



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Recuperación de Pb – Zn de minerales sulfurados con
contenido de carbón mediante proceso de flotación en
San Mateo – Lima**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTOR

Cristhian Renzo DURÁN BUSTINCIO

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

Durán, C. (2025). *Recuperación de Pb – Zn de minerales sulfurados con contenido de carbón mediante proceso de flotación en San Mateo – Lima*. [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	Cristhian Renzo Durán Bustincio
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	46427231
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/0000-0001-7411-3866
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Luis Alfredo Orihuela Salazar
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08004136
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Manuel Prudencio Caballero Rios
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09136425
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Jorge Luis Ventosilla Shaw
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08386770
Datos de investigación	

Línea de investigación	No aplica
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Latitud: -12.058333 Longitud: -77.083333
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2023 - 2025
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05 Química inorgánica, Química nuclear https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.04.02



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

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS 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 miércoles 07, del mes de mayo del 2025 siendo las 16:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Mg. LUIS ALFREDO, Orihuela Salazar	(PRESIDENTE)
Ing. MANUEL PRUDENCIO, Caballero Rios	(MIEMBRO)
Ing. JORGE LUIS, Ventosilla Shaw	(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS Titulada: **«RECUPERACIÓN DE Pb – Zn DE MINERALES SULFURADOS CON CONTENIDO DE CARBÓN MEDIANTE PROCESO DE FLOTACIÓN EN SAN MATEO - LIMA»** presentada por Don: CRISTHIAN RENZO DURÁN BUSTINCIO, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: **METALÚRGICO**.

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

.....**SATISFACCIÓN**.....

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

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

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

Siendo las **17:00** horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 7 de mayo de 2025

Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR
Presidente

Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS
Miembro

Ing. JORGE LUIS VENTOSILLA SHAW
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° 001178-2023-D-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es “RECUPERACIÓN DE Pb – Zn DE MINERALES SULFURADOS CON CONTENIDO DE CARBÓN MEDIANTE PROCESO DE FLOTACIÓN EN SAN MATEO – LIMA” presentado por el bachiller **CRISTHIAN RENZO DURÁN BUSTINCIO** 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 el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de **17%** 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.

Firma del Asesor

DNI: 08608364

Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS



ÍNDICE

RESUMEN	vii
ABSTRACT	ix
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.....	4
2.4. Objetivos de la Investigación	5
2.4.1. Objetivos Generales.....	5
2.4.2. Objetivos Específicos	5
2.5. Hipótesis y Variables.....	5
2.5.1. Hipótesis General	5
2.5.2. Hipótesis Específicas.....	5
2.5.3. Identificación de Variables.....	6
2.5.4. Operacionalización de Variables	8
CAPÍTULO III: Marco Teórico	9
3.1. Antecedentes de la Investigación	9
3.2. Bases Teóricas	10
3.2.1. Plomo.....	10
3.2.1.1. Producción a Nivel Nacional e Internacional	10
3.2.1.2. Cotización.....	12

3.2.1.3.	Exportaciones	12
3.2.1.4.	Mineralogía y Asociaciones	13
3.2.1.5.	Flotación de Pb	14
3.2.1.5.1.	Aspectos Electroquímicos en la Flotación de Galena	14
3.2.1.5.2.	Reactivos de Flotación	15
3.2.1.5.3.	Variables de Flotación	17
3.2.2.	Zinc	18
3.2.2.1.	Producción a Nivel Nacional e Internacional	18
3.2.2.2.	Exportaciones	19
3.2.2.3.	Mineralogía y Asociaciones	20
3.2.2.4.	Flotación de Zn	22
3.2.2.4.1.	Reactivos de Flotación de Zn	23
3.2.2.4.1.	Variables Influyentes en la Flotación de Zn	26
3.2.3.	Carbón	27
3.2.3.1.	Producción a Nivel Nacional e Internacional	27
3.2.3.2.	Minerales y Asociaciones	27
3.2.3.3.	Flotación de carbón	30
3.2.3.3.1.	Reactivos de Flotación de carbón	33
CAPÍTULO IV: Metodología de la Investigación		35
4.1.	Tipo y Diseño de Investigación	35
4.2.	Unidad de Análisis	36
4.2.1.	Ubicación	36
4.2.2.	Geografía	36
4.2.3.	Clima	36

4.3.	Población de Estudio	37
4.4.	Tamaño de Muestra	37
4.5.	Procedimiento Metodológico de la Investigación	37
CAPÍTULO V: Resultados		39
5.1.	Microscopia Óptica del Mineral de Cabeza	39
5.1.1.	Entrelazamiento de Minerales	41
5.1.2.	Posibilidades de Liberación de Partículas Entrelazadas..	43
5.2.	Análisis Químico del Mineral de Cabeza	47
5.3.	Análisis Granulométrico	47
5.4.	Flotación Exploratoria de Pb y Zn.....	48
5.5.	Pretratamiento de Flotación de Carbón	49
5.6.	Análisis Químicos a Distintas Granulometrías del Mineral	53
5.7.	Flotación de Zn a 100% - 50 Malla	53
5.7.1.	Resultados de la Flotación de Zn a 100% - 50 Malla.....	54
5.7.2.	Análisis de la Varianza de la Recuperación de Zn a 100 % - 50 Malla	57
5.7.2.1.	Modelo para la Recuperación de Zn (100 % - Malla 50)	58
5.8.	Flotación de Pb-Zn a 100% + 50 Malla.....	58
5.8.1.	Etapas de Flotación de Pb	58
5.8.1.1.	Evaluación de Depresores de Zn	59
5.8.1.2.	Evaluación de Colectores de Pb	61
5.8.1.3.	Resultados de las Pruebas de Flotación de Pb.....	62
5.8.1.4.	Análisis de la Varianza para la Recuperación de Pb ...	65
5.8.1.5.	Análisis de la Varianza para la Ley de Pb	66

5.8.2.	Etapas de Flotación de Zn	67
CAPÍTULO VI: Discusión de Resultados.....		68
CONCLUSIONES.....		71
RECOMENDACIONES		73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		74
ANEXOS.....		78

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico primeramente a Dios, por estar siempre a mi lado y darme fuerzas para seguir adelante. También se los dedico a mis padres que me enseñaron a ser fuerte y perseverante.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, por darme fuerzas y ayudarme a llegar aquí donde estoy, sin él no lo hubiera podido lograr. Agradezco también a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por ser mi guía y enseñarme a ser un buen profesional, puntual y disciplinado. A mis profesores, que durante toda mi vida universitaria, ayudaron a mi formación tanto personal como profesional, fueron mis pilares para conocer de ahí en adelante temas más amplios de Preparación de Muestras Inorgánicas y Flotación de Minerales. Hay tantas personas a quienes tengo que agradecer, y darles gracias por mi formación, personas como el Ing. Vidal Aramburu, el Ing. Pedro Ramírez, el Ing. Jhony Tarqui, el Ing. Abel Mendoza, el Ing. Pedro Ñaupá, el Ing. José Ramos y el Ing. Percy Chávez. Agradecer a todos mis compañeros de trabajo, que sin sus conocimientos y enseñanzas no sería quien soy ahora.

Muy agradecido por todo, a todos ellos que Dios los guie y bendiga.

RESUMEN

De la muestra de mineral carbonáceo sulfurado se obtuvo muestra representativa para realizar pruebas de caracterización y flotación selectiva de Pb-Zn. La microscopía óptica de la muestra determinó la presencia de antracita (ant), galena (gn), esfalerita (ef), plata nativa (Ag), pirita (py), arsenopirita (apy), pirrotita (po), goetita (go), y gangas (ggs). La Galena (gn) ocupó un volumen de 2.56% y 81.93% de grados de liberación, y con respecto a la Esfalerita (ef) se identificó ocupando 13.88% de volumen y 95.33% de grados de liberación; además se pudo observar trazas de Ag nativa, y 1.88% del volumen fue carbón antracítico. En base a la microscopía del mineral se desarrollaron pruebas de flotación de carbón a granulometrías de 100% - (20, 35, 50 y 70) Malla, determinando la mejor recuperación de 83.94% de carbón empleando 5 g/TM de diésel como colector a una granulometría de 100% - 50 malla.

La evaluación de la fracción fina (100%-50 Malla) se realizó sin molienda, y para recuperar valores de Zn, dado que la ley de Pb ensayada fue de 0.25%. La evaluación de la recuperación de Zn se realizó mediante un diseño factorial de 2 factores, 2 niveles, 2 réplicas, y un punto central, determinando la recuperación óptima de 95.78% con una calidad de 51.94% de Zn, para lo cual se empleó 100 g/TM de CuSO_4 (5%), 100 g/TM de Z-11(1%), y 100 g/TM de MIBC, valores correspondientes a la prueba N° 7 del diseño experimental. El ANOVA de los valores de recuperación obtenidos determinaron la mayor contribución del reactivo Xantato Z-11, con un valor de 92.46%, ajustando el modelo para la recuperación de Zn (%) = $20.30 + 0.1857(\text{CuSO}_4) + 0.7549(\text{Z-11}) - 0.001878(\text{CuSO}_4 * \text{Z-11})$.

Con respecto a la evaluación de la recuperación de valores de Pb y Zn en la fracción de gruesos (100% +50 malla), se realizó a una granulometría de 60.51% - 200

Malla, empleando 400 g/TM de reactivo mezcla $\text{ZnSO}_4/\text{NaCN}$ (3/1), 60 g/TM de AR-3418, 100 g/TM de MIBC, a un pH de 8.5, lográndose recuperar 98.54% de Pb con una calidad de 55.67%. En la segunda etapa con respecto a la flotación de Zn, alcanzo la mejor recuperación de 97.80% con una calidad de 55.1% de Zn en el concentrado, empleando los mismos valores de dosificación que en la etapa de flotacion a 100% - 50 Malla.

La recuperación total de Pb y Zn fueron de 96.21% y 91.62 %, respectivamente, valores que demuestran la viabilidad de la recuperación de Pb y Zn en minerales carbonáceos.

ABSTRACT

A batch of carbonaceous sulfide ore was sampled for Pb-Zn selective flotation and characterization tests. Optical microscopy of a mineral sample determined the presence of ant, gn, ef, Ag, py, apy, po, go, and ggs. The Pb species was identified occupying a volume of 9.73% and 95.21% of these mineral particles, they were observed as free, and with respect to the Zn mineral, it was identified with a distribution of 6.09% and 89.29% of release degrees, also traces of native Ag and anthracite-type coal mineral could be observed. Based on the microscopy of the mineral, coal flotation tests were developed at granulometries of 100% - (20, 35, 50, and 70) Mesh, determining the best recovery of 38.79 g of coal using 5 g/MT of MIBC, and 0.43% of total sulfides, at a granulometry of 100% - 50 Mesh.

The evaluation of the fine fraction (100%-50 Mesh) was carried out without grinding and only to recover Zn values, given that the Pb grade tested was 0.25%. The evaluation of Zn recovery was carried out through a factorial design of 2 factors, 2 levels, 2 replications, and a central point, determining the best recovery of 95.78% with a quality of 51.94% Zn, for which 100 g/TM of CuSO₄ (5%), 100 g/TM of Z-11 (1%), and 100 g/TM of MIBC, values corresponding to test No. 7 of the experimental design. The ANOVA of the recovery values obtained determined the greatest contribution of the Xanthate Z-11 reagent, with a value of 92.46%, adjusting the model for the recovery of Zn (%) = 20.30 + 0.1857(CuSO₄) + 0.7549(Z-11) - 0.001878(CuSO₄*Z-11).

Regarding the evaluation of the recovery of Pb and Zn values in the coarse fraction, it was determined that flotation at a granulometry of 60.25% - 200 Mesh and using 300 g/MT of ZnSO₄/NaCN mixture reagent (3/1), 60 g/TM of AR-3418, 100 g/TM of MIBC, at a pH of 8.5, managed to recover 98.54% of Pb with a quality of 55.67%.

With respect to Zn flotation, it achieved the best recovery of 97.79% with a quality of 55.1% Zn in the concentrate, using the same dosage values in the flotation stage at 100% - 50 Mesh.

The total recovery of Pb and Zn in the different conditions of the flotation process was 96.21%, and 91.62% of total recovery of Zn.

NOMENCLATURA

%	Porcentaje
°C	Grado Celsius
h	Horas
min	Minutos
g	Gramos
l	Litros
RPM	Revolución por minuto
Oz/TC	Onzas por toneladas cortas
lt/seg	Litros por segundos
g/TM	Gramos por tonelada
TCM	Contenido de carbón orgánico
Kg	Kilogramo
pH	Potencial de Hidrógeno
GL	Grados de libertad
SC	Suma de cuadrados
MC	Media de cuadrados
S	Desviación estándar
R ²	Coefficiente de determinación
PRESS	Suma de los cuadrados de error de predicción
gn	Galena
ef	Esfalerita
Ag	Plata nativa
apy	Arsenopirita

po	Pirrotita
goe	Goethita
py	Pirita
antr	Antracita
GGs	Gangas
CuSO ₄	Sulfato de cobre
MIBC	Metil isobutil carbinol
ZnSO ₄	Sulfato de zinc
NaCN	Cianuro de sodio
AR-3418	Aerophine 3418
Z-11	Xantato isopropílico de sodio

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de los carbones de acuerdo con el rango	28
Tabla 2 Empresas mineras de carbón	29
Tabla 3 Distribución volumétrica y grados de liberación de los minerales observados. 39	
Tabla 4 Volumen y liberación de los entrelazamientos.....	42
Tabla 5 Enlaces y posibilidades de liberación.....	43
Tabla 6 Ensayo químico del mineral de cabeza	47
Tabla 7 Análisis granulométrico del mineral de cabeza.....	47
Tabla 8 Condiciones de operación para la etapa de flotación de Pb	48
Tabla 9 Condiciones de operación para la etapa de flotación de Zn	49
Tabla 10 Balance de la flotación exploratoria	49
Tabla 11 Análisis de la granulometría en la flotación	50
Tabla 12 Análisis químico según la granulometría	53
Tabla 13 Condiciones de operación de la flotación de Zn a 100% - 50 Malla.....	53
Tabla 14 Orden de las pruebas de la flotación de Zn a 100% - 50 Malla.....	54
Tabla 15 1° flotación de Zn a 100% - 50 Malla	54
Tabla 16 2° flotación de Zn a 100% - 50 Malla	55
Tabla 17 3° flotación de Zn a 100% - 50 Malla	55
Tabla 18 4° flotación de Zn a 100% - 50 Malla	55
Tabla 19 5° flotación de Zn a 100% - 50 Malla	56
Tabla 20 6° flotación de Zn a 100% - 50 Malla	56
Tabla 21 7° flotación de Zn a 100% - 50 Malla	56
Tabla 22 8° flotación de Zn a 100% - 50 Malla	57
Tabla 23 ANOVA de la recuperación de Zn	57

Tabla 24 Coeficientes de correlación del modelo ajustado	58
Tabla 25 Condiciones de operación para la etapa de flotación de Pb	58
Tabla 26 1° de flotación con una dosificación 200g/TM (ZnSO ₄ /NaCN)	59
Tabla 27 2° de flotación con una dosificación 300g/TM (ZnSO ₄ /NaCN)	60
Tabla 28 3° de flotación con una dosificación 400g/TM (ZnSO ₄ /NaCN)	60
Tabla 29 4° de flotación con una dosificación 500g/TM (ZnSO ₄ /NaCN)	60
Tabla 30 Rango de variación de las variables	61
Tabla 31 Orden de las pruebas de la flotación de Zn a 100% - 50 Malla.....	61
Tabla 32 1° de flotación de Pb	62
Tabla 33 2° de flotación de Pb	62
Tabla 34 3° de flotación de Pb	63
Tabla 35 4° de flotación de Pb	63
Tabla 36 5° de flotación de Pb	63
Tabla 37 6° de flotación de Pb	64
Tabla 38 7° de flotación de Pb	64
Tabla 39 8° de flotación de Pb	64
Tabla 40 Varianza de las variables en la recuperación de Pb.....	65
Tabla 41 Resumen del análisis de varianza en la recuperación de Pb.....	66
Tabla 42 ANOVA para la ley de Pb	66
Tabla 43 Coeficientes de correlación del modelo para la ley de Pb.....	67
Tabla 44 Balance de la etapa de flotación de Zn.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Producción de Pb de empresas en el Perú, 2023	11
Figura 2 Producción de Zn de empresas en el Perú, 2023.....	19
Figura 3 Hidrofobicidad de varios suelos en función del porcentaje de carbono según la técnica del ángulo de contacto.....	32
Figura 4 Volumen porcentual de las especies libres.....	40
Figura 5 Grados de liberación de las especies libres	40
Figura 6 Volumen porcentual de los entrelazamientos	44
Figura 7 Micrografía que muestra la presencia de pirita, antracita, goethita y gangas .	45
Figura 8 Micrografía con presencia de pirita, galena, goethita y gangas	45
Figura 9 Micrografía que muestra la presencia de pirita, arsenopirita, pirrotina, plata y gangas	46
Figura 10 Micrografía con presencia de pirita, esfalerita, arsenopirita y gangas	46
Figura 11 Comparativa variación de las variables en el análisis granulométrico	51
Figura 12 Diagrama de Flujo de las Pruebas Experimentales	52

CAPÍTULO I: Introducción

Los procesos de concentración de minerales tienen por objetivo separar la parte valiosa de los estériles, logrando obtener un producto concentrado de calidad comercial, y una parte estéril sin valor económico. Estos procesos de concentración se diseñan en función de las características físicas del mineral, por ejemplo, los procesos de concentración gravimétrica aprovechan la diferencia de los pesos específicos de las especies de mineral que forman parte del proceso, otros procesos aprovechan las propiedades de magnetismo de los minerales, diferencia entre las propiedades fisicoquímicas como la adsorción o no de agua en la superficie del sólido y la aglomeración selectiva de un mineral, entre otras.

Uno de los principales procesos de concentración de minerales sulfurados es el proceso de flotación, el cual es responsable de la recuperación de minerales polimetálicos de yacimientos sulfurados, teniendo en cuenta la variabilidad geológica del depósito de mineral, además de la distribución volumétrica de las especies, tipos de entrelazamiento, grados de liberación, entre otros. Los diferentes métodos usados para caracterizar minerales difieren en la magnitud del análisis relacionado con los costos, siendo en algunos casos necesarios realizar una microscopía de alta resolución como la electrónica (Melgarejo et al., 2010; Ramos & Orihuela, 2017; Taya, 2018). Dicha información es relevante para evaluar el impacto de las especies involucradas en el procesamiento de estos minerales, con la finalidad de sectorizar eficientemente el depósito y optimizar la recuperación de las especies valiosas (Espinoza et al., 2021).

Es por estas razones que el presente trabajo demuestra que es posible recuperar plomo y zinc a partir de minerales con contenido de carbón mediante el proceso de flotación, para lo cual se propone un tratamiento previo de flotación de carbón, con la

finalidad de obtener un alimento libre de carbón, para la siguiente etapa del proceso, en el distrito de San Mateo de Huanchor, provincia de Huarochirí, departamento de Lima.

CAPÍTULO II: Planteamiento del Problema

2.1. Descripción de la Problemática

Uno de los principales métodos para la recuperación de minerales sulfurados de zinc y de plomo, es el proceso de flotación, el cual presentará cierto grado de dificultad en función de la mineralogía del depósito. Uno de los principales problemas en menas polimetálicas es la presencia de material carbonáceo, debido a que dicho material se comporta como un agente tensoactivo y, por lo tanto, influye de manera negativa con los reactivos de flotación, demostrando una influencia notoria sobre la dosificación de espumante, para lo cual se hace necesario dosificar mucho más reactivo de lo convencional, lo cual implica en el aumento de los costos del proceso.

La problemática causada por la presencia de materia carbonáceo se conoce desde los años 60, sin embargo, a la fecha, no se ha encontrado una manera completamente satisfactoria para procesar estos minerales, motivo por el cual se hace necesario el estudio a detalle del procesamiento de estos minerales, por lo que se pretende mejorar el proceso conociendo a detalle la mineralogía del yacimiento, y en base a este reconocimiento, se propone implementar la separación de carbón en una primera etapa, y la recuperación de las especies sulfuradas de plomo – zinc, mediante el proceso de flotación.

2.2. Problemática de la Investigación

2.2.1. Problema General

- ¿De qué manera podemos tener una mejor recuperación Pb-Zn mediante el proceso de flotación de minerales sulfurados con contenido de carbón en el distrito de San Mateo de Huanchor, provincia de Huarochirí - Lima?

2.2.2. Problemas Específicos

- ¿De qué manera podríamos determinar las especies de minerales, distribución volumétrica, grados de liberación y enlaces presentes, en materiales sulfurados con contenido de carbón, en el distrito de San Mateo?
- ¿De qué manera podemos separar carbón mediante el proceso de flotación de minerales polimetálicos en San Mateo?
- ¿De qué forma podemos recuperar Pb-Zn de los relaves de la concentración de carbon de la primera etapa, empleando el proceso de flotación?

2.3. Justificación de la Investigación

El presente proyecto de investigación del procesamiento de minerales polimetálicos con contenido de carbón mediante el proceso de flotación, permitirá recuperar plomo y zinc en el distrito de San Mateo, en función de las variables independientes que determinarán la recuperación de dichos metales, con la finalidad de dar viabilidad técnica y económica a la extracción y procesamiento de estos tipos de yacimientos, logrando a su vez incrementar la producción metálica de plomo y zinc a nivel mundial y por consiguiente el aumento de los ingresos por producción de este metal.

El alcance de la presente investigación está orientado para el procesamiento por flotación de minerales sulfurados con contenido de carbón para recuperar plomo y zinc en el distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí, departamento de Lima.

2.4. Objetivos de la Investigación

2.4.1. *Objetivo General*

- Recuperar Pb y Zn mediante el proceso de flotación de minerales sulfurados con contenido de carbón en el distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí-Lima.

2.4.2. *Objetivos Específicos*

- Caracterizar la muestra de mineral sulfurado con contenido de carbón, para determinar las especies mineralógicas presentes, distribución volumétrica, grados de liberación y enlaces mineralógicos en el distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí-Lima.
- Concentrar carbón mediante el proceso de flotación de minerales sulfurados polimetálicos en San Mateo en una primera etapa.
- Recuperar Pb-Zn mediante el proceso de flotación de los relaves de la concentración de carbón de la primera etapa.

2.5. Hipótesis y Variables

2.5.1. *Hipótesis General*

- El proceso de flotación de minerales sulfurados con contenido de carbón permitirá recuperar Pb-Zn en el distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí-Lima.

2.5.2. *Hipótesis Específicas*

- La caracterización de la muestra mineral sulfurada con contenido de carbón permitirá detallar las especies de minerales involucradas, distribución volumétrica, grados de liberación y enlaces presentes, en el distrito de San Mateo.
- El proceso de flotación de minerales polimetálicos permitirá concentrar carbón en el distrito de San Mateo.
- El proceso de flotación de los relaves de la concentración de carbón de la primera etapa permitirá incrementar la recuperación de Pb-Zn.

2.5.3. *Identificación de Variables*

Las variables se determinaron con base en una revisión exhaustiva de la literatura científica y en datos experimentales reportados en estudios previos sobre la flotación de minerales sulfurados y la recuperación de metales básicos. Estas variables son clave para influir en la liberación de especies mineralógicas y en la eficiencia de los procesos de flotación. Se consideraron las características específicas del mineral sulfurado con contenido de carbón en San Mateo, como la granulometría y las propiedades fisicoquímicas del carbón presente, que requieren ajustes específicos en la dosificación de reactivos y en las condiciones operativas del proceso.

Las variables a considerarse en la etapa de concentración de carbón mediante proceso de flotación son:

Variable independiente

- Granulometría
- Dosificación de reactivo diesel

Variable dependiente

- Porcentaje de recuperación de carbón

Variables intervinientes controladas

- Velocidad de agitación
- Tiempo de acondicionamiento de pulpa
- Tiempo de flotación
- Densidad de pulpa
- pH de flotación

Las variables a considerarse en el proceso de flotación para recuperar Pb-Zn, son:

Variables independientes

- Dosificación de reactivos ZnSO_4 y AR-3418 en la etapa de flotación de sulfuros de plomo
- Dosificación de CuSO_4 y Z-11 en la etapa de flotación de sulfuros de zinc

Variable dependiente

- Porcentaje de recuperación de Pb-Zn

Variables intervinientes controladas

- Velocidad de agitación
- Tiempo de acondicionamiento de pulpa
- Tiempo de flotación
- Densidad de pulpa
- pH de flotación

2.5.4. *Operacionalización de Variables*

Para comprender mejor el proceso de flotación de minerales con contenido de carbón y su influencia en la recuperación de plomo y zinc, se llevará a cabo un análisis detallado de las variables operativas. Este análisis incluirá la aplicación de balances metalúrgicos y técnicas estadísticas avanzadas utilizando el software Minitab 19. Estas herramientas nos permitirán examinar cómo diversas variables, tanto independientes como dependientes, interactúan entre sí durante el proceso de flotación.

CAPÍTULO III: Marco Teórico

3.1. Antecedentes de la Investigación

Asillo (2022) en su tesis “Evaluación de un circuito de recuperación de plomo y zinc mediante gravimetría y flotación” demostró la recuperación del 85% de Pb y 82.5% de Zn empleando en un espiral Humphrey para recuperar óxidos de plomo y una celda de flotación para concentrar sulfuros de plomo y zinc, a nivel laboratorio.

El autor sustentó la recuperación de dichos valores operando con un flujo de 65 L/minuto y con un porcentaje de sólidos del 30%, con una granulometría de 80% menos malla 150.

Schwarze (2017) en su tesis de maestría “Pretratamiento de mineral bituminoso de cobre previo a flotación” concluye que el proceso de preconcentración de flotación de carbón bitumen previo a la flotación de Cu, le permitió mejorar la recuperación de dicho valor metálico, además de haber obtenido cinéticas más rápidas, concentrados más limpios, y un menor consumo de espumante, reportando un valor de consumo de 50 g/t del mencionado reactivo. Además, concluyo que no es posible estabilizar el colchón de espuma en el proceso de flotación de Cu sin haber preconcentrado el material carbonaceo.

Gamarra (2019), en su tesis “Flotación bulk de minerales sulfurados de plomo – zinc refractario de bajo grado en la planta concentradora de huari de la UNCP”, investigó un mineral refractario de Pb y Zn y su comportamiento en el proceso de flotación, para lo cual analizó la influencia de la dosificación de reactivos activador sulfato de cobre (CuSO_4), dosificación de colector xantato Z-6 y Z-11, además de las variables el tiempo de flotación, tamaño de partícula y pH.

. Demostró experimentalmente que la dosificación del colector fue el factor más significativo que afecta las recuperaciones de Zn y Pb. Sustentó que la mejor prueba de

flotación bulk fue con una dosificación de 100 g/t de CuSO_4 y 150 g/t de xantato amílico, logrando recuperaciones máximas de Zn y Pb de 94 y 83%, respectivamente.

Vera (2019), realizó la investigación: “Evaluación del efecto de nuevos reactivos colectores y depresores para mejorar la recuperación del proceso de flotación en los circuitos de plomo y zinc de la planta concentradora Antonio Raymondi”, demostrando que la granulometría fue la variable de mayor contribución en la recuperación de los valores metálicos económicos, el autor sugiere operar con una granulometría del mineral de 70 % - 200 Malla, con la finalidad de mejorar la cinética de flotación. El autor concluyó la mayor contribución de la dosificación del cianuro de sodio, con valores de 200 g/t y 45 g/t, para las etapas de flotación de Pb y Zn, respectivamente

3.2. Bases Teóricas

3.2.1. Plomo

3.2.1.1. Producción a Nivel Nacional e Internacional

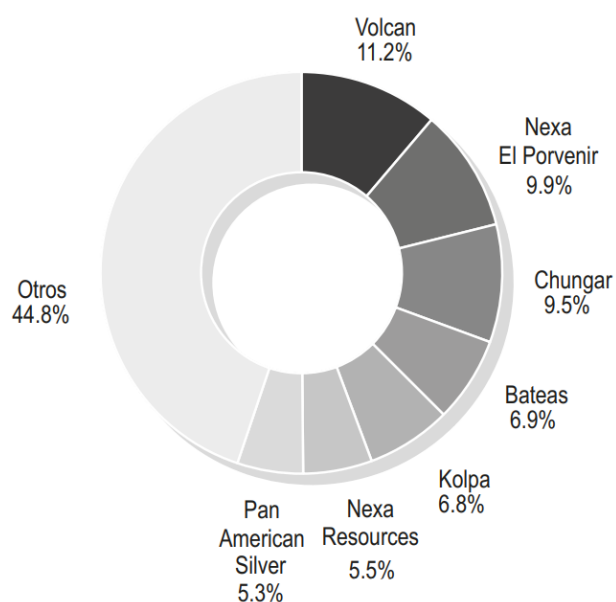
En noviembre de 2023, la cantidad de plomo producida a nivel nacional ascendió a 23,354 TMF, marcando un aumento del 9.0% respecto al mismo mes del año anterior, que fue de 21,417 TMF. Este incremento se atribuye principalmente a un aumento en la producción de empresas como Volcan Compañía Minera S.A.A. (+32.5%), Minera Bateas S.A.C (+35.7%) y Nexa Resources Perú S.A.A. (+23.1%). La producción total acumulada hasta noviembre de 2023 fue de 247,157 TMF, lo que representa un aumento del 6.3% en comparación con el mismo período del año anterior.

En términos de participación en la producción, Volcan Compañía Minera S.A.A. encabezó la lista con el 11.1%, seguido por Compañía Minera Chungar S.A.C. y Nexa Resources El Porvenir S.A.C., que contribuyeron cada una con el 9.9%.

A nivel departamental, Pasco se destacó con el 34.5% de la producción total, seguido de Junín con el 13.7%. Lima ocupó el tercer lugar, contribuyendo con el 11.8% del total de la producción de plomo (Dirección de Promoción Minera, 2023).

Figura 1

Producción de Pb de empresas en el Perú, 2023



Nota: Recuperado de Dirección de Promoción Minera (2023).

En el año 2022, la producción global de plomo alcanzó las 4,530,443 TMF, experimentando una ligera disminución del 0.2% en comparación con el 2021 (4,539,427 TMF). No obstante, este descenso se vio compensado por el aumento en la producción liderado por China. En cuanto a la participación a nivel mundial, China mantuvo su posición predominante con el 44.1%, seguida por Australia con el 9.7%. Estados Unidos y México ocuparon la tercera y cuarta posición con el 6.2% y 6.0%, respectivamente. Perú se ubicó en quinto lugar con el 5.6%, superando la producción de 255 mil TMF. Es destacable que la producción de China y Australia representó conjuntamente más del 53% de la producción global de plomo (Dirección de Promoción Minera, 2023).

3.2.1.2. Cotización

En 2022, el precio medio internacional del plomo fue de 97.5 ¢US\$/lb, lo que representó una disminución del 2.5% respecto al 2021 (100.1 ¢US\$/lb). Este descenso se intensificó en septiembre, cuando alcanzó su nivel más bajo del año (79.6 ¢US\$/lb), impulsado por el aumento de existencias de plomo debido a preocupaciones sobre un crecimiento económico más lento en China, derivadas de las políticas de reducción de emisiones para promover la sostenibilidad ambiental, y al incremento de inventarios en la Bolsa de Metales de Londres (LME). No obstante, durante el cuarto trimestre se registró una recuperación gradual, alcanzando 105.9 ¢US\$/lb en diciembre (Dirección de Promoción Minera, 2023).

3.2.1.3. Exportaciones

En 2022, las exportaciones totales de plomo alcanzaron un volumen de 738,396 TM, mostrando una disminución del 10.5% en comparación con 2021 (824,885 TM). Esta reducción, combinada con la baja cotización, resultó en una contracción interanual del 13.8% en el valor exportado de plomo, que fue de US\$ 1671 millones en comparación con los US\$ 1940 millones de 2021. El plomo contribuyó con el 4.4% al valor total de las exportaciones mineras y el 2.5% al valor nacional exportado. En cuanto a los destinos de exportación, China lideró con US\$ 1303.6 millones, representando el 72.8% del valor total. Corea del Sur se ubicó en segundo lugar con US\$ 298.6 millones, con una participación del 16.7%, seguido de Italia en tercer lugar con el 3.5% (Dirección de Promoción Minera, 2023).

3.2.1.4. Mineralogía y Asociaciones

- Galena (Galena) PbS.
- Composición Química: Pb: 86.60%; S: 13.40%; Impurezas: Bi: 0.2%; Cu: Trazas; Sb: 0.7%.
- Sistema Cristalino: Isométrico – Hexoctahedral.
- Hábito: Hexaedros, octaedros, hexaedros con octaedros; son los más frecuentes. Tendencia al idiomorfismo. Masiva, compacto, granular, (fino grueso. Estructura escarapelada con esfalerita y carbonatos bandeados.
- Color: Gris de plomo.
- Brillo: Metálico bastante brillante.
- Raya: Gris plomizo. Peso Específico: 7.2 – 7.6.
- Dureza: 2.5 (baja).
- Clivaje: Perfecto en 3 direcciones según el hexaedro {100} {001}.
- Polimorfismo & Serie: Forma a series con Claustalita (PbSe).
- Propiedades Químicas Importantes: Frágil, algo tendil, Sobre el carbón se funde fácilmente, se extiende humo sulfuroso formando aureóla amarilla de PbO, rodeada de un borde blanco azulado y deja como residuo botón de Pb. Metálico. Cuando está masiva compacto se puede confundir con bismutinita y algunos sulfosales. Fundamentalmente es el clivaje con lo que se le diferencia.
- Asociación mineralógica: Esfalerita, Marcasita, Pirita, Calcopirita; Tetraedrita, Minerales de plata (Ag), Siderita, Calcita, Dolomita, Baritina, Muchos minerales hidrotermales.
- Características distintivas: Color, brillo, clivaje, peso específico, hábito, dureza.

- Yacimiento: En muchos diferentes tipos de ambientes. En vetas Hidrotermales, formadas bajo amplio rango de temperaturas; en contacto con depósitos metamórficos, en pegmatitas. Yacimientos estratoligados, asociados a rocas sedimentarias o volcánicas. Yacimientos Mississippi Valley Type (MVT) acompañado con óxidos de plomo y zinc.
- Alteración: Es inestable en la zona de oxidación y se descompone fácilmente con formación de Cerusita (PbCO_3), Anglesita (PbSO_4), Piromorfita (PbPO_4).
- Importancia: Mena principal de plomo en el Perú. Presencia de inclusiones de minerales de plata (Ag) mal llamado “Galena Argentífera” (Dana, 1986).

3.2.1.5. Flotación de Pb

La flotación de plomo es un proceso crucial, se basa en la diferencia de propiedades hidrofóbicas entre la galena y otros minerales. El proceso implica la molienda de la mena, la adición de reactivos y la introducción de aire para crear burbujas que se adhieren a la galena, la espuma con la galena se separa de la pulpa con los otros minerales (Ralston, 1994).

3.2.1.5.1. Aspectos Electroquímicos en la Flotación de Galena

El mineral principal de plomo, la galena, usualmente se encuentra acompañado de otros sulfuros y minerales de ganga. El proceso clásico de preparación de minerales emplea tiocolectores como los xantatos en un rango de pH de 8 a 9, resultando en un concentrado con alrededor del 60% de plomo. Aunque el mecanismo de reacción aún no

está completamente elucidado, se cree que implica una adsorción con intercambio de iones en la superficie del mineral.

Se reconoce ampliamente que el oxígeno desempeña un papel crucial en el proceso de flotación. En el mecanismo químico, el ion sulfuro en la superficie de la galena se oxida, produciendo sulfato de plomo y tiosulfato, este último reacciona con el ion xantato para formar complejos. Por otro lado, en el mecanismo electroquímico, se observan reacciones de oxidación y reducción en la superficie de la galena en contacto con la solución acuosa que contiene el ion xantato y oxígeno.

Para comprender mejor estos procesos, se utilizan técnicas electroquímicas como la voltamperometría cíclica para establecer los potenciales de las reacciones y se identifican los productos mediante análisis químicos. La eficacia de la depresión de la galena se confirma mediante pruebas de flotabilidad realizadas en laboratorio. Estas pruebas se centran en medir el potencial electroquímico y verificar la aplicabilidad de la depresión electroquímica de la galena como técnica de flotación para separarla de la esfalerita (Hu et al., 2020).

3.2.1.5.2. *Reactivos de Flotación*

- a. Colectores: Busca conferir propiedades hidrofóbicas a las superficies de los minerales. Son sustancias químicas orgánicas del tipo surfactante que tienen la capacidad de adherirse selectivamente a la superficie de un mineral y convertirlo en hidrofóbico. Los xantatos son los agentes colectores comúnmente empleados para la flotación de minerales sulfurados, como es el caso del Pb-Zn (De la Rosa, 2013).
- b. Depresores: Son sustancias químicas, ya sean de naturaleza orgánica o inorgánica, que contrarrestan la acción del colector en la superficie del

mineral, otorgándole a la partícula mineral características hidrofílicas. Por ejemplo, el cianuro se utiliza como agente depresor para la separación de la galena de la esfalerita y la pirita, así como para la separación de sulfuros de cobre de la galena, los sulfuros de cobre y la pirita; el quebracho se emplea como reactivo depresor del zinc (De la Rosa, 2013).

- c. Activadores: En la flotación de la galena, se emplea sulfuro de sodio como reactivo activador. Este compuesto químico se añade al mineral de galena para activar su superficie, lo que mejora su respuesta al colector utilizado en el proceso de flotación. De esta manera, el sulfuro de sodio facilita la separación de la galena de otros minerales durante la concentración de minerales en la industria minera (De la Rosa, 2013).
- d. Modificadores de pH: La presencia de galena puede requerir un ajuste específico del pH para lograr una flotación efectiva y selectiva. Los modificadores de pH mencionados anteriormente se utilizan para controlar las condiciones ácidas o básicas en la pulpa mineral, lo que puede influir en la adhesión del colector a la superficie de la galena y, por lo tanto, en su capacidad de flotar. El uso adecuado de estos reactivos puede mejorar la recuperación y la selectividad del mineral de galena durante el proceso de concentración, contribuyendo así a la eficiencia global de la operación minera (De la Rosa, 2013).
- e. Espumantes: Los espumantes, líquidos orgánicos poco solubles en agua, desempeñan un papel crucial en la separación de partículas hidrófobas e hidrófilas durante el proceso de flotación. Estos reactivos aseguran la formación de una espuma estable, vital para mantener las partículas capturadas en la superficie y evitar su retorno a la pulpa. La estabilidad de

la espuma es esencial para garantizar una recuperación eficiente de los minerales deseados. En el caso específico de la galena, la selección del espumante adecuado es fundamental para lograr una flotación efectiva. Es crucial que el espumante no se adsorba en la superficie del mineral, ya que esto podría afectar la selectividad del colector principal. La elección de compuestos espumantes compatibles con la galena es esencial para optimizar la recuperación y la eficiencia del proceso de concentración (De la Rosa, 2013).

3.2.1.5.3. *Variables de Flotación*

- a. Tamaño de partícula de la mena: La mena de plomo que se introduce al proceso de flotación debe estar reducida al tamaño adecuado para garantizar una buena recuperación del mineral valioso, liberándolo de la ganga (De la Rosa, 2013).
- b. Selección y dosificación de reactivos para la flotación: Es crucial elegir los reactivos apropiados según el tipo de mineral de plomo a ser flotado (colectores, espumantes, modificadores de pH, activadores o depresores). Cada uno de estos reactivos requiere un tiempo específico de acondicionamiento para interactuar eficazmente con la pulpa y mejorar la recuperación del mineral de plomo (De la Rosa, 2013).
- c. Densidad de la pulpa o porcentaje de sólidos: Es importante controlar el porcentaje de sólidos en la pulpa de plomo para garantizar un proceso de flotación eficiente. La densidad de la pulpa afecta el tiempo de residencia del mineral en las etapas de flotación, lo que a su vez influye en la

capacidad del circuito. Normalmente, se opera la celda de flotación con un porcentaje de sólidos entre el 20% y el 45% en peso (De la Rosa, 2013).

- d. Tiempo de residencia: El tiempo de flotación necesario depende de las características específicas del mineral de plomo y de la interacción de los diversos factores del proceso. Para optimizar los circuitos de flotación, se realizan pruebas cinéticas para determinar el tiempo óptimo de flotación (De la Rosa, 2013).
- e. Control del pH: El pH es un parámetro crítico en los procesos de flotación de plomo, ya que influye significativamente en la ley y la recuperación del mineral. La flotación selectiva del plomo es particularmente sensible al pH, ya que los reactivos de flotación, especialmente los colectores, funcionan mejor dentro de ciertos rangos de pH (De la Rosa, 2013).
- f. Aireación y acondicionamiento de la pulpa: El acondicionamiento adecuado de la pulpa es esencial para permitir que los reactivos de flotación actúen de manera eficiente. La aireación controlada de la pulpa en la celda de flotación es una variable clave que puede acelerar o retardar la flotación para mejorar la recuperación metalúrgica o la ley del plomo (De la Rosa, 2013).

3.2.2. Zinc

3.2.2.1. Producción a Nivel Nacional e Internacional

En noviembre de 2023, la producción nacional de zinc alcanzó 115,646 TMF, mostrando un aumento del 1.2% en comparación con el mismo mes del año anterior (114,235 TMF). Este aumento se debe a los mayores niveles de producción registrados por Minera Shouxin Perú S.A. (+283.6%), Nexa Resources Perú S.A.A. (+25.3%) y

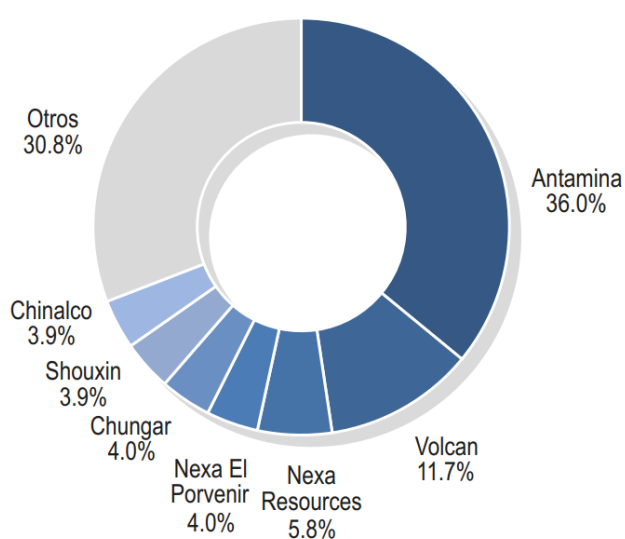
Minera Chinalco Perú S.A. (+34.1%). En términos acumulados hasta noviembre de 2023, la producción total fue de 1,318,979 TMF, lo que representa un crecimiento del 5.8% en comparación con el mismo período de 2022 (1,246,732 TMF).

En cuanto a los principales actores en la producción de zinc, Compañía Minera Antamina S.A. mantuvo su liderazgo con el 35.8%, seguido por Volcan Compañía Minera S.A.A. con el 11.7% y Nexa Resources Perú S.A.A. con el 5.8%.

A nivel regional, Áncash ocupó el primer lugar con el 39.7%, seguido por Junín y Pasco con el 18.4% y 12.8%, respectivamente (Dirección de Promoción Minera, 2023).

Figura 2

Producción de Zn de empresas en el Perú, 2023



Nota: Recuperado de Dirección de Promoción Minera (2023).

3.2.2.2. Exportaciones

El monto de las exportaciones de zinc en octubre de 2023 fue de US\$ 175 millones, mostrando una disminución del 18.9% en comparación con el mismo mes de 2022 (US\$ 216 millones). Esta caída se debe principalmente al impacto negativo del

precio, que disminuyó un 13.0%, a pesar del aumento en el volumen embarcado del 14.5% respecto al año anterior.

En cuanto a las exportaciones acumuladas hasta octubre de 2023, estas alcanzaron los US\$ 2012 millones, lo que representa una reducción del 14.5% en comparación con el mismo período de 2022 (US\$ 2355 millones).

China se mantuvo como el principal destino de las exportaciones de zinc, con el 31.6% del total, seguido por Corea del Sur con el 11.4% y España en tercer lugar con el 9.1%. Estos tres países representaron conjuntamente el 52.1% de las exportaciones totales de zinc durante el período de enero a octubre.

En cuanto al precio del zinc, en noviembre experimentó un aumento del 3.9% en comparación con octubre, impulsado por la lenta recuperación del sector inmobiliario en China y la expansión de la producción industrial manufacturera (Dirección de Promoción Minera, 2023).

3.2.2.3. Mineralogía y Asociaciones

- Esfalerita (Sphalerite): ZnFeS
- Composición Química: Zn: 64.06%; Fe: 2.88%; S: 33.06%
- Impurezas: Cd: 0.28%, In, Ga, Ge, Mn: 2.66%, Ag
- Sistema Cristalino: Isométrico - Hextetraedral
- Habito: Cristales de tetraedros, dodecaedros deformados, macla de rotación frecuentes, pared de caras (110) apariencia de macla según (110) de contacto, masivo, granular muy fino o compacto, concreciones, botroidal, maclas múltiples y simples, presentan estrías.
- Variedades: Marmatita: Esfalerita negra u opaca, alto contenido de Fe (máx. 36.5% Fe). Blenda Rubia (rubizin): Incoloro transparente, pardo

amarillento, verde acaramelado <%Fe Brunckita: Esfalerita blanca, pulverulenta altos contenidos de Cd y terrosas disminuye Fe, predomina Zn (Puquio - Huancayo). Cleofano: De color incoloro mayor % Zn

- Color: Variado: Pardo a marrón, amarillo caramelo, verde, marrón oscuro, amarillo verdoso, negro, azul, rojizo, blanco, incoloro
- Brillo: Resinoso en algunos, adamantinos, ⁺Fe brillo submetálico.
- Raya: Variado más negro, marrón, pardo amarillo, blanquecino
- Peso Específico: Varía según el contenido de Fe 3.9 - 4.2
- Dureza: 3.5 a 4
- Clivaje: Perfecto según (110) a bueno 6 direcciones en dodecaedro, 6 direcciones según el rombo dodecaedro. No hay fractura, nunca varia.
- Polimorfismo & Serie: Trimorfo con Matraita y Wurtzita.
- Otras propiedades importantes: Es muy frágil, al soplete decrepita y funde solo en los vértices, no es buen conductor del calor piroeléctrico polar, calienta, se carga eléctricamente S son traslúcida y opaca.
- Asociación mineralógica: Galena, Calcopirita, Marcasita, Pirita, Fluorita, Baritina, Cuarzo.
- Características distintivas: Clivaje, brillo, color, dureza, hábito.
- Yacimiento: En ambientes hidrotermales asociado casi siempre a galena, calcopirita, yacimientos estratoligados, yacimientos sedimentarios, metamorfismo de contacto (Antamina), en bandas sedimentarias.
- Alteración: Pasa a ser smithsonita (ZnCO_3), Hemimorfita ($\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$).
- Importancia: Mena importantísima de Zn si tuviera Cd, In, Ga (Dana, 1986).

3.2.2.4. Flotación de Zn

Los principios de la flotación del zinc se basan en la interacción de diversos reactivos y parámetros que influyen en el proceso de separación de minerales de zinc de sus gangas. La adsorción de colectores de mezclas aniónicas/catiónicas en la superficie de minerales de zinc es un aspecto crucial en la flotación, ya que la formación de complejos co-colectores en cadenas juega un papel determinante en la selectividad del proceso. La relación molar de los colectores aniónicos/catiónicos muestra un efecto significativo en la flotación mineral, y se ha observado que la presencia de ciertos reactivos como el sulfuro de sodio puede aumentar la adsorción de colectores. Además, la temperatura, la concentración de pulpa sólida y el deslimado son parámetros importantes que influyen en la eficacia del proceso de flotación del zinc (Chumbes, 2019).

La formación de complejos insolubles y la interacción entre aniones y cationes también son aspectos relevantes en la flotación del zinc, ya que influyen en la adsorción de los colectores y en la selectividad del proceso. La presencia de ciertos reactivos, como el sulfuro de sodio, ha demostrado aumentar la adsorción de colectores, lo que puede mejorar la eficiencia de la flotación del zinc. Asimismo, la relación molar de los colectores aniónicos/catiónicos ha mostrado tener un efecto significativo en la flotación mineral, y se ha observado que la temperatura, la concentración de pulpa sólida y el deslimado son parámetros importantes en el proceso de flotación del zinc.

El tipo de colector, el agente sulfurante, el regulador de pH, los tipos de depresores y dispersantes son factores determinantes en el proceso de flotación del zinc. La eficacia de la estrategia de flotación se ve influenciada por el rango (Rodríguez, 2016).

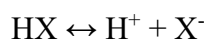
3.2.2.4.1. *Reactivos de Flotación de Zn*

a. Colectores

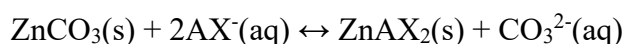
Los xantatos son los colectores más importantes para la flotación de minerales de sulfuro, así como para los óxidos (es decir, óxido de cobre, plomo y minerales de zinc). La sulfuración seguida de flotación con xantato no se utiliza en la flotación de los silicatos de zinc, hemimorfita y willemite, debido al alto consumo de sulfidante, la necesidad de activación con sulfato de cobre y las bajas recuperaciones obtenidas. Barbery y Cecil informaron que los xantatos se pueden usar para la flotación de mineral de zinc oxidado. La recuperación de flotación de smithsonita utilizando tubo Hallimond se determinó al 81,3% utilizando xantato de amilo de potasio (KAX) a pH alrededor de 10,5. Se sugiere la flotación de minerales de óxido de zinc para la sulfuración de la smithsonita seguida de la activación con CuSO_4 y flotación del óxido de zinc activado utilizando xantato a pH 10,5. También se da a entender que después del pretratamiento de la pulpa con sulfidizador seguido de reacondicionamiento con CuSO_4 , la flotación de óxido de zinc se puede lograr con una mezcla de colectores de xantato/mercaptano. Es evidente, a diferencia de lo que ocurre con los minerales de sulfuro, que los xantatos de cadena corta no son eficaces en la flotación de sus homólogos de óxido, y que los óxidos de Zn pueden ser flotados por xantatos de cadena larga (amilo o superior). La diferencia probablemente esté relacionada con la mayor hidrofiliidad natural de los óxidos, en comparación con los sulfuros, lo que sugiere la necesidad de un colector más hidrofóbico, y con el mecanismo de adsorción de xantato. La acción de los xantatos sobre los minerales sulfurados da como resultado un enlace químico entre el xantato y el metal. Con los óxidos, es menos probable que los átomos metálicos formen un enlace químico con el xantato debido al carácter iónico más alto del enlace entre el metal y el oxígeno que el que existe entre el metal y el azufre. Se sugiere que la acción de los xantatos sobre los

óxidos metálicos depende más de un mecanismo electrostático que en el caso de los sulfuros. Como el enlace electrostático es más débil que el enlace de quimisorción, requiere una cadena de hidrocarburos más larga para formar una película estable para la hidrofobicidad. El xantato se hidroliza en solución para formar ácido xántico (HX) y luego se disocia (Vila, 2011).

El xantato se hidroliza en solución para formar ácido xántico (HX) y luego se disocia (Xin et al., 2017).



La interacción del amiloxantato con la superficie de la smithsonita a un pH de 10,5 puede estar representada por la siguiente reacción:



b. Modificadores y reguladores de pH

La elección de un valor de pH y un modificador adecuados es un factor esencial en el control de la flotación mineral. Un ajuste del pH mediante la adición de un ácido o un álcali afecta a las superficies de los sólidos, al grado de ionización o solubilidad de un tensioactivo, a las concentraciones de iones inorgánicos, al nivel del potencial electroquímico y al potencial de oxidación-reducción correspondiente (Ejtemaei et al., 2014).

Los agentes más utilizados para la regulación del pH ácido son HCl, H₂, HNO₃, etc., aunque la elección no se basa únicamente en criterios económicos. NaOH, Ca(OH)₂ y Na₂CO₃ son los agentes de elección para el pH alcalino, pero de nuevo, la selección de uno u otro también debe tener en cuenta la posible influencia del agente en el sistema, por ejemplo, el efecto del CO₃²⁻ sobre la precipitación de Ca²⁺ iones presentes en el medio. El hidróxido de sodio (NaOH) debe usarse como regulador del pH, y el uso de carbonato

de sodio para ajustar el pH de la pulpa en la flotación de óxido de zinc puede disminuir la cantidad de recuperación de minerales. Este fenómeno se puede argumentar con base en el diagrama de especies dominantes para el $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-ZnCO}_3$, es decir, a un pH de alrededor de 11, utilizando Na_2CO_3 adicional, precipita $\text{Zn}(\text{OH})_2(\text{s})$, lo que provoca una reducción de la flotación de smithsonita (Ejtemaei et al., 2014)..

c. Depresores

Los principales problemas en la flotación aniónica de minerales de zinc oxidados involucran la flotación de los principales minerales de ganga asociados (cuarzo y calcita) en concentrado. Es muy importante utilizar un depresor que no tenga ninguna influencia en la valiosa flotación del óxido de zinc. Se ha caracterizado que el cuarzo no puede ser flotado por oleico a pH 9 debido a su carga superficial negativa. Por el contrario, los resultados reales de la flotación muestran que no hubo separación entre la smithsonita y el cuarzo, y ambos han sido puestos a flote (Ejtemaei et al., 2014).

La calcita y la dolomita fueron deprimidas por el ácido cítrico en la flotación con ácido oleico, pero este método no ha encontrado aplicación en ninguna práctica vegetal. SH, como depresor en la separación de un solo mineral de smithsonita-calcita por tubo de Hollimond en flotación con ácido oleico mostró resultados exitosos. Por otro lado, al usar SH en la flotación de ácido oleico real del mineral de óxido de zinc, el grado de CaO disminuyó, mientras que el grado de zinc también cayó abruptamente. Para comprender las causas de estos resultados inversos del tubo de Hollimond y la flotación real, debemos investigar a fondo la influencia de los iones disueltos en las superficies de calcita y smithsonita en la flotación con ácido oleico (Ejtemaei et al., 2014).

d. Dispersantes

Los lodos tienen un efecto marcado sobre la flotación del zinc oxidado y dan lugar a un consumo excesivo de reactivos con menos selectividad. Los minerales de óxido de zinc consisten tanto en limos primarios como en lodos secundarios que se crean durante los procesos de trituración y molienda. El principal problema en el procesamiento de relaves de flotación de zinc es el gran volumen de finos y lodos con el aumento del consumo de reactivos, lo que provoca el fenómeno llamado slime-coating, que dificulta la selectividad y, en algunos casos, hace inviable el proceso. Para evitar esto, se puede aplicar deslimado y usar diferentes reactivos como floculantes, coagulantes, dispersantes y depresores. Los lodos son perjudiciales para la flotación y el proceso generalmente requiere un paso de deslimado antes de la flotación (Ejtemaei et al., 2014).

3.2.2.4.2. *Variables Influyentes en la Flotación de Zn*

a. Tamaño de partícula

En pruebas de la influencia de las nano-microburbujas y el tamaño del alimento en la flotación del zinc, se realizaron reducción de tamaño de partícula por molienda húmeda y seca bajo tres tiempos de molienda diferentes para preparar seis alimentaciones de flotación, con los tamaños superiores de 38, 75 y 106 μm .

Se asumió que estas condiciones afectaban: estrategia de molienda, alimentación y el efecto de la distribución del tamaño del alimento en el rendimiento de separación del Pb y el Zn. La figura 4 describe la distribución del tamaño de partícula de cuatro muestras más finas que 106 y 75 μm determinadas mediante tamizado húmedo.

Dado que el tamizado no fue preciso para los piensos más finos (-38 μm), se realizaron análisis SLS en ellos.

En la molienda en seco produce partículas más finas que la molienda en húmedo, por ejemplo, hay una diferencia de 18 μm entre d80 de las fracciones de tamaño más gruesas (-106 μm) aunque el tamaño superior sea idéntico. A medida que las partículas se vuelven más finas, debido a la fuerza elástica de las partículas más finas, la diferencia entre los tamaños de partícula para las alimentaciones más finas se vuelve menor, es decir, alrededor de 5 μm (Rao et al., 2015).

3.2.3. Carbón

3.2.3.1. Producción a Nivel Nacional

En lo que respecta a la producción de carbón, se registró un incremento significativo del 32.7% en comparación con el año anterior, alcanzando un total de 191.9 mil toneladas. En cuanto al tipo de carbón extraído, el 54.4% corresponde a carbón antracita proveniente de los departamentos de Lima, La Libertad, Áncash y Cajamarca, mientras que el 45.6% proviene de carbón bituminoso del departamento de Lima (Dirección de Promoción Minera, 2023).

3.2.3.2. Minerales y Asociaciones

Es una roca sedimentaria, localizada bajo una capa de arena, es utilizado como combustible fósil, puesto que proviene de la descomposición de millones de años de diversos materiales orgánicos, proteínas y vegetales. Compuesto por hidrogeno, nitrógeno, carbono, azufre, con un peso específico de 1 a 1.8 g/cm^3 (Speight, 2005). Por ello cada muestra de carbón es única, depende de factores como el tipo de material donde inicia la carbonización, el entorno donde se madura y el tipo de bacterias que contribuyen a su formación. Existen varios tipos de carbón que son: lignitos, bituminosos, turba (menos rango) y antracita (mayor rango). Los criterios de clasificación vienen

determinados por: el porcentaje de carbono fijo, contenido de material volátil, poder calorífico, humedad, esta clasificación es según la American Society for Testing and Materials – ASTM como se observa en la tabla 1 (Unidad de Planeación Minero Energética, 2012).

Tabla 1

Clasificación de los carbones de acuerdo con el rango

Tipo	Carbono fijo (%)	Material volátil (%)	Contenido de humedad (%)	Poder calorífico (Btu/lb)	Poder calorífico (MJ/Kg)	Poder calorífico (Kcal/Kg)
Antracita	86-98	1	<15	>14.000	>32.6	>7.780
Bituminoso	45-86	32	15-20	10.500-14.000	24.5-32.6	5.800-7.780
Subbituminoso	35-45	50	20-30	7.800-15.500	18.2-24.5	4.300-7.780
Lignito y turba	25-35	96	>30	4.000-7.800	9.3-18.2	2.200-4.300

Nota: Recuperado de la Unidad de Planeación Minero Energética (2005).

- Antracita: Usado como combustible en generación de calor o vapor en la industria térmica y siderúrgica, también se utiliza en la fabricación de colorantes, purificación de agua para su consumo.
- Bituminoso: Usados en procesos de obtención del acero y en la producción de vapor para la generación de energía.
- Subbituminoso: Empleado en la generación de energía eléctrica y en procesos industriales.
- Lignito y turba: Es empleado en la generación calorífica (calefacción) energía eléctrica, para algunos procesos industriales en donde se requiere generar vapor (Unidad de Planeación Minero Energética, 2005).

El carbón se encuentra dispuesto en mantos formados de estructuras mineralizadas horizontales que pueden tener diversos espesores a diferentes profundidades, intercaladas por capas de rocas sedimentarias, esta disposición de los mantos define la tecnología de extracción y gran parte del contenido del material mineral no combustible que acompaña al carbón y afecta su uso en fines de generación de energía y consumo energético (Pérez, 2012).

Las minas de carbón estudiadas en su mayoría están ubicadas en el departamento de La Libertad, específicamente en las provincias de Otuzco y Sánchez Carrión, dos pertenecen al departamento de Ancash y una al departamento de Amazonas (Chachapoyas); véase la Tabla 2, donde se detallan.

Tabla 2

Empresas mineras de carbón

Empresa minera	Minas		Ubicación	Tipo de carbón
	Propias	De terceros		
Black Hill Company SAC	Chimú I	Ninguna	Gran Chimú – La Libertad	Antracita masiva y granular
Consorcio Minero Alto Chicama EIRL	Magia Blanca	Ninguna	Chuquisongo – Usquil – Otuzco – La Libertad	Antracita de grano fino
Minerales Trujillo EIRL	Los Andes	Ninguna	Canibamba – Usquil – Otuzco – La Libertad	Antracita granulado y masivo
Compañía Minera Sol Sofía SAC	Ninguna	Minas de Chacomás	San Martín – Usquil – Otuzco – La Libertad	Antracita granulado en nódulos
		San Martín	Capachique – Usquil – Otuzco – La Libertad	Antracita granular
		Mina El Gato	Huamachuco – Sánchez Carrión – La Libertad	Antracita masiva
		Carbonífera 2000	Huamachuco – Sánchez Carrión – La Libertad	Antracita granulado

		Angel Antonio I	Tarica – Yanac – Corongo – Ancash	Antracita masiva
MATECOM	Ninguna	Minera Canibamba	Canibamba – Usquil – Otuzco – La Libertad	Antracita masiva y granular
Juanc Jumer	Minera Juanc Jumer	Ninguna	Huamachuco – Sanchez Carrión – La Libertad	Antracita alterada
	Mina Ucro	Ninguna	Cruz Colorada – Huamachuco – Sanchez Carrión – La Libertad	Antracita alterada
Minera Cerro Corazón EIRL	Pampa Verde	Ninguna	Pampa Verde – Usquil – Otuzco – La Libertad	Antracita de grano fino
	Mina Pampa Hermosa	Ninguna	Pampa Hermosa – Usquil – Otuzco – La Libertad	Antracita de grano fino
	Mina Guitarrilla	Ninguna	Huaranchal – Otuzco – La Libertad	Antracita masiva
Minera Alto Chicama EIRL	Mina Tres Ases	Ninguna	Huaranchal – Otuzco – La Libertad	Antracita masiva y granular
Silvia Burga Rivas Plata	Mina Sonchino	Ninguna	Sonche – Chachapoyas - Amazonas	Semi bituminoso
Otras Minas Visitadas	Consorcio Minero Israel		Gran Chimú – La Libertad	Antracita masiva y granular
	Mina Aguas Limpias		Gran Chimú – La Libertad	Antracita masiva y granular
Jesús de Nazareth S.A.	Jesús de Nazareth 1, 3 y 4		Coina – Usquil – Otuzco – La Libertad	Antracita masiva y granular
Mina El Chorreo - Huarochiri	Petitorio Minero		Huarochirí – Santa – Ancash	Grafito

Nota: Recuperado de Giraldo & Blas (2007).

3.2.3.3. Flotación de carbón

La tecnología básica de flotación de carbón se ha derivado de la flotación de minerales, donde la tecnología se ha utilizado ampliamente. La primera planta de flotación de espuma para carbón se estableció en el Reino Unido en 1920 y la primera

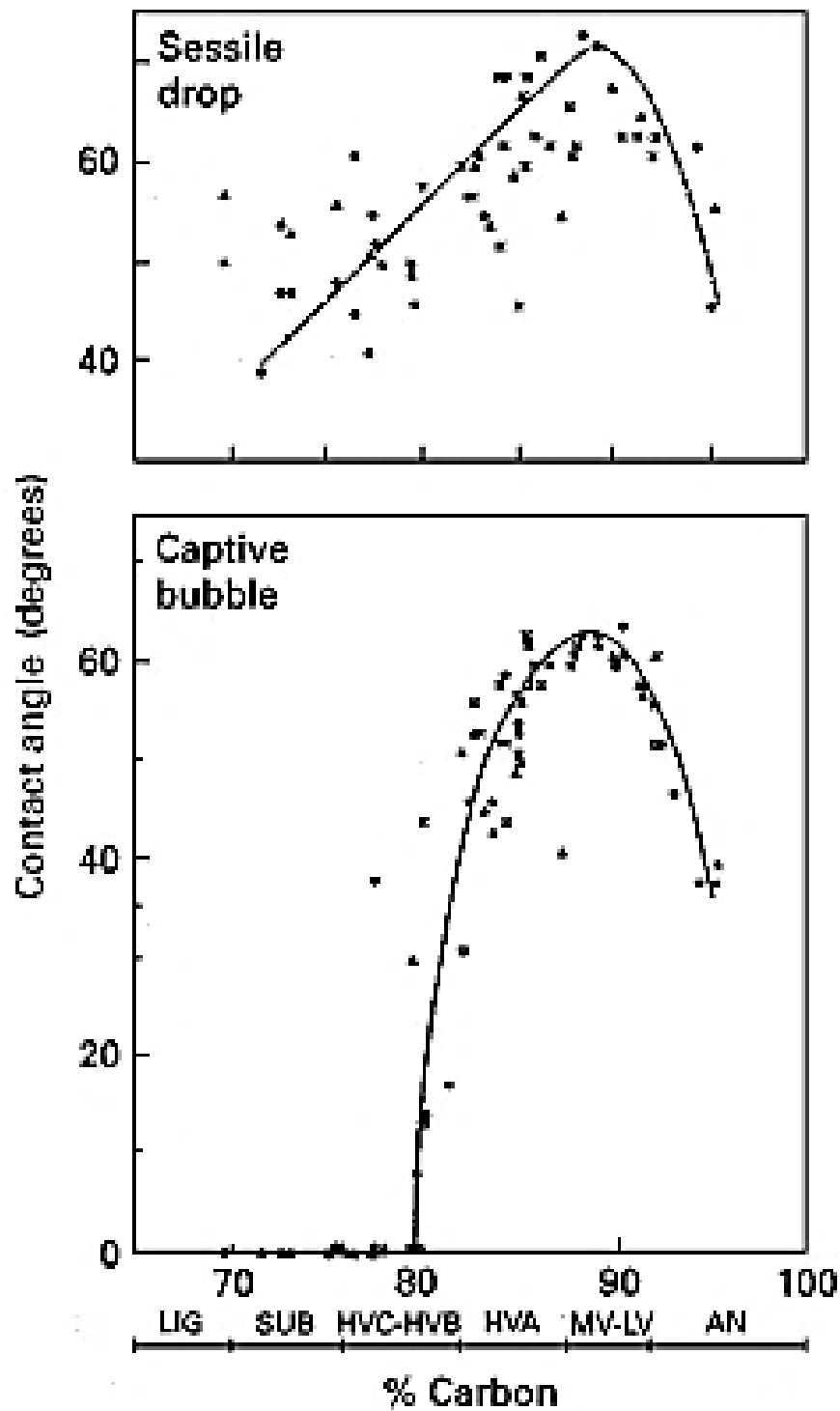
planta estadounidense se estableció en 1930. La tecnología de flotación por espuma ha progresado sustancialmente en los últimos cincuenta años.

El carbón es un material combustible sólido y existe en el suelo junto con las impurezas. El carbón, al estar compuesto de elementos de carbono, es de naturaleza hidrofóbica y, por lo tanto, es un buen candidato para la técnica de flotación por espuma. Las impurezas presentes en el carbón consisten básicamente en arcillas, cuarzo, calcita, dolomita, pirita, clorita, etc., que son de naturaleza hidrófila y, por lo tanto, pueden eliminarse fácilmente en un medio acuoso. Los minerales de pirita presentes en el carbón tienen un carácter ambivalente y, a veces, son difíciles de eliminar mediante la técnica de flotación.

La hidrofobicidad del carbón varía con el rango del grupo funcional carbón y oxígeno presente en el carbón. Los carbones bituminosos de alta volatilidad son los más hidrófobos, mientras que el lignito es el menos hidrofóbico. Una técnica para cuantificar la hidrofobicidad del carbón es a través de la medición de los ángulos de contacto del agua en las superficies del carbón. La Figura 3 muestra los datos del ángulo de contacto del agua en varios carbones. Tenga en cuenta que el ángulo de contacto máximo o la hidrofobicidad se produce a aproximadamente 88% C, y los carbones de antracita con alto contenido de carbono son menos hidrofóbicos (Piñeres et al., 2018).

Figura 3

Hidrofobicidad de varios suelos en función del porcentaje de carbono según la técnica del ángulo de contacto



Nota: Recuperado de Bachmann et al. (2008).

3.2.3.3.1. *Reactivos de Flotación de carbón*

El propósito de los reactivos de flotación es proporcionar una superficie hidrofóbica fuerte y crear pequeñas burbujas relativamente estables. Para la flotación de carbón, en general, solo se utilizan los reactivos colectores y espumadores (Parekh, 2000).

a. Colectores

Teóricamente hablando, los carbones altamente hidrófobos (que contienen 85-90% C) no deberían requerir ningún colector. En la práctica, se utiliza una pequeña cantidad de fueloil N° 2 o queroseno como colector. La cantidad de colector requerida varía desde un bajo ($0,11-0,2 \text{ kg t}^{-1}$) para un carbón de alto rango hasta un alto ($1,0-2,0 \text{ kg t}^{-1}$) para un carbón de bajo rango (Parekh, 2000).

b. Espumantes

La función principal del vaporizador es producir una gran cantidad de burbujas. Las burbujas deben ser capaces de llevar el carbón a la superficie sin romperse, y una vez fuera de la máquina de flotación, debe descomponerse. Los espumadores más utilizados para la flotación de carbón son el alcohol puro, por ejemplo, MIBC (metil isobutil carbinol) o una mezcla de varios alcoholes y los espumadores a base de polipropilenglicol. La cantidad de espumador requerida varía de $0,2$ a $0,5 \text{ kg t}^{-1}$ (Parekh, 2000).

c. Depresor

La función del depresor es suprimir la flotación de un componente de la mezcla de sólidos mediante la adición de un producto químico específico. En la flotación de carbón, la pirita generalmente flota junto con el carbón. Se han publicado muchos trabajos

sobre el tema; sin embargo, Chaudhari y Aplan, y Xu y Aplan, han llevado a cabo una investigación detallada de varios reactivos para deprimir la flotación de pirita. Llegaron a la conclusión de que no existe un reactivo universal para deprimir la pirita. En la industria del carbón, no se practica la depresión de pirita; Sin embargo, en el futuro esto podría convertirse en un paso importante para que la industria del carbón sobreviva. Existen otras variables para la flotación, como el pH, los reactivos dispersantes, el porcentaje de sólidos, el tamaño de las partículas, etc. Sin embargo, en la industria del carbón, se presta muy poca o ninguna atención a estos factores. Los lectores interesados deben consultar el trabajo de Aplan (Parekh, 2000).

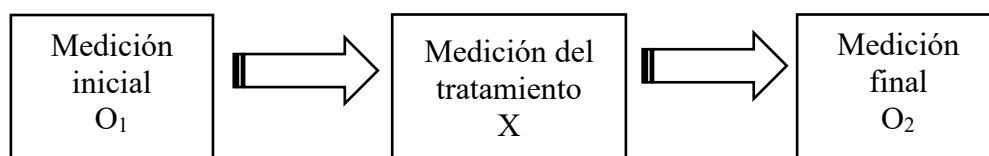
CAPÍTULO IV: Metodología de la Investigación

4.1. Tipo y Diseño de Investigación

La investigación por desarrollarse es de tipo experimental, porque se aplicarán los conocimientos actuales de caracterización del mineral y proceso de flotación de minerales sulfurados con contenido de carbón, teniendo en cuenta la influencia de las variables geometalúrgicas que determinarán la recuperación de Pb-Zn.

La investigación es de tipo experimental, deductiva y cuantitativa, porque se realizarán pruebas metalúrgicas a nivel de laboratorio, tomando como base las teorías de caracterización del mineral y proceso de flotación de minerales sulfurados con contenido de carbón, teniendo en cuenta la influencia de las variables geometalúrgicas que determinarán la recuperación de Pb-Zn, además de los antecedentes en el procesamiento de estos tipos de recursos minerales.

El diseño de investigación es el siguiente:



Nota: Elaborado por el autor.

Donde:

O₁: Minerales sulfurados polimetálicos de Pb-Zn con contenido de carbón, en la provincia de San Mateo.

X: Aplicación del proceso de flotación de minerales sulfurados polimetálicos con contenido de carbón, teniendo en cuenta la mineralogía de la muestra problema.

O₂: Recuperación de plomo y zinc.

4.2. Unidad de Análisis

4.2.1. Ubicación

San Mateo es un distrito ubicado en la provincia de Huarochirí, en el departamento de Lima, Perú. La provincia de Huarochirí se encuentra en la sierra central del Perú. Se encuentra ubicado a una distancia de 95 km de Lima, por la ruta de la carretera Central. Además, está ubicado en la cuenca alta del río Rímac, en el centro de la vertiente occidental de los andes peruanos.

4.2.2. Geografía

Abarca una superficie de 425.6 km² y se encuentra en la sierra de Lima a una altitud de 3185 msnm. Su accesibilidad es a través de la Carretera central.

Las coordenadas geográficas del distrito de San Mateo son (Díaz et al., 2023):

- Latitud: S 12° 45' 12.28"
- Longitud: O 74° 24' 17.24"

4.2.3. Clima

San Mateo de Huanchor tiene un clima tundra, hace frío todo el año. La temperatura media anual en San Mateo de Huanchor es 23° y la precipitación media anual es 16 mm. No llueve durante 334 días por año, la humedad media es del 77% y el Índice UV es 6.

- Día: la temperatura media diurna está entre 21°C y 26°C durante el día.
- Noche: la temperatura media nocturna está entre 15°C y 22°C.
- Temperatura del mar: la temperatura media del mar está entre 17°C y 24°C.
- Lluvia: llueve 21 días y hay un total aproximado de 18 mm precipitaciones (Díaz et al., 2023).

4.3. Población de Estudio

La población de estudio de la presente investigación fue el mineral de cabeza, extraído y muestreado de los yacimientos mineros sulfurados con contenido de carbón en el distrito de San Mateo de Huanchor, provincia de Huarochirí, departamento de Lima.

4.4. Tamaño de Muestra

La investigación y las pruebas metalúrgicas del proyecto se llevarán a cabo en los laboratorios de la E.P. de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM, mientras que la caracterización del mineral se realizará en el laboratorio de GEOXINPESAC. Para determinar el tamaño de la muestra requerida, se consideraron los siguientes factores: Pruebas metalúrgicas planificadas, cantidad mínima necesaria por prueba y un margen adicional. En base a estos criterios, se estimó un total de 200 kg de muestra, de los cuales 100 kg se reservarán como muestra testigo para futuras verificaciones o controles de calidad.

4.5. Procedimiento Metodológico de la Investigación

- Recopilación de antecedentes sobre la problemática en estudio.
- Obtener una muestra representativa de mineral de cabeza del distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí, departamento de Lima.
- Preparación mecánica de la muestra y muestreo de testigo.
- Pruebas de moliendabilidad del mineral de cabeza.
- Ensayos químicos y mineralogía de muestras representativas.
- Pruebas preliminares y definitivas de flotación de carbón en una primera etapa.

- Pruebas preliminares y definitivas de flotación de Pb-Zn, a partir de los relaves de la primera etapa.
- Sistematizar los resultados obtenidos, mediante balances metalúrgicos en hojas de cálculo y análisis estadísticos en Minitab 19.
- Proponer en base a los resultados obtenidos a nivel de laboratorio, pruebas a nivel de planta piloto.

CAPÍTULO V: Resultados

5.1. Microscopia Óptica del Mineral de Cabeza

Se preparó el lote del mineral a una granulometría de 100% - 10 Malla, y luego se muestreo 1 Kg de mineral para molienda de 8 minutos, alcanzando una granulometría de 70.23% - 200 Malla. La muestra molida se secó en una estufa a 120 °C por 2 horas, y luego se muestreo 10 gramos de mineral para preparar una briqueta que luego fue observada al microscopio óptico de luz reflejada, logrando identificar partículas de ant, gn, ef, Ag, py, apy, po, go, y ggs. El conteo de partículas determinó que la distribución volumétrica de la gn fue de 2.56%, identificándose el 81.93% como especies libres, con respecto a la esfalerita, esta ocupó un volumen de 13.88%, y 95.33% de grados de liberación, además, se identificaron minerales de carbón tipo antracita con una distribución de 1.88 % en volumen y 93.44% de especies libres. La tabla 3 representa el total de especies minerales identificados al microscopio y sus respectivos valores de distribución volumétrica y grados de liberación, así también, la figura 4 y 5 representan en gráficos de barras comparativos de la distribución en volumen, y grados de liberación, respectivamente.

Tabla 3

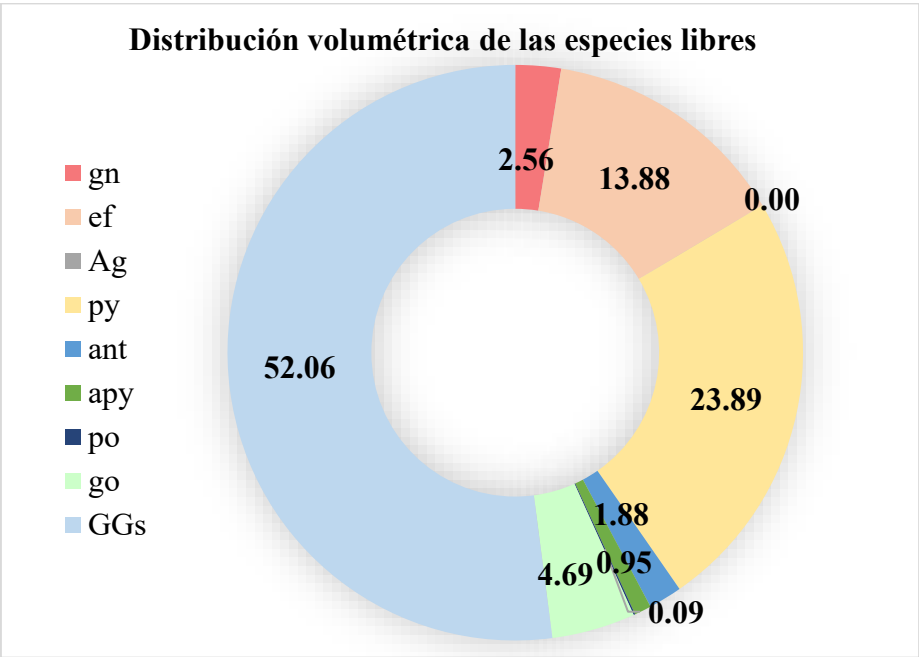
Distribución volumétrica y grados de liberación de los minerales observados

Minerales	Volumen porcentual (%)	Grado de liberación (%)
Galena	2.56	81.93
Esfalerita	13.88	95.33
Plata nativa	Trazas	-
Pirita	23.89	95.87
Antracita	1.88	93.44
Arsenopirita	0.95	83.87
Pirrotita	0.09	66.67
Goethita	4.69	94.74
Gangas	52.06	99.23
Total	100.00	

Nota: Reportado por el laboratorio GEOXINPESAC.

Figura 4

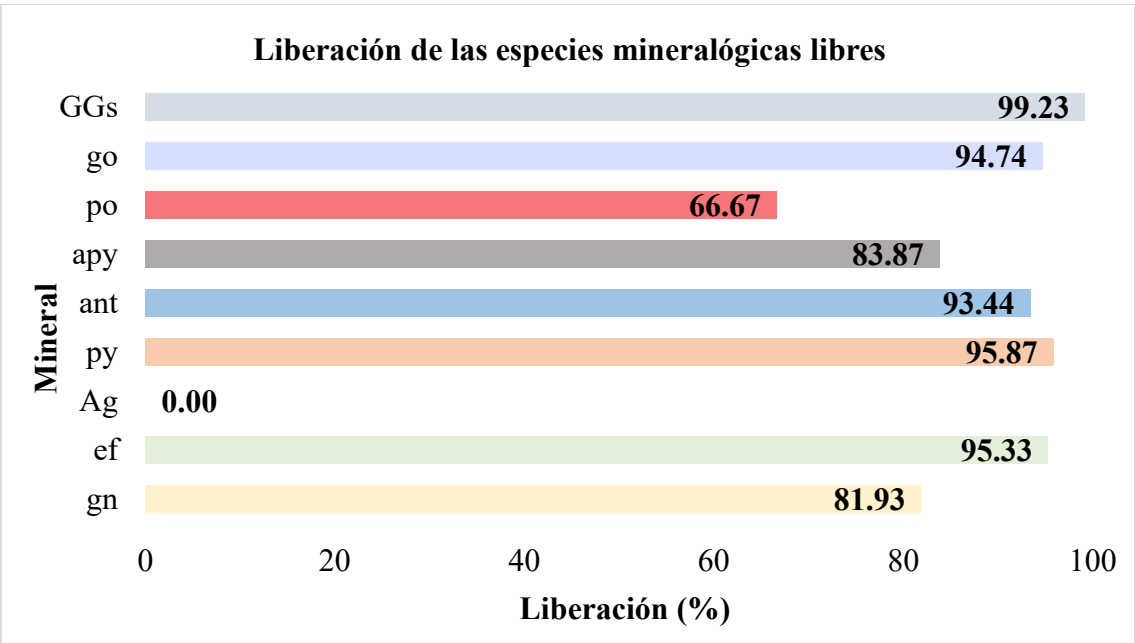
Volumen porcentual de las especies libres



Nota: Información del laboratorio GEOXINPESAC.

Figura 5

Grados de liberación de las especies libres



Nota: Reportado por laboratorio GEOXINPESAC.

5.1.1. Entrelazamiento de Minerales

Con respecto a los minerales de Pb y Zn, se identificaron enlaces binarios de gn-ef, ef-py, gn-Ag, además de enlaces triples de ef-py-apy, y gn-py-ggs. La antracita se observó formando enlaces binarios con la pirita, tal y como se observa en la tabla 4.

Tabla 4*Volumen y liberación de los entrelazamientos*

Minerales			Galena		Esfalerita		Plata nativa		Pirita		Antracita		Arsenopirita		Pirrotita		Goethita		Gangas	
			N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V
Total de Partículas Libres	3144.00		68.00		429.00		0.00		743.00		57.00		26.00		2.00		144.00		1675.00	
% Volumen Partículas libres		96.95		2.10		13.23		0.00		22.91		1.76		0.80		0.06		4.44		51.65
Total de partículas entrelazadas	Número de partículas	Volumen porcentual	Galena		Esfalerita		Plata nativa		Pirita		Antracita		Arsenopirita		Pirrotita		Goethita		Gangas	
			N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V
gn-ef	13.00	0.40	5.00	0.15	8.00	0.25														
ef-py	10.00	0.31			4.00	0.12			6.00	0.19										
py-apy	6.00	0.19							4.00	0.12			2.00	0.06						
gn-Ag	7.00	0.22	7.00	0.22			0.00	0.00												
py-po	6.00	0.19							5.00	0.15					1.00	0.03				
py-ant	12.00	0.37							8.00	0.25	4.00	0.12								
go-GGs	14.00	0.43															8.00	0.25	6.00	0.19
ef-py-apy	16.00	0.50			9.00	0.28			4.00	0.12			3.00	0.09						
gn-py-GGs	15.00	0.47	3.00	0.09					5.00	0.15									7.00	0.22
Total entrelaz.	99.00	3.05	15.00	0.46	21.00	0.65	0.00	0.00	32.00	1.00	4.00	0.12	5.00	0.15	1.00	0.03	8.00	0.25	13.00	0.41
Total lib. + entrelaz.	3243.00	100.00	83.00		450.00		0.00		775.00		61.00		31.00		3.00		152.00		1688.00	
Total volumen porcentual		100.00		2.56		13.88		Trazas		23.89		1.88		0.95		0.09		4.69		52.06
Grados de liberación			81.93		95.33		0.00		95.87		93.44		83.87		66.67		94.74		99.23	
Símbolos:			N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizadas.																	
			%V = Volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.																	

Nota: Reportado por laboratorio GEOXINPESAC.

5.1.2. Posibilidades de Liberación de Partículas Entrelazadas

Se identificaron 13 partículas mixtas de gn-ef, de las cuales, solo el 0.06% presentaron un enlace tipo sándwich fácil de liberar, 10 partículas de ef-py con el 0.19% de enlaces tipo borde compuesto difícil de liberar, y 7 partículas de gn-Ag fáciles de liberar. Con respecto a los enlaces triples, todos presentaron enlaces difíciles de liberar, tal y como se representa en la tabla 5. El gráfico circular de la figura 6 representa la distribución de los enlaces observados en el análisis modal.

Tabla 5

Enlaces y posibilidades de liberación

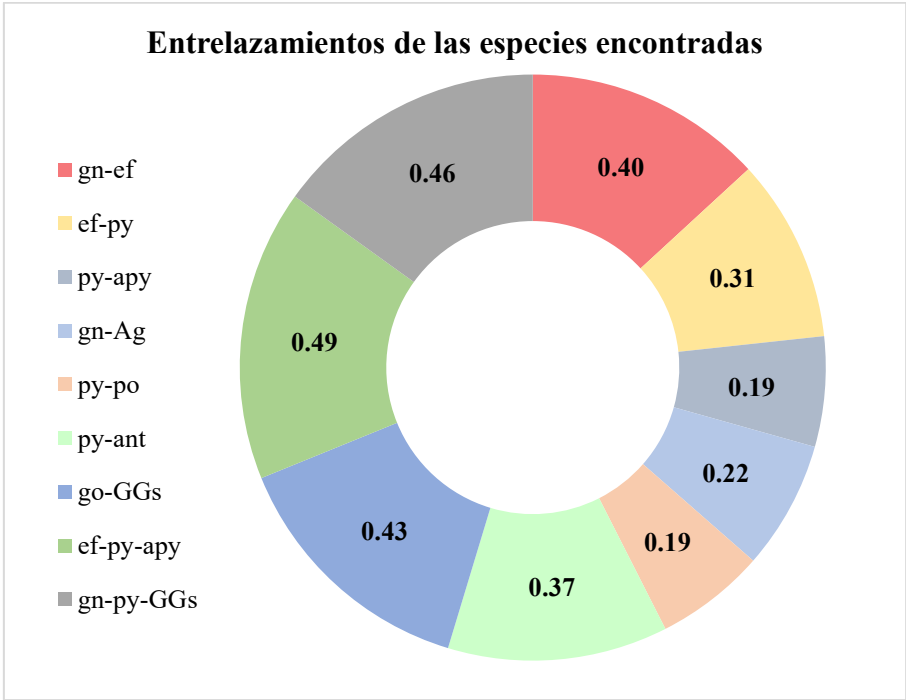
Minerales entrelazados	Tipo entrelazamiento	Número de partículas	Distribución porcentual (%)	Liberación
Partículas libres		3144	96.95	
gn-ef	Sandwich	2	0.06	Moderadamente fácil a difícil
	Concéntrico	4	0.12	Muy difícil a imposible
	Borde compuesto	7	0.22	Muy difícil
ef-py	Ameboide	4	0.12	Moderadamente fácil
	Borde compuesto	6	0.19	Muy difícil
py-apy	Concéntrico	1	0.03	Muy difícil a imposible
	Corona	5	0.16	Muy difícil a imposible
gn-Ag	Ameboide	3	0.09	Moderadamente fácil
	Sandwich	4	0.13	Moderadamente fácil a difícil
py-po	Ameboide	2	0.06	Moderadamente fácil
	Concéntrico	4	0.13	Muy difícil a imposible
	Simple	3	0.09	Fácil
py-ant	Sandwich	3	0.09	Moderadamente fácil a difícil
	Concéntrico	6	0.19	Muy difícil a imposible
	Simple	1	0.03	Fácil
go-GGs	Ameboide	4	0.12	Moderadamente fácil
	Sandwich	4	0.12	Moderadamente fácil a difícil
	Sub-corona	5	0.15	Muy difícil
	Ameboide	2	0.06	Moderadamente fácil
ef-py-GGs	Borde compuesto	3	0.09	Muy difícil
	Concéntrico	5	0.14	Muy difícil a imposible
	Gráfico	6	0.18	Imposible
	Simple	1	0.03	Fácil
gn-py-GGs	Sandwich	1	0.03	Moderadamente fácil a difícil
	Sub-corona	2	0.06	Muy difícil

Concéntrico	3	0.09	Muy difícil a imposible
Corona	8	0.25	Muy difícil a imposible
TOTAL	3219	100.00	

Nota: Reportado por el laboratorio GEOXINPESAC.

Figura 6

Volumen porcentual de los entrelazamientos

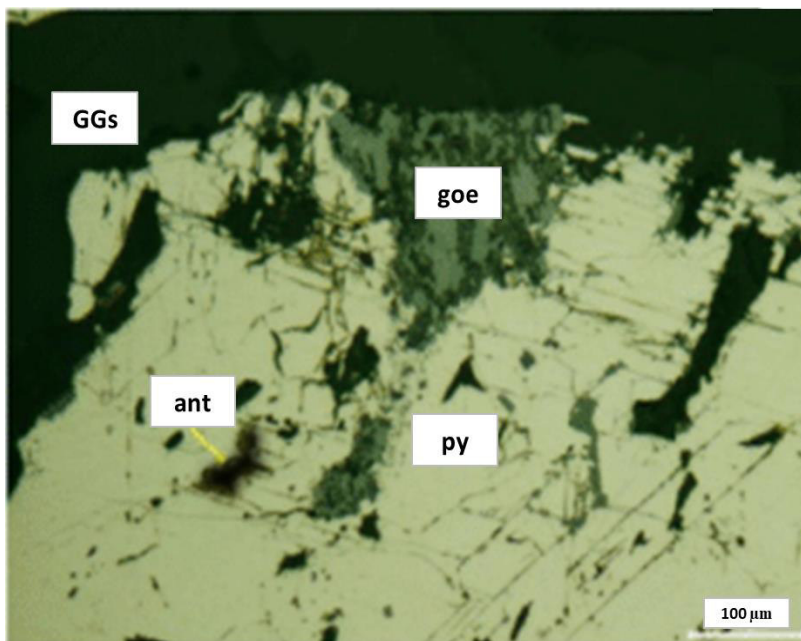


Nota: Reportado por laboratorio GEOXINPESAC.

Las figuras 7, 8, 9 y 10 presentan las principales micrografías obtenidas mediante microscopía óptica de luz reflejada, permitiendo analizar el contacto entre partículas y la distribución mineral en el mineral de cabeza. Estas imágenes destacan las asociaciones binarias y su relevancia en el proceso de flotación, proporcionando información crucial sobre las especies portadoras de valor y sus contactos con otros minerales. Además, resaltan las interacciones complejas que plantean desafíos para la liberación efectiva durante el procesamiento metalúrgico.

Figura 7

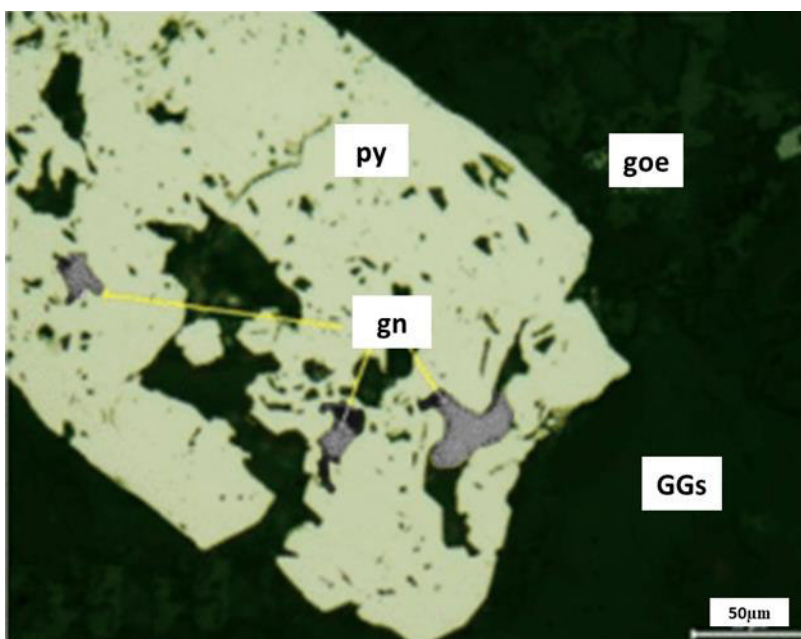
Micrografía que muestra la presencia de pirita, antracita, goethita y gangas



Nota: Reportado por el laboratorio GEOXINPESAC.

Figura 8

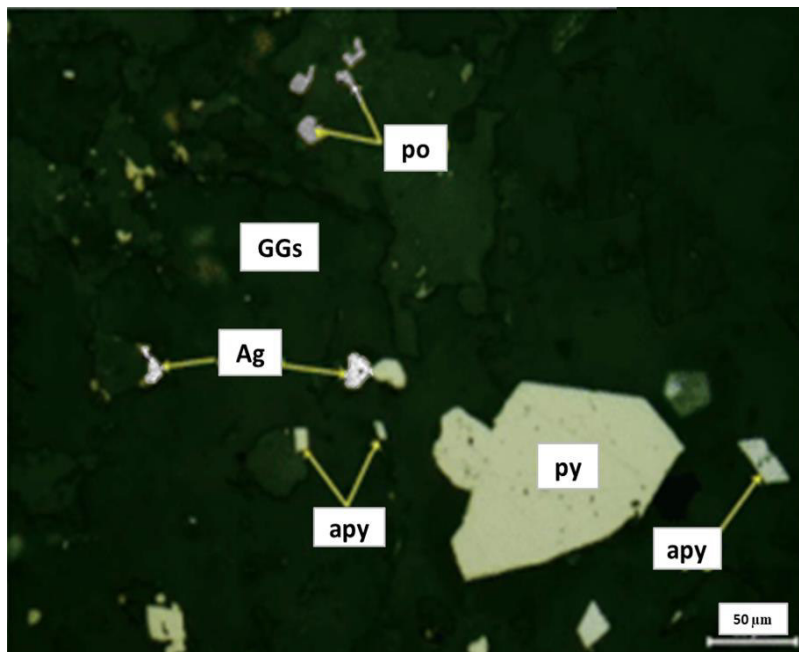
Micrografía con presencia de pirita, galena, goethita y gangas



Nota: Reportado por el laboratorio GEOXINPESAC.

Figura 9

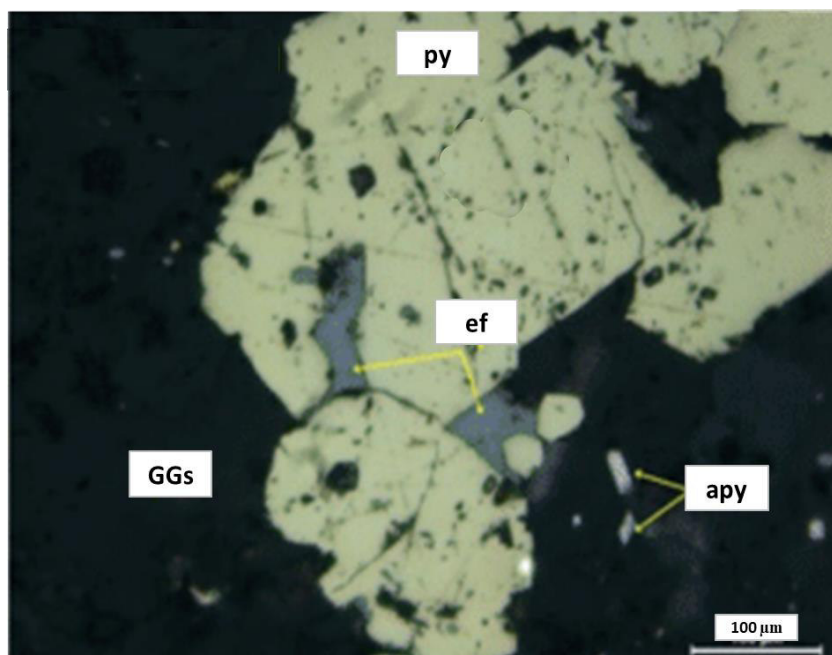
Micrografía que muestra la presencia de pirita, arsenopirita, pirrotina, plata y gangas



Nota: Reportado por el laboratorio GEOXINPESAC.

Figura 10

Micrografía con presencia de pirita, esfalerita, arsenopirita y gangas



Nota: Reportado por el laboratorio GEOXINPESAC.

5.2. Análisis Químico del Mineral de Cabeza

Con una muestra representativa del lote de mineral se realizaron ensayos químicos de volumetría para determinar la ley de Pb y Zn, y ensayos por vía seca para determinar la ley de Ag. Los resultados del análisis químico se detallan en la tabla 6.

Tabla 6

Ensayo químico del mineral de cabeza

Pb(%)	Zn(%)	C(%)	Ag(Oz/TC)
1.67	8.94	4.57	1.68

Nota: Reportado por el laboratorio H&F Laboratorios SAC.

5.3. Análisis Granulométrico

Con 300 g de muestra se realizó un análisis granulométrico empleado un Ro-Tap mecánico y un juego de tamices N° 10, 20, 30, 50, 70, 100, 200, 325, y 400 Malla. El tiempo de operación del equipo fue de 30 minutos, tal y como se puede observar en la tabla 7.

Tabla 7

Análisis granulométrico del mineral de cabeza

Malla	Peso (g)	%Peso	%Ac. Retenido	%Ac. Pasante
20	169.171	35.72	35.72	64.28
30	34.976	7.38	43.10	56.90
50	81.659	17.24	60.34	39.66
70	54.132	11.43	71.77	28.23
120	35.094	7.41	79.18	20.82
160	39.033	8.24	87.43	12.57
200	17.898	3.78	91.20	8.80
325	24.204	5.11	96.31	3.69
-325	17.455	3.69	100.00	0.00
	473.622	100.00		

Nota: Realizado en la UNMSM., E.P de Ingeniería Metalúrgica

5.4. Flotación Exploratoria de Pb y Zn

Se realizó la flotación exploratoria de Pb y Zn con la finalidad de recuperar dichos valores sin tener en cuenta el contenido de carbón mineral. La flotación de Pb se realizó a una granulometría de 50.87 % - 200 Malla, empleando depresores de ZnSO_4 y NaCN en concentraciones de 600 g/TM y 150 g/TM, respectivamente, además de 30 g/TM de AR-3418 y 100 g/TM de MIBC, alcanzado una recuperación de 76.47% con una ley de 35.62%. Las condiciones de operación de la etapa de flotación de Pb se describen en la tabla 8, y los resultados de las pruebas en el balance metalúrgico de la tabla 10.

Con una remolienda de los relaves de flotación de Pb se alcanzó una granulometría de 65.24% - 200 Malla, la cual alimento a la etapa de acondicionamiento de Zn empleando 500 g/TM de CuSO_4 , 300 g/TM de Z-11, y 120 g/TM de MIBC, alcanzando a recuperar 82.83 % de Zn con una calidad de 42.59%, tal y como se puede observar en el balance de la tabla 10. Las condiciones de operación de la etapa de Zn se detallan en la tabla 9.

Tabla 8

Condiciones de operación para la etapa de flotación de Pb

Parámetro	Valor
Peso mineral	1000 gramos
Granulometría	50.87 % - 200 Malla
% Sólidos	42%
RPM	800 – 1200
Flujo de aire	10 lt/sg
pH	8.5
ZnSO_4	600 g/TM
NaCN	150 g/TM
Acondicionamiento depresores	15 minutos
AR-3418	30 g/TM
MIBC	100 g/TM
Acondicionamiento colectores	10 minutos
Tiempo de flotación Rougher	3 minutos
Tiempo de flotación Cleaner	0.5 minutos

Nota: Realizado en la UNMSM., E.P de Ingeniería Metalúrgica

Tabla 9*Condiciones de operación para la etapa de flotación de Zn*

Parámetro	Valor
Granulometría	65.24 % - 200 Malla
% Sólidos	42%
Rpm	1200
Flujo de aire	10 lt/Sg
pH	11
CuSO ₄	500 g/TM
Acondicionamiento - activador	15 minutos
Xantato Z-11	300 g/TM
MIBC	120 g/TM
Acondicionamiento - colector	10 minutos
Tiempo de flotación Rougher	8 minutos
Tiempo de flotación Cleaner	3 minutos

Nota: Realizado en la UNMSM., E.P de Ingeniería Metalúrgica**Tabla 10***Balance de la flotación exploratoria*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	1000.00	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Pb	38.96	3.90	35.62	2.77	15.87	138.78	10.79	61.83	71.24	1.22	30.42	25.67
Medio Pb	95.23	9.52	1.07	1.24	2.33	10.19	11.81	22.19	5.23	1.33	10.92	
Conc. Zn	157.44	15.74	0.24	42.59	2.67	3.78	670.54	42.04	1.94	75.79	20.68	6.35
Medio Zn	224.11	22.41	0.04	2.78	1.22	0.90	62.30	27.34	0.46	7.04	13.45	
Relave final	484.26	48.43	0.85	2.67	1.03	41.16	129.30	49.88	21.13	14.61	24.54	-
Cabeza calculada			1.95	8.85	2.03	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC

5.5. Pretratamiento de Flotación de Carbón

La presencia de especies de esfalerita y antracita de tamaño fino en el mineral de cabeza perjudican la molienda del mineral, por lo que se vio la necesidad de clasificar

con tamices N° 35, 50, 75, y 100 Malla, para evaluar la flotación de antracita a distintas dosificaciones de reactivo diésel. Los mejores resultados se alcanzaron a una granulometría de 100% - 50 Malla, logrando concentrar 38.79 g de carbón, el cual representó una recuperación de 83.94%, a partir de 1000 g de mineral de cabeza, empleando 5 g/TM de diésel. Los resultados de las pruebas de flotación de carbón se describen en la tabla 11, y los valores de recuperación de carbón que no fueron reportados, fue debido a el desplazamiento de los sulfuros por exceso de reactivo, lo cual no representó el objetivo del pretratamiento de flotación de carbón.

Tabla 11

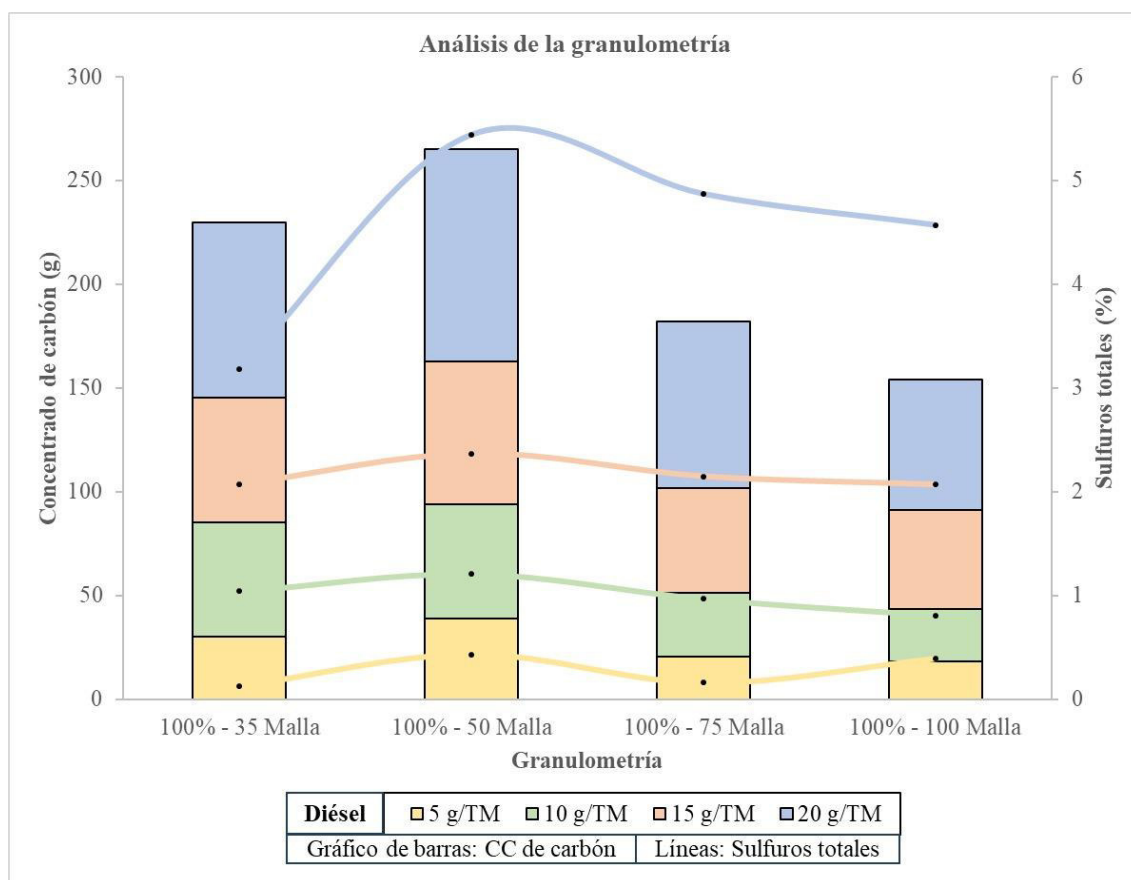
Análisis de la granulometría en la flotación

Granulometría	Diésel (g/TM)	Concentrado de carbón (g)	Recuperación C (%)	Sulfuros totales (%)
100% - 35 Malla	5	30.24	65.89	0.13
	10	55.23	-	1.04
	15	60.11	-	2.07
	20	84.07	-	3.18
100% - 50 Malla	5	38.79	83.94	0.43
	10	55.21	-	1.21
	15	68.97	-	2.37
	20	102.35	-	5.44
100% - 75 Malla	5	20.61	44.75	0.16
	10	30.67	64.99	0.97
	15	50.3	-	2.15
	20	80.47	-	4.87
100% - 100 Malla	5	18.09	38.73	0.39
	10	25.22	53.41	0.81
	15	48.13	-	2.07
	20	62.55	-	4.57

Nota: Realizado en la UNMSM., E.P de Ingeniería Metalúrgica

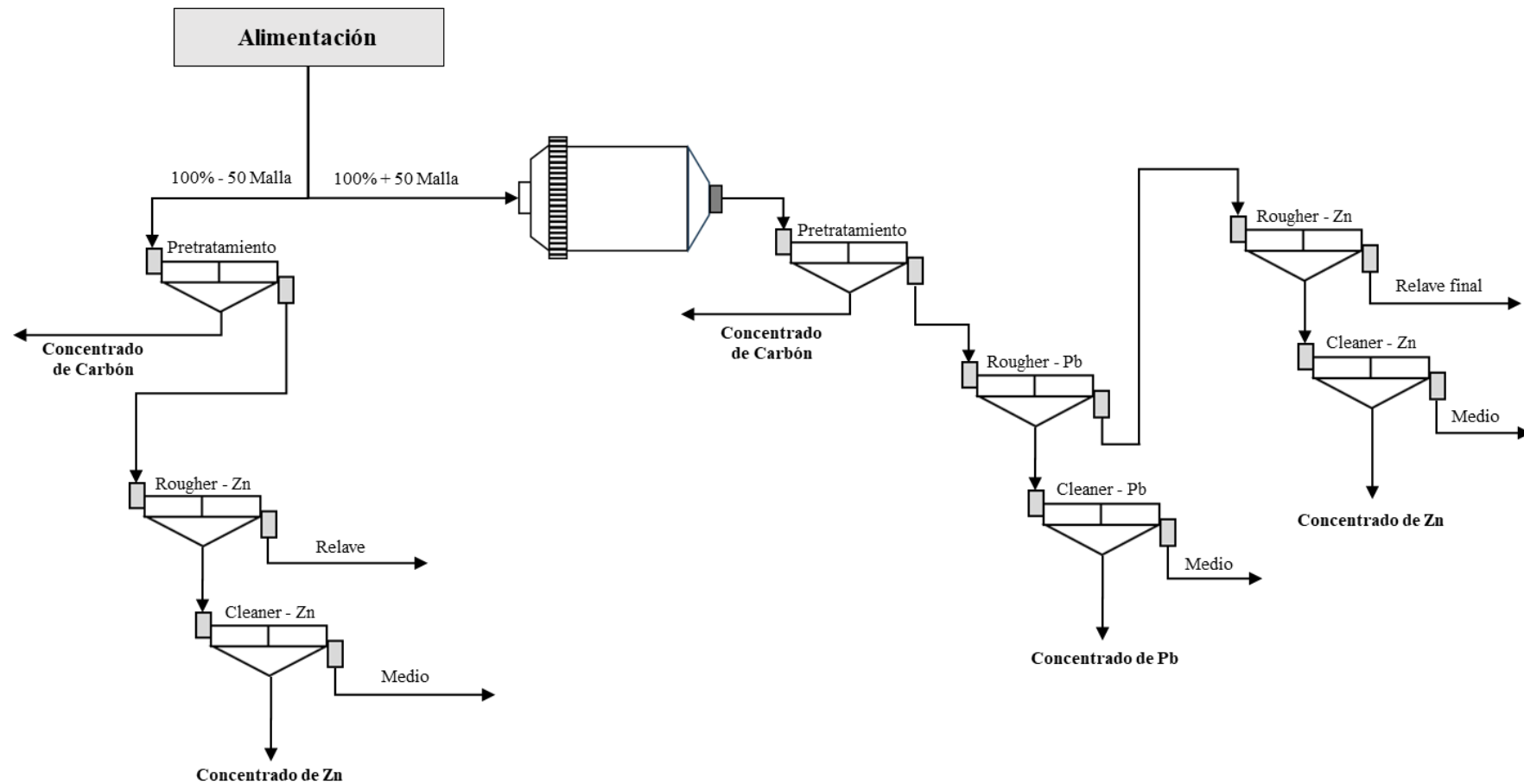
Figura 11

Comparativa variación de las variables en el análisis granulométrico



Nota: Representa los resultados de la tabla 11.

En base a los mejores resultados de las pruebas de flotación de carbón, se desarrolló un diagrama de flujo del desarrollo de las pruebas tal y como se muestra en la figura 12, teniendo en cuenta que en la fracción de finos se identificó principalmente esfalerita y cantidades despreciables de galena, y en la fracción de gruesos se identificaron ambos minerales.

Figura 12*Diagrama de Flujo de las Pruebas Experimentales**Nota:* Elaborado con software Metsim Version 2024.07.

5.6. Análisis Químicos a Distintas Granulometrías del Mineral

Se ensayó por volumetría para determinar las leyes de Pb - Zn, y copelación para Ag, para las distintas granulometrías de trabajo, tal y como se puede observar en la tabla 12.

Tabla 12

Análisis químico según la granulometría

Granulometría	Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)
100% - 50 Malla	0.25	10.15	1.23
100% + 50 Malla	2.54	8.68	1.68

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC

5.7. Flotación de Zn a 100% - 50 Malla

Se realizó un diseño experimental factorial de 2 factores, 2 niveles y 2 réplicas, para evaluar la contribución de la dosificación de reactivos CuSO₄ (5%) y Z-11 (1%) sobre la recuperación y calidad de Zn en el concentrado. Los valores de las variables independientes y las condiciones de operación se describen en la tabla 13, y la plantilla del diseño experimental en la tabla 14.

Tabla 13

Condiciones de operación de la flotación de Zn a 100% - 50 Malla

Parámetro	Valor
Granulometría	60.51% - 200 Malla
pH	11
CuSO ₄ (5%)	Según diseño
Z-11 (1%)	Según diseño
MIBC	120 g/TM

Nota: Realizado en la UNMSM., E.P de Ingeniería Metalúrgica

Tabla 14*Orden de las pruebas de la flotación de Zn a 100% - 50 Malla*

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	CuSO ₄ (g/TM)	Z-11 (g/TM)
1	1	1	1	100	50
2	2	1	1	200	50
3	3	1	1	100	100
4	4	1	1	200	100
5	5	1	1	100	50
6	6	1	1	200	50
7	7	1	1	100	100
8	8	1	1	200	100

Nota: Elaborado con software Minitab 19**5.7.1. Resultados de la Flotación de Zn a 100% - 50 Malla**

Los mejores resultados de las pruebas de flotación de Zn se obtuvieron en la prueba de orden 7, alcanzando una recuperación de 95.78 % de Zn, con una calidad de 51.94%, empleando 100 g/TM de CuSO₄, y 100 g/TM de Z-11. Los resultados de las pruebas experimentales se detallan en los balances metalúrgicas de las tablas del 15 al 22.

Tabla 15*1° flotación de Zn a 100% - 50 Malla*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	250.00	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Zn	33.69	13.48	0.37	45.68	8.74	4.99	615.58	117.78	22.24	61.44	58.61	
Medio Zn	69.88	27.95	0.10	2.57	0.44	2.80	71.84	12.30	12.47	7.17	6.12	7.42
Relave final	146.43	58.57	0.25	5.37	1.21	14.64	314.53	70.87	65.30	31.39	35.27	
Cabeza calculada			0.22	10.02	2.01	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC

Tabla 16*2° flotación de Zn a 100% - 50 Malla*

Componentes	Peso	%	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	250.00	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Zn	36.85	14.74	0.64	47.54	10.25	9.43	700.74	151.09	46.15	68.84	70.05	-
Medio Zn	72.64	29.06	0.05	3.08	0.54	1.45	89.49	15.69	7.11	8.79	7.28	6.78
Relave final	140.51	56.20	0.17	4.05	0.87	9.55	227.63	48.90	46.74	22.36	22.67	-
Cabeza calculada			0.20	10.19	2.16	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC**Tabla 17***3° flotación de Zn a 100% - 50 Malla*

Componentes	Peso	%	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	250.00	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Zn	45.78	18.31	0.87	52.13	10.25	15.93	954.60	187.70	58.69	88.54	75.39	-
Medio Zn	74.15	29.66	0.15	2.48	0.54	4.45	73.56	16.02	16.39	6.82	6.43	5.46
Relave final	130.07	52.03	0.13	0.96	0.87	6.76	49.95	45.26	24.92	4.63	18.18	-
Cabeza calculada			0.27	10.78	2.49	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC**Tabla 18***4° flotación de Zn a 100% - 50 Malla*

Componentes	Peso	%	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	250.00	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Zn	48.77	19.51	0.98	48.77	10.27	19.12	951.41	200.35	72.06	91.28	79.02	-
Medio Zn	77.01	30.80	0.16	1.37	0.84	4.93	42.20	25.88	18.58	4.05	12.88	5.13
Relave final	124.22	49.69	0.05	0.98	0.55	2.48	48.69	27.33	9.36	4.67	13.60	-
Cabeza calculada			0.27	10.42	2.54	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC

Tabla 19*5° flotación de Zn a 100% - 50 Malla*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	250.00	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Zn	30.07	12.03	0.31	47.63	7.96	3.73	572.89	95.74	17.01	57.35	47.75	-
Medio Zn	69.45	27.78	0.2	3.05	0.63	5.56	84.73	17.50	25.34	8.48	8.73	8.31
Relave final	150.48	60.19	0.21	5.67	1.45	12.64	341.29	87.28	57.65	34.17	43.53	-
Cabeza calculada			0.22	9.99	2.01	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC**Tabla 20***6° flotación de Zn a 100% - 50 Malla*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	250.00	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Zn	32.88	13.15	0.58	48.06	9.87	7.63	632.09	129.81	37.58	67.66	64.06	-
Medio Zn	71.44	28.58	0.05	2.45	0.66	1.43	70.01	18.86	7.04	7.49	9.31	7.60
Relave final	140.51	56.20	0.2	4.13	0.96	11.24	232.12	53.96	55.38	24.85	26.63	-
Cabeza calculada			0.20	9.34	2.03	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC**Tabla 21***7° flotación de Zn a 100% - 50 Malla*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	250.00	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Zn	45.78	18.31	0.93	51.94	9.85	17.03	951.13	180.37	66.80	87.57	79.17	-
Medio Zn	74.15	29.66	0.11	3.01	0.46	3.26	89.28	13.64	12.80	8.22	5.99	5.46
Relave final	130.07	52.03	0.1	0.88	0.65	5.20	45.78	33.82	20.41	4.22	14.84	-
Cabeza calculada			0.25	10.86	2.28	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC

Tabla 22*8° flotación de Zn a 100% - 50 Malla*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	250.00	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Zn	50.06	20.02	1.02	49.65	11.32	20.42	994.19	226.67	79.24	91.14	83.24	
Medio Zn	76.82	30.73	0.11	1.51	0.54	3.38	46.40	16.59	13.11	4.25	6.09	4.99
Relave final	123.12	49.25	0.04	1.02	0.59	1.97	50.23	29.06	7.64	4.61	10.67	
Cabeza calculada			0.26	10.90	2.72	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC**5.7.2. Análisis de la Varianza de la Recuperación de Zn a 100 % - 50 Malla**

El análisis de la varianza de los valores de recuperación de Zn demostró la mayor contribución que ejerce el reactivo Z-11 con un valor de 92.46%, tal y como se observa en la tabla 23.

Tabla 23*ANOVA de la recuperación de Zn*

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	1203.82	99.42%	1203.82	401.27	227.67	0
Lineal	2	1159.73	95.78%	1159.73	579.87	329	0
CuSO ₄	1	40.14	3.32%	40.14	40.14	22.77	0.009
Z11	1	1119.59	92.46%	1119.59	1119.59	635.22	0
Interacciones	1	44.09	3.64%	44.09	44.09	25.01	0.007
CuSO ₄ *Z11	1	44.09	3.64%	44.09	44.09	25.01	0.007
Error	4	7.05	0.58%	7.05	1.76		
Total	7	1210.87	100.00%				

Nota: Elaborado con software Minitab 19

5.7.2.1. Modelo para la Recuperación de Zn (100 % - Malla 50)

La ecuación de recuperación de Zn = $20.30 + 0.1857(\text{CuSO}_4) + 0.7549(\text{Z11}) - 0.001878(\text{CuSO}_4 * \text{Z11})$, representa la recuperación de Zn en función de la dosificación de reactivos CuSO_4 (5%) y Z-11, la cual presentó un coeficiente de correlación predictivo del 97.67%, tal y como se describe en la tabla 24.

Tabla 24

Coeficientes de correlación del modelo ajustado

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
1.3276	99.42%	98.98%	28.2004	97.67%	61.69	32.09

Nota: Elaborado con software Minitab 19

5.8. Flotación de Pb-Zn a 100% + 50 Malla

El material retenido en la malla 50 se redujo de tamaño en un molino de bolas para alimentar al proceso de flotación de Pb-Zn.

5.8.1. Etapa de Flotación de Pb

Previo a la flotación de Pb se flotó el carbón con petróleo teniendo en cuenta las pruebas realizadas de pretratamiento de flotación de carbón (100%-50 Malla), y posteriormente se evaluaron la dosificación de los depresores de Zn, y luego los colectores de Pb. Las condiciones operativas se detallan en la tabla 25.

Tabla 25

Condiciones de operación para la etapa de flotación de Pb

Parámetro	Valor
Peso mineral	1000 gramos
Granulometría	60.53 % - 200 Malla

% Sólidos	42%
Rpm	800 – 1200
Flujo de aire	10 lt/sg
pH	8.5
ZnSO ₄	Según diseño
NaCN	
Acondicionamiento depresores	15 minutos
AR-3418	50 g/TM
MIBC	80 g/TM
Acondicionamiento colectores	10 minutos
Tiempo de flotación Rougher	3 minutos
Tiempo de flotación Cleaner	0.5 minutos

Nota: Realizado en la UNMSM., E.P de Ingeniería Metalúrgica

5.8.1.1. Evaluación de Depresores de Zn

Con la finalidad de controlar el desplazamiento de Zn en el concentrado de Pb, se evaluaron las dosificaciones de los reactivos ZnSO₄(5%) y NaCN(1%), empleados como una mezcla en proporciones de 3 a 1, respectivamente. Se realizaron 4 pruebas de evaluación de depresores para dosificaciones de 200, 300, 400, y 500 g/TM de reactivo mezcla. La prueba más representativa alcanzó una recuperación de 95.89% de Pb con una ley de 56.21%, además, el concentrado reportó 2.13% de Zn, lo cual significó un desplazamiento de 1.88% de dicho metal en el concentrado de Pb. Los resultados de las pruebas metalúrgicas se detallan en las tablas 26, 27, 28 y 29.

Tabla 26

1° de flotación con una dosificación 200g/TM (ZnSO₄/NaCN)

Componentes	Peso	%	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	968.24	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Pb	44.13	4.56	42.67	13.44	22.56	194.48	61.26	102.82	76.57	7.13	50.85	-
Medio Pb	86.33	8.92	0.56	3.44	1.25	4.99	30.67	11.15	1.97	3.57	5.51	21.94
Relave final	837.78	86.53	0.63	8.87	1.02	54.51	767.49	88.26	21.46	89.30	43.64	-
Cabeza calculada			2.54	8.59	2.02	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC

Tabla 27*2° de flotación con una dosificación 300g/TM (ZnSO₄/NaCN)*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	971.44	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Pb	32.13	3.31	50.85	9.54	23.44	168.18	31.55	77.53	79.87	3.91	43.97	-
Medio Pb	70.87	7.30	1.89	2.14	1.53	13.79	15.61	11.16	6.55	1.93	6.33	30.23
Relave final	868.44	89.40	0.32	8.51	0.98	28.61	760.77	87.61	13.58	94.16	49.69	-
Cabeza calculada			2.11	8.08	1.76	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC**Tabla 28***3° de flotación con una dosificación 400g/TM (ZnSO₄/NaCN)*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	970.58	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Zn	36.41	3.75	56.21	2.13	21.45	210.86	7.99	80.47	88.58	0.98	48.23	-
Medio Zn	70.67	7.28	2.39	1.01	1.23	17.40	7.35	8.96	7.31	0.90	5.37	26.66
Relave final	863.5	88.97	0.11	9.02	0.87	9.79	802.49	77.40	4.11	98.12	46.40	-
Cabeza calculada			2.38	8.18	1.67	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC**Tabla 29***4° de flotación con una dosificación 500g/TM (ZnSO₄/NaCN)*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	967.42	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Zn	40.75	4.21	52.78	1.55	18.94	222.32	6.53	79.78	90.64	0.80	39.23	-
Medio Zn	77.01	7.96	1.56	0.68	0.85	12.42	5.41	6.77	5.06	0.67	3.33	23.74
Relave final	849.66	87.83	0.12	9.12	1.33	10.54	800.99	116.81	4.30	98.53	57.44	-
Cabeza calculada			2.45	8.13	2.03	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC

5.8.1.2. Evaluación de Colectores de Pb

Se elaboró un diseño experimental factorial de 2 factores, 2 niveles y 2 réplicas, para evaluar la contribución de los reactivos AR-3418 y espumante MIBC sobre la recuperación y calidad de Pb en el concentrado. Los valores de las variables se representan en la tabla 30, y la plantilla del diseño en la tabla 21, teniendo en cuenta que en el desarrollo de estas pruebas se dosificó 400 g/TM de reactivo mezcla $\text{ZnSO}_4/\text{NaCN}$, y se mantuvieron las otras variables de operación.

Tabla 30

Rango de variación de las variables

Variable	Valor mínimo	Valor máximo
AR-3418 (g/TM)	60	120
MIBC (g/TM)	50	100

Nota: Realizado en la UNMSM., E.P de Ingeniería Metalúrgica

Tabla 31

Orden de las pruebas de la flotación de Zn a 100% - 50 Malla

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	AR-3418(g/TM)	MIBC (g/TM)
1	1	1	1	60	50
2	2	1	1	120	50
3	3	1	1	60	100
4	4	1	1	120	100
5	5	1	1	60	50
6	6	1	1	120	50
7	7	1	1	60	100
8	8	1	1	120	100

Nota: Elaborado con software Minitab 19

5.8.1.3. Resultados de las Pruebas de Flotación de Pb

La mejor prueba de flotación de Pb empleo 60 g/TM de AR-3418, y 100 g/TM de MIBC, alcanzando una recuperación de 98.54% con una ley de 55.67% de Pb en el concentrado, valores que corresponden a la prueba de orden N°7. El total de los resultados se detallan en los balances metalúrgicos de las tablas del 32 al 39.

Tabla 32

1° de flotación de Pb

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	967.4	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Pb	32.54	3.36	50.44	2.13	30.23	169.66	7.16	101.68	83.10	0.83	50.57	
Medio Pb	75.73	7.83	0.89	0.85	1.24	6.97	6.65	9.71	3.41	0.77	4.83	29.73
Relave final	859.13	88.81	0.31	9.55	1.01	27.53	848.12	89.70	13.48	98.40	44.61	
Cabeza calculada			2.04	8.62	2.01	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC

Tabla 33

2° de flotación de Pb

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	967.55	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Pb	27.41	2.83	42.53	2.03	35.46	120.48	5.75	100.46	86.40	0.66	57.48	
Medio Pb	64.22	6.64	1.22	1.01	2.33	8.10	6.70	15.47	5.81	0.77	8.85	35.30
Relave final	875.92	90.53	0.12	9.54	0.65	10.86	863.65	58.84	7.79	98.58	33.67	
Cabeza calculada			1.39	8.76	1.75	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC

Tabla 34*3° de flotación de Pb*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	970.02	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Pb	30.87	3.18	57.61	2.41	30.14	183.34	7.67	95.92	84.02	0.87	59.93	-
Medio Pb	60.44	6.23	4.87	1.3	1.57	30.34	8.10	9.78	13.91	0.92	6.11	31.42
Relave final	878.71	90.59	0.05	9.57	0.6	4.53	866.92	54.35	2.08	98.21	33.96	-
Cabeza calculada			2.18	8.83	1.60	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC**Tabla 35***4° de flotación de Pb*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	968.74	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Pb	38.22	3.95	41.06	2.01	30.34	162.00	7.93	119.70	90.68	0.90	69.58	-
Medio Pb	78.51	8.10	0.97	0.63	1.03	7.86	5.11	8.35	4.40	0.58	4.15	25.35
Relave final	852.01	87.95	0.1	9.86	0.5	8.80	867.19	43.98	4.92	98.52	21.87	-
Cabeza calculada			1.79	8.80	1.72	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC**Tabla 36***5° de flotación de Pb*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	969.33	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Pb	32.54	3.36	48.57	1.95	32.54	163.05	6.55	109.24	82.29	0.74	52.34	-
Medio Pb	75.73	7.81	0.74	0.57	1.02	5.78	4.45	7.97	2.92	0.50	3.82	29.79
Relave final	861.06	88.83	0.33	9.87	1.03	29.31	876.76	91.50	14.79	98.76	43.84	-
Cabeza calculada			1.98	8.88	2.09	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC

Tabla 37*6° de flotación de Pb*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	970.01	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Pb	28.65	2.95	40.82	2.04	29.66	120.57	6.03	87.60	87.42	1.46	70.72	-
Medio Pb	60.32	6.22	0.95	0.96	1.54	5.91	5.97	9.58	4.28	1.45	7.73	33.86
Relave final	411.03	42.37	0.27	9.45	0.63	11.44	400.43	26.70	8.30	97.09	21.55	-
Cabeza calculada			1.38	4.12	1.24	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC**Tabla 38***7° de flotación de Pb*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	968.25	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Pb	32.44	3.35	55.67	2.13	32.64	186.52	7.14	109.36	91.38	1.70	76.84	-
Medio Pb	60.44	6.24	2.34	1.02	1.87	14.61	6.37	11.67	7.16	1.52	8.20	29.85
Relave final	412.12	42.56	0.07	9.55	0.5	2.98	406.48	21.28	1.46	96.78	14.95	-
Cabeza calculada			2.04	4.20	1.42	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC**Tabla 39***8° de flotación de Pb*

Componentes	Peso	% Peso	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	970.04	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Pb	42.25	4.36	41.78	2.01	30.34	181.97	8.75	132.15	91.83	1.00	71.68	-
Medio Pb	80.41	8.29	1.11	0.63	1.03	9.20	5.22	8.54	4.64	0.60	4.63	22.96
Relave final	847.38	87.36	0.08	9.86	0.5	6.99	861.32	43.68	3.53	98.40	23.69	-
Cabeza calculada			1.98	8.75	1.84	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC

5.8.1.4. Análisis de la Varianza para la Recuperación de Pb

El ANOVA de los valores de recuperación demostraron la mayor contribución del reactivo espumante MIBC, con un valor de 74.32%, así también la interacción de los reactivos determinó una contribución de 20.72%, tal y como se puede observar en la tabla 40.

Como resultado del desarrollo de las pruebas se obtuvo un modelo matemático que intenta predecir la recuperación de dicho metal, en función de la dosificación de AR-3418 y MIBC, la cual se representa en la ecuación de la recuperación de Pb = $58.86 + 0.2439(\text{AR-3418}) + 0.4182(\text{MIBC}) - 0.002848(\text{AR-3418} \cdot \text{MIBC})$, y presentó un coeficiente de correlación predictivo del 95.13%, tal y como se puede observar en la tabla 41.

Tabla 40

Varianza de las variables en la recuperación de Pb

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	174.092	98.78%	174.092	58.031	108.15	0
Lineal	2	137.584	78.07%	137.584	68.792	128.2	0
AR-3418	1	6.607	3.75%	6.607	6.607	12.31	0.025
MIBC	1	130.977	74.32%	130.977	130.977	244.09	0
Interacciones	1	36.509	20.72%	36.509	36.509	68.04	0.001
AR-3418*MIBC	1	36.509	20.72%	36.509	36.509	68.04	0.001
Error	4	2.146	1.22%	2.146	0.537		
Total	7	176.239	100.00%				

Nota: Elaborado con software Minitab 19

Tabla 41*Resumen del análisis de varianza en la recuperación de Pb*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
0.732521	98.78%	97.87%	8.5854	95.13%	52.18	22.57

Nota: Elaborado con software Minitab 19**5.8.1.5. Análisis de la Varianza para la Ley de Pb**

Con respecto a los valores de ley de Pb en los concentrados, el ANOVA determinó la mayor contribución de la dosificación de AR-3418 con un valor de 82.51%, además, la interacción de los reactivos representó una contribución de 8.48%, tal y como se puede observar en la tabla 42. Como resultado del análisis de la varianza de los resultados se ajustó la ecuación de la ley $Pb = 42.81 - 0.0073(AR-3418) + 0.2905(MIBC) - 0.002463(AR-3418 \cdot MIBC)$, que predice la ley de Pb en función de la dosificación de los reactivos estudiados, la cual presentó un coeficiente de correlación predictivo de 93.35%, tal y como se observa en la tabla 43.

Tabla 42*ANOVA para la ley de Pb*

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	316.625	98.34%	316.625	105.541	78.89	0.001
Lineal	2	289.318	89.86%	289.318	144.659	108.13	0
AR-3418	1	265.651	82.51%	265.651	265.651	198.56	0
MIBC	1	23.667	7.35%	23.667	23.667	17.69	0.014
Interacciones	1	27.306	8.48%	27.306	27.306	20.41	0.011
AR-3418*MIBC	1	27.306	8.48%	27.306	27.306	20.41	0.011
Error	4	5.351	1.66%	5.351	1.338		
Total	7	321.976	100.00%				

Nota: Elaborado con software Minitab 19

Tabla 43*Coeficientes de correlación del modelo para la ley de Pb*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
1.15667	98.34%	97.09%	21.406	93.35%	59.49	29.88

Nota: Elaborado con software Minitab 19**5.8.2. Etapa de Flotación de Zn**

La etapa de flotación de Zn se realizó bajo los parámetros de la mejor prueba de flotación a 100% - 50 Malla, tal y como se puede observar en la tabla 13, y los resultados de las pruebas determinaron una recuperación de 97.80% con una calidad de 55.11% de Zn, y se representa en el balance de la tabla 44.

Tabla 44*Balance de la etapa de flotación de Zn*

Componentes	Peso	%	Ley			Metálico			Recuperación (%)			Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	
Cabeza	1000.00	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conc. Zn	142.34	14.23	0.7	55.11	2.85	9.96	784.44	40.57	54.54	86.20	41.32	-
Medio Zn	210.55	21.06	0.21	5.01	0.8	4.42	105.49	16.84	24.20	11.59	17.16	7.03
Relave final	647.11	64.71	0.06	0.31	0.63	3.88	20.06	40.77	21.25	2.20	41.52	-
Cabeza calculada			0.18	9.10	0.98	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Ensayos químicos reportados por HyF Laboratorios SAC

CAPÍTULO VI: Discusión de Resultados

La microscopía óptica del mineral carbonáceo identificó la presencia de minerales sulfurados como gn, ef, py, apy y po, además logro identificar mineral de carbón antracítico y Ag nativa. La especie de Pb representó una distribución de 2.5 % con 95.21% de especies libres, la especie de Zn se identificó con una distribución porcentual del 6.09% y 82.29% de grados de liberación. La complejidad de la muestra se basa en la presencia de mineral de carbón tipo antracita, la cual actúa como un agente tensoactivo consumiendo más reactivos y dificultando la recuperación y calidad de los concentrados. El trabajo presentado por **Schwarse (2017)** presentó un tipo de mineral con presencia de carbón, convirtiéndose en una de las similitudes con respecto al presente trabajo, sin embargo; las principales diferencias radican en que el autor investigó un carbón tipo bitumen asociado a calcopirita, y realizó un tipo de caracterización con un equipo denominado Hi-Logger en la Universidad de Chile.

Con la finalidad de determinar el nivel de interferencia de la antracita en el proceso de flotación, se realizó una flotación directa exploratoria de una muestra representativa del lote, alcanzando una recuperación de 76.47% de Pb con una calidad en el concentrado de 35.62%, además de 82.83% de Zn con una calidad de 42.59%, reportando elevados consumos de reactivos en todas las etapas del proceso. Una de las principales dificultades se presentó debido al inminente desplazamiento de Zn en el concentrado de Pb, llegando a ser incontrolable por la granulometría muy fina que presentó posterior a la molienda. Por tal razón, se decidió evaluar la flotación de carbón a granulometrías de 100% - (35, 50, 70 y 100 Malla), determinado que la mejor prueba de flotación de antracita a 100% -- 50 Malla fue con 5 g/TM de MIBC, reportando 38.79 g de carbón y 0.43% de sulfuros totales a partir de 1000 g de mineral. La flotación de

carbón sigue la metodología planteada por **Quijandria & Aramburú (2016)**, sin embargo, el autor difiere en las condiciones de operación, trabajando con niveles de alcalinidad de 8, 9, y 10, además de un colector tipo Kerosene. En la actualidad, dicho reactivo combustible se encuentra prohibido y se usa por lo general un combustible diésel. En una primera fase exploratoria fue primordial empezar evaluando dicho colector diésel, sin embargo, las especies de Zn y Pb se arrastraban junto con el carbón en el colchón de espumas, luego de la flotación de carbón, se llevó a cabo la flotación de Zn, no teniendo en cuenta el Pb en esta etapa, dado que la inspección visual de la muestra demostró la presencia de solo algunos granos de galena. La etapa de flotación de Zn evaluó la contribución de los reactivos CuSO_4 (5%) y Z-11(1%) sobre la recuperación y calidad de Zn en el concentrado, determinando la mayor contribución del reactivo Xantato Z-11, y la mejor prueba que se realizó alcanzó una recuperación de 95.78% con una calidad de 51.94% de Zn. La principal diferencia con respecto al trabajo realizado por **Gamarra (2019)**, fue que dicho autor flotó un concentrado bulk Pb-Zn, y, por otro lado, la configuración de reactivos usadas para el bulk fue la misma que se usó en la flotación de Zn del presente trabajo, es decir, el autor evaluó la influencia de la dosificación de reactivos CuSO_4 y la mezcla de Z-11/Z-6, y solo teniendo en cuenta la recuperación de Zn, el autor obtuvo la mejor recuperación de 94%, valor más bajo que el reportado en el presente trabajo.

La evaluación de la fracción de gruesos del mineral de cabeza (% + 50 Malla) se realizó para recuperar valores de Pb y Zn, en el proceso de flotación selectiva de minerales polimetálicos. La fracción de gruesos se redujo de tamaño hasta una granulometría de 60.54 % - 200 Malla, teniendo en cuenta el test de moliendabilidad del mineral de cabeza. La etapa de flotación de Pb se llevó a cabo en 2 fases, en la primera se evaluó la dosificación necesaria para minimizar el desplazamiento de esfalerita en el concentrado,

para la cual se evaluó la dosificación de reactivo mezcla de ZnSO_4 y NaCN en valores de 200, 300, 400, y 500 g/TM, alcanzando el valor mínimo de desplazamiento para dosificaciones de 500 g/TM, sin embargo, los valores de 400 g/TM logró controlar el desplazamiento con valores similares con respecto a la recuperación y grado de Zn en el concentrado de Pb.

Una de las principales similitudes con respecto al trabajo realizado por **Vera (2019)**, fue que el autor empleo NaCN como depresor de minerales de Zn y fe, por otro lado, la diferencia radica en que nosotros empleamos reactivo mezcla, es decir que además de cianuro dosificamos sulfato de Zn como una mezcla en proporciones definidas.

Luego de haber definido la mejor dosificación para controlar el desplazamiento de Zn, se evaluó la dosificación del colector AR318, y MIBC elaborando un diseño experimental factorial de 2 factores, 2 niveles, y 2 réplicas, logrando 98.54 % de recuperación, con una ley de 55.67%, valores alcanzados con una dosificación de 60 g/TM de AR-3418 y 100 g/TM de MIBC (Prueba N°7). El análisis de la varianza de los valores de recuperación de Pb, determinaron la mayor contribución del reactivo MIBC con un valor de 66.43% de contribución, seguido de la dosificación de AR-3418 con un valor de 21.58, y, por último, la contribución de la interacción de los reactivos fue de 10.36%. Luego de la etapa de flotación de Pb, activamos Zn en la etapa de flotación de Zn con sulfato de cobre (5%), xantato Z-11 (1%) y espumante MIBC, para lo cual se tomó en cuenta los valores de reactivos empleados para optimizar la recuperación y calidad de Zn en el concentrado.

CONCLUSIONES

- La microscopía óptica identificó las principales especies mineralógicas del mineral de cabeza: gn, ef, ant, Ag, py, apy, po, gt y ggs. La galena (Pb) presentó un volumen del 2.56% y un 81.93% de especies libres, mientras que la esfalerita (Zn) tuvo un volumen del 13.88% y 95.33% de grados de liberación. La antracita ocupó un 1.88% del volumen con 93.44% de liberación.
- La flotación de carbón antracita (100% - 50 malla) alcanzó un peso de concentrado del 38.79% con 0.43% de sulfuros totales, utilizando 5 g/TM de reactivo, optimizando el pretratamiento previo a la flotación de Zn.
- La flotación de Zn en material libre de carbón logró una recuperación máxima del 95.78% y una calidad del 51.94% en el concentrado. Este resultado, correspondiente a la prueba N° 7 del diseño factorial, mostró la mayor influencia del xantato Z-11 en la recuperación (92.46% de contribución según ANOVA).
- La flotación selectiva de Pb-Zn permitió recuperar el 98.54% de Pb con una calidad del 55.67% en el concentrado, empleando reactivos en una granulometría del 60.53% - 200 malla y un pH de 8.5.
- La etapa final de flotación de Zn alcanzó una recuperación del 97.80% y una calidad del 55.11% de Zn en el concentrado, utilizando las mismas condiciones de flotación a 100% - 50 malla.
- En conjunto, se logró una recuperación total del 96.21% para el Pb y del 91.62% para el Zn, cumpliendo los objetivos de recuperación mediante flotación en minerales sulfurados con contenido de carbón.
- La remoción de carbón antracita en la etapa previa reduce significativamente los costos operativos relacionados con el consumo de reactivos y tiempo de flotación,

aumentando la eficiencia general del proceso y mejorando la calidad de los concentrados de Pb y Zn.

- La investigación evidencia que la eliminación del carbón en minerales sulfurados podría generar beneficios económicos en proyectos futuros, al evitar penalizaciones por impurezas en los concentrados, reducir pérdidas de metal valioso y asegurar productos de mayor calidad comercial, mejorando la rentabilidad del proceso.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere evaluar diferentes tipos de colectores para flotar material carbonáceo, priorizando la posibilidad de obtener un carbón de calidad comercial con bajo contenido de azufre.
- Se recomienda explorar la viabilidad de realizar pruebas de ciclo cerrado, en las que los relaves de flotación de Zn a 100% - 50 malla sean alimentados a la etapa de flotación de Pb en la fracción del mineral de cabeza a 100% + 50 malla.
- Se propone realizar un análisis de malla valorada para analizar la distribución de antracita, galena y esfalerita en función del tamaño de partícula, y su impacto en el proceso de flotación.
- Se considera importante llevar a cabo una microscopia electrónica del mineral de cabeza para caracterizar con mayor precisión las gangas y su posible interferencia en las diferentes etapas de flotación.
- Se sugiere incluir un análisis detallado de costos y beneficios en futuros trabajos, considerando cómo la remoción de carbón impacta en la reducción de costos operativos, penalizaciones y mejoras en la calidad de los concentrados, con el objetivo de justificar la implementación industrial del proceso.
- Se sugiere realizar una evaluación económica basada en los resultados más prometedores de recuperación y calidad de los concentrados, para determinar la viabilidad financiera del proyecto.
- Se recomienda investigar alternativas al cianuro de sodio como reactivo, considerando opciones más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, que puedan mantener o mejorar la eficiencia del proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asillo, C. (2022). *Evaluación de un circuito de recuperación de plomo y zinc mediante gravimetría y flotación*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Bachmann, J., Guggenberger, G., Baumgartl, T., Ellerbrock, R., Urbanek, E., Goebel, M., Kaiser, K., Horn, R., & Fischer, W. (2008). Physical carbon-sequestration mechanisms under special consideration of soil wettability†. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(1), 14-26. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700054>
- Chumbes, G. (2019). *Flotación del Zn marmatítica con alto contenido de pirrotita*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho. <http://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/UNJFSC/3776/tesis%20de%20chumbes%20diaz%20OK.pdf?sequence=1>
- Dana, C. (1986). *Manual de Mineralogía* (4ta ed.). Madrid: Editorial Reverte.
- De la Rosa, J. (2013). *Flotación selectiva de minerales sulfuros de plomo-zinc en presencia de reactivos naturales del tipo Quebracho*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Díaz, M., Blas, S., Gonzales, S., Damián, N., & Giraldo, U. (2023). Variación de la concentración de metales pesados por precipitaciones y avenidas en la cuenca del río Rímac, Lima-Perú. *21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 1-11. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.1061>
- Dirección de Promoción Minera. (2023). *Boletín Estadístico Minero, Edición N° 12*. Boletín, Ministerio de Energía y Minas, Lima.

- 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/10.1016/j.cis.2013.02.003>
- Espinoza, L., Iriarte, G., Espinoza, L., Gutarra, R., Herrera, M., Zamalloa, J., Aramburú, V., & Torres, J. (2021). Importancia de la mineralogía en la geometalurgia: aplicación en Perú. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 24(48), 85-100. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21707>
- Gamarra, H. (2019). *Flotación bulk de minerales sulfurados de plomo – zinc refractarios de bajo grado en la Planta Concentradora de Huari de la UNCP*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Giraldo, M., & Blas, W. (2007). Minería actual del carbon en el norte del Peru. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 10(20), 76-81. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v10i20.497>
- Hu, Y., Wu, M., Liu, R., & Sun, W. (2020). A review on the electrochemistry of galena flotation. *Minerals Engineering*, 150(106272). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106272>
- Melgarejo, J., Provenza, J., Galí, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222010000100002&lng=es&tlng=es.
- Parekh, B. (2000). *Coal Flotation*. Encyclopedia of Separation Science. <https://doi.org/10.1016/B0-12-226770-2/05801-4>

- Pérez, R. (2012). *Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Piñeres, J., Barraza, J., García, E., & Sandoval, S. (2018). Evaluación de la flotación de lodos finos de carbón usando análisis reléase. *Ingeniería y Competitividad*, 20(1), 75-81. <https://doi.org/10.25100/iyv.v20i1>
- Quijandría, J., & Aramburú, V. (2016). Evaluación del carbón mineral para disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 19(38), 61-66. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v19i38.13569>
- Ralston, J. (1994). The chemistry of galena flotation: Principles & practice. *Minerals Engineering*, 7(5-6), 715-735. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(94\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0892-6875(94)90102-3)
- Ramos, J., & Orihuela, A. (2017). *Caracterización y evaluación de pruebas metalúrgicas de flotación de un mineral complejo polimetálico del distrito de Palca - Huancavelica*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Rao, S., Yang, T., Zhang, D., Liu, W., Chen, L., Hao, Z., Xiao, Q., & Wen, J. (2015). Leaching of low grade zinc oxide ores in NH_4Cl - NH_3 solutions with nitrilotriacetic acid as complexing agents. *Hydrometallurgy*, 158, 101-106. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.10.013>
- Rodríguez, K. (2016). *Evaluación de la flotación de zinc en la planta concentradora Austria Duvaz S.A.* Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Schwarse, J. (2017). *Pretratamiento de mineral bituminoso de cobre previo a flotación*. Tesis de maestría, Universidad de Chile, Santiago.

- Speight, J. (2005). *Handbook of Coal Analysis* (Vol. 166). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Taya, W. (2018). *Optimización de la flotación polimetálica en la planta concentradora Mallay*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2005). *Informe de gestión*. Informe, Ministerio de Minas y Energía de la República de Colombia, Medellín.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2012). *Cadena del Carbón*. Colombia: Ministerio de Minas y Energía.
- Vera, C. (2019). *Evaluación del efecto de nuevos reactivos colectores y depresores para mejorar la recuperación del proceso de flotación en los circuitos de plomo y zinc de la planta concentradora Antonio Raymondi*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Vila, C. (2011). *Estudio del efecto del pH sobre el potencial de la pulpa y flotación de minerales sulfurados en la planta concentradora Chumpe de la CIA. Minera Corona S.A.* Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Xin, M., Liuyin, X., Shuai, W., Hong, Z., & Hui, J. (2017). Structural Modification of Xanthate Collectors To Enhance the Flotation Selectivity of Chalcopyrite. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56, 6307-6316. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b04566>

ANEXOS

ANEXO 1

Matriz de consistencia

"RECUPERACIÓN DE Pb – Zn DE MINERALES SULFURADOS CON CONTENIDO DE CARBÓN MEDIANTE PROCESO DE FLOTACIÓN" EN SAN MATEO – LIMA				
Problema general	Objetivo general	Hipótesis		
		Hipótesis general	Variables de la hipótesis general	
			Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿De qué manera podemos recuperar Pb-Zn mediante el proceso de flotación de minerales sulfurados con contenido de carbón en la provincia de San Mateo - Lima?	Recuperar Pb y Zn mediante el proceso de flotación de minerales sulfurados con contenido de carbón en la provincia de San Mateo-Lima.	El proceso de flotación permitirá la recuperación eficiente de Pb y Zn a partir de minerales sulfurados con contenido de carbón en la provincia de San Mateo-Lima.	Granulometría del mineral Dosificación de reactivos	El tamaño de partícula se reporta en micras, y se calcula con un juego de mallas de distintas aberturas Esta variable se reporta en g/TM, y se mide con la ayuda de una micropipeta.
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 se podría determinar las especies minerales, distribución volumétrica, grados de liberación y enlaces presentes, en materiales sulfurados con contenido de carbón, en la provincia de San Mateo?	Caracterizar la muestra de mineral sulfurado con contenido de carbón determinando las especies mineralógicas presentes, su distribución volumétrica, grados de liberación y enlaces mineralógicos en la provincia de San Mateo-Lima.	La caracterización de la muestra mineral sulfurado con contenido de carbón permitirá determinar las especies de minerales involucradas, distribución volumétrica, grados de liberación y enlaces presentes, en la provincia de San Mateo.	Especies y enlaces presentes Distribución volumétrica Grados de liberación	Se identifican en el microscopio óptico de luz reflejada Distribución de las especies de minerales en porcentaje. Estos datos se observan en el microscopio y se reportan en micrómetros (µm).
Problema específico N°2	Objetivo específico N°2	Hipótesis específica N°2	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿De qué manera se puede concentrar carbón mediante el proceso de flotación de minerales polimetálicos en San Mateo?	Concentrar carbón mediante el proceso de flotación de minerales polimetálicos en San Mateo en una primera etapa.	El proceso de flotación permitirá la concentración del carbón de los minerales polimetálicos sulfurados en la provincia de San Mateo.	Granulometría Dosificación de reactivo diésel	El tamaño de partícula se reporta en micras, y se calcula con un juego de mallas. Esta variable se reporta en g/TM, y se mide con la ayuda de una micropipeta.
Problema específico N°3	Objetivo específico N°3	Hipótesis específica N°3	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿Cómo se puede recuperar Pb-Zn de los relaves de la primera etapa, empleando el proceso de flotación?	Recuperar plomo y zinc a partir de los relaves de la primera etapa mediante flotación selectiva.	El proceso de flotación de los relaves obtenidos en la primera etapa incrementará la recuperación de plomo y zinc.	Dosificación de ZnSO ₄ Dosificación de AR-3418	Esta variable se reporta en g/TM, y se mide con la ayuda de una micropipeta. Esta variable se reporta en g/TM, y se mide con la ayuda de una micropipeta.

ANEXO 2

Reporte del análisis químico 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 : CRISTHIAN DURÁN
Tipo de Muestra : Mineral
Procedencia :
Fecha de Recepción : 03 de marzo del 2024
Referencia : H&F 158 /2024

DENOMINACIÓN DE MUESTRA:	RESULTADOS DE ANÁLISIS			
	Pb	Zn	TCM	Ag
	%	%	%	Oz/TC
Mineral carbonáceo	1.67	8.94	4.57	1.68

Lima, 15 de marzo del 2024

H&F LABORATORIOS SAC
SERVICIOS ANALITICOS

ALVARO HUAYTALLA M.
GERENTE GENERAL

ANEXO 3

Fotos tomadas durante las pruebas de flotación exploratoria, en el laboratorio de UNMSM



FOTO

Nº1 Primera parte del cuarteo



FOTO

Nº2 Segunda parte del cuarteo



FOTO

Nº3 Aplicación de los reactivos y agua en la flotación



FOTO

Nº4 Flotación del mineral