



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

**Diseño para la recuperación de zinc en minerales
sulfurados de alta ley mediante el proceso de flotación en
el departamento de Ancash**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTORES

José Alberto VILELA CARHUAVILCA

Oscar Andres LÓPEZ AREVALO

ASESOR

Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2023



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

Vilela, J. & López, O. (2023). *Diseño para la recuperación de zinc en minerales sulfurados de alta ley mediante el proceso de flotación en el departamento de Ancash*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	José Alberto Vilela Carhuavilca
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	76790590
URL de ORCID	-
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Oscar Andres López Arevalo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	74974524
URL de ORCID	-
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	Daniel Florencio Lovera Dávila
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06450640
Miembro del jurado 1	

Nombres y apellidos	Luis Americo Rivera Del Valle
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10647742
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Manuel Leonardo Cabrera Sandoval
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07770007
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.17. Flotación de Minerales
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Universidad Nacional Mayor de San Marcos Edificio: Ingeniería Metalúrgica- Laboratorio Metalúrgico País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Código postal: 15081 Latitud: -12.060588908759044 Longitud: -77.08411378869394
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2021 – Agosto 2023
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 Ingeniería de procesos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02



«Año de la unidad, la paz y el desarrollo»

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

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el jueves 03 del mes de Agosto del 2023, siendo las 20:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO, Lovera Dávila
Mg. LUIS AMÉRICO, Rivera del Valle
Ing. MANUEL LEONARDO, Cabrera Sandoval

(PRESIDENTE)
(MIEMBRO)
(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA titulada «DISEÑO PARA LA RECUPERACIÓN DE ZINC EN MINERALES SULFURADOS DE ALTA LEY MEDIANTE EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN EL DEPARTAMENTO DE ANCASH» presentada por Don: JOSÉ ALBERTO VILELA CARHUAVILCA 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 preguntas pertinentes, que fueron absueltas a:

.....SATISFACCIÓN.....

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

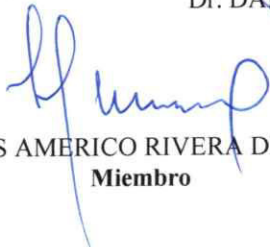
Diecisiete (17) aprobado con mención honrosa

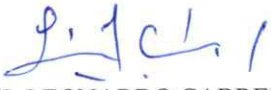
Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis Mancomunada por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **José Alberto Vilela Carhuavilca**.

Siendo las...*20:46*...horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis Mancomunada, firmadas por el Jurado Calificador

Lima, 03 de Agosto del 2023


Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente


Mg. LUIS AMÉRICO RIVERA DEL VALLE
Miembro


Ing. MANUEL LEONARDO CABRERA SANDOVAL
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

«Año de la unidad, la paz y el desarrollo»

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

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el jueves 03 del mes de Agosto del 2023, siendo las 20:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO, Lovera Dávila
Mg. LUIS AMÉRICO, Rivera del Valle
Ing. MANUEL LEONARDO, Cabrera Sandoval

(PRESIDENTE)
(MIEMBRO)
(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA titulada «**DISEÑO PARA LA RECUPERACIÓN DE ZINC EN MINERALES SULFURADOS DE ALTA LEY MEDIANTE EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN EL DEPARTAMENTO DE ANCASH**» presentada por Don: OSCAR ANDRES LÓPEZ AREVALO 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 preguntas pertinentes, que fueron absueltas a:

.....**SATISFACCIÓN**.....

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

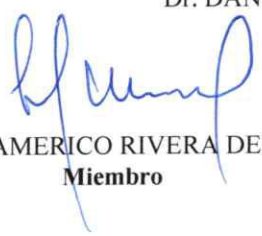
Diecisiete (17), aprobado con mención honrosa

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

Siendo las.....*20:46*.....horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis Mancomunada, firmadas por el Jurado Calificador

Lima, 03 de Agosto del 2023


Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente


Mg. LUIS AMÉRICO RIVERA DEL VALLE
Miembro


Ing. MANUEL LEONARDO CABRERA SANDOVAL
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

Anexo 2
Informe de Evaluación de Originalidad

- 1. FACULTAD**
Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
- 2. ESCUELA**
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica
- 3. AUTORIDAD ACÁDEMICA QUE EMITE EL INFORME DE ORIGINALIDAD**
Director de E.P. de Ingeniería Metalúrgica
- 4. APELLIDOS y NOMBRES DE LA AUTORIDAD ACADÉMICA**
Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR
- 5. OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES**
Sra. CAROLINA BETSABE CARREÑO RIOS
- 6. DOCUMENTO EVALUADO:**
Tesis Mancomunada para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, titulada: «DISEÑO PARA LA RECUPERACIÓN DE ZINC EN MINERALES SULFURADOS DE ALTA LEY MEDIANTE EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN EL DEPARTAMENTO DE ANCASH»
- 7. AUTOR DEL DOCUMENTO:**
Bach. JOSÉ ALBERTO VILELA CARHUAVILCA
- 8. FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO EN LA DIRECCIÓN EP:**
25/07/2022
- 9. FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:**
25/07/2022
- 10. SOFTWARE UTILIZADO**
Turnitin
- 11. CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES**
 - ✓ Excluye textos entrecomillados
 - ✓ Excluye fuentes para buscar similitud
 - ✓ Excluye Bibliografía
 - ✓ Excluye cadenas menores a 40 palabras
- 12. PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES (5%)**
- 13. FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS**

- 14. OBSERVACIONES**
Ninguna
- 15. CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD**
Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones
- 16. FECHA DEL INFORME**
Lima, 18 de agosto del 2022



Firmado digitalmente por ORIHUELA
SALAZAR Luis Alfredo FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 18.08.2022 21:01:17 -05:00

Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR
DIRECTOR
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



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

Anexo 2
Informe de Evaluación de Originalidad

- 1. FACULTAD**
Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
- 2. ESCUELA**
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica
- 3. AUTORIDAD ACÁDEMICA QUE EMITE EL INFORME DE ORIGINALIDAD**
Director de E.P. de Ingeniería Metalúrgica
- 4. APELLIDOS y NOMBRES DE LA AUTORIDAD ACADÉMICA**
Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR
- 5. OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES**
Sra. CAROLINA BETSABE CARREÑO RIOS
- 6. DOCUMENTO EVALUADO:**
Tesis Mancomunada para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, titulada: «DISEÑO PARA LA RECUPERACIÓN DE ZINC EN MINERALES SULFURADOS DE ALTA LEY MEDIANTE EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN EL DEPARTAMENTO DE ANCASH»
- 7. AUTOR DEL DOCUMENTO:**
Bach. OSCAR ANDRES LÓPEZ AREVALO
- 8. FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO EN LA DIRECCIÓN EP:**
25/07/2022
- 9. FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:**
25/07/2022
- 10. SOFTWARE UTILIZADO**
Turnitin
- 11. CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES**
 - ✓ Excluye textos entrecomillados
 - ✓ Excluye fuentes para buscar similitud
 - ✓ Excluye Bibliografía
 - ✓ Excluye cadenas menores a 40 palabras
- 12. PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES (5%)**
- 13. FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS**

- 14. OBSERVACIONES**
Ninguna
- 15. CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD**
Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones
- 16. FECHA DEL INFORME**
Lima, 18 de agosto del 2022



UNMSM

Firmado digitalmente por ORIHUELA
SALAZAR Luis Alfredo FAU
20148092262.soti
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 18.08.2022 21:00:36 -05:00

Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR
DIRECTOR
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

INDICE

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
2.1. Descripción del Problemática	2
2.2. Problema Fundamental	2
2.2.1. Problema General.....	2
2.2.2. Problemas Específicos	3
2.3. Justificación de la Investigación	3
2.3.1. Justificación Tecnológica.....	3
2.4. Objetivos	4
2.4.1. Objetivos Generales	4
2.4.2. Objetivos Específicos.....	4
2.5. Hipótesis y Variables	4
2.5.1. Hipótesis General.....	4
2.5.2. Hipótesis Específicas	4
2.5.3. Identificación de Variables	5
2.5.4. Operacionalización de Variables	6
CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO.....	7
3.1. Antecedentes	7
3.2. Marco Teórico.....	9
3.2.1. Ubicación de Ancash	9
3.2.1.1. Etimología de la Palabra Ancash	9
3.2.1.2. Ubicación Geográfica.....	9
3.2.1.3. Accesibilidad	11

3.2.2.	Historia Del Zinc.....	11
3.2.3.	Zinc en la Naturaleza	12
3.2.4.	Propiedades del Zinc.....	13
3.2.4.1.	Propiedades Físicas del Zinc	13
3.2.4.2.	Propiedades Químicas del Zinc.....	13
3.2.5.	Principales Minerales de Zinc.....	14
3.2.6.	Flotación de Minerales.....	16
3.2.6.1.	Variables de la Flotación de Minerales	17
3.2.6.2.	Flotación de Minerales de Zinc.....	18
3.2.7.	Diseños Experimentales Factoriales	19
3.2.8.	Usos y Aplicaciones del Zinc Metálico	19
3.2.9.	Producción de Zinc a Nivel Nacional	20
3.2.9.1.	Producción Minero Metálica Nacional	20
3.2.9.1.1.	Producción Metálica del Zinc en Perú	20
3.2.9.1.2.	Producción de Zinc en el Perú por Empresas.....	21
3.2.9.1.3.	Producción de Zinc Peruana a Nivel Regional.....	22
CAPÍTULO IV METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN Y MINERALOGÍA DE LA MUESTRA		24
4.1.	Tipo y Diseño de Investigación	24
4.2.	Unidad de Análisis.....	25
4.3.	Población de Estudio.....	25
4.4.	Tamaño de Muestra.....	25
4.5.	Selección de Muestra	25
4.6.	Procedimiento Metodológico de la Investigación.....	26
4.7.	Análisis Mineralógico de la Investigación.....	27

4.7.1.	Interpretación Mineralógica.....	27
4.7.2.	Distribución Volumétrica y Grados de Liberación.....	28
4.7.3.	Interpretación del Grado de Liberación para los Minerales que han Intervenido en el Análisis Modal	28
CAPÍTULO V PRUEBAS EXPERIMENTALES.....		35
5.1.	Pruebas de Moliendabilidad del Mineral	35
5.2.	Pruebas de Flotación de Zinc del Mineral de Cabeza.....	36
5.3.	Análisis Químico del Mineral de Cabeza	37
5.4.	Elaboración del Diseño Factorial.....	37
5.5.	Desarrollo del Diseño Factorial	38
5.5.1.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 1 ..	39
5.5.2.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 2 ..	39
5.5.3.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 3 ..	40
5.5.4.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 4 ..	40
5.5.5.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 5 ..	40
5.5.6.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 6 ..	41
5.5.7.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 7 ..	41
5.5.8.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 8 ..	41
5.5.9.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 9 ..	42
5.5.10.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 10	42
5.5.11.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 11	42
5.5.12.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 12	43

5.5.13.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 13	43
5.1.14.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 14	43
5.1.15.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 15	44
5.1.16.	Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 16	44
5.6.	ANOVA para la Recuperación de Zinc	44
5.7.	Ecuación de Regresión para la Recuperación de Zinc en Unidades No Codificadas	46
5.8.	ANOVA para el Grado de Zinc	46
5.9.	Ecuación de Regresión para el Grado de Zinc en Unidades No Codificadas ..	48
CAPÍTULO VI DISCUSION DE RESULTADOS		49
CAPÍTULO VII CONCLUSIONES		51
CAPÍTULO VIII RECOMENDACIONES		53
CAPÍTULO IX REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		54
ANEXOS		57

DEDICATORIA

La elaboración y el desarrollo del siguiente proyecto de investigación se lo dedicamos a nuestro único Dios, quién nos colmó de sabiduría e inteligencia a lo largo de toda nuestra carrera, a nuestras familias por su respaldo en cada etapa de la investigación, motivándonos constantemente para seguir adelante, a pesar de buenos y malos momentos. Gracias totales.

AGRADECIMIENTO

Un especial agradecimiento a nuestro asesor el doctor Vidal Sixto Aramburú Rojas y a cada uno de los docentes de la decana de América que nos guiaron en cada etapa de la investigación, a nuestros compañeros de aula que se vieron involucrados en el desarrollo de las pruebas metalúrgicas y contribuyeron con sus conocimientos para hacer este proyecto una realidad.

RESUMEN

El desarrollo del siguiente proyecto de investigación se ejecutó con un mineral sulfurado de alta ley en zinc del departamento de Ancash, el cual se preparó mecánicamente en una chancadora primaria a nivel de laboratorio hasta obtener un producto 100% - 10 Malla, para luego determinar la curva de moliendabilidad que indicó una granulometría de 65% - 200 Malla en 12 minutos. La caracterización mineralógica evidenció la presencia de esfalerita, calcopirita, pirita, arsenopirita, magnetita, rutilo, goethita y gangas; la ley de cabeza en zinc es de 18.51%.

Como resultado de la caracterización se concluyó elaborar un diseño de experimentos tipo factorial con dos niveles, tres factores y dos réplicas para evaluar las variables independientes que contribuyen con la calidad del concentrado de zinc. Como variables independientes se decidió evaluar la influencia de la dosificación de reactivos: sulfato de cobre (5%), xantato Z-6 (1%) y MIBC. El ANOVA para la recuperación de zinc determinó que el MIBC es el reactivo de más influencia en la recuperación de estos concentrados y la interacción de dos o tres reactivos no representa ninguna influencia sobre esta variable, con un coeficiente de determinación del 98.95%, lo cual indica la confiabilidad del modelo. Así mismo se evaluó el ANOVA para el grado de zinc y también se concluyó que el MIBC es el reactivo de mayor contribución en la calidad del concentrado, con un coeficiente de determinación del 89.59%. La mejor prueba de flotación alcanzó una recuperación de 98.17% de zinc, con una calidad del concentrado de 41.23%, y una ratio de 3.69.

ABSTRACT

The development of the following research project was carried out with a high-grade zinc sulphide mineral from the department of Ancash, which was mechanically prepared in a primary crusher at laboratory level until a 100% - 10 Mesh product was obtained, to later determine the grindability curve that indicated a granulometry of 65% - 200 Mesh in 12 minutes. The mineralogical characterization evidenced the presence of sphalerite, chalcopyrite, pyrite, arsenopyrite, magnetite, rutile, goethite and gangue; the zinc head grade is 18.51%.

As a result of the characterization, it was concluded to develop a factorial type experiment design with two levels, three factors and two replicates to evaluate the independent variables that contribute to the quality of the zinc concentrate. As independent variables, it was decided to evaluate the influence of the dosage of reagents: copper sulfate (5%), xanthate Z-6 (1%) and MIBC. The ANOVA for zinc recovery determined that MIBC is the most influential reagent in the recovery of these concentrates and the interaction of two or three reagents does not represent any influence on this variable, with a coefficient of determination of 98.95%, which indicates the reliability of the model. Likewise, the ANOVA for the degree of zinc was evaluated and it was also concluded that the MIBC is the reagent with the greatest contribution to the quality of the concentrate, with a coefficient of determination of 89.59%.

The best flotation test reached a recovery of 98.17% of zinc, with a concentrate quality of 41.23%, and a ratio of 3.69.

NOMENCLATURA

%	Porcentaje
pH	Potencial de Hidrógeno
L/S	Relación líquido-sólido
RPM	Revoluciones por minuto
L/min	Litro por minuto
lb/TM	Libra por tonelada métrica
km ²	Kilómetro cuadrado
° , ' , ''	Latitud (grados, minutos, segundos)
m	Metro
km	Kilómetro
°C	Grados centígrados
mg/km ³	Miligramo por kilómetro cúbico
TM	Toneladas métricas
g/mol	Gramo por mol
g/ml	Gramo por milímetro
°K	Kelvin
kJ/mol	Kilojulio por mol
atm	Atmósfera
m/s	Metro por segundo
Å	Radio iónico / Radio atómico
eV	Electronvoltio
hrs	Horas
min	Minuto

Kg	Kilogramo
g	Gramo
g/TM	Gramo por tonelada métrica
GL	Grados de libertad
SC	Suma de cuadrados
MC	Media de cuadrados
EE	Error estándar
FIV	Factor de inflación de la varianza
S	Desviación estándar
R^2	Coeficiente de determinación

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Rutas de acceso a Ancash	11
Tabla 2 Propiedades físicas del zinc	13
Tabla 3 Propiedades químicas del zinc	14
Tabla 4 Minerales de zinc	14
Tabla 5 Producción metálica de enero 2021-2022.....	21
Tabla 6 Exportaciones de productos mineros	23
Tabla 7 Minerales identificados en el microscopio	27
Tabla 8 Minerales identificados en el microscopio	28
Tabla 9 Volúmenes y grados de liberación en los minerales observados.....	30
Tabla 10 Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa.....	31
Tabla 11 Tiempo de molienda y granulometría del mineral	35
Tabla 12 Condiciones estándar de las pruebas metalúrgicas	37
Tabla 13 Ensayos químicos del mineral de cabeza.....	37
Tabla 14 Valores de las variables independientes del proceso de flotación	38
Tabla 15 Elaboración del diseño factorial, 2 niveles, 3 factores.....	38
Tabla 16 Resultado para orden de corrida 1	39
Tabla 17 Resultado para orden de corrida 2	39
Tabla 18 Resultado para orden de corrida 3	40
Tabla 19 Resultado para orden de corrida 4	40
Tabla 20 Resultado para orden de corrida 5	40
Tabla 21 Resultado para orden de corrida 6	41
Tabla 22 Resultado para orden de corrida 7	41

Tabla 23 Resultado para orden de corrida 8	41
Tabla 24 Resultado para orden de corrida 9	42
Tabla 25 Resultado para orden de corrida 10	42
Tabla 26 Resultado para orden de corrida 11	42
Tabla 27 Resultado para orden de corrida 12	43
Tabla 28 Resultado para orden de corrida 13	43
Tabla 29 Resultado para orden de corrida 14	43
Tabla 30 Resultado para orden de corrida 15	44
Tabla 31 Resultado para orden de corrida 16	44
Tabla 32 ANOVA respecto a la recuperación de zinc	45
Tabla 33 Resumen del modelo de la recuperación de zinc	45
Tabla 34 Coeficientes de codificación de la recuperación de zinc	45
Tabla 35 ANOVA para el grado de zinc	47
Tabla 36 Resumen del modelo del grado de zinc	47
Tabla 37 Coeficientes de codificación del grado de zinc.....	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ángulo de contacto de las tres fases (aire-agua-sólido)	10
Figura 2 Proceso productivo de zinc metálico	15
Figura 3 Principales usos finales del zinc	20
Figura 4 Producción de zinc peruana por cada empresa	22
Figura 5 Apy – cp – GGs, como partículas libres; partículas entrelazadas de ef – cp	31
Figura 6 Ef – cp – GGs, como partículas libres	32
Figura 7 Apy – py – cp – GGs, como partículas libres	32
Figura 8 Ef – py – GGs, como partículas libres; partículas entrelazadas de cp – apy	33
Figura 9 Py – ef – cp – rt – GGs, como partículas libres	33
Figura 10 Py – cp – GGs, como partículas libres; partículas entrelazadas de cp – ef	34
Figura 11 Curva de moliendabilidad	36
Figura 12 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de la recuperación de Zn	46
Figura 13 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados del grado de Zn	48
Figura 14 Gráfica de efectos principales para la recuperación de Zn	49
Figura 15 Gráfica de efectos principales para el grado de Zn	50

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Según el boletín estadístico minero del MINEM, en el cierre del año del 2020, Perú lideró la producción de zinc en Latinoamérica y se posicionó como tercer principal productor en el mundo.

Así mismo la UPME describe al zinc como el cuarto metal más consumido a nivel mundial, y como fuente principal de extracción, a la esfalerita.

El beneficio de minerales sulfurados de zinc en el departamento de Ancash es bastante prometedor en relación con las reservas que se tiene de este mineral. Los pequeños productores mineros por lo general son los que explotan y procesan minerales de alta ley, que al momento de ser procesados generalmente tiene que ser blendeados con lotes de minerales marginales lo que genera indirectamente un problema en el procesamiento con respecto a la recuperación y la calidad de concentrados que se desean obtener, ya que estos lotes de los minerales marginales aportan especies contaminantes que perjudican el proceso. El hecho de no caracterizar las especies que se van a blendear en un proceso no planificado conlleva muchas veces a obtener grandes pérdidas económicas para el pequeño productor minero.

De los escenarios anteriormente descritos es que surge la necesidad de estudiar las distintas características de las especies sulfuradas de zinc, y su comportamiento frente al procesamiento de estos minerales, por flotación, en la región de mayor producción a nivel nacional, con la finalidad de darle viabilidad a la producción de este metal, a partir de minerales de alta ley.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Descripción del Problemática

La flotación de minerales de alta ley de zinc no se realiza debido a que la mayoría de los circuitos en pequeña minería generan muchas pérdidas de contenido metálico durante su procesamiento. Generalmente estos lotes de alta ley tienen que ser blendeados con lotes de baja ley para que puedan ser procesados. El pequeño productor minero tiene que esperar que llegue un lote de baja ley y muchas veces se blendea con minerales que perjudican la recuperación. El problema de la presente investigación son las altas pérdidas de contenido metálico de zinc en el procesamiento por flotación de minerales sulfurados de alta ley en el departamento de Ancash.

2.2. Problema Fundamental

La problemática que se abordó para desarrollar el siguiente proyecto de investigación, tiene fundamento que para el proceso de flotación de especies sulfuradas de alta ley para los pequeños mineros presentan bajas recuperaciones y calidades de concentrados no comerciales. Por ello, se hace necesario evaluar las variables independientes de dosificación de reactivos y desarrollar un modelo que sirva como base para controlar el procesamiento de estas especies, por flotación, con la finalidad de reducir las pérdidas económicas por las bajas recuperaciones y calidades de concentrado pobres en zinc.

2.2.1. Problema General

- ¿Cómo diseñar la recuperación de zinc en el procesamiento de minerales sulfurados de alta ley mediante el proceso de flotación en el departamento de Ancash?

2.2.2. Problemas Específicos

- ¿De qué manera determinaremos las especies de minerales, volumen porcentual, grados de liberación y enlaces presentes en las muestras sulfuradas de alta ley de zinc en el departamento de Ancash?
- ¿De qué forma podría diseñarse la recuperación de zinc mediante el procesamiento de especies sulfuradas de alta ley, por flotación, en el departamento de Ancash?
- ¿Cómo interpretar y analizar los resultados reportados en laboratorio mediante las pruebas metalúrgicas de flotación de minerales sulfurados de alta ley en el departamento de Ancash?

2.3. Justificación de la Investigación

La justificación del siguiente proyecto de investigación es mostrar un procedimiento metalúrgico, en base a la mineralogía de tales minerales sulfurados de alta ley, del departamento de Ancash, en base a la dosificación de reactivos de flotación, para obtener recuperaciones y calidades de concentrados aceptables.

2.3.1. Justificación Tecnológica

La justificación tecnológica del siguiente proyecto de investigación sustenta que la evaluación del consumo de los reactivos empleados en la flotación de especies sulfuradas de alta ley en zinc permitirá obtener recuperaciones y calidades de concentrados aceptables para un proceso de comercialización, generando un incremento en la rentabilidad del proceso, por la mejora en el beneficio de estos yacimientos, en el departamento de Ancash.

2.4. Objetivos

2.4.1. *Objetivos Generales*

- Diseñar la recuperación de zinc en especies sulfuradas de alta ley mediante el proceso de flotación en el departamento de Ancash.

2.4.2. *Objetivos Específicos*

- Determinar las especies de minerales, su volumen porcentual, grados de liberación y enlaces presentes en las muestras sulfuradas de alta ley de zinc, en el departamento de Ancash.
- Realizar diseños de experimentos para pruebas metalúrgicas de flotación a nivel de laboratorio, teniendo en cuenta la variables independientes, dependientes y constantes que intervienen en el proceso.
- Interpretar los resultados reportados para la recuperación de zinc, desde minerales de alta ley, mediante balances metalúrgicos y métodos estadísticos.

2.5. Hipótesis y Variables

2.5.1. *Hipótesis General*

- El diseño del proceso de flotación de especies sulfuradas de alta ley permitirá la recuperación adecuada de zinc, en el departamento de Ancash.

2.5.2. *Hipótesis Específicas*

- La caracterización de los minerales sulfurados de alta ley de zinc permitirá identificar las especies de minerales involucradas, distribución volumétrica de las especies, enlaces entre minerales y grados de liberación para recuperar zinc en el departamento de Ancash.

- El diseño de las pruebas metalúrgicas por flotación de minerales sulfurados de alta ley hará posible recuperar zinc adecuadamente, en el departamento de Ancash.
- El tratamiento de datos reportados de laboratorio metalúrgico de las pruebas de flotación de minerales sulfurados de alta ley de zinc, mediante balances metalúrgicos y análisis estadísticos en Minitab 19, determinará la recuperación de zinc, en el departamento de Ancash.

2.5.3. Identificación de Variables

Se tomarán en cuenta las siguientes variables para el proceso de flotación de especies sulfuradas de alta ley en zinc:

Variable dependiente

- Recuperación de zinc (%)
- Calidad del concentrado (%Zn)

Variables independientes

- Dosificación de sulfato de cobre
- Dosificación de xantato amílico de potasio (Z-6)
- Dosificación de espumante MIBC

Variables independientes constantes

- % Sólidos
- Granulometría
- pH
- Acondicionamiento de la pulpa (min)
- Tiempo de flotación (min)
- RPM Celda de Flotación (N° de vueltas por min.)

- Flujo de Aire (L/min)

2.5.4. Operacionalización de Variables

Los datos reportados por el desarrollo de las pruebas metalúrgicas de flotación serán presentados en balances metalúrgicos y se analizará estadísticamente en Minitab 19 con la finalidad de interpretar, evaluar y determinar la dependencia de las variables tratadas.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes

Castro (2005) en sus tesis “Optimización del proceso de flotación de concentrado de zinc en la compañía minera “Yauliyacu” S.A mediante diseños experimentales”, evaluó la dosificación de los reactivos: sulfato de cobre y xantato Z-11, y el pH, en función de la recuperación de concentrado de zinc, obteniendo valores óptimos de 1.184 Lb/TM de sulfato de cobre y pH de 11.5, obteniendo teóricamente un 94% de recuperación de zinc en la flotación bulk y a nivel de laboratorio un 90.58% de recuperación de este metal. A nivel de planta concentradora, se logró obtener una mejora de calidad de concentrado y una recuperación de 90.64%. Concluye que el sulfato de cobre y la alcalinidad del proceso (pH) son las variables de mayor contribución en la flotación de concentrados de zinc.

Roman (2018) en su tesis “Optimización del proceso de flotación rougher zinc en minerales m4b (mineral de cobre (calcopirita) y zinc) sobre selectividad y recuperación de minerales. Mediante el uso de reactivos alternativos diamond” evaluó el reemplazo del reactivo SIPX con el colector Diamond F4224LI, obteniendo una mejora en la calidad de concentrado de +5.75% a +7.20, disminuyendo la recuperación del proceso de - 1.82% a -1.47. Así mismo, logró disminuir en 10% el consumo de cal (empleándose solo en la etapa de cleaner) para alcanzar un pH de 11.60 (óptimo), logrando de esta manera controlar la evacuación de las espumas del proceso, por la fluidez de éstas.

Chumbes (2019) “Flotación del Zn marmatítica con alto contenido de pirrotita”, identifica el problema que genera la pirrotita en la flotación de zinc, hace referencia que a pH = 10 activa la pirrotita en el circuito de flotación de este metal. El autor señala la importancia del grado de liberación, por lo que pudo comprobar que a una flotación con granulometría de

63% a 67% - malla 200, el contenido metálico fino se perdía como lamas en el siguiente circuito de flotación. Determina una granulometría óptima de flotación en la etapa de zinc de 53% - 56% - malla 200 para evitar pérdidas por desplazamiento de finos a la siguiente etapa, así mismo determinó que el pH en el circuito no debe ser mayor a 12. Aplicando los parámetros anteriormente descritos en planta, logró incrementar la calidad de concentrado de 46% a 48 % y 67% a 72% de contenido metálico.

Palafox et al. (2010), en su artículo de investigación “Rediseño del circuito de flotación de zinc usando modelación matemática”, emplearon simulación matemática con la finalidad de encontrar el flujograma óptimo del proceso, que permitió incrementar la recuperación de zinc y mejorar el grado del concentrado. Los resultados a nivel de pilotaje industrial concluyeron que modificando las cargas circulantes el proceso incrementó la recuperación de 93 a 96.7%, manteniendo constante el grado de concentrado en 57%.

Rodriguez (2015), en su tesis “Evaluación de la flotación de zinc en la planta concentradora Austria Duvaz s.a.”, orientaron el proyecto para la mejora de la recuperación y el grado del concentrado en el circuito de flotación de Zn. El autor concluyó que con una remolienda en el circuito de Zn aumenta la recuperación de 85.81 a 87.82%; las pruebas metalúrgicas de investigación se realizaron con mineral de cabeza de mina. Por el alto desplazamiento del zinc en el circuito bulk Pb-Cu, el autor recomienda aumentar la dosificación de sulfato de zinc.

3.2. Marco Teórico

3.2.1. *Ubicación de Ancash*

3.2.1.1. Etimología de la Palabra Ancash

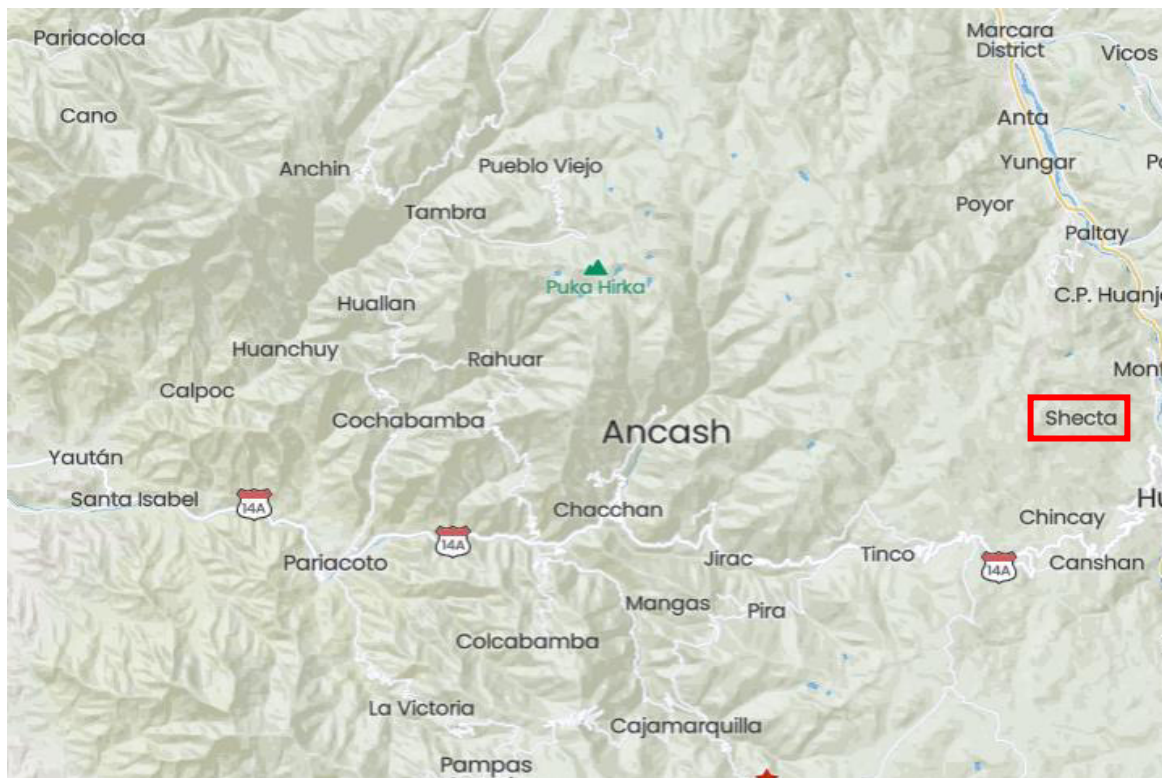
La etimología de la palabra Ancash tiene origen el río Anqashmayu, traducido al español como "río azul" (azul=anqash, río=mayu). A partir del siglo XX se le denominó «Ancash» (Poma, 2020).

3.2.1.2. Ubicación Geográfica

Ancash se encuentra situado al centro y occidente del Perú, con un área registrada de 35 915 Km², que representa 2,8% del Perú. Está formado por costa y sierra. Es limítrofe con la ciudad de Lima por el sur, Huánuco por el este, el departamento de La Libertad por el norte y el mar del Pacífico por el oeste. Dicho departamento se encuentra políticamente constituido por 20 provincias y 166 distritos, cuya capital tiene por nombre Huaraz (Villareal & Rodríguez, 2009).

Figura 1

Ángulo de contacto de las tres fases (aire-agua-sólido)



Nota: Mapcarta.com (2022)

En las proximidades de la costa del departamento de Ancash, se registran 16 islas pequeñas con un área aproximada de 12,2 km². Isla Blanca e isla Santa son los territorios con mayor superficie, 4,0 km² y 3,2 km², respectivamente. Dicho departamento abarca principalmente la región de sierra (72%). Registra una altitud de 4 m.s.n.m. en el distrito Chimbote-provincia Santa, y los 3 910 m.s.n.m., distrito Shilla-provincia Carhuaz.

Ancash es un departamento del Perú, con latitud 9°25'16.39" Sur y la longitud 77°41'31.60" Oeste, con una altitud media de 3,091 m.s.n.m. (Villareal & Rodríguez, 2009).

3.2.1.3. Accesibilidad

Se puede acceder a Ancash a través de tres rutas de viaje (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2017):

Tabla 1

Rutas de acceso a Ancash

Lima-Pativilca-Huaraz	408 km (aprox. 6-8 h, vía asfaltada)
Casma-Huaraz	150 km (aprox. 6 h, 20% vía asfaltada)
Santa-Huallanca-Huaraz	227 km (aprox. 5 h y 30 min, vía asfaltada)

Nota: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2017)

3.2.2. Historia Del Zinc

En sus inicios el mineral de zinc era usado para la conformación de aleaciones a base de cobre conocidas como latón, así mismo usaban sales a base de zinc para fines curativos. Vestigios del latón encontrados en Asiria y Babilonia datan del año 3000 antes de Cristo, y en Palestina vestigios más recientes 1400 antes de Cristo (Schönnenbeck & Neumann, 2021).

El zinc en sus inicios fue conocido como elemento aleante del cobre, y su forma era conocida como latón. El primer artículo de joyería de latón o aleación zinc-cobre data del año 500 antes de Cristo de la isla de Rodas. El zinc era encontrado de forma de carbonato de zinc. A partir de este compuesto se descubrió de forma casual que era adecuado para formar aleaciones, de tal manera que su primer uso fue como moneda (Solano, 2005).

El elemento zinc data de los pueblos antiguos, escuchándose en relatos hablar acerca de este metal, llamándolo plata falsa. En la ciudad de Grecia se encontraron depósitos de sulfuros de plomo y también se halló distintos tipos de ornamentos de este metal como, por ejemplo: una estatuilla en Transilvania y un frontal en Pompeya.

En la edad media se dice que los alquimistas confundieron la transmutación cobre-oro con la fabricación de aleación cobre-zinc (latón). Científicamente, en la obra de Para Celso, datan las primeras propiedades del zinc metálico. (Schönnenbeck & Neumann, 2021).

Durante el siglo XII, escrito chinos hablan del uso del zinc y de las propiedades que posee este para la fabricación de monedas y espejos. En el siglo XVII y XVIII, en Asia se comercializaban grandes cantidades de placas de zinc llamadas spelter. A mitad del siglo XVII los ingles adoptaron de China la tecnología para la fabricación de artículos de zinc e instalaron una fundición para la obtención de zinc metálico en hornos de vidrio (Ballester et al., 2000).

3.2.3. Zinc en la Naturaleza

El zinc es un elemento metálico, natural y uno de los constituyentes de la corteza terrestre, necesario para nuestro medio ambiente. Se conoce que es un elemento con gran distribución en la naturaleza, sin embargo, no es abundante, pues este es el 0.012% de la capa superficial y en el suelo tiene una concentración media de 50 mg/Km³ (Rubio et al., 2007).

Su presencia ha sido registrada no solo en rocas y suelos, sino también en los seres vivos de nuestro ecosistema, además de esto el aire y el agua registran trazas de este metal.

Este metal cumple un rol importante en la actividad biológica de todo ser vivo. Así mismo, ingerir ciertas cantidades da como resultado un sistema inmunológico fuerte, también es vital para diversos procesos naturales: reproducción, sentidos del ser humano, digestión, entre otras (Asociación Latinoamericana de Zinc, 2004).

Contribuye con la mejora del nivel de vida, dato que como elemento natural se ha venido aplicando en la humanidad en formas médicas y farmacéuticas.

El zinc es uno de los elementos más importantes de la humanidad utilizándose 10 000 000 TM anualmente (Gershy-Damet & Saldarriaga, 2019).

3.2.4. *Propiedades del Zinc*

3.2.4.1. **Propiedades Físicas del Zinc**

Sobre los 225°C, el alcanza un color blanco con coloración azul (International Zinc Association, 2018).

Tabla 2

Propiedades físicas del zinc

PROPIEDADES	VALOR
Estado ordinario	Sólido
Masa atómica	65.37 g/mol
Densidad	7.14 g/ml
Punto de fusión	692,68°K
Punto de ebullición	1180°K
Entalpía de vaporización	115,3 kJ/mol
Entalpía de fusión	7,322 kJ/mol
Presión de vapor	189,68x10 ⁻⁵ atm a 692,73°K
Velocidad del sonido	3700 m/s a 293.15°K

Nota: International Zinc Association (2018)

3.2.4.2. **Propiedades Químicas del Zinc**

Es capaz de reaccionar con ácidos y bases, y por esto conocido como metal anfótero. Sus propiedades químicas se asemejan a las del aluminio (International Zinc Association, 2018).

Tabla 3*Propiedades químicas del zinc*

PROPIEDADES	VALOR
Número atómico	30
Valencia	2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1,6
Radio covalente	1.31 (Å)
Radio iónico	0.74 (Å)
Radio atómico	1.38 (Å)
Configuración electrónica	[Ar]3d ¹⁰ 4s ²
Primer potencial de ionización	9,42 eV

Nota: International Zinc Association (2018)**3.2.5. Principales Minerales de Zinc**

Entre los minerales de este metal tenemos a (Anthony et al., 1990):

Tabla 4*Minerales de zinc*

Mineral	Fórmula	Descripción
Adamita	$\text{Zn}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})$	Presenta dos formas de cristalización y pertenece a la familia de los arseniatos.
Esfalerita	ZnS	Pertenece a la clase de los sulfuros.
Calcofanita	$\text{ZnMn}_3\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Pertenece al grupo de la calcofanita.
Hemimorfita	$\text{Zn}_4(\text{OH})_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Es del grupo de los silicatos (silicato hidratado).
Smitsonita	ZnCO_3	Forma parte de la familia de los carbonatos.

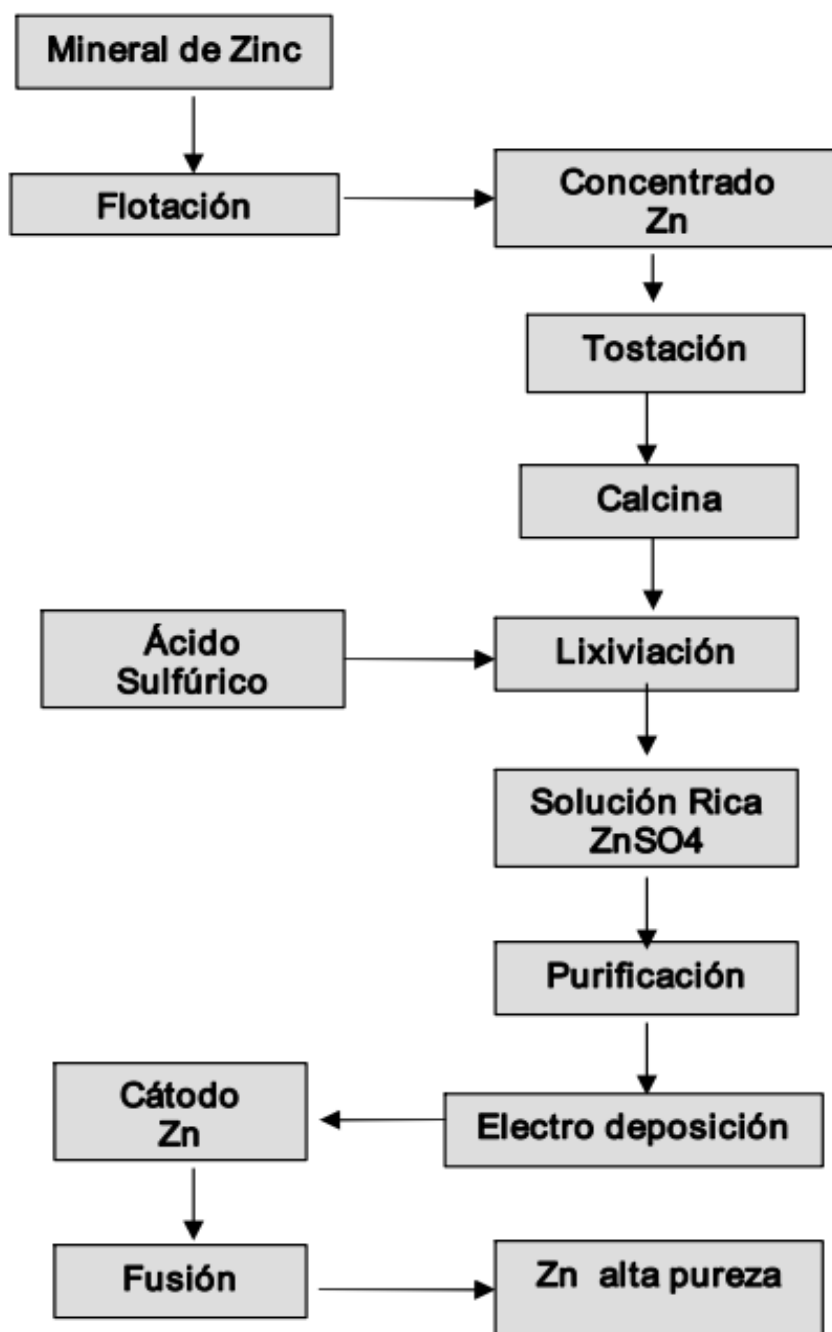
Nota: Cornelis (1986)

Los principales minerales de zinc que se procesan en el Perú son mayormente de tipo sulfuros y se benefician mediante flotación, los principales sulfuros de zinc que encontramos

en los yacimientos del departamento de Ancash son tipo esfalerita (ZnS_2) en mayor proporción y marmatita ($\text{FeZn})\text{S}$ en menor proporción (Estudios mineros del Perú S.A.C., 2012).

Figura 2

Proceso productivo de zinc metálico



Nota: Estudios mineros del Perú S.A.C. (2012)

3.2.6. Flotación de Minerales

La flotación consiste en separar y concentrar minerales alterando sus superficies a condiciones hidrofóbicas o hidrofílicas, para que se adhieran o no a las burbujas de gas. Este proceso se puede aplicar en diversos minerales, entre los cuáles tenemos a los nativos, sulfuros, sulfatos, silicatos, carbonatos, entre otros. Se basa en la separación del mineral valioso del material estéril con el que está asociado (Azañero, 2015).

Según el tipo de separación se puede dividir en:

- Flotación colectiva: Una separación en dos grupos, este concentrado está conformado por dos o más valores metálicos.
- Flotación selectiva: Separación para cada concentrado con un único valor metálico.

Los reactivos pueden ser aplicados desde la molienda o en la celda de flotación, dependerá del tiempo de residencia que requieran. La pulpa es burbujeada desde la parte baja de la celda con el apoyo de aspas de agitadores rotatorios, de esta forma permitir que las partículas del mineral, los reactivos, el aire y el agua estén en un contacto constante. Esta pulpa agitada y el aire insuflado generan burbujas de aire que arrastran hacia la parte superior de la celda al mineral valioso (Ortiz & Julca, 2017).

Los reactivos utilizados en la flotación pueden ser de diversas naturalezas, al igual que cumplir diferentes funciones, según esto tenemos los siguientes reactivos:

- Espumantes: Mantiene una espuma estable, una tamaño adecuado de las burbujas.
- Colectores: Incrementa las propiedades hidrofóbicas.
- Depresores: Evita la recolección de las especies no deseadas.
- Activadores: Apoya al colector en la absorción de la superficie del mineral.

- Modificadores de pH: Estabiliza el pH al nivel que sea necesario, dependerá del mineral al flotar.

En la flotación interactúan: la fase líquida (agua con reactivos), fase gaseosa (aire que se insufla a la celda) y fase sólida (mineral). La hidrofobicidad es un principio básico para la flotación, pero son pocos los minerales que son hidrofóbicos naturalmente, por ello, se incrementa esta propiedad con la ayuda de los colectores y otro punto esencial a considerar es la granulometría para lograr una flotación óptima (Ortiz & Julca, 2017).

Un componente esencial para este proceso es la celda de flotación, en la actualidad se usan de tipo:

- Mecánicas: Las más utilizadas, cuentan con un impulsor mecánico.
- Neumáticas: Estas se caracterizan por usar aire comprimido en lugar de un impulsor.
- Columnas: Tienen un flujo en sentido opuesto proveniente de las burbujas de mineral con el agua lavado y las burbujas de aire con la pulpa.

3.2.6.1. Variables de la Flotación de Minerales

Se deben considerar las variables relacionadas al mineral, a la molienda y clasificación, al agua, al acondicionamiento, al proceso de flotación y a las máquinas, entre las principales tenemos a (Azañero, 2015):

- Mineralogía del mineral
- Asociaciones del mineral
- pH natural del mineral
- Dureza del mineral

- Presencia de lamas primarias y secundarias
- Oxidación en la explotación y molienda
- Tamaño de liberación
- Tiempo de molienda
- Densidad de la pulpa
- Porcentaje de sólidos
- Adicionamiento de reactivos
- Tiempo de acondicionamiento
- Tiempo de flotación
- Granulometría
- Potencia de la celda
- Agitación

3.2.6.2. Flotación de Minerales de Zinc

La concentración por flotación de las especies sulfuradas de zinc por lo general se realiza a un pH mayor a 10.5 aunque también es posible que pueda flotar a pH menores. Una vez liberada la especie comercial de zinc es necesario activarla para dejarla expuesta a los colectores, que generalmente son xantatos, y un espumante. El nivel de dificultad que genera la flotación de esfalerita no es tan considerable como para la flotación de marmatita (Mateos, 2020).

La esfalerita es flotada por espumas luego de activarse con la dosificación de iones cobre como sulfato de cobre y un xantato de cadena corta. También se da el caso de que pueda ser flotado a otras condiciones de reacción a pH alto. Durante la oxidación de pirita se producen iones de Fe^{+2} y Fe^{+3} . Dadas estas condiciones la esfalerita absorbe gran cantidad de xantato debido a la activación de los sulfuros de zinc con los iones de hierro. El mecanismo de la

flotación de esfalerita comprende básicamente tres etapas: absorción de especies ferrosas, oxidación de especies férricas e interacción con el xantato (Ganoza, 2010).

3.2.7. Diseños Experimentales Factoriales

En los experimentos factoriales se analizan al mismo tiempo dos o más factores, y donde los procedimientos se establecen por la conjugación de los diversos niveles individualmente (Sandoval, 2011).

Al empezar a optimizar se debe identificar las variables significativas, por ello en esta parte del proceso se aconsejan los diseños de primer orden.

En un diseño factorial se considera que la relación de las variables con la respuesta es representada por un modelo matemático lineal, este modelo debe pronosticar exactamente cada uno de los puntos del diseño, pese a esto es necesario saber que con el modelo no bastará para justificar las respuestas, e incluso se asume la presencia de curvatura. Debido a esto la realización de más pruebas en el punto central del diseño ayuda a tener una estimación promedia del efecto curvatura (Castro, 2005).

3.2.8. Usos y Aplicaciones del Zinc Metálico

Según IZA, el mayor uso del zinc es en aplicaciones de galvanizado, 15% como elemento aleante base, 14% formando parte de aleaciones de bronce y latones, 8% como sulfatos y óxidos de zinc, y el 3% restante como elementos de aleaciones específicas.

Entre las principales aplicaciones del zinc metálico se tiene:

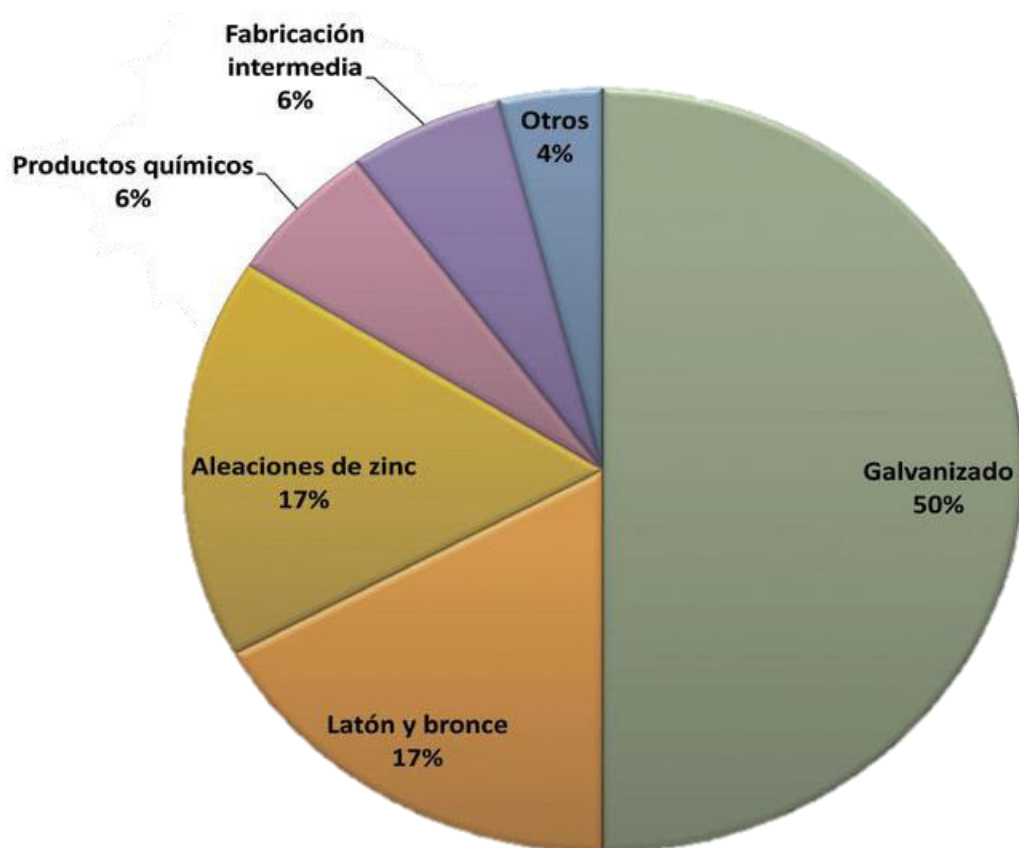
Construcción 45%: Empleándose en forma de chapas, calaminas, grifería, piezas decorativas, etc.

Transporte 25%: La pasta de este metal es usada como agente anticorrosivo en toda la industria automotriz.

Aplicaciones eléctricas y electrónicas 23%: El óxido de este metal es uno de los minerales con mayor proyección en el campo de la electrónica por las excelentes propiedades ópticas que poseen en el campo ultravioleta, además de esto tiene aplicaciones en el campo de la nanotecnología, espintrónica, pieza electricidad, biosensores, etc. (Azula, 2016).

Figura 3

Principales usos finales del zinc



Nota: Azula (2016)

3.2.9. Producción de Zinc a Nivel Nacional

3.2.9.1. Producción Minero Metálica Nacional

3.2.9.1.1. Producción Metálica del Zinc en Perú

La actividad minera contribuye con el desarrollo de la economía nacional, especialmente en el PBI y en las diversas actividades de producción relacionadas a esta;

también brinda una gran contribución en la balanza de comercio, generación de divisas, aumento de empleabilidad y recaudación fiscal. Lo antes mencionado es de gran importancia, ya que está directamente relacionada a la producción metálica nacional.

En el caso particular de producción nacional del zinc, sufrió una disminución de 13.2% desde enero del año 2021 hasta el mismo mes en 2022. Esta variación fue desfavorable a comparación de otros metales como el cobre, oro, estaño y molibdeno que lograron un incremento de 12.7%, 4.5%, 14.7%, 0.2% de forma respectiva.

Tabla 5

Producción metálica de enero 2021-2022

Metal		Enero		
		2021	2022	Var. %
Cobre	(TMF)	176737	199255	12.70 %
Oro	(g finos)	7577176	7915894	4.50 %
Zinc	(TMF)	122660	106894	13.20 %
Plata	(kg finos)	254913	254326	0.20 %
Plomo	(TMF)	20943	20568	1.80 %
Hierro	(TMF)	1129003	795348	29.60 %
Estaño	(TMF)	2101	2410	14.70 %
Molibdeno	(TMF)	2727	2733	0.20 %

Nota: Ministerio de Energía y Minas (2022)

3.2.9.1.2. Producción de Zinc en el Perú por Empresas

La producción del zinc peruana disminuyó en un 13.2% debido a que empresas como Compañía Minera Antamina S.A., Compañía Minera Chungar S.A.C. y Nexa Resources Perú S.A.A., presentaron una variación desfavorable en su producción del -5.9%, -13.7% y -51.0% respectivamente (Ministerio de Energía y Minas, 2022).

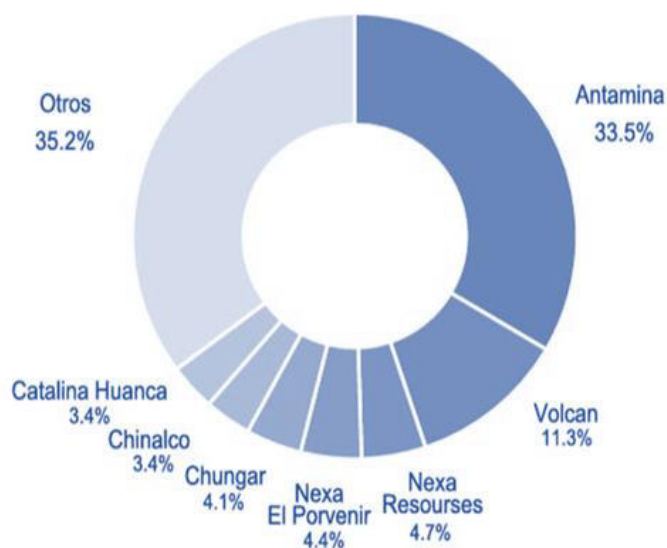
A pesar de los cambios negativos en producción que presentaron las empresas antes mencionadas, Compañía Minera Antamina S.A. ocupó el primer puesto con un 33.5% del total de finos de zinc producidos.

El segundo puesto lo ocupó Volcan Compañía Minera S.A.A. y el tercer puesto lo obtuvo Nexa Resources Perú S.A.A. con el 11.3% y 4.7% respectivamente.

Figura 4

Producción de zinc peruana por cada empresa

2022: Estructura de la producción de zinc por empresas, enero



Nota: Ministerio de Energía y Minas (2022)

3.2.9.1.3. Producción de Zinc Peruana a Nivel Regional

Con respecto a la producción de zinc a nivel regional, Áncash se encuentra en primer puesto con un 37.7% de producción nacional, seguidos de Junín y Pasco con un 21.2% y 14.9% en el orden respectivo.

Tabla 6*Exportaciones de productos mineros*

ZINC/TMF	122660	106480	-13.20%	100.00%
ÁNCASH	41530	40111	-3.40%	37.70%
JUNÍN	20938	22537	7.60%	21.20%
PASCO	15775	15835	0.40%	14.90%
LIMA	22349	12112	-45.80%	11.40%
ICA	13941	7048	-49.40%	6.60%
AYACUCHO	3468	3781	9%	3.60%
AREQUIPA	2886	3385	17.30%	3.20%
HUANCAVELICA	1500	934	-37.70%	0.90%
CUSCO	273	558	104.30%	0.50%
PUNO	-	180	+	0.20%

Nota: Ministerio de Energía y Minas (2022)

CAPÍTULO IV

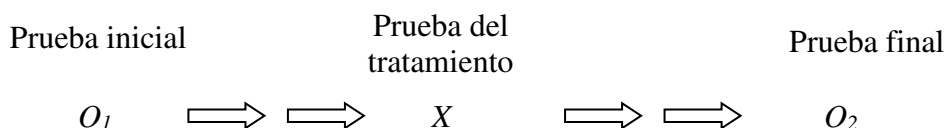
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN Y MINERALOGÍA DE LA MUESTRA

4.1. Tipo y Diseño de Investigación

El desarrollo de la presente tesis es experimental, puesto que se aplican los conocimientos relacionados al método científico, aplicando las teorías de la flotación con diseños experimentales factoriales, teorías aplicadas para mejorar la recuperación de zinc en especies sulfuradas de alta ley en el departamento de Ancash.

El siguiente proyecto es de tipo cualitativo, dado que caracteriza las especies de minerales presentes en la muestra problema; cuantitativa y deductiva porque analiza, interpreta y relaciona las variables independientes y dependientes durante el desarrollo experimental del estudio.

El diseño de investigación planteado es el siguiente:



O_1 : Tratamiento metalúrgico de flotación de especies sulfuradas de alta ley en zinc, con bajas recuperaciones y calidad de concentrado pobre.

X : Caracterización de la muestra en estudio y diseños experimentales factoriales para mejorar la recuperación y grado del concentrado de zinc mediante el proceso de flotación de especies sulfuradas de alta ley en el departamento de Ancash.

O_2 : Recuperación de zinc económicamente rentables en minerales sulfurados de alta ley.

4.2. Unidad de Análisis

La fuente del problema se recopiló en el departamento de Ancash, lugar donde se obtuvo la información necesaria para desarrollar y elaborar el siguiente proyecto investigación, trabajando en conjunto con las comunidades involucradas en dicha problemática.

4.3. Población de Estudio

Corresponde al mineral sulfurado de alta ley de zinc, debidamente muestreado de los yacimientos en el departamento de Ancash.

La elaboración y desarrollo del proyecto se realizaron en el laboratorio de metalurgia de la empresa METALANDIN SAC, y la caracterización mineralógica en la empresa GEOXINPESAC.

4.4. Tamaño de Muestra

El lote de mineral necesario para el desarrollo de las pruebas metalúrgicas de investigación fue de 70 Kg, cantidad de muestra necesaria para desarrollar pruebas metalúrgicas de moliendabilidad, gravedad específica, ensayos químicos y caracterización de la muestra, pruebas de flotación con diseños experimentales factoriales. Cabe mencionar que el desarrollo de las pruebas se realizó con la mitad del lote muestreado en campo, quedando la otra mitad como muestra testigo para corroboración de los resultados si es que así lo requiere el proyecto.

4.5. Selección de Muestra

La muestra de mineral sulfurado de alta ley de cabeza fue obtenida de manera representativa en el departamento de Ancash y trasladado al laboratorio metalúrgico de la empresa METALANDIN SAC. La muestra fue preparada mecánicamente hasta obtener 100%

-10" en una chancadora de mandíbula y una chancadora tipo cónica. Una vez preparado el total del lote se realizó la separación de la muestra testigo. Con 35 Kg de muestra se desarrolló el presente proyecto de investigación basados en diseños experimentales factoriales para mejorar la recuperación de minerales sulfurados de zinc en el departamento de Ancash.

4.6. Procedimiento Metodológico de la Investigación

- Recopilación de referencias para el problema en estudio.
- Muestreo representativo del lote de mineral de sulfurado de alta ley, en el departamento de Ancash.
- Preparación mecánica del mineral hasta obtener un 100% - 10malla, tamaño necesario para la operación de molienda y el desarrollo de la batería de pruebas de flotación.
- Muestreo representativo de 300 gramos de mineral molido para ensayos químicos y caracterización geológica de la muestra.
- Elaboración del diseño experimental para la flotación de especies sulfuradas de alta ley en zinc con el uso de Minitab 19.
- Pruebas preliminares de flotación de las especies sulfuradas de alta ley de zinc en el laboratorio metalúrgico.
- Desarrollo de la batería de pruebas de flotación de los especies sulfuradas de alta ley de zinc en el laboratorio metalúrgico.
- Elaboración de los balances metalúrgicos en hojas de cálculo y análisis estadísticos en Minitab 19 con los datos reportados de las pruebas metalúrgicas de flotación de especies sulfuradas de alta ley de zinc.

4.7. Análisis Mineralógico de la Investigación

Con el uso de microscopio óptico de luz reflejada se observó una muestra de especie sulfurada de alta ley en zinc, debidamente preparada y pulida en forma de una briqueta. Como resultado de dicha observación, se procedió a detallar las especies identificadas en el microscopio. En la tabla 7 se denotan los minerales observados, la fórmula y abreviatura con los cuales serán identificadas a lo largo del proyecto.

Tabla 7

Minerales identificados en el microscopio

Minerales	Fórmula	Abreviatura
Esfalerita	ZnS	Ef
Calcopirita	CuFeS ₂	Cp
Pirita	FeS ₂	Py
Arsenopirita	FeAsS	Apy
Magnetita	Fe ₃ O ₄	Mt
Rutilo	TiO ₂	Rt
Goethita	FeO.OH	Gt
Gangas		GGs

Nota: Gagliuffi (2021)

4.7.1. Interpretación Mineralógica

Minerales zincíferos

Se observaron minerales sulfurados de zinc como la esfalerita.

Minerales de cobre

La especie sulfurada de cobre, que se logró identificar fue la calcopirita.

Minerales ferríferos

Los principales minerales con contenido de hierro que se identificaron fueron la arsenopirita, pirita, goethita y magnetita.

Minerales de titanio

Como especie con contenido de titanio, se observó al rutilo.

Otros Minerales

Compuesto principalmente por gangas de tipo carbonatos y silicatos.

4.7.2. Distribución Volumétrica y Grados de Liberación

El volumen porcentual se reportó para cada especie, de igual manera para el grado de liberación; los cuales se cuantificaron para todas las especies observadas en el microscopio y se detallan en la tabla 8.

Tabla 8

Minerales identificados en el microscopio

Minerales	Volumen (%)	Grado de liberación (%)
Esfalerita	15.65	82.74
Calcopirita	2.85	98.80
Pirita	18.52	98.91
Arsenopirita	0.84	97.56
Magnetita	0.05	100
Rutilo	0.07	0
Goethita	0.05	100
Gangas	61.97	99.43
TOTAL	100	

Nota: Gagliuffi (2021)

4.7.3. Interpretación del Grado de Liberación para los Minerales que han Intervenido en el Análisis Modal

Según lo observado en la tabla 8, se interpretará de la siguiente manera, con respecto al grado de liberación para el total de especies de minerales observados en la caracterización.

Los sulfuros de zinc (esfalerita) ocupan el 15.65% del lote de mineral muestreado, observándose el 82.74% como partículas libres.

La calcopirita se cuantificó en un 2.85% del lote de mineral muestreado, observándose el 98.80% como partículas libres.

La pirita se reportó en un 18.52% del lote de mineral muestreado, identificándose el 98.91% como partículas libres.

La arsenopirita representa el 0.84% del lote de mineral muestreado, identificándose el 97.56% como partículas libres.

La magnetita representa el 0.05% del lote de mineral muestreado, observándose el 100.00% como partículas libres.

El dióxido de titanio (rutilo) representa el 0.07% del volumen total de la muestra, observándose en su totalidad enlazada.

La goethita representa el 0.05% del lote de mineral muestreado, observándose el 100.00% como partículas libres.

Las gangas ocupan el 6.97% del lote de mineral muestreado, identificándose el 99.43% como partículas libres.

La razón por la cual el total de las especies no se encuentran liberadas totalmente, se debe al tipo de enlace del cual forman parte.

Tabla 9*Volúmenes y grados de liberación en los minerales observados*

MINERALES			ESFALERITA		CALCOPIRITA		PIRITA		ARSENOPIRITA		MAGNETITA		RUTILO		GOETHITA		GANGAS	
			N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V
Total de Partículas Libres		1,888.00	253		55		358		16		1		-		1		1,204.00	
% Volumen Partículas libres		96.62		12.95		2.81		18.32		0.82		0.05		-		0.05		61.62
TOT.PARTÍCULAS ENTRELAZADAS	NUMERO PARTICUL.	VOLUMEN PORCENTUAL	ESFALERITA		CALCOPIRITA		PIRITA		ARSENOPIRITA		MAGNETITA		RUTILO		GOETHITA		GANGAS	
			N	% V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V
ef-cp	15.26	0.78	14.76	0.76	0.5	0.03		-		-		-		-		-		-
ef-py	41.8	2.14	38	1.94		-	3.8	0.19		-		-		-		-		-
cp-GGs	0.58	0.03		-	0.13	0.01		-		-		-		-		-	0.45	0.02
cp-apy	0.44	0.02		-	0.04	0		-	0.4	0.02		-		-		-		-
py-GGs	2.33	0.12		-		-	0.13	0.01		-		-		-		-	2.2	0.11
rt-GGs	5.59	0.29		-		-		-		-		-	1.29	0.07		-	4.3	0.22
TOTAL ENTREL.	66	3.38	52.76	2.7	0.67	0.03	3.93	0.2	0.4	0.02	-	-	1.29	0.07	-	-	6.95	0.36
TOT.LIB+ENLZ	1,954.00	100	305.8		55.67		361.9		16.4		1		1.29		1		1,210.95	
TOT.VOL.PORCENTUAL		100		15.65		2.85		18.52		0.84		0.05		0.07		0.05		61.97
GRADOS DE LIB.PORCENTUAL			82.74		98.8		98.91		97.56		100		0		100		99.43	
Símbolos:	N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizadas.																	
	%V = Volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.																	

Nota: Gagliuffi (2021)

Tabla 10

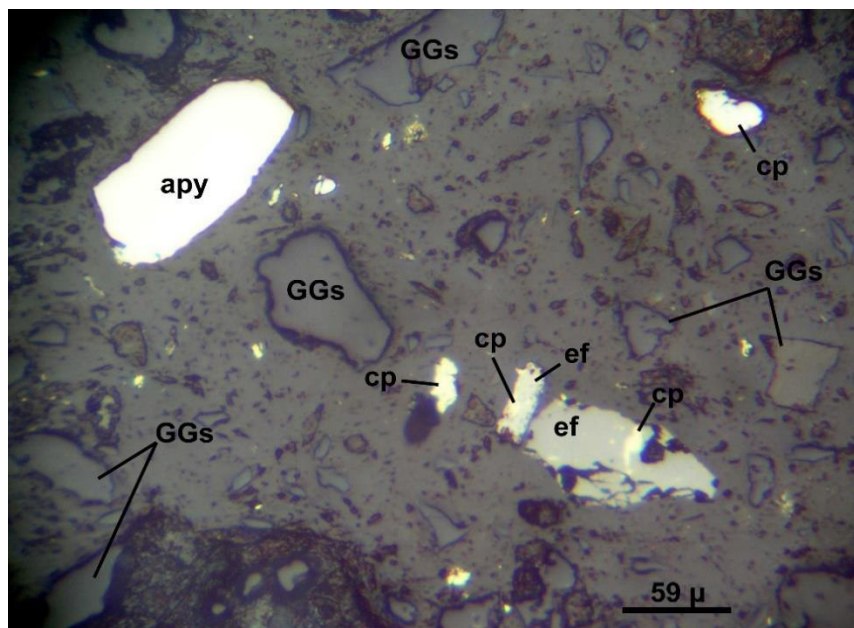
Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa

Minerales entrelazados	Tipo entr.	Num. part.	Dist. porc.	Posibilidades de liberación completa
Partículas libres		1,888.00	96.62	
ef-cp	1dII	4.51	0.23	Imposible
	1dIII	0.98	0.05	Imposible
	1eI	0.39	0.02	Muy difícil a imposible
	1eII	9.18	0.47	Muy difícil a imposible
	3dII	0.20	0.01	Muy difícil a imposible
ef-py	1aI	41.80	2.14	Fácil
cp-GGs	1bIV	0.39	0.02	Moderadamente fácil
	1dII	0.19	0.01	Imposible
cp-apy	1bI	0.44	0.02	Moderadamente fácil
py-GGs	1eI	2.33	0.12	Muy difícil a imposible
rt-GGs	1aI	1.67	0.09	Fácil
	1bIV	2.56	0.13	Moderadamente fácil
	1eI	1.36	0.07	Muy difícil a imposible
T O T A L		1,954.00	100	

Nota: Gagliuffi (2021)

Figura 5

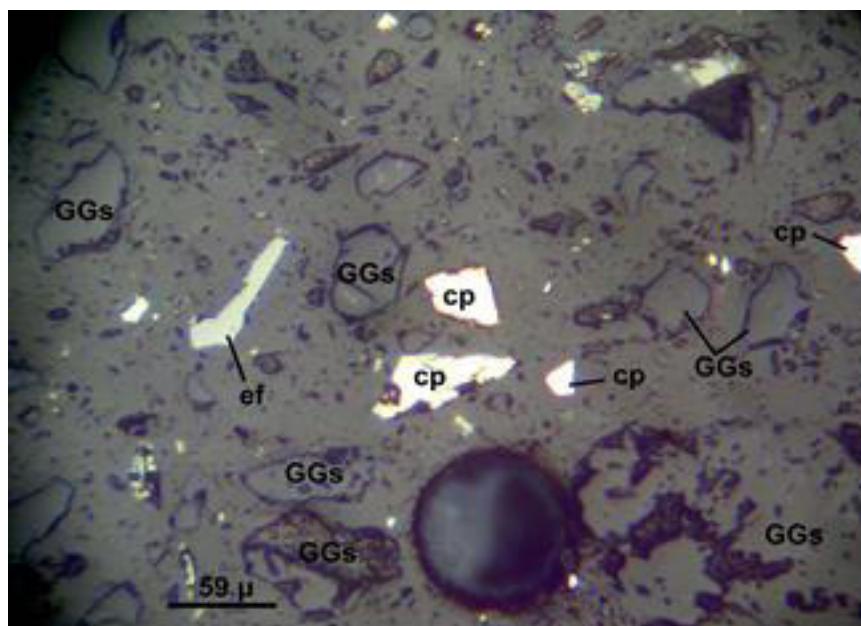
Apy – cp – GGs, como partículas libres; partículas entrelazadas de ef – cp



Nota: Gagliuffi (2021)

Figura 6

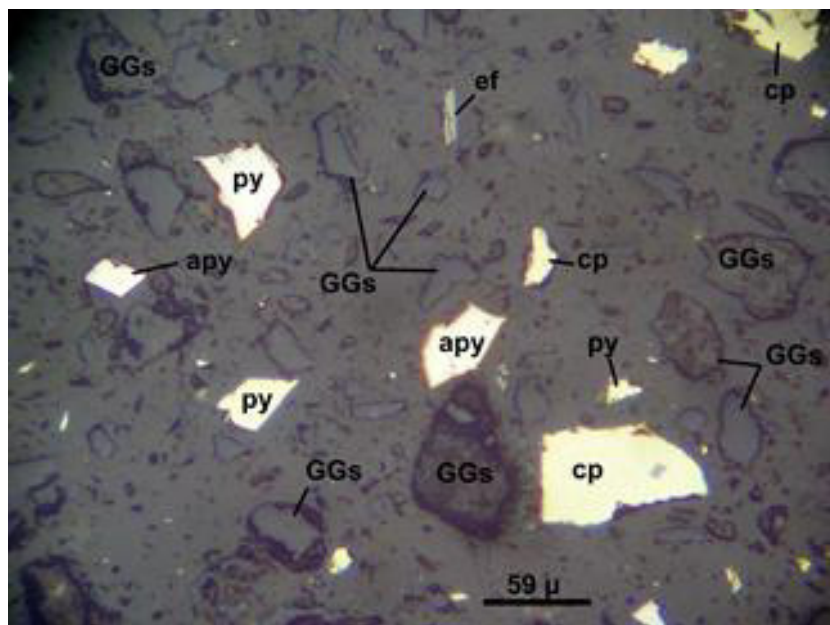
Ef – cp – GGs, como partículas libres



Nota: Gagliuffi (2021)

Figura 7

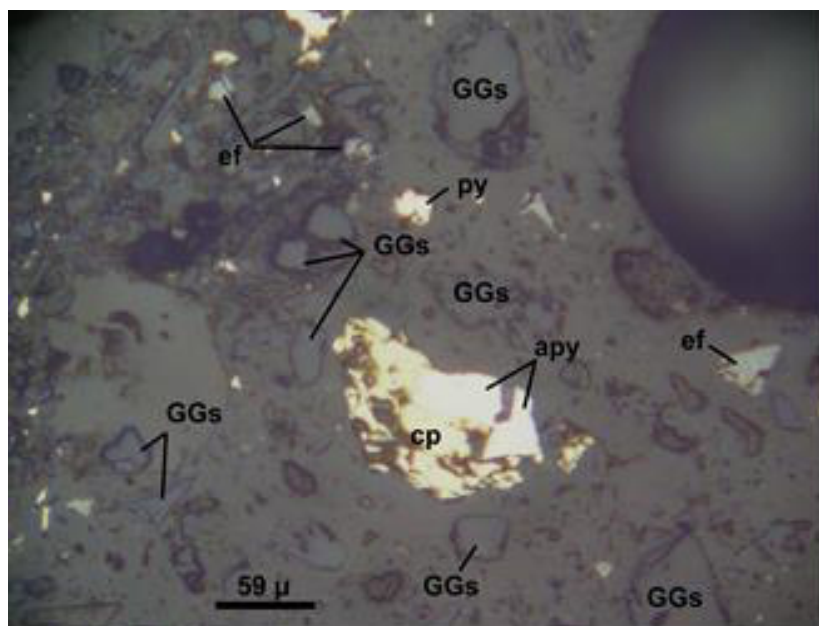
Apy – py – cp – GGs, como partículas libres



Nota: Gagliuffi (2021)

Figura 8

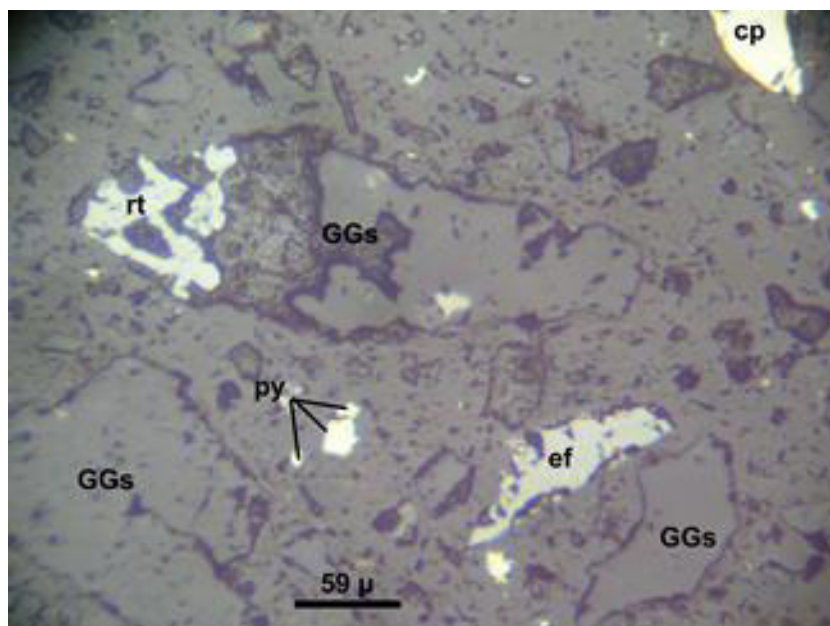
Ef – py – GGs, como partículas libres; partículas entrelazadas de cp – apy



Nota: Gagliuffi (2021)

Figura 9

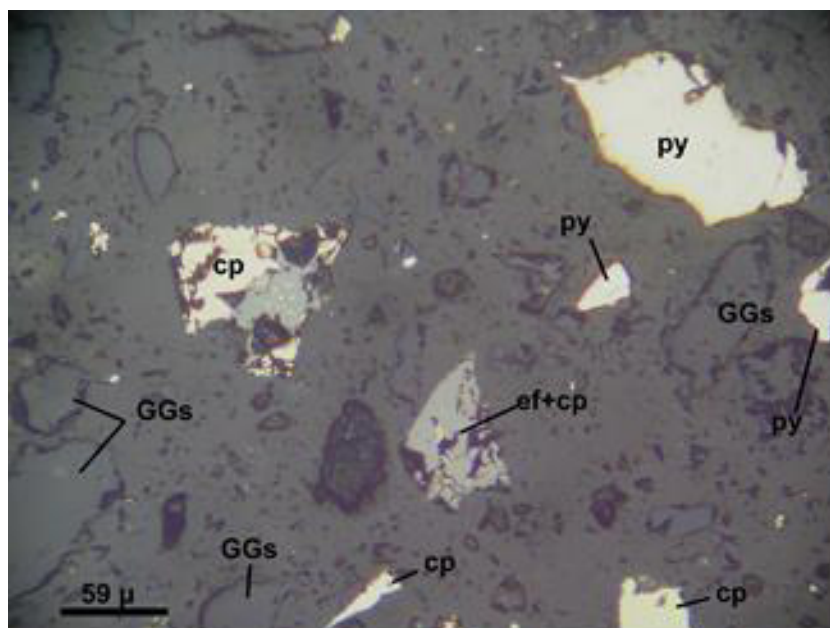
Py – ef – cp – rt – GGs, como partículas libres



Nota: Gagliuffi (2021)

Figura 10

Py – cp – GGs, como partículas libres; partículas entrelazadas de cp – ef



Nota: Gagliuffi (2021)

CAPÍTULO V

PRUEBAS EXPERIMENTALES

5.1. Pruebas de Moliendabilidad del Mineral

Se realizaron pruebas de reducción de tamaño del lote de mineral muestreado (100% - malla 10) para determinar la curva de moliendabilidad y se ejecutó en el molino de bolas del laboratorio de preparación mecánica de minerales en las instalaciones de la empresa METALANDIN S.A.C, y se determinó el tiempo necesario para obtener una granulometría de 65 % - 200 malla, tamaño donde la mayoría de las partículas de zinc se muestran como libres a la inspección visual.

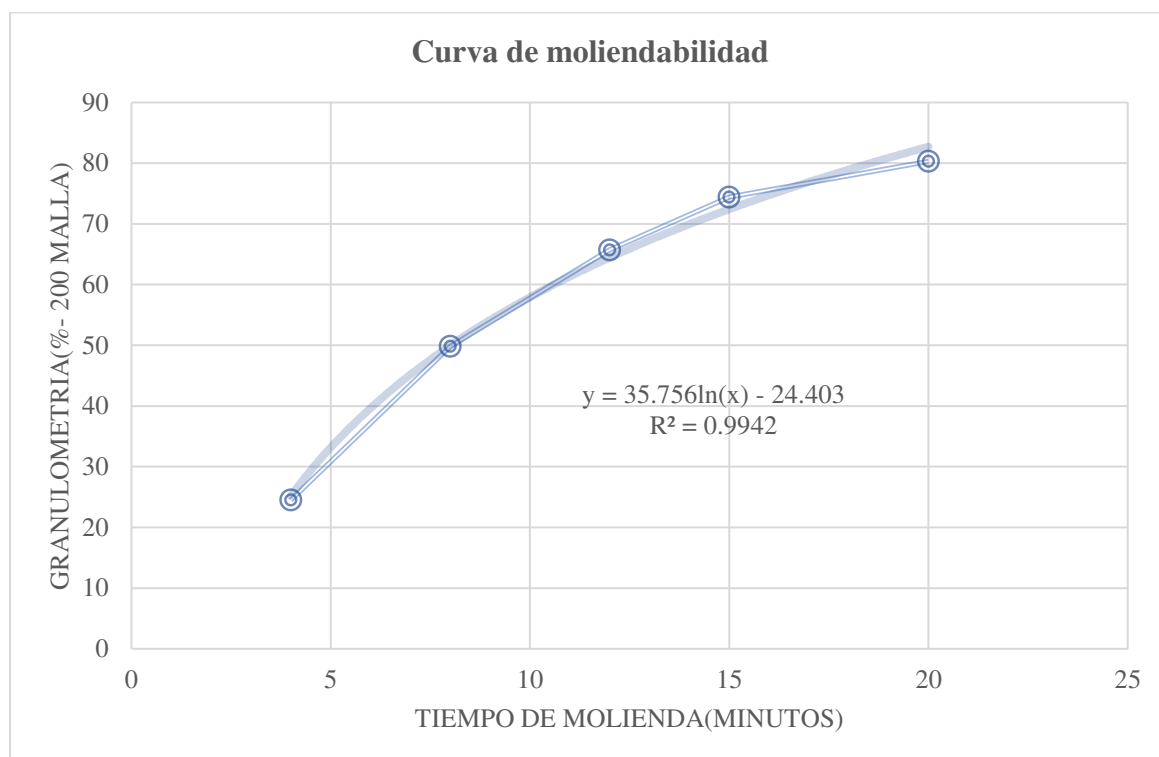
En la tabla 11 se describe la reducción de tamaño en función del tiempo de molienda y se muestra la curva de moliendabilidad en la figura 11.

Tabla 11

Tiempo de molienda y granulometría del mineral

Tiempo(min)	Granulometría (% - 200 malla)
4	24.5
8	49.8
12	65.7
15	74.4
20	80.3

Nota: Considerando un rango de tiempo comprendido entre 4 a 20 minutos.

Figura 11*Curva de moliendabilidad*

Nota: Se presenta la ecuación que sigue la curva.

5.2. Pruebas de Flotación de Zinc del Mineral de Cabeza

Se desarrollaron pruebas metalúrgicas de flotación del mineral de cabeza muestreado de los yacimientos sulfurados en la provincia de Ancash, y las condiciones de operación estándar para el desarrollo experimental se describen en la tabla 12. Esta etapa radica en recuperar la mayor cantidad de especies sulfuradas de zinc en una primera etapa y luego concentrar las especies hasta un grado comercial con el uso de los diseños experimentales factoriales. Se tomó en cuenta la variable dosificación de reactivos: Sulfato de cobre, xantato Z-6 y MIBC.

Tabla 12*Condiciones estándar de las pruebas metalúrgicas*

Cantidad del mineral	1.0 kg
Tamaño de partícula	62.3% - 74 μ
pH	11
Porcentaje de sólidos	30%
Tiempo de acondicionamiento	7 min.
Tiempo de Flotación	15 min.
RPM del impulsor	1200

Nota: Parámetros operativos.**5.3. Análisis Químico del Mineral de Cabeza**

Aproximadamente 300 gr. de muestra representativa del lote de mineral de cabeza, se enviaron a laboratorio químico para determinar la ley de zinc, y se detalla en la tabla 13.

Tabla 13*Ensayos químicos del mineral de cabeza*

Componente	Zn (%)
Mineral de cabeza	18.51

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).**5.4. Elaboración del Diseño Factorial**

En base a la caracterización mineralógica se elaboró un diseño factorial de experimentos de 2 niveles, 3 factores y 2 réplicas para luego desarrollar las pruebas metalúrgicas de flotación, considerando como variables independientes la dosificación de reactivos: Sulfato de cobre (5%), Z-6 y MIBC (100%), las demás variables que participan en el proceso se mantuvieron constantes. Las cantidades mínimas y máximas de la dosificación de los reactivos en estudio se describen a continuación en la tabla 14 y el diseño de la batería de pruebas de flotación en la tabla 15.

Tabla 14

Valores de las variables independientes del proceso de flotación

Reactivo	Dosificación mínima(g/TM)	Dosificación máxima(g/TM)
CuSO ₄	200	500
Xantato Z-6	30	70
MIBC	20	40

Nota: La unidad empleada es gramos por tonelada métrica.

Tabla 15

Elaboración del diseño factorial, 2 niveles, 3 factores

OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	Sulfato de cobre(g/TM)	Z- 6 (g/TM)	MIBC (g/TM)
1	1	1	1	200	30	20
2	2	1	1	500	30	20
3	3	1	1	200	70	20
4	4	1	1	500	70	20
5	5	1	1	200	30	40
6	6	1	1	500	30	40
7	7	1	1	200	70	40
8	8	1	1	500	70	40
9	9	1	1	200	30	20
10	10	1	1	500	30	20
11	11	1	1	200	70	20
12	12	1	1	500	70	20
13	13	1	1	200	30	40
14	14	1	1	500	30	40
15	15	1	1	200	70	40
16	16	1	1	500	70	40

Nota: La unidad empleada es gramos por tonelada métrica.

5.5. Desarrollo del Diseño Factorial

En base a la plantilla del diseño factorial, se desarrollaron pruebas metalúrgicas de flotación en el laboratorio de pruebas metalúrgicas METALANDIN SAC, teniendo en cuenta las variables independientes y dependientes, así como aquella que consideraron como

constantes del proceso. Los resultados de las pruebas se reportan en los balances metalúrgicos de las tablas 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 y 31.

5.5.1. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 1

Tabla 16

Resultado para orden de corrida 1

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	244.5	24.45	35.60	870.42	48.09	4.09
Medio	431.88	43.188	16.50	712.60	39.37	
Relave	323.62	32.36	7.01	226.86	12.53	
Cabeza calculada			18.10			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.5.2. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 2

Tabla 17

Resultado para orden de corrida 2

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	279	27.9	33.20	926.28	51.28	3.58
Medio	459.8	45.98	14.88	684.18	37.88	
Relave	261.20	26.12	7.50	195.90	10.84	
Cabeza calculada			18.06			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.5.3. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 3

Tabla 18

Resultado para orden de corrida 3

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	311.1	31.11	30.01	933.61	51.74	3.21
Medio	400.3	40.03	17.50	700.53	38.82	
Relave	288.60	28.86	5.90	170.27	9.44	
Cabeza calculada			18.04			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.5.4. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 4

Tabla 19

Resultado para orden de corrida 4

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	312.5	31.25	30.80	962.50	52.87	3.20
Medio	340.6	34.06	20.61	701.98	38.56	
Relave	346.90	34.69	4.50	156.11	8.57	
Cabeza calculada			18.21			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.5.5. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 5

Tabla 20

Resultado para orden de corrida 5

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	250.34	25.034	43.30	1083.97	59.85	3.99
Medio	506.8	50.68	13.20	668.98	36.93	
Relave	242.86	24.29	2.40	58.29	3.22	
Cabeza calculada			18.11			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.5.6. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 6

Tabla 21

Resultado para orden de corrida 6

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	269.8	26.98	37.50	1011.75	54.97	3.71
Medio	478.4	47.84	15.80	755.87	41.07	
Relave	251.80	25.18	2.90	73.02	3.97	
Cabeza calculada			18.41			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.5.7. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 7

Tabla 22

Resultado para orden de corrida 7

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	257.8	25.78	38.10	982.22	52.33	3.88
Medio	453.1	45.31	18.60	842.77	44.90	
Relave	289.10	28.91	1.80	52.04	2.77	
Cabeza calculada			18.77			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.5.8. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 8

Tabla 23

Resultado para orden de corrida 8

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	234.8	23.48	40.20	943.90	51.80	4.26
Medio	465.3	46.53	18.10	842.19	46.22	
Relave	299.90	29.99	1.20	35.99	1.98	
Cabeza calculada			18.22			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.5.9. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 9

Tabla 24

Resultado para orden de corrida 9

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	245.5	24.55	36.90	905.90	48.60	4.07
Medio	428.91	42.891	17.10	733.44	39.35	
Relave	325.59	32.56	6.90	224.66	12.05	
Cabeza calculada			18.64			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.5.10. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 10

Tabla 25

Resultado para orden de corrida 10

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	276.4	27.64	34.12	943.08	51.15	3.62
Medio	463.12	46.312	15.12	700.24	37.98	
Relave	260.48	26.05	7.70	200.57	10.88	
Cabeza calculada			18.44			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.5.11. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 11

Tabla 26

Resultado para orden de corrida 11

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	277.87	27.787	32.98	916.42	50.79	3.60
Medio	457.65	45.765	15.01	686.93	38.07	
Relave	264.48	26.45	7.60	201.00	11.14	
Cabeza calculada			18.04			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.5.12. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 12

Tabla 27

Resultado para orden de corrida 12

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	315.43	31.543	30.99	977.52	54.09	3.17
Medio	398.77	39.877	17.01	678.31	37.53	
Relave	285.80	28.58	5.30	151.47	8.38	
Cabeza calculada			18.07			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.5.13. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 13

Tabla 28

Resultado para orden de corrida 13

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	260.43	26.043	39.10	1018.28	54.04	3.84
Medio	449.87	44.987	17.90	805.27	42.73	
Relave	289.70	28.97	2.10	60.84	3.23	
Cabeza calculada			18.84			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.1.14. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 14

Tabla 29

Resultado para orden de corrida 14

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	253.44	25.344	42.12	1067.49	58.63	3.95
Medio	501.78	50.178	13.98	701.49	38.53	
Relave	244.78	24.48	2.11	51.65	2.84	
Cabeza calculada			18.21			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.1.15. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 15

Tabla 30

Resultado para orden de corrida 15

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	277.87	27.787	40.50	1125.37	60.25	3.60
Medio	457.65	45.765	15.01	686.93	36.78	
Relave	264.48	26.45	2.10	55.54	2.97	
Cabeza calculada			18.68			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.1.16. Resultados de la Flotación de Zinc para Orden de Corrida 16

Tabla 31

Resultado para orden de corrida 16

Componentes	Peso(g)	%Peso	Grado(%)	Finos	Recuperación(%)	Ratio
Cabeza	1000.00	100.00				
Concentrado	270.65	27.065	41.23	1115.89	61.14	3.69
Medio	451.1	45.11	14.98	675.75	37.03	
Relave	278.25	27.83	1.20	33.39	1.83	
Cabeza calculada			18.25			

Nota: La unidad empleada es el porcentaje (%).

5.6. ANOVA para la Recuperación de Zinc

En la tabla 32 se describe el ANOVA para la recuperación de zinc, así mismo en la tabla 33 se denotan los coeficientes de correlación como resultado del desarrollo de las pruebas para el procesamiento de minerales sulfurados de alta ley en zinc y en la tabla 34 se presenta los coeficientes de codificación. Finalmente, en la figura 12 se representa el diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

Tabla 32*ANOVA respecto a la recuperación de zinc*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	252.212	36.03	107.6	0
Lineal	3	248.311	82.77	247.18	0
CuSO ₄	1	4.337	4.337	12.95	0.007
Z-6	1	9.348	9.348	27.92	0.001
MIBC	1	234.626	234.626	700.68	0
Interacciones de 2 términos	3	3.797	1.266	3.78	0.059
CuSO ₄ *Z-6	1	0.668	0.668	2	0.195
CuSO ₄ *MIBC	1	1.671	1.671	4.99	0.056
Z-6*MIBC	1	1.458	1.458	4.35	0.07
Interacciones de 3 términos	1	0.104	0.104	0.31	0.593
CuSO ₄ *Z-6*MIBC	1	0.104	0.104	0.31	0.593
Error	8	2.679	0.335		
Total	15	254.891			

Nota: Se destaca el dato de la contribución de las variables.

Tabla 33*Resumen del modelo de la recuperación de zinc*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.578668	98.95%	98.03%	95.80%

Nota: Datos estadísticos destacables.

Tabla 34*Coeficientes de codificación de la recuperación de zinc*

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		93.321	0.145	645.07	0	
CuSO ₄	1.041	0.521	0.145	3.6	0.007	1
Z-6	1.529	0.764	0.145	5.28	0.001	1
MIBC	7.659	3.829	0.145	26.47	0	1
CuSO ₄ *Z-6	0.409	0.204	0.145	1.41	0.195	1
CuSO ₄ *MIBC	-0.646	-0.323	0.145	-2.23	0.056	1
Z-6*MIBC	-0.604	-0.302	0.145	-2.09	0.07	1
CuSO ₄ *Z-6*MIBC	0.161	0.081	0.145	0.56	0.593	1

Nota: Se analizan las variables de forma individual y en conjunto.

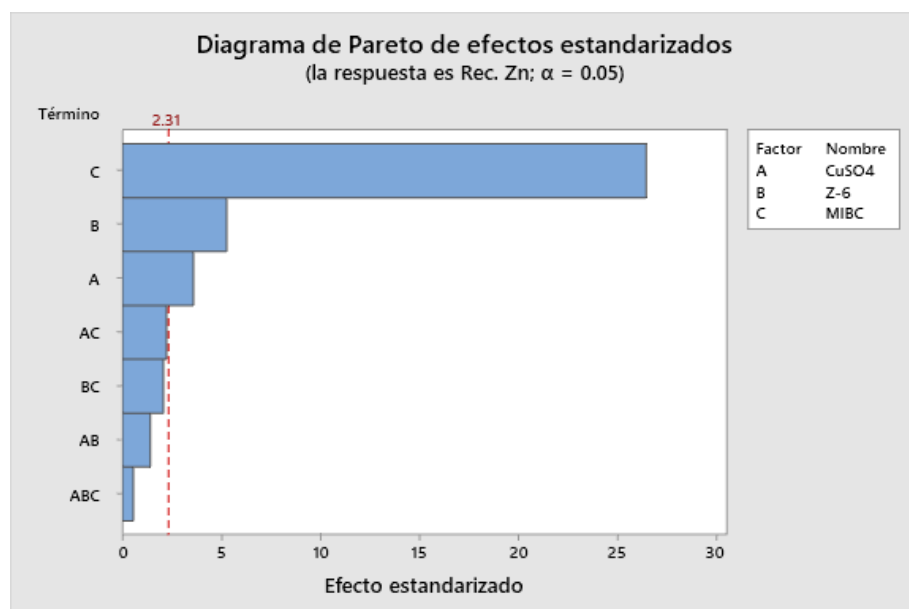
5.7. Ecuación de Regresión para la Recuperación de Zinc en Unidades No Codificadas

Se presenta un modelo matemático para la recuperación de zinc como una función de la dosificación de reactivos: sulfato de cobre (CuSO_4), MIBC y Z-6.

$$\begin{aligned} \% \text{ Rec. Zn} = & 73.96 + 0.01056 (\text{CuSO}_4) + 0.0879 (\text{Z-6}) + 0.5808 (\text{MIBC}) - 0.000012 \\ & (\text{CuSO}_4) * (\text{Z-6}) - 0.000350 (\text{CuSO}_4) * (\text{MIBC}) - 0.00245 (\text{Z-6}) * (\text{MIBC}) + 0.000003 \\ & (\text{CuSO}_4) * (\text{Z-6}) * (\text{MIBC}) \end{aligned}$$

Figura 12

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de la recuperación de Zn



Nota: Gráfico de efecto estandarizado de las variables.

5.8. ANOVA para el Grado de Zinc

A continuación, se describe en la tabla 35 el ANOVA para el grado de zinc, así mismo en la tabla 36 se denota los coeficientes de correlación como resultado del desarrollo de las pruebas para el procesamiento de minerales sulfurados de alta ley en zinc, en la tabla 37 se presenta los coeficientes de codificación. Finalmente, en la figura 13 se representa el diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

Tabla 35*ANOVA para el grado de zinc*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	246.054	35.151	9.83	0.002
Lineal	3	226.912	75.637	21.16	0
CuSO ₄	1	2.504	2.504	0.7	0.427
Z-6	1	18.126	18.126	5.07	0.054
MIBC	1	206.281	206.281	57.7	0
Interacciones de 2 términos	3	18.976	6.325	1.77	0.231
CuSO ₄ *Z-6	1	5.748	5.748	1.61	0.24
CuSO ₄ *MIBC	1	2.584	2.584	0.72	0.42
Z-6*MIBC	1	10.644	10.644	2.98	0.123
Interacciones de 3 términos	1	0.166	0.166	0.05	0.835
CuSO ₄ *Z-6*MIBC	1	0.166	0.166	0.05	0.835
Error	8	28.599	3.575		
Total	15	274.653			

Nota: Se destaca el dato de la contribución de las variables.

Tabla 36*Resumen del modelo del grado de zinc*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.89075	89.59%	80.48%	58.35%

Nota: Datos estadísticos destacables.

Tabla 37*Coefficientes de codificación del grado de zinc*

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		36.666	0.473	77.57	0	
CuSO ₄	-0.791	-0.396	0.473	-0.84	0.427	1
Z-6	-2.129	-1.064	0.473	-2.25	0.054	1
MIBC	7.181	3.591	0.473	7.6	0	1
CuSO ₄ *Z-6	1.199	0.599	0.473	1.27	0.24	1
CuSO ₄ *MIBC	0.804	0.402	0.473	0.85	0.42	1
Z-6*MIBC	1.631	0.816	0.473	1.73	0.123	1
CuSO ₄ *Z-6*MIBC	0.204	0.102	0.473	0.22	0.835	1

Nota: Se analizan las variables de forma individual y en conjunto.

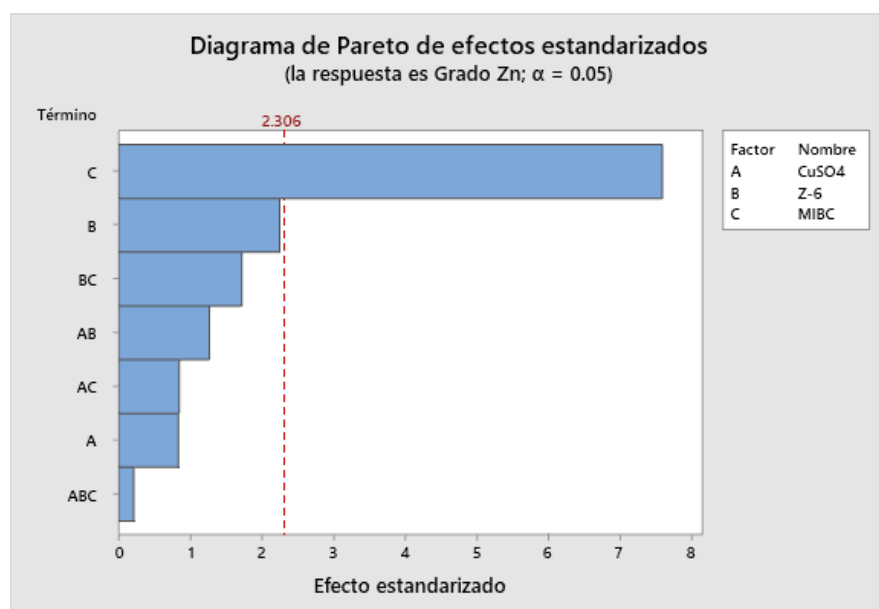
5.9. Ecuación de Regresión para el Grado de Zinc en Unidades No Codificadas

Se presenta un modelo matemático para el grado de zinc en función de las variables independientes que intervinieron en el procesamiento de este tipo de minerales.

$$\text{Grado Zn} = 40.1 - 0.0156 \text{ CuSO}_4 - 0.210 \text{ Z-6} + 0.121 \text{ MIBC} + 0.000098 \text{ CuSO}_4 * \text{Z-6} + 0.000098 \text{ CuSO}_4 * \text{MIBC} + 0.00289 \text{ Z-6} * \text{MIBC} + 0.000003 \text{ CuSO}_4 * \text{Z-6} * \text{MIBC}$$

Figura 13

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados del grado de Zn



Nota: Gráfico de efecto estandarizado de las variables.

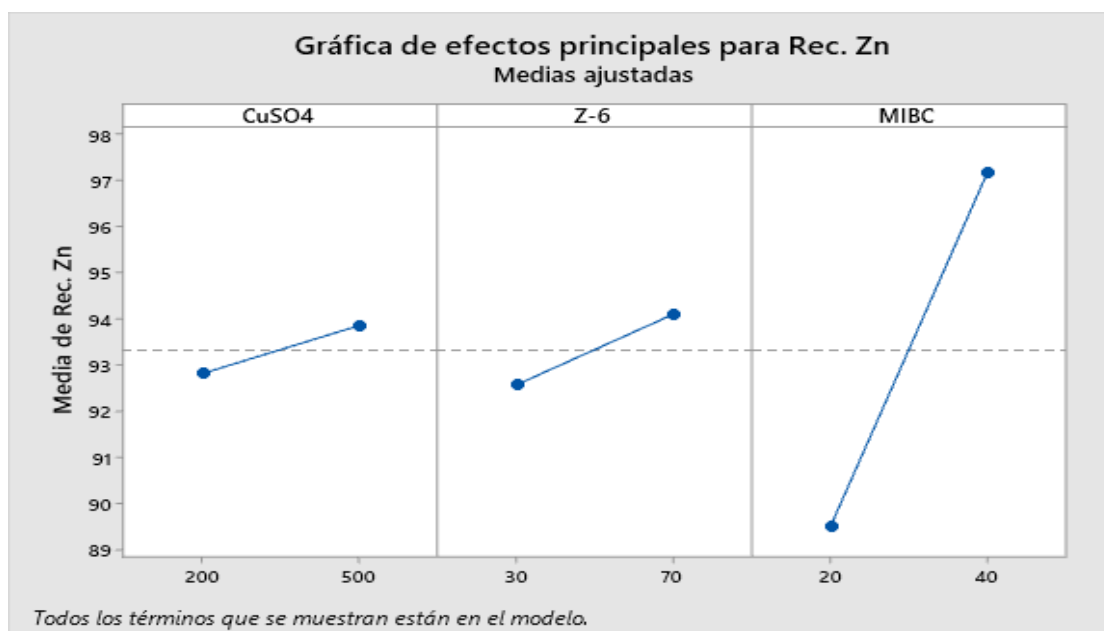
CAPÍTULO VI

DISCUSION DE RESULTADOS

Como consecuencia de la caracterización mineralógica se decidió evaluar la recuperación y la calidad de zinc, del concentrado, mediante el proceso de flotación de especies sulfuradas de alta ley, elaborando y desarrollando un diseño experimental factorial de 2 niveles, 3 factores y 2 réplicas, con el objetivo de analizar e identificar la contribución de la dosificación de los reactivos: sulfato de cobre, xantato Z-6 y MIBC, con niveles mínimos y máximos de: 200 a 500, 30 a 70 y 20 a 40, gr/TM respectivamente. El desarrollo de la matriz del diseño indico que los reactivos de mayor contribución para la recuperación de zinc es el MIBC, y en menor proporción el sulfato de cobre y el xantato Z-6 tal como se evidencia en la figura 14.

Figura 14

Gráfica de efectos principales para la recuperación de Zn

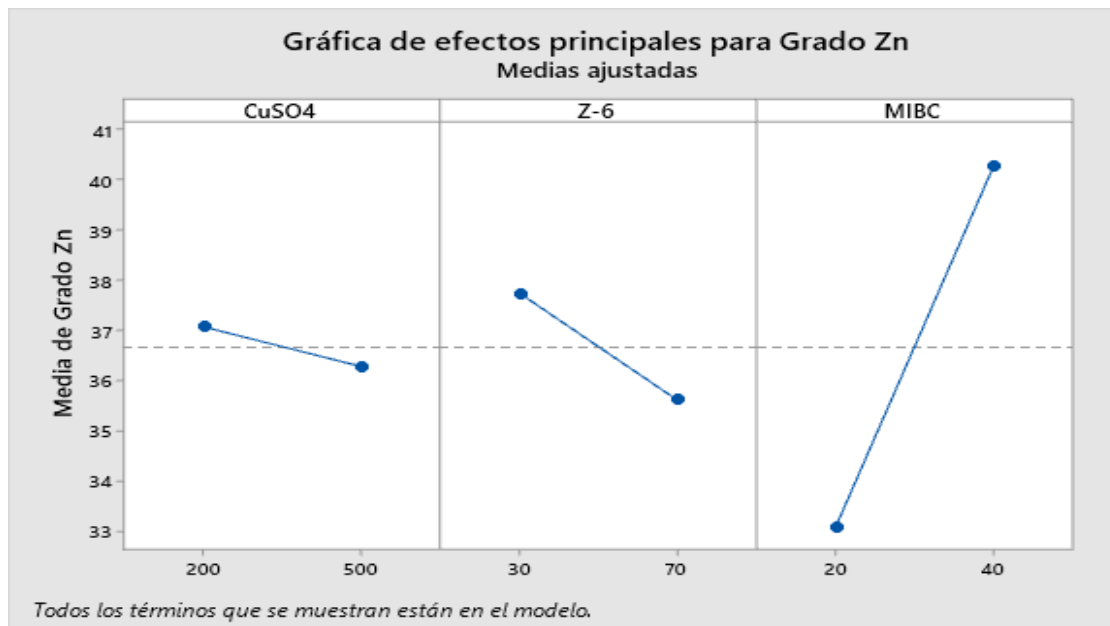


Nota: Gráfica presentada mediante puntos y líneas.

Así mismo, el ANOVA para la calidad de zinc en el concentrado indico que también el MIBC ejerce la mayor contribución sobre la calidad del concentrado, y se presenta en la figura 15.

Figura 15

Gráfica de efectos principales para el grado de Zn



Nota: Gráfica presentada mediante puntos y líneas.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

- La mineralogía del mineral presenta zinc como esfalerita, con una distribución porcentual de 15.65% y un grado de liberación de 82.74%; así mismo se observaron especies mineralógicas como: calcopirita, pirita, arsenopirita, magnetita, rutilo, goethita y gangas.
- La mejor prueba de flotación se realizó con una dosificación de 500 g- CuSO_4 /TM, 70 g- Z6 / TM, y 40 g - MIBC /TM, la cual alcanzó una recuperación de 98.17% de zinc, con una calidad del concentrado de 41.23%, y un ratio de 3.69, valores obtenidos en la prueba de orden 16.
- El ANOVA para la recuperación de zinc indicó que el reactivo MIBC, es la variable de mayor contribución, representando un 92.05 %, así mismo, en menor proporción el sulfato de cobre y el xantato Z-6, con una contribución de 3.67% y 1.70%, respectivamente.
- El modelo matemático para la recuperación de zinc determinado mediante diseños de experimentos factoriales tiene un coeficiente de determinación de 98.95% y es:

$$\text{Rec. Zn (\%)} = 73.96 + 0.01056 (\text{CuSO}_4) + 0.0879 (\text{Z-6}) + 0.5808 (\text{MIBC}) - 0.000012 (\text{CuSO}_4) * (\text{Z-6}) - 0.000350 (\text{CuSO}_4) * (\text{MIBC}) - 0.00245 (\text{Z-6}) * (\text{MIBC}) + 0.000003 (\text{CuSO}_4) * (\text{Z-6}) * (\text{MIBC}).$$
- La única variable de influencia en el grado del concentrado de zinc es la dosificación de MIBC, con una contribución del 75.11%, siendo determinante para la calidad del producto obtenido.

- El modelo matemático representativo para la calidad del concentrado presenta un coeficiente de determinación de 89.59%, y es:

$$\begin{aligned} \text{Grado Zn (\%)} = & 40.1 - 0.0156 \text{ CuSO}_4 - 0.210 \text{ Z-6} + 0.121 \text{ MIBC} + 0.000098 \\ & \text{CuSO}_4 * \text{Z-6} + 0.000098 \text{ CuSO}_4 * \text{MIBC} + 0.00289 \text{ Z 6} * \text{MIBC} + 0.000003 \\ & \text{CuSO}_4 * \text{Z-6} * \text{MIBC}. \end{aligned}$$

CAPÍTULO VIII

RECOMENDACIONES

- Evaluar otros tipos de celdas de flotación que podrían presentarse como atractivas para el procesamiento de minerales de alta ley en zinc.
- Analizar el proceso estudiado con otro tipo de reactivos que puedan incrementar la recuperación y el grado del concentrado.
- Estudiar el efecto de otras variables que son determinantes en el proceso de flotación como: flujo de aire inyectado a la celda, porcentaje de sólidos, entre otros.
- Proponer de acuerdo con los resultados reportados, realizar el pilotaje del procesamiento de las especies sulfuradas de alta ley, por flotación, en el departamento de Ancash.
- Evaluar la recuperación de otras especies mineralógicas que puedan aportar valor comercial, como la pirita.
- Optimizar el proceso y simular en software para obtener más información en el procesamiento de estos minerales.

CAPÍTULO IX

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anthony, J., Bideaux, R., Bladh, K., & Nichols, M. (1990). *Handbook of Mineralogy* (Vol. 1). Arizona, The USA: Mineral Data Publishing.
- Asociación Latinoamericana de Zinc. (2004). *LATIZA*. www.latiza.com
- Azañero, A. (2015). *Flotación y concentración de minerales*. Lima: Colecciones Jóvic.
- Azula, R. (2016). *Análisis del sector minero en concentrados de zinc en el Perú*. Tesis de maestría, Universidad de Piura, Lima.
- Ballester, A., Verdeja, L., & Sancho, J. (2000). *Metalurgia extractiva* (Vol. I). Síntesis.
- Castro, J. (2005). *Optimización del proceso de flotación de concentrado de zinc en la compañía minera "Yauliyacu" S.A. mediante diseños experimentales*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Chumbes, G. (2019). *Flotación del Zn marmatítica con alto contenido de pirrotita*. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Lima.
- Cornelis, C. (1986). *Manual de Mineralogía de Dana* (4ta ed.). Madrid: Editorial Reverte.
- Estudios mineros del Perú S.A.C. (2012). *Manual de minería*. Estudios mineros del Perú S.A.C. https://www.iestpoyon.edu.pe/web/documentos/Manual_de_Mineria.pdf
- Ganoza, J. (2010). Efecto del hierro en la flotación de zinc. *TECSUP*.
- Gershy-Damet, K., & Saldarriaga, M. (Setiembre de 2019). El zinc: Situación actual en el Perú y perspectivas. *Moneda*.
- International Zinc Association. (2018). *IZA*. www.iza.com
- Mateos, M. (2020). *Efecto de la salinidad en la flotación de esfalerita y marmatita*. Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia.

- Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Boletín Estadístico Minero*. Boletín, Ministerio de Energía y Minas, Lima.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (Julio de 2017). *Ministerio de Transportes y Comunicaciones*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/Mapas%20Departamentales/02-ANCASH.pdf
- Ortiz, A., & Julca, D. (2017). *Recuperación de oro en minerales sulfurados de baja ley en la provincia de Casma*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Palafox, C., De la Fuente, D., Castillo, J., & Reyes, J. (2010). Rediseño del circuito de flotación de zinc usando modelación matemática.
- Poma, M. (2020). *Estudio etnolexicográfico del léxico de los pobladores de Pomabamba, Áncash*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Rodriguez, K. (2015). *Evaluación de la flotación de zinc en la planta concentradora austria duvaz s.a.* Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Roman, E. (2018). *Optimización del proceso de flotación rougher zinc en minerales m4b (mineral de cobre (calcopirita) y zinc) sobre selectividad y recuperación de minerales. Mediante el uso de reactivos alternativos diamond*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Rubio, C., González Weller, D., Martín-Izquierdo, R., Revert, C., Rodríguez, I., & Hardisson, A. (2007, ene./feb.). El zinc: oligoelemento esencial. *SciELO*, XXII(1), 101-107.
- Sandoval, J. (2011). Experimentos experimentales.
- Schönnenbeck, M., & Neumann, F. (2021). *History of Zinc, its Production and Usage*. Bericht, Rheinzink.

- Solano, M. (2005). *Mobilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del cinc*. Tesis de doctorado, Universidad de Murcia, Murcia.
- Villareal, E., & Rodríguez, Í. (2009). *Informe Geoeconómico de la región de Ancash*. INGEMMET. Lima: Dirección de recursos minerales y energéticos.

ANEXOS

Anexo 1

Tipos de intercrecimientos

TIPOS GEOMETRICOS DE INTERCRECIMIENTOS ENTRE MINERALES											
POSIBILIDADES DE LIBERACION COMPLETA											
MALLAS < 150											
	I	II	III	IV	LIBERACION		I	II	III	IV	LIBERACION
1a SIMPLE					FACIL	2d COLOFORME					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE
1b AMEBOIDE					MODERADAMENTE FACIL	3a SANDWICH					MODERADAMENTE FACIL A DIFICIL
1c GRAFICO					IMPOSIBLE	3b ESTRATIFICADO					IMPOSIBLE
1d DISEMINADO					IMPOSIBLE	3c RETICULAR					IMPOSIBLE
1e INCLUSION					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE	3d VETEADO					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE
2a CORONA					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE	4a BORDE COMPUESTO					MUY DIFICIL
2b SUB-CORONA					MUY DIFICIL	4b COMPENETRACION					MODERADAMENTE DIFICIL
2c CONCENTRICO					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE	4c INTERSTICIAL					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE

Nota: Nos indican la posibilidad de liberación.