

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



**T E S I S**

**Evaluación de la moliendabilidad de los minerales polimetálicos para  
determinar el grado de liberación en la empresa Pan American Silver  
Huaron, Pasco - 2024**

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

**Autores:**

**Bach. Sergio Yak DURAND PUENTE**

**Bach. Luz Emily GAGO SOTO**

**Asesor:**

**Dr. Eusebio ROQUE HUAMAN**

**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 de la moliendabilidad de los minerales polimetálicos para  
determinar el grado de liberación en la empresa Pan American Silver  
Huaron, Pasco - 2024**

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

---

**Dr. Rubén Edgar PALOMINO ISIDRO**  
**PRESIDENTE**

---

**Dr. Ramiro SIUCE BONIFACIO**  
**MIEMBRO**

---

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



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

**INFORME DE ORIGINALIDAD N° 003-2026-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 de la moliendabilidad de los minerales polimetálicos para  
determinar el grado de liberación en la empresa Pan American Silver  
Huaron, Pasco-2024**

Apellidos y nombres de los tesistas

**Bach. Sergio Yak, DURAND PUENTE**

**Bach. Luz Emily, GAGO SOTO**

Apellidos y nombres del Asesor:

Dr. Eusebio ROQUE HUAMAN

Escuela de Formación Profesional

**Ingeniería Metalúrgica**

Índice de Similitud

**8 %**

**APROBADO**

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

Cerro de Pasco, 30 de marzo del 2026



Firmado digitalmente por PALOMINO  
ISIDRO Ruben Edgar FAU  
20154605046 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 30.03.2026 16:52:46 -05:00

## **DEDICATORIA**

### **A NUESTROS PADRES**

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento por todo el amor y apoyo que nos han brindado a lo largo de nuestras vidas. Su esfuerzo inagotable ha sido la base sólida que nos ha permitido construir nuestras metas y alcanzar este logro. Cada sacrificio que han hecho y cada lección que nos han enseñado han sido esenciales en nuestro camino. Ustedes han sido nuestra mayor fuente de inspiración, y sin su dedicación y constante aliento, nada de esto habría sido posible. Les estaremos eternamente agradecidos.

### **A NUESTROS MAESTROS**

Deseamos expresar nuestro más profundo agradecimiento a todos aquellos que, con su amplio conocimiento y paciencia incansable, nos han acompañado en este viaje de aprendizaje y crecimiento. Su dedicación a la enseñanza y su habilidad para despertar la curiosidad en sus estudiantes han dejado una marca imborrable en nosotros. No solo nos han transmitido su sabiduría, sino que también han fomentado en nosotros la confianza necesaria para afrontar nuevos retos.

## **AGRADECIMIENTO**

En la realización de este trabajo de investigación, deseamos expresar nuestra más sincera gratitud a nuestras familias, cuyo apoyo incondicional ha sido un pilar fundamental en cada etapa de este proceso. Su aliento 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 nuestra formación profesional. Sus enseñanzas y orientación nos han proporcionado las herramientas necesarias para enfrentar los retos académicos y nos han inspirado a buscar la excelencia.

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

## RESUMEN

El estudio titulado Evaluación de la moliendabilidad de los minerales polimetálicos para determinar el grado de liberación en la empresa Pan American Silver Huaron, Pasco – 2024 tuvo como objetivo principal analizar el comportamiento de los minerales Común, Campaña y Travieso durante la molienda, con el fin de optimizar la eficiencia de los procesos metalúrgicos. La investigación es de tipo aplicado, con enfoque cuantitativo y diseño experimental, desarrollada mediante ensayos controlados de conminución y análisis de liberación mineral. La población estuvo conformada por todos los minerales procesados en la planta concentradora durante el periodo de estudio, y la muestra se obtuvo mediante muestreo mecánico continuo, con una masa mínima de 50 kg por tipo de mineral, determinada según la Teoría de Gy, garantizando representatividad. Los procedimientos incluyeron ensayos de moliendabilidad, determinación del Índice de Trabajo ( $W_i$ ), análisis granulométrico y caracterización química y mineralógica. Se emplearon instrumentos de laboratorio como molinos de laboratorio, mesas de rodillos, balanzas analíticas, Peachímetros y potenciómetros, complementados con software estadístico para el análisis de datos. Los resultados mostraron diferencias significativas en la dureza y moliendabilidad de los minerales: Campaña presentó el mayor  $W_i$  (14,66 kWh/TM), mientras que Travieso mostró menor resistencia y tiempos de molienda más cortos. Asimismo, se evidenció que la eficiencia energética y la reducción del tamaño de partículas dependen directamente de la naturaleza del mineral, lo que permite establecer criterios de operación y planificación para optimizar el proceso de molienda en planta.

**Palabras clave:** moliendabilidad, minerales polimetálicos, liberación mineral, índice de trabajo, eficiencia energética.

## ABSTRACT

The main objective of this study, entitled “Evaluation of the grindability of polymetallic minerals to determine the degree of liberation at the Pan American Silver Huaron company, Pasco – 2024,” was to analyze the behavior of Common, Campaña, and Travieso minerals during grinding in order to optimize the efficiency of metallurgical processes. The research is applied in nature, with a quantitative approach and experimental design, developed through controlled comminution tests and mineral liberation analysis. The population consisted of all minerals processed at the concentrator plant during the study period, and the sample was obtained through continuous mechanical sampling, with a minimum mass of 50 kg per mineral type, determined according to Gy's Theory, ensuring representativeness. The procedures included grindability tests, determination of the Work Index (Wi), granulometric analysis, and chemical and mineralogical characterization. Laboratory instruments such as laboratory mills, roller tables, analytical balances, Peachimeters, and potentiometers were used, complemented by statistical software for data analysis. The results showed significant differences in the hardness and grindability of the minerals: Campaña had the highest Wi (14.66 kWh/MT), while Travieso showed lower resistance and shorter grinding times. Likewise, it was evident that energy efficiency and particle size reduction depend directly on the nature of the mineral, which allows for the establishment of operating and planning criteria to optimize the grinding process in the plant.

**Keywords:** grindability, polymetallic minerals, mineral liberation, work index, energy efficiency.

## INTRODUCCIÓN

La Minera Huaron, operada por Pan American Silver y ubicada en la sierra central de la región Pasco, se dedica al procesamiento de minerales polimetálicos con contenidos de plomo, plata y zinc. La mineralogía de la zona es diversa, destacando la presencia de galena argentífera y esfalerita como principales minerales de interés económico, mientras que la ganga está compuesta mayoritariamente por silicatos y sulfosales de cobre, plomo y plata. La eficiencia en la conminución y liberación de estos minerales es crucial, ya que influye directamente en la recuperación metalúrgica y en la calidad de los concentrados. Una molienda insuficiente provoca baja liberación de los minerales valiosos, mientras que una sobremolienda genera costos energéticos elevados y pérdidas de material.

El problema central que motiva esta investigación radica en la necesidad de optimizar los procesos de molienda en la planta concentradora, ajustando los parámetros operativos según las características de cada tipo de mineral, con el fin de maximizar la liberación de plomo, plata y zinc y mejorar la eficiencia energética del proceso.

El presente estudio, titulado “Evaluación de la moliendabilidad de los minerales polimetálicos para determinar el grado de liberación en la empresa Pan American Silver Huaron, Pasco – 2024”, tiene como objetivo principal analizar el comportamiento de los minerales Común, Campaña y Travieso durante la molienda, determinando el tiempo óptimo de conminución y evaluando el índice de trabajo (Wi) de cada mineral. La investigación es de tipo aplicada, cuantitativa, con diseño experimental y enfoque descriptivo, desarrollándose mediante ensayos controlados de moliendabilidad, análisis granulométrico y caracterización química y mineralógica.

El estudio se circunscribe a los minerales mencionados, procesados en la planta durante el año 2024, y busca aportar información técnica que sirva para la optimización de los

parámetros de molienda, contribuyendo a la mejora de la eficiencia operativa, la productividad y la toma de decisiones estratégicas en la empresa Pan American Silver Huarón.

## INDICE

### Página

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

INDICE

INDICE DE TABLAS

### CAPITULO I

#### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema .....	1
1.2. Delimitación de la investigación .....	3
1.2.1. Delimitación espacial .....	3
1.2.2. Delimitación temporal .....	3
1.2.3. Delimitación temática.....	3
1.2.4. Delimitación operativa .....	3
1.2.5. Delimitación metodológica.....	4
1.2.6. Delimitación social .....	4
1.3. Formulación del problema.....	4
1.3.1. Problema general .....	4
1.3.2. Problemas específicos.....	4
1.4. Formulación de objetivos .....	5
1.4.1. Objetivo general .....	5
1.4.2. Objetivos específicos .....	5

1.5. Justificación de la investigación .....	5
1.6. Limitaciones de la investigación .....	7

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio .....	9
2.1.1. Antecedentes Internacionales .....	9
2.1.2. Antecedentes Nacionales .....	12
2.1.3. Antecedentes Regionales .....	14
2.2. Bases teóricas – científicas .....	16
2.2.1. Teoría de conminución .....	16
2.2.2. Moliendabilidad de minerales .....	18
2.2.3. Liberación mineralógica .....	23
2.2.4. Distribución del tamaño de partícula.....	24
2.2.5. Tipos de molienda de minerales .....	24
2.2.6. Innovaciones en la Molienda Minera .....	25
2.2.7. Tipo de circuito de molienda .....	25
2.2.8. Impactos del grado de liberación en la recuperación metalográfica.....	27
2.2.9. Work Index .....	28
2.3. Definición de términos básicos .....	29
2.4. Formulación de hipótesis.....	30
2.4.1. Hipótesis general .....	30
2.4.2. Hipótesis específicas.....	30
2.5. Identificación de variables.....	30
2.5.1. Variables independientes .....	30
2.5.2. Variables dependientes .....	30

2.6. Definición operacional de variables e indicadores .....	31
--	----

### CAPITULO III

#### METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación .....	32
3.2. Nivel de investigación .....	32
3.3. Métodos de investigación .....	33
3.4. Diseño de investigación.....	33
3.5. Población y muestra .....	34
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	35
3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.....	37
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	38
3.9. Tratamiento estadístico.....	38
3.10. Orientación ética filosófica y epistémica .....	39

### CAPITULO IV

#### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo .....	40
4.1.1. Preparativos y desarrollo de las pruebas de moliendabilidad.....	40
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	42
4.2.1. Identificación de la composición mineralógica.....	42
4.2.2. Análisis granulométrico de malla valorada .....	43
4.2.3. Determinación de la dureza del mineral (work index) .....	46
4.2.4. Ensayo de Moliendabilidad .....	48
4.2.5. Flotación batch a 65% - 200 mallas.....	53
4.2.6. Estudios de microscopia óptica .....	64
4.3. Prueba de hipótesis .....	69

4.4. Discusión de resultados .....	71
------------------------------------	----

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

## INDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
<b>Tabla 1</b> Operacionalización de Variable Independiente .....	31
<b>Tabla 2</b> Ensaye químico de mineral Común .....	42
<b>Tabla 3</b> Ensaye químico de mineral Campaña.....	42
<b>Tabla 4</b> Ensaye químico de mineral Travieso .....	43
<b>Tabla 5</b> Análisis granulométrico de malla valorada para el mineral común.....	44
<b>Tabla 6</b> Análisis granulométrico de malla valorada para mineral campaña. ....	45
<b>Tabla 7</b> Análisis granulométrico de malla valorada para el mineral travieso. ....	45
<b>Tabla 8</b> Clasificación de dureza del mineral .....	48
<b>Tabla 9</b> Índice de trabajo (Work Index) comparativo.....	48
<b>Tabla 10</b> Tiempo de molienda para mineral común. ....	49
<b>Tabla 11</b> Tiempo de molienda para mineral campaña. ....	50
<b>Tabla 12</b> Tiempo de molienda para mineral travieso.....	52
<b>Tabla 13</b> Condiciones de flotación del mineral común.....	56
<b>Tabla 14</b> Balance metalúrgico de Plomo, cobre y zinc de mineral común.....	56
<b>Tabla 15</b> Balance metalúrgico de Plomo, cobre y zinc de mineral común.....	57
<b>Tabla 16</b> Balance metalúrgico de Plomo, cobre y zinc de mineral común.....	57
<b>Tabla 17</b> Condiciones de flotación mineral de campaña .....	59
<b>Tabla 18</b> Balance metalúrgico de Plomo, cobre y zinc de mineral campaña.....	60
<b>Tabla 19</b> Balance metalúrgico de Plomo, cobre y zinc de mineral campaña.....	61
<b>Tabla 20</b> Balance metalúrgico de Plomo, cobre y zinc de mineral común.....	61
<b>Tabla 21</b> Condiciones de flotación del mineral de travieso .....	62
<b>Tabla 22</b> Balance metalúrgico batch de Mineral Travieso .....	63
<b>Tabla 23</b> Balance metalúrgico batch de Mineral Travieso .....	63

<b>Tabla 24</b> Balance metalúrgico batch de Mineral Travieso. ....	64
<b>Tabla 25</b> Correlación.....	70

## INDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1:</b> Ecuación - fórmula de índice de trabajo de bond.....	19
<b>Figura 2:</b> Zonas del interior de un molino .....	23
<b>Figura 3:</b> Grado de liberación de minerales en molienda (malla-200).....	34
<b>Figura 4:</b> Tiempo de molienda para mineral común.....	50
<b>Figura 5:</b> Tiempo de molienda para mineral común.....	51
<b>Figura 6:</b> Tiempo de molienda para mineral común.....	53
<b>Figura 7</b> Concentrado de cobre malla + 200 bicromato.....	65
<b>Figura 8</b> Concentrado COBRE malla + 200 (Metabisulfito).....	66
<b>Figura 9</b> Concentrado PLOMO malla + 200 (Bicromato).....	67
<b>Figura 10</b> Concentrado PLOMO malla + 200 (Metabisulfito) .....	67
<b>Figura 11</b> Concentrado ZINC malla + 200 (Metabisulfito).....	68
<b>Figura 12</b> Concentrado ZINC malla + 200 (Metabisulfito).....	69
<b>Figura 13</b> Prueba de hipótesis.....	70

## **CAPITULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

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

La liberación de los minerales polimetálicos es un proceso complejo, ya que cada veta mineralizada presenta distintas características de dureza y composición. Estas diferencias hacen necesario profundizar en su estudio para comprender mejor su comportamiento en la molienda. Además, cada equipo utilizado en este proceso posee factores y parámetros de operación propios, lo que requiere la realización de pruebas metalúrgicas específicas. En este marco, la investigación busca identificar los parámetros de molienda más adecuados que permitan optimizar la liberación de los minerales y mejorar la eficiencia del proceso.

La molienda de los minerales polimetálicos resulta un proceso complejo debido a su propia naturaleza, ya que depende de múltiples parámetros y variables. Cada mineral requiere un tratamiento particular durante la conminución, lo que implica que el proceso de molienda debe adaptarse de manera específica a sus características, independientemente de la operación general que se realice. (Rosales Marín et al., 2020)

El consumo de energía en la molienda está directamente vinculado a la interacción de los diferentes componentes presentes en el mineral. Por ello, resulta necesario realizar una evaluación integral que considere las variaciones de los parámetros de molienda que influyen en la liberación de los minerales. (Coello Velásquez & Tijonov, 2021)

La empresa Pan American Silver Huaron, ubicada en la región Pasco, se dedica a la explotación y procesamiento de minerales polimetálicos como zinc, plomo, cobre y plata. Un aspecto clave para el éxito de sus operaciones es la moliendabilidad de los minerales, ya que de este factor depende el grado de liberación de los minerales durante el proceso de molienda.

Sin embargo, la empresa enfrenta dificultades debido a la variabilidad en la moliendabilidad de los minerales que se extraen, lo que repercute en la eficiencia del proceso de conminución y, en consecuencia, en la recuperación de metales de interés económico.

El diagnóstico inicial muestra que la falta de un conocimiento más profundo sobre las propiedades de moliendabilidad de los minerales en Huaron está generando:

- variaciones en los tiempos y costos de molienda,
- ineficiencias en la liberación de los minerales valiosos, y
- una disminución en la recuperación metalúrgica.

Ante esta situación, se hace necesario llevar a cabo una evaluación sistemática de la moliendabilidad de los minerales polimetálicos extraídos. Con ello se busca optimizar el proceso de molienda, mejorar la eficiencia operativa de la planta y, al mismo tiempo, aportar información valiosa para la investigación y la práctica profesional en el campo de la metalurgia.

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

### **1.2.1. Delimitación espacial**

La investigación se desarrolló en la Unidad Minera Pan American Silver Huaron, ubicada en el distrito de Huayllay, provincia y departamento de Pasco. El estudio se centró en la planta concentradora, donde se procesan minerales polimetálicos con contenidos de plomo, zinc, cobre y plata. Este espacio fue elegido porque refleja las condiciones reales de operación, lo que permite que los resultados obtenidos sean aplicables directamente a su proceso productivo.

### **1.2.2. Delimitación temporal**

El trabajo se llevó a cabo durante el año 2024, abarcando el periodo en el que se realizaron las pruebas de molienda y flotación. Este marco temporal permitió recopilar información actualizada y representativa de las operaciones de la planta, asegurando que los resultados respondan a las condiciones vigentes en el proceso.

### **1.2.3. Delimitación temática**

El estudio se centró en la evaluación de la moliendabilidad de los minerales polimetálicos, con el propósito de determinar el grado de liberación de los metales de interés económico (plomo, zinc, cobre y plata). Se abordaron aspectos relacionados con los parámetros de molienda, el consumo de energía y la influencia en la recuperación metalúrgica, dejando fuera otros procesos como la fundición o refinación.

### **1.2.4. Delimitación operativa**

La investigación se realizó tanto en condiciones de planta como en laboratorio, a través de pruebas de molienda y flotación. Estas pruebas estuvieron orientadas a identificar los parámetros óptimos de operación que garanticen una liberación eficiente de los minerales valiosos y, con ello, una mejora en la recuperación metalúrgica. La

aplicación práctica de este enfoque busca contribuir a la optimización de la producción de la planta concentradora.

#### **1.2.5. Delimitación metodológica**

El estudio adoptó un diseño cuasiexperimental, propio de investigaciones aplicadas en el ámbito de la ingeniería metalúrgica. Se emplearon técnicas de conminución, análisis granulométrico y pruebas de flotación, priorizando la obtención de resultados confiables que puedan servir de referencia para futuros trabajos en la empresa o en investigaciones académicas relacionadas.

#### **1.2.6. Delimitación social**

Además de su impacto técnico, la investigación pretende aportar al desarrollo académico y profesional de los tesisistas, fortaleciendo competencias en el área de procesamiento de minerales. Asimismo, los resultados tienen relevancia para la empresa, ya que contribuyen con información práctica que puede ayudar a optimizar sus operaciones y, de manera indirecta, beneficiar a la comunidad minera de Pasco al fomentar prácticas más eficientes y sostenibles.

### **1.3. Formulación del problema**

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

¿De qué manera la moliendabilidad de los minerales polimetálicos influye en el grado de liberación de las especies minerales en la Empresa Pan American Silver Huaron, Pasco – 2024?

#### **1.3.2. Problemas específicos**

- a. ¿Cuál es la composición mineralógica y granulométrica del mineral polimetálico que ingresa al circuito de molienda en la unidad Huaron?
- b. ¿Cuál es el índice de trabajo (Work Index) de los distintos tipos de minerales polimetálicos en la empresa Pan American Silver Huaron?

- c. ¿Cuál es la moliendabilidad de los diferentes minerales polimetálicos, para la liberación del mineral valioso?
- d. ¿Cuál es la recuperación metálica de los diferentes minerales a 65% -200 mallas de grado de liberación?

#### **1.4. Formulación de objetivos**

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

Evaluar la moliendabilidad de los minerales polimetálicos para determinar el grado de liberación de las especies minerales en la Empresa Pan American Silver Huaron, Pasco – 2024.

##### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a. Determinar la composición mineralógica y granulométrica de los diferentes minerales polimetálico que influyen en el grado de liberación de elementos metálicos.
- b. Determinar el work index de los minerales polimetálicos para determinar la dureza del mineral.
- c. Determinar el tiempo de molienda de los diferentes tipos de minerales polimetálicos para determinar el grado de liberación.
- d. Realizar pruebas de flotación a 65% -200 mallas de grado de liberación para determinar la recuperación metálica.

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

La presente investigación se realiza debido a que en la empresa Pan American Silver Huaron se presentan dificultades asociadas a la variabilidad en la moliendabilidad de los minerales polimetálicos. Esta condición limita la eficiencia del proceso de molienda, lo que repercute en una liberación incompleta de los minerales valiosos y, en consecuencia, en una menor recuperación metalúrgica.

El estudio es necesario porque permitirá identificar y evaluar los parámetros óptimos de moliendabilidad, con el fin de establecer condiciones de operación que mejoren la liberación de los minerales de interés (plomo, zinc, cobre y plata).

Los beneficios para la empresa se reflejan en varios niveles:

- **Técnico:** La investigación permitió optimizar el proceso de molienda mediante un mejor control granulométrico y la determinación de parámetros de operación adecuados. Esto se tradujo en un mayor grado de liberación de los minerales valiosos, lo que mejora la eficiencia metalúrgica y fortalece el desempeño de la planta concentradora.
- **Económico:** Al lograrse una molienda más eficiente y un mayor grado de liberación, se incrementó la recuperación metalúrgica de plomo, zinc, cobre y plata. A su vez, la optimización de la conminución redujo el consumo energético y los costos operativos, lo cual contribuye a mejorar la rentabilidad de la empresa y la sostenibilidad de sus operaciones.
- **Operativo:** El estudio generó información confiable y validada que sirve de base para la toma de decisiones en la planta concentradora. De esta forma, se facilita el ajuste oportuno de los parámetros de molienda según las características específicas de cada tipo de mineral procesado, mejorando la estabilidad y previsibilidad de la operación.
- **Ambiental:** Una molienda más controlada disminuye la pérdida de minerales valiosos en los relaves y reduce el volumen de residuos generados. Esto se traduce en un aprovechamiento más responsable de los recursos minerales y en una operación más eficiente y sostenible, alineada con las políticas ambientales y de responsabilidad social de la empresa.

En síntesis, la investigación se justifica porque responde a una necesidad real de la empresa y busca aportar soluciones prácticas que contribuyan a mejorar la productividad, la rentabilidad y la sostenibilidad de las operaciones de Pan American Silver Huaron.

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

- **Territorial**

La investigación se desarrolló en las instalaciones del laboratorio de la empresa Pan American Silver Huaron, ubicada en el distrito de Huayllay, provincia y departamento de Pasco. Este espacio proporcionó las condiciones técnicas necesarias para llevar a cabo las pruebas de molienda y análisis correspondientes.

- **Temporal**

El estudio se ejecutó durante el periodo comprendido entre el 11 de diciembre de 2023 y el 15 de junio de 2024, tiempo en el cual se realizaron las pruebas metalúrgicas, el análisis de resultados y la redacción del informe final.

- **Conceptual**

La investigación se delimitó conceptualmente al análisis de la moliendabilidad de minerales polimetálicos, lo que implicó evaluar factores como el tiempo de molienda, la granulometría obtenida y la determinación de los minerales presentes. Estos aspectos permitieron establecer parámetros que orientaron la correcta liberación de los componentes valiosos y el tamaño de las partículas, aportando información relevante para el proceso de conminución.

- **Recursos**

El trabajo de investigación fue autofinanciado, contando con el apoyo de servicios de laboratorio y los materiales básicos necesarios para el desarrollo de la investigación, tales como hojas bond, lapiceros, laptop, memoria USB, acceso a

internet y energía eléctrica. Estos recursos fueron esenciales para garantizar tanto la ejecución experimental como el análisis documental.

- **Evaluación de la moliendabilidad**

Se llevaron a cabo pruebas estandarizadas de moliendabilidad, principalmente el Índice de Trabajo de Bond, complementadas con otras pruebas que permitieron caracterizar las propiedades de los minerales polimetálicos extraídos en la mina Huaron.

- **Determinación del grado de liberación**

Finalmente, se realizaron análisis mineralógicos detallados para determinar el grado de liberación de los minerales valiosos tras la molienda. Para ello, se aplicaron técnicas como la microscopía óptica y el análisis de imágenes, lo que permitió obtener información precisa sobre la eficiencia del proceso de conminución.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de estudio

##### 2.1.1. Antecedentes Internacionales

Riera & Valdivieso (2022). En la tesis **Determinación del Índice de Moliendabilidad en materiales metálicos y no metálicos mediante la implementación de un molino de Bond** indicaron que El molino de Bond implementado en el Laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay permitió realizar de manera exitosa los ensayos de molturabilidad, quedando disponible para fines académicos y de investigación. Los resultados mostraron que el índice de molturabilidad (Gbp) es inversamente proporcional a la resistencia del material, con valores de 4,08 g/rev para el caolín, 1,22 g/rev para la andesita y 1,01 g/rev para la roca mineralizada. Estos resultados fueron consistentes con estudios previos en otros minerales, lo que respalda la validez de los ensayos. En cuanto al índice de trabajo en función del diámetro del molino (WiD), se obtuvo 4,41 kWh/t para caolín (D=3,22 m), 15,77 kWh/t para andesita y 20.08 kWh/t para roca mineralizada (D=0.8

m). En condiciones operativas específicas ( $W_i$ ), los valores fueron de 6,10, 16,56 y 21,13 kWh/t, respectivamente, con energías específicas de fractura de 7,50, 20,21 y 22,84 kWh/t. La potencia mecánica calculada varió según el material y la producción: para el caolín, 59,97 kW (80,42 HP) a 8 t/h y 22,49 kW (30,16 HP) a 3 t/h; para la andesita, 60,64 kW (81,32 HP) a 3 t/h; y para la roca mineralizada, 68,53 kW (91,90 HP) a 3 t/h. Considerando una eficiencia global del 95 %, la potencia fue de 84,65 HP en caolín (8 t/h), 31,74 HP en caolín (3 t/h), 81,32 HP en andesita y 96,74 HP en roca mineralizada. Estos resultados confirman que materiales más resistentes requieren mayor potencia, independientemente de la capacidad de producción. Finalmente, se determinó que los diámetros óptimos de los molinos difieren de los equipos instalados en planta. En caolín, el diámetro óptimo es de 1,63 m frente al molino existente de 3,22 m, lo que evidencia un sobredimensionamiento. En cambio, para la roca mineralizada y la andesita los diámetros óptimos son de 1,69 m y 1,63 m, respectivamente, lo que muestra que un molino de 0,8 m sería insuficiente para su procesamiento.

Coello & Velásquez (2021). En el artículo **Molienda de minerales multicomponentes: modelo íntegro-diferencial para la valoración de la energía** nos indican que los modelos tradicionales que explican matemáticamente la relación entre la energía utilizada y la reducción de tamaño presentan limitaciones cuando se trata de analizar a profundidad minerales con múltiples componentes. Para superar estas dificultades, se realizaron ajustes al modelo planteado por Tijonov, los cuales, junto con un exhaustivo trabajo experimental, permitieron desarrollar una propuesta más sólida. Este nuevo modelo facilita la evaluación del consumo energético en la molienda de minerales multicomponentes y constituye un punto de partida para investigaciones futuras, orientadas a construir una teoría capaz de describir y predecir los complejos procesos que ocurren durante la molienda de este tipo de minerales.

Morocho et al. (2021) en su tesis **Caracterización mineralógica y análisis del grado de liberación de los minerales de cobre-molibdeno de la Mina Mirador**. El yacimiento Mirador corresponde a un sistema magmato-mesothermal formado por diferentes fases de intrusiones filonianas e hipoabisales. La roca encajonante es la cuarzomonzonita del complejo intrusivo de Zamora (Jzgd), afectada por diques de pórfido temprano (Jefp), vinculados al primer evento mineralizante, y por una brecha hidrotermal mineralizada con clastos de litologías previas, asociada a un segundo pulso de mineralización. El análisis mineralógico (macroscópico, microscópico, DRX y químico) indicó que la calcopirita es la mena principal de cobre en la zona primaria, mientras que en la zona enriquecida predomina la calcosina. También se detectaron minerales secundarios de valor económico como oro y plata, y de manera excepcional la presencia de clinoclasa, un arsenato de cobre poco común en estos depósitos. Los resultados químicos mostraron que la granodiorita Zamora y la brecha asociada a ella presentan las mayores leyes de cobre ( $\approx 0,9\%$ ), con una mineralización más estable. En cambio, las rocas de pórfido temprano tienden a reducir el contenido de cobre por su mineralización irregular. En los ensayos de molienda se obtuvo que, para alcanzar un 60 % bajo malla #200 ( $<75\ \mu\text{m}$ ), los tiempos óptimos variaron entre 2 y 6 minutos según la litología. Posteriormente, las pruebas de flotación mostraron concentrados con leyes de cobre entre 23,9 % y 27,8 % y recuperaciones superiores al 84 %. En general, la granodiorita Zamora y la brecha hidrotermal asociada demostraron un mejor comportamiento metalúrgico, con mineralización más homogénea y mayores recuperaciones de cobre.

Marín et al. (2020) en su artículo **Investigación experimental en el consumo de energía específica y reducción de tamaño en la molienda de bolas usando diferentes tipos de levantador** aplicaron una metodología experimental para evaluar

los efectos del diseño de levantadores en molinos de bolas, manteniendo constantes las condiciones de operación y la granulometría de la alimentación. Bajo este enfoque, se analizaron distintos tipos de levantadores con variaciones en ángulo y altura, identificando su influencia en la generación de finos. Los resultados mostraron que el uso de levantadores intensifica la molienda al favorecer los mecanismos de impacto y abrasión. En particular, se evidenció que tanto el ángulo como la altura del levantador determinan el perfil de carga y, por ende, la eficiencia del proceso. El Levantador IV ( $\alpha = 22,5^\circ$ ,  $h = 12$  mm) registró la mayor producción de finos (32 %) con un consumo de 9,69 kWh/ton, seguido por el Levantador III ( $\alpha = 15^\circ$ ,  $h = 16$  mm) con 21,5 % de finos. En conclusión, el diseño de los levantadores influye de manera significativa en la eficiencia de molienda, por lo que se recomienda considerar las variaciones de ángulo y altura en futuros diseños, así como explorar diferentes condiciones operativas para comprender mejor su efecto en el proceso.

### **2.1.2. Antecedentes Nacionales**

Cuadros (2020). En la tesis “**Evaluación de la moliendabilidad para el tratamiento de minerales sulfurados de cobre**” evaluaron la molienda en el circuito de bolas se utilizó el análisis granulométrico de los hidrociclones, alcanzándose más del 80 % de sólidos en los nidos, lo que evidenció una adecuada eficiencia de clasificación. Además, se implementó un sistema de gestión de datos mediante software especializado para optimizar el control de las operaciones metalúrgicas. La caracterización mineralógica mostró la presencia de calcopirita asociada a molibdenita, acompañada de pirita y silicatos, minerales que resultan relativamente favorables para la separación de sulfuros de cobre y molibdeno. En el nido 2 del hidrociclón, el corte  $d_{50}$  se determinó en 205  $\mu\text{m}$ . Asimismo, se destacó que un muestreo adecuado en el molino de bolas permite un mejor control de las variables de operación y que el índice

de trabajo (Work Index) obtenido en laboratorio debe ser comparable con el de planta. El análisis de relaves indicó que las principales pérdidas de cobre provienen de calcosita, bornita y calcopirita con tamaños de 50  $\mu\text{m}$ , encontrándose un 49 % de partículas liberadas y un 51 % asociadas a silicatos, granates y piroxenos. Finalmente, el muestreo horario contribuye a regular los parámetros operativos y a reducir la pérdida de bolas de molienda, que en condiciones óptimas debe mantenerse entre 0 y 5 BPM.

Surco (2022). En su tesis **Evaluación del tamaño de partícula óptimo en molienda para la concentración por flotación en minera Coripuno**, menciona que para alcanzar un 90% -200 mallas en la etapa de remolienda, se determinó que implementar un molino 8x10 es necesario; sin embargo, un análisis económico muestra que una chancadora terciaria es más rentable, ya que alimenta material más fino a los molinos. Alimentar los molinos primarios 8x10 N°1 y N°2 con mineral de 100% -10 mm a 100% -8 mm, y usando una Chancadora Terciaria HP-300 METSO, permite obtener un producto final de 90% -200 mallas, ideal para la flotación. Llegando a la conclusión que el consumo de bolas se reduce de 0,68 g/Tn a 0,62 g/Tn debido a una carga más liberada desde el área de chancado, disminuyendo también el consumo de energía en los molinos. Las pruebas de flotación indican que el tiempo de molienda más adecuado es de 32 minutos y 12 segundos para alcanzar un 80% -200 mallas, con una recuperación de 48,72% de Au. Las pruebas de laboratorio muestran que el grado de molienda óptimo para la alimentación a la flotación es de 90% y 80% -200 mallas, ya que presentan las mayores recuperaciones. Esto conllevará a las mejores pruebas de flotación, realizadas a 90% -200 mallas, lograron recuperaciones de Au de 75,8% y 77,6%. La recuperación gravimétrica fue del 36,50% de Au a 50% -200 mallas, logrando una recuperación global de 78,20% de Au.

Espinoza (2021). En su tesis **Efecto del cianuro de sodio en el tratamiento de minerales polimetálicos para la concentración por flotación de menas de plomo y**

**zinc** observó que, en el concentrado de plomo, la presencia de plata disminuye conforme aumenta la dosificación de NaCN, mientras que la ley del plomo tiende a incrementarse, aunque sin una influencia estadísticamente significativa. En cambio, en el concentrado de zinc, la ley de este metal sí se incrementa con la mayor adición de NaCN, mostrando un efecto estadísticamente relevante. Respecto a las recuperaciones, tanto el plomo como el zinc mejoran conforme aumenta la dosificación de cianuro de sodio, mientras que la recuperación de plata presenta una disminución. No obstante, desde el punto de vista estadístico, este comportamiento no afecta significativamente la recuperación de plomo y zinc, pero sí resulta determinante en la recuperación de plata. Finalmente, se determinó que, a medida que se incrementa el grado de liberación de los minerales, la asociación entre ellos tiende a disminuir. Esto se evidenció en la reducción del valor del estadístico t-student y en la aproximación del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) hacia cero.

### **2.1.3. Antecedentes Regionales**

Lucas & Simón (2024). En la tesis de titulada **“Tratamiento de los minerales polimetálicos para el incremento de la recuperación del concentrado de plomo en la Unidad Minera El Porvenir Milpo – Pasco – 2023”** en condiciones normales de flotación bulk se alcanzó una recuperación de 83,55 % de plomo y 62,92 % de plata. Los ensayos demostraron que la recuperación de plomo en el concentrado depende en gran medida de la granulometría: al incrementar el grado de molienda se logran mejores resultados. De hecho, al optimizar las variables más influyentes —como el grado de molienda, ajustado al 55 % bajo malla 200, y manteniendo la dosificación del colector AP-3418 en 19,4 g/t— se logró elevar la recuperación de plomo de 83,55 % a 85,53 % en pruebas de laboratorio. Asimismo, la calidad del concentrado bulk resultó satisfactoria, con un grado de liberación de 48,71 %. Bajo estas condiciones se

obtuvieron recuperaciones de 85,53 % para plomo y 74,33 % para plata, lo que confirma la eficiencia del proceso optimizado.

Carhuaz & Cervantes (2023). En la tesis **Optimización del Hidrociclón en el circuito de molienda para la recuperación de Pb-Ag en la planta concentradora Paragsha - Empresa Administradora Cerro S.A.C. - Pasco – 2023** muestran que el rediseño del hidrociclón permitió incrementar las recuperaciones, alcanzando 34,88 % para plomo y 24,86 % para plata, lo que significó una mejora en la eficiencia del proceso de 1,45 % y 4,04 %, respectivamente. Se comprobó que la optimización del hidrociclón en el circuito de molienda de la planta concentradora Paragsha influye directamente en la recuperación de Pb-Ag, especialmente al operar sin cilindro central. El análisis estadístico confirmó la validez de este efecto, ya que el valor p fue mayor al nivel de significancia establecido ( $p = 0,083 > 0,05$  con 95 % de confianza). El estudio de la distribución de partículas demostró que un mayor tiempo de retención en el ciclón favorece el retorno de minerales pesados de plomo y plata, incluso estando liberados. Esto ocasiona sobre-molienda y pérdidas en fracciones muy finas (malla -400). Para mitigar este problema, se evaluó el desempeño de los hidrociclones primarios de 20” operando con y sin cilindro central, durante un periodo de dos meses, aprovechando las condiciones normales de planta. Finalmente, el análisis económico indicó que la valorización de los concentrados de Pb-Ag representa un beneficio anual aproximado de 889,586.28 dólares, sin necesidad de realizar inversiones significativas adicionales en la planta concentradora.

Esteban (2022). En su tesis **Aplicación de la función Rosin Rammler para el control del circuito de molienda - clasificación de la planta concentradora San Expedito Pasco**, reporta los resultados de las pruebas experimentales realizados directamente en planta concentradora San Expedito, con el apoyo de los operadores y

supervisores realizando un control estricto de las variables carga circulante y su relación con el  $D_{50}$  en función de la densidad de pulpa. El objetivo de la tesis consistió, en aplicar la función Rosin Rammler para el control del circuito molienda-clasificación de la planta concentradora San Expedito. Para ello, se determinó la carga circulante del circuito de molienda-clasificación que se obtuvo de los análisis granulométricos del alimento, rebose y arenas de retorno. Siendo la carga circulante de 1 568. El tamaño crítico  $D_{50}$  se determinó con el coeficiente de partición del rebose entre las arenas de retorno y se determinó que es 64,76 micrones Aplicando la ecuación de Rosin Rammler y reemplazando los valores del tamaño crítico  $D_{50}$  al alimento del clasificador se determinó el porcentaje de las arenas de retorno que es 60,10% (Ac +) y las arenas del rebose es 39,90 % (Ac +) y con estos pesos se determinó la carga circulante 1 5062 que es similar a la que se obtuvo por análisis granulométrico 1 568. En la planta concentradora en una operación normal, el control de la carga circulante se realiza mediante densidades de pulpa y llevándolo a diluciones para posteriormente determinar la carga circulante 1 565, como se ve es similar a lo determinado por análisis granulométrico, Rosin Rammler mediante la relación  $D_{50}$ , y densidades de pulpa. Con esto se confirma lo afirmado por el ingeniero José Manzaneda en su libro de procesamiento de minerales.

## **2.2. Bases teóricas – científicas**

### **2.2.1. Teoría de conminución**

La teoría de la conminución se centra en la energía necesaria para reducir una masa rocosa desde un tamaño inicial “D” hasta un tamaño menor “d”. Esta energía corresponde a la que el material es capaz de almacenar durante su deformación elástica hasta llegar al punto de fractura. Por ello, en los procesos de conminución es fundamental analizar la relación entre la energía consumida y el tamaño de los

fragmentos obtenidos. A diferencia de los métodos tradicionales, esta teoría plantea un enfoque inverso: parte de la granulometría requerida, estima la energía que se necesita para alcanzar esa fragmentación y, en función de ello, determina la cantidad de explosivo que debe proporcionar dicha energía. Asimismo, permite calcular parámetros técnicos clave, como el burden y el espaciamiento. (Noa Quispe, 2016)

La conminución se entiende como un proceso en el que la energía mecánica y cinética, generada por una máquina o cualquier otra fuente de energía, se transfiere directamente al material rocoso. Este contacto provoca fricciones internas y elevadas temperaturas dentro de la roca, lo que finalmente ocasiona su subfracturamiento.

#### **A. Ley de Conminución**

La ley de la conminución es un conjunto de teorías que buscan relacionar la energía consumida en un proceso de reducción de tamaño (trituración o molienda) con el tamaño final de las partículas obtenidas. En otras palabras, son modelos matemáticos que permiten estimar cuánta energía se necesita para fragmentar una roca desde un tamaño inicial ( $D$ ) hasta un tamaño final ( $d$ ). Existen varias formulaciones conocidas como leyes de la conminución, cada una con un enfoque distinto:

- **Ley de Kick (1885):** plantea que la energía requerida es proporcional a la reducción relativa de tamaño, es decir, depende de la razón entre el tamaño inicial y el final. Es más aplicable a fragmentaciones gruesas.
- **Ley de Rittinger (1867):** sostiene que la energía es proporcional a la nueva área superficial creada durante la molienda. Es más válida para fragmentaciones finas.

- **Ley de Bond (1952):** propone que la energía se relaciona con la reducción de tamaño en un rango intermedio, considerando un “índice de trabajo” propio de cada mineral.

### **2.2.2. Moliendabilidad de minerales**

Blanco (2020). Manifiesta que la molienda de minerales es una de las etapas más importantes en la minería, ya que permite reducir el tamaño de las rocas hasta obtener las partículas necesarias para liberar y recuperar los minerales de interés. Este proceso suele realizarse en grandes equipos giratorios o en molinos cilíndricos, donde el mineral se mezcla con agua y, en algunos casos, con reactivos químicos, preparando la pulpa para la siguiente fase: la flotación. En los últimos años, la industria minera ha incorporado notables avances tecnológicos en este campo. Entre las tendencias más destacadas se encuentran la molienda autógena y semiautógena (SAG), que aprovechan al propio mineral como medio de molienda en lugar de utilizar cuerpos molidores de acero, y la implementación de molinos verticales de rodillos, los cuales han demostrado mayor eficiencia frente a los molinos de bolas tradicionales, especialmente en minerales de alta dureza y abrasividad, como el hierro y el oro. Asimismo, la optimización de la molienda ha evolucionado gracias al uso de herramientas como el control predictivo avanzado (APC). Esta tecnología se basa en modelos matemáticos que permiten anticipar el comportamiento del proceso y ajustar, en tiempo real, las variables operativas, logrando así un mejor desempeño y eficiencia energética en la planta.

La molienda de minerales constituye la etapa final en la reducción de partículas sólidas hasta alcanzar un tamaño adecuado que permita la liberación de las especies útiles y facilite procesos posteriores como la flotación, la lixiviación o la concentración gravimétrica. Para este fin, la industria minera emplea diversos tipos de molinos, entre los que destacan los de barras, bolas, autógenos (AG) y semiautógena (SAG), siendo

los molinos de bolas y SAG los más utilizados. En ambos casos, el mineral se mezcla con cuerpos moledores, ya sean bolas de acero o fragmentos del mismo mineral, lo que produce la fractura y reducción progresiva de las partículas.

La molienda puede realizarse en circuito abierto o cerrado, siendo este último el más eficiente, pues permite un mayor control del tamaño de partícula y un mejor aprovechamiento de la energía. Cabe resaltar que este proceso es altamente demandante desde el punto de vista energético, ya que consume cerca del 70% de la energía total empleada en el beneficio de minerales. Por ello, lograr una molienda adecuada no solo es esencial para optimizar la recuperación de las especies valiosas, sino también para garantizar un desempeño eficiente en las etapas posteriores de concentración.

#### A. Índice de trabajo de Bond

Para Neikov (2019) el Índice de Trabajo de Bond se entiende como la energía específica, expresada en kilovatios-hora por tonelada, requerida para reducir un material a un tamaño determinado. Su cálculo se realiza mediante una ecuación empírica que considera factores como el tamaño de partícula, la facilidad de molienda y la superficie específica. Este indicador resulta fundamental en el diseño y optimización de los procesos de conminución.

**Figura 1:** Ecuación - fórmula de índice de trabajo de bond

The equation that Bond developed for this calculation was

$$W = \frac{\sqrt{100} \cdot W_i}{\sqrt{P}} - \frac{\sqrt{100} \cdot W_i}{\sqrt{F}}$$

where

- W = predicted mill energy consumption, in kWh/st
- W<sub>i</sub> = Work Index, in kWh/st
- 100 = 100 μm, which is the product size in the definition of Work Index
- P, F = 80% passing sizes, in μm of the feed (F) and product (P)

This equation is also commonly written as

$$W = 10 \cdot W_i \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)$$

Nota: Google.com

## **B. Factores que afecta la moliendabilidad**

Los factores que influyen en la moliendabilidad son diversos y abarcan tanto las características del material como las condiciones del proceso. Entre las propiedades del mineral destacan su dureza y humedad, mientras que, en lo referente al molino, influyen aspectos como el tipo de equipo, la velocidad de rotación y la carga de molienda. También son determinantes las condiciones de operación, por ejemplo, la velocidad y tamaño de la alimentación, así como la remoción adecuada del producto. A ello se suman otros elementos, como el medio de molienda utilizado (en cuanto a tamaño, forma y dureza), el tipo de circuito de molienda y la presencia o no de agua en la operación, diferenciando así entre molienda húmeda y molienda seca. (Sherif Eskandarany, 2015)

## **C. Clasificación de minerales según la moliendabilidad**

Procesos metalúrgicos (2021) los minerales se pueden clasificar según la moliendabilidad en categorías como fáciles de moler, moderados y difíciles de moler, basándose en la energía y el esfuerzo que requieren para ser reducidos a un tamaño determinado. Esta clasificación se determina a través de pruebas específicas que miden la resistencia a la trituración, el desgaste y la fragmentación del mineral, resultando en una guía esencial para optimizar los procesos metalúrgicos y concentradores.

### **Factores que influyen en la moliendabilidad**

**Dureza:** Los minerales más duros, como los diamantes, son más difíciles de moler que los más blandos.

**Tenacidad:** Minerales tenaces o dúctiles requieren más energía para romperse.

**Fractura:** El tipo de fractura (concooidal, irregular) influye en la molienda.

**Composición química:** Algunos minerales, como los silicatos o los sulfuros, son más difíciles de moler que otros.

**Humedad y presencia de arcillas:** La humedad y las impurezas pueden afectar la molienda.

### **Proceso para clasificar la moliendabilidad**

**Pruebas estandarizadas:** Se usan equipos como molinos de bolas o de barras para triturar muestras de mineral.

**Medición de energía:** Se calcula la energía necesaria para alcanzar un tamaño de partícula específico (por ejemplo, 75 o 100 micras).

**Cálculo del índice de trabajo (Work Index):** Se obtiene un valor que indica la energía requerida. Un índice de trabajo bajo significa que el mineral es más fácil de moler.

**Categorización:** Basándose en el índice de trabajo, se pueden clasificar los minerales:

- Fáciles de moler: Tienen un índice bajo.
- Moderados: Tienen un índice intermedio.
- Difíciles de moler: Tienen un índice alto.

### **Importancia de la clasificación**

La clasificación según la moliendabilidad permite:

#### **Optimizar el diseño y la operación de las plantas concentradoras:**

Permite seleccionar el equipo adecuado (molinos de bolas, de barras, autógenos, etc.) y determinar la energía necesaria.

#### **Mejorar la eficiencia del proceso metalúrgico:**

Una molienda adecuada es fundamental para liberar las partículas valiosas de la ganga y facilitar la separación posterior, como por flotación.

### **Reducir costos operativos:**

Al entender la moliendabilidad del mineral, se pueden optimizar los tiempos y la energía consumida, lo que se traduce en una operación más rentable.

#### **A. Determinación del tamaño de molienda**

Definir el tamaño de molienda adecuado es un aspecto clave en el beneficio de minerales, ya que de ello depende tanto la recuperación de especies valiosas como la reducción de costos operativos. No existe un tamaño estándar, pues este varía según las características del mineral y el tipo de proceso a emplear (flotación, lixiviación o concentración gravimétrica).

Entre los factores más importantes a considerar se encuentran la dureza, textura, densidad, composición química del mineral, granulometría de alimentación y producto final, así como las condiciones de operación del molino (velocidad de rotación, carga de bolas y dimensiones). Por ello, las pruebas metalúrgicas son indispensables para establecer el grado de molienda óptimo y garantizar una eficiente liberación mineralógica.

El tamaño de molienda también puede variar con el tiempo de operación y las condiciones del molino, lo que hace necesario un monitoreo constante de la granulometría y ajustes periódicos en los parámetros de operación. En cuanto a los métodos empleados, se destacan:

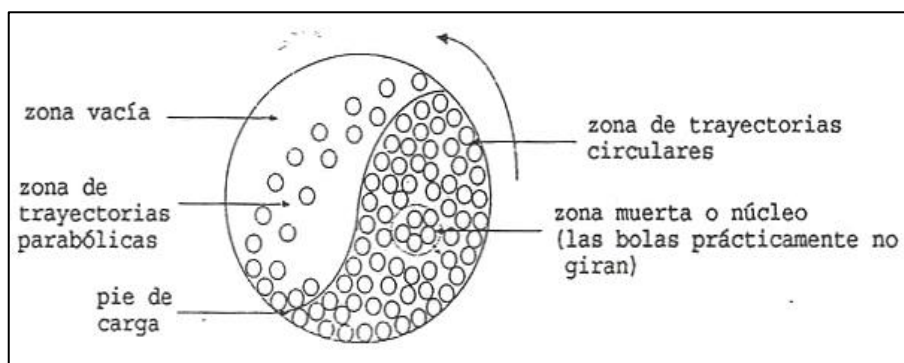
- **Pruebas de laboratorio:** que permiten estimar los beneficios de una molienda más fina o más gruesa.
- **Observación directa en plantas industriales:** ajustando parámetros y evaluando sus efectos en la recuperación.
- **Simulación numérica:** que utiliza software especializado para modelar el comportamiento del proceso.

- **Optimización de parámetros:** como la carga de bolas, la velocidad de giro y el tamaño del cuerpo moledor.
- **Tratamientos adicionales:** como el calentamiento o el uso de reactivos, para modificar las propiedades mecánicas del mineral.

La densidad de pulpa es otro factor crítico en el circuito de molienda, pues influye directamente en la eficiencia del proceso. Mantenerla dentro de los rangos establecidos evita la sobrecarga del molino y mejora la liberación de partículas. Para ello, se regula mediante la adición de agua y se controla con densímetros, los cuales permiten mediciones continuas y en tiempo real.

Entre los equipos más utilizados destacan los densímetros nucleares (cada vez menos usados por su impacto ambiental) y los densímetros electromagnéticos, preferidos por su confiabilidad y bajo mantenimiento. Estos dispositivos, al integrarse con sistemas de control automático, permiten regular bombas, válvulas y caudales de agua, optimizando la molienda y aumentando la recuperación metálica.

**Figura 2:** Zonas del interior de un molino



Nota. Google.com

### 2.2.3. Liberación mineralógica

La caracterización mineralógica es el proceso mediante el cual se estudian en detalle los minerales que componen una muestra, con el fin de conocer su naturaleza y propiedades. Para ello se emplean diferentes técnicas, que van desde la simple

observación a nivel macroscópico y microscópico, hasta métodos más especializados como la difracción de rayos X o la catodoluminiscencia. Este tipo de análisis resulta esencial porque permite identificar con precisión los minerales presentes, comprender la composición del material y predecir su comportamiento. Gracias a esta información, se pueden optimizar procesos clave en la minería, como la flotación de minerales, la metalurgia extractiva o incluso la exploración de nuevos yacimientos. (Baumgartner et al., 2016)

#### **2.2.4. Distribución del tamaño de partícula**

La distribución del tamaño de partícula en una caracterización mineralógica describe el rango y la proporción de partículas presentes en una muestra, siendo un parámetro clave para comprender el comportamiento de los minerales en procesos como flotación, lixiviación, sedimentación o concentración. Su análisis es relevante no solo en minería, sino también en áreas como química, física, biología e ingeniería, ya que influye en propiedades como la reactividad, solubilidad, estabilidad y capacidad de flujo. Para determinarla se emplean diversas técnicas, entre ellas la microscopía, sedimentación, difracción láser y dispersión de luz, cuya selección depende del tipo de material y de los objetivos del estudio. En consecuencia, controlar esta distribución resulta esencial para optimizar la producción y el procesamiento de materiales en distintos campos industriales.

#### **2.2.5. Tipos de molienda de minerales**

La molienda de minerales puede realizarse de diferentes formas, siendo las más comunes la molienda seca y la molienda húmeda. En la molienda húmeda, el agua reduce la resistencia de las partículas, lo que disminuye el consumo energético y permite un proceso más eficiente y con menor ocupación de espacio en comparación

con la molienda en seco. Según el tipo de cuerpo moledor empleado, se distinguen varios tipos de molinos:

- **Molinos de bolas:** usados principalmente para obtener moliendas finas, donde el mineral se fragmenta con la ayuda de bolas de acero u otros cuerpos molturantes.
- **Molinos de barras:** empleados generalmente en la molienda primaria, al permitir una reducción inicial del tamaño de las partículas antes de etapas más finas del proceso.

#### **2.2.6. Innovaciones en la Molienda Minera**

En los últimos años, se han desarrollado tecnologías avanzadas de molienda, como la molienda autógena y semiautógena (SAG), en las cuales el propio mineral actúa como medio de molienda. Este tipo de procesos se caracterizan por su mayor eficiencia energética y por ofrecer mayor flexibilidad respecto al tamaño de alimentación. Asimismo, la incorporación de molinos verticales de rodillos ha demostrado un rendimiento superior frente a los molinos de bolas convencionales, especialmente en el tratamiento de minerales de alta dureza y abrasividad, como el hierro y el oro. (Andrea Blanco, 2020)

Estos avances tecnológicos e innovaciones han permitido optimizar la eficiencia, mejorar la adaptabilidad y reforzar el control de las operaciones de molienda dentro de la industria minera.

#### **2.2.7. Tipo de circuito de molienda**

Un circuito de molienda es el sistema empleado en la industria minera para reducir el tamaño de los minerales y facilitar su posterior procesamiento. Está conformado principalmente por un molino y un clasificador, y puede operar bajo tres configuraciones: circuito abierto, circuito cerrado y circuito inverso. En el circuito abierto, el mineral pasa directamente por el molino sin una etapa de clasificación

intermedia. En el circuito cerrado, el molino trabaja junto al clasificador: las partículas gruesas retornan al molino para seguir siendo trituradas, mientras que las finas continúan hacia la siguiente fase. El circuito inverso, por su parte, incorpora una clasificación previa al ingreso del mineral al molino; de esta manera, el material fresco se envía primero al ciclón y solo las arenas clasificadas ingresan al molino como alimentación. La selección del tipo de circuito no es un detalle menor, ya que influye directamente en la eficiencia, el consumo energético y el rendimiento global de la molienda. (Austin & Concha A., 2013)

En el procesamiento de minerales se emplean distintos tipos de circuitos de molienda, cuya elección depende de las características del mineral y de los requerimientos del producto final. Los más comunes son:

- **Circuito abierto:** el mineral pasa directamente por la etapa de molienda sin retorno, es decir, una vez molido se envía a la siguiente fase del proceso.
- **Circuito cerrado:** incorpora un clasificador que trabaja junto al molino. Las partículas gruesas que no alcanzan el tamaño deseado retornan al molino para ser trituradas nuevamente, mientras que las finas continúan al proceso siguiente.
- **Circuito inverso:** a diferencia del anterior, el mineral fresco no entra primero al molino, sino al ciclón, y solo las arenas clasificadas se alimentan al molino.

La elección entre estas configuraciones no es aleatoria; requiere analizar factores como la molidurabilidad de la mena, las características del mineral (dureza, mineralogía), el tamaño de alimentación, la finura de molienda requerida, además de realizar estudios técnicos y económicos que respalden la decisión. Asimismo, mantener un buen control y estabilidad del circuito es clave para asegurar la eficiencia y el rendimiento.

### **2.2.8. Impactos del grado de liberación en la recuperación metalográfica**

El grado de liberación es un factor clave en los estudios mineralúrgicos, pues permite medir qué tan eficiente ha sido la molienda y la trituración. A través de este parámetro se determina la proporción de minerales valiosos que han quedado separados de la ganga o de los minerales no deseados, lo cual resulta fundamental para optimizar los procesos de concentración y recuperación. (Ingeniería Metalúrgica, 2018)

La liberación de minerales depende en gran medida del tamaño de las partículas y de los granos, alcanzando su mayor eficacia cuando las partículas son alrededor de una décima parte del tamaño de los granos. Evaluar este parámetro permite conocer qué tan efectiva ha sido la molienda para obtener partículas minerales “libres” y listas para su procesamiento posterior. Contar con información sobre los niveles de liberación es esencial para entender cómo se comportan los minerales en distintos procesos industriales y ambientales, como la flotación, la lixiviación o la sedimentación. Además, el grado de liberación se convierte en una herramienta valiosa para optimizar las etapas de concentración y tratamiento, contribuyendo a mejorar la eficiencia operativa y la rentabilidad en la actividad minera.

Para (RA Mariano et al., 2016) la liberación de minerales constituye una etapa fundamental en los diagramas de flujo del procesamiento mineral, ya que consiste en fragmentar grandes trozos de mineral en partículas más pequeñas, adecuadas para los procesos de separación. Este mineral está formado por granos con propiedades distintas, las cuales influyen directamente en la manera en que se rompen durante la molienda. En la literatura especializada, la rotura del mineral suele clasificarse como aleatoria o no aleatoria, siendo esta última dividida en diferentes tipos según las características observadas. A lo largo de los años, diversos investigadores han propuesto definiciones y enfoques para explicar estas formas de rotura. En términos generales, la rotura

aleatoria se entiende como un proceso independiente tanto de las propiedades intrínsecas del mineral como de sus características mecánicas durante la conminución. Más que redefinir conceptos, los estudios existentes buscan organizar y comparar los distintos descriptores empleados en este campo, con el fin de establecer criterios comunes para comprender mejor los mecanismos de liberación y optimizar los procesos de beneficio de minerales.

### **2.2.9. Work Index**

El Work Index (WI) es un parámetro que mide la dureza de un mineral y la energía necesaria para reducir su tamaño durante la molienda. Se determina mediante el Test de Moliendabilidad de Bond, que evalúa el consumo específico de energía para que el 80% del material pase una malla de 100 micras (P80). Este índice, expresado en kWh/ton, varía según el mineral: por ejemplo, la bauxita presenta valores bajos (8,78 kWh/ton), mientras que rocas duras como la diorita alcanzan valores más altos (20,90 kWh/ton). Si bien es útil para comparar materiales, no refleja con exactitud el consumo energético real en planta, ya que este depende de múltiples factores operativos. (Rojas Lava, 2018)

Por otro lado, el grado de liberación indica la proporción de mineral que logra separarse de la ganga después de la molienda. Este parámetro es fundamental porque refleja la eficiencia de los procesos de trituración y molienda, además de definir la cantidad de mineral útil disponible para etapas posteriores como la flotación o la lixiviación. La liberación está directamente relacionada con el tamaño de partícula, siendo más eficiente cuando este alcanza dimensiones cercanas a una décima parte del tamaño de los granos minerales.

### 2.3. Definición de términos básicos

**Eficiencia de molienda.** Se entiende como la capacidad de un mineral para ser reducido de tamaño hasta alcanzar partículas con las dimensiones deseadas, considerando siempre las características y el tamaño del material que ingresa al proceso.

**Grado de liberación.** La liberación es el proceso mediante el cual las partículas de mineral valioso se separan de la ganga o material no deseado. Su objetivo principal es permitir la concentración o extracción de los minerales y elementos de interés de manera más eficiente.

**Minerales polimetálicos.** Son compuestos inorgánicos formados por la unión de uno o varios metales con azufre. Dentro de este grupo se encuentran minerales como la blenda, la marmatita, la esfalerita, la calcopirita, entre otros, que representan fuentes importantes de metales de interés económico. (Wills, 1981)

**Parámetro de molienda.** Son las variables que influyen directamente en el proceso de molienda, tales como el tiempo de operación, la velocidad del molino, la densidad de la pulpa, la carga moledora y el tamaño del mineral de alimentación.

**Velocidad crítica.** Es la velocidad de rotación del molino en función de su diámetro y de la fuerza centrífuga generada. Cuando esta velocidad es demasiado alta, las bolas se adhieren a las paredes internas del molino y dejan de caer libremente, lo que impide la generación de impacto y, en consecuencia, reduce la eficiencia del proceso.

**Velocidad de operación.** Es la velocidad a la que opera el molino en relación con su velocidad crítica, la cual debe mantenerse dentro de un rango aproximado del 50% al 90%. En el caso específico de los molinos de bolas, se recomienda trabajar entre un 70% y 85% de la velocidad crítica, ya que en este intervalo se logra un equilibrio adecuado entre el impacto y la abrasión, favoreciendo una molienda más eficiente.

## **2.4. Formulación de hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

La moliendabilidad de los minerales polimetálicos influye significativamente en el grado de liberación de los minerales valiosos en la empresa Pan American Silver Huaron, Pasco – 2024.

### **2.4.2. Hipótesis específicas**

- a. La composición mineralógica y granulométrica de los diferentes tipos de minerales influyen en el grado de liberación de elementos metálicos.
- b. El work index de los minerales polimetálico influye en la dureza del mineral tratado.
- c. El tiempo de molienda de los minerales polimetálicos influyen en el grado de liberación de los elementos metálicos.
- d. El grado de liberación influye en la recuperación metálica de los diferentes minerales.

## **2.5. Identificación de variables**

### **2.5.1. Variables independientes**

- Grado de liberación

### **2.5.2. Variables dependientes**

- Evaluación de la moliendabilidad

## 2.6. Definición operacional de variables e indicadores

**Tabla 1** Operacionalización de Variable Independiente

V. I.	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Fuente
<b>Evaluación de la moliendabilidad</b>	La moliendabilidad es una propiedad física de los materiales que describe su capacidad para ser reducidos de tamaño a través de los procesos de trituración y molienda. Un material con alta moliendabilidad se considera fácil de moler, mientras que con baja moliendabilidad requiere mayor esfuerzo y consumo energético.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caracterización mineralógica y granulométrica</li> <li>- Determinación del work index del mineral</li> <li>- Moliendabilidad del mineral polimetálico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>% contenido metálico</li> <li>% peso por fracción</li> <li>Dureza del mineral</li> <li>Kw-h/T</li> <li>Tiempo de molienda</li> </ul>	Laboratorio
V. D.	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Fuente
<b>Grado de liberación</b>	El grado de liberación es una medida cuantitativa que refleja la eficacia con la que la molienda permite separar las partículas de mineral valioso de la ganga o material no deseado.	Liberación del mineral polimetálico	65% -200 mallas	Laboratorio

*Nota.* Elaboración propia

## CAPITULO III

### METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Tipo de investigación

El estudio de investigación es **experimental aplicada**, debido a que se da soluciones reales a problemas que se presenta dentro de la minería polimetálica. **Experimental** es debido a que se realiza pruebas de molienda a diferentes tiempos para determinar la moliendabilidad del mineral. **Aplicada** es debido a que se da solución a problemas reales.

#### 3.2. Nivel de investigación

De acuerdo a la profundidad el estudio se ubica en el **nivel explicativo**, ya que busca identificar y analizar las causas que determinan el comportamiento de los minerales polimetálicos durante el proceso de molienda, así como las relaciones que existen entre sus características físicas y químicas y el grado de liberación alcanzado.

Este enfoque permite no solo describir los fenómenos, sino también explicar por qué ocurren, estableciendo vínculos causales entre las variables involucradas como indica (Alvarez Risco, 2020). De esta manera, la investigación proporciona una base

sólida para la toma de decisiones en la planta, ofreciendo información útil que contribuye a la optimización del proceso de molienda y al mejoramiento de la eficiencia operativa de la empresa Pan American Silver Huarón.

### **3.3. Métodos de investigación**

La investigación se desarrolló bajo el método científico, caracterizado por ser un proceso sistemático, ordenado y objetivo que permitió obtener conocimientos confiables. Este método partió de la observación y planteamiento del problema, seguido de la formulación de hipótesis, la recopilación y análisis de datos y, finalmente, la comprobación de resultados.

En el contexto de este estudio, el método científico aseguró que los procedimientos aplicados para evaluar la moliendabilidad de los minerales polimetálicos y determinar su grado de liberación se realizaran con rigurosidad técnica y validez estadística. De esta manera, se garantizó que las conclusiones obtenidas fueran verificables y útiles para la optimización de las operaciones de molienda en la empresa Pan American Silver Huarón.

### **3.4. Diseño de investigación**

El diseño de la investigación fue de tipo **experimental**, dado que se planificaron y ejecutaron pruebas bajo condiciones controladas con el propósito de analizar la moliendabilidad de los minerales polimetálicos y determinar su grado de liberación. Este diseño permitió manipular la variable independiente el proceso de molienda en diferentes condiciones para observar y registrar sus efectos sobre la variable dependiente, correspondiente al grado de liberación de los minerales. Asimismo, se establecieron de manera previa los puntos de muestreo y recolección de datos, garantizando que la información obtenida fuera representativa y confiable. La aplicación del diseño experimental facilitó la comparación objetiva de los resultados,

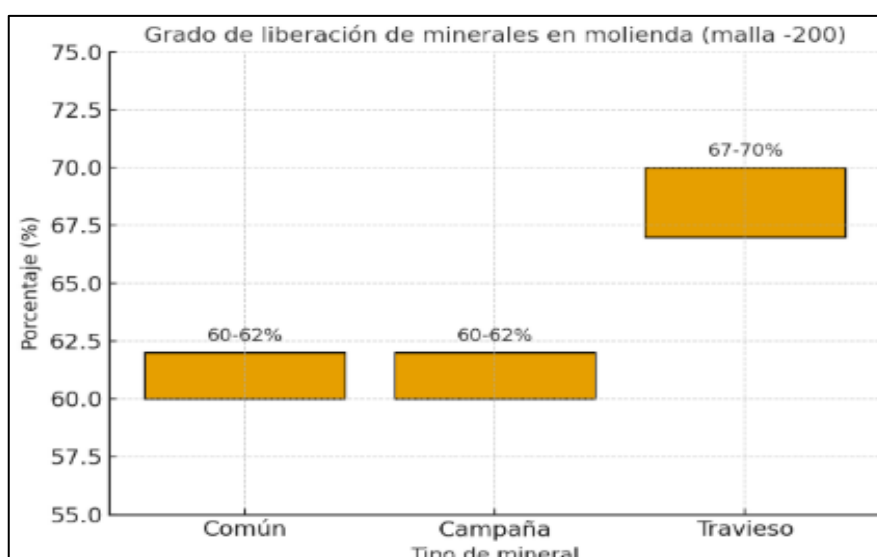
asegurando la validez y reproducibilidad de las conclusiones alcanzadas en la investigación.

### 3.5. Población y muestra

#### Población

La población del estudio lo conforma toda la concesión minera de los minerales polimetálicos de la empresa Pan American Silver Huarón. Estos minerales corresponden a tres tipos principales: Común, Campaña y Travieso, cada uno con características particulares en cuanto a su moliendabilidad y grado de liberación. De acuerdo con los reportes de la planta, el grado de liberación en la etapa de molienda para el mineral Común y Campaña se encuentra en un rango de 60 % a 62 % de malla -200, mientras que en el caso del mineral Travieso alcanza valores entre 67 % a 70 %. Esta diferencia refleja la variabilidad de los minerales que conforman la población, lo cual hace necesario un análisis detallado para establecer parámetros de control más precisos en el proceso de molienda.

**Figura 3:** Grado de liberación de minerales en molienda (malla -200)



*Nota.* Elaboración Propia

## Muestra

La muestra fue obtenida mediante el muestreo mecánico, empleando equipos automáticos que recolectaron material de manera continua e intermitente para asegurar la representatividad. La determinación de la masa mínima de muestra se realizó aplicando la teoría de Gy, que establece:

$$M = \frac{Cd^3}{S^2}$$

Donde:

- M = masa mínima de la muestra (kg)
- C = constante dependiente de las características del mineral,
- d = tamaño máximo de partícula (cm),
- S = desviación estándar aceptada.

La masa mínima de muestra se determinó mediante la Teoría de Gy, estableciendo una precisión objetivo del 5 %. Se consideró el tamaño máximo de partícula que ingresa al muestreador ( $d = 1,20$  cm) y una constante de material  $C = 0.072$ , acorde con la heterogeneidad observada en los minerales polimetálicos de planta. Con la expresión de la ecuación se obtuvo  $M \approx 49,8$  kg; por criterios operativos y de aseguramiento de calidad se adoptó 50 kg por cada tipo de mineral (Común, Campaña y Travieso). Esta masa permitió realizar cuarteos sucesivos y réplicas analíticas manteniendo la representatividad de la muestra.

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

#### Técnicas de recolección de datos

Las técnicas empleadas para la recolección de datos en la investigación fueron:

**Observación directa:** permitió identificar de manera detallada las condiciones de los minerales durante las pruebas experimentales.

**Recopilación de datos de campo:** a partir de registros proporcionados por la planta concentradora.

**Caracterización mineralógica:** mediante análisis cualitativos y cuantitativos que permitieron conocer la composición mineral.

**Análisis granulométrico:** determinación de la distribución del tamaño de partícula en diferentes etapas del proceso.

**Revisión documental y bibliográfica:** consulta de literatura especializada y reportes técnicos que sirvieron de base para contrastar y sustentar los resultados experimentales.

#### **Instrumentos de recolección de datos**

Los instrumentos utilizados para la recolección y validación de los datos fueron: **Formularios y reportes metalúrgicos:** empleados para registrar la información experimental.

#### **Equipos de laboratorio:**

- Molino de laboratorio para ensayos de molienda.
- Mesa de rodillos para homogenización de muestras.
- Celdas de flotación de laboratorio (utilizadas únicamente para ensayos complementarios de liberación).

#### **Equipos de caracterización:**

- Peachímetros y potenciómetros para la medición de parámetros fisicoquímicos.
- Balanza analítica y balanza Marcy para la determinación precisa de masas y densidades.

### **3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación**

La selección de los instrumentos se realizó en función de los objetivos de la investigación y de las características propias del material de estudio. Se eligieron equipos de laboratorio como el molino de laboratorio, la mesa de rodillos, balanza analítica, balanza Marcy, peachímetro y potenciómetro, además de formularios y reportes metalúrgicos para el registro de datos. Estos instrumentos fueron considerados adecuados debido a su uso estandarizado en estudios de moliendabilidad, análisis granulométrico y caracterización de minerales en el ámbito metalúrgico.

Según (Carrasco Díaz, 2008) la validación de los instrumentos se efectuó mediante la revisión de normas técnicas y protocolos de laboratorio, así como con la opinión de especialistas en metalurgia y procesamiento de minerales de la empresa Pan American Silver Huarón S.A. De este modo, se aseguró que los instrumentos cumplieran con los requisitos de precisión y pertinencia para los fines de la investigación.

En cuanto a la confiabilidad, esta se garantizó mediante:

- La calibración periódica de los equipos de medición (balanzas, potenciómetros, peachímetros).
- La realización de pruebas piloto y ensayos repetidos, que permitieron verificar la reproducibilidad de los resultados.
- El uso de formatos estandarizados de registro, lo que redujo el riesgo de errores humanos en la toma de datos.

De esta manera, se aseguró que los instrumentos de investigación utilizados proporcionaran resultados válidos, consistentes y confiables, garantizando la calidad de los datos obtenidos y, en consecuencia, la solidez de las conclusiones de la investigación.

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

El procesamiento de los datos obtenidos en la investigación se realizó inicialmente mediante el uso de hojas de cálculo en Microsoft Excel, que permitieron organizar la información en tablas estructuradas y facilitar su análisis posterior. En primera instancia, se aplicaron técnicas de tabulación y codificación, lo que permitió clasificar los datos según las variables de estudio. Posteriormente, se llevaron a cabo cálculos estadísticos descriptivos, tales como promedios, desviaciones estándar, valores máximos y mínimos, con el fin de identificar tendencias y evaluar la consistencia de los resultados. Asimismo, se elaboraron gráficos comparativos y diagramas de dispersión, los cuales facilitaron la interpretación visual de los resultados obtenidos y la identificación de patrones de comportamiento en las variables analizadas.

Finalmente, para asegurar la confiabilidad del análisis, se efectuaron contrastes con referencias bibliográficas y estudios previos, lo que permitió validar los resultados obtenidos y garantizar su coherencia con los fundamentos teóricos. Este procedimiento aseguró un análisis sistemático, ordenado y riguroso de los datos.

### **3.9. Tratamiento estadístico**

El tratamiento estadístico de los datos obtenidos en la investigación se llevó a cabo aplicando estadística descriptiva e inferencial. En una primera etapa, se calcularon valores promedios, desviaciones estándar, varianzas, así como valores máximos y mínimos, con el fin de describir de manera objetiva el comportamiento de las variables estudiadas.

Posteriormente, se realizaron análisis comparativos entre los diferentes tipos de muestras, con el propósito de identificar variaciones significativas en sus características físicas y químicas. Para ello, se aplicaron pruebas estadísticas de contraste de hipótesis, utilizando un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%, lo que permitió

validar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los resultados. El uso de estas herramientas estadísticas permitió garantizar la confiabilidad, validez y rigurosidad científica del estudio, asegurando que las conclusiones derivadas de los datos respondieran a criterios objetivos y verificables.

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

El estudio se desarrolló bajo principios éticos que garantizan el respeto, la responsabilidad y la transparencia en cada una de sus etapas. En concordancia con la normativa universitaria y los lineamientos de la investigación científica, se aseguró la integridad en la recolección, procesamiento y presentación de los datos, evitando cualquier tipo de manipulación, sesgo o distorsión. Desde la perspectiva filosófica, el estudio se fundamentó en la búsqueda de la verdad objetiva, reconociendo la importancia del conocimiento científico como medio para comprender los fenómenos naturales y aportar soluciones prácticas en el ámbito ingenieril. Se asumió además un compromiso con la responsabilidad social, entendiendo que la producción de conocimiento debe contribuir al bienestar colectivo y al desarrollo sostenible.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

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

El presente trabajo de investigación se desarrolló en la planta concentradora de la empresa Pan American Silver Huarón S.A., con el propósito de evaluar el grado de liberación de los minerales polimetálicos en la etapa de molienda. Actualmente, los registros de planta muestran que el grado de liberación se encuentra entre 60% y 62% de malla -200 en los minerales Común y Campaña, mientras que para el mineral Travieso oscila entre 67% y 70%. En este contexto, la investigación se planteó como una alternativa de mejora, orientada a analizar el efecto que tendría un incremento del porcentaje de malla -200 sobre el desempeño metalúrgico.

##### **4.1.1. Preparativos y desarrollo de las pruebas de moliendabilidad**

Antes de iniciar las pruebas, se efectuaron preparativos esenciales que garantizaron la representatividad y confiabilidad de las muestras. La obtención de estas se realizó directamente del producto del chancado final (alimento al molino primario),

bajo un muestreo sistemático por turnos, con el fin de asegurar que fueran compuestas y representativas. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a un proceso de secado y chancado hasta alcanzar el 100% de malla -600 ASTM, seguido de homogenización y cuarteo para obtener porciones adecuadas para los ensayos.

Con estas muestras se determinaron inicialmente las leyes de cabeza (Ag, Cu, Pb, Zn, Fe, As, Sb, Mn, Bi, PbOx y ZnOx), las cuales fueron validadas en laboratorio antes de continuar con las evaluaciones. Luego, se llevó a cabo la determinación del Work Index comparativo, empleando tiempos de molienda establecidos (0 y 10 minutos), tanto para la muestra de mineral como para una muestra patrón de cuarzo.

Asimismo, se establecieron pruebas de molienda controlada para alcanzar diferentes porcentajes de liberación en malla -200 ASTM, a través de intervalos de tiempo (0, 10, 15 y 20 minutos). Esto permitió construir un perfil granulométrico detallado y analizar cómo varía la distribución de las leyes metálicas en función de la reducción del tamaño de partícula.

Paralelamente, se realizaron ajustes y calibraciones de los equipos de laboratorio, tales como potenciómetros, balanzas analíticas y de precisión, asegurando mediciones exactas durante los ensayos. También se prepararon reactivos de trabajo siguiendo los estándares de la planta concentradora, a fin de mantener condiciones similares a las operativas.

Finalmente, los productos obtenidos de las pruebas fueron sometidos a ensayos químicos en laboratorio certificado, cuyos resultados se organizaron en balances de liberación y moliendabilidad. Este procedimiento permitió una interpretación integral de la respuesta de los minerales frente a las condiciones de molienda ensayadas.

El trabajo concluyó con la sistematización, análisis, discusión y difusión de resultados, integrando tanto la información experimental como la contrastación

bibliográfica, asegurando que las conclusiones fueran sólidas y sustentadas en bases científicas.

## 4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

En seguida, le presentamos los datos de la composición mineralógica del mineral en estudio y el análisis granulométrico de malla valorada.

### 4.2.1. Identificación de la composición mineralógica.

Para la identificación de la composición mineralógica del mineral se preparó el mineral a malla -100, tanto para el mineral común, mineral campaña y travieso y posteriormente, se envió para el ensaye químico, en seguida se presentan en las tablas 2.

**Tabla 2** *Ensaye químico de mineral Común*

Ag g/t	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe	%As	%Mn	%Bi	%Sb	%CuOx	%PbOx	%ZnOx
165,15	0,49	1,81	3,82	10,98	0,64	2,55	0,02	0,1	<0,001	0,13	0,12

*Nota.* Datos obtenidos de laboratorio químico

En la tabla 2 se observa un alto contenido de plata (165,15 g/t), acompañado de valores significativos de plomo (1,81%) y zinc (3,82%). El contenido de cobre es moderado (0,493%), mientras que el manganeso (2,55%) y el hierro (10,98%) muestran una presencia relevante. Los óxidos de plomo y zinc representan una proporción considerable, lo cual puede influir en el comportamiento metalúrgico de este mineral.

**Tabla 3** *Ensaye químico de mineral Campaña*

Ag g/t	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe	%As	%Mn	%Bi	%Sb	%CuOx	%PbOx	%ZnOx
120,07	0,43	1,07	3,87	11,53	0,22	1,75	0,02	0,05	0,02	0,14	0,2

*Nota.* Datos obtenidos de laboratorio químico

La tabla 3 presenta un contenido intermedio de plata (120,07 g/t), con valores de plomo (1,07%) y zinc (3,87%) semejantes al mineral común, aunque con menor riqueza en plata. El cobre se encuentra en 0,439%. En comparación, el contenido de

óxidos metálicos es más elevado en cobre (0,02%), plomo (0,14%) y zinc (0,20%), lo que podría condicionar sus características de tratamiento.

**Tabla 4** *Ensaye químico de mineral Travieso*

Ag g/t	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe	%As	%Mn	%Bi	%Sb	%CuOx	%PbOx	%ZnOx
55,57	3,38	0,17	0,41	26,34	1,31	0,59	0,05	0,2	0,06	0,03	0,04

*Nota.* Datos obtenidos de laboratorio químico

En esta tabla 4 se distingue por su alto contenido de cobre (3,38%) y hierro (26,34%), mientras que los niveles de plata (55,57 g/t), plomo (0,17%) y zinc (0,41%) son bajos. El manganeso y el arsénico presentan valores relevantes, y los óxidos de plomo y zinc alcanzan proporciones considerables, lo que lo convierte en un mineral con características diferenciadas respecto a los otros dos.

En síntesis, los resultados evidencian una clara diferencia en la composición de los tres tipos de mineral: el mineral Común se caracteriza por su alto contenido de plata, el mineral Campaña presenta una composición intermedia y balanceada, mientras que el mineral Travieso destaca por su riqueza en cobre y hierro, aunque con bajos valores de plata, plomo y zinc. Esta diversidad composicional justifica la necesidad de realizar pruebas específicas de moliendabilidad y de liberación para cada uno de ellos, dado que su respuesta a las operaciones de conminución no será uniforme.

#### **4.2.2. Análisis granulométrico de malla valorada**

El análisis granulométrico se realizó con los diferentes minerales como: mineral común, mineral de campaña y mineral travieso. Se utilizó mineral a -6 malla, el cual se homogenizó separadamente y se cargó al tamiz para su respectivo tamizaje durante 8 min. Seguidamente se procedió al pesado por tamiz y enviado al laboratorio para su respectivo ensaye químico. A continuación, le presentamos en la tabla el contenido metálico por mallas.

**Tabla 5** Análisis granulométrico de malla valorada para el mineral común.

Mesh	Micrones	Peso gr.	%Peso	Ag g/T	% Pb	% Zn
6	3350	9,8	3,27	18,42	0,25	0,24
8	2360	19,1	6,37	22,01	0,38	0,65
10	1700	31,2	10,40	55,33	0,43	0,46
14	1168	34,3	11,43	87,4	0,72	0,93
20	850	36,9	12,30	43,12	0,82	0,85
30	600	37,9	12,63	134,61	0,85	1,12
40	425	41,2	13,73	239,46	1,09	1,02
50	300	22,6	7,53	331,53	1,95	2,67
70	212	12,2	4,07	343,64	4,49	2,93
100	150	14,4	4,80	361,21	4,65	3,48
140	106	10,6	3,53	321,02	4,75	1,73
200	75	9,7	3,23	201,52	4,80	1,74
270	53	5,5	1,83	289,05	5,98	1,61
325	45	4,5	1,50	224,21	6,01	1,12
400	38	3,5	1,17	188,02	7,51	1,29
-400	38	6,6	2,20	348,31	5,89	0,95

*Nota.* Datos obtenidos de laboratorio.

En la tabla 5 se observa, el mayor contenido de plomo se encuentra entre la malla -30 a la malla +100, que tienen leyes de 1,12 a 3.48% de plomo.

La plata de acuerdo al análisis granulométrico se encuentra desde la malla -30 hasta la malla -400 que alcanza una ley de 348, 31 g/T. El zinc, similar que las anteriores tiene una ley de 1,12% (-30 mallas) a 3,48% malla +100.

En conclusión, se puede afirmar que el mayor contenido metálico se encuentra entre las mallas -30 a +100 mallas, donde se tiene que liberar el mineral para su recuperación.

**Tabla 6** *Análisis granulométrico de malla valorada para mineral campaña.*

Mesh	Micrones	Peso gr.	%Peso	Ag g/T	% Pb	% Zn
6	3350	2,03	0,68	14,21	0,22	0,31
8	2360	36,70	12,23	18,03	0,25	0,72
10	1700	53,45	17,82	46,13	0,31	0,66
14	1168	44,01	14,67	83,21	0,37	0,95
20	850	34,33	11,44	43,12	0,62	0,93
30	600	30,52	10,17	123,59	0,75	1,47
40	425	11,31	3,77	239,46	0,09	1,09
50	300	11,55	3,85	221,41	1,67	2,84
70	212	9,01	3,00	333,64	2,49	2,93
100	150	9,31	3,10	345,21	3,45	3,48
140	106	8,43	2,81	321,02	3,73	3,73
200	75	7,34	2,45	241,52	3,65	2,26
270	53	7,10	2,37	242,12	3,21	2,61
325	45	3,04	1,01	208,01	3,01	1,21
400	38	2,06	0,69	198,02	2,77	1,29
-400	38	29,81	9,94	178,24	2,09	0,85

*Nota.* Datos obtenidos de laboratorio.

En la tabla 6 observamos, que el mayor contenido de plomo se encuentra a partir de la malla - 50 hasta la malla -325, con leyes 1,65% Pb a 208,01 % Pb, de igual manera en el zinc.

**Tabla 7** *Análisis granulométrico de malla valorada para el mineral travieso.*

Mesh	Micrones	Peso gr.	%Peso	Ag g/T	% Cu	% Zn
6	3350	4,21	1,40	0,29	0,22	0,02
8	2360	32,54	10,85	0,58	0,25	0,03
10	1700	55,31	18,44	1,46	0,31	0,05
14	1168	44,13	14,71	9,86	0,37	0,06
20	850	30,76	10,25	35,41	0,62	0,08
30	600	32,18	10,73	68,94	0,75	0,09
40	425	10,20	3,40	98,65	0,09	0,14
50	300	12,65	4,22	101,76	1,67	0,18
70	212	8,74	2,91	104,04	21,49	0,15
100	150	9,56	3,19	130,33	33,45	0,25
140	106	8,49	2,83	145,16	31,73	0,27
200	75	7,03	2,34	162,82	3,65	0,36
270	53	7,14	2,38	154,35	3,21	0,37
325	45	3,09	1,03	132,03	3,01	0,39
400	38	2,16	0,72	120,22	2,77	0,42
-400	38	31,81	10,60	132,62	2,09	0,45

*Nota.* Datos obtenidos de laboratorio.

En la tabla 7 observamos, que el mayor contenido de cobre se encuentra a partir de la malla - 50 hasta la malla -140, con leyes 1,67% Cu a 31,73 % Cu. El zinc tiene leyes bajas en cada fracción del tamiz.

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

Para la determinación de la dureza del mineral se usó el método comparativo con cuarzo que tiene un Índice de Trabajo de 13,6 Kw-hr/Tc. Para los tres tipos de minerales se determinó el tamaño de alimentación promedio  $F_{80}$  (en la muestra 100% pasante malla 6 ASTM) y el tamaño del producto  $P_{80}$  luego de la molienda, para las muestras (Mineral común, campaña, travieso y Cuarzo) el tiempo de molienda fue de 20 minutos para las tres muestras, los siguientes datos son resultados del análisis granulométrico:

##### a) Mineral común

$$F_{80} \text{ cuarzo} = 1834,70 \text{ } \mu\text{m (100\% malla -6).}$$

$$P_{80} \text{ cuarzo} = 292,65 \text{ } \mu\text{m.}$$

$$F_{80} \text{ mineral} = 1405,79 \text{ } \mu\text{m (100\% malla -6)}$$

$$P_{80} \text{ mineral} = 186,69 \text{ } \mu\text{m.}$$

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

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

Haciendo uso de la ecuación de bond se determinó el  $Wi = 13,29 \text{ Kw-hr/TM}$  que será el indicador de dureza del mineral en estudio.

##### b) Mineral campaña

$$F_{80} \text{ cuarzo} = 1834,70 \text{ } \mu\text{m (100\% malla -6).}$$

$$P_{80} \text{ cuarzo} = 292,65 \text{ } \mu\text{m.}$$

$$F_{80} \text{ mineral} = 1550,0 \text{ } \mu\text{m (100\% malla -6)}$$

$P_{80} \text{ mineral} = 205,94 \mu\text{m}$ .

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

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

Haciendo uso de la ecuación de bond se determinó el  $Wi = 14,66 \text{ Kw-hr/TM}$  que será el indicador de dureza del mineral en estudio.

**c) Mineral travieso**

$F_{80} \text{ cuarzo} = 1834,70 \mu\text{m}$  (100% malla -6).

$P_{80} \text{ cuarzo} = 292,65 \mu\text{m}$ .

$F_{80} \text{ mineral} = 1398,39 \mu\text{m}$  (100% malla -6)

$P_{80} \text{ mineral} = 185,71 \mu\text{m}$ .

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

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

Haciendo uso de la ecuación de bond se determinó el  $Wi = 13,22 \text{ Kw-hr/TM}$  que será el indicador de dureza del mineral en estudio.

Los resultados obtenidos en la determinación del Work Index comparativo se presentan en la Tabla 8, los cuales constituyen un insumo fundamental para analizar el comportamiento de los minerales frente al proceso de molienda.

Enseguida realizamos la comparación del work index obtenido de los tres tipos de minerales con los valores de clasificación de dureza de la tabla 9.

**Tabla 8** *Clasificación de dureza del mineral*

<b>Descripción</b>	<b>Limite Wi (Kw-H/Tm)</b>
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
Extremadamente duro	21,77

*Nota.* Datos tomados del laboratorio metalúrgicos

Comparando la dureza obtenida del work index de los minerales tenemos la respectiva descripción en tabla 9.

**Tabla 9** *Índice de trabajo (Work Index) comparativo*

<b>MINERAL</b>	<b>Wi (Comparativo)</b>	<b>Descripción</b>
<b>Común</b>	13,29 kw-h/TM	Medio duro
<b>Campaña</b>	14,66 kw-h/TM	Duro
<b>Travieso</b>	13,22 kw-h/TM	Medio duro

*Nota.* Elaboración Propia

#### **4.2.4. Ensayo de Moliendabilidad**

Las pruebas de moliendabilidad se llevaron a cabo utilizando muestras representativas de los minerales Común, Campaña y Travieso. Para los minerales Común y Campaña, se emplearon porciones de 2000 gramos de mineral acompañadas de 1000 cc de agua, con el fin de mantener condiciones homogéneas en el ensayo. En el caso del mineral Travieso, debido a su alta ley de cobre, se optó por trabajar con 1000 gramos de mineral y 500 cc de agua, ajustando así las condiciones de prueba para evitar sesgos en los resultados. Los datos obtenidos en estas pruebas de moliendabilidad se encuentran presentados en la Tabla 4, los cuales constituyen la base para el análisis comparativo del comportamiento de los diferentes tipos de mineral frente al proceso de molienda.

**a) Mineral común**

Para determinar la moliendabilidad del mineral se aplicó procedimientos estándares de la empresa para dar confiabilidad a los resultados. La molienda se da inicio con la adición del mineral al molino con un peso de 2 kilogramo, agua 1000 ml y se procede a realizar la molienda a 5, 10, 14,7, 18,9 y 23,4 min, teniendo los siguientes resultados.

**Tabla 10** *Tiempo de molienda para mineral común.*

N° prueba	TIEMPO (min)	% M - 200
1	5	37
2	10	51
3	14,7	60
4	18,9	65
5	23,4	70
	18,7	65

65% - 200 mallas = 18,94 min

*Nota.* Datos tomados de pruebas metalúrgicas

De la ecuación de molienda tenemos

$$Y = 1,78961x + 31,102$$

Donde:

Y = malla - 200

X = tiempo de molienda

Remplazando los datos se determinó el tiempo de la molienda:

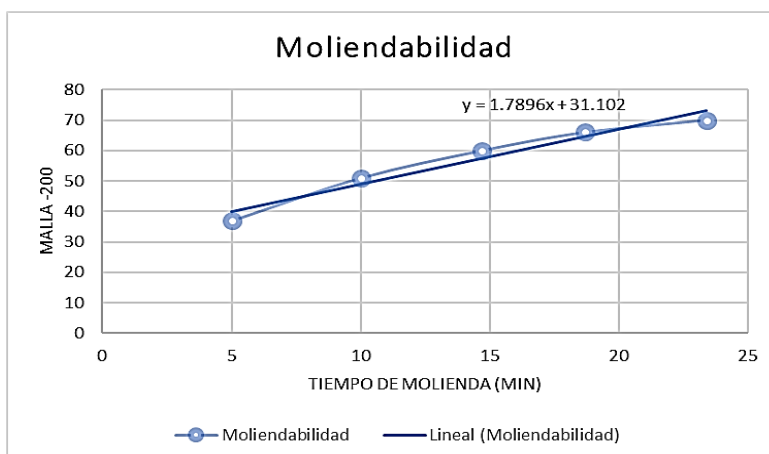
$$65 = 1,7896X + 31,102$$

$$X = 18,94 \text{ min.}$$

El tiempo de molienda estimado es de 18,94 minutos para 65% - 200 mallas

A continuación, le presentamos la figura 4 del tiempo de molienda del mineral común.

**Figura 4:** *Tiempo de molienda para mineral común*



*Nota.* Datos tomados de pruebas metalúrgicas

Los resultados del ensayo de molienda batch indican que el mineral presenta una dureza de 14,66 kWh/Tc, alcanzando un 65 % de pasante malla –200 en un tiempo de 18,94 minutos. El incremento progresivo del consumo energético con el tiempo evidencia una cinética de molienda típica de un mineral de moliendabilidad media, donde el aumento de finos requiere incrementos energéticos cada vez mayores.

**b) Mineral campaña**

Teniendo los respectivos cuidados y aplicando los procedimientos estándares, similares al mineral común se adiciono el mineral al molino 2,0 K y 1000 ml de agua se precedió a la molienda durante 5, 10, 15,5, 19,8 y 24 minutos

**Tabla 11** *Tiempo de molienda para mineral campaña.*

N° prueba	TIEMPO (min)	% M - 200
1	5	37
2	10	49
3	15,5	60
4	19,8	65
5	24,1	70
	19,8	65
65% - 200 mallas = 19,81 min		

*Nota.* Datos tomados de pruebas metalúrgicas

De la ecuación de molienda tenemos

$$Y = 1,7428x + 30,467$$

Donde:

Y = malla - 200

X = tiempo de molienda

Remplazando los datos se determinó el tiempo de la molienda:

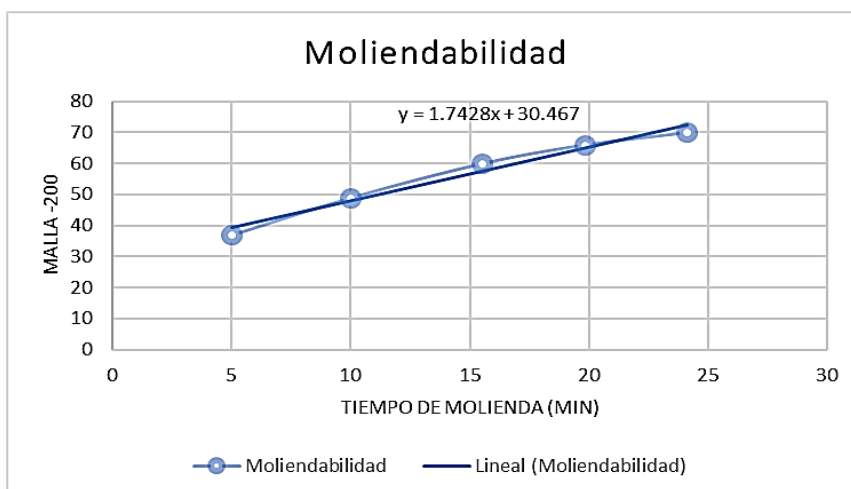
$$65 = 1,78961X + 30,467$$

$$X = 19,81 \text{ min.}$$

El tiempo de molienda estimado es de 19,81 minutos para 65% - 200 mallas

A continuación, le presentamos la figura 6 del tiempo de molienda del mineral campaña.

**Figura 5:** *Tiempo de molienda para mineral común*



*Nota.* Datos tomados de pruebas metalúrgicas

Los resultados del ensayo de molienda batch indican que el mineral presenta una dureza de 13,29 kWh/Tc, alcanzando un 65 % de pasante malla -200 en un tiempo de 18,94 minutos. El incremento progresivo del consumo energético con el tiempo evidencia una cinética de molienda típica de un mineral de moliendabilidad

dura, donde el aumento de finos requiere incrementos energéticos cada vez mayores.

**c) Mineral travieso**

Teniendo los respectivos cuidados y aplicando los procedimientos estándares, similares al mineral común se adiciono el mineral al molino 1,0 K y 500 ml de agua se precedió a la molienda durante 4, 7,5, 11,2 y 13,8 minutos.

**Tabla 12** *Tiempo de molienda para mineral travieso*

N° prueba	TIEMPO (min)	% M - 200
1	4	41
2	7,5	56
3	11,2	65
4	13,8	70
	11,2	65
65% - 200 mallas = 11,22 min		

*Nota.* Datos tomados de pruebas metalúrgicas

De la ecuación de molienda tenemos

$$Y = 2,9978x + 31,345$$

Donde:

Y = malla - 200

X = tiempo de molienda

Remplazando los datos se determinó el tiempo de la molienda:

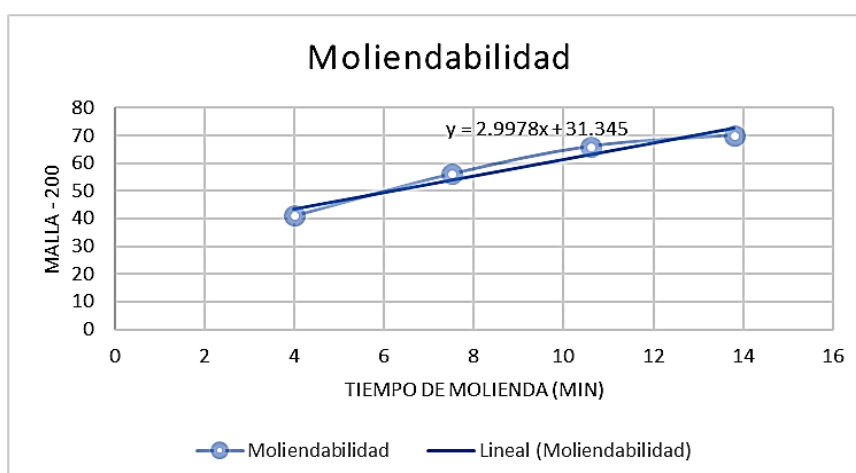
$$65 = 2,9978X + 31,345$$

$$\mathbf{X = 11,22 \text{ min.}}$$

El tiempo de molienda estimado es de 11,22 minutos para 65% - 200 mallas

A continuación, le presentamos la figura 6 del tiempo de molienda del mineral campaña.

**Figura 6:** Tiempo de molienda para mineral común



*Nota.* Datos tomados de pruebas metalúrgicas

Los resultados del ensayo de molienda batch indican que el mineral presenta una dureza de 13,22 kWh/Tc, alcanzando un 65 % de pasante malla -200 en un tiempo de 11,22 minutos. El incremento progresivo del consumo energético con el tiempo evidencia una cinética de molienda típica de un mineral de moliendabilidad media, donde el aumento de finos requiere incrementos energéticos cada vez mayores.

#### 4.2.5. Flotación batch a 65% - 200 mallas

Determinado el grado de liberación de los diferentes minerales se procedió a realizar pruebas de flotación y determinar la recuperación metálica. Para ello, se determinó la dosificación de reactivos como: colectores espumantes, depresores y activadores.

Se emplearon reactivos en concentraciones estándar (CNNa, xantatos y carbón activado al 1%; sulfato de cobre y cal al 10%; RCS al 2,5%; H-150 al 100%). En la Tabla 6 se muestran los balances metalúrgicos de las pruebas *batch*, obteniéndose tres concentrados del mineral común a distintos porcentajes de malla -200.

El mineral se muele a 65% malla -200, que se determinó en la prueba de moliendabilidad, para el tiempo estimado para cada tipo de mineral en estudio. Se debe recordar que la dosificación de reactivos se determinó en base a lo utilizado en planta concentradora.

A continuación, le presentamos las condiciones de operación de las pruebas metalúrgicas para cada tipo de mineral.

#### **A. Condiciones de operación de flotación bulk (mineral común)**

##### **Molienda:**

- Peso de mineral : 1 Kg
- Agua : 500 cc
- Tiempo de molienda : 19,81 minutos
- **Cianuro de sodio** : **25 - 30 g/Tn**
- Granulometría : 65% -200 mallas

##### **Flotación Rougher Bulk**

- pH de flotación : 8,9
- sulfato de zinc : 200 g/Tn
- Z-11/Z-6 : 10 - 15 g/Tn
- Espumante H-150 : 25 g/Tn
- Tiempo Acond : 2 minutos
- Flotación : 3 minutos

##### **Flotación scavenger bulk:**

- Z-11/Z-6 : 3 g/Tn
- Tiempo de flotación : 2 minutos

##### **Flotación Cleaner bulk I:**

- Cianuro de sodio : 5 gr/Tn

- Tiempo de flotación : 2 minutos

### **Condiciones de la flotación de zinc**

#### **Flotación Rougher Zinc:**

- Cal : 1000 gr/Tn
- pH de flotación : 10,50
- Sulfato de Cobre : 168 - 175 gr/Tn
- Z-11/Z-6 : 8 - 10 gr/Tn
- Espumante H-150 : 12 gr/Tn
- Tiempo Acond : 5 minutos
- Flotación : 3 minutos

#### **Flotación scavenger zinc:**

- sulfato de Cobre : 25 gr/Tn
- Z-11/Z-6 : 8 gr/Tn
- Tiempo de flotación : 2 minutos

#### **Flotación Cleaner zinc I:**

- Cal : 400 gr/Tn
- pH : 11,60
- Tiempo de flotación : 2 minutos

En seguida, le presentamos en la tabla 12 los puntos de dosificación de las pruebas batch.

**Tabla 13** Condiciones de flotación del mineral común

Nombre	Tiempo (min)	pH	Reactivos gr/ton							
			NaCN	Z-11/Z-6	Cal	CuSo4	H-150	Carbón	RCS	
Molienda	14,7 – 18,7 y 23,4	8,9	30							
Ro-Bk	3	8,9		10				31		
Scv-Bk	2	8,9		5						
1° Cl Bk	3	8,5	5							
2° Cl Bk	3	8,5								
3° Cl Bk										
Ac Zn 1°	5	10,5			600					
Ac Zn 2°	3	10,5			150	160				
Ro Zn	1,5	10,5		10	100		6			
Scv-Zn	1,5	10,5		10		25	3			
1° Cl Zn	3	12,5			300					
2° Cl Zn	3	12,5			300					
3° Cl Zn										
1 Ac Sep Pb/Cu	5	7,9							3	5
Ro Sep Pb/Cu	3	7,9						3		5
Scv Sep Pb/Cu	4	7,9								5
<b>Total, de reactivos en gr/ton</b>			<b>35</b>	<b>39</b>	<b>1 450</b>	<b>185</b>	<b>44</b>	<b>3</b>	<b>15</b>	

Nota. Elaboración Propia

Realizada las pruebas de flotación, en seguida le presentamos el balance metalúrgico.

**Segunda prueba:** consistió en la dosificación de **NaCN de 30 g/T** y colector **Z-11/Z-6 10 g/T**, se mantuvo como constante el grado de liberación en 65% - 200 mallas, espumante 31 g/T.

**Tabla 14** Balance metalúrgico de Plomo, cobre y zinc de mineral común

P-002	% Peso	Ensaye químico					% Distribución				
		Ag gr/ton	Cu%	Pb%	Zn%	Fe%	%Ag	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe
Conc. Cu	1,66	5 500,60	21,77	18,12	4,43	12,28	54,97	73,64	16,59	1,92	1,85
Conc. Pb	2,23	1 906,05	1,59	61,32	6,21	7,48	25,65	7,24	75,61	3,63	1,52
Conc. Zn	6	159,44	0,51	0,33	52,14	5,47	5,77	6,25	1,09	81,95	2,99
Relave Final	90,11	25,05	0,07	0,13	0,53	11,43	13,61	12,87	6,71	12,5	93,65
Cab. (calc.)	100	165,85	0,49	1,81	3,82	11	100	100	100	100	100

Nota. Datos de laboratorio

En la tabla 14 se observa, que la recuperación de cobre es de 73,64%, el plomo alcanza 75,61% de recuperación y el zinc tiene 81,95%. El concentrado de los productos es aceptable de 21,77%, 61,32 y 52,14% respectivamente.

**Tercera prueba:** Esta prueba consistió en la dosificación de **NaCN de 25 g/T** y colector **Z-11/Z-6 de 15 g/T**, se mantuvo como constante el grado de liberación en 65% - 200 mallas, espumante 31 g/T.

**Tabla 15 Balance metalúrgico de Plomo, cobre y zinc de mineral común**

P-003	% Peso	Ensaye químico					% Distribución				
		Ag gr/ton	Cu%	Pb%	Zn%	Fe%	%Ag	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe
<b>Conc. Cu</b>	2,06	4 913,13	19,44	19,37	3,72	18,04	61,26	81,7	22,16	2	3,38
<b>Conc. Pb</b>	2,01	1 751,10	0,81	63,8	4,32	8,47	21,3	3,32	71,2	2,27	1,55
<b>Conc. Zn</b>	6,2	129,78	0,46	0,19	51,31	4,7	4,87	5,82	0,65	83,26	2,66
<b>Relave Final</b>	89,73	23,12	0,05	0,12	0,53	11,3	12,56	9,16	5,98	12,46	92,41
<b>Cab. (calc.)</b>	<b>100</b>	<b>165,15</b>	<b>0,49</b>	<b>1,8</b>	<b>3,82</b>	<b>10,98</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Nota. Datos de laboratorio

En la tabla 15 se observa, que la recuperación de cobre es de 81,70%, el plomo alcanza 71,20% de recuperación y el zinc tiene 83,26%. El concentrado de los productos es aceptable de 19,44%, 63,80 y 51,31% respectivamente.

**Cuarta prueba:** Esta prueba consistió en la dosificación de **NaCN de 30 g/T** y colector **Z-11/Z-6 de 15 g/T**, se mantuvo como constante el grado de liberación en 65% - 200 mallas, espumante 31 g/T.

**Tabla 16 Balance metalúrgico de Plomo, cobre y zinc de mineral común**

P-004	% Peso	Ensaye químico					% Distribución				
		Ag gr/ton	Cu%	Pb%	Zn%	Fe%	%Ag	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe
<b>Conc. Cu</b>	2,12	4 546,19	19,02	19,31	2,74	20,89	58,29	81,91	22,59	1,52	4,03
<b>Conc. Pb</b>	1,96	2 062,83	0,74	63,59	1,74	4,36	24,49	2,95	68,89	0,89	0,78
<b>Conc. Zn</b>	6,8	147,19	0,57	0,44	49,81	7,87	6,06	7,89	1,65	88,72	4,88
<b>Relave Final</b>	89,12	20,67	0,04	0,14	0,38	11,13	11,15	7,25	6,86	8,87	90,32
<b>Cab. (calc.)</b>	<b>100</b>	<b>165,15</b>	<b>0,49</b>	<b>1,81</b>	<b>3,82</b>	<b>10,98</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Nota. Datos de laboratorio

En la tabla 16 se observa, que la recuperación de cobre es de 81,91%, el plomo alcanza 68,89% de recuperación y el zinc tiene 88,72%. El concentrado de los productos es aceptable de 19,02%, 63,59 y 49,81% respectivamente.

## **B. Condiciones de operación de flotación bulk (mineral campaña)**

### **Molienda:**

- Peso de mineral : 1 Kg
- Agua : 500 cc
- Tiempo de molienda : 19,81 minutos
- **Cianuro de sodio** : **24 - 30 g/Tn**
- Granulometría : 65% -200 mallas

### **Flotación Rougher Bulk**

- pH de flotación : 8,9
- sulfato de zinc : 200 g/Tn
- Z-11/Z-6 : 8 - 14 g/Tn
- Espumante H-150 : 25 g/Tn
- Tiempo Acond : 2 minutos
- Flotación : 3 minutos

### **Condiciones de la flotación de zinc**

#### **Flotación Rougher Zinc:**

- Cal : 1000 gr/Tn
- pH de flotación : 10,50
- sulfato de Cobre : 165-170 gr/Tn
- Z-11/Z-6 : 8-10 gr/Tn
- Espumante H-150 : 12 gr/Tn
- Tiempo Acond : 5 minutos

- Flotación : 3 minutos

**Flotación scavenger zinc:**

- sulfato de Cobre : 25 gr/Tn
- Z-11/Z-6 : 8 gr/Tn
- Tiempo de flotación : 2 minutos

**Flotación Cleaner zinc I:**

- Cal : 400 gr/Tn
- pH : 11,60
- Tiempo de flotación : 2 minutos

Se emplearon reactivos con concentraciones estándar (NaCN, xantatos y carbón activado al 1%; sulfato de cobre y cal al 10%; RCS al 2,5%; H-150 al 100%). Se registró un alto consumo de cal (2 350 g/t) debido al pH ácido del mineral. Los puntos de dosificación de reactivos se muestran en la Tabla 17.

**Tabla 17** *Condiciones de flotación mineral de campaña*

Nombre	Tiempo (min)	pH	Reactivos gr/ton						
			NaCN	Z-11/Z-6	Cal	CuSo4	H-150	Carbón	RCS
Molienda	15,5 – 19,8 y 24,1	6,84	30						
Ro-Bk	3	8,5		10	300		31		
Scv-Bk	2	8,4		5					
1° Cl Bk	3	8,5	5						
2° Cl Bk	3	8,5							
3° Cl Bk									
Ac Zn 1°	5	10,5			600				
Ac Zn 2°	3	10,5			150	160			
Ro Zn	1,5	10,5		10	100		6		
Scv-Zn	1,5	10,5		10		25	3		
1° Cl Zn	3	12,5			600				
2° Cl Zn	3	12,5			600				
3° Cl Zn									
1 Ac Sep Pb/Cu	5							3	5
Ro Sep Pb/Cu	3						3		5
Scv Sep Pb/Cu	4								5
<b>Total, de reactivos en gr/ton</b>			<b>35</b>	<b>39</b>	<b>2 350</b>	<b>185</b>	<b>44</b>	<b>3</b>	<b>15</b>

*Nota.* Elaboración Propia

Los parámetros de las pruebas metalúrgicas se realizaron teniendo en cuenta la dosificación de NaCN y colectores. El cianuro de sodio se dosificó en 24 g/T y 30 g/T. La combinación de colectores Z-11/Z-6 se dosificó de 8g/T a 14 g/T.

**Segunda prueba** del mineral de campaña se dosificó el **NaCN en 30 g/T** y Colectores **Z-11/Z-6 en 14 g/T**. los parámetros de moliendabilidad se trabajó 65% -200 mallas, dosificación de espumante H-150 se mantuvo en 36 g/T.

Después de realizar las pruebas metalúrgicas le presentamos los respectivos balances metalúrgicos de las pruebas. Ver tabla 18.

**Tabla 18** Balance metalúrgico de Plomo, cobre y zinc de mineral campaña

M-02	% Peso	Ensaye químico					% Distribución				
		Ag gr/ton	Cu%	Pb%	Zn%	Fe%	%Ag	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe
Conc. Cu	1,24	5 042,50	24,79	14,04	3,98	8,66	52,21	70,05	16,31	1,28	0,94
Conc. Pb	1,14	2 031,37	3,05	64,82	8,58	3,04	19,25	7,89	68,92	2,52	0,3
Conc. Zn	5,26	175,63	0,73	0,72	55,98	5,08	7,7	8,73	3,54	76,15	2,32
Relave Final	92,35	27,09	0,06	1,13	0,84	12,01	20,84	13,33	11,22	20,05	96,44
Cab. (calc.)	100	120,07	0,44	1,07	3,87	11,5	100	100	100	100	100

Nota. Datos de laboratorio

En la tabla 18 se observa, que la recuperación de cobre alcanza el 70,05%, el plomo alcanza 68,92% de recuperación y el zinc tiene 76,15%. Los concentrados son de buena calidad, siendo 24,79% para cobre, 64,82% para el plomo y 55,98% para el zinc.

**Tercera prueba** del mineral de campaña se dosificó el **NaCN en 24 g/T** y Colectores **Z-11/Z-6 en 8 g/T**. los parámetros de moliendabilidad se trabajó 65% - 200 mallas, dosificación de espumante H-150 se mantuvo en 36 g/T.

En seguida, después de realizar las pruebas metalúrgicas le presentamos los respectivos balances metalúrgicos de las pruebas.

**Tabla 19** Balance metalúrgico de Plomo, cobre y zinc de mineral campaña

M-03	% Peso	Ensaye químico					% Distribución				
		Ag gr/ton	Cu%	Pb%	Zn%	Fe%	%Ag	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe
Conc. Cu	0,98	6 136,46	25,45	12,6	2,57	8,08	49,99	56,78	11,52	0,65	0,69
Conc. Pb	1,37	2 157,51	8,51	58,7	2,82	3,96	24,56	26,53	74,98	1,00	0,47
Conc. Zn	5,25	165,07	0,69	0,64	57,72	4,81	7,22	8,26	3,14	78,3	2,19
Relave Final	92,41	23,69	0,04	0,12	0,84	12,06	18,23	8,43	10,36	20,06	96,65
Cab. (calc.)	100	120,07	0,44	1,07	3,87	11,53	100	100	100	100	100

Nota. Datos de laboratorio

En la tabla 19 se observa, que la recuperación de cobre alcanza el 56,78%, el plomo alcanza 74,98% de recuperación y el zinc tiene 78,30%. Los concentrados son de buena calidad, siendo 25,45% para cobre, 58.7% para el plomo y 57,98% para el zinc. En esta prueba la recuperación de cobre baja debido a que se limpió más.

Cuarta prueba del mineral de campaña se dosifico el NaCN en 30 g/T y Colectores Z-11/Z-6 en 14 g/T. los parámetros de moliendabilidad se trabajó 65% -200 mallas, dosificación de espumante H-150 se mantuvo en 36 g/T.

**Tabla 20** Balance metalúrgico de Plomo, cobre y zinc de mineral común

M-04	% Peso	Ensaye químico					% Distribución				
		Ag gr/ton	Cu%	Pb%	Zn%	Fe%	%Ag	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe
Conc. Cu	0,59	7 975,04	27,67	10,67	2,44	9,26	39,34	37,35	5,91	0,37	0,48
Conc. Pb	1,89	2 290,09	10,57	45,31	2,57	4,67	36,12	45,61	80,28	1,26	0,77
Conc. Zn	5,34	173,93	0,71	0,52	57,66	4,44	7,73	8,64	2,6	79,55	2,06
Relave Final	92,17	21,89	0,04	0,13	0,79	12,09	16,8	8,4	11,21	18,82	96,7
Cab. (calc.)	100	120,07	0,44	1,07	3,87	11,52	100	100	100	100	100

Nota. Datos de laboratorio

En la tabla 20 se observa, que la recuperación de cobre alcanza el 37,35%, el plomo alcanza 80,28% de recuperación y el zinc tiene 79,55%. Los concentrados son de buena calidad, siendo 27,67% para cobre, 45,31 para el plomo y 57,66% para el zinc. En esta prueba la recuperación de cobre baja más debido a que el cobre se lixivio.

### C. Condiciones de operación de flotación cobre (mineral Travieso)

#### Molienda:

- Peso de mineral : 1000 g
- Agua : 500 cc
- Tiempo de molienda : 11,22 minutos
- **Cianuro de sodio** : **30 - 35 g/Tn**
- Granulometría : 65% -200 mallas

#### Flotación Rougher Bulk

- pH de flotación : 8,9
- sulfato de zinc : 200 g/Tn
- **Z-11/Z-6** : 25 - 30 g/Tn
- Espumante H-150 : 25 g/Tn
- Tiempo Acond : 2 minutos
- Flotación : 3 minutos

En la siguiente tabla le presentamos los puntos de dosificación de los reactivos de flotación.

**Tabla 21** *Condiciones de flotación del mineral de travieso*

Reactivos gr/ton						
Nombre	Tiempo (min)	pH	NaCN	Z-11/Z-6	Cal	H-150
Molienda	7,5 – 10,6 y 13,8	10,97	30			
Ro-Bk	3	10,97		20		31
Scv-Bk	2	10,8		10		
1° Cl Bk	3	9,8	10			
2° Cl Bk	3	9,8				
3° Cl Bk						
Total, de reactivos en gr/ton			40	30	2 350	31

*Nota.* Elaboración Propia

Culminado las pruebas metalúrgicas se procedió a realizar los cálculos para determinar las respectivas recuperaciones.

En esta **segunda prueba** se dosifico el **NaCN en 35 g/T** y combinación de colector **Z-11/Z-6 en 25 g/T**. Los restos de los parámetros se mantuvo como constantes.

**Tabla 22** Balance metalúrgico batch de Mineral Travieso

MT-02	% Peso	Ensaye químico					% Distribución				
		Ag gr/ton	Cu%	Pb%	Zn%	Fe%	%Ag	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe
Conc. Cu	12,38	377,6	25,89	1,16	2,72	16,13	84,11	94,82	84,54	82,75	7,58
Relave Final	87,62	10,08	0,2	0,03	0,08	27,78	15,89	5,18	15,46	17,25	92,42
<b>Cab. (calc.)</b>	<b>100</b>	<b>55,57</b>	<b>3,38</b>	<b>0,17</b>	<b>0,41</b>	<b>26,34</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

*Nota.* Datos tomados de laboratorio

En esta prueba se tiene alta recuperación de cobre con 94,82% con un grado de concentrado de 25,89%

**Tercera prueba** experimental consistió en dosificar **NaCN en 30 g/T** y combinación de colector **Z-11/Z-6 en 30 g/T**. Los restos de los parámetros se mantuvo como constantes.

**Tabla 23** Balance metalúrgico batch de Mineral Travieso

MT-03	% Peso	Ensaye químico					% Distribución				
		Ag gr/ton	Cu%	Pb%	Zn%	Fe%	%Ag	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe
Conc. Cu	14,94	314,15	21,48	0,97	2,35	22,19	84,48	94,97	84,99	84,99	12,59
Relave Final	85,06	10,14	0,2	0,03	0,07	27,07	15,52	5,03	15,01	14,52	87,41
<b>Cab. (calc.)</b>	<b>100</b>	<b>55,57</b>	<b>3,38</b>	<b>0,17</b>	<b>0,41</b>	<b>26,34</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

*Nota.* Datos tomados de laboratorio

En esta prueba la recuperación de cobre se incrementa a 94,97% con un grado de concentrado de 21,48%.

Cuarta prueba experimental consistió en dosificar **NaCN en 35 g/T** y combinación de colector **Z-11/Z-6 en 30 g/T**. Los restos de los parámetros se mantuvo como constantes.

**Tabla 24** Balance metalúrgico batch de Mineral Travieso.

MT-04	% Peso	Ensaye químico					% Distribución				
		Ag gr/ton	Cu%	Pb%	Zn%	Fe%	%Ag	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe
Conc. Cu	15,19	310,85	21,15	0,78	2,06	21,49	85	94,99	69,49	76,52	12,2
Relave Final	84,81	9,83	0,2	0,06	0,11	27,71	15	5,01	30,51	23,48	87,8
<b>Cab. (calc.)</b>	<b>100</b>	<b>55,57</b>	<b>3,38</b>	<b>0,17</b>	<b>0,41</b>	<b>26,77</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

*Nota.* Datos tomados de laboratorio

En esta prueba la recuperación de cobre se incrementa a 94,99% con un grado de concentrado de 21,15%.

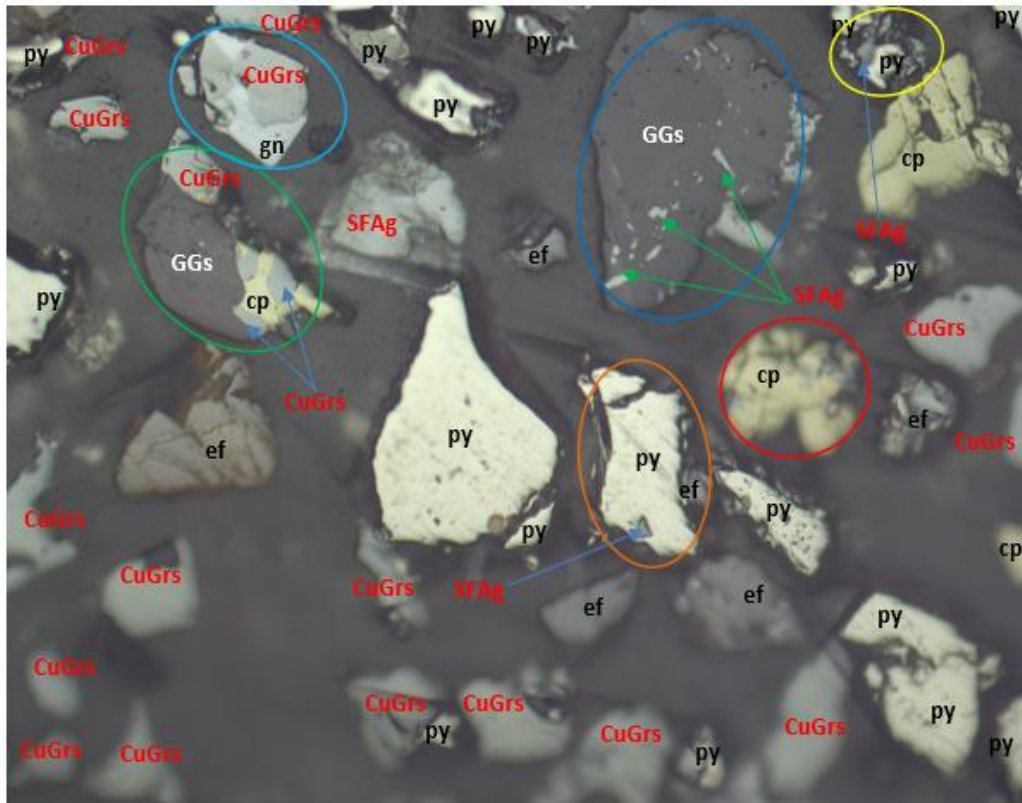
#### 4.2.6. Estudios de microscopia óptica

Con el concentrado cobre, plomo y zinc se realizaron los estudios de **microscopia** óptica, para lo cual la muestra flotada fue deslamada a malla 400, secada, homogenizada, pesada en 15 gramos para la elaboración de las briquetas para el posterior pulido y estudio de microscopia.

- Esfalerita (znS)
- Galena (PbS)
- Calcopirita (CuFeSe)
- Cerusita (PbCo)
- Pirita ( FeS<sub>2</sub>)
- Arsenopirita (FeAsS)
- Marcasita (FeS<sub>2</sub>)
- Magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)
- Hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- Goethita ( FeO.OH)
- Gangas

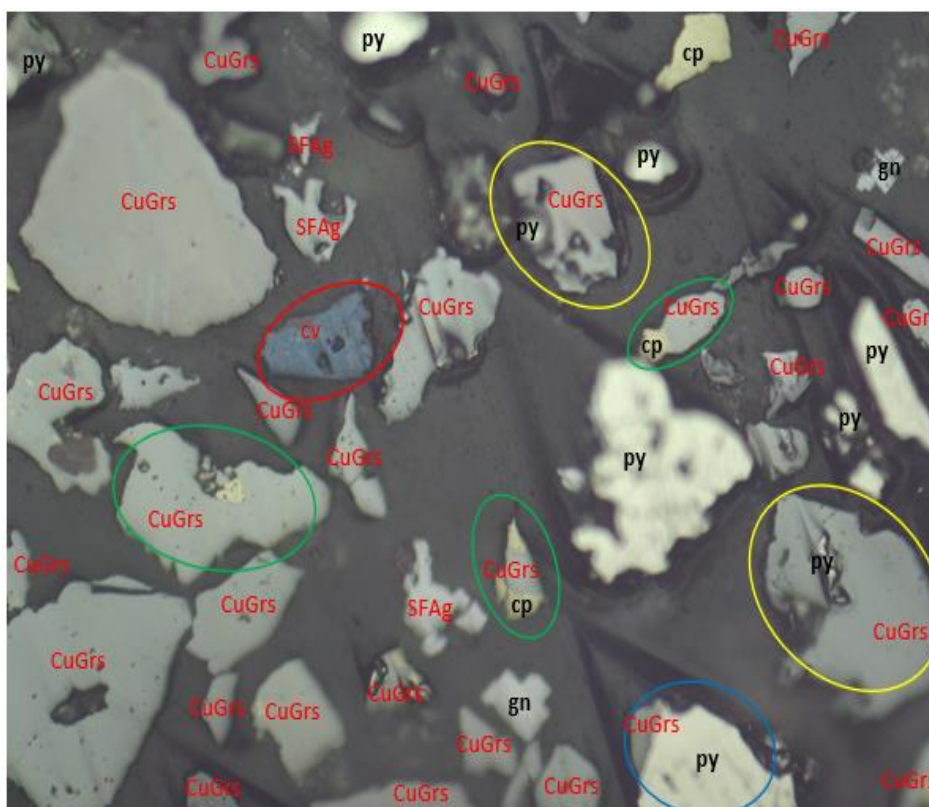
De los estudios de microscopia óptica se obtuvieron las siguientes imágenes:

*Figura 7 Concentrado de cobre malla + 200 bicromato*



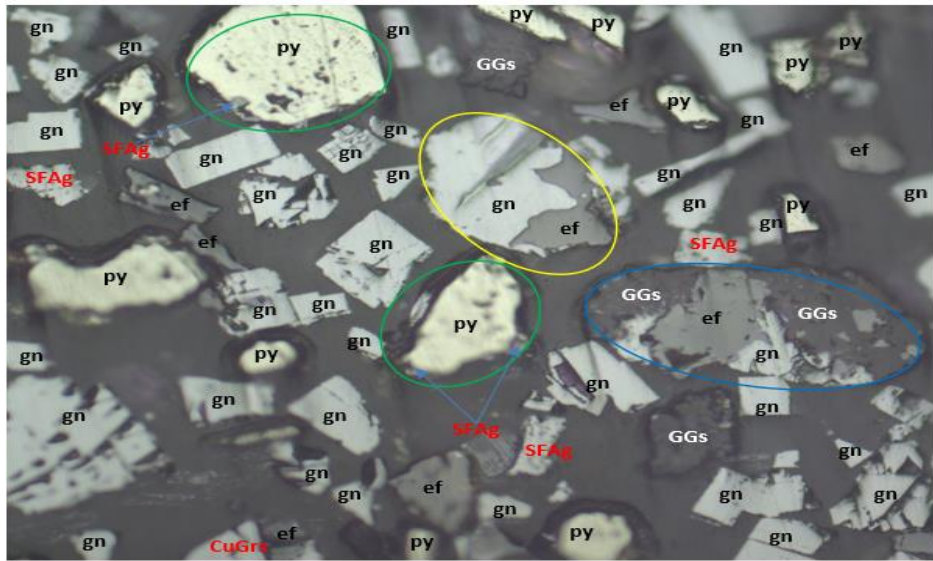
En la imagen se observa dentro del área verde partícula mixta de cobres grises – calcopirita – ganga (CuGrs/cp/GGs), dentro del área celeste partícula mixta galena - cobres grises (gn/CuGrs), dentro del área amarilla mixta de sulfosal de plata – pirita (SFAg/py), dentro del área anaranjado partícula de pirita con inclusiones de sulfosales de plata (SFAg...py), dentro del área azul inclusiones de sulfosales de plata en ganga (SFAg...GGs) y dentro del área rojo partícula de calcopirita de calcopirita con inclusiones de sulfosales de plata (SFAg..cp). Completando la vista se observa partículas libres de cobres grises (CuGrs), calcopirita (cp), esfalerita (ef), sulfosales de plata (SFAg) y pirita (py).

**Figura 8** Concentrado COBRE malla + 200 (Metabisulfito)



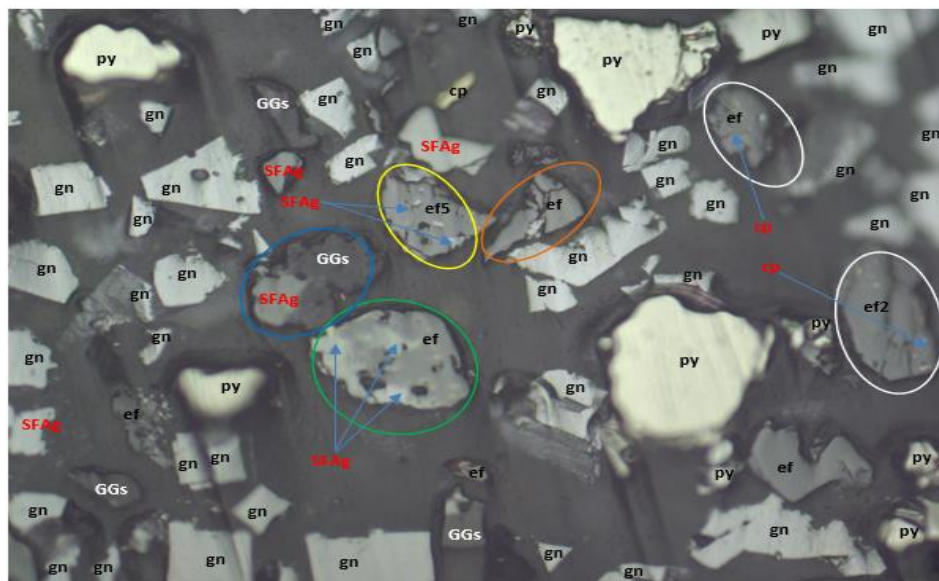
En la imagen se observa dentro del área azul partícula mixta de cobre gris – pirita (CuGRs/py), dentro de las áreas amarillas partículas de cobres grises con inclusiones de pirita (py...CuGrs), dentro de las áreas verdes partícula de cobre gris con inclusiones de calcopirita (cp...CuGrs) y dentro del área rojo partícula de cobre secundario – covelita (cv). Completando la vista se observa partículas libres de cobres grises (CuGrs), calcopirita (cp), galena (gn), esfalerita (ef) y pirita (py).

*Figura 9 Concentrado PLOMO malla + 200 (Bicromato)*



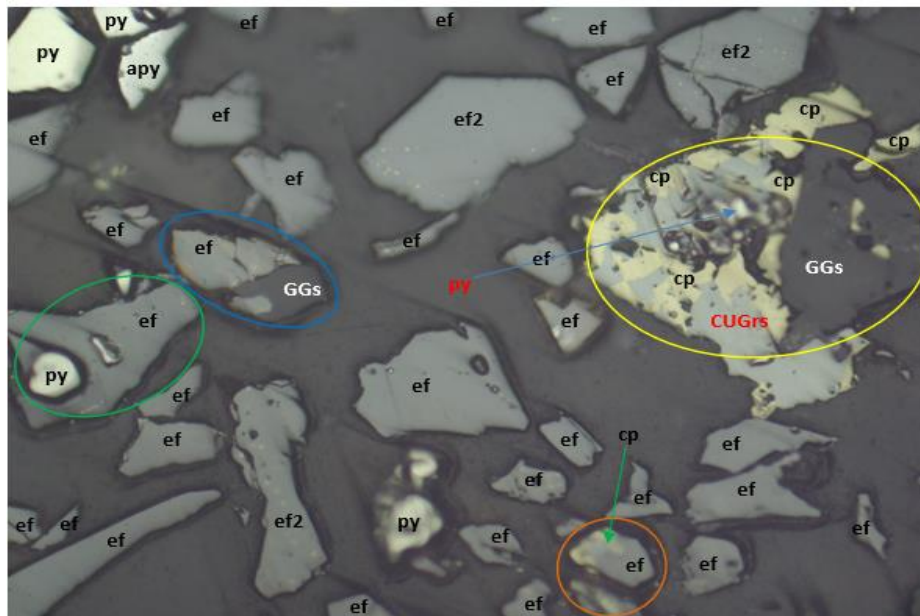
En la imagen se observa dentro del área amarilla partícula mixta de galena – esfalerita (gn/ef), dentro del área azul partícula mixta de galena – esfalerita – ganga (gn/ef/GGs) y dentro de las áreas verdes partícula de pirita con inclusiones de sulfosales de plata (SFAg...py). Completando la vista se observa partículas libres de galena (gn), esfalerita (ef), cobre gris (CuGrs), pirita (py) y gangas (GGs).

*Figura 10 Concentrado PLOMO malla + 200 (Metabisulfito)*



En la imagen se observa dentro del área verde partícula mixta de sulfosal de plata – esfalerita (SFAg/ef), dentro del área azul partícula mixta de sulfosal de plata – ganga (SFAg/GGs), dentro del área anaranjado partícula mixta de esfalerita tipo – galena (ef/gn), dentro del área amarilla partícula de esfalerita tipo5 (ef5: inclusiones de sulfosales de plata en esfalerita) y dentro de las áreas blancas partícula de esfalerita tipo2 (ef2: inclusiones de calcopirita en esfalerita). Completando la vista se observa partículas libres de galena (gn), esfalerita (ef), calcopirita (cp), sulfosal de plata (SFAg), pirita (py) y gangas (GGs).

**Figura 11** Concentrado ZINC malla + 200 (Metabisulfito)



En la imagen se observa dentro del área anaranjado partícula mixta de calcopirita – esfalerita (cp/ef), dentro del área azul partícula mixta de esfalerita – ganga (ef/GGs), dentro del área amarilla partícula mixta de cobre gris – calcopirita – ganga – pirita (CuGrs/cp/py/GGs) y dentro del área verde partícula mixta de esfalerita – pirita (ef/py). Completando la vista se observa partículas libres de esfalerita (ef), esfalerita tipo 2 (ef2: inclusiones de calcopirita en esfalerita) (ef2), arsenopirita (apy) y pirita (py).

**Figura 12** Concentrado ZINC malla + 200 (Metabisulfito)



En la imagen se observa dentro del área azul partícula mixta de sulfosal de plata – esfalerita tipo2 (SFAg/ef2), dentro del área amarilla partícula mixta de esfalerita – galena (ef/gn) y dentro del área verde partícula mixto de cobre gris – calcopirita con inclusiones de pirita (CuGrs/cp). Completando la vista se observa partículas libres de esfalerita normal (ef), esfalerita tipo 2 (ef2: inclusiones de calcopirita en esfalerita) (ef2), pirita (py) y ganga (GGs).

### **4.3. Prueba de hipótesis**

#### **Hipótesis Nula**

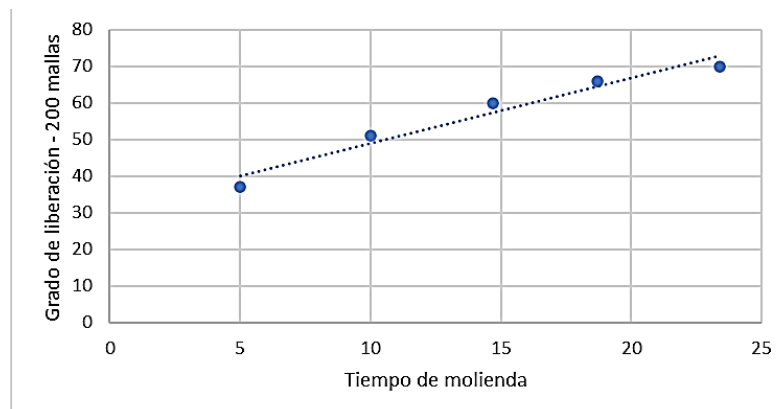
La evaluación de la moliendabilidad de los minerales polimetálicos no influye significativamente en el grado de liberación de las especies minerales en la Empresa Pan American Silver Huaron, Pasco – 2024.

#### **Hipótesis Alterna**

La evaluación de la moliendabilidad de los minerales polimetálicos influye significativamente en el grado de liberación de las especies minerales en la Empresa Pan American Silver Huaron, Pasco – 2024.

La demostración de la prueba de hipótesis lo realizamos con los datos de moliendabilidad del mineral común.

**Figura 13 Prueba de hipótesis**



**Nivel de significancia**

$\alpha = 0.01$

**Estadístico de prueba**

**Tabla 25 Correlación**

		Tiempo de molienda	Grado de liberación
Tiempo de molienda	Correlación de Pearson	1	,987**
	Sig. (bilateral)		,002
	N	5	5
Grado de liberación	Correlación de Pearson	,987**	1
	Sig. (bilateral)	,002	
	N	5	5

*La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).*

**Valor de decisión**

**(Si  $P > \alpha$  se acepta la  $H_0$ ) (Si  $P < \alpha$  se rechaza la  $H_0$ )**

$P=0,002 < \alpha = 0,01$

**Decisión**

Se acepta la hipótesis nula

## Conclusión

Existe suficiente evidencia para afirmar que la moliendabilidad de los minerales polimetálicos influye en el grado de liberación de las especies metálicas en la Empresa Minera Pan American Silver Huarón, al 99% de significancia.

### 4.4. Discusión de resultados

De los ensayos químicos para los minerales: común, campaña y travieso se determinaron que el *mineral común* tiene 165,15 g/t de plata, 0,49% de plomo, 3,82% de Zn y 10,98% de fierro, observado que los restos de los metales son bajos y no generan problema en la flotación de minerales. El *mineral de campaña* tiene 120,07 g/t de plata, 0,43% de cobre, 1,07% de plomo, 3,87% de Zn y 11,53% de fierro, observado que los restos de los elementos metálicos son bajos y no generan tampoco problema en la flotación de minerales. El *mineral travieso* después de los ensayos químicos tiene 55,57 g/t de plata, 3,38% de cobre, 0,17% de plomo, 0,41% de Zn, 26,34% de fierro y 1,31% de arsénico. Sin embargo, al observar el arsénico tiene una ley de 1,31%, que durante la flotación no va generar ningún problema y los restos de los elementos metálicos son bajos y no generan tampoco problema.

Respecto al análisis de malla valorada para *mineral común* se observa que los mayores contenidos metálicos de Ag, Pb y Zn se encuentran entre -30 mallas hasta -400 mallas, es así que la plata varía de 134,61 g/T a 348,31 g/T, el plomo de 0,85% a 5,89% y el zinc varía de 1,12% a 1,29%. El análisis de malla valorada para *mineral campaña* se observa que los mayores contenidos metálicos de Ag, se encuentran entre -10 mallas hasta -400 mallas, es así que la plata varía de 46,13 g/T a 178,24 g/T, el plomo en este mineral se encuentra entre -50 mallas a -400 mallas con 1,67% a 2,09% y el zinc también varía donde su contenido metálico por fracciones por malla es desde

-30 mallas a +400 mallas con un contenido de 1,47% a 1,29%. En conclusión, el mineral se encuentra en diferentes fracciones.

Respecto al *mineral travieso* también se observa que la plata se encuentra con alto contenido metálico desde -30 mallas hasta -400 mallas, oscilando des 1,46 g/T a 1,32 g/t de plata. El cobre tiene su mayor contenido metálico a partir de -50 mallas a -400 mallas que tienen leyes de 1,67% a 2,09% de cobre. El porcentaje zinc es bajo en casi todas las fracciones de la malla.

Los resultados del índice de trabajo determinado para mineral común se determino  $W_i = 13,29$  kw-h/TM considerándose como un mineral medio duro. El índice de trabajo de mineral común según las pruebas es  $W_i=14,66$  kw-h/TM, este mineral se considera en el rango de duro. Y, por último, de las pruebas de molienda para mineral travieso se determino que tienen un índice de trabajo de  $W_i=13,22$  kw-h/TM, considerándose como un mineral medio duro. **Riera & Valdivieso (2022)** evaluaron diferentes materiales más resistentes, roca mineralizada y andesita, mostrando índices de trabajo  $W_i = 21,13$  y  $16,56$  kWh/t, respectivamente. Mientras, otros materiales como el caolín, presentaron valores significativamente menores  $W_i = 6,10$  kWh/t.

Teniendo en cuenta el índice de dureza obtenido anteriormente, la prueba de moliendabilidad para los diferentes minerales se trabajo independientemente. El *mineral común* se trabajó a diferentes tiempos de molienda de 5, 10, 14,7, 18,9 y 23,4 minutos, encontrándose el 65% - 200 mallas a los 18,9 minutos. *Mineral campaña* se trabajó a diferentes tiempos de molienda de 5, 10, 15,5, 19,8 y 24,1 minutos, encontrándose el 65% - 200 mallas a los 19,81 minutos. En cuanto al *mineral Travieso* se trabajó a diferentes tiempos de molienda de 4, 7,5, 11,8 y 13,8 minutos, encontrándose el 65% - 200 mallas a los 11,2 minutos, donde se tiene una malla adecuada para el proceso de flotación.

De las pruebas de flotación del mineral común, la cuarta prueba P-004 tiene las mejores recuperaciones metálicas de cobre con 81,91%, plomo 68,89% y zinc 88,72%, siendo las dosificaciones de NaCN de 30 g/T y colector Z-11/Z-6 con 15 g/T. Se trabajó a una molienda de 65% - 200 mallas. Las pruebas de flotación realizadas con mineral campaña a 65% -200 mallas, el mejor resultado se tuvo en la tercera prueba M-03 lográndose recuperaciones de 56,78% de cobre, 74,98% de plomo y zinc 78,03%. La tercera prueba (MT-03) con mineral travieso se tuvo mejores resultados teniendo recuperaciones metálicas de 94,97% de cobre, la dosificación de reactivos fue de 30 g/T de NaCN y Z-11/Z-6 30 g/T.

## CONCLUSIONES

- El análisis químico evidenció que los tres tipos de mineral presentan composiciones distintas: el mineral Común destaca por su alto contenido de plata (165,15 g/t) y concentraciones significativas de plomo y zinc; el Campaña tiene una composición intermedia y balanceada; mientras que el Travieso se caracteriza por su riqueza en cobre (3,388%) y hierro (26,34%), aunque con bajos valores de plata, plomo y zinc. Esto justifica la necesidad de tratamientos específicos y adaptados a cada mineral. Los altos valores metálicos del análisis de malla valorada para mineral común se encuentran entre -30 malla a -400 mallas tanto para la plata, plomo y zinc. Los altos valores metálicos de mineral campaña se encuentran a partir de -10 mallas a -400 malla, el plomo de -50 malla a -400 mallas y el zinc de -30 mallas a 400 mallas. El mineral travieso tiene altos valores metálicos donde la Ag se encuentra a partir de -10 malla a -400 mallas y el cobre -50 mallas a -400 mallas.
- El mineral Campaña registró el valor más alto de  $W_i$  (14,66 kWh/TM), evidenciando su mayor resistencia a la molienda, mientras que Común y Travieso presentaron valores menores (13,29 y 13,22 kWh/TM, respectivamente). Estos resultados muestran que el consumo energético está directamente relacionado con la dureza de los minerales, siendo un factor crítico en la planificación de la molienda y la eficiencia energética de la planta.
- Las pruebas de moliendabilidad muestran que el mineral Travieso requiere menor tiempo de molienda para alcanzar los porcentajes de reducción deseados (% M - 200), mientras que los minerales Común y Campaña demandan tiempos mayores. Esto indica que Travieso es más fácil de reducir, reflejando su menor dureza relativa frente a los otros minerales. En las pruebas de flotación a 65% - 200 mallas de los diferentes tipos de minerales, trabajando con mineral común, las recuperaciones alcanzadas en la flotación se obtuvieron en la prueba P-004, teniendo cobre con 81,91%, plomo 68,89% y zinc 88,72%.

La prueba M-03 con mineral común es la mejor debido a que se obtuvo altas recuperaciones de 56,78% de cobre, 74,98% de plomo y zinc 78,03%. Y, por último, en la tercera prueba MT-03 flotando con mineral travieso se tuvo la mejor recuperación con 94,97% de cobre.

## RECOMENDACIONES

- Ajustar los tiempos y condiciones de molienda de acuerdo con la dureza y composición de cada mineral, priorizando parámetros específicos para Campaña debido a su mayor resistencia y para Travieso por su mayor facilidad de reducción.
- Implementar estrategias de control de energía, considerando que los minerales más resistentes requieren un mayor consumo de energía, para reducir costos operativos y mejorar la eficiencia de la planta.
- Realizar muestreos periódicos de los minerales para verificar su composición química y comportamiento frente a la molienda, asegurando un control adecuado de los parámetros operativos y mejorando la previsión de resultados en planta.
- Diseñar y dimensionar los molinos y equipos de conminución teniendo en cuenta las diferencias de dureza y composición de los minerales, evitando sobredimensionamientos y garantizando eficiencia operativa.
- Usar la información de  $W_i$  y moliendabilidad para ajustar el grado de liberación de partículas y granulometría, optimizando la recuperación de metales valiosos como plata, plomo y cobre en los procesos de concentración.
- Dado que cada mineral responde de manera distinta a la molienda, se recomienda realizar pruebas complementarias de liberación y flotación para asegurar una recuperación máxima y eficiente de los metales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alulima Morocho. (2021). Caracterización mineralógica y análisis del grado de liberación de los minerales de cobre-molibdeno de la Mina Mirador [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54133>
- Alvarez Risco, A. (2020). Clasificación de las Investigaciones. Universidad de Lima, 150.
- Andrea Blanco, E. (2020). Bloque II – Capítulo 8. Molienda. Universidad de Cantabria, 1-55.
- Austin, L. G., & Concha A., F. (2013). Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación. CYTED. [https://www.academia.edu/4003258/Austin\\_Concha\\_Disenio\\_y\\_Simulacion\\_de\\_circuitos\\_de\\_Molienda\\_y\\_Clasificacion](https://www.academia.edu/4003258/Austin_Concha_Disenio_y_Simulacion_de_circuitos_de_Molienda_y_Clasificacion)
- Blanco. (2020). Moliendabilidad de minerales chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/b844a893-fc50-4602-9250-60ea30baffcc/content>
- Baumgartner, E.A (2016). Caracterización mineralógica detallada en el depósito de Cu-Au Cerro Corona—La clave fundamental para la geometalúrgia y la optimización de procesos. 1-4.
- Carhuas de la Cruz, H. M., & Cervantes Sosa, F. (2023). Optimización del Hidrociclón en el circuito de molienda para la recuperación de Pb-Ag en la planta concentradora Paragsha—Empresa Administradora Cerro S.A.C. - Pasco – 2023 [Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/3566>
- Carrasco Díaz, S. (2008). Metodología de la investigación científica: Pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación – Biblioteca. <https://fcctp.usmp.edu.pe/biblioteca/2023/03/30/metodologia-de-la-investigacion-cientifica-pautas-metodologicas-para-disenar-y-elaborar-el-proyecto-de-investigacion/>

- Coello Velásquez, A. L., & Tijonov, O. N. (2021). Molienda de minerales multicomponentes: Modelo íntegro-diferencial para la valoración de la energía. 17(3-4), 49-53.
- Cuadros Romero, D. R. (2020). Evaluación de la moliendabilidad para el tratamiento de minerales sulfurados de cobre [Universidad Nacional San Agustín de Arequipa]. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/5a94ba68-3d60-4813-8e47-e98b5ed29791>
- Espinoza Castillo, B. J. (2021). Efecto del cianuro de sodio en el tratamiento de minerales polimetálicos para la concentración por flotación de menas de plomo y zinc [Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/5774>
- Esteban Huayanay, C. E. (2022). Aplicación de la función Rosin Rammler para el control del circuito de molienda—Clasificación de la planta concentradora San Expedito Pasco [Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2657>
- Ingeniería Metalúrgica. (2018). La determinación del grado de liberación mineralógica (p. 33). Universidad Nacional del Centro del Perú. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://www.911metallurgist.com/wp-content/uploads/2015/11/determinacion-grado-liberacion.pdf>
- Leyton Arce, J. J. (2022). Metodología experimental para identificar oportunidades de mejora de la eficiencia energética en el proceso de molienda del mineral de cobre utilizando un molino de bolas de 0,5 HP [Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/items/b8cc0777-3d42-4da8-a45f-4e657216d35b>
- Lucas Picoy, A. J., & Simon Martinez, M. A. (2024). Tratamiento de los minerales polimetálicos para el incremento de la recuperación del concentrado de plomo en la Unidad Minera El Porvenir Milpo – Pasco – 2023 [Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/4923>

- Neikov, O. D. (2019). Trituración y molienda mecánica. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081005439000026?via%3Dihub>
- Noa Quispe, F. (2016). Determinación de fragmentación del mineral en voladura de tajeos aplicando la teoría de conminución de la unidad minera Untuca—Cori Puno SAC. [Universidad Nacional del Altiplano]. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/3796>
- Procesos metalúrgicos. (2021). Molienda y clasificación de minerales (p. 46). Asociación Educativa CETEMIN.
- RA Mariano, CL Evans, & E. Manlapig. (2016). Definition of random and non-random breakage in mineral liberation. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089268751630125X>
- Riera Loachamín, D. E., & Valdivieso Crespo, F. S. (2022). Determinación del Índice de Moliendabilidad en materiales metálicos y no metálicos mediante la implementación de un molino de Bond [Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/12517>
- Rojas Lava, J. D. (2018). Evaluación de índice de trabajo, (Work Index); en un yacimiento tipo pórfido de cobre y su implicancia geometalúrgica [Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/items/41a12c51-167b-49ec-9cd0-f621b8be1f14>
- Rosales Marín, G., Andrade Martínez, J., Alvarado Macías, G., Espinosa Serrano, E., & Nava Gómez, D. (2020). Investigación experimental en el consumo de energía específica y reducción de tamaño en la molienda de bolas usando diferentes tipos de levantador. Ingeniería Investigación y Tecnología, 21(2), 1-8.
- Sherif Eskandarany. (2015). Aleación mecánica. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781455777525000012>

- Surco Choque, C. J. (2022). Evaluación del tamaño de partícula óptimo en molienda para la concentración por flotación en minera Coripuno [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/98eae999-526f-4ef2-b13a-d80f678e9c52>
- Viloria Cedeño, N. E. (2016). Metodología para investigaciones aplicadas con enfoque transdisciplinario: Sociales y tecnológicas (Serie de libros arbitrados de la Dirección de Publicaciones de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador). María Eugenia Carrillo / Marta De Sousa. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://upel.edu.ve/wp-content/uploads/2024/05/019-Metodologia-para-investigaciones-aplicadas-con-enfoque-transdisciplinario-sociales-y-tecnologicas.pdf>
- Wills, B. A. (1981). Tecnología de procesamiento de minerales. Tratamiento de menas y recuperación de minerales (2nd ed). Pergamon Press.

## ANEXOS

### INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

**Tabla 1** *Ensaye químico de mineral*

Ag g/t	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe	%As	%Mn	%Bi	%Sb	%CuOx	%PbOx	%ZnOx
-----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-------	-------	-------

**Tabla 2** *Análisis granulométrico de malla valorada.*

Mesh	Micrones	Peso gr.	%Peso	Ag g/T	% Pb	% Zn
6	3350					
8	2360					
10	1700					
14	1168					
20	850					
30	600					
40	425					
50	300					
70	212					
100	150					
140	106					
200	75					
270	53					
325	45					
400	38					
-400	38					

**Tabla 3** *Clasificación de dureza del mineral*

Descripción	Limite Wi (Kw-H/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
Extremadamente duro	21,77



**Tabla 7 Balance metalúrgico de Plomo, cobre y zinc**

P-002	% Peso	Ensaye químico					% Distribución				
		Ag gr/ton	Cu%	Pb%	Zn%	Fe%	%Ag	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe
Conc. Cu											
Conc. Pb											
Conc. Zn											
Relave Final											
Cab. (calc.)											

**Tabla 8 Balance metalúrgico batch**

MT-02	% Peso	Ensaye químico					% Distribución				
		Ag gr/ton	Cu%	Pb%	Zn%	Fe%	%Ag	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe
Conc. Cu											
Relave Final											
Cab. (calc.)											

**Anexo 2**

**Mapa Ubicación de la Minera Pan American Silver - Unidad Huaron**



Nota. Google Maps

## Ubicación

Localidades	Distancia	Descripción de Trayectoria
1. La Oroya -Cerro de Pasco	130 km	Carretera Central Asfaltada
2. Cerro de Pasco – Huarón	60 km	Carretera Pasco-Huayllay

## **MATRIZ DE CONSISTENCIA**

## Evaluación de la moliendabilidad de los minerales polimetálicos para determinar el grado de liberación en la empresa Pan American Silver Huaron, Pasco-2024

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES E INDICADORES			METODOLOGIA
<p>Problema general</p> <p>¿De qué manera la moliendabilidad de los minerales polimetálicos influye en el grado de liberación de las especies minerales en la Empresa Pan American Silver Huaron, Pasco – 2024?</p>	<p><b>Objetivo general</b></p> <p>Evaluar la moliendabilidad de los minerales polimetálicos para determinar el grado de liberación de las especies minerales en la Empresa Pan American Silver Huaron, Pasco – 2024.</p>	<p><b>Hipótesis general</b></p> <p>La moliendabilidad de los minerales polimetálicos influye significativamente en el grado de liberación de los minerales valiosos en la empresa Pan American Silver Huaron, Pasco – 2024.</p>	<p><b>Variable independiente</b></p> <p>✓ Grado de liberación de</p>	<p><b>Dimensiones</b></p> <p><b>D1:</b> Grado de liberación = <math>\frac{\text{suma } A * S * F}{\text{Tot part mix.}}</math></p>	<p><b>Indicadores</b></p> <p><b>I1:</b> suma A = Suma del área  <b>I2:</b> S = Superficie  <b>I3:</b> F = Factor  <b>I4:</b> Tot part mix. = Total de partículas mixtas</p>	<p><b>Tipo de investigación:</b> Aplicativo</p> <p><b>Método de investigación:</b> Científico</p> <p><b>Diseño de investigación:</b> Experimental</p>
<p>Problemas específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>PG1</b> ¿Cuál es la composición mineralógica y granulométrica del mineral polimetálico que ingresa al circuito de molienda en la unidad Huaron?</li> <li>• <b>PG2</b> ¿Cuál es el índice de trabajo (Work Index) de los distintos tipos de minerales polimetálicos en la empresa Pan American Silver Huaron?</li> <li>• <b>PG3</b> ¿Cuál es la moliendabilidad de los diferentes minerales polimetálicos, para la</li> </ul>	<p><b>Objetivos específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>OE1</b> Determinar la composición mineralógica y granulométrica de los diferentes minerales polimetálico que influyen en el grado de liberación de elementos metálicos.</li> <li>• <b>OE2</b> Determinar el work index de los minerales polimetálicos para determinar la dureza del mineral.</li> <li>• <b>OE3</b> Determinar el tiempo de molienda de los diferentes tipos de</li> </ul>	<p><b>Hipótesis específicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>HE1:</b> La composición mineralógica y granulométrica de los diferentes tipos de minerales influyen en el grado de liberación de elementos metálicos.</li> <li>• <b>HE2 :</b> El work index de los minerales polimetálico influye en la dureza del mineral tratado.</li> <li>• <b>HE3:</b> El tiempo de molienda de los minerales polimetálicos influyen en el grado de</li> </ul>	<p>✓ Evaluación de la moliendabilidad</p>	<p><b>Dimensiones</b></p> <p><b>D1:</b> Caracterización mineralógica.  <b>D2:</b> Distribución del tamaño de partícula.  <b>D3:</b> Flotación.</p>	<p><b>Indicadores</b></p> <p><b>I1:</b> Minerales libres y mixtos.  <b>I2:</b> Micrones (µm)</p>	<p><b>Nivel de investigación:</b> Explicativa</p> <p><b>Población:</b> La población de la investigación estuvo conformada por todos los minerales polimetálicos procesados en la planta concentradora de Pan American Silver Huaron durante el periodo de estudio, incluyendo los tipos Común, Campaña y Travieso. Cada mineral presenta características particulares de moliendabilidad y grado de liberación, con valores que van del 60 % al 62 % en Común y Campaña, y del 67 % al 70 % en Travieso, lo que evidencia la variabilidad de la población y la necesidad de un análisis detallado para optimizar el control del proceso de molienda.</p>

---

liberación del mineral valioso?

- **PG4** ¿Cuál es la recuperación metálica de los diferentes minerales a 65% -200 mallas de grado de liberación?

minerales polimetálicos para determinar el grado de liberación.

- **OE4** Realizar pruebas de flotación a 65% -200 mallas de grado de liberación para determinar la recuperación metálica.

liberación de los elementos metálicos.

- **HE4:** El grado de liberación influye en la recuperación metálica de los diferentes minerales.

---

**Muestra:**

La muestra se obtuvo mediante muestreo mecánico con equipos automáticos, asegurando representatividad. La masa mínima de cada tipo de mineral (Común, Campaña y Travieso) se calculó según la teoría de Gy, considerando un tamaño máximo de partícula de 1,20 cm y una precisión del 5 %, resultando en 50 kg por mineral, lo que permitió realizar cuarteos y réplicas analíticas.

**Técnicas de recolección de datos:**

Se emplearon observación directa, recopilación de datos de campo, interpretación y análisis de resultados, caracterización mineralógica, análisis granulométrico y revisión bibliográfica.

**Instrumentos de recolección de datos:**

Formularios y reportes metalúrgicos, molino de laboratorio, mesa de rodillos, celdas de flotación (ensayos complementarios), peachímetros, potenciómetros, balanzas analíticas y Marcy, y software estadístico y ofimático para procesamiento y análisis de datos.

---