



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Evaluación metalúrgica del mineral polimetálico de Pb-
Zn en el proceso de flotación en la pequeña minería de la
provincia de Huaylas-Ancash**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTORES

Rodolfo César CAMPOS ESPINOZA

Angel Jonathan JARA VALENCIA

ASESOR

Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

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

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

Referencia bibliográfica

Campos, R. & Jara, A. (2025). *Evaluación metalúrgica del mineral polimetálico de Pb-Zn en el proceso de flotación en la pequeña minería de la provincia de Huaylas-Ancash*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Rodolfo César Campos Espinoza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	46371880
URL de ORCID	No aplica
Datos de autor	
Nombres y apellidos	Angel Jonathan Jara Valencia
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	46371880
URL de ORCID	No aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08608364
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-5818-8569
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Daniel Florencio Lovera Dávila
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06450640
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Manuel Prudencio Caballero Ríos
Tipo de documento	DNI

Número de documento de identidad	09136425
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Luis Vidarte Merizalde
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07397539
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.17. Flotación de Minerales
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Ancash Provincia: Huaylas
Año o rango de años en que se realizó la investigación	ABRIL 2023- DICIEMBRE 2023
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



«Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana»

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

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el Jueves 14, del mes de agosto del 2025 siendo las 18:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO, Lovera Dávila
Ing. MANUEL PRUDENCIO, Caballero Ríos
Ing. JOSÉ LUIS, Vidarte Merizalde

(PRESIDENTE)
(MIEMBRO)
(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA Titulada: «EVALUACIÓN METALÚRGICA DEL MINERAL POLIMETÁLICO DE Pb-Zn EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN LA PEQUEÑA MINERÍA DE LA PROVINCIA DE HUAYLAS-ANCASH» presentada por Don: ANGEL JONATHAN JARA VALENCIA, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: **METALÚRGICO**.

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

.....SATISFACCIÓN.....

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

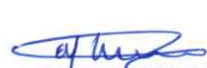
.....CATORCE (14) APROBADO.....

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis Mancomunada por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **Angel Jonathan Jara Valencia**.

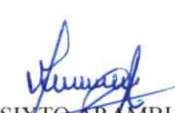
Siendo las **19:10** horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis Mancomunada.

Lima, 14 de agosto de 2025


Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente


Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RÍOS
Miembro


Ing. JOSÉ LUIS VIDARTE MERIZALDE
Miembro


Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
ASESOR DE TESIS



«Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana»

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

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el Jueves 14, del mes de agosto del 2025 siendo las 18:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO, Lovera Dávila
Ing. MANUEL PRUDENCIO, Caballero Ríos
Ing. JOSÉ LUIS, Vidarte Merizalde

(PRESIDENTE)
(MIEMBRO)
(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA Titulada: «EVALUACIÓN METALÚRGICA DEL MINERAL POLIMETÁLICO DE Pb-Zn EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN LA PEQUEÑA MINERÍA DE LA PROVINCIA DE HUAYLAS-ANCASH» presentada por Don: RODOLFO CÉSAR CAMPOS ESPINOZA, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: **METALÚRGICO**.

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

.....SATISFACCIÓN.....

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

.....CATORCE (14) APROBADO.....

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis Mancomunada por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **Rodolfo César Campos Espinoza**.

Siendo las **19:10** horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis Mancomunada.

Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente

Lima, 14 de agosto de 2025

Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RÍOS
Miembro

Ing. JOSÉ LUIS VIDARTE MERIZALDE
Miembro

Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
ASESOR DE TESIS



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N.º001178-2023-D-FIGMMG/UNMSM de la tesis mancomunada, cuyo título es “EVALUACIÓN METALÚRGICA DEL MINERAL POLIMETÁLICO DE PB-ZN EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN LA PEQUEÑA MINERÍA DE LA PROVINCIA DE HUAYLAS-ANCASH” presentado por los bachilleres **RODOLFO CÉSAR Campos Espinoza y ANGEL JONATHAN Jara Valencia** para optar el título profesional de Ingeniero Metalúrgico.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **13%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

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

Lima, 28 de mayo de 2024

Firma del Asesor _____

Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURU ROJAS

DNI: 08608364

ÍNDICE

RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
CAPÍTULO I: Introducción	1
CAPÍTULO II: Planteamiento del Problema.....	3
2.1. Descripción de la Problemática	3
2.2. Problemática de la Investigación.....	4
2.2.1. Problema General	4
2.2.2. Problemas Específicos	4
2.3. Justificación de la Investigación.....	5
2.4. Objetivos de la Investigación	5
2.4.1. Objetivos Generales.....	5
2.4.2. Objetivos Específicos	5
2.5. Hipótesis y Variables.....	6
2.5.1. Hipótesis General	6
2.5.2. Hipótesis Específicas	6
2.5.3. Identificación de Variables.....	7
2.5.4. Operacionalización de Variables	9
CAPÍTULO III: Marco Teórico	10
3.1. Antecedentes de la Investigación	10
3.2. Bases Teóricas	14
3.2.1. Flotación de Minerales	14
3.2.1.1. Elementos de Flotación	15
3.2.1.1. Elementos Tecnológicos del Proceso	16

3.2.1.2.	Fases e Interfaces en el Proceso de Flotación.....	18
3.2.1.2.1.	Características de las Distintas Fases	18
3.2.1.2.2.	Características de las Distintas Interfases.....	20
3.2.1.3.	Mecanismos de Flotación	25
3.2.1.4.	Reactivos de Flotación	26
3.2.1.4.1.	Colectores	27
3.2.1.4.2.	Espumantes.....	29
3.2.1.4.3.	Los modificadores	29
3.2.2.	Comercialización de Minerales	30
3.2.2.1.	Conceptos Básicos de Comercialización de Minerales	31
3.2.2.2.	Términos del Contrato de Comercialización	32
3.2.2.3.	El Mercado de Minerales y Metales	33
3.2.2.4.	Participantes en la Comercialización de Minerales.....	33
3.2.2.4.1.	Modalidades de Venta – Tipos de Contratos	34
3.2.2.5.	Bolsas de Metales	34
3.2.2.5.1.	Cotizaciones Internacionales	34
3.2.2.5.2.	Principales Mercados de Minerales y Metales	35
3.2.2.5.3.	Principales Elementos en los Contratos Comerciales de Concentrados de Minerales.....	37
3.2.3.	Producción Metálica Nacional.....	39
3.2.3.1.	Producción de Zinc Nacional	40
3.2.3.2.	Producción de Plomo Nacional	41
CAPÍTULO IV: Metodología de la Investigación		43

4.1.	Tipo y Diseño de Investigación.....	43
4.2.	Unidad de Análisis	44
4.3.	Población de Estudio	44
4.4.	Tamaño de Muestra	44
4.5.	Procedimiento Metodológico de la Investigación	45
CAPÍTULO V: Resultados.....		49
5.1.	Análisis Mineralógico	49
5.1.1.	Descripción Microscópica de las Especies.....	49
5.1.2.	Distribución Volumétrica y Grados de Liberación.....	50
5.1.3.	Entrelazamiento de Minerales y Posibilidades de Liberación	53
5.2.	Análisis Químico del Mineral de Cabeza	57
5.3.	Pruebas de Moliendabilidad	57
5.4.	Proceso Estándar de Flotación.....	58
5.5.	Flotación del Mineral de Cabeza – Etapa de Pb.....	59
5.5.1.	Diseños Experimentales para la Flotación de Pb.....	60
5.5.1.1.	Resultados de las pruebas de Flotación de Pb	61
5.5.1.2.	Análisis de la Varianza para la Recuperación de Pb ...	62
5.5.1.3.	Análisis de la Varianza para la Calidad de Pb.....	64
5.5.1.4.	Análisis de la Varianza para la Recuperación de Ag...65	
5.5.1.5.	Análisis de la Varianza para la Calidad de Ag	67
5.5.1.6.	Optimización de la Flotación de Pb-Ag	69
5.6.	Flotación – Etapa de Zn.....	70
5.6.1.	Diseños Experimentales para la Flotación de Zn	70
5.6.1.1.	Resultados de las pruebas de Flotación de Zn.....	71

5.6.1.2.	Análisis de la Varianza para la Recuperación de Zn...	72
5.6.1.3.	Análisis de la Varianza para la Calidad de Zn.....	74
5.6.1.4.	Optimización de la Flotación de Zn	76
5.7.	Valorización de los Concentrados	77
CAPÍTULO VI: Discusión de Resultados.....		80
CONCLUSIONES.....		85
RECOMENDACIONES		87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		88
ANEXOS.....		91

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor incondicional y su constante apoyo. A mi esposa e hija, por su paciencia y comprensión y a todas las personas que me inspiraron en este camino, este trabajo está dedicado a ustedes.

Ángel Jonathan Jara Valencia

A mis queridos padres y mis hermanos que me apoyaron en todo el transcurso de la carrera, a mis maestros y compañeros de la universidad que sin su enseñanza y su ayuda no hubiese sido posible realizar esta tesis.

Rodolfo César Campos Espinoza

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de alguna manera en la realización de este trabajo. En primer lugar, agradecer a nuestro asesor de tesis, Ing. Aramburú, por su orientación, apoyo y paciencia a lo largo de este proceso. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Agradecemos profundamente a nuestras familias por su inquebrantable apoyo y comprensión durante estos años de estudio. Su amor y aliento fueron nuestra mayor motivación para alcanzar este logro.

Por último, agradezco a todas las personas que participaron en este estudio sin su participación, este trabajo no habría sido posible.

Gracias a todos los que contribuyeron de alguna manera en este proyecto. Su apoyo fue invaluable y siempre será apreciado.

RESUMEN

En este estudio se investigó un mineral proveniente del distrito de Huaylas, en Ancash, con una ley de cabeza de 17.41% de Pb, 12.93% de Zn, y 5.23 Oz/TC de Ag. La microscopia óptica permitió identificar las principales especies minerales, destacando la galena (20.56%) y la esfalerita (17.68%) como los minerales sulfurados predominantes de plomo y zinc, respectivamente, con un alto grado de liberación de partículas (98.89% para la galena y 99.82% para la esfalerita). También se detectaron trazas de calcopirita (1.27%), tetraedrita (0.69%) y plata nativa. La pirita fue el mineral mayoritario (34.38%), seguida de las gangas (24.51%). Los análisis químicos confirmaron las leyes de 17.41% de Pb, 12.93% de Zn y 5.23 Oz/TC de Ag, lo que respalda la viabilidad económica del tratamiento. En cuanto al estudio metalúrgico, se realizaron pruebas de flotación en dos etapas. La mejor recuperación de plomo se alcanzó en la prueba N°8 con un 97.35% de recuperación, una ley de 61.55% y 21.15 Oz/TC de Ag, utilizando una granulometría de 250 μ , 80 g/TM de AR-3418, 200 g/TM de ZnSO₄, 50 g/TM de NaCN, 20 g/TM de AR-1242, y 15 g/TM de MIBC, a un pH de 8.5. En la recuperación de zinc, la prueba N°6 alcanzó un 98.14% de recuperación, con una ley de 58.63%, usando una granulometría de 70% - 200 malla, 500 g/TM de CuSO₄, 50 g/TM de Z-11 y 15 g/TM de MIBC, a un pH de 11. Los resultados de valorización económica indicaron que una tonelada métrica de concentrado de plomo generó un valor de \$1327.88, mientras que el concentrado de zinc alcanzó un valor de \$1041.02 por tonelada. Estos resultados demuestran la rentabilidad potencial del proceso de flotación para los pequeños productores mineros de la provincia de Huaylas, Ancash, proporcionando una guía útil para transacciones de compra y venta de minerales en la región.

ABSTRACT

This study investigates a mineral from the Huaylas district in Ancash, with a head grade of 17.41% Pb, 12.93% Zn, and 5.23 Oz/TC Ag. Optical microscopy identified the main mineral species, with galena (20.56%) and sphalerite (17.68%) as the predominant lead and zinc sulfides, respectively, showing high particle liberation rates (98.89% for galena and 99.82% for sphalerite). Traces of chalcopyrite (1.27%), tetrahedrite (0.69%), and native silver were also detected. Pyrite was the predominant mineral (34.38%), followed by gangue minerals (24.51%). Chemical analysis confirmed grades of 17.41% Pb, 12.93% Zn, and 5.23 Oz/TC Ag, supporting the economic feasibility of metallurgical treatment. In the metallurgical study, flotation tests were conducted in two stages. The best lead recovery was achieved in test N°8, with 97.35% recovery, a grade of 61.55%, and 21.15 Oz/TC of Ag, using a particle size of 250 μ , 80 g/TM of AR-3418, 200 g/TM of ZnSO₄, 50 g/TM of NaCN, 20 g/TM of AR-1242, and 15 g/TM of MIBC, at a pH of 8.5. Zinc recovery reached 98.14% in test N°6, with a grade of 58.63%, using a particle size of 70% - 200 mesh, 500 g/TM of CuSO₄, 50 g/TM of Z-11, and 15 g/TM of MIBC, at a pH of 11. Economic valuation showed that one metric ton of lead concentrate was valued at \$1327.88, while zinc concentrate was valued at \$1041.02 per ton. These results demonstrate the potential profitability of flotation processes for small-scale miners in the Huaylas region, providing a useful guide for mineral trading in the area.

NOMENCLATURA

py	Pirita
ef	Esfalerita
gn	Galena
cp	Calcopirita
Th	Tetraedrita
Ag	Plata nativa
LIMs	Limonitas
GGs	Gangas
%	Porcentaje
mm	Milímetros
g	Gramos
Kg	Kilogramos
Min	Minutos
L	Litros
μ	Micras
\$	Dólares
S/.	Soles
”	Pulgadas
min	Minutos
TM	Toneladas métricas
Oz	Onzas
ppm	Partes por millón
TMH	Toneladas métricas húmedas

TMS	Toneladas métricas secas
ctv	Centavos
lb	Libras
GL	Grados de libertad
SC	Suma de cuadrados
MC	Media de los cuadrados
S	Desviación estándar
R	Regresión

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Principales mercados de minerales y metales a nivel mundial</i>	37
Tabla 2 <i>Principales elementos pagables y penalizables</i>	39
Tabla 3 <i>Producción minera metálica</i>	39
Tabla 4 <i>Variación interanual</i>	40
Tabla 5 <i>Total de especies identificadas en la muestra</i>	49
Tabla 6 <i>Volumen y liberación porcentual de las especies</i>	51
Tabla 7 <i>Enlaces de las especies y posibilidades de liberación</i>	54
Tabla 8 <i>Leyes reportadas en el análisis químico</i>	57
Tabla 9 <i>Reporte de P80 en función del tiempo de molienda</i>	58
Tabla 10 <i>Condiciones de operación de la flotación estándar</i>	59
Tabla 11 <i>Valores de la campaña actual</i>	59
Tabla 12 <i>Condiciones de operación de la flotación de Pb</i>	60
Tabla 13 <i>Variables del diseño experimental de flotación de Pb</i>	60
Tabla 14 <i>Diseño de pruebas de flotación de Pb</i>	61
Tabla 15 <i>Resultados de las pruebas de flotación de Pb</i>	61
Tabla 16 <i>Análisis de las variables para la recuperación de Pb</i>	62
Tabla 17 <i>Coeficientes de correlación para la recuperación de Pb</i>	63
Tabla 18 <i>Análisis de las variables para la calidad de Pb</i>	64
Tabla 19 <i>Coeficientes de correlación para la calidad de Pb</i>	65
Tabla 20 <i>Análisis de las variables para la recuperación de Ag</i>	66
Tabla 21 <i>Coeficientes de correlación para la recuperación de Ag</i>	66
Tabla 22 <i>Análisis de las variables para la calidad de Ag</i>	68
Tabla 23 <i>Coeficientes de correlación para la calidad de Ag</i>	68

Tabla 24 <i>Datos optimizados de la flotación de Pb-Ag</i>	69
Tabla 25 <i>Condiciones de operación de la flotación de Zn</i>	70
Tabla 26 <i>Variables del diseño experimental de flotación de Zn</i>	71
Tabla 27 <i>Elaboración del diseño experimental de flotación de Zn empleando Minitab</i> 19	71
Tabla 28 <i>Resultados de las pruebas de flotación de Zn</i>	72
Tabla 29 <i>Análisis de las variables para la recuperación de Zn</i>	73
Tabla 30 <i>Coeficientes de correlación para la recuperación de Zn</i>	73
Tabla 31 <i>Análisis de las variables para la calidad de Zn</i>	75
Tabla 32 <i>Coeficientes de correlación para la calidad de Zn</i>	75
Tabla 33 <i>Datos optimizados de la flotación de Zn</i>	76
Tabla 34 <i>Contrato de comercialización de concentrado de Pb</i>	78
Tabla 35 <i>Contrato de comercialización de concentrado de Zn</i>	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Partículas en la flotación</i>	16
Figura 2 <i>Corte transversal de una celda de flotación</i>	17
Figura 3 <i>Fenómeno de adsorción de materiales tensoactivos</i>	21
Figura 4 <i>Hidrofobización del mineral con colector</i>	22
Figura 5 <i>Definición del ángulo de contacto</i>	23
Figura 6 <i>Ángulo de contacto en solido de distinta mojabilidad</i>	24
Figura 7 <i>Diagrama de la concentración iónica</i>	25
Figura 8 <i>Mineralización de las burbujas de aire</i>	26
Figura 9 <i>Comportamiento teórico de precios en los mercados bursátiles</i>	35
Figura 10 <i>2022-2023: Producción mensual de zinc</i>	41
Figura 11 <i>Estructura de la producción de zinc por empresas, enero – agosto</i>	41
Figura 12 <i>2022-2023: Producción mensual de plomo</i>	42
Figura 13 <i>Estructura de la producción de plomo por empresas, enero – agosto</i>	42
Figura 14 <i>Diagrama descriptivo del procesamiento</i>	48
Figura 15 <i>Volumen de las especies</i>	52
Figura 16 <i>Liberación de las especies</i>	53
Figura 17 <i>Enlaces de las especies</i>	54
Figura 18 <i>Micrografía 1: Cristales de esfalerita (ef) – con pequeñas inclusiones de calcopirita (cpl) dando lugar a textura de exsolución. La esfalerita se encuentra microfracturada, granos de pirita (py) y galena (gn) reemplazando a la ganga (GGs).</i>	55

Figura 19 <i>Micrografía 2: Cristales de pirita (py) euhedrales y subhedrales reemplazados y cooroidos por la galena (gn) Se observa asimismo cristales de pirita de fina granulometría incluidos en ella. La galena rellena también porosidades de la pirita. .</i>	55
Figura 20 <i>Micrografía 3: Plata nativa (Ag) en microfracturas de pirita (py), galena (gn) reemplazando a la pirita a traves de bordes y fracturas. Los sulfuros estan reemplazando a la ganga (GGs).....</i>	56
Figura 21 <i>Micrografía 4: Granos de tetraedrita (th) reemplazando parcialmente a pirita (py), y calcopirita III, galena (gn), granos de galena y cristales de pirita en intersticios de la ganga (GGs).</i>	56
Figura 22 <i>Curva de moliendabilidad.....</i>	58
Figura 23 <i>Gráfico normal de efectos estandarizados para la recuperación de Pb</i>	63
Figura 24 <i>Gráfico normal de efectos estandarizados para la ley de Pb</i>	65
Figura 25 <i>Gráfico normal de efectos estandarizados para la recuperación de Ag</i>	67
Figura 26 <i>Gráfico normal de efectos estandarizados para la ley de Ag</i>	69
Figura 27 <i>Gráfico normal de efectos estandarizados para la recuperación de Zn.....</i>	74
Figura 28 <i>Gráfico normal de efectos estandarizados para la ley de Zn</i>	76
Figura 29 <i>Diagrama de Pareto para la recuperación de Pb</i>	81
Figura 30 <i>Diagrama de Pareto para la calidad de Pb.....</i>	81
Figura 31 <i>Diagrama de Pareto para la recuperación de Zn.....</i>	82
Figura 32 <i>Diagrama de Pareto para la calidad de Zn</i>	83
Figura 33 <i>Comparativa de la mejora en la valorización</i>	84

CAPÍTULO I: Introducción

La flotación es el proceso comúnmente empleado para concentrar especies de minerales sulfurados, y en algunos casos es posible flotar especies oxidadas con un tratamiento previo. Las espumas de flotación contienen tres fases, y las partículas sólidas ejercen una influencia en la estabilización o desestabilización de las espumas dependiendo de su naturaleza, es decir, el grado de hidrofobicidad, tamaño y concentración de finos. Recientemente, las tasas de consumo de metales de plomo y zinc han aumentado significativamente, principalmente debido a la creciente demanda de la industria de la construcción (Navidi & Rashchi, 2008; Kostović & Gligorić, 2015).

La extracción y el beneficio en la industria metalúrgica de concentrados polimetálicos sulfurados de cobre, plomo y zinc puede presentar varios desafíos, y más aún cuando los contenidos de dichos metales son tan bajas que se hace necesario diseñar varias etapas de limpieza, la cual dependerá de las especies mineralógicas presentes en el yacimiento, sea de valor comercial o estéril, estos influirán positiva o negativamente en el proceso de recuperación de los valores metálicos (Huallpa, 2018).

La extracción de minerales polimetálicos como cobre, plomo y zinc requiere un análisis integral que incluya pruebas metalúrgicas para optimizar la recuperación de valores metálicos, así como una evaluación técnica y económica del proyecto. Esto implica garantizar que los ingresos superen los costos de inversión, extracción y procesamiento, y que las operaciones cumplan con las regulaciones y normativas locales. La realización de estudios de factibilidad y análisis de costo-beneficio resulta fundamental para determinar la viabilidad de estos proyectos mineros (Sotomayor, 2018).

Las pruebas metalúrgicas se direccionan teniendo en cuenta las características geológicas del yacimiento, es decir que se configuran los procesos metalúrgicos en

función a la mineralogía del yacimiento, encontrándose muchas veces un desafío cuando existe la presencia de especies perjudiciales para el proceso de flotación, como es el caso de los contenidos de insolubles asociados a los depósitos de minerales sulfurados, minerales de ganga micácea y arcillosa, también se consideran perjudiciales, entre otras (Villaverde & Lara, 2020).

CAPÍTULO II: Planteamiento del Problema

2.1. Descripción de la Problemática

La cantidad y calidad de los recursos de minerales presentes en el yacimiento son factores claves para determinar el mejor proceso de concentración. La exploración y evaluación del yacimiento deben proporcionar información sobre la cantidad y calidad de los minerales, así como su ubicación y la facilidad para extraerlos. Uno de las principales problemáticas en la compra y venta de minerales en la pequeña minería de Huaylas - Ancash, es el desconocimiento del proceso de flotación de menas polimetálicas, así como no tomar en cuenta la importancia de la caracterización de las especies de valor económico. Por lo general, los lotes de minerales extraídos son vendidos a precios determinados In Situ, mediante mutuo acuerdo entre comprador y vendedor. Esta transacción informal no toma en cuenta, factores como: Recuperación y calidad de los concentrados a vender, así como las especies contaminantes que presenta el concentrado, es por tal razón que se hace necesario la evaluación metalúrgica del mineral polimetálico de esta zona (Montero, 2012).

Desde una perspectiva económica, el precio de los metales es un factor crítico en rentabilidad de la explotación de minerales polimetálicos. Los precios de los metales fluctúan en función de la oferta y la demanda del mercado mundial, ya que esta depende de las necesidades de las distintas industrias. Por ello, contar con un conocimiento actualizado del mercado y de las proyecciones de demanda futura resulta fundamental para evaluar la viabilidad económica a largo plazo de un proyecto.

En la actualidad, uno de los principales desafíos en la explotación de yacimientos de minerales polimetálicos de Cu-Pb-Zn es identificar las condiciones óptimas de procesamiento mediante pruebas metalúrgicas. Estas pruebas permiten determinar los

parámetros necesarios para maximizar la recuperación de los metales, lo cual es crucial para que el proyecto sea económicamente viable. Además, factores como los altos costos de inversión y procesamiento, junto con el cumplimiento de estrictas normativas legales, hacen imprescindible realizar un detallado análisis de costo-beneficio y factibilidad técnica.

2.2. Problemática de la Investigación

2.2.1. Problema General

- ¿Cómo puede la evaluación metalúrgica del proceso de flotación en mejora de la recuperación Pb y Zn en la pequeña minería del distrito de Huaylas – Ancash?

2.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo contribuye la caracterización mineralógica mediante microscopía óptica de luz reflejada a la identificación de especies minerales, distribución volumétrica, grado de liberación y asociaciones en los minerales polimetálicos de Pb-Zn en la pequeña minería de la provincia de Huaylas – Ancash?
- ¿Qué variables del proceso de flotación pueden modificarse para mejorar la eficiencia en la concentración de Pb y Zn en minerales polimetálicos provenientes de la pequeña minería en la provincia de Huaylas – Ancash?
- ¿Cómo permite la evaluación metalúrgica estimar el valor económico de los concentrados de Pb y Zn en la pequeña minería de la provincia de Huaylas – Ancash?

2.3. Justificación de la Investigación

La investigación metalúrgica es esencial para el desarrollo y la optimización de los procesos de producción en la industria de la minería y la metalurgia. La investigación experimental y teórica en metalurgia proporciona información valiosa sobre los materiales, los procesos y las tecnologías, lo que permite mejorar la calidad del producto, reducir costos y aumentar la eficiencia de la producción.

La investigación del procesamiento de flotación de minerales polimetálicos de Pb-Zn en el departamento de Ancash, permitirá darle viabilidad al procesamiento de estos tipos de yacimientos de manera eficiente y así poder incrementar la producción metálica de plomo y zinc a nivel mundial, y por consiguiente el aumento de los ingresos por producción de estos metales.

El alcance de la presente investigación está orientado para determinar la viabilidad técnica y económica de la extracción y procesamiento por flotación, a partir de minerales polimetálicos de Pb-Zn en la provincia de Huaylas – Ancash.

2.4. Objetivos de la Investigación

2.4.1. *Objetivos Generales*

- Realizar la evaluación metalúrgica del proceso de flotación de minerales polimetálicos para aumentar la recuperación Pb y Zn en los concentrados obtenidos por los pequeños productores mineros de la provincia de Huaylas – Ancash.

2.4.2. *Objetivos Específicos*

- Caracterizar la muestra de mineral polimetálicos de Pb-Zn de los pequeños productores mineros, para determinar las especies mineralógicas

presentes, distribución volumétrica, grados de liberación, partículas libres y entrelazados en la provincia de Huaylas – Ancash.

- Mejorar el proceso de flotación de minerales polimetálicos para aumentar la concentración de Pb y Zn en el concentrados de los pequeños productores mineros de la provincia de Huaylas – Ancash.
- Determinar la valorización de los concentrados de Pb y Zn mediante la evaluación metalúrgica de los minerales polimetálicos de la provincia de Huaylas – Ancash.

2.5. Hipótesis y Variables

2.5.1. Hipótesis General

- La evaluación metalúrgica del proceso de flotación podría permitir mejorar la recuperación y calidad de los concentrados de Pb y Zn obtenidos por los pequeños productores de la provincia de Huaylas – Ancash.

2.5.2. Hipótesis Específicas

- La caracterización de los minerales polimetálicos de Pb-Zn mediante microscopía óptica de luz reflejada posibilitaría la identificación de las especies minerales presentes, su distribución volumétrica, asociaciones y grados de liberación, en la provincia de Huaylas – Ancash.
- La evaluación metalúrgica del proceso de flotación de minerales polimetálicos podría contribuir al incremento de la concentración de Pb y Zn, en la provincia de Huaylas – Ancash.

- La evaluación metalúrgica de los minerales polimetálicos podría facilitar la valorización de los concentrados de Pb y Zn en la pequeña minería de la provincia de Huaylas – Ancash.

2.5.3. Identificación de Variables

Las variables fueron determinadas en función de los objetivos del estudio, la experiencia operacional adquirida y con el respaldo técnico de los antecedentes estudiados sobre flotación de minerales polimetálicos. Se consideraron tanto las condiciones operativas, como los reactivos y parámetros comúnmente utilizados en la concentración de Pb y Zn en procesos de flotación similares.

En la etapa de flotación de plomo se considerarán las siguientes variables:

Variable dependiente

- Recuperación de plomo (%)

Variable independiente

- Granulometría
- AR-3418

Variables constantes

- % Sólidos
- AR-1242
- pH
- Tiempo de Acondicionamiento (min)
- Tiempo de flotación (min)
- RPM del impulsor
- Flujo de Aire (L/min)

En la etapa de flotación de zinc se considerarán las siguientes variables:

Variable dependiente

- Recuperación de zinc (%)

Variable independiente

- Sulfato de cobre (CuSO_4)
- Xantato Z-11

Variables constantes

- % Sólidos
- pH
- Tiempo de Acondicionamiento (min)
- Tiempo de flotación (min)
- RPM del impulsor
- Flujo de Aire (L/min)

En la etapa de valorización de los concentrados se considerarán las siguientes variables:

Variable dependiente

- Valor del concentrado de plomo
- Valor del concentrado de Zinc

Variable independiente

- Ley de plomo
- Ley de zinc
- Contaminantes

2.5.4. Operacionalización de Variables

El procesamiento de los resultados obtenidos en laboratorio se realizó en una primera etapa elaborando hojas de cálculo en Excel, las cuales permitieron determinar el balance metalúrgico de las pruebas experimentales realizadas, determinando las variables dependientes estudiadas en la investigación.

En la segunda etapa se aplicó un software estadístico de nombre Minitab 19, la cual nos permitió analizar la varianza de los valores de recuperación y calidad obtenidos en el balance metalúrgico.

Así también, para los cálculos económicos de los indicadores del proyecto, se usaron hojas de cálculo en MS Excel 2019.

CAPÍTULO III: Marco Teórico

3.1. Antecedentes de la Investigación

(Wei et al., 2021), introdujeron un nuevo proceso de flotación con menor alcalinidad y sin descalcificación para aumentar la recuperación de los valores de Pb-Zn, minimizar costos y contaminación ambiental. Los resultados de los experimentos a escala de laboratorio mostraron que este enfoque innovador permitió una recuperación efectiva de ambos minerales, con un reemplazo del proceso altamente alcalino por uno menos alcalino y la eliminación de la descalcificación. Se logró recuperar un 43.37% de plomo en el concentrado de plomo, con una ley de plomo del 52.73%, y un total del 84.42% de zinc. Este nuevo enfoque se validó a escala industrial.

(Foroutan et al., 2021) en su artículo “Critical importance of pH and collector type on the flotation of sphalerite and galena from a low-grade lead–zinc ore” investigaron la influencia de la alcalinidad de la pulpa y la dosificación de colectores específicos para recuperar Pb-Zn en el proceso de flotación. Los autores emplearon reactivos del tipo xantato de etilo y Aero 3418 para la etapa de Pb, y Aero 3477 y xantato de amilo en la etapa de flotación de valores de zn. Demostraron que la mejor ley de pb se logró con Aero 3418 a un pH de 8, pero esto también resultó en mayores contenidos de Fe y Zn en el concentrado de Pb, afectando la calidad del concentrado de zn. La máxima ley de Zn y recuperación (42.9% y 76.7%, respectivamente) se obtuvo a un pH de 6 con Aero 3477 como colector. Se seleccionaron pH 8 y pH 6 como los valores óptimos para los circuitos de flotación de plomo y zinc, respectivamente, en función de los resultados obtenidos.

(Irannajad et al., 2019) en su artículo “Surface dissolution-assisted mineral flotation: A review” se enfocaron en el potencial de la disolución superficial como un método para modificar la superficie de los minerales en la flotación, abordando los

parámetros y mecanismos involucrados, las propiedades superficiales de los minerales y cómo este pretratamiento afecta el comportamiento de flotación de diversos minerales. La disolución superficial conduce a cambios específicos en la química cristalina, la química superficial y la química de solución de los minerales, lo que influye en la eficacia del proceso de flotación. Este método se ha investigado en una variedad de minerales, destacando su mayor aplicabilidad en minerales de óxido y silicato. Para futuros estudios, se recomienda centrarse en las características cinéticas y termodinámicas de los minerales, así como en el desarrollo de una metodología para su aplicación a nivel industrial.

(Kursun & Ulusoy, 2015) en su artículo “Zinc Recovery from a Lead–Zinc–Copper Ore by Ultrasonically Assisted Column Flotation” lograron mejorar la recuperación de zinc a partir de minerales de plomo, zinc y cobre mediante la flotación en columna con y sin pretratamiento ultrasónico. Se optimizaron los parámetros operativos, resultando en un concentrado de zinc con un 16.93% de Zn y una recuperación del 29.41% en una etapa de flotación en columna sin ultrasonido. Al aplicar el pretratamiento ultrasónico en estas condiciones, se obtuvo un concentrado con un 24.51% de Zn y una recuperación del 39.97%. Además, se lograron mejoras significativas utilizando tres etapas de limpieza y tres etapas de flotación de barrido por columna, alcanzando un concentrado de zinc con un 53.41% de Zn y una recuperación del 71.48%. Finalmente, con la asistencia de pretratamiento ultrasónico antes de la flotación en columna en múltiples etapas, se obtuvo un concentrado de zinc con un 73.32% de Zn y una recuperación del 76.44%. Los resultados indican que la utilización de ultrasonidos incrementó la ley y la recuperación del zinc, posiblemente debido a la dispersión ultrasónica, la mayor adsorción de colectores y la cavitación hidrodinámica que favoreció la interacción entre partículas y burbujas.

(Huallpa, 2018) en su tesis “Concentración por flotación de minerales sulfurados: plata, plomo, cobre, zinc y oro en minerales polimetálicos” aplicaron el proceso de flotación en varias etapas, incluyendo la flotación bulk, flotación de zinc y flotación diferencial para recuperar cobre y plomo, donde utilizaron reactivos específicos para estos minerales, a una granulometría de 60% -200m. Se logró obtener un concentrado de zinc mediante dos etapas de limpieza, y la separación entre cobre y plomo se logró deprimiendo el plomo (PbS) utilizando una mezcla de bicromato de potasio, CMC (almidón y fosfato monosódico).

(Ejtemaei et al., 2014) en su artículo “A review of zinc oxide mineral beneficiation using flotation method” abordaron el desafío de extraer zinc de relaves mineros con bajo contenido de zinc oxidado. Se discuten dos enfoques principales: la flotación y la lixiviación ácida. Debido a las similitudes en la química de superficie de los minerales involucrados, la separación de minerales de óxido de zinc mediante flotación es compleja. Se considera que la lixiviación selectiva es prometedora, pero costosa en términos de ácido. Se propone preconcentrar el zinc a través de la flotación y luego aplicar métodos hidrometalúrgicos. El artículo ofrece una revisión crítica de los métodos de flotación de minerales de óxido de zinc, destacando factores clave como tipos de reactivos y parámetros de proceso. En resumen, proporciona una guía científica completa sobre la estrategia de flotación en la recuperación de zinc de minerales de óxido de zinc.

(Lee et al., 2009) en su artículo “Flotation of mixed copper oxide and sulphide minerals with xanthate and hydroxamate collectors” demostraron que el uso de hidroxamatos de n-octilo junto con colectores de sulfuro tradicionales permitió la recuperación exitosa de sulfuros y óxidos de cobre de minerales mezclados. Esto se logró sin disminuir la recuperación de sulfuro de cobre en comparación con el tratamiento de minerales de sulfuro de forma independiente. En una mezcla compuesta por un 70% de

mineral de sulfuro y un 30% de mineral de óxido, se alcanzó una alta recuperación de cobre de hasta un 95.5%. La recuperación de cobre utilizando una combinación de colectores resultó ser más efectiva que la recuperación lograda utilizando solo xantato, especialmente después de una posible sulfuración controlada.

(Önal et al., 2005) en su investigación “Flotation of Aladag oxide lead–zinc ores” examinaron una muestra de mineral de óxido de plomo-zinc con alto contenido de plomo y zinc de Kayseri, Turquía. Las pruebas iniciales de flotación no pudieron recuperar selectivamente el zinc, por lo que se enfocaron en la producción de concentrados de plomo. Se investigaron varios factores, como el número de etapas de flotación, la cantidad de reactivos como Na₂S y ZnSO₄, y la aplicación de concentración por gravedad antes de la flotación para mejorar la eficiencia. Se logró producir un concentrado de plomo con un alto contenido de plomo (65.42% de Pb) y una recuperación del 77% en un experimento de seis etapas. La mayoría del zinc permaneció en los desechos (12.23% de Zn). Luego, utilizando concentración por gravedad seguida de flotación, se obtuvo un concentrado de plomo con un promedio de 65.80% de Pb y una recuperación total de plomo del 86.5%. Sin embargo, la mayor parte del zinc permaneció en los desechos debido a su compleja estructura mineralógica, por lo que se sugiere la aplicación de procesos metalúrgicos adicionales para recuperar el zinc de los desechos.

(Sibanda et al., 2020) en su artículo “Enhancing the flotation recovery of copper minerals in smelter slags from Namibia prior to disposal” revelaron que las escorias contenían principalmente minerales de sulfuro de cobre, en forma de granos libres y finamente diseminados en la ganga de fayalita. En la primera fase de los estudios experimentales, las escorias se molieron al mismo grado que en la planta. Las pruebas de flotación se realizaron utilizando diversos reactivos comerciales, y las recuperaciones de cobre estuvieron entre 70-80%. En la segunda fase, los relaves de flotación se molieron

aún más finamente y se lograron recuperaciones acumuladas de cobre superiores al 90%. Se descubrió que el alquilditiofosfato de sodio, mercaptobenzotiazol (FC7245), era el reactivo de flotación secundario más efectivo para lograr altas recuperaciones de cobre. Esto representa una mejora significativa en comparación con el proceso de molino-flotación previo.

3.2. Bases Teóricas

3.2.1. Flotación de Minerales

El proceso de flotación de minerales es un método de separación de materiales de distintas composiciones químicas, la cual se lleva a cabo utilizando suspensiones acuosas y burbujas de gas, aprovechando las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas de los materiales.

La flotación es por lo general el principal método de concentración de especies sulfuradas, la cual implica la separación de componentes, es decir que la pulpa finamente molida formará una mezcla junto con los reactivos y el aire inyectado por los equipos para luego ser separada en componentes tipo concentrados y relaves.

La separación de los componentes puede llevarse a cabo mediante distintos procedimientos, dependiendo de los resultados que se esperé, por ejemplo, en la flotación colectiva donde se logran concentrar más de una especie mineral de valor económico, además de la flotación selectiva donde se logran recuperar concentrados finales.

Cuando los materiales de interés representan una proporción menor en el mineral y los materiales no deseados tienen un volumen significativo, las operaciones de flotación adquieren características de un proceso de concentración. Esto ocurre, por ejemplo, en la separación de minerales valiosos o no ferrosos de sus impurezas respectivas. Por otro

lado, cuando la fracción no deseada es minoritaria en el mineral, las operaciones de flotación se asemejan más a un proceso de purificación (Yianatos, 2005).

3.2.1.1. Elementos de Flotación

Se pueden observar tres etapas claramente definidas: sólida, líquida y gaseosa. La etapa sólida se refiere a los minerales que se desean separar. La fase líquida consiste en el agua y los reactivos de flotación con las condiciones de operación necesaria para la separación de las especies de minerales. Antes de llevar a cabo el proceso, los sólidos y el agua se preparan en forma de suspensiones llamadas pulpas, las cuales pueden contener desde unas cuantas unidades hasta un 40% de sólidos, y depende de las características físicas de las especies de minerales involucrados en el proceso.

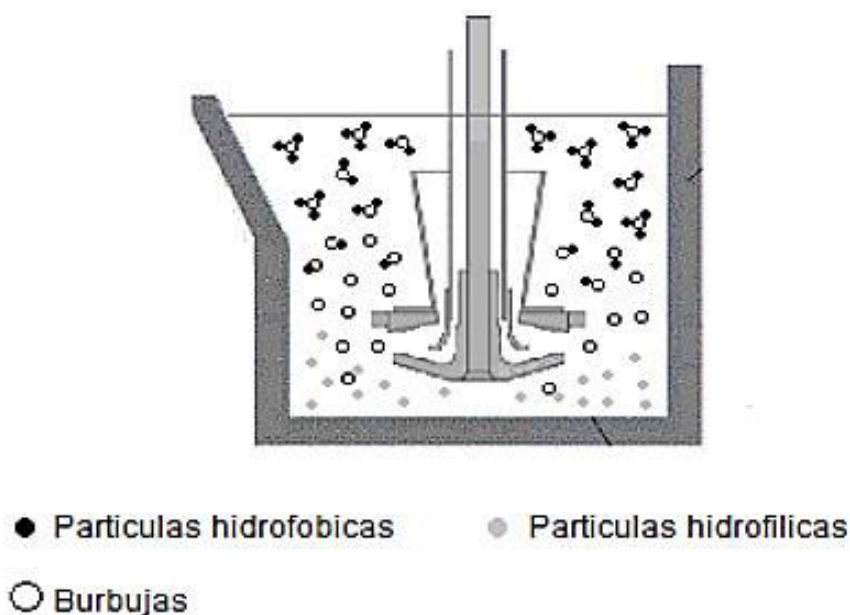
El gas empleado en las operaciones de separación es el aire, el cual se introduce en la pulpa de manera neumática o mecánica con el fin de crear burbujas que actúan como puntos de unión para las partículas sólidas. Fundamentalmente, este proceso se centra en cómo los sólidos interactúan con el agua, es decir, su capacidad de mojarse con el agua.

Por otro lado, los minerales, que pueden ser óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y otros, y que generalmente constituyen la mayor parte de los minerales no deseados o ganga, suelen ser hidrófobos, es decir, repelen el agua. También se observa que los minerales hidrofóbicos tienen afinidad por las burbujas de aire, es decir, se adhieren a ellas, mientras que los minerales hidrofílicos no tienen esa afinidad y no se adhieren a las burbujas, la cual constituye el principio de la flotación de las especies sulfuradas. Esta afinidad de las partículas sulfuradas por el aire genera que se arrastre con el flujo de aire adherida a la superficie de la burbuja de agua y flote en forma de espumas mineralizadas, tal como se ilustra en la Figura 1.

El proceso de flotación es único para cada tipo de yacimiento, de tal manera que las fases líquidas, sólidas y gaseosas se configuraran en función a las distintas especies de minerales involucrados en el proceso (Nguyen, 2013).

Figura 1

Partículas en la flotación



Nota: Según la forma y color representan partículas hidrofóbicas, hidrofílicas y burbujas (Sutulov, 1963).

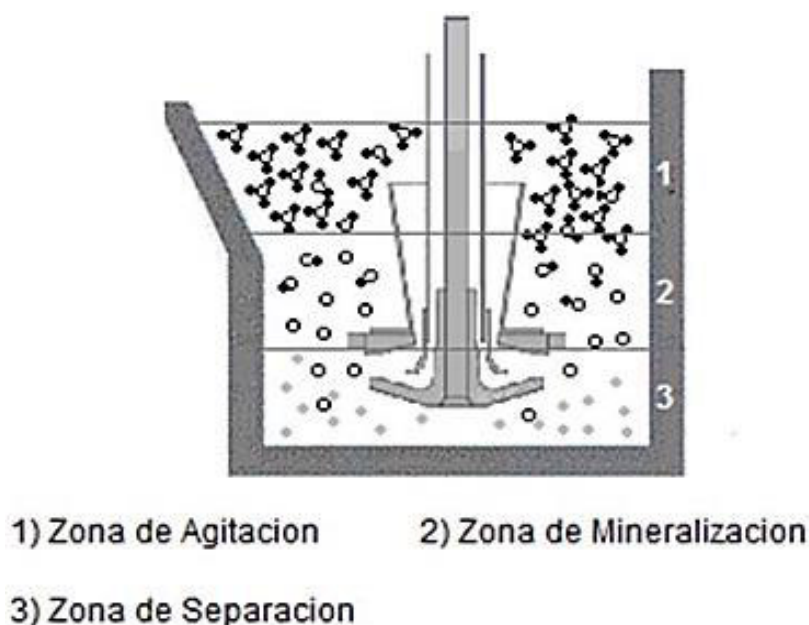
3.2.1.1. Elementos Tecnológicos del Proceso

El proceso de flotación se lleva a cabo a través de una serie de etapas. Inicialmente, el mineral crudo o materia prima se introduce en una planta de trituración en seco, donde se somete a dos o tres etapas de trituración hasta obtener fragmentos de aproximadamente 10 mm de tamaño. Estos fragmentos se envían a una planta de operación de molienda, donde, el mineral a una determinada granulometría se mezcla con agua y se alimenta a un tambor rotario provisto de bolas de acero de distintos tamaños,

alcanzando dimensiones de 50 a 100 micras, según su grado de dispersión. En esta etapa de molienda, el objetivo es reducir el mineral hasta el punto en que se libera de manera efectiva (Nguyen, 2013).

Figura 2

Corte transversal de una celda de flotación



Nota: Se tiene tres zonas (Sutulov, 1963).

El mineral previamente procesado se trata con una variedad de reactivos, algunos de los cuales tienen la finalidad de preparar la superficie de los minerales para que puedan interactuar con los reactivos (denominados modificadores), otros reactivos sirven para mejorar la hidrofobicidad de las especies sulfuradas, y finalmente, hay reactivos que contribuyen a la estabilidad de un colchón de espumas metálicas, uniforme y duradera (llamados agentes espumantes). Después de acondicionar las suspensiones de mineral con estos reactivos, se introducen en las máquinas de flotación, donde generalmente se

produce la separación, obteniendo un concentrado con los componentes valiosos y descargando la parte no deseada como relave (Castro, 2003).

3.2.1.2. Fases e Interfaces en el Proceso de Flotación

El proceso de flotación involucra la interacción de tres fases, siendo las fases líquidas (agua) y gaseosa (aire) prácticamente constantes en la mayoría de los casos, mientras que la fase sólida (minerales) es la que varía según las circunstancias específicas. Además de estos elementos esenciales en la flotación, es importante destacar la inclusión de reactivos que se incorporan para inducir cambios beneficiosos en el desarrollo del proceso. Asimismo, es relevante mencionar las posibles impurezas transportadas por minerales y agua en ocasiones (Azañero, 2015).

3.2.1.2.1. Características de las Distintas Fases

a. Sólido

Los sólidos, especialmente en el caso de los minerales, suelen exhibir una estructura cristalina que resulta de la composición química de las moléculas, iones y átomos que los conforman, cada uno de los cuales forma una entidad compleja. Al abordar los fenómenos de flotación, nos enfocamos en particular en las fuerzas de enlace químico y físico, incluyendo las fuerzas de Van der Waals, así como las fuerzas moleculares residuales que explican otros efectos secundarios. Cada partícula sólida sometida al proceso de flotación experimenta previamente una reducción de tamaño, un proceso que conlleva la ruptura de enlaces químicos o físicos, generando fuerzas residuales en su superficie. Estos enlaces pueden clasificarse en tres tipos distintos: iónicos, covalentes y metálicos, cada uno aportando propiedades específicas a la materia, algunas de las cuales tienen relevancia en el contexto de la flotación. Las características de hidrofilia e

hidrofobicidad que influyen en la flotabilidad natural de los minerales están estrechamente relacionadas con su polaridad.

b. Agua

El agua es el componente principal en el proceso de flotación, debido a su disponibilidad y bajo costo. La naturaleza de los enlaces de los átomos de hidrógeno y oxígeno en la molécula de agua provoca que los átomos de hidrógeno formen un ángulo de aproximadamente $109^{\circ}30'$ con respecto al átomo de oxígeno. Esta disposición angular es responsable de la distribución desigual de cargas eléctricas dentro de la molécula de agua.

En términos generales, en el proceso de hidratación, la adsorción de moléculas de agua se presenta de manera ordenada únicamente en las proximidades de la superficie sólida. Estas moléculas están alineadas de manera precisa según la orientación de sus polos. Por otro lado, las moléculas que constituyen la capa exterior alrededor de las partículas ya no mantienen una unión tan fuerte ni una orientación tan definida, y pueden estar sujetas a fenómenos de difusión, los cuales son provocados por variaciones de temperatura y movimientos dentro del líquido.

c. Gas

A menos que se trate de casos específicos en experimentos, en la industria de la flotación, se utiliza exclusivamente aire. El aire desempeña un papel químico en el proceso de flotación y actúa como el medio para llevar las partículas minerales hacia la superficie.

Además de la capacidad de los gases para disolverse en agua, en los procesos de flotación, es importante tener en cuenta la saturación de las burbujas de aire con vapor de

agua. Dado que los gases se adhieren activamente a la superficie de los minerales y tienen una influencia química sobre estos, este factor puede ser significativo, ya que la humedad, en presencia de oxígeno, puede aumentar considerablemente la oxidación. Por ejemplo, se ha demostrado que ciertos minerales puros no flotan sin una cierta oxidación, sino que más bien hay una adsorción de oxígeno en la superficie de estos minerales. Además, los metales nativos solo adquieren la capacidad de flotar después de interactuar con el oxígeno en su superficie.

En la actualidad se vienen desarrollando pruebas metalúrgicas de flotación evaluando la insuflación de otros tipos de gases como nitrógeno, además de ello, el tamaño de las partículas de gas es determinantes para estabilizar la espuma de flotación de las distintas partículas de minerales involucrados en un determinado proceso (Azañero, 2015).

3.2.1.2.2. *Características de las Distintas Interfases*

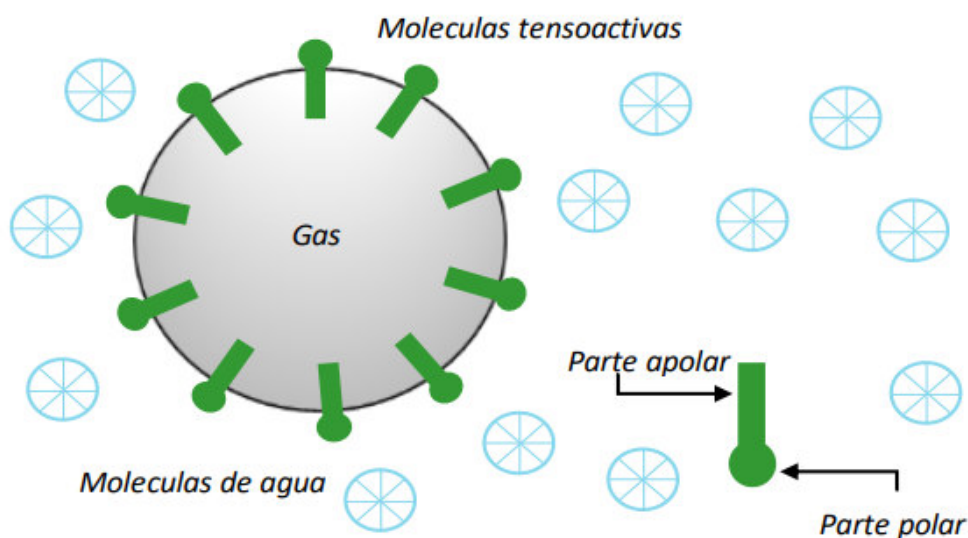
a. Interfase Gas – Líquido

En el proceso de flotación, es común que la interfaz se establezca entre el aire y el agua. En cualquier líquido (o sólido) que esté en equilibrio con su fase gaseosa, se observa la presencia de cierta cantidad de energía libre en su superficie, lo cual se cuantifica mediante la tensión superficial. Existen compuestos que se adhieren de manera selectiva en la interfaz entre el gas y el líquido, disminuyendo así la tensión superficial, y estos compuestos se conocen como tensioactivos. En el contexto de la flotación, a los tensioactivos empleados se les denomina agentes espumantes, debido a su capacidad de estabilizar la fase de espuma. Estos agentes también desempeñan un papel en la generación de pequeñas burbujas.

i) **Fenómeno de Adsorción:** Las interfaces entre gas y líquido desempeñan un papel significativo en los procesos de adsorción, especialmente cuando los líquidos contienen sustancias disueltas, es decir, en forma de soluciones. En estas circunstancias, se ha notado que las sustancias disueltas presentan concentraciones diferentes tanto en el propio líquido como en su interfaz con el gas.

Figura 3

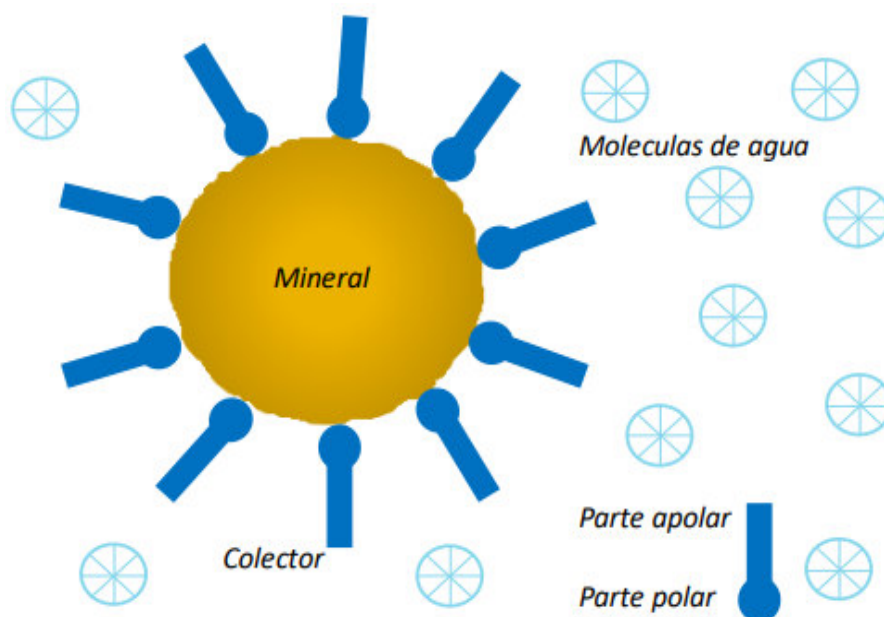
Fenómeno de adsorción de materiales tensoactivos



Nota: Se identifica la parte apolar y polar (Sutulov, 1963).

b. Interfase Sólido – Líquido

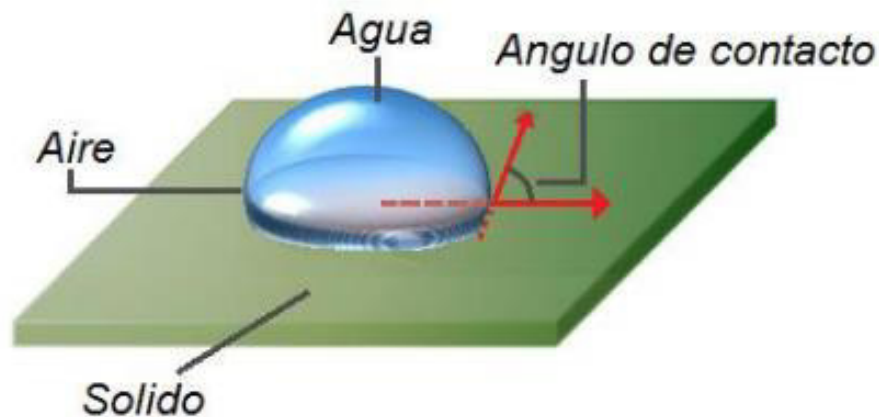
Las superficies sólidas o partículas inmersas en agua experimentan un proceso de hidratación. Como mencioné anteriormente, este proceso está influenciado por la naturaleza de la superficie de los sólidos, es decir, por las propiedades eléctricas que se desarrollan en la superficie después de su formación.

Figura 4*Hidrofobización del mineral con colector*

Nota: Se identifica la parte apolar y polar (Sutulov, 1963).

c. Contacto de Tres Fases

En el proceso de elevar una partícula sólida mediante una burbuja de aire, la conexión entre estos dos elementos se establece a través de un contacto entre tres fases, y este contacto posee características muy particulares. La figura 5 esquematiza gráficamente cómo interactúan las fases líquido, sólido y gas, en el proceso de flotación de minerales sulfurados, teniendo en cuenta que todas las especies sulfuradas presenta distintos grados de hidrofobicidad, y en algunos casos se necesita de una configuración rigurosa de reactivos y demás variables de operación, con la finalidad de alcanzar altas recuperaciones y buena calidad del concentrado final.

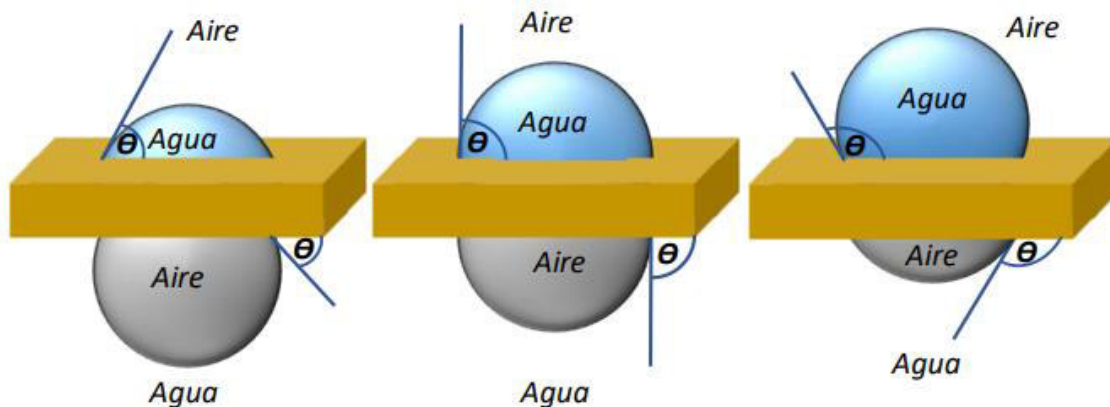
Figura 5*Definición del ángulo de contacto*

Nota: Las líneas rojas representan el ángulo (Sutulov, 1963).

- i) **Ángulo de Contacto:** Por ejemplo, si en lugar de una placa de vidrio utilizamos una superficie mineral que ha sido vuelto hidrofóbica gracias a un recolector, y colocamos esta superficie debajo del agua mientras introducimos una burbuja de aire encima de ella, la burbuja se adherirá a la superficie, desplazando el agua que se encontraba en el área de contacto. La línea de contacto trifásica se extenderá en forma de un círculo sobre la superficie del mineral. Si en algún punto de esta línea de contacto trifásica dibujamos una línea tangente a la superficie de la burbuja, el ángulo θ formado entre la tangente y la superficie se denomina ángulo de contacto. En el contexto de la flotación, este ángulo ofrece una relación cuantitativa entre las propiedades hidrofóbicas del mineral o de un reactivo que incrementa la hidrofobicidad, y la capacidad de flotación del mineral.

Figura 6

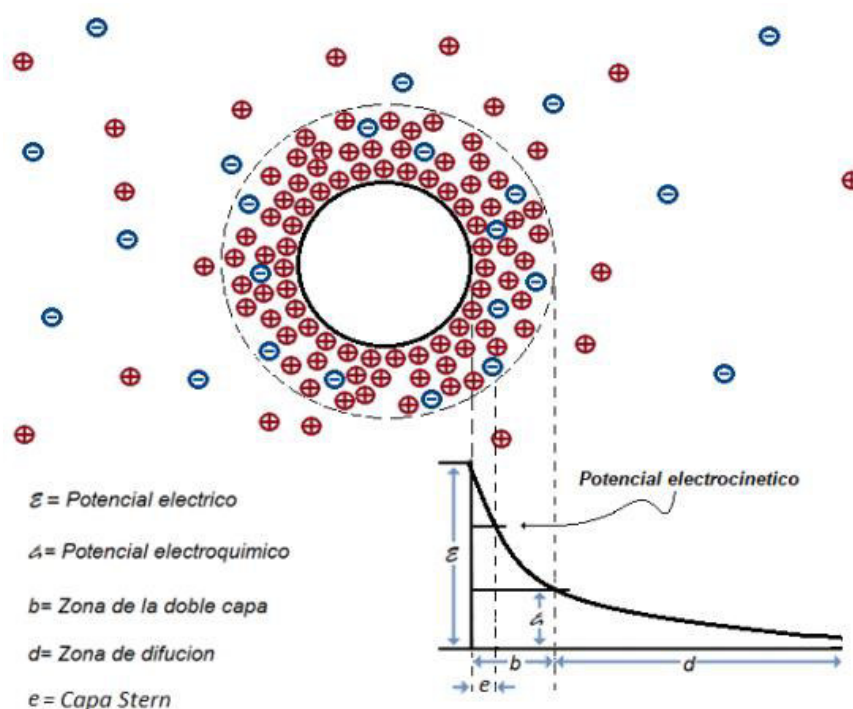
Ángulo de contacto en solido de distinta mojabilidad



Nota: Representación del ángulo (Sutulov, 1963).

ii) **Potencial Electroquímico:**

El potencial electroquímico en el contexto de la flotación se refiere a la diferencia de potencial eléctrico entre la superficie del mineral y la solución circundante en un sistema de flotación. En la flotación, este potencial juega un papel crucial en la adsorción selectiva de reactivos de flotación en la superficie del mineral. La superficie de los minerales cargados eléctricamente dará lugar a que termine la disolución de los iones tipo cationes, las cuales se encuentran formando parte de la red cristalina, generando una atracción por los átomos de carga positiva. Esta diferencia de potencial entre la superficie y el líquido se puede observar en la doble capa de cargas eléctricas de la Figura 7. En el procesamiento de minerales, el potencial queda determinado por la concentración de iones H^+ y OH^- , de tal manera que, cuando la carga superficial es cero se determina el punto cero de carga para el valor de pH.

Figura 7*Diagrama de la concentración iónica*

Nota: Medidas según la leyenda (Sutulov, 1963).

3.2.1.3. Mecanismos de Flotación

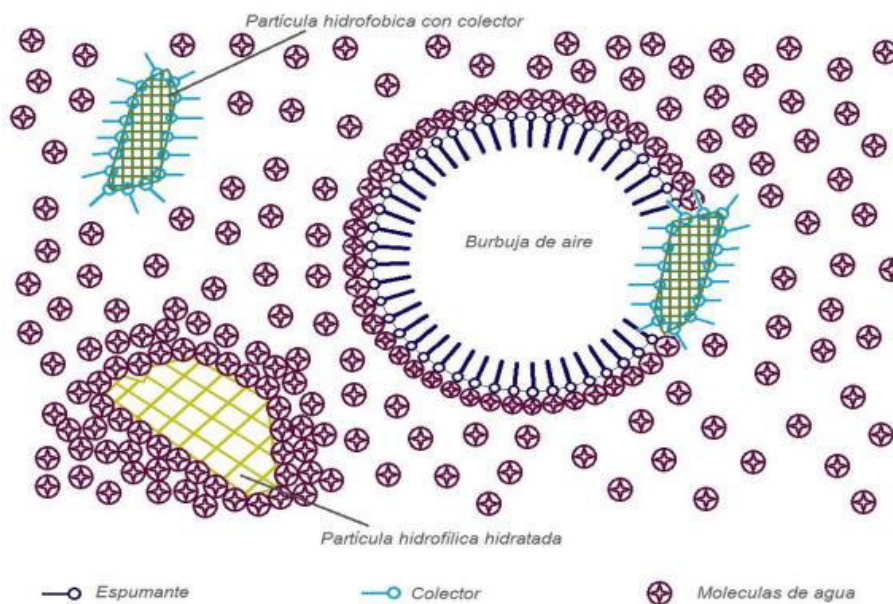
La dosificación de los reactivos colectores aumenta las propiedades hidrofóbicas de las partículas sulfuradas, los cuales suelen ser compuestos orgánicos de naturaleza heteropolar. Esto significa que, en su estructura molecular, una parte es claramente no polar, como un hidrocarburo, mientras que la otra parte es polar y posee propiedades iónicas. Para que los colectores se adhieran eficazmente, es necesario que la pulpa opere bajo ciertas condiciones favorables en la denominada doble capa de cargas eléctricas, lo cual se logra mediante la incorporación de reactivos conocidos como modificadores. Estos modificadores reducen el potencial de la doble capa o, en ocasiones, modifican su naturaleza, creando así las condiciones adecuadas para la adhesión de los colectores. Con este proceso, las partículas minerales se recubren con el colector, que se incorpora en su

estructura cristalina mediante su componente polar, otorgándoles propiedades hidrofóbicas a través de su parte no polar.

En lo que respecta al mecanismo de adsorción de los colectores, el otro elemento estudiado en la formación de burbujas de partículas es la burbuja de aire. Esta burbuja es esencial para dos propósitos principales: en primer lugar, para recoger las partículas presentes en la suspensión, y en segundo lugar, para transportarlas hacia la superficie. El transporte se realiza gracias a la fuerza de flotación de acuerdo con la ley de Arquímedes. Es importante destacar que cada burbuja puede ser considerada como un punto de contacto entre dos fases, una fase líquida y otra gaseosa,

Figura 8

Mineralización de las burbujas de aire



Nota: Representación gráfica (Sutulov, 1963).

3.2.1.4. Reactivos de Flotación

Son compuestos químicos que pueden ser de origen natural como sintético, que se utilizan para garantizar que la flotación sea un proceso selectivo, creando las

condiciones ideales para mejorar este método de concentración de minerales. Estos reactivos suelen pertenecer a la categoría de tensoactivos o modificadores de la superficie de los minerales. En la actualidad se vienen desarrollando una serie de reactivos orgánicos que ofrecen la misma eficiencia en el proceso que los reactivos convencionales, sin embargo, estos reactivos mencionados son amigables con el medio ambiente, es por ello, que poco a poco se viene desplazando una serie de reactivos que son nocivos para la salud y el desarrollo del ser humano y el medio ambiente.

3.2.1.4.1. *Colectores*

Son sustancias químicas orgánicas que tienen la capacidad de actuar de manera selectiva sobre la superficie de ciertos minerales, convirtiéndolos en hidrófobos y facilitando la interacción con las burbujas de aire, lo que los vuelve propensos a ser atraídos por estas burbujas. La mayoría de los colectores son moléculas complejas que tienen una estructura asimétrica y constan de dos partes con propiedades distintas: una parte apolar que se orienta hacia el agua, ya que tiene una interacción mínima con los dipolos del agua y, por lo tanto, muestra una fuerte repulsión hacia ella; y una parte polar que se dirige hacia el mineral, dado que la superficie del mineral responde a esta parte de los colectores. Esta disposición hace que la superficie mineral cubierta por las moléculas colectoras adquiera propiedades hidrófobas. La clasificación de los colectores se realiza según su capacidad de disociación en soluciones acuosas, considerando también el ion que genera el efecto de repeler el agua

a. Colectores no iónicos

Por lo general, se trata de hidrocarburos líquidos no polares con estructuras diversas que no se separan en agua. Estos reactivos son inherentemente repelentes al agua,

y si se pueden aplicar de manera efectiva en la superficie de los minerales, pueden resultar extremadamente beneficiosos.

b. Colectores aniónicos

Son aquellos reactivos que inducen la repulsión del agua en el mineral mediante la acción del anión. Estos son los colectores más comúnmente empleados en la flotación de minerales, y en su estructura molecular, presentan grupos afines a las superficies sólidas con diversas composiciones. En algunos casos, estos grupos son iones basados en hidroxilo con base en estructuras orgánicas, mientras que en otros casos son iones basados en sulfuro de hidrógeno que derivan de sulfuros divalentes.

c. Colectores catiónicos

En estos tipos de reactivos, la resistencia al agua es proporcionada por el catión, que lleva una carga positiva. De manera similar, los colectores aniónicos constan de un radical hidrocarbonado y un grupo afín a las superficies sólidas que está unido químicamente al radical.

- i. Xantatos:** Son colectores aniónicos ampliamente empleados y se encuentran disponibles en el mercado en forma de soluciones, polvo o gránulos. Los gránulos son preferidos en gran medida debido a que presentan menos inconvenientes relacionados con la generación de polvo y ofrecen mayor estabilidad durante el almacenamiento. Es importante tener en cuenta que todos los xantatos se descomponen al entrar en contacto con la humedad, generando disulfuro de carbono, una sustancia altamente inflamable.

- ii. **Ditiofosfatos:** Son compuestos que se originan a partir de la reacción entre el pentasulfuro de fósforo y alcoholes solubles en agua. Se emplean en soluciones que varían entre el 5% y el 20%. El intervalo de pH adecuado para su uso se encuentra en el rango de 4 a 12. Estos reactivos se utilizan principalmente en la etapa inicial de la flotación, ya que después de este proceso y en presencia de sustancias depresoras, los ditiofosfatos pierden su capacidad de recoger ciertos minerales, permitiendo así la realización de una flotación selectiva.
- iii. **Tiocompuestos:** Entre estos tipos de reactivos podemos mencionar a la tiocarbanilida, los mercaptanos y tiofenoles, el mercaptobenzotiazol, el difeniltiocarbazida, el ditiocarbamatos y otros.

3.2.1.4.2. *Espumantes*

Estos tipos de reactivos son compuestos químicos de naturaleza orgánica del tipo heteropolar, teniendo una similitud con respecto a la estructura de los colectores. Estos compuestos están formados de una parte polar que es hidrofílica, y una parte apolar que es hidrofóbica, y está formada por una cadena de H-C, por otro lado, la parte polar es del tipo OH. La estructura del tipo heteropolar es causante de la adsorción de las partículas minerales en la interfase agua-aire., de tal manera que al generarse burbujas de aire producto de la operación de la celda de flotación, quedan adheridas a las moléculas de espumante.

3.2.1.4.3. *Los modificadores*

Estos tipos de reactivos son responsables de controlar las condiciones de la pulpa, de tal manera que pueda mejorar la acción de un reactivo colector. Esta gama de reactivos

tiene la propiedad de aumentar o minimizar las características hidrofóbicas de las partículas involucradas.

Estos se clasifican en:

a. Activadores

Estos tipos de reactivos interactúan directamente con las superficies de los minerales involucrados, facilitando la acción de reactivo colector sobre la superficie del mineral.

b. Depresores

Estos tipos de compuestos químicos generan efectos contrarios a los activadores, de tal manera que la dosificación de estos genera una estabilidad en la capa hidratada, aumentando el carácter hidrofílico de la especie, permitiendo que no flote.

c. Reguladores o modificadores del pH

Son aquellos responsables de modificar el grado de acidez o alcalinidad de la pulpa, de tal manera que pueda generar las condiciones necesarias requeridas por el proceso. Entre los principales modificadores empleados en la industria, podemos mencionar a la cal (Azañero, 2015).

3.2.2. Comercialización de Minerales

El estudio de viabilidad de un proyecto contempla necesariamente la valorización de los productos finales del procesamiento, es decir determinar el precio a pagar por los concentrados metálicos. El mercado de transacción de estos tipos de materia prima debe de cubrir todos los gastos generados desde la extracción, procesamiento, despacho, cierre de minas, entre otros, las cuales permitirán darle viabilidad económica a la explotación del recurso mineral. La valorización de los concentrados en muchos casos emplea los valores internacionales de los precios de los metales.

La valorización de los concentrados es dependiente de las leyes de los elementos presentes en el concentrado de mineral, es decir que la presencia de elementos tonificadores como es el caso de los metales preciosos aumentará el precio a pagar por tonelada de concentrado, y por otro lado, los elementos penalizables disminuirán el valor de venta de los concentrados, además de estar sujeto a las condiciones que impone el comprador y que se estipula en el contrato de comercialización. Por lo general, estos contratos de comercialización se pactan por un periodo definido de tiempo, la cual depende netamente de la capacidad de producción de la mina, y de las reservas que posea, de tal manera que pueda cumplir con el contrato establecido para proveer una cierta cantidad de concentrado por un periodo de tiempo (Montero, 2012).

3.2.2.1. Conceptos Básicos de Comercialización de Minerales

Para realizar la valorización de los concentrados se adopta la ley en porcentajes para elementos metálicos como Cu, Pb, Zn, entre otros, y, por otro lado, los metales preciosos se reportan en gramos /tonelada u Onzas/tonelada, como es el caso del Au, Ag, Pt, entre otros. El contrato de comercialización define la venta de una determinada cantidad de concentrado en un periodo de tiempo, estableciendo el análisis químico para una serie de elementos que serán pactados por ambas partes, es decir que no solo se determina el precio en base al metal de mayor proporción, póngase un ejemplo de concentrado de Cu, también se mandaría analizar por Au y Ag, de tal manera que una determinada ley de estos es pagable en forma de bonificaciones. Por otro lado, también se mandará analizar por contaminantes del tipo As, Sb, Bi, Hg, entre otros, los cuales son llamados elementos penalizadores, es decir, reducen el valor del concentrado cuando sobrepasan una ley de contaminantes impuestas por las fundiciones o los compradores de concentrados de mineral (Montero, 2012).

3.2.2.2. Términos del Contrato de Comercialización

a. Concentrado

Corresponde al producto ofertado por los mineros, el cual ha sido obtenido por una serie de procesos de extracción del mineral y su posterior procesamiento por flotación. Este tipo de material debe de cumplir con las condiciones dispuestas por el comprador y estipuladas en el contrato. Los concentrados de mineral obtenido en el proceso de flotación difieren dependiendo de la naturaleza de los yacimientos que los contienen. Es decir que un concentrado de Cu de la sierra tiene distintas características que un concentrado de Cu de la costa, en términos de elementos bonificables y penalizables. Además de ellos, se debe determinar la humedad del concentrado y el lugar donde se va a despachar el producto (Montero, 2012).

En la industria minera cada concentrado es de características únicas y depende de la naturaleza geológica del yacimiento. Además, se sabe que el procesamiento de minerales por flotación tendrá que producir concentrados de Zn con una ley que varía entre 50 y 60%, así como, 50 y 70% de ley para concentrados de Pb (Sotomayor, 2018).

b. Metales Fundidos

La fundición es el proceso encargado de obtener un elemento metálico, es decir que la composición del mineral reacciona con las elevadas temperaturas del proceso, dando lugar a la formación de gases, y la producción de un elemento metálico, que pasará por una serie de etapas de conformado para tener un producto final. Este proceso, permite la eliminación de las impurezas que puedan contener estos tipos de materiales, además de lograr recuperar una cierta cantidad de elementos metálicos en el concentrado, de tal manera, que, dentro del contrato de comercialización, se estipula una cantidad de metal

recuperable por este proceso, además de la cantidad de metal a pagar en el concentrado (Montero, 2012).

c. Metales Refinados

La refinación de los metales obtenidos por fundición tiene por finalidad obtener un producto de alta calidad mediante procesos electroquímicos, de tal manera que se obtiene un metal de 99.99% de pureza. Esta refinación de los metales representa un costo que se estipula dentro del contrato de comercialización (Montero, 2012).

3.2.2.3. El Mercado de Minerales y Metales

Principalmente, podemos mencionar a los siguientes países como socios estratégicos en la compra de concentrados metálicos (Sotomayor, 2018):

- China
- EE.UU.
- La Comunidad Europea
- Japón
- La Región Sudamericana.

3.2.2.4. Participantes en la Comercialización de Minerales

La comercialización de minerales se lleva a cabo por productores independientes o empresas que se dedican a la compra y venta de concentrados, las cuales venden su producto a las fundiciones o refinerías, las cuales producirán un producto bruto metálico.

En el contexto de la venta de concentrados a una empresa local, se dice que es la que genera menos ingresos, por otro lado, el productor minero siempre busca vender directo a un mercado internacional, que le pueda comprar a un mejor precio.

Países como Bolivia, Colombia, Chile, Venezuela no realizan el proceso de fundición o refinación de metales, vendiendo concentrados de metales que son refinados en otros países.

Se puede definir las siguientes etapas en la comercialización de concentrado de minerales:

- Compra
- Almacenamiento.
- Venta.
- Transporte.
- Financiamiento de embarque (Sotomayor, 2018).

3.2.2.4.1. *Modalidades de Venta – Tipos de Contratos*

Los contratos de comercialización pactados de mutuo acuerdo entre 2 personas, puede ser bajo 2 modalidades principalmente:

Contrato a corto plazo: Estos tipos de contratos son realizados para la compra casual, es decir, aquella que se realiza en un solo despacho (Sotomayor, 2018).

3.2.2.5. *Bolsas de Metales*

3.2.2.5.1. *Cotizaciones Internacionales*

Precios: Son determinados por la bolsa de metales, tomando en cuenta la ley de la oferta y la demanda de un tipo de metal. Este ente no compra ni vende metales, su labor garantiza la compra y venta de metales. Los precios de los metales establecidos por unidad de tiempo quedan sujetos a variaciones por las siguientes razones:

- Flujo de inversiones.
- Niveles de rentabilidad presente y futuras.

- Situación económica actual de las empresas ofertantes y demandantes.

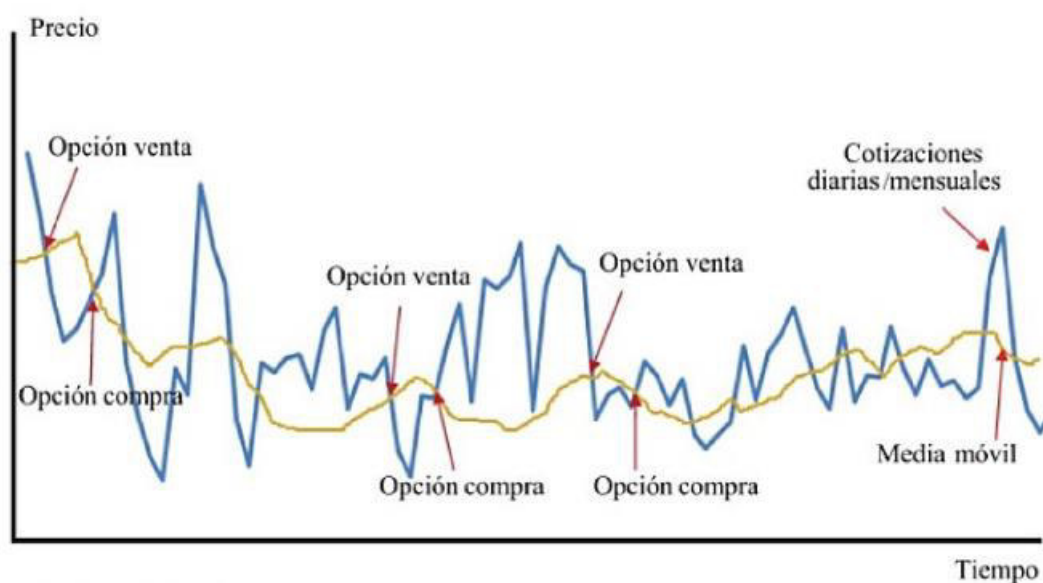
a. London Metal Exchange (LME) de Inglaterra - 1935

En operaciones a futuros, es la principal bolsa de metales del mundo, concretamente en ella se negocian el aluminio, cobre, plomo, zinc, níquel, plata y estaño.

En la figura 9, se representa la variación de los precios con relación a las cotizaciones del día, en la cual se fija el precio en la intersección de las curvas, tal y como se señala en la figura.

Figura 9

Comportamiento teórico de precios en los mercados bursátiles



Nota: Representación gráfica (Sotomayor, 2018).

3.2.2.5.2. Principales Mercados de Minerales y Metales

a. Mercados de futuros

Estos tipos de mercado se llevan a cabo a largo plazo, con contratos temporales y establecidos bajo acuerdo mutuo entre ambas partes. En estos

tipos de mercado se ofertan principalmente los elementos metálicos no férreos en forma de concentrados de mineral, como, por ejemplo: minerales de Cu, Pb y Zn, además de la transacción de los metales preciosos como Au y Ag.

- b. Mercado al contado:** Aquel que se realiza con dinero en efectivo.
- c. Mercado a plazo:** Es una forma de transacción en la que se negocian las mercancías físicas o reales.
- d. Mercado en cartel:** Tiene la característica de que el precio del metal es establecido por solo uno de ellos, de manera fija, teniendo el objetivo de restringir las transacciones.
- e. Mercados libres:** Este es el caso de las ventas esporádicas, en la cual el pequeño productor minera vende su lote de concentrado de manera interrumpida y esporádica. El vendedor no tiene la obligación de proveer una determinada cantidad por tiempo.
- f. Convenios anuales:** Estos contratos pactan la compra y venta de minerales para periodos de hasta un año, poco más o menos.
- g. Contrato forward:** Es un acuerdo privado en un mercado al contado entre un comprador y un vendedor para la entrega de la materia prima a un precio (Sotomayor, 2018).

Tabla 1*Principales mercados de minerales y metales a nivel mundial*

Mercado (bolsas)	Au	Ag	Pt	Pa	Al	Cu	Pb	Zn	Ni	Sn
BBF	X									
CBOT	X	X								
CME	X									
COMEX	X	X			X	X				
HKCE	X									
INTEX	X									
LME					X	X	X	X	X	X
LBMA	X	X	X							
MACE	X	X				X				
NYMEX			X	X						
SHFE	X				X	X		X		
SFE	X									
SYMEX	X									
WFE	X									
TOKYO	X									
CME GROUP	X	X	X	X	X	X				

Nota: En diferentes bolsas según la ubicación (Sotomayor, 2018).

3.2.2.5.3. Principales Elementos en los Contratos Comerciales de Concentrados de Minerales

a. Cantidad y duración

Se refiere a la cantidad de concentrado que se va a comercializar, y depende del tipo del acuerdo mutuo entre empresas, es decir si es una sola venta o es una cantidad en un determinado tiempo

b. Calidad

La naturaleza y especificaciones de los contenidos del concentrado.

c. Embarque

Indica el tiempo, frecuencia y el tamaño de los embarques.

d. Entrega

El contrato de comercialización debe estipular el lugar donde se entregará el material vendido, en algunos casos, el comprador nacional compra desde la planta de procesamiento y lo lleva directo a la refinería.

e. Precio

En esta cláusula se consignan el pago (formulas) de los elementos pagables dependiendo del mineral o concentrado de mineral o metal refinado y las deducciones.

f. Gastos de tratamiento y escaladores**i) Gasto de tratamiento o Maquila:**

Es el costo del tratamiento metalúrgico posterior de fundición, a la cual debe someterse el concentrado hasta obtener un producto metálico de ciertas características

ii) Escaladores: Estos factores sirven para compensar las posibles fluctuaciones del precio de los metales en la bolsa con respecto al precio de la maquila (Sotomayor, 2018).

La siguiente tabla demuestra los elementos pagables en un concentrado metálico, y los elementos que generan castigos impuestos por las fundiciones.

Tabla 2*Principales elementos pagables y penalizables*

Elemento	Conc de cobre	Conc. de zinc	Conc. de plomo
Metales pagables			
Plata	X	X	X
Oro	X	X	X
Cobre	X		
Zinc		X	
Plomo			X
Elementos penalizables			
Antimonio	X	X	X
Arsénico	X	X	X
Mercurio	X	X	X
Manganeso		X	
Bismuto	X		X
Plomo	X		
Cloro	X		
Cadmio		X	
MgO		X	
Fluor	X		
Fierro		X	
Silice		X	
Zinc	X		X

Nota: Se dividen en metales pagables y elementos penalizables (Sotomayor, 2018).

3.2.3. Producción Metálica Nacional

Tabla 3*Producción minera metálica*

Metal	Agosto			Enero-Agosto		
	2022	2023	Var. %	2022	2023	Var. %
Cobre (TMF)	207588	223178	7.5%	1499477	1771183	18.1%
Oro (g finos)	8196321	8880490	8.3%	63230482	62279666	-1.5%
Zinc (TMF)	127024	135610	6.8%	907660	956938	5.4%
Plata (kg finos)	275294	264122	-4.1%	2036595	1958758	-3.8%
Plomo (TMF)	23280	24444	5.0%	169366	175880	3.8%
Hierro (TMF)	1043999	1226881	17.5%	8287970	9598098	15.8%
Estaño (TMF)	1920	2698	40.5%	18480	15192	-17.8%
Molibdeno (TMF)	2603	1968	-24.4%	21032	20904	-0.6%

Nota: Con las variaciones según el periodo (MINEM, 2023).

3.2.3.1. Producción de Zinc Nacional

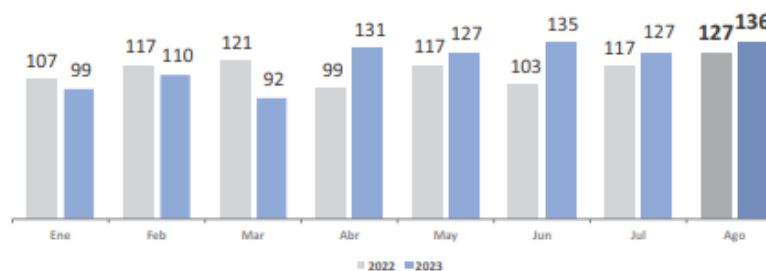
La producción nacional de zinc alcanzó un total de 135,610 toneladas métricas finas (TMF) en el 2023, hasta agosto, experimentando un aumento del 6.8% en comparación con agosto de 2022 (127,024 TMF). Como resultado, la producción acumulada hasta agosto fue de 956,938 TMF, registrando un aumento del 5.4% en comparación con el mismo período de 2022 (907,660 TMF), impulsado por el mejor rendimiento de los titulares mineros, especialmente Compañía Minera Antamina S.A. (+5.1%) y Volcan Compañía Minera S.A.A. (+16.0%). La tabla 4 representa la producción metálica de los meses de agosto del 2022 y 2023, además se puede observar la variación de Zn con un valor de 6.8%.

Tabla 4

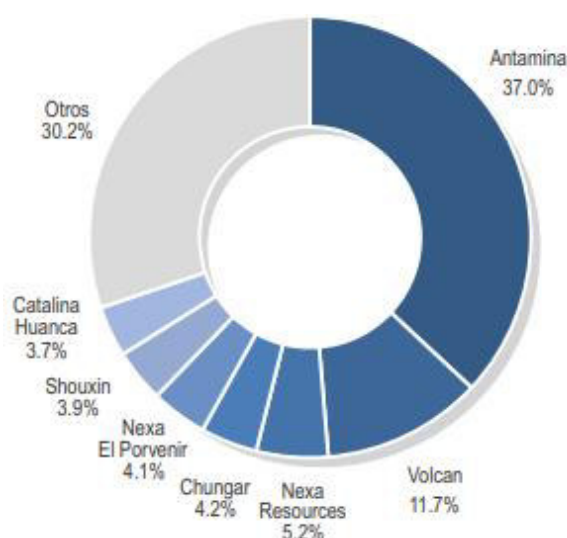
Variación interanual

Metal	Unidad	Agosto 2022	Agosto 2023	Variación %
Cobre	TMF	207588	223178	7.5%
Oro	g finos	8196321	8880490	8.3%
Zinc	TMF	127024	135610	6.8%
Plata	kg finos	275594	264122	-4.1%
Plomo	TMF	23280	24444	5.0%
Hierro	TMF	1043999	1226881	17.5%
Estaño	TMF	1920	2698	40.5%
Molibdeno	TMF	2603	1968	-24.4%

Nota: Con las variaciones según el periodo (MINEM, 2023).

Figura 10*2022-2023: Producción mensual de zinc*

Nota: Las unidades son miles de TMF (MINEM, 2023).

Figura 11*Estructura de la producción de zinc por empresas, enero – agosto*

Nota: Datos organizados en un gráfico de pastel (MINEM, 2023).

3.2.3.2. Producción de Plomo Nacional

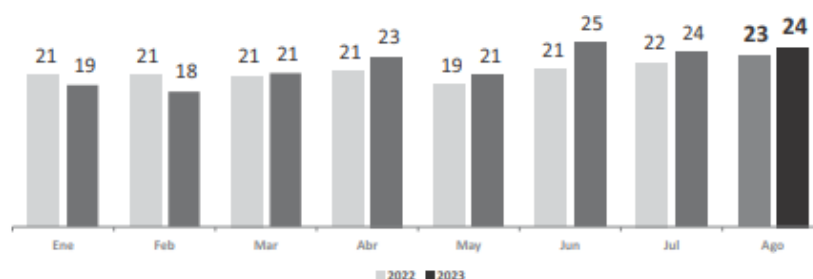
En el mes de agosto del 2023, la producción nacional de concentrados de plomo alcanzó las 24,444 toneladas métricas finas (TMF), reflejando un aumento del 5.0% en comparación con agosto de 2022 (23,280 TMF). Este incremento se debe principalmente al desempeño positivo de Volcan, Compañía Minera Chungar S.A.C, y Pan American Silver Huaron S.A. Gracias a estos avances, la producción acumulada hasta agosto

alcanzó las 175,880 TMF, lo que representa un aumento del 3.8% en comparación con el mismo período del año anterior (169,366 TMF).

La figura 12 representa la producción mensual de Pb durante los periodos 2022 y 2023, así también, la gráfica circular de la figura 13 representa la producción de Pb por empresas.

Figura 12

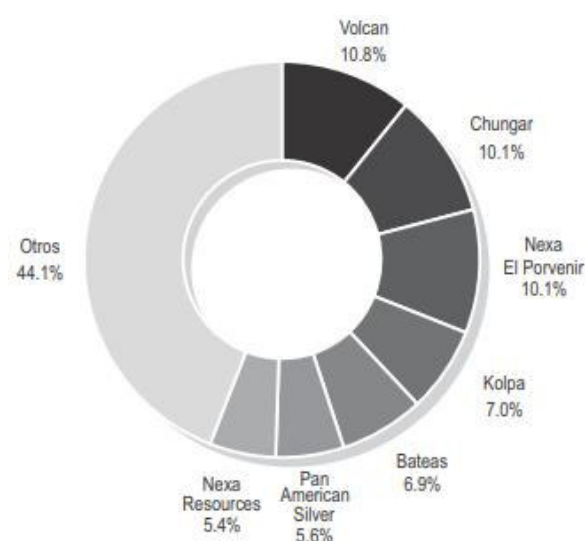
2022-2023: Producción mensual de plomo



Nota: Las unidades son miles de TMF (MINEM, 2023).

Figura 13

Estructura de la producción de plomo por empresas, enero – agosto



Nota: Datos organizados en un gráfico de pastel (MINEM, 2023).

CAPÍTULO IV: Metodología de la Investigación

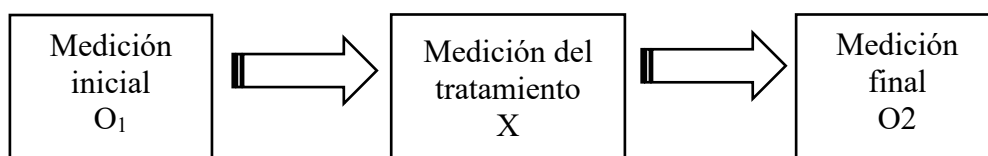
4.1. Tipo y Diseño de Investigación

El desarrollo de la presente investigación es de tipo experimental cuantitativo, de acuerdo con la clasificación propuesta por (Hernandez y otros, 2014) y que permite la manipulación de las variables independientes.

La investigación realizada es de tipo experimental, en la cual se aplicaron los conocimientos de mineralogía, para identificar minerales empleando microscopia óptica, y los de flotación de minerales teniendo en cuenta la influencia del grado de liberación del mineral de Pb-Zn, para la recuperación de dichos valores metálicos.

La investigación es deductiva porque relaciona las variables en estudio, por medio de resultados obtenidos en las pruebas metalúrgicas, y el enfoque cuantitativo que está relacionado a variables de este tipo.

El diseño de investigación es el siguiente:



Donde:

O₁: Minerales polimetálicos de Pb-Zn del proyecto de pequeños productores mineros, en la provincia de Huaylas – Ancash.

X: Aplicación de los procesos de flotación, teniendo en cuenta la mineralogía de la muestra problema.

O₂: Recuperación y valorización de concentrados de plomo y zinc.

4.2. Unidad de Análisis

La unidad de análisis del estudio actual corresponde a la provincia de Huaylas, siendo la ciudad más antigua del departamento de Áncash, y una de las veinte que conforman dicho departamento.

4.3. Población de Estudio

La población de estudio de la presente investigación estará constituida por el mineral de cabeza extraído y muestreado de los yacimientos mineros ubicados en la provincia de Huaylas, en el departamento de Ancash. Dichos minerales polimetálicos de plomo y zinc serán seleccionados con base en criterios geológicos y mineralógicos, considerando la representatividad de las vetas y depósitos presentes en la zona.

Los estudios relacionados con este proyecto de investigación y el desarrollo de las pruebas metalúrgicas serán realizados en los laboratorios de METALANDIN S.A.C. Por otro lado, la caracterización mineralógica detallada se llevará a cabo en el laboratorio de GEOXINPESAC para determinar composición, especies minerales, grados de liberación y asociaciones mineralógicas.

4.4. Tamaño de Muestra

Se seleccionó un tamaño de muestra de 100 kg de mineral de cabeza, considerando que esta cantidad garantiza la representatividad del mineral extraído de los yacimientos de la provincia de Huaylas, en el departamento de Ancash. El proceso de selección se basó en la norma técnica peruano NTP-ISO 12743 para el muestreo de minerales y concentrados, que recomiendan un tamaño mínimo adecuado al nivel de heterogeneidad del material y al volumen necesario para realizar pruebas metalúrgicas confiables. Este

tamaño también fue definido en consulta con especialistas, considerando proyectos similares realizados en yacimientos con características geológicas comparables.

Se almacenaron 50 kg como muestra testigo, siguiendo las buenas prácticas de investigación, para cubrir análisis complementarios o verificación de resultados si fuera necesario. Los 50 kg restantes se utilizarán para las pruebas experimentales, asegurando suficiente material para flotación, análisis químico, caracterización mineralógica y estudios de concentración, manteniendo la confiabilidad estadística de los resultados obtenidos.

4.5. Procedimiento Metodológico de la Investigación

- Recopilación de información pertinente y base de datos.

Se realizará una revisión exhaustiva de la literatura científica, informes técnicos y bases de datos relacionados con los minerales polimetálicos de Pb-Zn. Esta etapa tiene como objetivo establecer un marco teórico sólido para la investigación, identificar parámetros operativos y diseñar el procedimiento experimental con base en experiencias previas.

- Muestreo representativo del mineral de cabeza.

Consiste en recolectar muestras del mineral de cabeza extraído de los yacimientos en la provincia de Huaylas, garantizando la representatividad y homogeneidad del material. El muestreo se efectuará siguiendo las Normas ISO 12743, asegurando que el tamaño y método seleccionado reflejen las características reales del depósito.

- Preparación mecánica del mineral.

El mineral será reducido de tamaño en etapas sucesivas, utilizando una chancadora de quijadas para una primera trituración y luego una

chancadora de rodillos para una granulometría más fina. Este paso es fundamental para adecuar el mineral al tamaño de partícula requerido para las pruebas de flotación y análisis de laboratorio.

- Análisis químico de la muestra.

Una fracción representativa del mineral molido, 300 gramos, se enviará a un laboratorio acreditado para determinar las leyes de Pb, Zn, Cu, Ag y As mediante la técnica de absorción atómica. Este análisis permitirá conocer las concentraciones iniciales de los elementos metálicos presentes.

- Caracterización mineralógica de la muestra.

Se realizará un análisis mineralógico utilizando un microscopio óptico de luz reflejada, empleando 300 gramos de la muestra molida. Este procedimiento permitirá identificar las especies minerales presentes, los grados de liberación y los enlaces existentes entre los minerales valiosos y la ganga.

- Elaboración de diseño experimental del proceso de flotación de minerales.

Se estructurará un diseño experimental que considere las variables críticas del proceso, como pH, tipo y dosis de reactivos, granulometría, tiempo de flotación, entre otros. Este diseño permitirá optimizar las pruebas metalúrgicas y garantizar resultados reproducibles.

- Pruebas preliminares de flotación de los minerales polimetálicos para recuperar Pb.

Estas pruebas iniciales servirán para determinar las condiciones óptimas de operación (pH, reactivos, tiempo, etc.) para la recuperación de plomo. Los resultados serán evaluados para ajustar los parámetros del diseño experimental.

- Pruebas definitivas de flotación de los minerales polimetálicos para recuperar Pb.

Con base en los parámetros obtenidos de las pruebas preliminares, se realizarán pruebas de flotación definitivas para evaluar la eficiencia en la recuperación del plomo y validar los resultados obtenidos.

- Pruebas preliminares de flotación de los minerales polimetálicos para recuperar Zn.

Se aplicarán ensayos iniciales para optimizar las condiciones del proceso de flotación que permitan la recuperación selectiva del zinc. Esta etapa también permitirá ajustar las variables operativas para maximizar la separación de los metales.

- Pruebas definitivas de flotación de los minerales polimetálicos para recuperar Zn.

Una vez definidos los parámetros óptimos, se llevarán a cabo pruebas finales de flotación para evaluar la recuperación y calidad de los concentrados de zinc, verificando la consistencia de los resultados.

- Sistematización de los resultados.

Los datos obtenidos de las pruebas de flotación se organizarán en balances metalúrgicos utilizando hojas de cálculo. Se realizarán análisis estadísticos con el software Minitab 19 para evaluar la significancia de las variables y validar el diseño experimental.

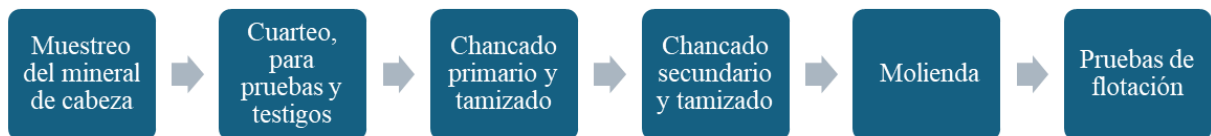
- Valorización de los concentrados de Pb y Zn.

Se estimará el valor económico de los concentrados obtenidos considerando las leyes de los metales recuperados, el precio del mercado

y las posibles penalizaciones. Este análisis permitirá determinar la viabilidad económica del proyecto.

Figura 14

Diagrama descriptivo del procesamiento



Nota: Se emplea un diagrama de bloques.

CAPÍTULO V: Resultados

5.1. Análisis Mineralógico

Se obtuvo una muestra de 300 gramos de mineral representativo del lote, la cual se preparó a una granulometría de 60 % - 200 malla para ser observada al microscopio óptico de luz reflejada. La briqueta de mineral empleo 10 g de muestra además de aglutinante, y pudo determinar la presencia de minerales de plomo como la galena, minerales de zinc como la esfalerita, además de plata nativa, las cuales constituyen las principales especies observadas de valor económico. Se pudo identificar especies de cobre, que también pueden representar un atractivo económico a tomar en cuenta. El total de las especies identificadas se describen en la tabla 5.

Tabla 5

Total de especies identificadas en la muestra

Minerales	Fórmula	Abreviatura
Pirita	FeS ₂	py
Esfalerita	ZnS	ef
Galena	PbS	gn
Calcopirita	CuFeS ₂	cp
Tetraedrita	(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	Th
Plata nativa	Ag	Ag
Limonita	FeO(OH)·nH ₂ O	LIMs
Gangas	-	GGs

Nota: La caracterización empleó un microscopio óptico de luz reflejada

5.1.1. Descripción Microscópica de las Especies

Los minerales opacos identificados fueron los siguientes:

- **Pirita:** Ocurre como cristales ahueradles a anhedrales de hábito mayormente cúbico con variaciones de tamaños, los de granos de menor

granulometría, varían entre 0.05mm y 0.3mm, las piritas de grano grueso varían entre 0.5mm y 3mm.

- **Esfalerita:** Aparece como cristales de formas anhedrales con tamaños que varían entre 0.2mm y 1.7mm, los cristales se hallan microfracturados y rellenos por la ganga.
- **Galena:** Se aprecia como cristales de formas anhedrales con tamaños hasta de algunos cm de longitud, exhibe textura de deformación.
- **Calcopirita:** Se presenta de forma anedral con tamaños menores de 0.2mm, rellena intersticios y porosidades de la ganga, se halla en bordes o relleno de porosidades de la esfalerita y piritas. Del mismo modo se halla como inclusión y reemplazada por la galena.
- **Tetraedrita:** Ocurre como cristales anhedrales con tamaños menores de 0.6mm, se presenta relleno de intersticios de la ganga.
- **Plata nativa:** 0.1mm ocurre en microfracturas de piritas y parcialmente en bordes de la tetraedrita.
- **Limonita:** Se presenta como producto de alteración y relleno de venillas de la ganga.
- **Gangas:** Corresponde a la parte no metálica.

5.1.2. Distribución Volumétrica y Grados de Liberación

Se identificó la presencia de minerales de zinc como la esfalerita, la cual representó el 17.68% del volumen total de la muestra, además de especies de plomo como galena con una distribución de 20.56%. Así también se pudo identificar especies de cobre como la calcopirita y tetraedrita con valores de distribución del 1.27% y 0.69%,

además de plata nativa con una distribución de 0.06%, las cuales corresponden a las principales especies de atractivo económico.

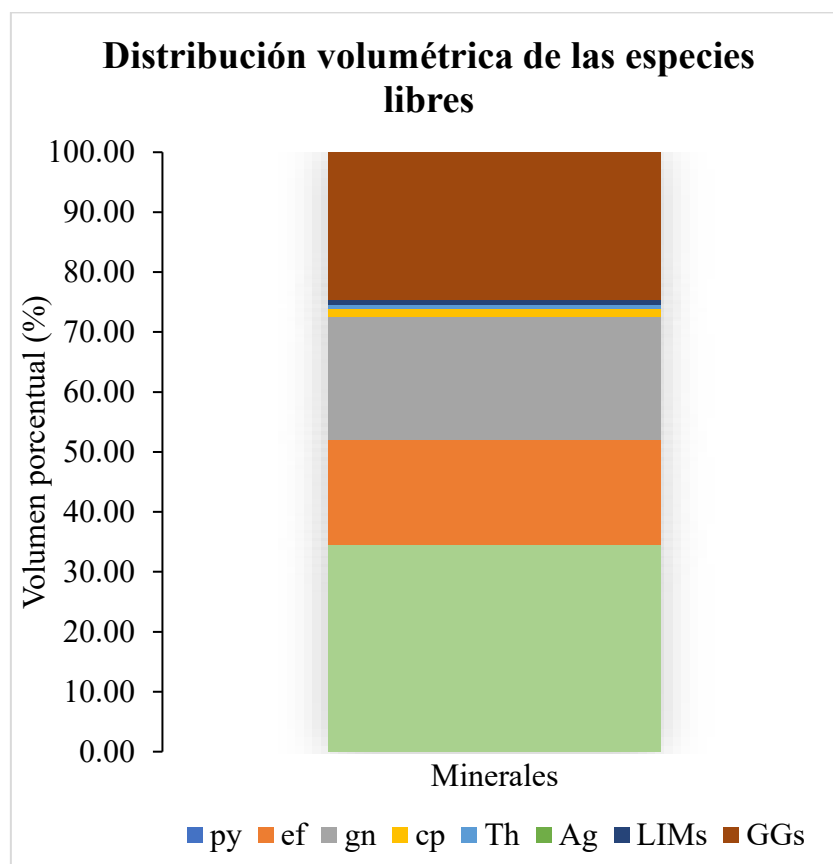
La esfalerita se identificó en un 99.82% como especie libre, y la galena en un 98.89%, tal y como se puede observar en la tabla 6, además de la figura 15.

Tabla 6

Volumen y liberación porcentual de las especies

Minerales	Volumen porcentual (%)	Grado de liberación (%)
Pirita	34.38	99.71
Esfalerita	17.68	99.82
Galena	20.56	98.89
Calcopirita	1.27	89.74
Tetraedrita	0.69	85.71
Plata nativa	0.06	50.00
Limonita	0.85	92.31
Gangas	24.51	96.00
Total	100.00	

Nota: La caracterización empleó un microscopio óptico de luz reflejada

Figura 15*Volumen de las especies*

Nota: Gráfico comparativo de la distribución de las especies

Como se pudo ver en la tabla anterior, el 99.71% de la pirita se encuentra como especies liberadas.

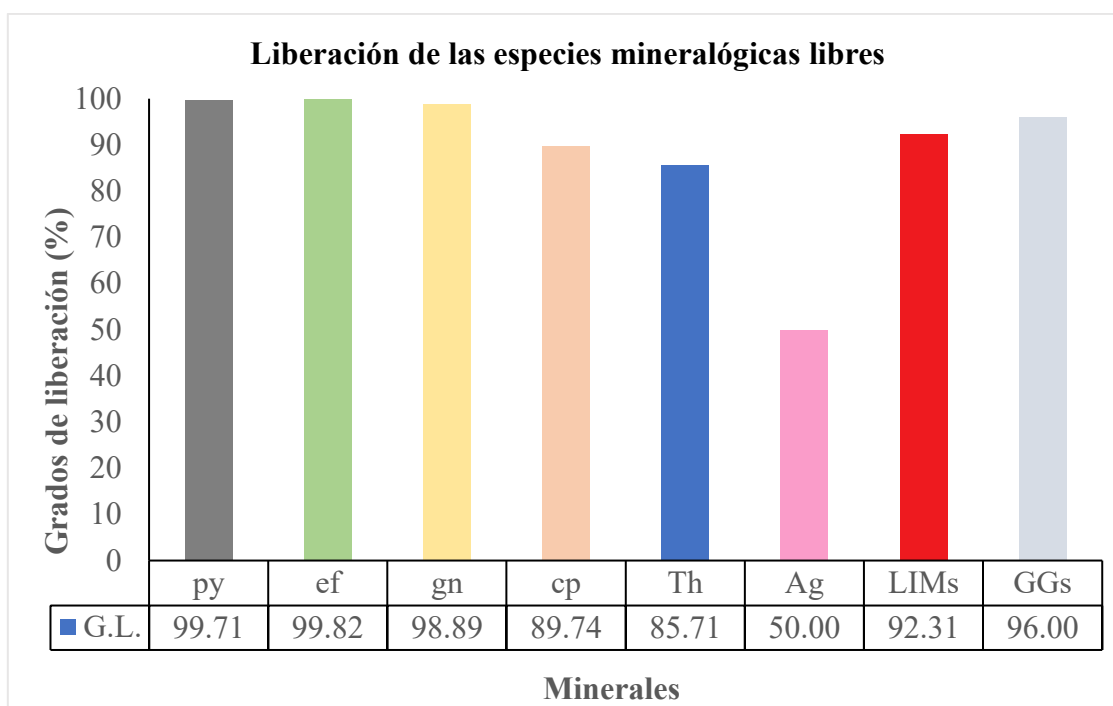
La razón por la cual, las especies de minerales no se encuentran totalmente libres es por la naturaleza de los enlaces que se encuentran formando. Por otro lado, las principales especies a tomar en cuenta son los minerales de plomo y zinc, teniendo en cuenta que la muestra presenta una cantidad de cobre que no genera algún valor económico por las bajas leyes que reportan.

Se pudo identificar minerales de Pb como la galena, con un grado de liberación del 98.89%

Las gangas se encuentran formando parte del 24.51% del volumen total de la muestra, la cual presenta 96% de grado de liberación. La figura 16 representa el gráfico de barras de los grados de liberación de las especies.

Figura 16

Liberación de las especies



Nota: Se representa los porcentajes de las especies que se observaron como liberadas

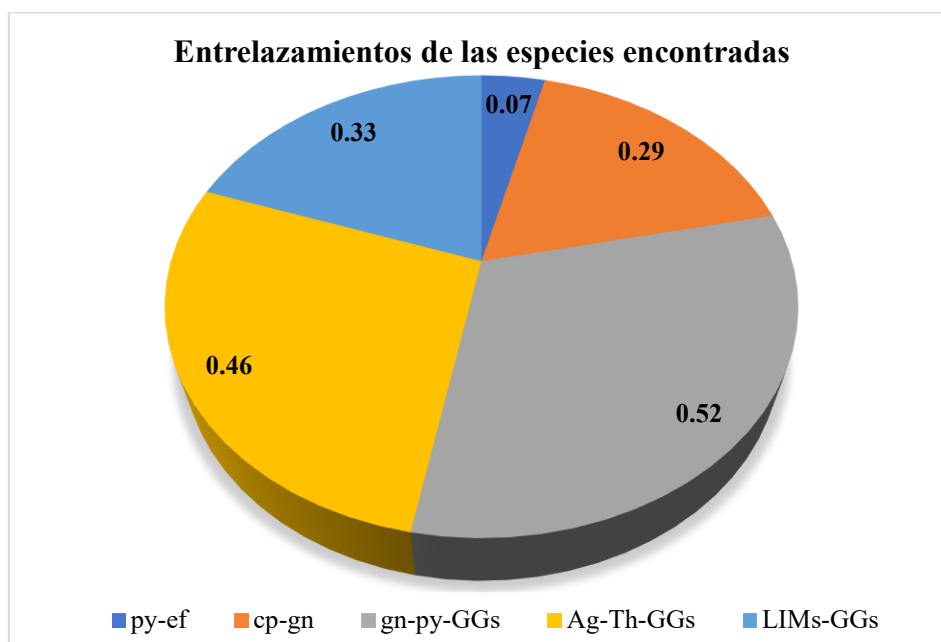
5.1.3. *Entrelazamiento de Minerales y Posibilidades de Liberación*

La microscopia óptica de luz reflejada identificó enlaces mixtos de py-ef, cp-gn, gn-py-ggs, Ag-th-ggs, y LIMs-ggs. La tabla 7 describe las posibilidades de liberación y la distribución de los enlaces observados, y el gráfico circular de la figura 17 representa la distribución de enlaces identificados en el análisis modal. Los minerales identificados y los enlaces que forman se pueden observar en las micrografías de las figuras 18, 19, 20 y 21.

Tabla 7*Enlaces de las especies y posibilidades de liberación*

Minerales entrelazados	Tipo entr.	Num part.	Dist. Porc. (%)	Posibilidades de liberación completa
Partículas libres		3009	98.33	
py-ef	1bIV	2	0.07	Moderadamente fácil
	1aII	2	0.06	Fácil
cp-gn	1bIII	3	0.10	Moderadamente fácil
	3aI	4	0.13	Moderadamente fácil a difícil
	1aII	3	0.09	Fácil
gn-py-GGs	3aIV	2	0.07	Moderadamente fácil a difícil
	1bII	7	0.23	Moderadamente fácil
	4aII	4	0.13	Muy difícil
	1bIV	1	0.02	Moderadamente fácil
Ag-Th-GGs	3aII	2	0.08	Moderadamente fácil a difícil
	4bI	4	0.14	Moderadamente difícil
	2bIII	7	0.22	Muy difícil
	4bIII	1	0.03	Moderadamente difícil
LIMs-GGs	4aI	4	0.14	Muy difícil
	3cIII	5	0.16	Imposible
TOTAL		3060	100.00	

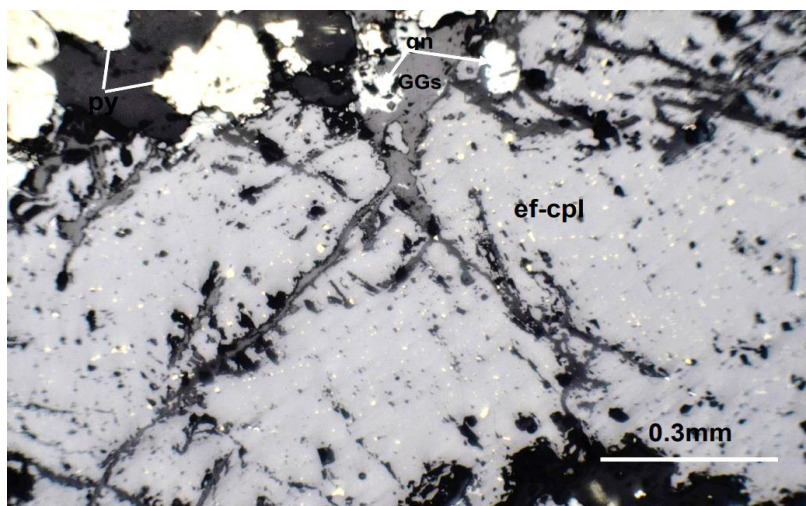
Nota: Se representan enlaces mixtos y ternarios identificados en el microscopio

Figura 17*Enlaces de las especies*

Nota: Distribución porcentual de los enlaces identificados

Figura 18

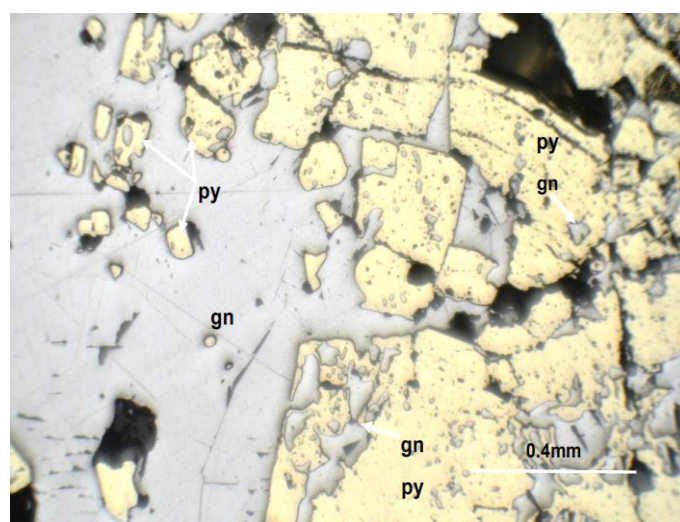
Micrografía 1: Cristales de esfalerita (ef) – con pequeñas inclusiones de calcopirita (cpI) dando lugar a textura de exsolución. La esfalerita se encuentra microfracturada, granos de pirita (py) y galena (gn) reemplazando a la ganga (GGs).



Nota: Se observó con un aumento del microscopio de 200X.

Figura 19

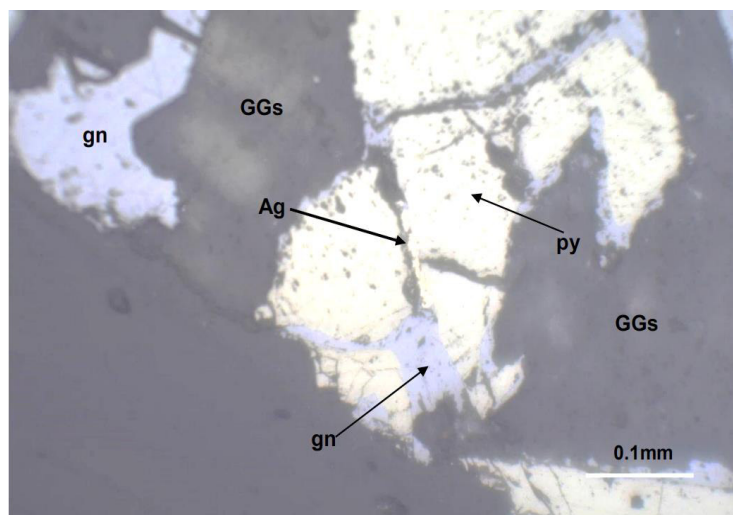
Micrografía 2: Cristales de pirita (py) euhedrales y subhedrales reemplazados y cooroidos por la galena (gn) Se observa asimismo cristales de pirita de fina granulometría incluidos en ella. La galena rellena también porosidades de la pirita.



Nota: Se observó con un aumento del microscopio de 200X.

Figura 20

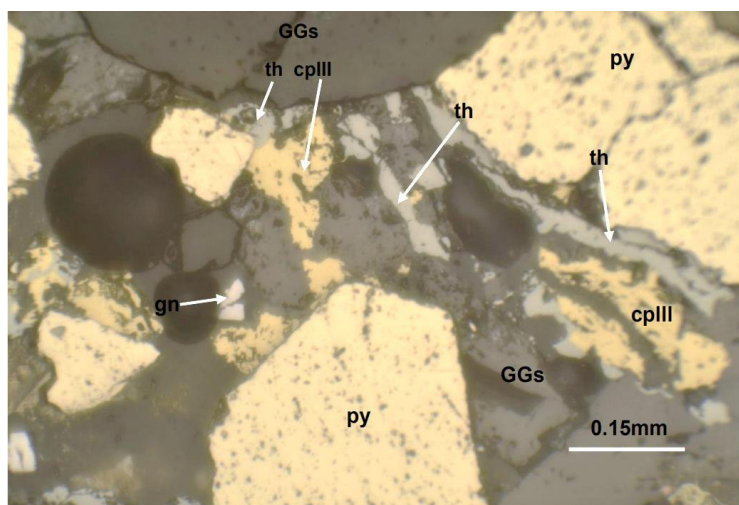
Micrografía 3: Plata nativa (Ag) en microfracturas de pirita (py), galena (gn) reemplazando a la pirita a través de bordes y fracturas. Los sulfuros están reemplazando a la ganga (GGs)



Nota: Se observó con un aumento del microscopio de 200X.

Figura 21

Micrografía 4: Granos de tetraedrita (th) reemplazando parcialmente a pirita (py), y calcopirita III, galena (gn), granos de galena y cristales de pirita en intersticios de la ganga (GGs).



Nota: Se observó con un aumento del microscopio de 200X.

5.2. Análisis Químico del Mineral de Cabeza

Se muestreo 300 g de mineral representativo del lote, determinando mediante métodos volumétricos leyes de 17.41 % de Pb, 12.93% de Zn, y 5.23 Oz/TC de Ag mediante método de copelación. Estos elementos representan un atractivo económico para los pequeños productores mineros, y determinan las leyes para cada despacho de mineral. El total de los elementos ensayados se detallan en la tabla 8.

Tabla 8

Leyes reportadas en el análisis químico

Elemento	Ley
Pb	17.41%
Zn	12.93%
Cu	0.25%
Ag	5.23 Oz/TC
As	0.32%

Nota: Datos representados con porcentaje (%) y onzas por tonelada corta (Oz/TC).

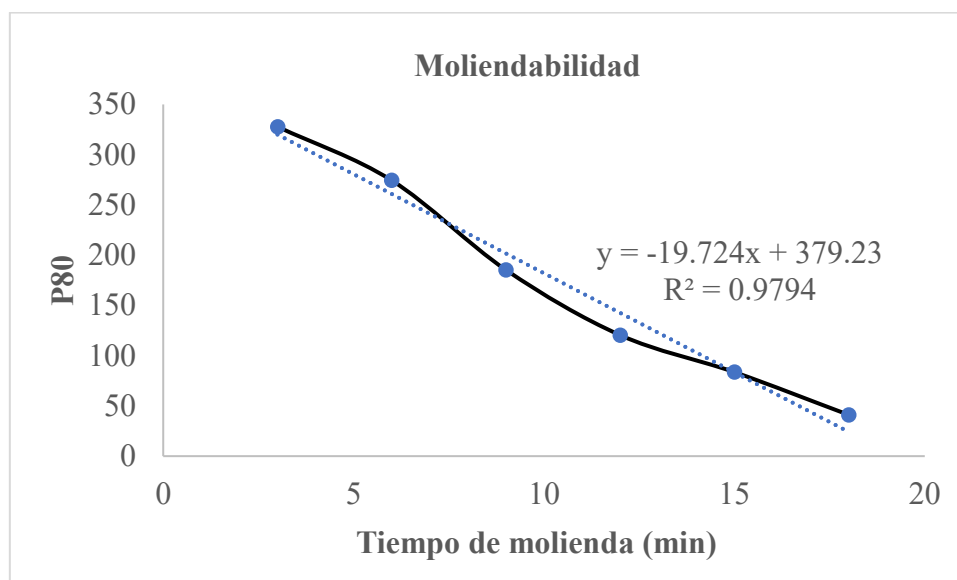
5.3. Pruebas de Moliendabilidad

Se realizaron pruebas de moliendabilidad empleando un molino de bolas de laboratorio de 1 Kg de capacidad, y 14 Kg de bolas con tamaños de 60% de bolas de 1", y 40% de 0.5". Para el tamizaje de la muestra se usó un Ro-Tap mecánico acondicionado en húmedo, y un set de mallas de la serie Tyler. Los resultados de las pruebas de moliendabilidad se describen en la tabla 9, y la curva de la figura 22 representa el tamaño de partícula P_{80} en función del tiempo de molienda.

Tabla 9*Reporte de P80 en función del tiempo de molienda*

Tiempo (min)	P80 (μ)
3	327.86
6	274.41
9	185.32
12	120.44
15	83.61
18	41.11

Nota: El análisis de malla empleó 300 gramos de muestra representativa.

Figura 22*Curva de moliendabilidad*

Nota: Se ajustó un modelo matemático lineal

5.4. Proceso Estándar de Flotación

Los pequeños mineros de Huaylas explotan y procesan el mineral sulfurado en plantas de alquiler, teniendo en cuenta las condiciones de operación que se presentan la tabla 10.

Tabla 10*Condiciones de operación de la flotación estándar*

Proceso	Variable	Valor
Pb	Granulometría	50% - Malla 200
	pH	8.5
	ZnSO ₄	150 g/TM
	NaCN	30 g/TM
	AR-3418	50 g/TM
	MIBC	25 g/TM
Zn	Granulometría	65% - Malla 200
	pH	11
	CuSO ₄	100 g/TM
	Z-11	100 g/TM
	MIBC	30 g/TM

Nota: Datos representados con porcentaje (%), gramos por toneladas métricas (g/TM) y minutos.

Los resultados de las pruebas metalúrgicas bajo las condiciones estándar determinaron los valores que se presentan en la tabla 11.

Tabla 11*Valores de la campaña actual*

Campaña	Rec. Pb	Ley Pb	Rec. Zb	Ley Zn
60 TM	89.25%	54.27%	92.10%	50.41%

Nota: Datos representados con porcentaje (%) y toneladas métricas (TM).

5.5. Flotación del Mineral de Cabeza – Etapa de Pb

En base a la mineralogía de la muestra, se desarrollaron pruebas de flotación de minerales, empleando una celda Denver de laboratorio y una celda de volumen de 4 L. Para las pruebas de flotación de Pb, los valores de las variables consideradas constantes se describen en la tabla 12.

Tabla 12*Condiciones de operación de la flotación de Pb*

Variable	Valor
Peso (g)	1200
% Sólidos	35
Granulometría	Según diseño
pH	8.5
ZnSO ₄	200 g/TM
NaCN	50 g/TM
Acondicionamiento - depresores	10 minutos
AR-3418	Según diseño
AR-1242	20 g/TM
MIBC	15 g/TM
Acondicionamiento - colectores	10 minutos
Tiempo de flotación	12 minutos

Nota: Datos representados con gramos (g), porcentaje (%), gramos por toneladas métricas (g/TM) y minutos.

5.5.1. Diseños Experimentales para la Flotación de Pb

En esta primera etapa, se evaluó la influencia de las variables granulometría y dosificación de colector AR-3418, sobre la recuperación y calidad del concentrado de Pb, empleando diseños experimentales factoriales de 2 factores, 2 niveles y 2 réplicas. Para ello, se empleó el software estadístico Minitab 19. Los valores de las variables se describen en la tabla 13, y el diseño experimental de pruebas en la tabla 14.

Tabla 13*Variables del diseño experimental de flotación de Pb*

Variable	Valor mínimo	Valor máximo
Granulometría	180 μ	250 μ
AR-3418	40 g/TM	80 g/TM

Nota: Se presentan los valores mínimos y máximos de las variables independientes del diseño.

Tabla 14*Diseño de pruebas de flotación de Pb*

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Granulometría	AR-3418
1	1	1	1	180	40
2	2	1	1	250	40
3	3	1	1	180	80
4	4	1	1	250	80
5	5	1	1	180	40
6	6	1	1	250	40
7	7	1	1	180	80
8	8	1	1	250	80

Nota: Se utilizó el software estadístico Minitab 19.

5.5.1.1. Resultados de las pruebas de Flotación de Pb

Se alcanzó la mayor de recuperación de Pb en la prueba N°8, con un valor de 97.35 % y una calidad de concentrado de 61.55 % de Pb. Además, dicho concentrado reportó 21.15 Oz/TC de Ag, alcanzando una recuperación de 92.49%. Por lo contrario, los valores más bajos corresponden a la prueba 5, alcanzando una recuperación de 85.41% de Pb, con una calidad de 52.88%, valores se alcanzados a un P80 de 180 μ y 40 g/TM de AR-3418.

El total de los resultados de las pruebas de flotación, se describen en la tabla 15, y los balances metalúrgicos se detallan en los anexos.

Tabla 15*Resultados de las pruebas de flotación de Pb*

N° Prueba	Rec. Pb (%)	Ley Pb(%)	Rec. Ag (%)	Ley Ag(%)
1	85.43	53.67	89.35	19.87
2	92.49	56.73	91.65	20.44
3	89.40	54.15	91.33	20.01
4	96.60	60.35	91.75	21.15
5	85.41	52.88	90.71	19.54

6	93.05	57.51	91.29	20.44
7	90.11	52.97	91.00	19.84
8	97.35	61.55	92.49	21.15

Nota: Se realizaron las 8 pruebas determinadas según el diseño.

5.5.1.2. Análisis de la Varianza para la Recuperación de Pb

El ANOVA para la recuperación de Pb demostró la mayor contribución de la granulometría sobre dicha variable, con un valor de 74.10%, así también la dosificación del AR-3418 representó una contribución del 25.41 %, tal y como se observa en la tabla 16. La ecuación 1 representa el modelo matemático que predice la recuperación de plomo en función de las variables de granulometría P80 y dosificación de AR-3418, la cual presentó un coeficiente de correlación predictivo del 98.08 %, lo que demuestra la confiabilidad del modelo. Los valores de los coeficientes de correlación del modelo ajustado se describen en la tabla 17.

Tabla 16

Análisis de las variables para la recuperación de Pb

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	142.652	99.52%	142.652	47.551	276.03	0
Lineal	2	142.643	99.51%	142.643	71.321	414.02	0
Granulometría	1	106.223	74.10%	106.223	106.223	616.62	0
AR-3418	1	36.42	25.41%	36.42	36.42	211.42	0
Interacciones dobles	1	0.01	0.01%	0.01	0.01	0.06	0.825
Granulometría*AR-3418	1	0.01	0.01%	0.01	0.01	0.06	0.825
Error	4	0.689	0.48%	0.689	0.172		
Total	7	143.341	100.00%				

Nota: Se destaca la contribución de la granulometría en la flotación.

$$\text{Rec. Pb (\%)} = 61.81 + 0.1071 \times \text{Granulometría} + 0.1173 \times \text{AR-3418} - 0.000049 \times \text{Granulometría} \times \text{AR-3418} \quad (1)$$

Tabla 17

Coefficientes de correlación para la recuperación de Pb

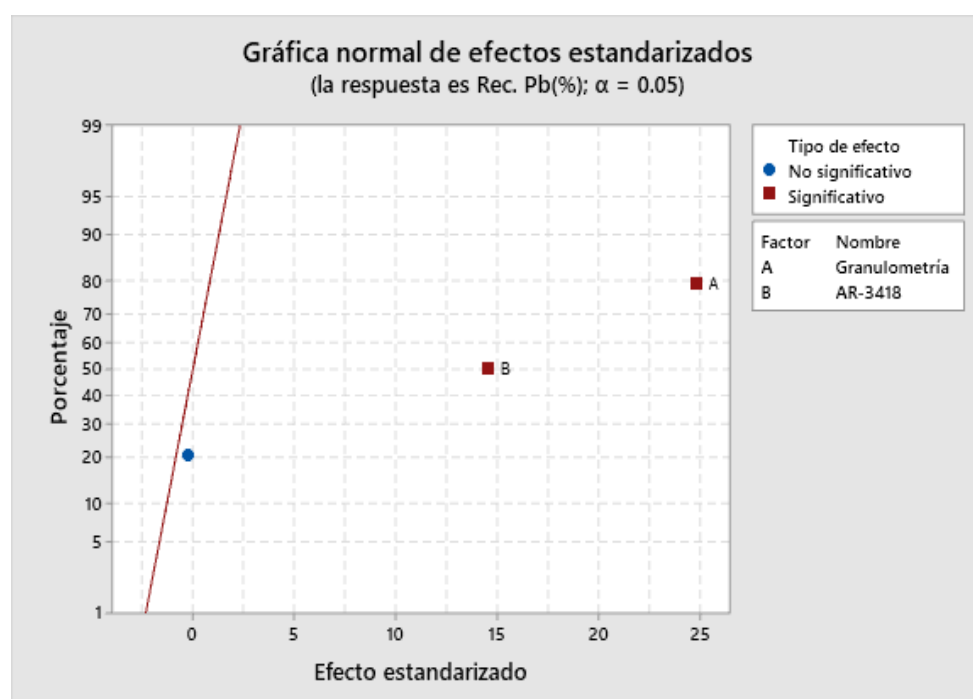
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
0.415051	99.52%	99.16%	2.75627	98.08%	43.09	13.49

Nota: El R^2 predictivo representa la confiabilidad del modelo.

La figura 23 representa la gráfica normal de efectos estandarizados para la recuperación de Pb, la cual demuestra que las variables granulometría y dosificación de AR-3418 son significativos para recuperar Pb.

Figura 23

Gráfico normal de efectos estandarizados para la recuperación de Pb



Nota: Determinado con una confiabilidad del 95%

5.5.1.3. Análisis de la Varianza para la Calidad de Pb

El ANOVA para la ley de Pb en el concentrado demostró la mayor contribución de la granulometría sobre dicha variable, con un valor de 79%, así también la dosificación del AR-3418 representó una contribución del 11%, y las interacciones entre las variables representó una contribución de 8%, tal y como se observa en la tabla 18. La ecuación 2 representa el modelo matemático que predice la recuperación de plomo en función de las variables de granulometría P80 y dosificación de AR-3418, la cual presentó un coeficiente de correlación predictivo del 98.08 %, lo que demuestra la confiabilidad del modelo. Los valores de los coeficientes de correlación del modelo ajustado se describen en la tabla 19.

Tabla 18

Análisis de las variables para la calidad de Pb

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	77.86	0.97	77.86	25.95	51.08	0.00
Lineal	2	71.58	0.90	71.58	35.79	70.44	0.00
Granulometría	1	63.11	0.79	63.11	63.11	124.21	0.00
AR-3418	1	8.47	0.11	8.47	8.47	16.66	0.02
Interacciones dobles	1	6.28	0.08	6.28	6.28	12.37	0.03
Granulometría*AR-3418	1	6.28	0.08	6.28	6.28	12.37	0.03
Error	4	2.03	0.03	2.03	0.51		
Total	7	79.90	1.00				

Nota: Se destaca la contribución de la granulometría en la flotación.

$$\text{Ley Pb (\%)} = 52.22 + 0.0043 \times \text{Granulometría} - 0.2208 \times \text{AR-3418} + 0.001266 \times \text{Granulometría} \times \text{AR-3418} \quad (2)$$

Tabla 19

Coefficientes de correlación para la calidad de Pb

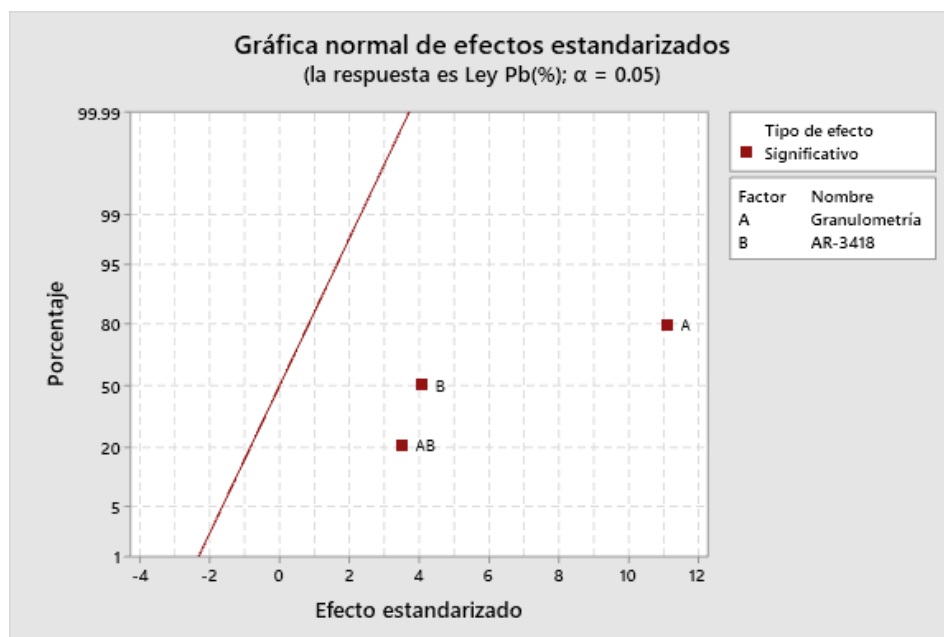
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
0.71282	97.46%	95.55%	8.1298	89.82%	51.74	22.14

Nota: El R^2 predictivo representa la confiabilidad del modelo.

La figura 24 representa la gráfica normal de efectos estandarizados para la calidad del concentrado de Pb, la cual demuestra que las variables granulometría y dosificación de AR-3418 son significativos para dicha variable respuesta.

Figura 24

Gráfico normal de efectos estandarizados para la ley de Pb



Nota: Considerando una confiabilidad del 95%.

5.5.1.4. Análisis de la Varianza para la Recuperación de Ag

El ANOVA para la recuperación de Ag demostró la mayor contribución de la variable granulometría, con un valor de 50.87%, seguido de la dosificación de AR-3418

con 24.73%, así también, el modelo que representa la recuperación de la Ag se representa en la ecuación 3, con un coeficiente de correlación predictivo del 8.09%, lo que demuestra que el modelo no es confiable para recuperar Ag. El conjunto total de coeficientes de correlación del modelo para recuperar Ag, se detallan en la tabla 21.

Tabla 20

Análisis de las variables para la recuperación de Ag

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	4.59021	77.02%	4.59021	1.53007	4.47	0.091
Lineal	2	4.50558	75.60%	4.50558	2.25279	6.58	0.054
Granulometría	1	3.03167	50.87%	3.03167	3.03167	8.86	0.041
AR-3418	1	1.47391	24.73%	1.47391	1.47391	4.31	0.107
Interacciones dobles	1	0.08463	1.42%	0.08463	0.08463	0.25	0.645
Granulometría*AR-3418	1	0.08463	1.42%	0.08463	0.08463	0.25	0.645
Error	4	1.36941	22.98%	1.36941	0.34235		
Total	7	5.95962	100.00%				

Nota: Se destaca la contribución de la granulometría en la flotación.

$$\text{Rec. Ag (\%)} = 84.21 + 0.026 \times \text{Granulometría} + 0.0531 \times \text{AR-3418} + 0.000147 \times \text{Granulometría} \times \text{AR-3418} \quad (3)$$

Tabla 21

Coefficientes de correlación para la recuperación de Ag

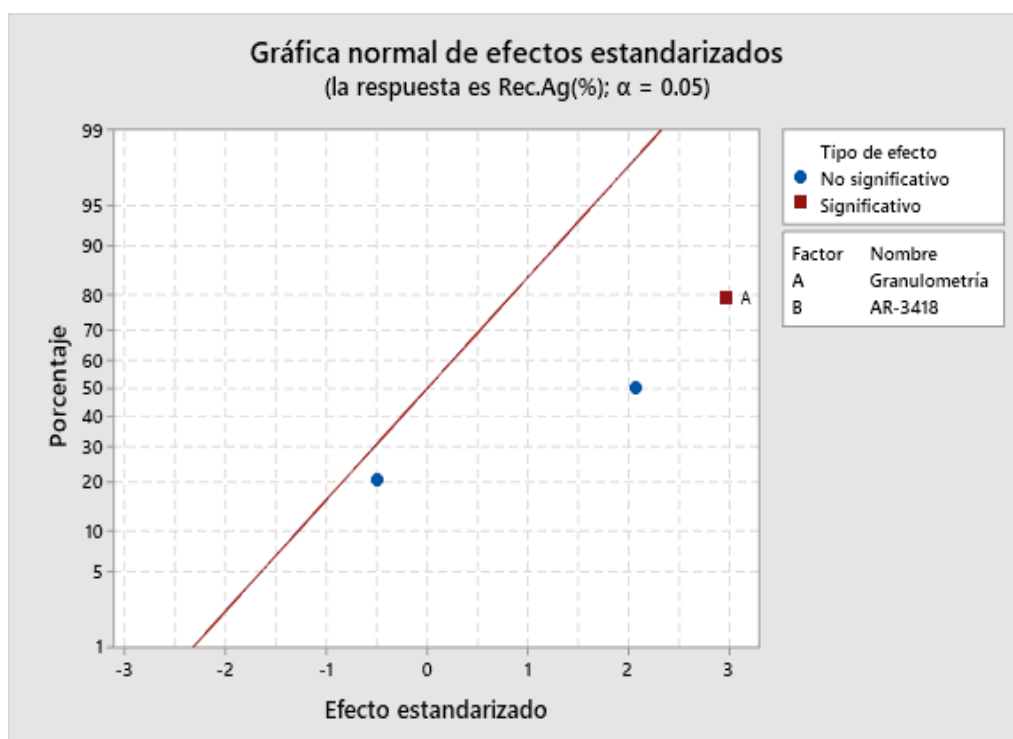
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
0.58511	77.02%	59.79%	5.47766	8.09%	48.58	18.98

Nota: El R² predictivo determinó que el modelo no es confiable para recuperar plata (%).

La figura 25 representa la gráfica normal de efectos estandarizados para la recuperación de Ag en el concentrado, la cual demuestra que la variable granulometría es significativa para dicha variable respuesta.

Figura 25

Gráfico normal de efectos estandarizados para la recuperación de Ag



Nota: Considerando una confiabilidad del 95%

5.5.1.5. Análisis de la Varianza para la Calidad de Ag

El análisis de la varianza para la calidad de Ag en el concentrado demostró la mayor contribución de la variable granulometría, con un valor de 75.56 %, tal y como se observa en la tabla 22. El modelo que representa la calidad de Ag en el concentrado se puede observar en la ecuación 4, la cual presentó un coeficiente de correlación predictivo del 89.16 %, lo cual demuestra que el modelo es replicable, tal y como se observa en la tabla 23.

Tabla 22*Análisis de las variables para la calidad de Ag*

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	2.4733	97.29%	2.4733	0.82443	47.86	0.001
Lineal	2	2.35325	92.57%	2.35325	1.17662	68.31	0.001
Granulometría	1	1.9208	75.56%	1.9208	1.9208	111.51	0
AR-3418	1	0.43245	17.01%	0.43245	0.43245	25.11	0.007
Interacciones dobles	1	0.12005	4.72%	0.12005	0.12005	6.97	0.058
Granulometría*AR-3418	1	0.12005	4.72%	0.12005	0.12005	6.97	0.058
Error	4	0.0689	2.71%	0.0689	0.01723		
Total	7	2.5422	100.00%				

Nota: Se destaca la contribución de la granulometría en la flotación.

$$\text{Ley Ag (\%)} = 18.855 + 0.00350 \times \text{Granulometría} - 0.0260 \times \text{AR-3418} + 0.000175 \\ \times \text{Granulometría} \times \text{AR-3418} \quad (4)$$

Tabla 23*Coefficientes de correlación para la calidad de Ag*

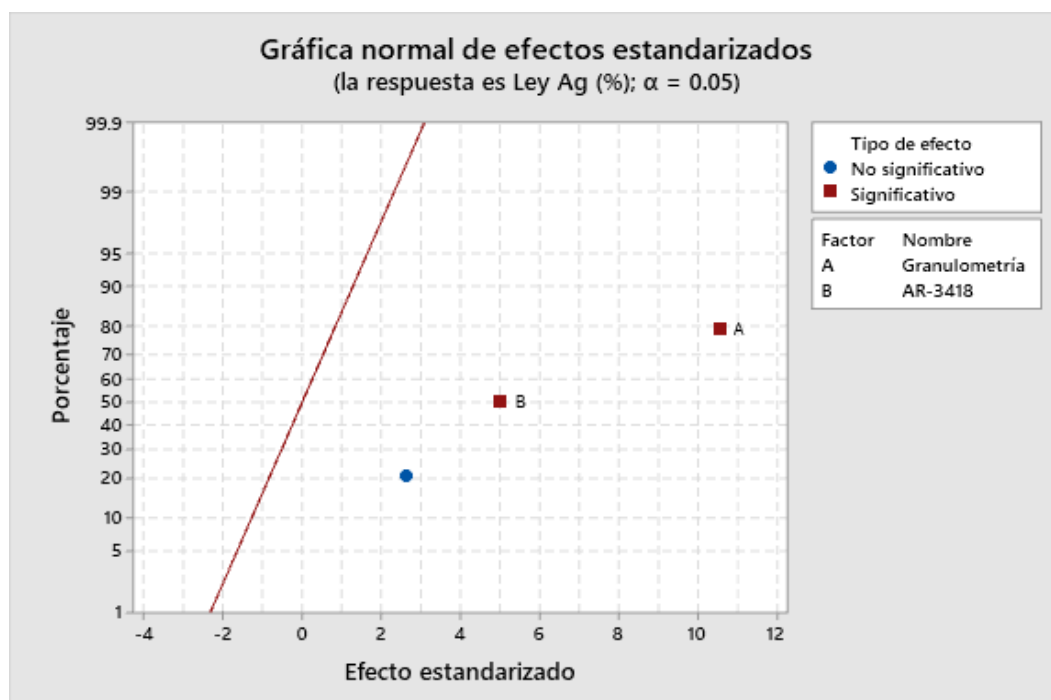
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
0.131244	97.29%	95.26%	0.2756	89.16%	24.67	-4.94

Nota: El R² predictivo representa la confiabilidad del modelo.

La figura 26 representa la gráfica normal de efectos estandarizados para la ley de Ag en el concentrado, la cual demuestra que las variables granulometría y dosificación de reactivo AR-3418 son significativos para dicha variable respuesta.

Figura 26

Gráfico normal de efectos estandarizados para la ley de Ag



Nota: Considerando una confiabilidad del 95%.

5.5.1.6. Optimización de la Flotación de Pb-Ag

Se optimizó el valor de las variables independientes para maximizar la recuperación y calidad de Pb y Ag, mediante el proceso de flotación, para ello, se empleó la función optimizadora de respuestas del Minitab 19. Los valores optimizados de las variables independientes y dependientes se representan en la tabla 24.

Tabla 24

Datos optimizados de la flotación de Pb-Ag

Solución	Granulometría	AR-3418	Ley Ag (%) Ajuste	Rec. Ag (%) Ajuste	Ley Pb(%) Ajuste	Rec. Pb(%) Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	250	80	21.15	92.121	60.95	96.9711	0.944272

Nota: Valores optimizados por el paquete estadístico Minitab 19.

5.6. Flotación – Etapa de Zn

En esta segunda etapa, se evaluó la influencia de las variables dosificación de reactivos CuSO_4 (5%) como activador de esfalerita, y xantato Z-11(1%) como colector, sobre la recuperación y calidad del concentrado de Zn, empleando- diseños experimentales factoriales con el uso del software estadístico Minitab 19. Las condiciones de operación para el desarrollo del diseño de pruebas, se detalla en la tabla 25.

Tabla 25

Condiciones de operación de la flotación de Zn

Variable	Valor
Peso (g)	1000
pH	11
Granulometría	70% - 200 Malla
CuSO_4	Según su diseño
Acondicionamiento - depresores	10 minutos
Z-11	Según su diseño
MIBC	15 g/TM
Acondicionamiento colectores	10 minutos
Tiempo de flotación	15 minutos

Nota: Datos representados con gramos (g), porcentaje (%), gramos por toneladas métricas (g/TM) y minutos.

5.6.1. Diseños Experimentales para la Flotación de Zn

Se elaboró un diseño experimental factorial de 2 factores, 2 niveles y 2 réplicas, con el uso del software estadístico Minitab 19. Los valores mínimos y máximos de las variables se describen en la tabla 26, y el diseño experimental de pruebas en la tabla 27.

Tabla 26*Variables del diseño experimental de flotación de Zn*

Variable	Valor mínimo	Valor máximo
CuSO ₄	250 g/TM	500 g/TM
Z-11	50 g/TM	100 g/TM

Nota: Se presentan los valores mínimos y máximos del diseño de pruebas.

Tabla 27*Elaboración del diseño experimental de flotación de Zn empleando Minitab 19*

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	CuSO ₄	Z-11
1	1	1	1	250	50
2	2	1	1	500	50
3	3	1	1	250	100
4	4	1	1	500	100
5	5	1	1	250	50
6	6	1	1	500	50
7	7	1	1	250	100
8	8	1	1	500	100

Nota: Diseño de 2 factores, 2 niveles y 2 réplicas

5.6.1.1. Resultados de las pruebas de Flotación de Zn

Se alcanzó la mayor de recuperación de Zn en la prueba N° 6, alcanzando un valor de 98.14 %, con una calidad de concentrado de 58.63% de Zn. Por lo contrario, los valores más bajos corresponden a la prueba N°1, alcanzando una recuperación de 91.81% de Zn, con una calidad de 50.04%, dichos valores se alcanzaron con dosificaciones de 250 g/TM de CuSO₄, y 50 g/TM de Z-11. El total de los resultados de las pruebas de flotación de Zn se detallan en la tabla 28, y los balances metalúrgicos se detallan en los anexos.

Tabla 28*Resultados de las pruebas de flotación de Zn*

N° Prueba	Rec. Zn (%)	Ley Zn (%)
1	91.81	50.04
2	97.89	57.81
3	93.56	54.15
4	94.58	52.66
5	92.18	51.11
6	98.14	58.63
7	94.82	53.74
8	95.70	53.17

Nota: Se realizaron las 8 pruebas determinadas según el diseño.

5.6.1.2. Análisis de la Varianza para la Recuperación de Zn

El ANOVA para la recuperación de Zn demostró la mayor contribución de la dosificación del reactivo CuSO_4 (5%), con un valor de 62.50%, así también la interacción de la dosificación de ambos reactivos representa una contribución del 33%, tal y como se observa en la tabla 29. La ecuación 1 representa el modelo matemático que predice la recuperación de zinc en función de las variables de dosificación de CuSO_4 (5%) y Z-11 (1%), la cual presentó un coeficiente de correlación predictivo del 84.39 %, lo que demuestra la confiabilidad del modelo. Los valores del total de los coeficientes de correlación del modelo ajustado se describen en la tabla 30.

Tabla 29*Análisis de las variables para la recuperación de Zn*

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	37.3842	96.10%	37.3842	12.4614	32.83	0.003
Lineal	2	24.5444	63.09%	24.5444	12.2722	32.33	0.003
CuSO ₄	1	24.3139	62.50%	24.3139	24.3139	64.05	0.001
Z-11	1	0.2306	0.59%	0.2306	0.2306	0.61	0.479
Interacciones dobles	1	12.8398	33.00%	12.8398	12.8398	33.82	0.004
CuSO ₄ * Z-11	1	12.8398	33.00%	12.8398	12.8398	33.82	0.004
Error	4	1.5185	3.90%	1.5185	0.3796		
Total	7	38.9027	100.00%				

Nota: Se destaca la contribución del CuSO₄ en la flotación.

$$\text{Rec. Zn (\%)} = 78.71 + 0.04435 \times \text{CuSO}_4 + 0.1452 \times \text{Z-11} - 0.000405 \times \text{CuSO}_4 \times \text{Z-11} \quad (5)$$

Tabla 30*Coefficientes de correlación para la recuperación de Zn*

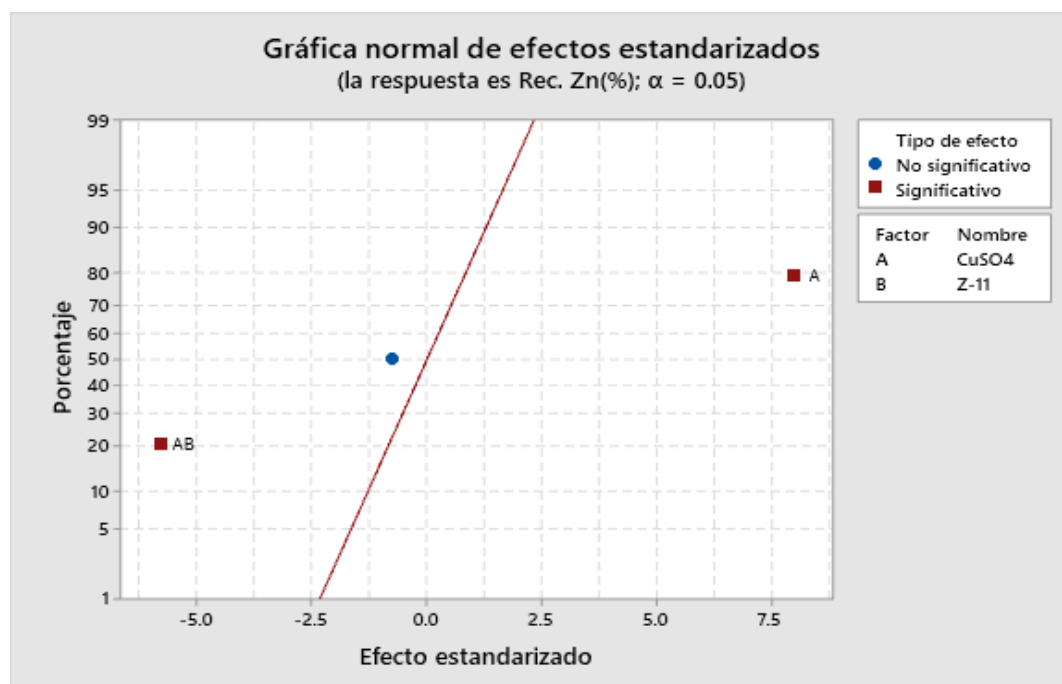
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
0.616131	96.10%	93.17%	6.07388	84.39%	49.41	19.81

Nota: El R² predictivo representa la confiabilidad del modelo.

La figura 27 representa la gráfica normal de efectos estandarizados para la recuperación de Zn en el concentrado, la cual demuestra que las variables dosificación del reactivo CuSO₄ (5%) y la interacción de la dosificación de ambos reactivos, son significativos para dicha variable respuesta.

Figura 27

Gráfico normal de efectos estandarizados para la recuperación de Zn



Nota: Considerando una confiabilidad 95%.

5.6.1.3. Análisis de la Varianza para la Calidad de Zn

El análisis de la varianza para la ley de Zn en el concentrado demostró la mayor contribución de la interacción de la dosificación de CuSO₄ (5%) y Z-11, con un valor de 60.20%, así también la dosificación de CuSO₄ (5%) representó una contribución del 35.01%, tal y como se observa en la tabla 31. La ecuación 6 representa el modelo matemático que predice la calidad de zinc en función de las variables de dosificación de CuSO₄ (5%) y Z-11 (1%), la cual presentó un coeficiente de correlación predictivo del 92.81 %, lo que demuestra la confiabilidad del modelo. Los valores del total de los coeficientes de correlación del modelo ajustado se describen en la tabla 32.

Tabla 31*Análisis de las variables para la calidad de Zn*

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	61.379	98.20%	61.379	20.4597	72.89	0.001
Lineal	2	23.751	38.00%	23.751	11.8756	42.31	0.002
CuSO ₄	1	21.879	35.01%	21.879	21.8791	77.95	0.001
Z-11	1	1.872	3.00%	1.872	1.8721	6.67	0.061
Interacciones dobles	1	37.628	60.20%	37.628	37.6278	134.06	0
CuSO ₄ * Z-11	1	37.628	60.20%	37.628	37.6278	134.06	0
Error	4	1.123	1.80%	1.123	0.2807		
Total	7	62.502	100.00%				

Nota: Se destaca la contribución del CuSO₄ en la flotación.

$$\text{Ley Zn (\%)} = 30.88 + 0.06528 \times \text{CuSO}_4 + 0.2409 \times \text{Z-11} - 0.000694 \times \text{CuSO}_4 \times$$

$$\text{Z-11} \quad (6)$$

Tabla 32*Coefficientes de correlación para la calidad de Zn*

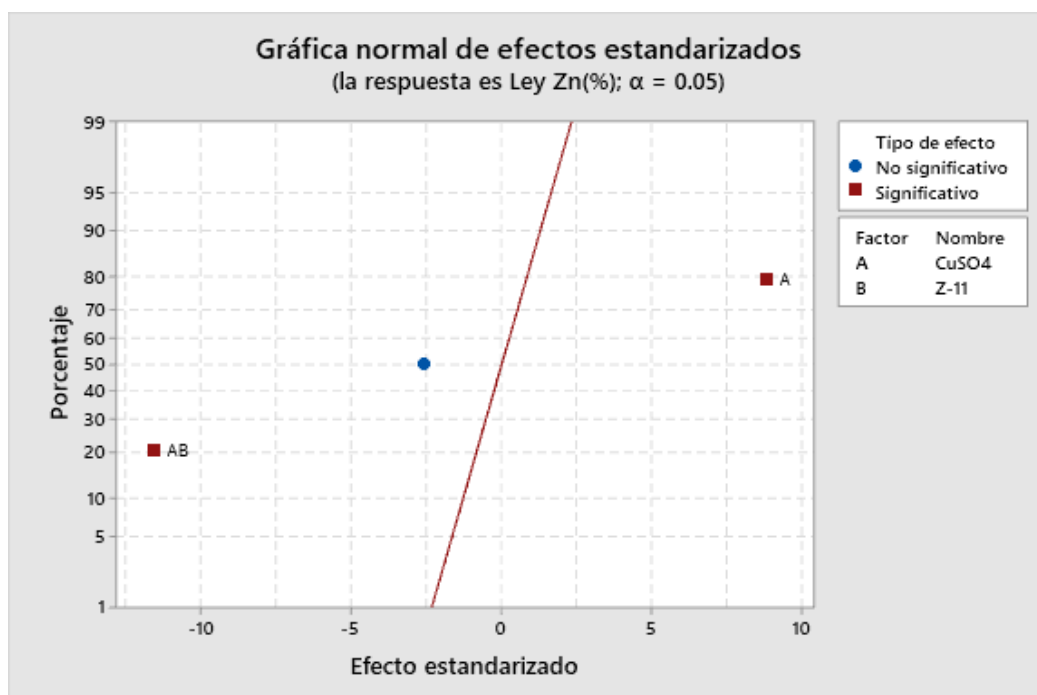
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
0.529799	98.20%	96.86%	4.491	92.81%	46.99	17.39

Nota: El R predictivo representa la confiabilidad del modelo.

La figura 28 representa la gráfica normal de efectos estandarizados para la calidad de Zn en el concentrado, la cual demuestra que la interacción de la dosificación de ambos reactivos, son los más significativos para dicha variable respuesta.

Figura 28

Gráfico normal de efectos estandarizados para la ley de Zn



Nota: Considerando una confiabilidad 95%.

5.6.1.4. Optimización de la Flotación de Zn

Se optimizó el valor de las variables independientes para maximizar la recuperación y calidad de Zn, mediante el proceso de flotación, para ello, se empleó la función optimizadora de respuestas del Minitab 19. Los valores optimizados de las variables independientes y dependientes se representan en la tabla 33.

Tabla 33

Datos optimizados de la flotación de Zn

Solución	CuSO ₄	Z-11	Ley Zn (%) Ajuste	Rec. Zn (%) Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	250	80	58.22	98.0139	0.966429

Nota: Considerando los datos máximos de las variables.

5.7. Valorización de los Concentrados

La evaluación metalúrgica del proceso de flotación de minerales polimetálicos determinó una recuperación de 92.89% de Pb con una calidad de 22%, además, el concentrado presentó 25 Oz/TC de Ag, tal y como lo indica la prueba N°8 del diseño de la flotación de Pb (ver anexo 2). El contrato de comercialización del mejor concentrado de Pb obtenido en laboratorio se presenta en la tabla 34, e indicó un valor de 1327.88 \$/TM

El contrato de comercialización de concentrado de Zn se detalla en la tabla 35, calculado en base a los valores de la prueba N°6 del diseño de pruebas de flotación de Zn (ver anexo 3), determinando un valor de 1041.02 \$/TM.

Tabla 34*Contrato de comercialización de concentrado de Pb*

Datos por considerar:	
Variable	Valor
TMH	124.69
%H2O	8.00
TMS	114.71
%Merma	2.00
TMSN	112.42
Ley de Cu (%)	0.40
Ley de Zn(%)	0.87
Ley de Pb (%)	61.55
Ley de As (%)	0.50
Ley de Hg (ppm)	0.00
Ley de Sb (%)	2.80
Ley de Bi (%)	0.05
Ley de Ag (oz/TM)	21.15
Ley de Au (g/TM)	0.00
Bonificaciones	
Elemento	\$/TM
As (%)	0.00
Sb (%)	393.62
Total	393.62

Deducción						
Elemento	Leyes (%)	Deducción (% o g/TM)	%Pago	Cotización (\$/TM o \$/Oz)	\$/TM	
Pb(%)	61.55	3	95.00	2087.39	1161.06	
Ag (Oz/TM)	21.15	50	90.00	22.38	393.62	
Au (g/TM)	0.00	0	90.00	1992.08	0.00	
Descuentos						
Tipo de maquila		Fundición (\$/TM)	Refinación (\$/TM)			
Pb (ctv/lb)			61.32			
Ag (\$/Oz)		152.19	7.04			
Au (\$/Oz)			0.00			
Total de maquila		220.55				
Castigos por impurezas						
Elemento	Ley	Tolerancia	Descuento	% Unidad	\$/TM (X)	
As (%)	0.21	0.2	2.5	0.1	0.25	
Sb (%)	0.11	0.2	2.5	0.1	0.00	
Bi (%)	0.05	0.01	1.5	0.01	6.00	
Zn (%)	5.31	10	2.5	1	0.00	
Hg (ppm)	20	30	2	30	0.00	
Total					6.25	
Valorización						
Valor	\$					
1TM de concentrado	1327.88					
Lote de concentrado	149280.95					

Nota: Los datos de valorización son representados en \$/mes.

Tabla 35*Contrato de comercialización de concentrado de Zn*

Datos por considerar:		
Variable	Valor	
Lote (TMH)	72.5	
Agua	8%	
Merma	2%	
Maquila (\$/TC)	178.94	
Precio base (\$/TM)	2500	
Escalador de precios - Arriba (\$/TM)	0.18	
Escalador de precios - Abajo (\$/TM)	0.12	
Costo Zn (\$/TM)	2312.5	
Costo Ag (\$/Oz)	22.38	
Costo Au (\$/Oz)	1992.08	
Ley de SiO2 en el concentrado	0.00%	
Ley de Zn en el concentrado	58.63%	
Ley de Mn en el concentrado	0.00%	
Ley de As en el concentrado	0.34%	
Ley de Sb en el concentrado	1.80%	
Ley de Bi en el concentrado	0.00%	
Ley de Hg(ppm) en el concentrado	0	
Ley de Ag(oz/TC) en el concentrado	1	
Ley de Fe en el concentrado	15%	

Penalización				
Metal	Cantidad libre	Penalización	Cantidad límite para castigar	Castigo por impurezas
As	0.20%	2	0.10%	2.80
Sb	0.20%	2	0.10%	32.00
Bi	0.01%	2	0.01%	0.00
SiO2	2.50%	2	1.00%	0.00
Fe	8.00%	2	1.00%	14.00
Mn	0.4%	2	0.10%	0.00
Hg(ppm)	50	2	50	0.00

Bonificaciones y maquila	
Variable	Valor
Pagos por Zn (\$)	1309.57
Bonificación por Ag (\$)	0.00
Maquila de fundición (\$/TM)	197.24
Escalador de Zn (\$/TM)	22.50
Maquila total	219.74

Valorización	
Valor	\$
Valor del concentrado (\$)	1041.02
Valor del lote (\$)	68047.61

Pérdidas metalúrgicas		
Metal	Pérdidas metalúrgicas	% a pagar
Zn(%)	2%	100%
Ag(Oz/TM)	100%	100%

Nota: Los datos de valorización son representados en \$/mes.

CAPÍTULO VI: Discusión de Resultados

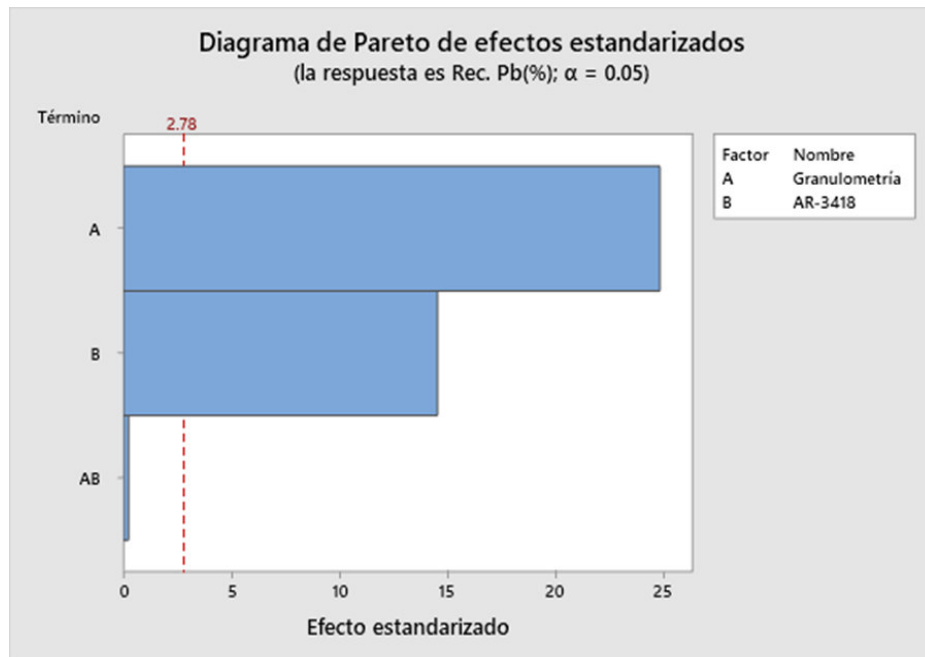
La microscopia óptica de la muestra representativa a una granulometría de 60% - 200 Malla permitió identificar a las especies de galena y esfalerita con valores de grado de liberación cercanos al 100 %, lo cual fue favorable para el desarrollo de las pruebas de flotación. Los valores de plata reportados en el mineral de cabeza no solo provienen de la plata nativa que se observó, es probable que cierta cantidad de este elemento se encuentre asociado a la galena. Se pudo identificar cantidades de cobre en leyes de 0.35 %, los cuales no son considerados comerciales para este proyecto, las cuales proviene de minerales como la calcopirita y tetraedrita.

Para el diseño de las pruebas de flotación de Pb, se tomaron en cuenta las variables de granulometría y dosificación del colector AR-3418, teniendo en cuenta que la naturaleza del plomo le favorece flotar a tamaños gruesos, se consideró valores de P80 entre 180 μ y 250 μ . Con respecto a la evaluación del colector específico, se tomó en cuenta la investigación de (Foroutan et al., 2021), además de ello, se tomaron en cuenta los valores de pH que utilizó, siendo la principal fuente de información para guiar la etapa de flotación de Pb. La influencia de las variables de granulometría y dosificación de reactivo AR-3418 sobre la recuperación y calidad del concentrado de plomo, se representa en la figura 29 y 30.

Los reactivos evaluados fueron en base a pruebas preliminares e inspección visual, lo que permitió evaluar en una primera etapa los depresores de zinc, como el sulfato y cianuro de sodio con la finalidad de controlar el desplazamiento de las especies de zinc, concluyendo que la esfalerita se deprimía fácilmente con una dosificación de 200 g/TM y 50 g/TM, respectivamente, definiendo una de las variables constantes en función a los resultados obtenidos por (Önal et al., 2005).

Figura 29

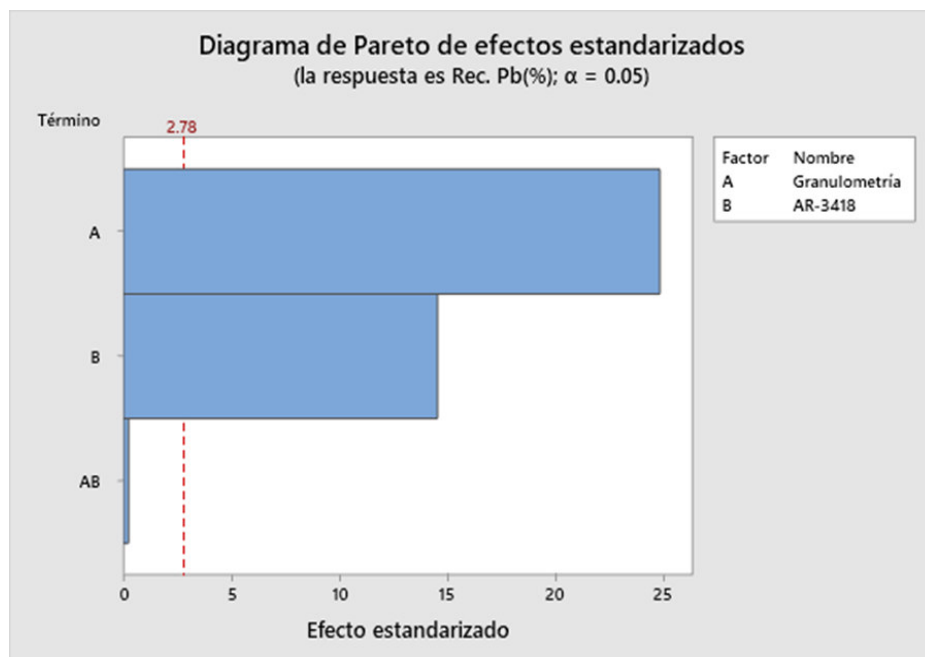
Diagrama de Pareto para la recuperación de Pb



Nota: Confiabilidad del 95%

Figura 30

Diagrama de Pareto para la calidad de Pb



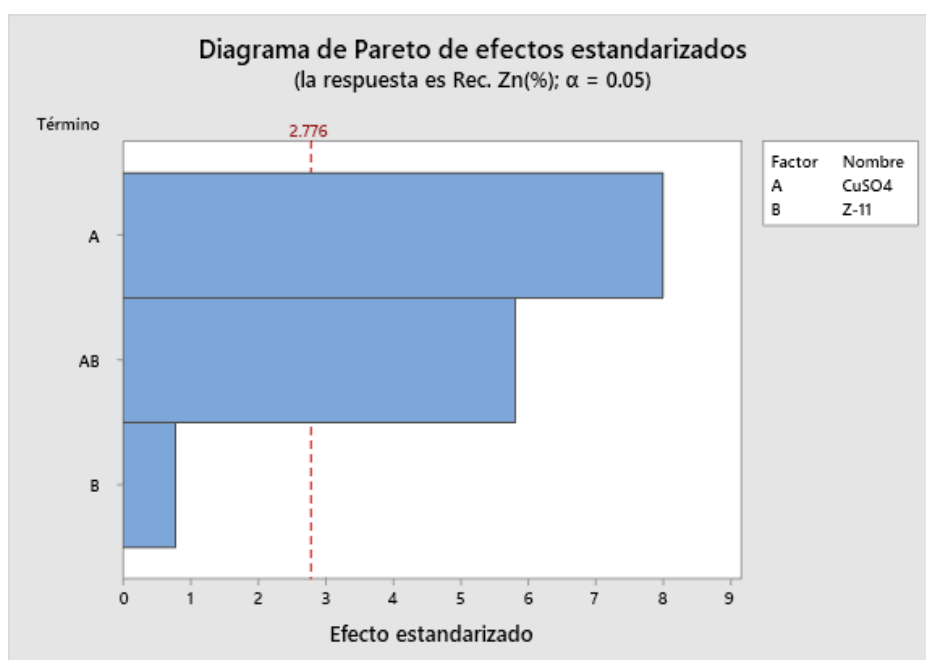
Nota: Confiabilidad del 95%

La mayor liberación de las especies a 60% - 200 Malla, favoreció completamente la flotación de las especies de minerales, dado que gran porcentaje del área superficial de las partículas quedaron expuestas a la acción de los colectores, tanto depresores como colectores.

La flotación de las especies de zinc no presentó algún tipo de problema, lográndose activar eficientemente con 500 g/TM de CuSO_4 , y como colector xantato Z-11, pudiendo evaluar algún tipo de colector que pudiera ahorrar costos, o que genere menos polución, como es en el caso de los reactivos sólidos. Como resultado de las pruebas se determinó que el sulfato de cobre es la variable más determinante para recuperar Zn en la segunda etapa, luego también ejerce influencia la interacción de ambas variables. La influencia de las variables estudiadas, sobre la recuperación y calidad de zinc en el concentrado, se representa gráficamente la figura 31 y 32.

Figura 31

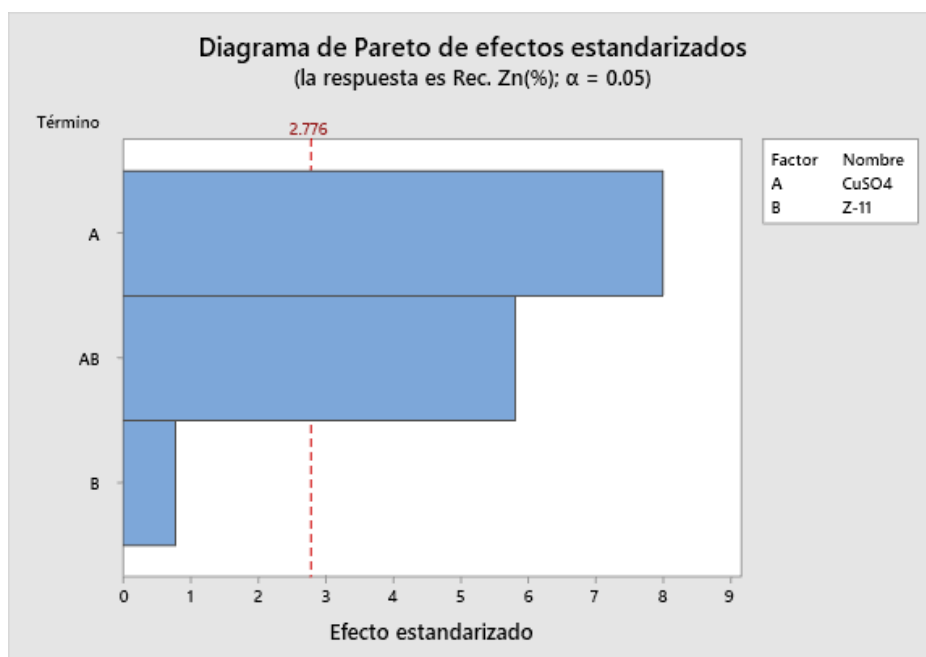
Diagrama de Pareto para la recuperación de Zn



Nota: Confiabilidad del 95%

Figura 32

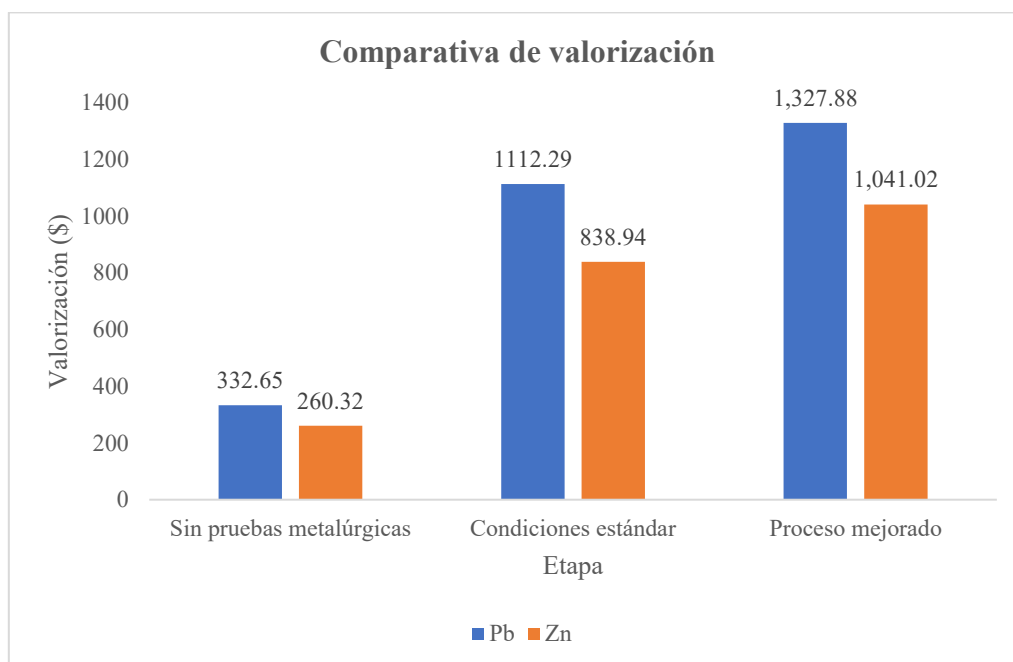
Diagrama de Pareto para la calidad de Zn



Nota: Confiabilidad del 95%

Otro aspecto fundamental en la evaluación de los resultados es el impacto económico que reciben los pequeños productores mineros al comercializar su mineral con o sin pruebas metalúrgicas. Generalmente, cuando el minero vende su mineral en bruto (sin análisis ni concentración), el pago recibido se basa en un valor promedio por tonelada de mineral, lo cual reduce significativamente su rentabilidad debido a que no se considera la recuperación real de los metales de interés.

En contraste, al realizar pruebas metalúrgicas, el productor puede conocer con mayor precisión el contenido y la recuperación de Pb y Zn, lo que le permite negociar un mejor precio de venta, estas pruebas tienen leyes de 54.27% y 50.41%, respectivamente. Finalmente, cuando el proceso es mejorado, se obtienen concentrados de mayor calidad y recuperación, lo que se traduce en una valorización económica superior, leyes de Pb de 61.55% y para Zn es 58.63%.

Figura 33*Comparativa de la mejora en la valorización*

Nota: Considerando los valores base de la venta de los concentrados, según sus recuperaciones y leyes

Este análisis evidencia que la caracterización mineralógica y la aplicación de pruebas metalúrgicas no solo permiten maximizar la recuperación de Pb y Zn, sino que representan un impacto económico tangible para los pequeños productores mineros.

CONCLUSIONES

- [1] La microscopía óptica de luz reflejada permitió identificar las especies minerales presentes en el mineral de cabeza, destacando la galena (20.56%) y la esfalerita (17.68%) como principales minerales sulfurados de plomo y zinc, respectivamente, además de trazas de calcopirita (1.27%), tetraedrita (0.69%) y plata nativa. Se observó que las partículas de galena y esfalerita están mayoritariamente liberadas (98.89% y 99.82%), lo que favorece su recuperación por flotación. Asimismo, la pirita fue el mineral mayoritario (34.38%), seguido de gangas (24.51%). Los análisis químicos confirmaron leyes de 17.41% de Pb, 12.93% de Zn y 5.23 Oz/TC de Ag, valores que superan los rangos mínimos de ley de corte reportados en la literatura para operaciones de pequeña minería, lo que respalda la viabilidad económica del tratamiento metalúrgico.
- [2] Considerando los datos actuales de la campaña (89.25% de recuperación de Pb con una ley de 54.27% y 92.10% de recuperación de Zn con una ley de 50.41%), el estudio metalúrgico realizado evidenció mejoras significativas en los parámetros evaluados. La mejor recuperación de plomo se obtuvo en la prueba N°8, logrando un 97.35% con una ley de 61.55% y 21.15 Oz/TC de Ag, empleando una granulometría de 250 μ , 80 g/TM de AR-3418, 200 g/TM de ZnSO₄, 50 g/TM de NaCN, 20 g/TM de AR-1242 y 15 g/TM de MIBC, a un pH de 8.5. Por otro lado, en la recuperación de zinc, la prueba N°6 alcanzó un 98.14% con una ley de 58.63%, utilizando una granulometría de 70% - 200 Malla, 500 g/TM de CuSO₄, 50 g/TM de Z-11 y 15 g/TM de MIBC, también a un pH de 11. Este análisis resalta el efecto de las condiciones de granulometría, reactivos y pH en el desempeño metalúrgico del proceso de flotación.

- [3] La valorización económica permite estimar la ganancia por los concentrados de plomo y zinc al ofrecer una base precisa para la negociación. La implementación de pruebas metalúrgicas y un proceso mejorado genera un incremento significativo en la rentabilidad del mineral. Según el análisis de valorización, el concentrado de plomo (Pb) del proceso mejorado alcanza un valor de \$1327.88 por tonelada, superando el valor de \$1112.29 obtenido bajo condiciones estándar y \$332.65 sin pruebas metalúrgicas. De manera similar, el concentrado de zinc (Zn) se valoriza en \$1041.02 por tonelada en el proceso mejorado, en contraste con \$838.94 en condiciones estándar y \$260.32 sin pruebas. Esta mejora sustancial en la valorización confirma que el estudio del proceso de flotación es una alternativa viable para maximizar los ingresos de los pequeños productores.

RECOMENDACIONES

Ampliar los estudios de caracterización mineralógica mediante técnicas avanzadas (como microscopía electrónica), a fin de obtener información más precisa sobre especies de Pb y Zn que puedan mejorar las estrategias de recuperación.

Realizar investigaciones sobre el tratamiento de aguas ácidas de mina en Huaylas, ya que representan un riesgo ambiental directo y su adecuado manejo contribuirá a la sostenibilidad de la actividad minera en la zona.

Analizar la viabilidad económica de establecer una planta de procesamiento de minerales en la región, tomando en cuenta aspectos normativos y legales aplicables, como los permisos formales de procesamiento (REINFO).

Realizar proyecciones económicas detalladas del proyecto, evaluando indicadores financieros como el VAN y el TIR, considerando diferentes horizontes de extracción y producción.

Explorar estrategias para optimizar la explotación del mineral, alineadas con los permisos de operación vigentes y las regulaciones aplicables.

Profundizar en la modelación geológica del yacimiento, lo que podría contribuir a estimaciones más precisas de los recursos disponibles y su aprovechamiento.

Incorporar enfoques integrales para la planificación de seguridad y salud en el trabajo durante las actividades de explotación minera, priorizando el bienestar de los trabajadores y el cumplimiento de estándares técnicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azañero, A. (2015). *Flotación y concentración de minerales*. Lima: Colecciones Jóvic.
- Castro, S. (2003). *Flotación, fundamentos y aplicaciones*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Curcio, S., De Jesús, M., Quirolo, M., & Vilker, A. (2010). Análisis de los determinantes de la variabilidad de los precios de las principales commodities exportadas por América Latina. *XI Jornadas Nacionales y Latinoamericanas Actuariales*.
- Ejtemaei, M., Gharabaghi, M., & Irannajad, M. (2014). A review of zinc oxide mineral beneficiation using flotation method. *Advances in Colloid and Interface Science*, 206, 68-78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.02.003>
- Foroutan, A., Zadeh, H., Kianinia, Y., & Ghadiri, M. (2021). Critical importance of pH and collector type on the flotation of sphalerite and galena from a low-grade lead–zinc ore. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-021-82759-3>
- Hernandez, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill. <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodología%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Huallpa, M. (2018). *Concentración por flotación de minerales sulfurados: plata, plomo, cobre, zinc y oro en minerales polimetálicos*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. https://repositorio.uni.edu.pe/bitstream/20.500.14076/13255/1/huallpa_am.pdf

- Irannajad, M., Salmani, O., & Mehdilo, A. (2019). Surface dissolution-assisted mineral flotation: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103050>.
- Kostović, M., & Gligorić, Z. (2015). Multi-criteria decision making for collector selection in the flotation of lead–zinc sulfide ore. *Minerals Engineering*, 74, 142-149.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.07.019>
- Kursun, H., & Ulusoy, U. (2015). Zinc Recovery from a Lead–Zinc–Copper Ore by Ultrasonically Assisted Column Flotation. *An International Journal*, 33(4), 349-356. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/02726351.2014.970314>
- Lee, K., Archibald, D., McLean, J., & Reuter, M. (2009). Flotation of mixed copper oxide and sulphide minerals with xanthate and hydroxamate collectors. *Minerals Engineering*, 22(4), 395-401.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.11.005>
- MINEM. (2023). *Boletín estadístico minero*. Lima: Ministerio de Energía y Minas.
<https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4745047-boletin-estadistico-minero-agosto-2023>
- MINEM. (2023). *Minería Peruana: Motor que impulsa el crecimiento*. Balance del primer semestre, Ministerio de Energía y Minas, Lima.
- Montero, I. (2012). *Formulación de un modelo matemático para optimizar la comercialización de minerales y metales en la región centro 2012*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Navidi, A., & Rashchi, F. (2008). Separation of oxidized zinc minerals from tailings: Influence of flotation reagents. *Minerals Engineering*, 21(12-14), 967-972.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.04.014>

- Nguyen, A. (2013). Froth Flotation. *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, 1-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.04401-2>
- Önal, G., Bulut, G., Gül, A., Kangal, O., Perek, K., & Arslan, F. (2005). Flotation of Aladag oxide lead–zinc ores. *Minerals Engineering*, 18(2), 279-282. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.10.018>
- Sibanda, V., Sipunga, E., Danha, G., & Mamvura, T. (2020). Enhancing the flotation recovery of copper minerals in smelter slags from Namibia prior to disposal. *Heliyon*, 6(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03135>
- Sotomayor, A. (2018). *Medio ambiente y comercialización de minerales*. Universidad de Lima. https://books.google.es/books?id=EdWEDwAAQBAJ&dq=comercializacion+de+minerales&lr=&hl=es&source=gbp_navlinks_s
- Sutulov, A. (1963). *Flotación de minerales*. Concepción: Instituto de Investigaciones Tecnológicas.
- Villaverde, E., & Lara, D. (2020). *Optimización de variables mediante la caracterización del circuito de molienda clasificación en la Planta Concentradora San Vicente 2019*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7424>
- Wei, Q., Dong, L., Qin, W., Jiao, F., Qi, Z., Feng, C., & Sun, D. (2021). Efficient flotation recovery of lead and zinc from refractory lead-zinc ores under low alkaline conditions. *Geochemistry*, 81(4), 2-4. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemer.2021.125769>
- Yianatos, J. (2005). *Flotación de minerales*. Universidad Técnica Federico Santa María.

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de consistencia

“Evaluación metalúrgica del mineral polimetálico de Pb-Zn en el proceso de flotación en la pequeña minería de la provincia de Huaylas-Ancash”				
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Hipótesis	
			Variables de la hipótesis general	
			Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿Cómo puede la evaluación metalúrgica del proceso de flotación en mejora de la recuperación Pb y Zn en la pequeña minería del distrito de Huaylas – Ancash?	Realizar la evaluación metalúrgica del proceso de flotación de minerales polimetálicos para aumentar la recuperación Pb y Zn en los concentrados obtenidos por los pequeños productores mineros de la provincia de Huaylas – Ancash.	La evaluación metalúrgica del proceso de flotación podría permitir mejorar la recuperación y calidad de los concentrados de Pb y Zn obtenidos por los pequeños productores de la provincia de Huaylas – Ancash.	Granulometría	Estos datos se obtienen como resultado del análisis granulométrico, y se reportan en μm
			Dosificación de reactivos	Estos datos se miden con la ayuda de una micropipeta y se reportan en g/TM
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables de las hipótesis específicas	
Problema específico N°1	Objetivo específico N°1	Hipótesis específica N°1	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿Cómo contribuye la caracterización mineralógica mediante microscopía óptica de luz reflejada a la identificación de especies minerales, distribución volumétrica, grado de liberación y asociaciones en los minerales polimetálicos de Pb-Zn en la pequeña minería de la provincia de Huaylas – Ancash?	Caracterizar la muestra de mineral polimetálicos de Pb-Zn de los pequeños productores mineros, para determinar las especies mineralógicas presentes, distribución volumétrica, grados de liberación, partículas libres y entrelazados en la provincia de Huaylas – Ancash.	La caracterización de los minerales polimetálicos de Pb-Zn mediante microscopía óptica de luz reflejada posibilitaría la identificación de las especies minerales presentes, su distribución volumétrica, asociaciones y grados de liberación, en la provincia de Huaylas – Ancash.	Especies y enlaces presentes	Se observan en el microscopio óptico de luz reflejada
			Distribución volumétrica	Se cuantifican por observación en el microscopio y se reportan en porcentajes
			Grados de liberación	Se cuantifican por observación en el microscopio y se reportan en porcentajes
Problema específico N°2	Objetivo específico N°2	Hipótesis específica N°2	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿Qué variables del proceso de flotación pueden modificarse para mejorar la eficiencia en la concentración de Pb y Zn en minerales polimetálicos provenientes de la pequeña minería en la provincia de Huaylas – Ancash?	Mejorar el proceso de flotación de minerales polimetálicos para aumentar la concentración de Pb y Zn en el concentrados de los pequeños productores mineros de la provincia de Huaylas – Ancash.	La evaluación metalúrgica del proceso de flotación de minerales polimetálicos podría contribuir al incremento de la concentración de Pb y Zn, en la provincia de Huaylas – Ancash.	Granulometría	Estos datos se obtienen como resultado del análisis granulométrico, y se reportan en μm
			Dosificación de reactivos	Estos datos se miden con la ayuda de una micropipeta y se reportan en g/TM
Problema específico N°3	Objetivo específico N°3	Hipótesis específica N°3	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿Cómo permite la evaluación metalúrgica estimar el valor económico de los concentrados de Pb y Zn en la pequeña minería de la provincia de Huaylas – Ancash?	Determinar la valorización de los concentrados de Pb y Zn mediante la evaluación metalúrgica de los minerales polimetálicos de la provincia de Huaylas – Ancash.	La evaluación metalúrgica de los minerales polimetálicos podría facilitar la valorización de los concentrados de Pb y Zn en la pequeña minería de la provincia de Huaylas – Ancash.	Ley de concentrado de plomo	Hojas de cálculo
			Ley de concentrado de zinc	Hojas de cálculo

Anexo 2

Ensayos químicos del mineral de cabeza



H&F LABORATORIOS SAC
DESDE 1999

Análisis químico de minerales, concentrados, aleaciones,
agua y aire. Control ambiental.
Fabricación y venta, de reactivos químicos y equipos.

REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO

Solicitante : Jara - Aramburú
Tipo de Muestra : Mineral
Procedencia :
Fecha de Recepción : 18 de agosto del 2023
Referencia : H&F 316 /2023

DENOMINACIÓN DE MUESTRA:	RESULTADOS DE ANÁLISIS
	Mineral polimetálico
Plomo (%)	17.41
Zinc (%)	12.93
Cobre (%)	0.25
Plata (Oz/TC)	5.23
Arsénico (%)	0.32

Lima, 29 de agosto del 2023

H&F LABORATORIOS SAC
SERVICIOS ANALITICOS

ALBINO HUAYTALLA M.
GERENTE GENERAL

Anexo 3

Pruebas de flotación de Pb-Ag

Prueba 1

[illegible]

Prueba 2

[illegible]

Prueba 3

[illegible]

Prueba 4

[illegible]

Prueba 5

[illegible]

Prueba 6

[illegible]

Prueba 7

[illegible]

Prueba 8

[illegible]

Anexo 4

Pruebas de flotación de Zn

Prueba 1

[illegible]

Prueba 2

[illegible]

Prueba 3

[illegible]

Prueba 4

[illegible]

Prueba 5

[illegible]

Prueba 6

[illegible]

Prueba 7

[illegible]

Prueba 8

[illegible]

Anexo 5*Pruebas Base de flotación de Pb*

Componentes	Peso (g)	% Peso	Ley Pb (%)	Metálico Pb (g)	Recuperación Pb (%)	Ratio
Concentrado	674.7	56.23	54.27	651.24	89.25	3.1
Relave	525.3	43.77	13.34	70.01	10.75	
Cabeza Calculada	—	—	17.41			

Pruebas Base de flotación de Zn

Componentes	Peso (g)	% Peso	Ley Zn (%)	Metálico Zn (g)	Recuperación Zn (%)	Ratio
Concentrado	674.7	56.23	50.41	604.92	92.1	3.9
Relave	525.3	43.77	9.12	47.79	7.9	
Cabeza Calculada	—	—	12.93			

Anexo 6*Imágenes de las pruebas de flotación*

Muestreo del mineral



Flotación de las muestras



Regulación de los parámetros del proceso de flotación