Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera,
Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

Caracterización geometalúrgica para la optimización de la recuperación de zinc mediante la flotación de minerales sulfurados en la provincia de Oyón

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Geometalurgia

AUTOR

Julio Brayan BERROCAL MAJERHUA

ASESOR

Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2026



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

Berrocal, J. (2026). *Caracterización geometalúrgica para la optimización de la recuperación de zinc mediante la flotación de minerales sulfurados en la provincia de Oyón*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Julio Brayan Berrocal Majerhua
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	73825450
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0008-6247-8137
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08608364
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-5818-8569
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Daniel Florencio Lovera Dávila
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06450640
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	José Alberto Terrones Alvarado
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08994472
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Luis Américo Rivera Del Valle
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10647742
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.0.5.3. Caracterización de materiales C.0.4.16. Lixiviación de minerales C.0.4.1. Desarrollo de modelos, simulación y optimización de procesos
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Laboratorio de Metalurgia Extractiva de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Urbanización: Ciudad Universitaria Avenida: Av. Venezuela 3789 Latitud: -12.0569 Longitud: -77.0850
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2024 - 2026
URL de disciplinas OCDE	Mineralogía: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.02 Minería, Procesamiento de minerales: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los veinticinco días del mes de setiembre del año dos mil veintiséis, siendo las diez horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen Nº 000422-2026-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 18 de setiembre del 2026, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«CARACTERIZACIÓN GEOMETALÚRGICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE ZINC MEDIANTE LA FLOTACIÓN DE MINERALES SULFURADOS EN LA PROVINCIA DE OYÓN»

Presentado por el Bach. **JULIO BRAYAN BERROCAL MAJERHUA**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **GEOMETALURGIA.**

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente Nº UNMSM-20230095642, de fecha 17 de octubre del 2023, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral Nº 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

MUY BUENO (17)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **GEOMETALURGIA** al Bach. **JULIO BRAYAN BERROCAL MAJERHUA.**

Siendo las 11:00 horas, se dio por concluido al acto académico.

DR. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente

MG. JOSÉ ALBERTO TERRONES ALVARADO
Secretario

DR. LUIS AMÉRICO RIVERA DEL VALLE
Miembro

DR. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Asesor

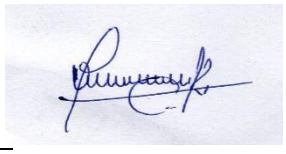
UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

Anexo 1
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, DR. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la **UPG** N° 000653-2023-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM **de la tesis**, cuyo título es **«CARACTERIZACIÓN GEOMETALÚRGICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE ZINC MEDIANTE LA FLOTACIÓN DE MINERALES SULFURADOS EN LA PROVINCIA DE OYÓN»,** presentado por el **bachiller** JULIO BRAYAN BERROCAL MAJERHUA, para optar el grado académico de MAGISTER EN GEOMETALURGIA, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **12%** 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 grado académico de MAGISTER EN GEOMETALURGIA.

Lima, 04 de Noviembre de 2026

Firma del Asesor 

Nombres y Apellidos del asesor: Vidal Sixto Aramburú Rojas

DNI: 08608364

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres Americo Berrocal Guillen y Ana Majerhua Rojas, por su paciencia y sabiduría, quienes me inculcaron de valores para llegar a ser quien soy hoy en día.

A mi hermana Naditza Berrocal Majerhua que han sido un ejemplo y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por estar presente siempre acompañándome en mis logros y fracasos, por darme un equilibrio en mi vida y una paz espiritual, agradezco a mis padres por su sacrificio, esfuerzo, apoyo y que gracias a sus enseñanzas pude salir adelante y a obrar correctamente. También a mi hermana por haber mantenido una unión familiar y haberme guiado con sus buenos consejos.

Finalmente agradezco a mi querida alma mater, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), a mi asesor de tesis el Dr. Vidal Aramburú Rojas y a todos los profesionales que han aparecido a lo largo de mi carrera universitaria y profesional, que por sus enseñanzas y anécdotas han aportado positivamente en mi persona, especialmente a mis maestros de la UNMSM, y a los ingenieros de BISA Ingeniería de Proyectos S.A., quienes me brindaron su apoyo y facilidades para sacar adelante este proyecto. Especialmente al Ing. Denis Lingan, quien se desempeña como Líder de Procesos.

ÍNDICE

RESUMEN XIII

ABSTRACT XIV

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I: Planteamiento Del Problema 3

1.1. Situación Problemática 3

1.2. Formulación del Problema 4

1.2.1. Problema General 4

1.2.2. Problemas Específicos 4

1.3. Objetivos de la Investigación 4

1.3.1. Objetivo General 4

1.3.2. Objetivos Específicos 4

1.4. Variables 5

1.5. Operacionalización de Variables 6

1.6. Justificación de la Investigación 8

1.6.1. Justificación Económica 8

1.6.2. Justificación Técnica 8

1.6.3. Justificación Ambiental y Social 9

1.7. Hipótesis 10

1.7.1. Hipótesis General 10

1.7.2. Hipótesis Específica 10

CAPÍTULO II: Marco Teórico 11

2.1. Antecedentes 11

2.2. Bases Teóricas 15

2.2.1. Geometalurgia 15

2.2.1.1. Análisis Geometalúrgico, Según el Objetivo 17

2.2.1.1.1. Difracción de Rayos X (DRX) 18

2.2.1.1.2. Fluorescencia de Rayos X (FRX) 18

2.2.1.1.3. Análisis de Termogravimetría (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) 19

2.2.1.1.4. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) 19

2.2.1.1.5. Microscopía Óptica de Luz Reflejada 19

2.2.2. Flotación 20

2.2.2.1. Reactivos de Flotación 25

2.2.2.2. Reactivos Colectores 25

2.2.2.3. Reactivos Modificadores 27

2.2.2.4. Reactivos Espumantes 30

2.2.2.5. Evaluaciones de Flotación a Nivel Laboratorio 31

2.2.2.6. Flotación Bulk Cobre-Plomo 32

2.2.2.7. Depresión de Sulfuros de Zinc 32

2.2.2.7.1. Depresión de Marmatita 33

2.2.2.7.2. Activación de los Sulfuros de Zinc 38

CAPÍTULO III: Metodología de la Investigación 41

3.1. Tipo de Investigación 41

3.2. Diseño de la Investigación 41

3.3. Análisis e Interpretación de la Información 42
3.4. Unidad de Análisis 42
3.5. Población y Muestra 42
3.6. Procedimiento, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información 43
CAPÍTULO IV: Resultados y Discusión 44
4.1. Microscopía Óptica del Mineral de Cabeza 44
4.1.1. Distribución Volumétrica y Grados de Liberación 45
4.1.2. Entrelazamiento de Minerales 47
4.2. Microscopía Electrónica del Mineral de Cabeza 53
4.2.1. Especies Minerales de Zinc y sus Amarres Mineralógicos 54
4.2.1.1. Grados de Liberación de la Esfalerita 55
4.2.1.2. Ensambles Mineralógicos de la Esfalerita 56
4.2.2. Especies Minerales de Plomo y sus Amarres Mineralógicos 59
4.2.2.1. Grados de Liberación de la Galena 60
4.2.2.2. Ensambles Mineralógicos de la Galena 62
4.2.3. Especies Minerales de Cobre y sus Amarres Mineralógicos 65
4.2.3.1. Grados de Liberación de la Calcopirita 67
4.2.3.2. Ensambles Mineralógicos de la Calcopirita 68
4.3. Análisis Químico del Mineral de Cabeza 72
4.4. Proceso Estándar de Flotación 72
4.4.1. Evaluación del Desplazamiento de Zinc en la Flotación Bulk Pb-Cu 75
4.4.1.1. Resultados del Diseño Experimental de Flotación Pb-Cu 76

4.4.1.2. Análisis de la Varianza para el Desplazamiento de Zinc..... 85

4.4.1.3. Valores para Mínimo Desplazamiento de Zinc en la Flotación Bulk Pb-Cu..... 86

4.4.2. Diseños Experimentales para la Flotación de Zinc..... 87

4.4.2.1. Resultados del Diseño Experimental de Flotación de Zn 88

4.4.2.2. Análisis de la Varianza para la Recuperación de Zinc 93

4.4.2.3. Análisis de la Varianza para la Ley de Zinc en el Concentrado 96

4.4.2.4. Optimización de la flotación de zinc 100

4.5. Valorización de Concentrados de Zinc en el Proceso Estándar..... 101

4.5.1. Valorización de Concentrados de Zinc en el Proceso Propuesto 102

CAPÍTULO V: Discusión de Resultados 104

RECOMENDACIONES..... 110

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 111

ANEXOS 116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Resumen del proceso de flotación. 21

Figura 2 Clasificación de minerales polares. 21

Figura 3 Representación esquemática del proceso de flotación. 22

Figura 4 Variables de flotación. 24

Figura 5 Clasificación de reactivos colectores. 27

Figura 6 Efecto de los espumantes. 30

Figura 7 Acción del espumante. 31

Figura 8 Diagrama de flujo de la parte experimental. 43

Figura 9 Volumetría de las especies encontradas. 45

Figura 10 Liberación de las especies encontradas. 46

Figura 11 Distribución total de las especies entrelazadas. 48

Figura 12 Micrografía con presencia de ef, py y gn. 49

Figura 13 Micrografía con presencia de ef, Au y GGs. 49

Figura 14 Micrografía con presencia de py, gn, ef y GGs. 50

Figura 15 Micrografía con presencia de cp, gn, hm, gt y GGs. 50

Figura 16 Micrografía con presencia de cp, ef y GGs. 51

Figura 17 Micrografía con presencia de ef, bn, Au y GGs. 51

Figura 18 Micrografía con presencia de el y ef. 52

Figura 19 Micrografía con presencia de bn, cp y GGs. 52

Figura 20 Composición de minerales de Zn. 54

Figura 21 Representación del porcentaje de liberación - esfalerita/marmatita. 56

Figura 22 Representación gráfica de las asociaciones de Zn. 57

Figura 23 Partículas según su liberación – Zn. 58

Figura 24 Asociaciones de los minerales de Zn. 59

Figura 25 Composición de minerales de Pb. 60

Figura 26 Representación del porcentaje de liberación – galena. 62

Figura 27 Representación gráfica de las asociaciones de Pb. 63

Figura 28 Partículas según su liberación – Pb. 64

Figura 29 Asociaciones de los minerales de Pb. 65

Figura 30 Composición de minerales de Cu. 66

Figura 31 Representación del porcentaje de liberación – calcopirita. 68

Figura 32 Representación gráfica de las asociaciones de Cu. 69

Figura 33 Partículas según su liberación – Cu. 70

Figura 34 Asociaciones de los minerales de Cu. 71

Figura 35 Gráfica normal de efectos estandarizados – Recuperación de Zn en la flotación bulk Pb-Cu. 86

Figura 36 Diagrama de Pareto de la recuperación de Zn en la flotación Zn. 94

Figura 37 Gráfica de contorno de la recuperación de Zn en la flotación Zn. 95

Figura 38 Gráfica de efectos principales de la recuperación de Zn en la flotación Zn. 96

Figura 39 Diagrama de Pareto de la ley de Zn en la flotación Zn. 98

Figura 40 Gráfica de contorno de la ley de Zn en la flotación Zn. 99

Figura 41 Gráfica de efectos principales de la ley de Zn en la flotación Zn. 99

Figura 42 Optimización de la flotación Zn. 101

Figura 43 Gráfica de efectos normales de la recuperación de Zn. 106

Figura 44 Gráfica de probabilidad normal de la calidad de Zn. 107

Figura 45 Gráfica de probabilidad normal de la recuperación de Zn. 107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de las variables. 7

Tabla 2 Especies identificados con microscopía óptica. 44

Tabla 3 Volumen y liberación de las especies encontradas. 47

Tabla 4 Volumen y liberación de las especies entrelazadas. 48

Tabla 5 Especies identificados con microscopía electrónica. 53

Tabla 6 Especies identificados con microscopia electrónica – Zn. 54

Tabla 7 Distribución de masas según la granulometría – esfalerita/marmatita. 55

Tabla 8 Porcentaje en masa según la granulometría – esfalerita/marmatita. 55

Tabla 9 Asociaciones de minerales de Zn. 57

Tabla 10 Especies identificados con microscopia electrónica – Pb. 60

Tabla 11 Distribución de masas según la granulometría – galena. 61

Tabla 12 Porcentaje en masa según la granulometría – galena. 61

Tabla 13 Asociaciones de minerales de Zn. 62

Tabla 14 Especies identificados con microscopia electrónica – Cu. 66

Tabla 15 Distribución de masas según la granulometría – calcopirita. 67

Tabla 16 Porcentaje en masa según la granulometría – calcopirita. 67

Tabla 17 Asociaciones de minerales de Zn. 69

Tabla 18 Ensayos químicos del mineral de cabeza. 72

Tabla 19 Condiciones de operación de la flotación Pb-Cu. 73

Tabla 20 Balance de la flotación Pb-Cu. 73

Tabla 21 Condiciones de operación de la flotación Zn. 74

Tabla 22 Balance de la flotación Zn. 74

Tabla 23 Valores de las variables analizadas en la flotación bulk Pb-Cu. 75

Tabla 24 Número de pruebas en la flotación bulk Pb-Cu. 76

Tabla 25 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 1. 77

Tabla 26 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 2. 77

Tabla 27 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 3. 78

Tabla 28 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 4. 78

Tabla 29 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 5. 79

Tabla 30 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 6. 79

Tabla 31 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 7. 80

Tabla 32 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 8. 80

Tabla 33 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 9. 81

Tabla 34 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 10. 81

Tabla 35 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 11. 82

Tabla 36 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 12. 82

Tabla 37 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 13. 83

Tabla 38 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 14. 83

Tabla 39 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 15. 84

Tabla 40 Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 16. 84

Tabla 41 Anova de la flotación Pb-Cu. 85

Tabla 42 Mínimo valor de la recuperación de Zn en la flotación Pb-Cu. 87

Tabla 43 Ajuste de variables independientes para el mínimo desplazamiento de Zn en la flotación Pb-Cu. 87

Tabla 44 Valores de las variables analizadas en la flotación Zn. 88

Tabla 45 Número de pruebas en la flotación Zn. 88

Tabla 46 Prueba de la flotación Zn 1. 89

Tabla 47 Prueba de la flotación Zn 2. 89

Tabla 48 Prueba de la flotación Zn 3. 90

Tabla 49 Prueba de la flotación Zn 4. 90

Tabla 50 Prueba de la flotación Zn 5. 91

Tabla 51 Prueba de la flotación Zn 6. 91

Tabla 52 Prueba de la flotación Zn 7. 92

Tabla 53 Prueba de la flotación Zn 8. 92

Tabla 54 Anova de la flotación Zn – recuperación. 93

Tabla 55 Resumen de datos estadístico obtenido del Anova de la flotación Zn – Recuperación. 94

Tabla 56 Anova de la flotación Zn – ley 97

Tabla 57 Resumen de datos estadístico obtenido del Anova de la flotación Zn – ley. 97

Tabla 58 Máximos valores de recuperación y ley de Zn. 100

Tabla 59 Ajuste de los variables independientes para maximizar la recuperación y ley de Zn. 100

Tabla 60 Contrato de comercialización del concentrado de Zn en el procesos estándar. 102

Tabla 61 Contrato de comercialización del concentrado de Zn en el procesos propuesto. 103

RESUMEN

En la investigación se realizó la microscopía óptica de una muestra de mineral representativa de la zona de Oyón, la cual determinó la presencia de especies minerales como calcopirita, bornita, pirita, pirrotita, esfalerita, galena, oro, electrum, hematita, goethita, y gangas. Las especies de Zn se identificaron al microscopio óptico como esfaleritas marmatíticas, la cual representó una distribución volumétrica de 17.24%, y 99.51% de especies libres, también se pudo identificar especies de Cu como calcopirita y bornita, con distribuciones de 5.37% y 0.48% respectivamente, especies de Pb como galena con una distribución de 7.41%, además de trazas de oro y electrum. Para conocer a detalle la mineralogía de las gangas se realizó una microscopía TIMA, logrando identificar especies de epidota, granate, cuarzo, muscovita, clorita, biotita, hematita, goethita, siderita, smithsonita, cerusita, anglesita, rutilo, y calcita.

En base a la mineralogía de la muestra problema, se desarrollaron pruebas de flotación para evaluar el desplazamiento de Zn en el concentrado de flotación bulk Pb-Cu, alcanzando un valor mínimo de 5.14% para dosificaciones de 120 g/TM de $ZnSO_4$, 60 g/TM de NaCN, y un pH de 9. La etapa de flotación de Zn evaluó la dosificación de los reactivos $CuSO_4$ y Z-11, elaborando un diseño experimental factorial de dos niveles, dos factores y dos replicas, alcanzando la mayor de recuperación de 97.61% con una ley de 48.06%, empleando 300 g/TM de $CuSO_4$, y 40 g/TM de Z-11. La ecuación que predice la recuperación de Zn en el proceso de flotación quedo definido como: Rec. Zn (%) = 54.082 + 0.15894($CuSO_4$) + 0.4771(Z-11) - 0.001953($CuSO_4$*Z-11), con un coeficiente de correlación del 99.66 %, y los valores optimizados de las variables fueron de: 300 g/TM de $CuSO_4$ y 40 g/TM de Z-11, para alcanzar una recuperación de 97.41% con una ley de 47.60% de Zn.

ABSTRACT

In the research, optical microscopy was carried out on a representative mineral sample from the Oyón area, which determined the presence of mineral species such as chalcopyrite, bornite, pyrite, pyrrhotite, sphalerite, galena, gold, electrum, hematite, goethite, and gangues. The Zn species were identified under the optical microscope as marmatitic sphalerites, which represented a volumetric distribution of 17.24%, and 99.51% of free species, Cu species such as chalcopyrite and bornite could also be identified, with distributions of 5.37% and 0.48% respectively, Pb species such as galena with a distribution of 7.41%, in addition to traces of gold and electrum. To understand the mineralogy of the gangues in detail, a TIMA microscopy was performed, identifying species of epidote, garnet, quartz, muscovite, chlorite, biotite, hematite, goethite, siderite, smithsonite, cerussite, anglesite, rutile, and calcite.

As a result of the mineralogy of the sample, flotation tests were developed to evaluate the displacement of Zn in the Pb-Cu bulk flotation concentrate, reaching a minimum value of 5.14% for dosages of 120 g/MT of $ZnSO_4$, 60 g/ TM of NaCN, and a pH of 9. The Zn flotation stage evaluated the dosage of the reagents $CuSO_4$ and Z-11, developing a factorial experimental design of two levels, two factors and two replicates, reaching the highest recovery of 97.61. % with a grade of 48.06%, using 300 g/TM of $CuSO_4$, and 40 g/TM of Z-11. The equation that predicts the recovery of Zn in the flotation process was defined as: Rec. Zn (%) = 54.082 + 0.15894($CuSO_4$) + 0.4771(Z-11) - 0.001953($CuSO_4$*Z-11), with a coefficient correlation of 99.66%, and the optimized values of the variables were: 300 g/TM of $CuSO_4$ and 40 g/TM of Z-11, to achieve a recovery of 97.41% with a grade of 47.60% of Zn.

INTRODUCCIÓN

La creciente complejidad en las características físicas y químicas de los minerales ha generado la necesidad de desarrollar estudios de caracterización cada vez más detallados y precisos. A través de estos estudios es posible identificar las fases minerales presentes, diferenciando aquellas de valor económico de las consideradas como ganga, así como establecer su distribución dentro del yacimiento (Melgarejo et al., 2010). Esta información resulta fundamental para comprender el comportamiento del mineral durante su procesamiento.

En este contexto, la caracterización mineralógica no solo permite describir la composición del material, sino también analizar aspectos como el grado de liberación, la granulometría y las propiedades fisicoquímicas que influyen directamente en la eficiencia de los procesos metalúrgicos (Ruiz et al., 2018). Asimismo, factores como la variabilidad mineralógica, el tamaño de partícula y la presencia de elementos perjudiciales pueden condicionar la selección y el desempeño de las rutas de tratamiento.

Según Rojas (2010), la elección de las técnicas de caracterización depende de los objetivos específicos del estudio, pudiendo abarcar desde métodos instrumentales avanzados, como la difracción y fluorescencia de rayos X o la microscopía electrónica, hasta análisis más convencionales como la granulometría y los ensayos químicos. La combinación adecuada de estas herramientas permite obtener resultados confiables, considerando criterios de precisión, exactitud y viabilidad operativa.

En ese sentido, surge la necesidad de realizar una caracterización geometalúrgica de los minerales sulfurados presentes en la provincia de Oyón, con la finalidad de generar información técnica que contribuya a optimizar la recuperación de zinc mediante el proceso de flotación. De

esta manera, se busca mejorar la eficiencia del proceso y, en consecuencia, incrementar la rentabilidad de la operación minera.

CAPÍTULO I: Planteamiento Del Problema

1.1. Situación Problemática

El conocimiento detallado de la mineralogía constituye un aspecto clave en el diseño y optimización de los procesos de concentración en plantas mineras. Sin embargo, en muchos casos, este análisis no se desarrolla de manera integral a lo largo de todas las etapas del procesamiento, lo que limita la capacidad de respuesta frente a la variabilidad del mineral durante la explotación. En los yacimientos polimetálicos, la presencia simultánea de minerales de plomo, zinc y cobre genera interacciones complejas que afectan el desempeño del proceso de flotación. Estas asociaciones mineralógicas, especialmente en sistemas Pb-Zn y Cu-Zn, influyen directamente en la selectividad del proceso, dificultando la adecuada separación de los minerales valiosos. Adicionalmente, la existencia de ciertos elementos y compuestos, como cloruros, nitratos o especies con contenidos de arsénico, antimonio y otros elementos penalizables, puede provocar la activación no deseada de minerales como la esfalerita, alterando su comportamiento durante la flotación. Esto repercute negativamente en la calidad del concentrado y en la eficiencia global del proceso (Pérez et al., 2010). Por otro lado, la presencia de minerales oxidados de plomo, zinc y cobre representa una limitación adicional, debido a que estos no responden de manera eficiente a los procesos convencionales de flotación, generando pérdidas en la recuperación de metales valiosos. Asimismo, factores como la variabilidad en la composición mineralógica, el grado de liberación y las características texturales del mineral condicionan el rendimiento metalúrgico. En este contexto, la falta de una caracterización geometalúrgica adecuada dificulta la identificación de las variables críticas del proceso y la implementación de estrategias efectivas para optimizar la recuperación de zinc. Por ello, resulta necesario desarrollar un estudio que integre la

caracterización mineralógica con el análisis de variables operativas, permitiendo mejorar la eficiencia del proceso de flotación en minerales sulfurados de la provincia de Oyón. (Ramos & Orihuela, 2017).

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

- ¿De qué manera la caracterización geometalúrgica de minerales sulfurados contribuye en la optimización de la recuperación de Zn mediante flotación, en la provincia de Oyón?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo podemos realizar la caracterización geometalúrgica de los minerales sulfurados en la provincia de Oyón?
- ¿Qué variables contribuyen en la recuperación de zinc en el proceso de flotación?
- ¿Cómo podemos optimizar la recuperación de zinc mediante diseños experimentales de flotación de minerales sulfurados de Oyón?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

- Caracterizar la muestra de mineral sulfurado para optimizar la recuperación de Zn en el proceso de flotación en la provincia de Oyón.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar la caracterización geometalúrgica de los minerales sulfurados en la provincia de Oyón.

- Identificar las variables contribuyentes en la recuperación de zinc mediante el proceso de flotación.
- Optimizar la recuperación de zinc mediante diseños experimentales de la flotación de minerales sulfurados de Oyón.

1.4. Variables

En la etapa de flotación bulk Pb-Cu, se analizó el desplazamiento de Zn en el concentrado, y las variables que se estudiaron fueron:

Variable Dependiente

- Recuperación de zinc (%)

Variables Independientes

- Dosificación de sulfato de zinc al 5 %.
- NaCN al 1 %.
- pH

Variables Constantes

- Dosificación de MIBC
- Dosificación de AR-3418
- % Sólidos
- Tiempo de acondicionamiento (min)
- Tiempo de flotación (min)
- RPM Celda de Flotación (N° de vueltas por min.)
- Flujo de aire (L/min)

En la etapa de flotación de Zn, se analizó la recuperación y calidad del concentrado de Zn, y las variables que se estudiaron fueron:

Variable Dependiente

- Recuperación de zinc (%)
- Grado de concentrado Zn (%)

Variables Independientes

- Dosificación de sulfato de cobre al 5 %.
- Z-11 al 1 %.

Variables Constantes

- Dosificación de MIBC
- pH
- % Sólidos
- Tiempo de acondicionamiento (min)
- Tiempo de flotación (min)
- RPM Celda de Flotación (N° de vueltas por min.)
- Flujo de aire (L/min)

1.5. Operacionalización de Variables

Con la finalidad de evaluar la influencia de las variables involucradas en el proceso de flotación, se emplearon herramientas de balance metalúrgico y análisis estadístico. Los datos obtenidos a partir de las pruebas experimentales fueron procesados mediante hojas de cálculo y el software Minitab 19, lo que permitió evaluar las relaciones existentes entre las variables independientes y dependientes.

Este enfoque facilitó la interpretación de los resultados experimentales y la identificación de las variables con mayor incidencia en la recuperación y calidad del zinc, contribuyendo así a la optimización del proceso.

Tabla 1

Operacionalización de las variables.

Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos de medición
Recuperación de Zn (%)	Porcentaje de zinc recuperado en el concentrado respecto al zinc total presente en el mineral alimentado.	Recuperación de metales	% de zinc recuperado en el concentrado	Balance metalúrgico
Dosificación de sulfato de zinc al 5%	Cantidad de sulfato de zinc ($CuSO_4$) añadido al proceso para controlar la flotación de zinc.	Reactivos químicos	g de $CuSO_4$ por tonelada de mineral (g/TM)	Balanza para pesaje
Cianuro de sodio al 1%	Concentración de cianuro de sodio (NaCN) utilizado como reactivo en la flotación.	Reactivos químicos	g de NaCN por tonelada de mineral (g/TM)	Balanza para pesaje
pH	Nivel de acidez o alcalinidad del medio de flotación, que influye en la selectividad de la flotación.	Condiciones del medio	Unidades de pH	Medidor de pH
Recuperación de Zn (%)	Porcentaje de zinc recuperado en el concentrado respecto al zinc total presente en el mineral alimentado.	Recuperación de metales	% de zinc recuperado en el concentrado	Balance metalúrgico
Grado de concentrado Zn (%)	Porcentaje de zinc presente en el concentrado final.	Calidad del concentrado	% de zinc en el concentrado	Análisis químico mediante absorción atómica (AAS)
Dosificación de sulfato de cobre al 5%	Cantidad de sulfato de cobre ($CuSO_4$) disuelto al 5% utilizado para promover la flotación selectiva.	Reactivos químicos	g de $CuSO_4$ por tonelada de mineral (g/TM)	Balanza para pesaje
Z-11 al 1%	Concentración de Z-11, un reactivo colector utilizado al 1% para la flotación selectiva de zinc.	Reactivos químicos	g de Z-11 por tonelada de mineral (g/TM)	Balanza para pesaje

Nota: Se consideraron las variables dependientes e independientes del estudio.

1.6. Justificación de la Investigación

El desarrollo de la presente investigación permitirá generar mejoras concretas en el proceso de flotación de minerales sulfurados, optimizando la recuperación de zinc mediante el uso de criterios geometalúrgicos. Asimismo, este estudio aporta al fortalecimiento del conocimiento aplicado en el procesamiento de minerales, contribuyendo a una operación más eficiente y a la reducción de pérdidas metalúrgicas en plantas concentradoras.

1.6.1. Justificación Económica

El zinc es un metal estratégico a nivel mundial, utilizado en sectores clave como la construcción, el transporte y la industria automotriz. Incrementar la recuperación y calidad del zinc en los concentrados permitirá reducir las pérdidas económicas asociadas a penalizaciones por elementos contaminantes y a la baja eficiencia de recuperación. Asimismo, optimizar el proceso fortalecerá la competitividad de las operaciones mineras en Oyón, generando mayores ingresos y contribuyendo al desarrollo económico de la región mediante el incremento de regalías mineras, generación de empleo y mejora en la balanza comercial nacional por la exportación de zinc de alta pureza.

1.6.2. Justificación Técnica

Desde una perspectiva técnica, la caracterización geometalúrgica proporciona información detallada sobre la composición mineralógica, textural y química del mineral, lo que permite diseñar estrategias específicas de flotación para maximizar la selectividad y eficiencia del proceso. La implementación de diseños experimentales basados en estas características garantizará la adaptación a las variaciones mineralógicas que ocurren durante la explotación, minimizando los problemas asociados con la activación de minerales no deseados, la presencia de óxidos y

elementos penalizables como arsénico y antimonio. Esto no solo mejorará la recuperación de zinc, sino que también establecerá procedimientos replicables para el procesamiento de minerales sulfurados en otras regiones.

1.6.3. Justificación Ambiental y Social

La optimización del proceso de flotación también tendrá un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental, al minimizar la generación de pasivos ambientales relacionados con el mal manejo de los residuos minerales. Desde el ámbito social, el fortalecimiento de la industria minera de Oyón contribuirá al bienestar de las comunidades locales mediante la creación de empleo, inversión en infraestructura y programas de responsabilidad social empresarial.

En los últimos años, la gestión ambiental en procesos de flotación ha cobrado mayor relevancia debido al impacto que generan los reactivos químicos en los efluentes y relaves. Estudios recientes (Zhang et al., 2021; Cisternas & Gálvez, 2022) demuestran que reactivos como NaCN, $ZnSO_4$ y colectores sulfhídricos incrementan la carga contaminante del agua residual, afectando la calidad del recurso hídrico y elevando los costos de tratamiento. Por ello, la optimización geometalúrgica no solo busca maximizar la recuperación de zinc, sino también reducir el impacto ambiental mediante la selección de dosificaciones mínimas efectivas y el control del pH, contribuyendo a una operación más sostenible y alineada con las normativas ambientales vigentes del MINAM y OEFA.

1.7. Hipótesis

1.7.1. Hipótesis General

- La caracterización geometalúrgica de los minerales sulfurados permitirá optimizar la recuperación de Zn mediante el proceso de flotación, en la provincia de Oyón.

1.7.2. Hipótesis Específica

- La caracterización geometalúrgica permitirá identificar las especies de minerales involucrados, distribución volumétrica, grados de liberación y enlaces presentes, en los minerales sulfurados de la provincia de Oyón.
- Las variables de pH y dosificación de reactivos permitirán recuperar Zn mediante el proceso de flotación.
- Los diseños experimentales del proceso de flotación de minerales de sulfurados permitirán optimizar la recuperación de zinc en la provincia de Oyón.

CAPÍTULO II: Marco Teórico

2.1. Antecedentes

En la última década, la geometalurgia ha evolucionado hacia modelos predictivos que integran mineralogía cuantitativa, variabilidad espacial y respuesta metalúrgica en tiempo real. Investigaciones recientes (Navarro et al., 2023; Lamberg & Vianna, 2022) destacan que la caracterización multiescala permite anticipar el comportamiento del mineral en flotación, especialmente en sistemas polimetálicos donde la activación superficial y la textura mineral influyen en la selectividad del proceso.

Williams & Holtzhausen (2001) analizaron yacimientos pertenecientes a Anglo American con el propósito de mejorar el procesamiento por flotación de minerales polimetálicos. En su estudio, identificaron que la complejidad mineralógica del depósito Broken Hill podía ser manejada mediante la mezcla con mineral proveniente de la unidad Swartberg. Determinaron que este último estaba compuesto principalmente por unidades litológicas con presencia de magnetita, cuarcita y anfibolita. Asimismo, observaron que la pirita constituía el sulfuro predominante, mientras que la galena representaba el principal mineral de valor económico, acompañada por calcopirita y esfalerita. Entre los principales problemas detectados, destacaron la presencia de bismuto en forma de cosalita y bismutinita, asociado a calcopirita y galena, lo cual afectaba el desempeño metalúrgico. Concluyeron que la variabilidad mineralógica, junto con factores como la dureza del mineral y la oxidación, influyen directamente en la eficiencia del proceso, proponiendo el uso de mezclas controladas de alimentación para optimizar la recuperación.

Castro (2005) desarrolló una investigación enfocada en la optimización del proceso de flotación de zinc en la Compañía Minera Yauliyacu S.A., utilizando diseños experimentales. Evaluó la influencia de variables como la dosificación de sulfato de cobre, el colector Z-11 y el pH del sistema. Como resultado, determinó condiciones óptimas que permitieron alcanzar recuperaciones cercanas al 94% en pruebas teóricas y alrededor del 90% a nivel experimental. El autor concluyó que tanto el sulfato de cobre como el control del pH son variables determinantes en la eficiencia del proceso de flotación de zinc.

Palafox et al. (2010) propusieron un rediseño del circuito de flotación de zinc mediante el uso de modelamiento matemático, con el objetivo de mejorar la recuperación del metal y la calidad del concentrado. A través de simulaciones, lograron optimizar el flujo del proceso, obteniendo incrementos en la recuperación de zinc desde valores cercanos al 93% hasta aproximadamente 96.7%, manteniendo constante la ley del concentrado. Este estudio resalta la importancia del análisis integral del circuito para mejorar el desempeño metalúrgico.

Roman (2018) evaluó la optimización del proceso de flotación rougher de zinc en minerales polimetálicos, analizando la selectividad y recuperación mediante el uso de reactivos alternativos. En particular, estudió el reemplazo del colector SIPX por el reactivo Diamond F4224LI, logrando mejoras en la calidad del concentrado, aunque con una ligera disminución en la recuperación. Asimismo, evidenció una reducción en el consumo de cal, manteniendo un pH óptimo del sistema. Sus resultados demuestran que la selección de reactivos influye significativamente en el equilibrio entre recuperación y calidad del concentrado.

Chumbes (2019) investigó el comportamiento de la flotación de zinc marmatítico en presencia de pirrotita, identificando que este mineral puede activarse bajo ciertas condiciones de pH, afectando negativamente la selectividad del proceso. Determinó que el control de la

granulometría y del pH resulta fundamental para evitar pérdidas de material fino y mejorar la calidad del concentrado. A nivel de planta, la aplicación de estos parámetros permitió incrementar tanto la ley como la recuperación del zinc.

Rodriguez (2015) analizó el proceso de flotación de zinc en la planta concentradora Austria Duvaz S.A., con el objetivo de mejorar tanto la recuperación como la calidad del concentrado. Sus resultados evidenciaron que la incorporación de una etapa de remolienda en el circuito de zinc permite incrementar la recuperación del metal. Asimismo, recomendó ajustar la dosificación de sulfato de zinc en el circuito bulk Pb-Cu para reducir el desplazamiento del zinc hacia etapas no deseadas.

Osti et al. (2017) estudiaron la recuperación de metales valiosos a partir de relaves hidrometalúrgicos de zinc mediante pruebas de flotación. Previamente, realizaron una caracterización detallada del material, incluyendo análisis granulométrico, difracción de rayos X y pruebas químicas. Identificaron que el relave presentaba una granulometría fina y alta complejidad mineralógica. A pesar de ello, lograron obtener recuperaciones interesantes de zinc, plomo y plata, destacando el potencial de estos residuos como fuente secundaria de metales.

Jianmin et al. (2017) evaluaron el efecto de reactivos combinados, específicamente citrato de sodio y pirofosfato, en la separación por flotación de minerales polimetálicos de plomo y zinc. Los resultados demostraron que esta combinación mejora la selectividad del proceso, alcanzando recuperaciones superiores al 80% para plomo y mayores al 90% para zinc.

Bin et al. (2022) investigaron un proceso integral para la recuperación selectiva de cobre, zinc e hierro en minerales polimetálicos, utilizando colectores específicos como el Z-200. A partir de sus ensayos, lograron recuperaciones superiores al 85% para los metales estudiados,

evidenciando la importancia de la selección adecuada de reactivos en la optimización del proceso de flotación.

Tiu et al. (2021) abordaron el estudio del yacimiento Lappberget desde un enfoque geometalúrgico, integrando herramientas de caracterización mineralógica avanzada como el análisis QEMSCAN. A partir de este análisis, identificaron una amplia diversidad de especies portadoras de plata, entre las que destacan la plata nativa, discrasita, allargentum, minerales del grupo tetraedrita, electrum, acantita y estefanita. Los resultados permitieron establecer la complejidad mineralógica del depósito y su influencia en el comportamiento metalúrgico, evidenciando la importancia de una caracterización detallada para definir estrategias eficientes de procesamiento.

Kyaw et al. (2021) desarrollaron un estudio orientado a la recuperación de zinc a partir de minerales polimetálicos, evaluando la influencia de distintos reactivos y condiciones operativas en el proceso de flotación. Mediante ensayos experimentales, analizaron variables como el tipo de colector, el control del pH y la interacción entre especies minerales, determinando que la adecuada selección de reactivos y condiciones del medio permite mejorar significativamente la selectividad y la recuperación del zinc. Sus resultados resaltan la necesidad de adaptar los parámetros operativos en función de la mineralogía del depósito para optimizar el desempeño del proceso.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Geometalurgia

La geometalurgia es un enfoque que relaciona la información geológica con el comportamiento metalúrgico de los minerales durante su procesamiento. Su aplicación permite comprender cómo las características mineralógicas, texturales y químicas influyen en etapas como la conminución y la flotación, facilitando la mejora de los procesos y la toma de decisiones operativas en planta (Suther y otros, 2004; Lane y otros, 2008; Lamberg, 2011; Lishchuk y otros, 2020).

La geometalurgia ha ganado creciente prominencia gracias al avance de técnicas y equipos modernos de caracterización mineralógica, los cuales desempeñan un papel crucial en la producción de minerales y concentrados de alta ley. Además, su relevancia se destaca en la predicción de las características del procesamiento de minerales y en la mitigación de riesgos asociados con nuevos descubrimientos minerales, especialmente aquellos catalogados como depósitos de baja ley, pero de alto tonelaje.

Dentro del ámbito de la geometalurgia, una parte esencial se centra en la caracterización de los minerales de mena y ganga. Este proceso permite no solo detallar la variabilidad mineralógica y las texturas presentes, sino también clasificarlas por sectores específicos. La clasificación por sectores es fundamental, ya que cada bloque así definido exhibe una respuesta metalúrgica única en términos de recuperación y calidad de los componentes valiosos. Estos componentes, estrechamente vinculados al valor económico, son determinantes para definir la rentabilidad general de un proceso minero (Lotter, 2011; Evans y otros, 2011; Lang y otros, 2018).

El análisis geometalúrgico arroja una serie de resultados esenciales que proporcionan una comprensión exhaustiva de un depósito mineral, abordando aspectos cruciales para la planificación y optimización de procesos:

a. Identificación de especies minerales: El estudio permite el reconocimiento detallado de las distintas especies minerales presentes en el yacimiento, junto con un análisis minucioso de sus características texturales, leyes, distribución volumétrica, enlaces y posibilidades de liberación. Esta información es fundamental para comprender la complejidad mineralógica del depósito.
b. Concentración de especies perjudiciales: Se evalúa la concentración de especies o elementos perjudiciales durante el proceso de extracción y procesamiento. Identificar y cuantificar estos componentes adversos es crucial para implementar estrategias efectivas de mitigación y control ambiental.
c. Características físicas del mineral: Se detallan las propiedades físicas del macizo rocoso, incluyendo su dureza, abrasividad y otras características relevantes. Estos datos son esenciales para diseñar equipos y procesos que puedan manejar eficientemente las condiciones específicas del depósito.
d. Determinación de la malla de liberación: Se establece la malla de liberación de las partículas de interés económico, proporcionando información crucial sobre el tamaño óptimo de fragmentación para lograr una recuperación eficiente durante el procesamiento.
e. Recuperación de valiosos: El estudio evalúa la eficacia de diferentes procesos para la recuperación de especies minerales específicas, permitiendo identificar las mejores prácticas y optimizar los métodos de extracción.

f. Características físicas de los productos del procesamiento: Se analizan las propiedades físicas de los productos resultantes del procesamiento, asegurando que cumplan con los estándares de calidad y especificaciones del mercado.

g. Consumo de Reactivos: Se determina el consumo o la necesidad de reactivos químicos en sectores específicos del depósito, lo que facilita la gestión eficiente de insumos y la reducción de costos operativos.

h. Planificación de extracción: Se desarrolla un plan detallado de extracción que incluye la secuencia de sectores con mejor recuperación. Este enfoque estratégico contribuye a un flujo de caja óptimo y a una gestión financiera efectiva del proyecto minero.

En conjunto, estos resultados proporcionan una base integral para la toma de decisiones informadas en la gestión y operación de depósitos minerales, contribuyendo significativamente a la rentabilidad y sostenibilidad de los procesos mineros.

2.2.1.1. Análisis Geometalúrgico, Según el Objetivo

La caracterización de muestras provenientes de un yacimiento se realiza mediante la aplicación de diversas técnicas analíticas especializadas. Entre las más empleadas se encuentran la difracción y fluorescencia de rayos X, así como la microscopía óptica y la microscopía electrónica de barrido, las cuales permiten identificar y analizar las fases minerales presentes. Asimismo, se utilizan métodos como la espectrofotometría de absorción atómica y el análisis térmico para complementar la evaluación del material. De igual manera, se recurre a procedimientos analíticos clásicos, tales como la volumetría, gravimetría y la espectrofotometría en el rango ultravioleta-visible, con el fin de obtener resultados cuantitativos confiables.

2.2.1.1.1. Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX), basada en el fenómeno descrito por Bragg, constituye un método fundamental en la caracterización geomelúrgica. Este enfoque aprovecha las longitudes de onda de los rayos X, que están relacionadas con los radios atómicos de los elementos. Al interactuar con las especies minerales, los rayos X son difractados por los electrones de los átomos en la muestra, generando un patrón de difracción. Este patrón, analizado mediante un difractómetro de rayos X, revela la posición, estructura y composición de las fases minerales presentes. La técnica no solo permite identificar las fases cristalinas, sino también aborda aspectos como polimorfismo, textura cristalográfica y parámetros de la red cristalina.

2.2.1.1.2. Fluorescencia de Rayos X (FRX)

La metodología basada en la fluorescencia de rayos X (FRX) encuentra su fundamento en la espectroscopía atómica. Esta técnica implica la excitación de átomos por radiación electromagnética, generando alteraciones en los estados energéticos que revelan la composición del analito. En el equipo de fluorescencia del INCITEMA-UPTC, los rayos X secundarios emitidos durante el bombardeo permiten detectar una gama amplia de elementos, desde calcio hasta elementos radiactivos como el uranio. La preparación de una perla, que consiste en la mezcla de mineral con tetra borato de litio, polvo compactado y líquidos aglomerantes, precede al análisis de las muestras.

2.2.1.1.3. Análisis de Termogravimetría (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

La metodología de termogravimetría y calorimetría diferencial de barrido (TGA-DSC) se centra en el estudio del comportamiento térmico de los materiales. Este enfoque, llevado a cabo con equipos como el de INCITEMA-UPTC, expone las muestras a esfuerzos térmicos, revelando detalles como fusión, sublimación, solidificación y reacciones químicas. La variación de entalpía entre la muestra y un material de referencia inerte, junto con determinaciones como calores específicos y puntos de ebullición, ofrece información crucial para comprender la composición y la pureza de los compuestos cristalinos, fundamentales en tratamientos térmicos.

2.2.1.1.4. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

La microscopía electrónica de barrido (MEB) se destaca por su capacidad para detallar la morfología de los materiales. Este enfoque utiliza un haz de electrones que bombardea la muestra, generando respuestas en forma de electrones secundarios y retrodispersados. La información obtenida, procesada por un detector, forma imágenes que revelan la composición cualitativa y la morfología de los elementos en la muestra. La preparación de la muestra requiere que sea granulada o sólida, conductora eléctricamente y libre de humedad, y se lleva a cabo en una cámara de vacío.

2.2.1.1.5. Microscopía Óptica de Luz Reflejada

La caracterización mineralógica mediante microscopía óptica de luz reflejada implica el uso de un microscopio de polarización de luz. Con iluminación vertical a la sección de pulido, este método, en el caso del campo oscuro, permite la observación de las muestras oblicuamente

reflejadas para magnificar su estructura original. Proporciona información sobre propiedades ópticas como maclas, reflectancia, birreflectancia, pleocroísmo, anisotropía y reflexiones internas. La identificación de minerales mediante briquetas pulidas y el estudio de intercrecimientos son esenciales para establecer estrategias precisas de procesamiento metalúrgico (Chirif, 2010).

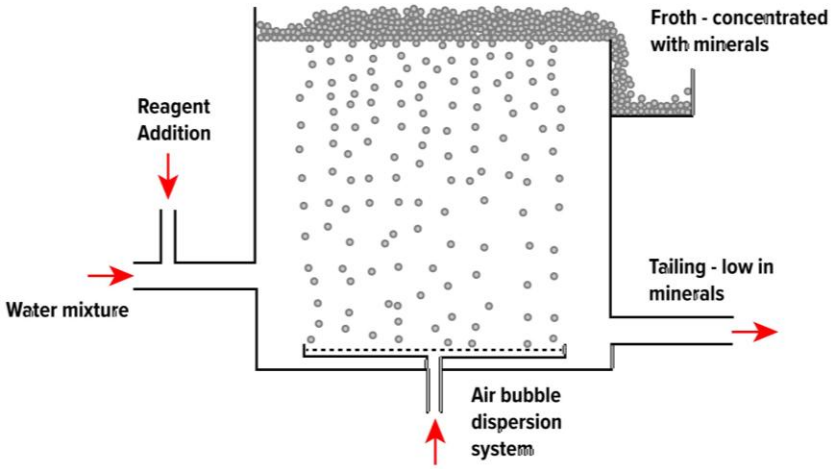
2.2.2. Flotación

La flotación es un proceso fisicoquímico que tiene por objetivo la concentración de especies de minerales sulfurados de especies estériles o sin algún valor económico. El principio del proceso de flotación se basa en la hidrofobicidad que presentan las partículas de minerales sulfurados al entrar en contacto con el aire, y reactivos que tienen la particularidad de aumentar estas características hidrofóbicas (Azañero et al., 2010).

La flotación de minerales sulfurados ha sido ampliamente estudiada, pero en los últimos años se han desarrollado modelos cinéticos y termodinámicos que permiten comprender mejor la interacción entre reactivos y superficies minerales (Rao & Finch, 2020). Estos avances han demostrado que la eficiencia del proceso depende de la química superficial, la presencia de iones activadores y la textura del mineral, factores que deben ser evaluados desde un enfoque geometalúrgico.

Figura 1

Resumen del proceso de flotación.



Nota: (Kiraz, 2014).

Figura 2

Clasificación de minerales polares.

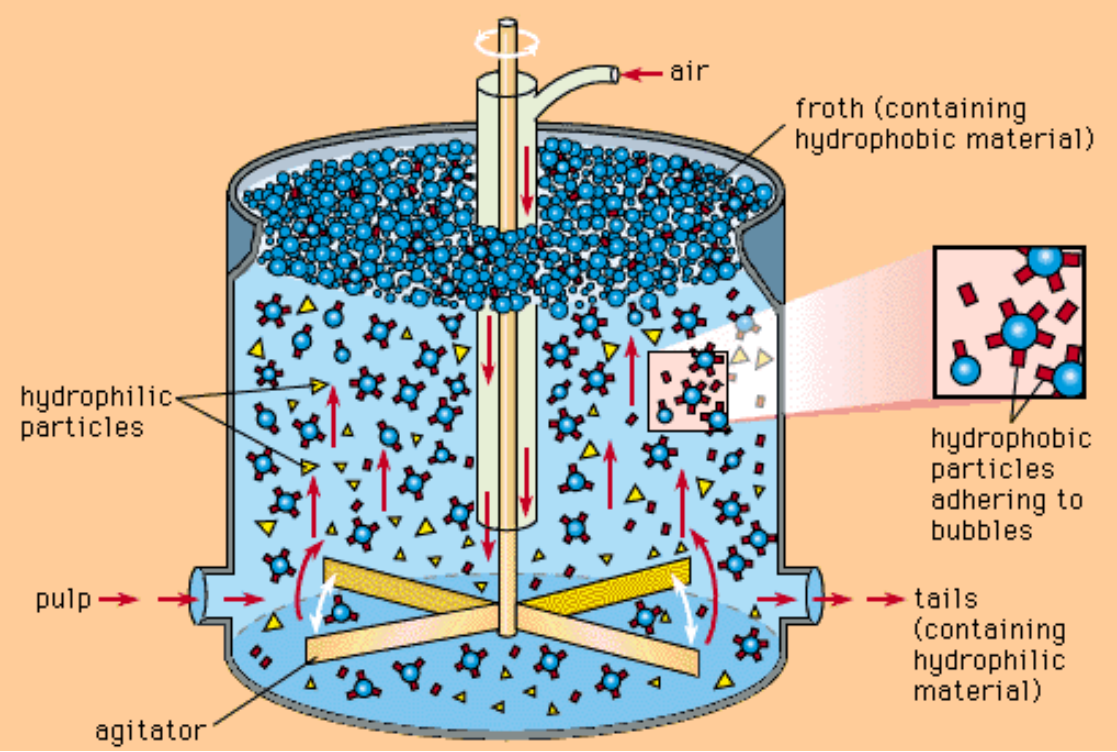
Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3a	Groupe 4	Groupe 5
Galène	Barite	Cerrusite	Hématite	Zircon
Covellite	Anhydrite	Malachite	Magnétite	Willemite
Bornite	Gypse	Azurite	Gothite	Hemimorphite
Chalopyrite	Anglesite	Wulfenite	Chromite	Beryl
Chalcocite			Ilménite	Feldspar
Stibinite		Groupe 3b	Corundum	Sillimanite
Argentite		Monazite	Pyrolusite	Garnet
Bismuthinite		Fluorite	Limonite	Quartz
Millérite		Calcite	Borax	
Cobaltite		Witherite	Wolframite	
Arsenopyrite		Magnesite	Columbite	
Pyrite		Dolomite	Tantalite	
Shpalérite		Apatite	Rutile	
Orpiment		Scheelite	Cassitérite	
Pentlandite		Smithsonite		
Realgare		Rhodochrosite		
Au,Cu..natif		Siderite		
FAIBLE ←		POLARITÉ	→	FORTE

Nota: (Kiraz, 2014).

El proceso de la flotación de minerales a nivel industrial se realiza con el alimento del mineral molido (pulpa), adicionándole los reactivos adecuados (según el mineral a flotar), que una vez ya mezclados se alimentan a las celdas de flotación. Las celdas de flotación burbujean aire por el fondo, a través de una especie de aspas agitadoras llamadas impulsores, lo cual hace que la pulpa se mantenga en constante agitación lo que permite el contacto entre las partículas con el agua con reactivo, y el aire (Ramos & Orihuela, 2017).

Figura 3

Representación esquemática del proceso de flotación.



Nota: (Kiraz, 2014).

Variables de operación del proceso de flotación (Fuerstenau et al., 2007)

El desempeño del proceso de flotación depende de un conjunto de variables operativas que controlan tanto la interacción entre partículas minerales y burbujas de aire, como la estabilidad del sistema en la pulpa. Estas variables deben ser cuidadosamente controladas, ya que pequeñas variaciones pueden generar cambios significativos en la recuperación y selectividad del proceso.

Entre los principales parámetros que influyen en la eficiencia de la flotación se encuentran los siguientes:

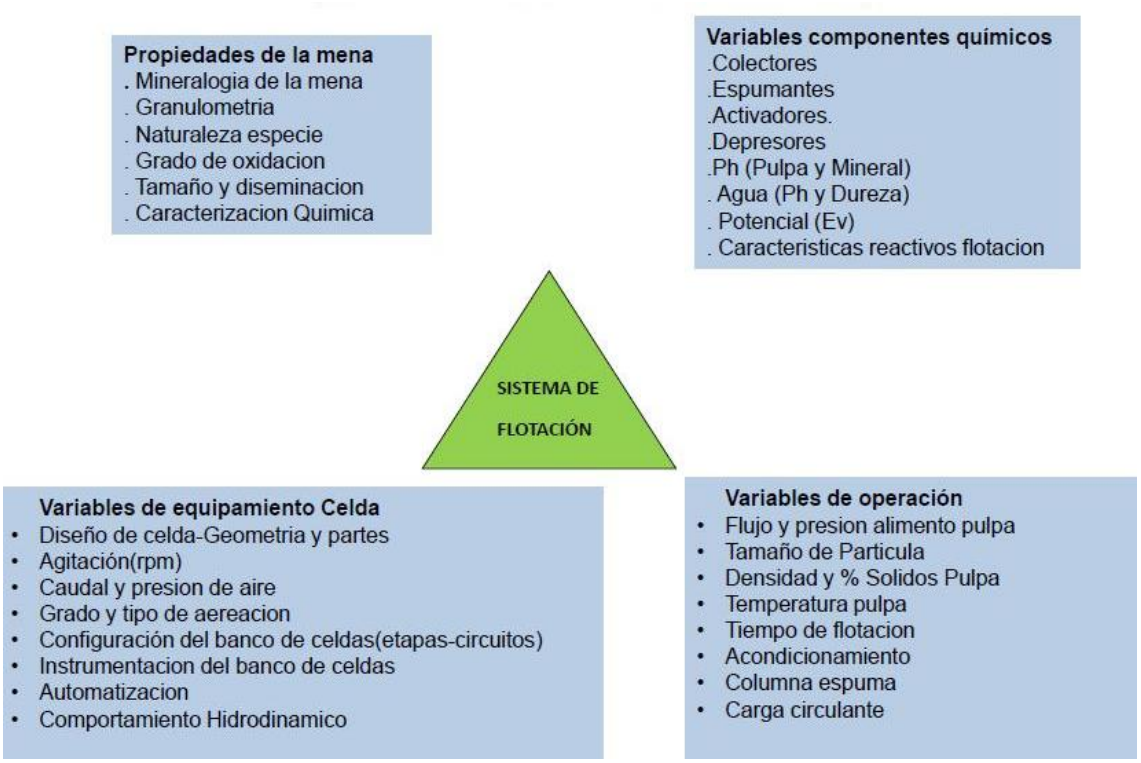
- Granulometría y grado de liberación: El tamaño de partícula constituye un factor determinante en la flotación, ya que condiciona el grado de liberación de los minerales. Una liberación insuficiente puede generar asociaciones entre minerales valiosos y ganga, reduciendo la selectividad del proceso. Por otro lado, la presencia de partículas excesivamente finas puede afectar la recuperación debido a problemas de arrastre o baja probabilidad de colisión con las burbujas de aire.
- pH del sistema: El pH controla el ambiente químico en el que se desarrolla la flotación, influyendo en la adsorción de reactivos sobre la superficie mineral. Su regulación es fundamental para lograr la selectividad del proceso, ya que permite favorecer o inhibir la flotación de determinadas especies minerales.
- Dosificación de reactivos: La cantidad y tipo de reactivos empleados, tales como colectores, espumantes y modificadores, afectan directamente la hidrofobicidad de las partículas y la estabilidad de la espuma. Un adecuado balance en la dosificación permite maximizar la recuperación sin comprometer la calidad del concentrado.
- Tiempo de acondicionamiento y flotación: El tiempo de acondicionamiento permite la adecuada interacción entre los reactivos y las partículas minerales, mientras que el tiempo

de flotación influye en la recuperación total del proceso. Un tiempo insuficiente puede limitar la adhesión de las partículas a las burbujas, mientras que un exceso puede generar arrastre de ganga.

- Densidad de pulpa: La concentración de sólidos en la pulpa afecta la viscosidad del sistema y la probabilidad de interacción entre partículas y burbujas. Valores inadecuados pueden disminuir la eficiencia del proceso y afectar la estabilidad de la espuma.
- Aireación y velocidad de agitación: El flujo de aire y la velocidad de agitación influyen en la generación de burbujas y en la dispersión de las partículas dentro de la celda de flotación. Un control adecuado de estos parámetros favorece la formación de una espuma estable y mejora la recuperación de los minerales valiosos.

Figura 4

Variables de flotación.



Nota: (Delgado, 2016).

2.2.2.1. Reactivos de Flotación

En el proceso de flotación, los reactivos cumplen un rol fundamental al modificar las propiedades superficiales de las partículas minerales, permitiendo su separación selectiva. La acción conjunta de estos compuestos químicos determina la eficiencia del proceso, influyendo tanto en la recuperación como en la calidad del concentrado (Castillo, 2014).

Los reactivos utilizados en flotación pueden agruparse según su función específica en colectores, espumantes y modificadores, cada uno con un papel particular dentro del sistema.

El uso de reactivos en flotación ha sido objeto de revisión ambiental en los últimos años. Investigaciones recientes (Santos et al., 2021) señalan que la selección de reactivos debe considerar no solo la eficiencia metalúrgica, sino también su impacto en los efluentes y relaves. La tendencia actual es emplear reactivos de menor toxicidad y optimizar las dosificaciones para reducir la carga química del proceso.

2.2.2.2. Reactivos Colectores

Conocidos también como promotores, estos reactivos confieren a los minerales una superficie hidrofóbica, lo que facilita su adhesión a las burbujas de aire durante el proceso de flotación. Su grado de selectividad puede optimizarse mediante un control adecuado de las dosificaciones empleadas, así como con la incorporación de reactivos modificadores que regulen su acción. De acuerdo con Azañero (2015), estos compuestos se agrupan en dos categorías principales:

- **No ionizables**: Trabajan a nivel molecular, entre estos reactivos tenemos a los aceites hidrocarbonatos e hidrocarburos.

- **Ionizables**: Se separan en iones, dependerá de la parte activa, si es anión o catión, este tipo de colectores se dividen en:
  - **Catiónicos**: En esta subdivisión se encuentran los derivados amínicos y aminas, se utiliza durante la flotación de óxidos, carbonatos y metales de tierras alcalinas.
  - **Aniónicos**: Estos colectores se dividen:

    Oxidrilo

    Son ácidos orgánicos, se subdividen en:

    a) Carboxílico

    b) Sulfatos

    c) Sulfonatos

    Sulfhidrilo

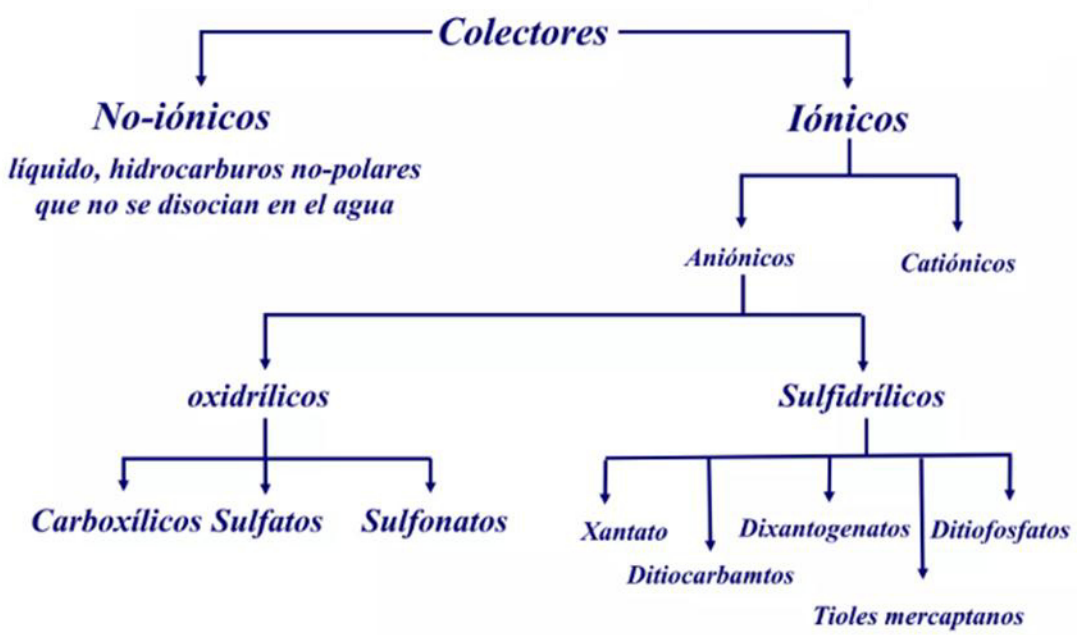
    Se subdividen en:

    a) Xantatos

    b) Ditiofosfatos

Figura 5

Clasificación de reactivos colectores.



Nota: (Delgado, 2016).

2.2.2.3. Reactivos Modificadores

Se emplean para modificar la pulpa lo que favorece a un acondicionamiento óptimo, de esta forma asegurar un efectivo empleo de los reactivos para que se dé una buena flotación. Entre ellos tenemos (Torres, 2016).

Los modificadores como $ZnSO_4$ y NaCN cumplen funciones críticas en la selectividad del proceso, pero su uso excesivo puede generar impactos ambientales significativos. Estudios recientes (Cisternas & Gálvez, 2022) recomiendan evaluar la dosificación mínima efectiva mediante diseños experimentales, reduciendo la generación de especies tóxicas y mejorando la sostenibilidad del proceso:

- **Modificadores del medio (pH)**

  El papel del pH es determinante, ya que los iones de hidrón e hidróxido luchan por estar en las superficies de los minerales. En varios casos de flotación se obtienen resultados satisfactorios cuando el pH se encuentra dentro de un rango determinado. Entre los reactivos más conocidos que se emplean para ajustar el pH se tiene a la cal y carbonato de sodio, la soda cáustica ocasionalmente.

- **Activadores**

  Disminuye la flotabilidad de un mineral haciendo su superficie más hidrofílica o impidiendo la adsorción de colectores (hacen que la partícula se moje y se hunda). Ejm: NacN, $ZnSO_4$, NaHS, quebracho.

  *NaCN: Anula la acción colectora en la flotación de la pirita y de sulfuro de Cobre y Zinc durante la flotación de plomo en menas de Pb/Zn. El mecanismo de depresión se efectúa a través de hidrólisis de los cianuros alcalinos que produce ácido cianhídrico que se disocia en iones cianuro de hidrógeno. Los cianuros con los metales forman complejos que son inactivos en la flotación por ser precipitados poco solubles.

  Por ejemplo: El ion cuprífero reacciona con el cianuro formando un complejo Cu/CN, haciendo que este se deprima.

$$Cu^{+2} + e^- \longrightarrow Cu^+$$

$$CN^- - e^- \longrightarrow \tfrac{1}{2}(CN)_2$$

$$Cu^{+2} + CN^- \longrightarrow Cu^+ + 1/2(CN^-)^2$$

$$Cu^+ + 2CN^- \longrightarrow (Cu(CN)_2)^-$$

$$Cu^{+2} + 3CN^- \longrightarrow (Cu(CN)_2)^- + 1/2(CN)_2$$

Acción depresora del ion sulfhidrilo, debido a la hidrolización del sulfuro de sodio en una pulpa.

$$Na_2S + 2OH = 2Na^+ + 2OH^- + H_2S$$

$$H_2S = H^+ + HS^-$$

$$HS^- = H^+ + S^-$$

Los cianuros alcalinos depresores en menor grado de calcopirita, enargita, bornita y la mayoría de los minerales sulfurosos con la posible excepción de galena y calcocita. Por lo tanto, es esencial un control cuidadoso de la cantidad usada.

El tiempo de acondicionamiento requerido también es importante ya que puede variar desde unos cuantos minutos hasta media hora.

Al ejecutar la flotación selectiva de minerales de Pb-Zn-Ag, el cianuro es usado en cantidades pequeñas en la etapa de limpieza de plomo para deprimir la pirita.

*$ZnSO_4$: Es usado solo o juntamente con el cianuro de sodio, para deprimir la esfalerita mientras se flotan minerales de plomo y cobre.

- **Dispersantes y sulfactantes**

  En caso de los dispersantes ayuda a controlar la alcalinidad de la pulpa y al mismo tiempo contrarrestar la interferencia de las lamas, coloides, y sales solubles. Los sulfactantes minimizan las reacciones de minerales sulfatados con minerales de zinc evitando la activación natural de zinc. Ejm: Na_2SiO_3, Na_2S/NaHS, MIN 3030.

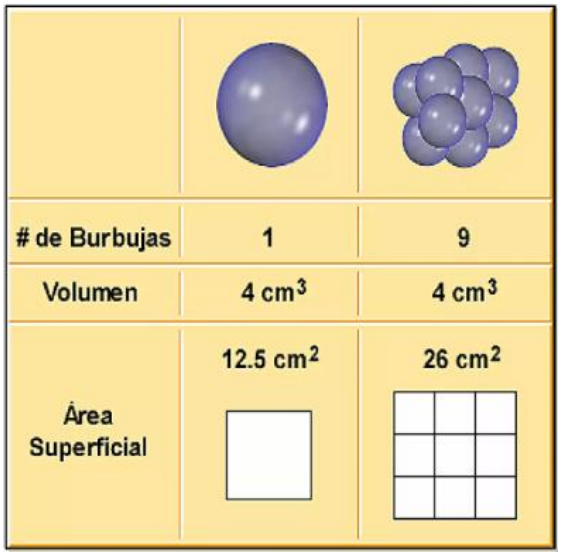
2.2.2.4. Reactivos Espumantes

Los espumantes tienen como función principal la generación y estabilización de la espuma en la superficie de la celda de flotación. Esta espuma permite el transporte de las partículas hidrofóbicas hacia la zona de descarga del concentrado.

El uso de espumantes adecuados contribuye a formar burbujas de tamaño uniforme y a mantener la estabilidad de la espuma, evitando su colapso prematuro. Entre los más empleados se encuentran los alcoholes de cadena larga, como el MIBC, ampliamente utilizado en circuitos de flotación de sulfuros.

Figura 6

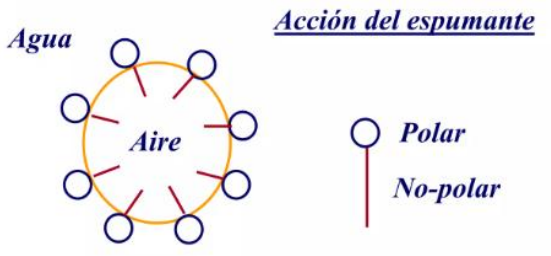
Efecto de los espumantes.



Nota: (Kiraz, 2014).

Figura 7

Acción del espumante.



Nota: (Kiraz, 2014).

2.2.2.5. Evaluaciones de Flotación a Nivel Laboratorio

- Flotación rougher para optimizar condiciones operativas como: grado de liberación (P80), dosificación pH, etc.
- Flotación cinética para determinar el tiempo de flotación evaluando porcentaje de recuperación y ley de concentrado.
- Flotación ciclo abierto, se desarrolla cuando ya tenemos las condiciones de operación y deseamos determinar las masas obtenidas y el diseño del diagrama de flujo.
- Flotación ciclo cerrado, se realiza para determinar el efecto de las cargas circulantes, porcentaje de recuperación y ley de concentrado.

Esta última evaluación por lo general es comparada con resultados de pruebas en plantas piloto contribuyendo a definir la performance metalúrgica de los minerales al proceso de flotación en forma más confiable.

Dado que las condiciones de operación que son obtenidas en un estudio preliminar a nivel de laboratorio; son escaladas y trasladadas a una planta de procesamiento de minerales para ser

controladas por medio de la automatización incluyendo sistemas de control de nivel de pulpa, control de flujo de pulpa, densidad de pulpa, control sobre las dosificaciones de reactivos y monitoreo de pH (Castillo, 2006).

2.2.2.6. Flotación Bulk Cobre-Plomo

La flotación bulk cobre–plomo corresponde a una etapa inicial en el tratamiento de minerales polimetálicos, en la cual se busca recuperar de manera conjunta los sulfuros de cobre y plomo en un mismo concentrado, separándolos de otros minerales como la esfalerita y la pirita.

Este tipo de flotación se basa en la similitud en el comportamiento superficial de minerales como la calcopirita y la galena, los cuales presentan afinidad por los colectores en condiciones específicas de operación. Para lograr una adecuada selectividad, es necesario controlar variables como el pH, la dosificación de reactivos y la presencia de agentes depresores.

Uno de los principales desafíos en esta etapa es evitar la flotación no deseada del zinc, especialmente en forma de esfalerita o marmatita, ya que su presencia en el concentrado bulk puede afectar etapas posteriores del proceso y disminuir la eficiencia global del circuito.

Por ello, durante la flotación bulk se emplean reactivos depresores como el sulfato de zinc y el cianuro de sodio, los cuales permiten inhibir la flotación de la esfalerita, asegurando que el zinc permanezca en la pulpa para su posterior recuperación en una etapa específica (Arias, 2018).

2.2.2.7. Depresión de Sulfuros de Zinc

Consiste en la inhibición de la activación y separación de recubrimiento de activadores, por lo que en la flotación bulk el sulfato de zinc y bisulfito de sodio deprimen a sulfuros de zinc:

esfalerita/marmatita (mineral con contenido de hierro) y el cianuro de sodio se emplea para la depresión del hierro e iones cobre (Quispe, 2019).

La depresión de sulfuros de zinc ha sido revisada en investigaciones recientes, donde se destaca la influencia de la mineralogía y la textura en la eficiencia del proceso (Navarro et al., 2023). La presencia de marmatita, especies oxidadas y elementos penalizables puede alterar la respuesta del mineral, por lo que la caracterización geometalúrgica es esencial para definir estrategias de depresión adecuadas.

La siguiente reacción muestra la existencia de ferrocianuro sobre la pirita, evitando que este flote.

$$Fe^{++} + 6CN^- \longrightarrow Fe(CN_6)^{-4}$$

2.2.2.7.1. Depresión de Marmatita

a. Efecto del pH: La importancia de la alcalinidad de la pulpa es evidente con el desarrollo de las nuevas operaciones con relleno cementado. Sin embargo, la diferencia entre ambos alcalinizadores no quedó demostrada.

   Finkelstein y Allison (1976), afirmó que la galena, se concentra por flotación selectivamente de la marmatita en un medio alcalino, de valores entre 8 y 10.

   Higgins y Quast (1992), demostraron que la adición de cal tiende a deprimir tanto a la galena como a la marmatita.

b. Adición de sulfato de zinc: La marmatita tiene la capacidad de resistirse a la oxidación, dado que pocos iones zinc son disueltos en la pulpa. Para que pueda garantizarse la depresión de los sulfuros de zinc, la actividad de los iones de zinc debe ser 1000 veces la actividad de los iones de plomo. Debido a la poca cantidad de iones de zinc en la pulpa, se le dosifica sulfato de zinc.

Solozhenkin y Vasyukevich (citado porFinkelstein y Allison, 1976) concluyó que la adsorción de iones de zinc por marmatita, calcopirita y pirita siguió un camino muy similar al observado con la esfalerita, excepto que la adsorción fue generalmente más alta.

Así también los principios de la termodinámica de minerales, proporciona evidencia que sustenta la formación de coloides de sales de zinc, que se dieron a lugar durante la precipitación y también actúan como depresores de los sulfuros de zinc. Algunos de los precipitados que se forman podemos mencionar al hidróxido de zinc, carbonato de zinc, sulfito de zinc y cianuro de zinc

Quedó demostrado que la acción de deprimir los sulfuros de zinc solo era posible en presencia de iones hidroxilo, lo cual daba lugar a la formación de hidróxidos de zinc, los cuales son adsorbidos en la superficie de los sulfuros de zinc, evitando la acción del xantato sobre estos.

Quedó demostrada la relación directa que existe entre los sulfuros de zinc y la concentración de hidróxido de zinc coloidal.

Finkelstein y Allison (1976), resumieron las posibles teorías que expliquen la adsorción de los precipitados coloidales en la superficie de los sulfuros de zinc, así:

- Coagulación o aglomeración de los precipitados en la pulpa.
- Se vuelve a precipitar estos coloides a través de los sitios de nucleación.
- El hidróxido de zinc es absorbido a través de la superficie de los sulfuros de zinc, a través de los puentes de oxígeno.
- El precipitado formado en la pulpa. Es absorbido químicamente en la superficie.

Grano et al. (1988) empleo sulfato de zinc como depresor de sulfuros de zinc en la flotación de galena. Demostró que es posible controlar la flotación de galena por la adición de este reactivo para un consumo de 0.9 kg/t de sulfato de zinc a pH 8,5.

El-Shall et al. (2000) investigó la función del sulfato de zinc en la depresión de los sulfuros de zinc en la flotación de galena, afirmando que la activación de la esfalerita se debía a una reacción de reemplazo, por iones plomo.

c. Adición de metabisulfito: Misra et al. (1985) informaron que el sulfito se puede usar para deprimir la esfalerita si se agrega al sistema antes de agregar el xantato. Generalmente, el sulfito se agrega en la molienda o durante el acondicionamiento, y la cantidad varía de 1 a 2 kg/t de mineral.

(1) Las mediciones del ángulo de contacto y los experimentos de flotación indicaron que la adición de sulfito antes del xantato resultó en una depresión efectiva de la esfalerita.

(2) La reacción de descomposición en fase homogénea del xantato en presencia de sulfito dependía del SO_2 relación molar /xantato, concentración de oxígeno disuelto y pH. La velocidad de descomposición fue muy rápida a un pH casi neutro (6–6,5).

(3) La adsorción de xantato sobre esfalerita se limitó a una cobertura monocapa efectiva.

(4) La depresión selectiva de la esfalerita por sulfito estaba relacionada con las tasas relativas de adsorción de xantato en comparación con la descomposición de xantato.

Se han sugerido varios mecanismos posibles para la acción depresora del sulfito sobre la esfalerita y también como modificador de la flotación durante la flotación del mineral sulfurado. Estos mecanismos incluyen:

- Formación de un revestimiento de superficie hidrofílico como sulfito de zinc o sulfato de calcio (cuando se usa cal como regulador de pH).
- Formación de sales de sulfito de metales pesados insolubles y posterior reducción de la concentración de iones de metales pesados en la pulpa, evitando así la activación no intencional.
- Descomposición del xantato debido a una reacción de oxidación promovida por sulfito.
- Adsorción limitada del colector por control del potencial redox.

Yamamoto (1980) declaró que el uso simultáneo de iones de zinc y sulfito deprimió la flotación de la esfalerita, pero el uso de sulfito solo no lo hizo. Concluyó que el xantato de etilo adsorbido en la superficie de la esfalerita activada no fue desorbido por el ion sulfito, Yamamoto (1980) apoyó los hallazgos de Misra et al. (1985) en el hecho de que la presencia de oxígeno y azufre, juntos dan como resultado la descomposición del xantato para formar perxantato. En el rango de pH alcalino, la descomposición del xantato fue lenta, pero esto no corresponde a la depresión de la esfalerita que es posible en presencia de sulfito en el rango de pH alcalino. La depresión de la esfalerita a mayor alcalinidad se debe más probablemente a la competencia de otros aniones con xantato por sitios superficiales. La depresión a valores de pH más bajos probablemente se deba a la descomposición del xantato.

Pattison (1983) informaron que, para la esfalerita no activada, se puede esperar que la probable formación de especies de sulfito de zinc resulte en una depresión, aunque los resultados de Mitrofanov y Kusnikova (1957) reveló poca diferencia (en solución alcalina) en la absorción de xantato de esfalerita inactivada, ya sea, que haya sulfito

presente o no. Los experimentos de Pattison produjeron sólo trazas de flotación de esfalerita inactivada con colector de xantato de etilo, independientemente de si se utilizó sulfito en el sistema de flotación. Llegó a la conclusión de que el mineral probado tenía solo un número limitado de sitios de superficie disponibles para la recolección, posiblemente debido a algún grado de activación no intencional, o al contenido de hierro de la esfalerita, y que el sulfito no impidió esta recolección limitada. Para la esfalerita activada con cobre, se demostró que el sulfito de sodio era un depresor bastante efectivo en solución alcalina, pero que la velocidad de flotación de la esfalerita en realidad aumentaba cerca del pH neutro por la presencia de sulfito. Grano et al. (1997) también investigó el efecto de agregar metabisulfito de sodio (MBS) a la flotación del mineral de plomo-zinc de Hilton. El trabajo previo sobre la interacción del metabisulfito de sodio y el xantato de etilo para la flotación de galena del mineral de Hilton había sido informado por Sheldon y Johnson (1988). Identificaron la temperatura y el tiempo de contacto como parámetros importantes en el procesamiento a escala piloto de este mineral.

Grano et al. (1997) encontraron que la adición simultánea de xantato y MBS disminuyó la recuperación de galena debido a la descomposición del xantato de etilo por el ion sulfito derivado de MBS. La depresión aumentó con el aumento de la adición de MBS y la temperatura de la pulpa. En estas condiciones hubo un aumento en la concentración de perxantato de etilo metaestable en solución, un producto intermedio de la descomposición del xantato por el ion sulfito. Las mediciones químicas de pulpa en el concentrador Hilton también mostraron una mayor concentración de perxantato de etilo cuando se agregó MBS en el mismo punto del circuito de flotación que el xantato de

etilo. Por el contrario, la aplicación de una etapa de adición de oxígeno después de la adición de MBS, pero antes de la adición de xantato de etilo, disminuyó la concentración de ion sulfito sin reaccionar. Esto se demostró por una concentración de perxantato de etilo disminuida en la solución y recuperación de flotación de galena restaurada. En estas condiciones, la dependencia de la flotación con galena del MBS (y la temperatura) fue menos marcada. La prevención de la descomposición de la solución de xantato de etilo por sulfito permitió optimizar la acción depresora de MBS en la flotación de esfalerita (y sulfuro de hierro).

2.2.2.7.2. Activación de los Sulfuros de Zinc

En la flotación de minerales polimetálicos (Cu-Pb-Zn), la activación de los sulfuros de Zinc puede ser por varios factores que conllevan indebidamente a este fenómeno como (Quispe, 2019):

a. Comportamiento propio del mineral cuando presenta especies mineralógicas de cobre secundario (calcosina, covelina, etc.).

   El control de este factor es complicado debido a que el cobre secundario se encuentra en proceso de alteración por lo que en la flotación van perdiendo iones de cobre generando así una activación natural de sulfuros de zinc.

b. Asociaciones complejas de los minerales: Cu-Zn, Pb-Zn.

   Puede controlarse mejorando las condiciones de molienda sin embargo es complicado cuando estas especies mineralógicas presentan un grado de liberación inferior a 40 micras.

c. Arrastre de sulfuros de zinc por factores mecánicos durante la flotación bulk.

Este factor es el más fácil de controlar mejorando la remoción de espumas o las condiciones de las celdas de flotación.

d. Otro mecanismo relevante corresponde a la activación superficial de la esfalerita mediante el reemplazo de iones Zn^{2+} por otros iones metálicos presentes en solución, tales como Cu^{2+}, Pb^{2+}, Cd^{2+} o Fe^{2+}/Fe^{3+}. Este proceso ocurre a través de reacciones químicas reversibles que generan una nueva fase superficial más reactiva, favoreciendo la adsorción de colectores. Este comportamiento puede representarse mediante las siguientes reacciones:

$$ZnS_{(s)} + Cu^{2+}(ac) \Leftrightarrow CuS_{(s)} + Zn^{2+}(ac)$$

$$ZnS_{(s)} + Pb^{2+}(ac) \Leftrightarrow PbS_{(s)} + Zn^{2+}(a$$

La presencia de estos iones puede provenir tanto del propio m|ineral como del agua de proceso, lo que incrementa la probabilidad de activación no deseada de la esfalerita durante la flotación.

En este contexto, el control de la activación del zinc requiere una adecuada gestión de los reactivos depresores. Compuestos como el sulfato de zinc, el cianuro de sodio, el bisulfito o el sulfuro de sodio permiten reducir la disponibilidad de sitios activos en la superficie del mineral, limitando su interacción con los colectores. Particularmente, la adición de sulfato de zinc resulta efectiva en sistemas donde existe presencia de plomo, ya que contribuye a estabilizar la superficie de la esfalerita e impedir su activación. Por otro lado, en sistemas con presencia de cobre, el uso de cianuro permite formar complejos estables con los iones cúpricos y cuprosos, disminuyendo su disponibilidad para activar la esfalerita, siempre que se mantenga un adecuado balance entre las concentraciones de los iones metálicos presentes en solución.

Adicionalmente, la activación del zinc puede verse influenciada por fenómenos de tipo electroquímico asociados a la oxidación de minerales presentes en el sistema. Por ejemplo, la disminución de pirita durante el proceso puede generar cambios en el equilibrio químico del medio, favoreciendo la formación de especies iónicas como Fe^{2+} y Fe^{3+}, las cuales pueden adsorberse sobre la superficie de la esfalerita, incrementando su hidrofobicidad. Asimismo, las condiciones de molienda y la calidad del agua de proceso influyen en la generación de especies activadoras, lo que resalta la importancia de controlar el ambiente químico del sistema desde etapas previas a la flotación. (Ganoza, 2022).

Para evitar la activación de esfalerita por ejemplo en una flotación bulk es necesario, la activación natural. La reacción para activar la esfalerita es agregando sulfato de cobre, sin embargo, esta reacción puede ocurrir siempre que haya iones activadores en la solución.

$$ZnS + CuSO_4 \Leftrightarrow Zn^{2+} + SO_4^{2-} + CuS$$

CAPÍTULO III: Metodología de la Investigación

3.1. Tipo de Investigación

La investigación desarrollada se enmarca dentro de un enfoque cuantitativo, ya que se fundamenta en la obtención y procesamiento de información numérica derivada de ensayos experimentales de flotación. Del mismo modo, corresponde a un estudio de tipo aplicado, dado que está orientado a dar solución a una problemática específica vinculada con la mejora en la recuperación de zinc en minerales sulfurados, mediante la aplicación de criterios basados en la caracterización geometalúrgica.

3.2. Diseño de la Investigación

La investigación que se va a realizar es aplicada, porque se emplearán los conocimientos existentes en geometalurgia en las pruebas en las celdas de flotación de relaves de minerales de la etapa de flotación pirita.

El diseño de investigación se efectuará siguiendo las metodologías que son pertinentes al proceso de flotación para luego las variables resultantes evaluarlas con algoritmos.

O_1	X	O_2

Donde:

O_1: Proceso convencional de flotación de Zn, sin tener en cuenta la mineralogía de procesos.

X: Aplicación de la caracterización mineralógica y diseños experimentales de flotación para la recuperación de Zn.

0_2: Optimización de la recuperación y calidad del concentrado de Zn, en el proceso de flotación de minerales polimetálicos en la provincia de Oyón.

3.3. Análisis e Interpretación de la Información

Los datos obtenidos durante las pruebas experimentales fueron procesados mediante herramientas de análisis estadístico, empleando el software Minitab 19. Se aplicaron técnicas como el análisis de varianza (ANOVA), gráficos de efectos principales y diagramas de Pareto, con el fin de identificar la significancia de las variables evaluadas.

Asimismo, se realizaron balances metalúrgicos para determinar la recuperación de zinc y la calidad del concentrado, permitiendo una evaluación integral del desempeño del proceso bajo diferentes condiciones operativas.

3.4. Unidad de Análisis

La recopilación y análisis de datos para esta investigación se llevaron a cabo en la provincia de Oyón, considerando también las comunidades circundantes como parte integral del proceso.

3.5. Población y Muestra

La población investigada en este estudio abarca los minerales sulfurados de la región de Oyón.

La investigación del proyecto y la ejecución de las pruebas metalúrgicas tendrán lugar en las instalaciones del laboratorio metalúrgico Bizalab.

Se tomaron aproximadamente 200 kilogramos de minerales sulfurados como muestra para los estudios necesarios, y se reservaron 50 kilogramos como muestra de control.

El material se recopiló en lonas, y se procedió a su homogeneización mediante el método de roleo, seguido de su subdivisión en muestras representativas que serían utilizadas en las pruebas de laboratorio.

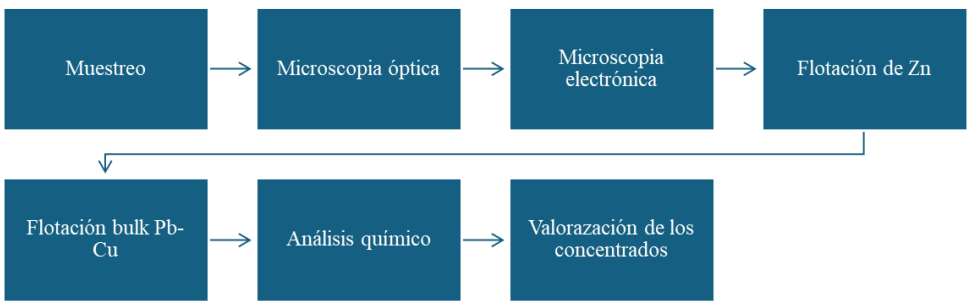
3.6. Procedimiento, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

El desarrollo experimental de la investigación comprendió las siguientes etapas:

- Caracterización del mineral: Se realizaron análisis mineralógicos mediante técnicas como microscopía óptica y electrónica, con el objetivo de identificar las especies minerales presentes, su distribución y grado de liberación.
- Pruebas de flotación: Se llevaron a cabo ensayos de flotación a nivel de laboratorio, evaluando diferentes condiciones operativas, tales como dosificación de reactivos, pH y tiempo de flotación, tanto en la etapa bulk Pb-Cu como en la flotación de zinc.
- Análisis químico: La determinación de leyes de los concentrados y relaves se realizó mediante técnicas de análisis químico, permitiendo calcular la recuperación metalúrgica del zinc.
- Procesamiento de datos: Los resultados obtenidos fueron analizados mediante herramientas estadísticas, con el fin de establecer relaciones entre las variables y determinar las condiciones óptimas del proceso.

Figura 8

Diagrama de flujo de la parte experimental.



CAPÍTULO IV: Resultados

4.1. Microscopía Óptica del Mineral de Cabeza

Se llevó a cabo el análisis modal del mineral cabeza de la provincia de Oyón, a una granulometría de 75% - 200 Malla, empleando un microscopio óptico de luz polarizante, con la finalidad de identificar los minerales presentes asociados al Pb y Zn, además de cuantificar su liberación, distribución en volumen, grados y posibilidades de liberación.

La tabla 2 representa los minerales identificados en el microscopio óptico de luz reflejada para una muestra representativa de 13 gramos de mineral de cabeza a una granulometría de 75%-200 Malla.

Tabla 2

Especies identificados con microscopía óptica.

Minerales	Fórmula	Abreviatura
Calcopirita	$CuFeS_2$	Cp
Bornita	Cu_5FeS_4	Bn
Pirita	FeS_2	Py
Pirrotita	$Fe_{0,8\text{-}1}S$	Po
Esfalerita	ZnS	Ef
Galena	PbS	gn
Oro	Au	Au
Electrum	-	el
Hematita	Fe_2O_3	hm
Goethita	FeO_2H	gt
Gangas	-	GGs

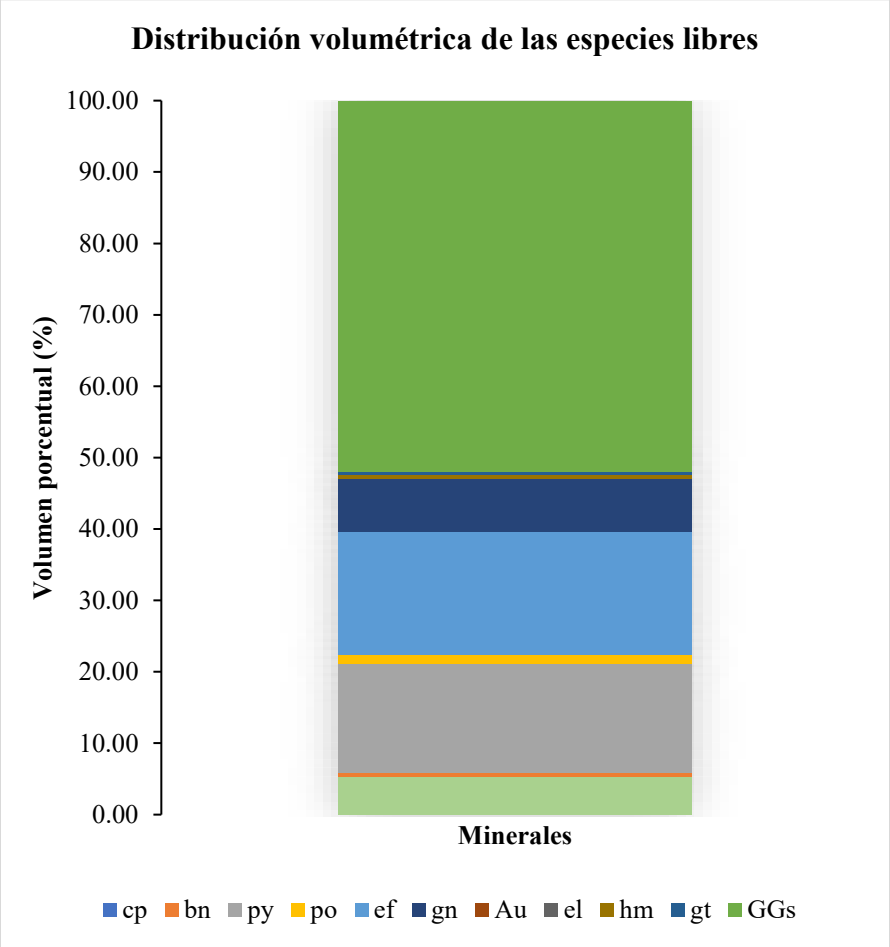
Nota: Las abreviaturas se emplearán para las siguientes presentaciones.

4.1.1. Distribución Volumétrica y Grados de Liberación

Se observaron especies de cobre como calcopirita y bornita con distribuciones de 5.37% y 0.48%, respectivamente, además de especies de plomo como galena con una distribución de 4.63%, especies de zinc como las esfaleritas marmatíticas que representaron el 17.24% del volumen total de la muestra. Los metales preciosos se identificaron como trazas adheridas a las gangas. La figura 9 representa la distribución volumétrica del total de las especies identificadas.

Figura 9

Volumetría de las especies encontradas.

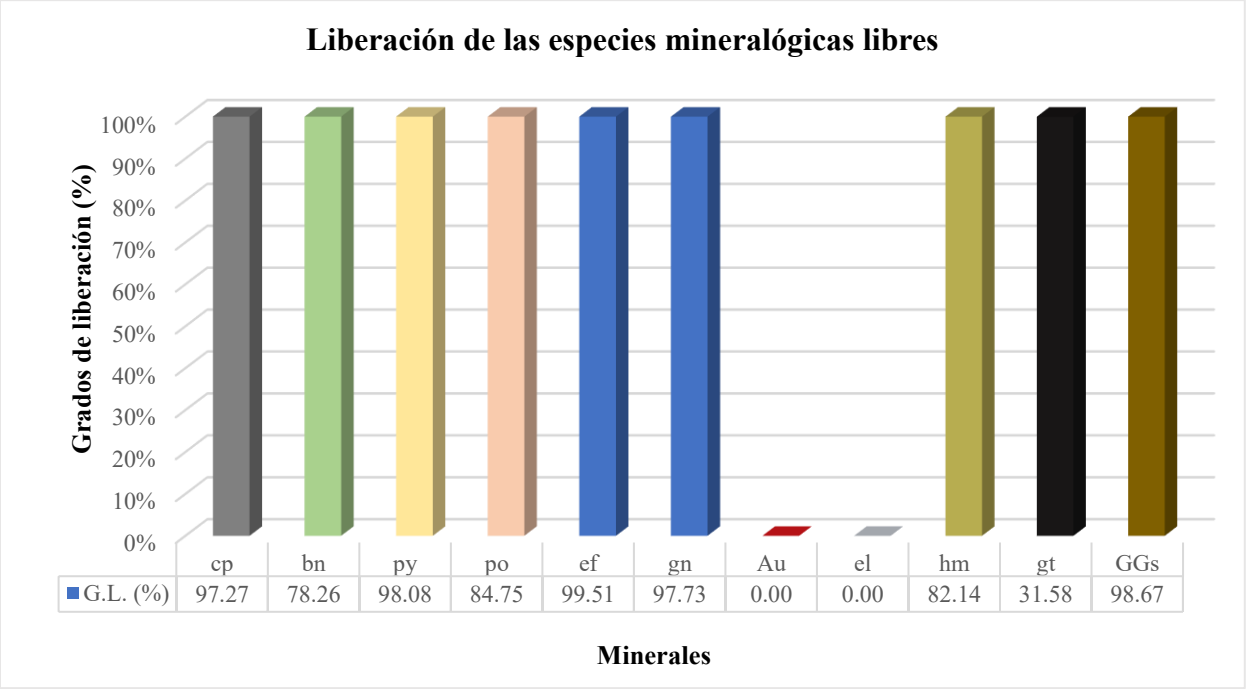


Nota: Empleado una barra para distribuir el total.

Las especies de cobre como la calcopirita se identificó con un 97.27% de grados de liberación y la bornita con 78.26%. La galena presentó una liberación de 97.73% y las esfaleritas marmatíticas 99.51%, tal y como se observa en la figura 10. La tabla 3 representa la distribución volumétrica y los grados de liberación del total de las especies observadas al microscopio.

Figura 10

Liberación de las especies encontradas.



Nota: Empleado gráficas de barras.

Tabla 3

Volumen y liberación de las especies encontradas.

Minerales	Volumen porcentual (%)	Grado de liberación (%)
Calcopirita	5.37	97.27
Bornita	0.48	78.26
Pirita	15.32	98.08
Pirrotita	1.24	84.75
Esfalerita	17.24	99.51
Galena	7.41	97.73
Oro	Trazas	0.00
Electrum	Trazas	0.00
Hematita	0.58	82.14
Goethita	0.41	31.58
Gangas	51.95	98.67
Total	100.00	

Nota: Detalle de los datos presentados previamente mediante gráficas.

4.1.2. Entrelazamiento de Minerales

La calcopirita se encontró formando enlaces con la bornita con un enlace muy difícil de liberar por medios mecánicos. Así también, se identificó a la galena con la pirita y esfaleritas marmatíticas. El total de los amarres mineralógicos observados se describen en la tabla 4, así mismo la figura 11 representa la distribución porcentual de los enlaces en un gráfico circular, también se presentan las micrografías del respectivo análisis.

Tabla 4

Volumen y liberación de las especies entrelazadas.

Minerales entrelazados	Tipo entr.	Num part.	Dist. Porc. (%)	Posibilidades de liberación completa
Partículas libres		5365	97.94	
py-po	1bIV	5	0.09	Moderadamente fácil
	1aIII	9	0.21	Fácil
	4aII	3	0.06	Muy difícil
cp-bn	1bIV	4	0.07	Moderadamente fácil
	1eIII	8	0.18	Muy difícil a imposible
Au-GGs	1bIV	3	0.04	Moderadamente fácil
	4bIII	6	0.15	Moderadamente difícil
gn-py-ef	1aIII	4	0.07	Fácil
	1bIV	6	0.16	Moderadamente fácil
	4aII	5	0.09	Muy difícil
	2aII	3	0.06	Muy difícil a imposible
el-gt-GGs	1bIV	3	0.06	Moderadamente fácil
	1eIII	2	0.04	Muy difícil a imposible
	4aII	5	0.10	Muy difícil
gt-hm-GGs	1eIII	8	0.18	Muy difícil a imposible
	4bIII	4	0.08	Moderadamente difícil
	4aII	6	0.13	Muy difícil
	1eIII	3	0.06	Muy difícil a imposible
	2bI	7	0.15	Muy difícil
	1eIV	4	0.08	Muy difícil a imposible
Total		**5463**	**100.00**	

Nota: Se presenta también la posibilidad de liberación.

Figura 11

Distribución total de las especies entrelazadas.

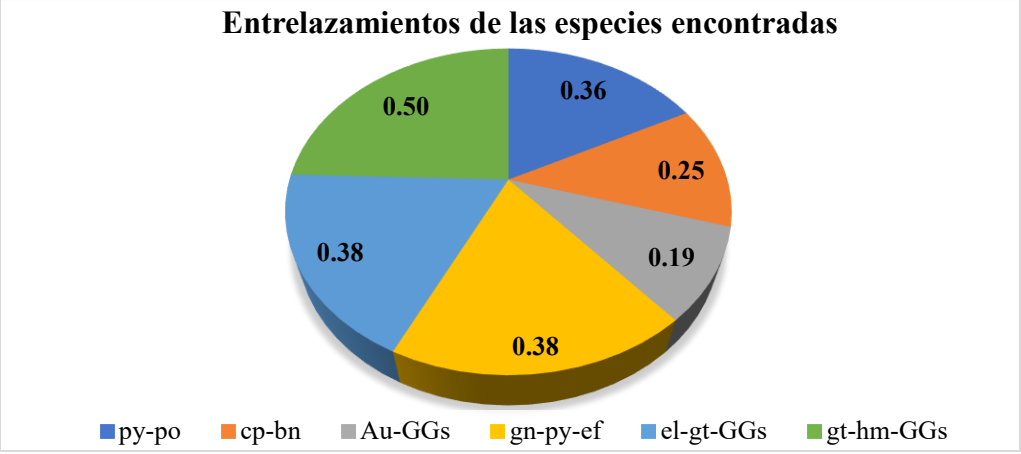
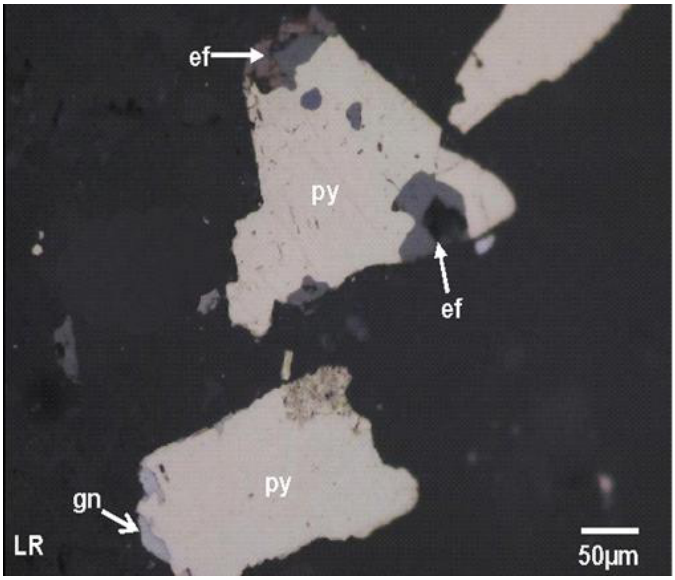


Figura 12

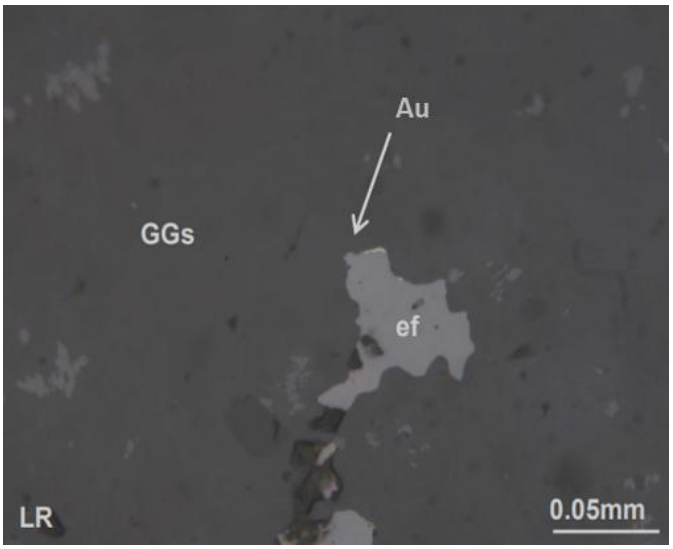
Micrografía con presencia de ef, py y gn.



Nota: Con un aumento de 50µm.

Figura 13

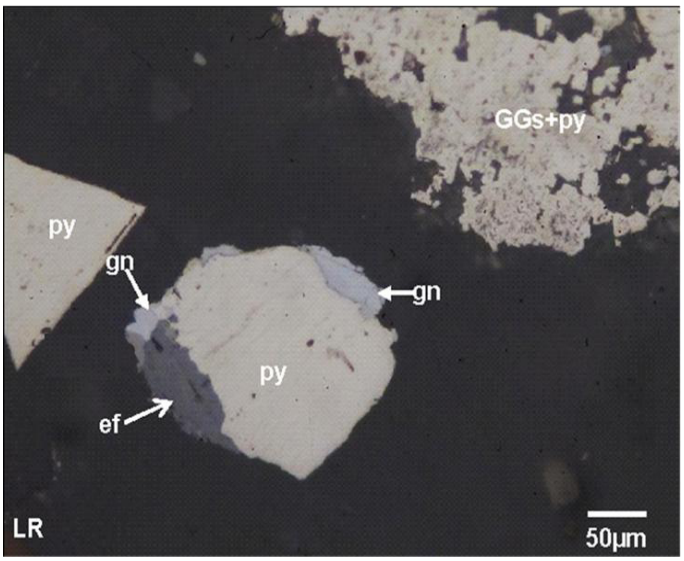
Micrografía con presencia de ef, Au y GGs.



Nota: Con un aumento de 0.05mm.

Figura 14

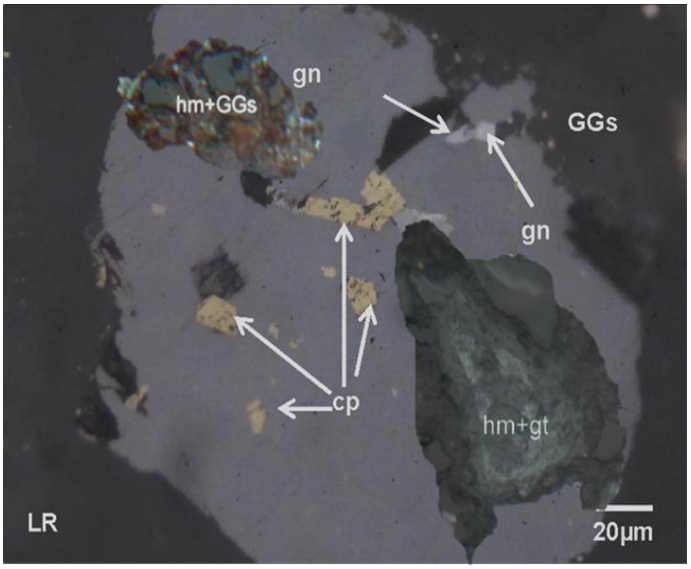
Micrografía con presencia de py, gn, ef y GGs.



Nota: Con un aumento de 50µm.

Figura 15

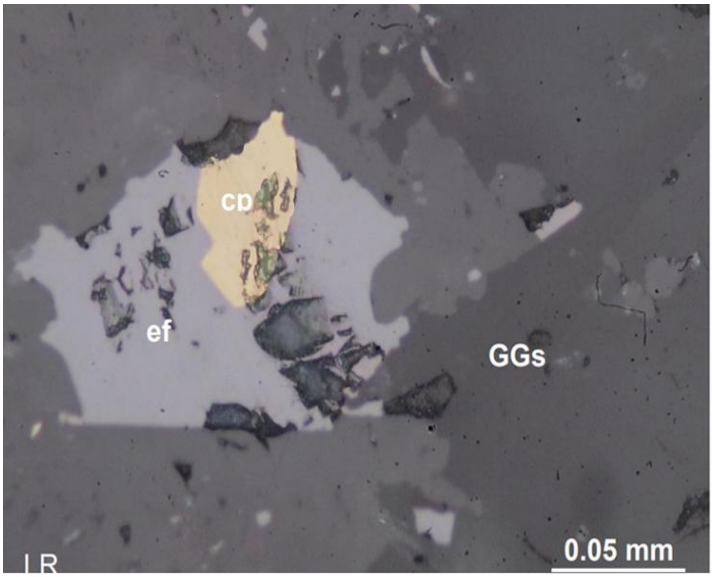
Micrografía con presencia de cp, gn, hm, gt y GGs.



Nota: Con un aumento de 20µm.

Figura 16

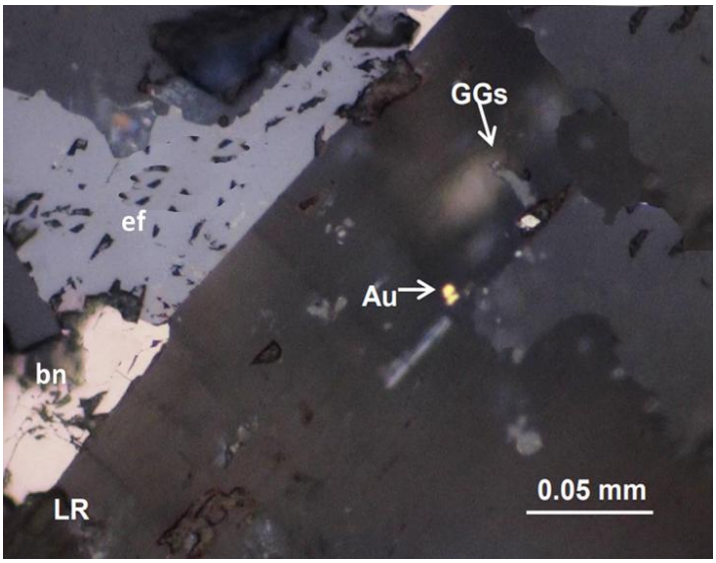
Micrografía con presencia de cp, ef y GGs.



Nota: Con un aumento de 0.05m.

Figura 17

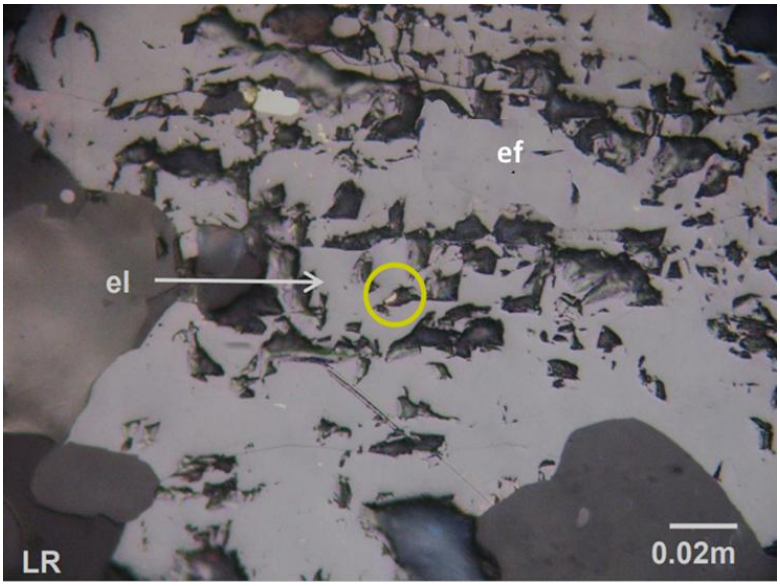
Micrografía con presencia de ef, bn, Au y GGs.



Nota: Con un aumento de 0.5mm.

Figura 18

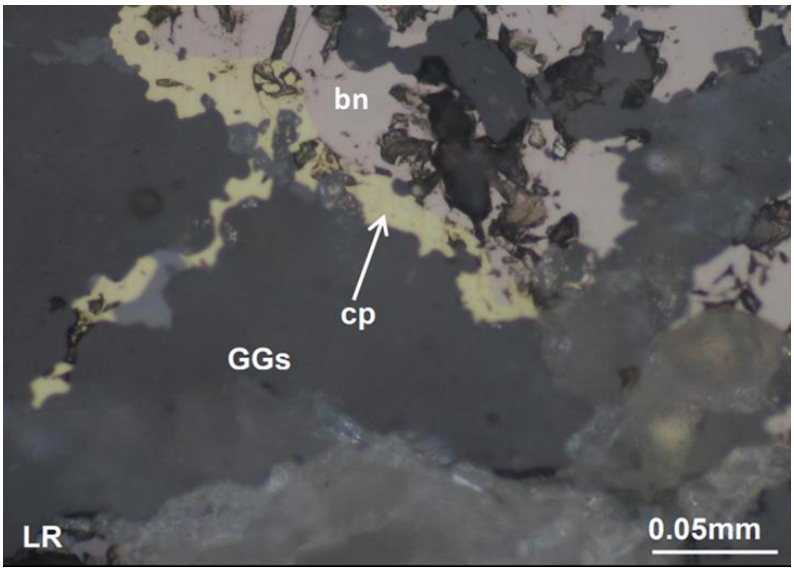
Micrografía con presencia de el y ef.



Nota: Con un aumento de 0.02m.

Figura 19

Micrografía con presencia de bn, cp y GGs.



Nota: Con un aumento de 0.05mm.

4.2. Microscopía Electrónica del Mineral de Cabeza

Una muestra representativa de mineral polimetálico se observó al microscopio electrónico Tima, con la finalidad de medir y clasificar las especies observadas por tamaño, composición y textura. La tabla 5 representa el total de especies de minerales que se observaron en el microscopio electrónico, y como se puede observar específica a detalle la composición no solo de los minerales sino también de las gangas.

Tabla 5

Especies identificados con microscopía electrónica.

Mineral	Fórmula General	Composición
Esfalerita/marmatita	$Zn_{0.825}\,Fe_{0.175}\,S$	15.21
Galena	PbS	6.02
Calcopirita	$CuFeS_2$	4.98
Bornita	Cu_5FeS_4	0.76
Pirita/pirrotita	FeS_2 / $Fe_{1-x}S_x$	14.83
Otros sulfuros	-	0.58
Oro	Au	0.01
Electrum	-	0.02
Epidota	$(Ca_2)(Al_2Fe^{3+})(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$	0.28
Granate	$(Ca,Fe,Mg,Mn)_3(Al,Fe,Mn,Cr,Ti,V)_2(SiO_4)_3$	0.31
Cuarzo	SiO_2	9.56
Muscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	0.18
Clorita	$(Mg,Fe)_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	0.11
Biotita	$K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10}(OH,F)_2)$	0.08
Hematita	Fe_2O_3	0.45
Goethita	FeO_2H	0.26
Siderita	$FeCO_3$	0.02
Smithsonita	$ZnCO_3$	0.09
Cerusita	$PbCO_3$	0.12
Anglesita	$PbSO_4$	0.04
Rutilo	TiO_2	0.12
Calcita	$CaCO_3$	0.26
Otros	-	45.71
Total		100.00

Nota: Se identificaron más especies en comparación con el caso de la microscopía óptica.

4.2.1. Especies Minerales de Zinc y sus Amarres Mineralógicos

El mayor aporte de Zn les correspondió a las esfaleritas marmatíticas con un valor de distribución del 9.54%, además se pudo identificar especies como la Smithsonita tal y como se observa en la tabla 6. La gráfica de barras de la figura 20 representa la comparación de las especies de minerales que aportan Zn.

Tabla 6

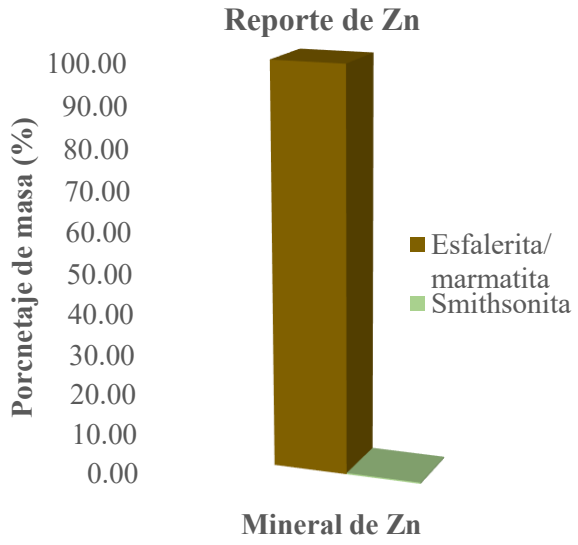
Especies identificados con microscopia electrónica – Zn.

Mineral de Zn	Composición (g)	Distribución porcentual (%)
Esfalerita / Marmatita	9.54	99.69
Smithsonita	0.03	0.31
Total	9.57	100.00

Nota: Las unidades de los datos son gramo (g) y porcentaje (%).

Figura 20

Composición de minerales de Zn.



Nota: Empleado gráficas de barras.

4.2.1.1. Grados de Liberación de la Esfalerita

Se determinó un grado de liberación de 70.09% para la esfalerita, además se determinó que el 25.77% se encuentra formando enlaces y 4.41% se encuentra ocluido en otra especie mineral. El mayor porcentaje de las partículas identificadas se encuentran con valores de liberación superiores al 70%, tal y como se observa en las tablas 7 y 8, en el gráfico de barras de la figura 21.

Tabla 7

Distribución de masas según la granulometría – esfalerita/marmatita.

Liberación de la esfalerita/marmatita	Tamaño [µm]						Total (g)
	>= 130	>= 75 <130	>= 53 <75	>= 35 <53	>= 20 <35	<20	
Libre	1.90	2.35	1.71	1.65	1.83	1.22	10.66
Medio	0.51	0.78	0.59	0.58	0.82	0.64	3.92
Ocluido	0.26	0.19	0.09	0.04	0.05	0.00	0.63
Total	**2.67**	**3.32**	**2.39**	**2.27**	**2.70**	**1.86**	**15.21**

Nota: La unidad de los datos es en gramos (g).

Tabla 8

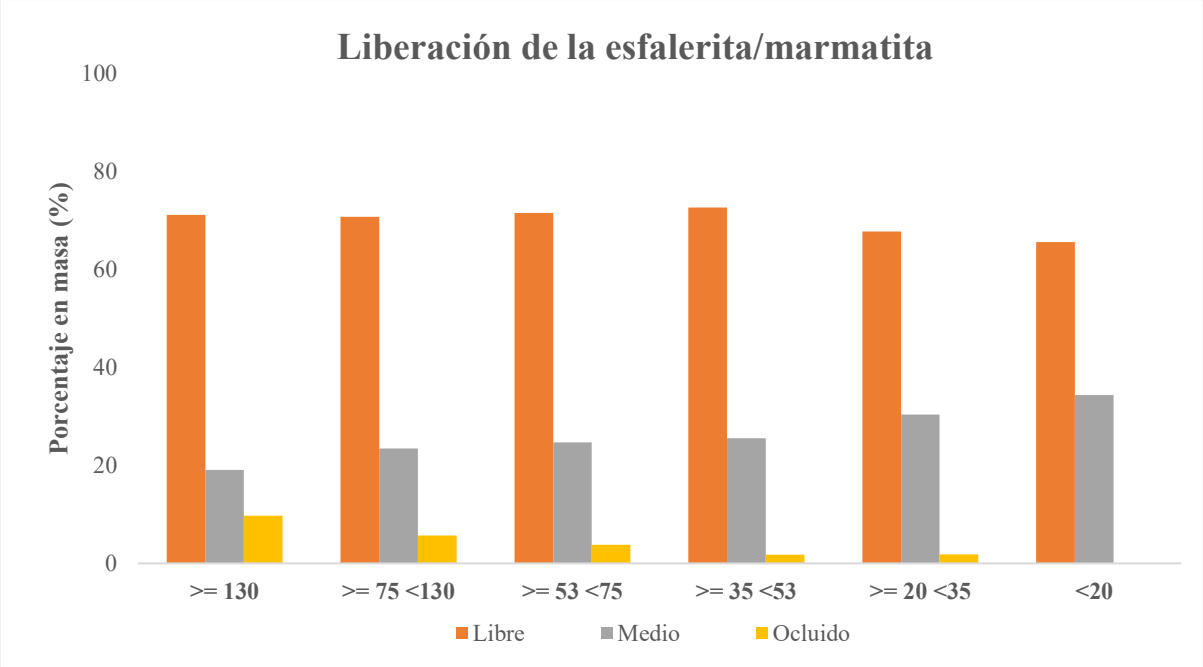
Porcentaje en masa según la granulometría – esfalerita/marmatita.

Liberación de la esfalerita/marmatita	Tamaño [µm]						Total (%)
	>= 130	>= 75 <130	>= 53 <75	>= 35 <53	>= 20 <35	<20	
Libre	71.16	70.78	71.55	72.69	67.78	65.59	70.09
Medio	19.10	23.49	24.69	25.55	30.37	34.41	25.77
Ocluido	9.74	5.72	3.77	1.76	1.85	0.01	4.14
Total	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**

Nota: La unidad de los datos es en porcentaje (%).

Figura 21

Representación del porcentaje de liberación - esfalerita/marmatita.



Nota: Empleado gráficas de barras.

4.2.1.2. Ensambles Mineralógicos de la Esfalerita

Se observó a la esfalerita formando en lances con la pirita, calcita y cuarzo, con valores de distribución del 5.32%, 9.60%, y 4.28%. Así también se identificaron que otros ensambles complejos representaron el 2.05% del volumen de la muestra, tal y como se observa en la tabla 9, y en el gráfico de barras de la figura 22.

Tabla 9

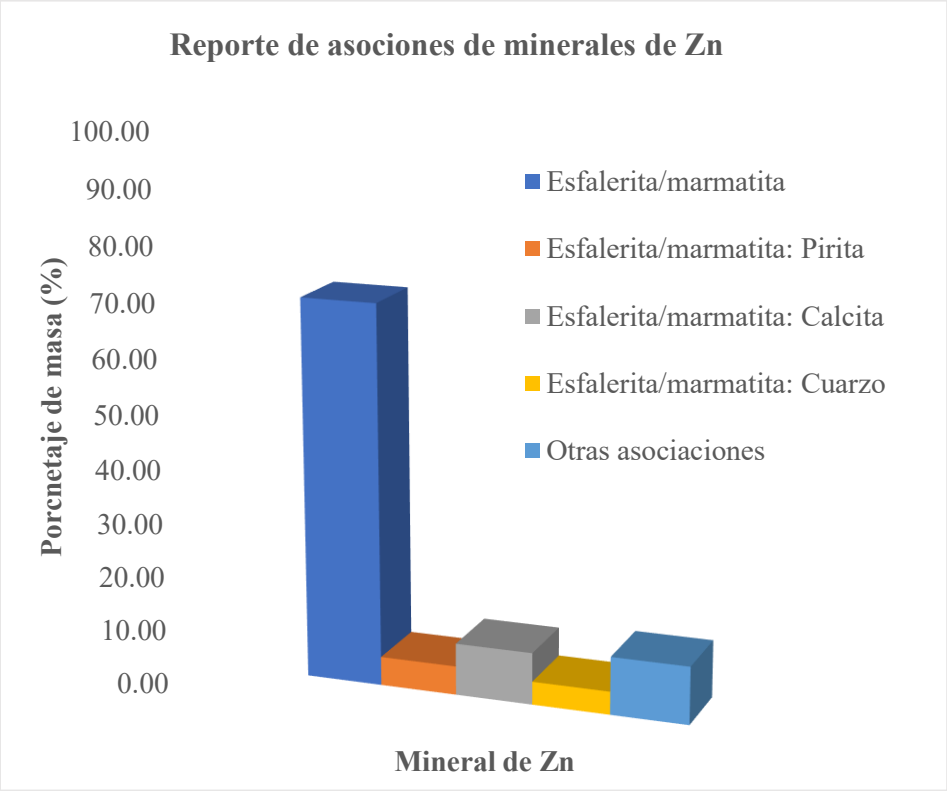
Asociaciones de minerales de Zn.

Asociaciones de minerales de Zn	Composición (g)	Distribución porcentual (%)
Esfalerita/marmatita	13.43	70.09
Esfalerita/marmatita: Pirita	1.02	5.32
Esfalerita/marmatita: Calcita	1.84	9.60
Esfalerita/marmatita: Cuarzo	0.82	4.28
Otras asociaciones	2.05	10.70
Total	19.16	100.00

Nota: Las unidades de los datos son gramo (g) y porcentaje (%).

Figura 22

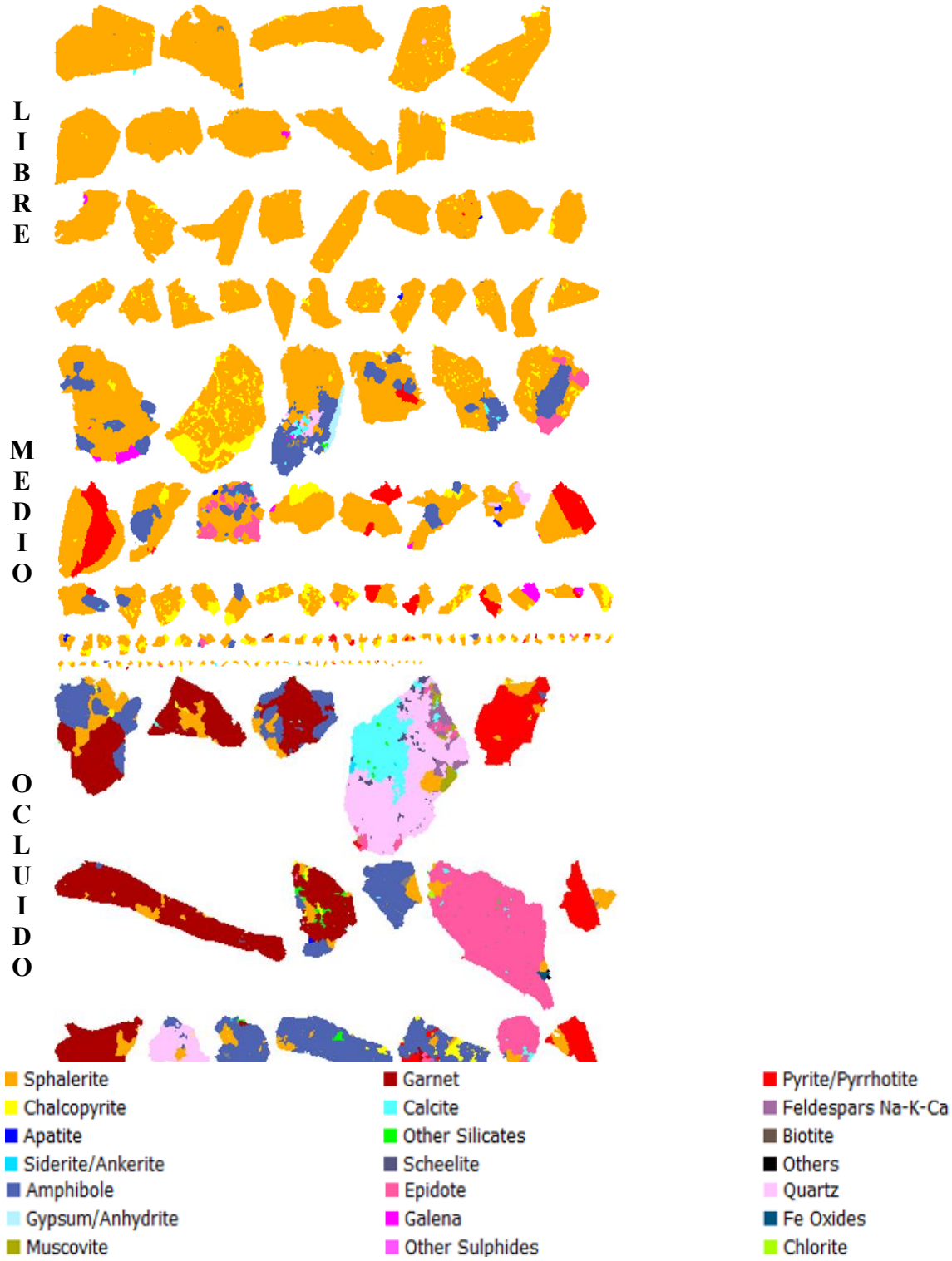
Representación gráfica de las asociaciones de Zn.



Nota: Empleado gráficas de barras.

Figura 23

Partículas según su liberación – Zn.



Nota: Los colores representan un mineral según la leyenda.

Figura 24

Asociaciones de los minerales de Zn.



Esfalerita/marmatita: pirita



Esfalerita/marmatita: calcita



Esfalerita/marmatita: cuarzo



Nota: Los colores representan un mineral según la leyenda.

4.2.2. Especies Minerales de Plomo y sus Amarres Mineralógicos

Las especies de plomo que se identificaron en el microscopio TIMA fue la galena principalmente con una composición del 5.08%, además de la cerusita y anglesita con distribuciones del 0.17% y 0.09%, con respecto al total de la muestra. Las distribuciones de las especies de plomo se describen con respecto a su composición con respecto al total de la muestra y su distribución con respecto al total de las especies que aportan plomo en la tabla 10.

Tabla 10

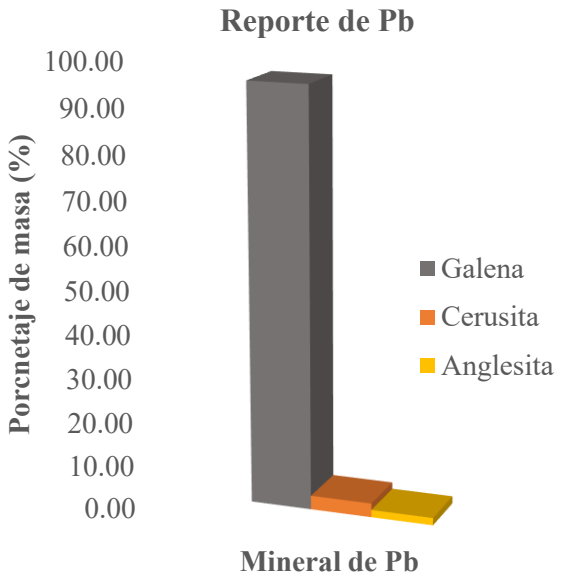
Especies identificados con microscopia electrónica – Pb.

Mineral de Pb	Composición (g)	Distribución porcentual (%)
Galena	5.08	95.13
Cerusita	0.17	3.18
Anglesita	0.09	1.69
Total	5.34	100.00

Nota: Las unidades de los datos son gramo (g) y porcentaje (%).

Figura 25

Composición de minerales de Pb.



Nota: Empleado gráficas de barras.

4.2.2.1. Grados de Liberación de la Galena

La necesidad de saber el grado de liberación de la galena se debe a que dicha especie representa el 95.13% de plomo en la muestra de cabeza, de tal manera que se determinó los

porcentajes de liberación de los minerales para un P80 de 130 µm. Los ensayos determinaron que la muestra presentó un grado de liberación del 77.91%, además las partículas presentan un valor de 4.15% de partículas ocluidas de galena. La mayor liberación de las especies de galena se identificó para los rangos de tamaño mayores a las 53 µm y menores a 130 µm, tal y como lo describen las tablas 11, y el gráfico 26.

Tabla 11

Distribución de masas según la granulometría – galena.

Liberación de la galena	**Tamaño [µm]**						**Total (g)**
	>= 130	**>= 75 <130**	**>= 53 <75**	**>= 35 <53**	**>= 20 <35**	**<20**	
Libre	0.07	0.88	1.51	0.72	0.52	0.99	4.69
Medio	0.45	0.17	0.21	0.18	0.05	0.02	1.08
Ocluido	0.07	0.09	0.04	0.05	0.00	0.00	0.25
Total	**0.59**	**1.14**	**1.76**	**0.95**	**0.57**	**1.01**	**6.02**

Nota: La unidad de los datos es en gramos (g).

Tabla 12

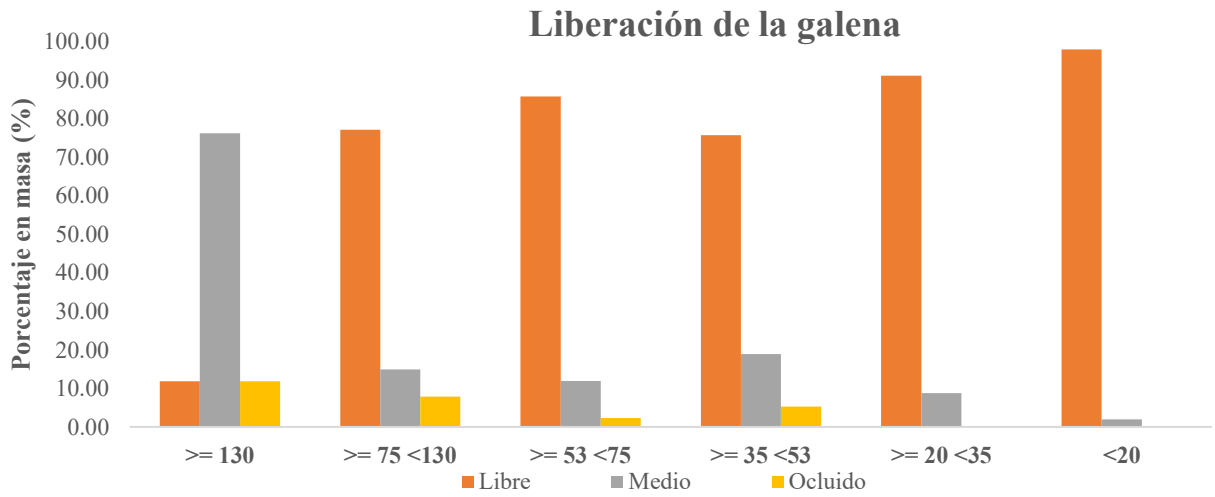
Porcentaje en masa según la granulometría – galena.

Liberación de la galena	**Tamaño [µm]**						**Total (%)**
	>= 130	**>= 75 <130**	**>= 53 <75**	**>= 35 <53**	**>= 20 <35**	**<20**	
Libre	11.86	77.19	85.80	75.79	91.23	98.01	77.91
Medio	76.27	14.91	11.93	18.95	8.77	1.98	17.94
Ocluido	11.86	7.89	2.27	5.26	0.00	0.01	4.15
Total	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**

Nota: La unidad de los datos es en porcentaje (%).

Figura 26

Representación del porcentaje de liberación – galena.



Nota: Empleado gráficas de barras.

4.2.2.2. Ensambles Mineralógicos de la Galena

Se observó a especies de galeana formando enlaces mixtos con la pirita, pirrotita, calcopirita, bornita y esfalerita. Se reportó el ensamble mineralógico galena-esfalerita marmatítica la cual representó el 11.04% del volumen total de las especies de plomo.

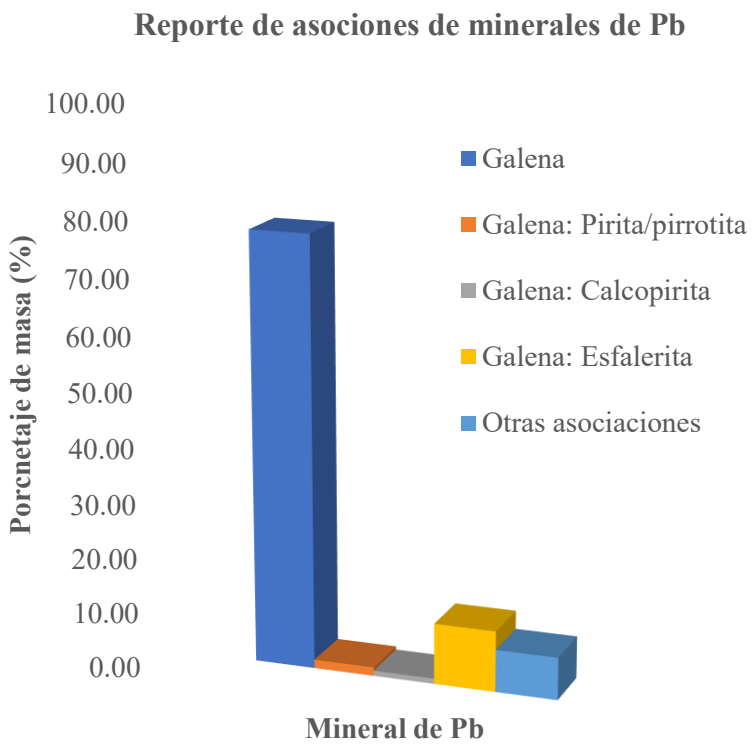
Tabla 13

Asociaciones de minerales de Zn.

Asociaciones de minerales de Zn	Composición (g)	Distribución porcentual (%)
Galena	6.49	77.91
Galena: Pirita/pirrotita	0.13	1.56
Galena: Calcopirita	0.08	0.96
Galena: Bornita	0.07	0.84
Galena: Esfalerita	0.92	11.04
Otras asociaciones	0.64	7.68
Total	8.33	100.00

Figura 27

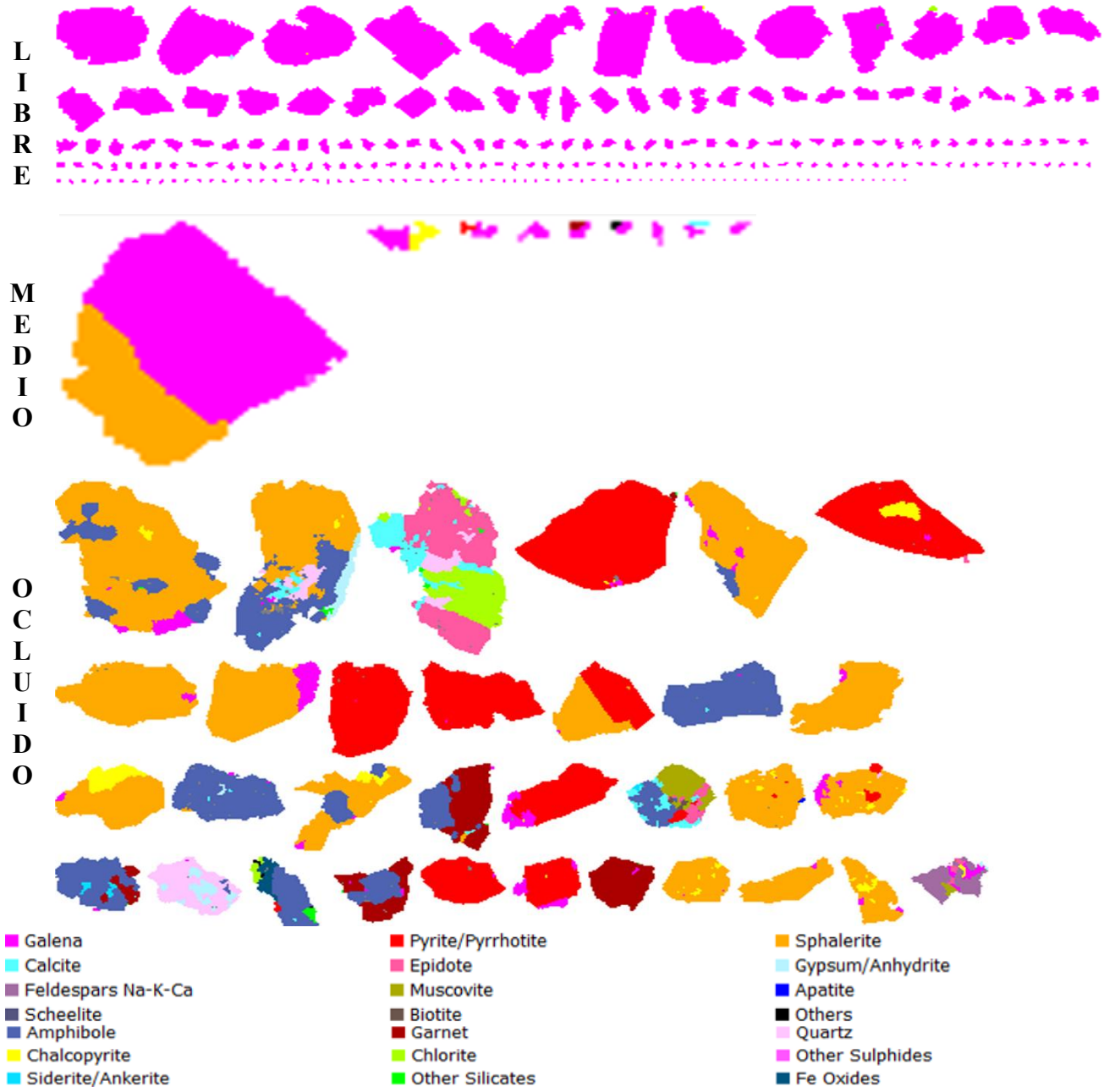
Representación gráfica de las asociaciones de Pb.



Nota: Empleado gráficas de barras.

Figura 28

Partículas según su liberación – Pb.



Nota: Los colores representan un mineral según la leyenda.

Figura 29

Asociaciones de los minerales de Pb.



Galena: pirita/pirrotita



Galena: calcopirita



Galena: esfalerita



Nota: Los colores representan un mineral según la leyenda.

4.2.3. Especies Minerales de Cobre y sus Amarres Mineralógicos

El total de las especies de Cu representaron el 4.66% del volumen total de la muestra, siendo la calcopirita la que aportó la mayor cantidad de contenido metálico con una distribución del 84.98%. Así también, se identificó a la bornita que aportó el 8.96% del contenido de cobre, tal y como se representa en la tabla 14 y la figura 30.

Tabla 14

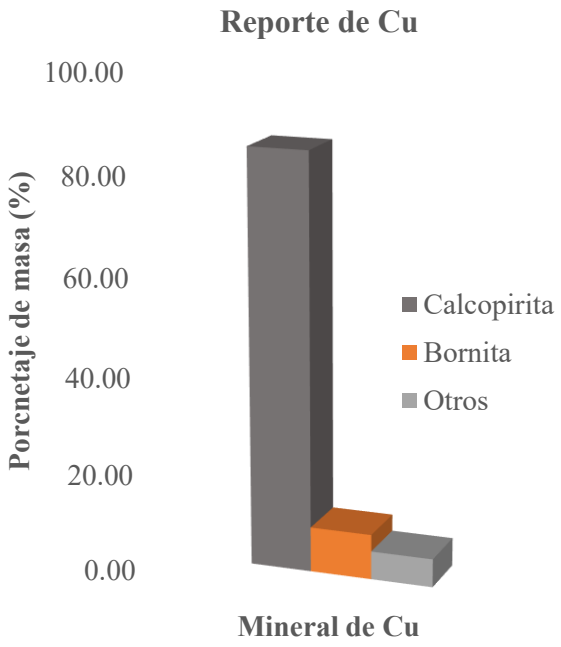
Especies identificados con microscopia electrónica – Cu.

Mineral de Cu	Composición (g)	Distribución porcentual (%)
Calcopirita	3.96	84.98
Bornita	0.43	9.23
Otros	0.27	5.79
Total	4.66	100.00

Nota: Las unidades de los datos son gramo (g) y porcentaje (%).

Figura 30

Composición de minerales de Cu.



Nota: Empleado gráficas de barras.

4.2.3.1. Grados de Liberación de la Calcopirita

El análisis del grado de liberación determinó que el 77.71% de la calcopirita se identificó como libre, además se pudo determinar que la mayor cantidad de mineral liberado fue a un tamaño mayor a las 53 µm y menor que 75 µm y representa el 25.5 % en peso de la muestra. El análisis de partículas libres por tamaño se representa en la tabla 15 y en el gráfico de barras de la figura 31.

Tabla 15

Distribución de masas según la granulometría – calcopirita.

Liberación de la calcopirita	Tamaño [µm]						Total (g)
	>= 130	>= 75 <130	>= 53 <75	>= 35 <53	>= 20 <35	<20	
Libre	0.32	0.41	1.27	0.85	0.43	0.59	3.87
Medio	0.11	0.09	0.28	0.36	0.15	0.00	0.99
Ocluido	0.03	0.00	0.06	0.03	0.00	0.00	0.12
Total	**0.46**	**0.50**	**1.61**	**1.24**	**0.58**	**0.59**	**4.98**

Nota: La unidad de los datos es en gramos (g).

Tabla 16

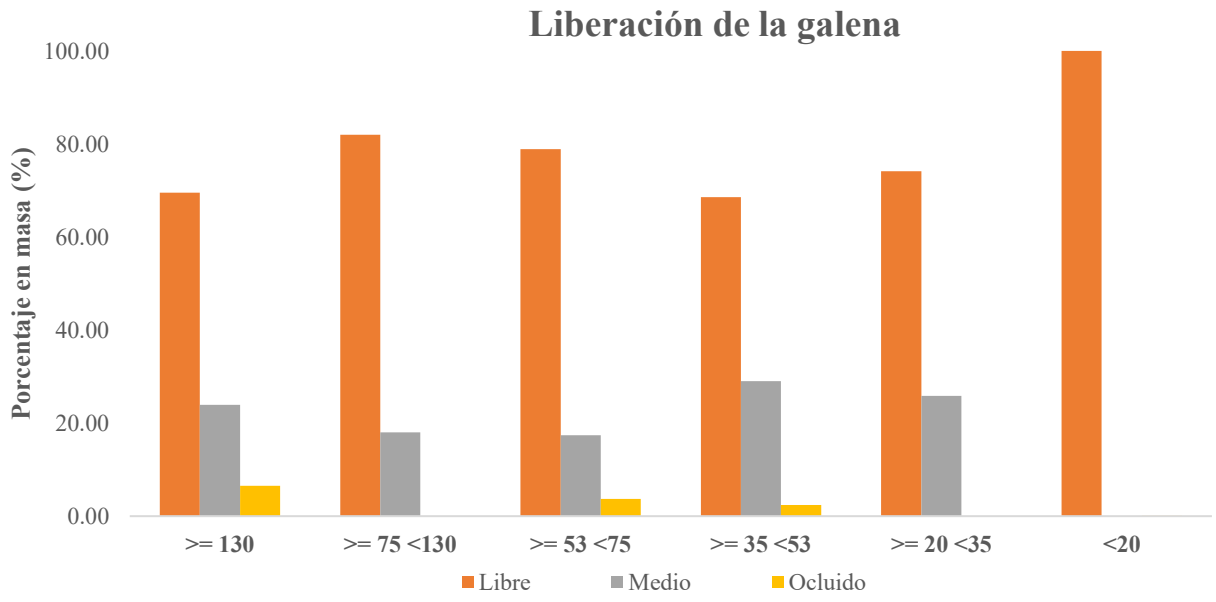
Porcentaje en masa según la granulometría – calcopirita.

Liberación de la calcopirita	Tamaño [µm]						Total (%)
	>= 130	>= 75 <130	>= 53 <75	>= 35 <53	>= 20 <35	<20	
Libre	69.57	82.00	78.88	68.55	74.14	99.98	77.71
Medio	23.91	18.00	17.39	29.03	25.86	0.00	19.88
Ocluido	6.52	0.00	3.73	2.42	0.00	0.02	2.41
Total	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**

Nota: La unidad es en porcentaje (%).

Figura 31

Representación del porcentaje de liberación – calcopirita.



Nota: Empleado gráficas de barras.

4.2.3.2. Ensambles Mineralógicos de la Calcopirita

Se pudo observar a la calcopirita formando enlaces con la esfalerita con un valor del 0.32% del volumen total de la muestra, así también con la galena con un valor porcentual del 0.27%. Así también se pudo identificar ensambles con pirita, granate, epidota, tal y como se puede observar en la tabla 17.

Tabla 17

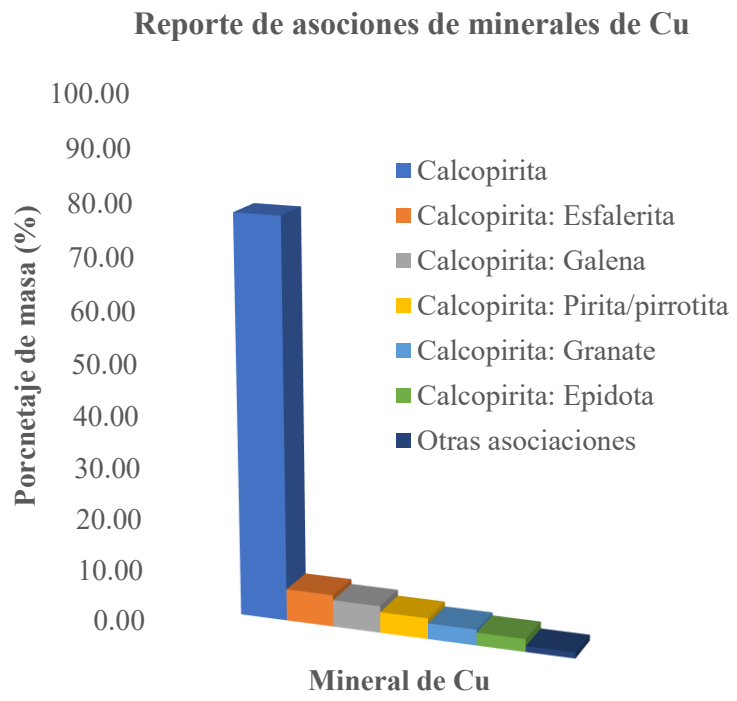
Asociaciones de minerales de Zn.

Asociaciones de minerales de Zn	Composición (g)	Distribución porcentual (%)
Calcopirita	4.01	77.71
Calcopirita: Esfalerita	0.32	6.20
Calcopirita: Galena	0.27	5.23
Calcopirita: Pirita/pirrotita	0.21	4.07
Calcopirita: Granate	0.16	3.10
Calcopirita: Epidota	0.13	2.52
Otras asociaciones	0.06	1.16
Total	5.16	100.00

Nota: Las unidades de los datos son gramo (g) y porcentaje (%).

Figura 32

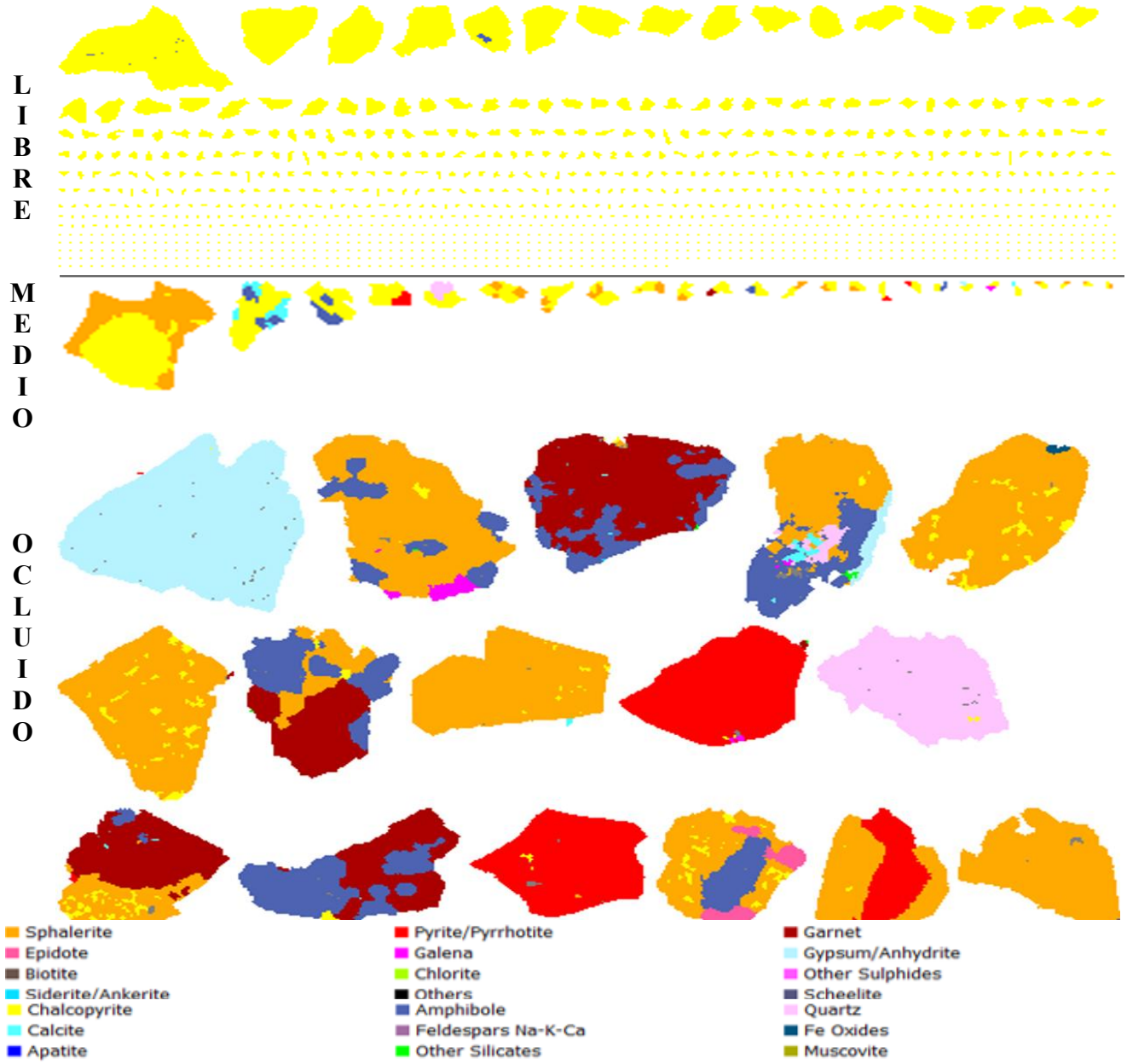
Representación gráfica de las asociaciones de Cu.



Nota: Empleado gráficas de barras.

Figura 33

Partículas según su liberación – Cu.



Nota: Los colores representan un mineral según la leyenda.

Figura 34

Asociaciones de los minerales de Cu.



Calcopirita: pirita/pirrotita



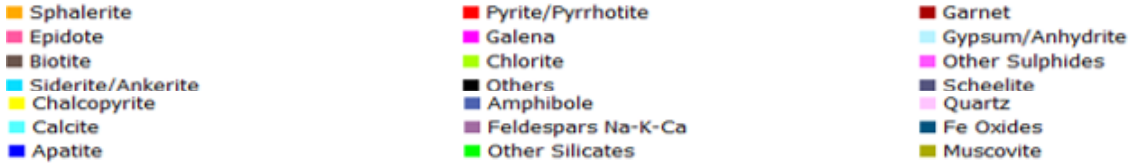
Calcopirita: esfalerita



Calcopirita: galena



Calcopirita: granate - epidota



Nota: Los colores representan un mineral según la leyenda.

4.3. Análisis Químico del Mineral de Cabeza

Una muestra representativa del lote de mineral sulfurado fue ensayada mediante métodos volumétricos para determinar las leyes de Pb, Zn y Cu, mientras que, para Au y Ag, se empleó el método de copelación. Los resultados del análisis químico se describen en la tabla 18.

Tabla 18

Ensayos químicos del mineral de cabeza.

Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)
5.07	6.37	1.54	3.47	1.23

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

4.4. Proceso Estándar de Flotación

El beneficio de minerales sulfurados polimetálicos en la provincia de Oyón se realizó mediante el proceso de flotación en plantas de acopio, la cual, se lleva a cabo en una primera etapa la flotación bulk de Pb-Cu, deprimiendo los sulfuros de Zn. Las condiciones estándar de la primera etapa de flotación bulk Pb-Cu, se detallan en la tabla 19, y los resultados de la flotación bulk en el balance metalúrgico de la tabla 20.

Los relaves de la flotación bulk Pb-Cu se alimentan al circuito de flotación de Zn, para lo cual se acondiciona con reactivo $CuSO_4$ (5%) a un pH de 11. Las condiciones de operación para la flotación estándar de Zn se describen en la tabla 21, y los resultados de la flotación se detalla en el balance metalúrgico de la tabla 22.

Tabla 19

Condiciones de operación de la flotación Pb-Cu.

Parámetro	Valor
Peso	1200 g
pH	8.5
Granulometría	200 µ
$ZnSO_4$	120 g/TM
NaCN	40 g/TM
Acondicionamiento depresor	5 min
AR-3418	30 g/TM
MIBC	15 g/TM
Acondicionamiento de colectores	5 min
Tiempo de flotación	8 min

Nota: Las unidades de los datos son gramos (g), micrones (µ), gramos por toneladas métricas (g/TM) y minutos (min).

Tabla 20

Balance de la flotación Pb-Cu.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Concentrado Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	152.64	12.72	30.04	6.54	11.94	21.44	6.01	382.11	83.19	151.88	272.72	76.45	73.70	13.53	65.47	70.40	53.39	7.86
Medio Pb-Cu	301.47	25.12	3.67	1.56	2.57	1.1	0.43	92.20	39.19	64.56	27.63	10.80	17.78	6.38	27.83	7.13	7.54	
Relave	745.89	62.16	0.71	7.92	0.25	1.4	0.9	44.13	492.29	15.54	87.02	55.94	8.51	80.09	6.70	22.46	39.07	
Cabeza calculada			**5.18**	**6.14**	**2.32**	**3.87**	**1.43**	**518.44**	**614.67**	**231.98**	**387.37**	**143.19**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 21

Condiciones de operación de la flotación Zn.

Parámetro	Valor
Peso	1000 g
pH	11
Granulometría	170 µ
$CuSO_4$	120 g/TM
Acondicionamiento de depresor	10 minutos
Z-11	60 g/TM
MIBC	20 g/TM
Acondicionamiento de colectores	5 minutos
Tiempo de flotación	10 minutos

Nota: Las unidades de los datos son gramos (g), micrones (µ), gramos por toneladas métricas (g/TM) y minutos (min).

Tabla 22

Balance de la flotación Zn.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Contenido Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1000	100.00																
Bulk Zn	171.43	17.14	0.97	42.74	1.03	2.45	2.71	16.63	732.69	17.66	42.00	46.46	37.07	88.50	81.84	36.74	63.45	5.83
Medio Zn	224.89	22.49	0.45	2.89	0.04	0.8	0.17	10.12	64.99	0.90	17.99	3.82	22.56	7.85	4.17	15.74	5.22	
Relave	603.68	60.37	0.3	0.5	0.05	0.9	0.38	18.11	30.18	3.02	54.33	22.94	40.37	3.65	13.99	47.52	31.33	
Cabeza calculada			0.44	8.27	0.21	1.14	0.73	44.86	827.87	21.58	114.32	73.22	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

4.4.1. Evaluación del Desplazamiento de Zinc en la Flotación Bulk Pb-Cu

En función de la caracterización mineralógica del material de estudio, se llevaron a cabo pruebas de flotación bulk Pb-Cu con el propósito de evaluar la influencia de los reactivos depresores, tales como el sulfato de zinc ($ZnSO_4$ al 5%), el cianuro de sodio (NaCN al 1%) y el pH del sistema, sobre el desplazamiento de las especies de zinc hacia el concentrado bulk. Los rangos de variación de las variables evaluadas se presentan en la Tabla 23, mientras que la estructura del diseño experimental factorial aplicado en las pruebas metalúrgicas se detalla en la Tabla 24.

Tabla 23

Valores de las variables analizadas en la flotación bulk Pb-Cu.

Variables	Valor mínimo	Valor máximo
$ZnSO_4$ (g/TM)	120	240
NaCN (g/TM)	30	60
pH	7	9

Nota: La unidad de los datos es gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 24

Número de pruebas en la flotación bulk Pb-Cu.

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	$ZnSO_4$	NaCN	pH
1	1	1	1	120	30	7
2	2	1	1	240	30	7
3	3	1	1	120	60	7
4	4	1	1	240	60	7
5	5	1	1	120	30	9
6	6	1	1	240	30	9
7	7	1	1	120	60	9
8	8	1	1	240	60	9
9	9	1	1	120	30	7
10	10	1	1	240	30	7
11	11	1	1	120	60	7
12	12	1	1	240	60	7
13	13	1	1	120	30	9
14	14	1	1	240	30	9
15	15	1	1	120	60	9
16	16	1	1	240	60	9

Nota: Pruebas donde se evalúan todas las combinaciones posibles de las variables con sus valores máximos y mínimos.

4.4.1.1. Resultados del Diseño Experimental de Flotación Pb-Cu

La prueba más representativa del diseño factorial correspondió a la prueba N°7, alcanzando una recuperación de 95.71% de Pb, 94.34 % de Cu, y 79.29% de Ag. Asi también, se alcanzó un mínimo desplazamiento de zinc en el concentrado bulk, con un valor de 5.14% de Zn en el bulk, y una calidad de 1.24%, con dosificaciones de 120 g/TM de $ZnSO_4$, 60 g/TM de NaCN, a un pH de 9. El total de los resultados de las pruebas de flotación se detallan en los balances metalúrgicos de las tablas del 25 al 40.

Tabla 25

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 1.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	148.75	12.40	24.44	6.54	8.34	21.44	6.11	302.95	81.07	103.38	265.77	75.74	56.99	13.02	54.53	69.71	59.45	8.07
Medio Pb-Cu	287.66	23.97	1.92	1.56	1.34	1.1	0.27	46.03	37.40	32.12	26.37	6.47	8.66	6.01	16.94	6.92	5.08	
Relave	763.59	63.63	2.87	7.92	0.85	1.4	0.71	182.63	503.97	54.09	89.09	45.18	34.35	80.97	28.53	23.37	35.47	
Cabeza calculada			5.32	6.22	1.90	3.81	1.27	531.61	622.43	189.59	381.22	127.39	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 26

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 2.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	138.74	11.56	26.38	5.43	12.34	20.11	5.46	305.00	62.78	142.67	232.51	63.13	60.42	9.47	71.72	58.73	51.66	8.65
Medio Pb-Cu	255.1	21.26	3.14	0.57	1.54	1.87	0.63	66.75	12.12	32.74	39.75	13.39	13.22	1.83	16.46	10.04	10.96	
Relave	806.16	67.18	1.98	8.75	0.35	1.84	0.68	133.02	587.83	23.51	123.61	45.68	26.35	88.70	11.82	31.23	37.38	
Cabeza calculada			5.05	6.63	1.99	3.96	1.22	504.76	662.72	198.92	395.87	122.20	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 27

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 3.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	150.49	12.54	25.49	6.02	7.93	20.14	6.39	319.67	75.50	99.45	252.57	80.14	60.72	11.61	54.93	67.18	58.25	7.97
Medio Pb-Cu	266.4	22.20	3.67	0.81	1.97	1.03	0.53	81.47	17.98	43.73	22.87	11.77	15.48	2.77	24.16	6.08	8.55	
Relave	783.11	65.26	1.92	8.53	0.58	1.54	0.7	125.30	556.66	37.85	100.50	45.68	23.80	85.62	20.91	26.73	33.20	
Cabeza calculada			5.26	6.50	1.81	3.76	1.38	526.44	650.14	181.03	375.94	137.58	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 28

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 4.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	151.22	12.60	26.41	3.97	9.11	18.41	5.08	332.81	50.03	114.80	232.00	64.02	64.79	7.54	66.64	61.51	51.40	7.94
Medio Pb-Cu	276.3	23.03	4.11	1.54	1.07	1.3	0.7	94.63	35.46	24.64	29.93	16.12	18.42	5.34	14.30	7.94	12.94	
Relave	772.48	64.37	1.34	8.98	0.51	1.79	0.69	86.26	578.07	32.83	115.23	44.42	16.79	87.12	19.06	30.55	35.66	
Cabeza calculada			5.14	6.64	1.72	3.77	1.25	513.70	663.56	172.27	377.16	124.55	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 29

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 5.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	151.22	12.60	29.41	3.1	11.07	21.47	7.07	370.62	39.07	139.50	270.56	89.09	72.37	6.47	71.79	67.39	64.89	7.94
Medio Pb-Cu	270.11	22.51	3.98	0.43	1.83	1.29	0.21	89.59	9.68	41.19	29.04	4.73	17.49	1.60	21.20	7.23	3.44	
Relave	778.67	64.89	0.8	8.55	0.21	1.57	0.67	51.91	554.80	13.63	101.88	43.48	10.14	91.92	7.01	25.38	31.67	
Cabeza calculada			5.12	6.04	1.94	4.01	1.37	512.11	603.55	194.32	401.47	137.30	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 30

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 6.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	154.88	12.91	30.01	2.59	11.01	20.11	7.04	387.33	33.43	142.10	259.55	90.86	75.29	5.35	74.16	68.27	66.10	7.75
Medio Pb-Cu	279.14	23.26	3.27	0.91	1.58	1.07	0.11	76.07	21.17	36.75	24.89	2.56	14.79	3.39	19.18	6.55	1.86	
Relave	765.98	63.83	0.8	8.94	0.2	1.5	0.69	51.07	570.66	12.77	95.75	44.04	9.93	91.27	6.66	25.18	32.04	
Cabeza calculada			5.14	6.25	1.92	3.80	1.37	514.46	625.25	191.62	380.19	137.47	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 31

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 7.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	150.14	12.51	31.04	1.24	12.34	25.44	8.71	388.36	15.51	154.39	318.30	108.98	70.20	2.79	75.61	73.38	73.63	7.99
Medio Pb-Cu	279.83	23.32	6.05	0.56	1.64	1.1	0.27	141.08	13.06	38.24	25.65	6.30	25.50	2.35	18.73	5.91	4.25	
Relave	770.03	64.17	0.37	8.22	0.18	1.4	0.51	23.74	527.47	11.55	89.84	32.73	4.29	94.86	5.66	20.71	22.11	
Cabeza calculada			5.53	5.56	2.04	4.34	1.48	553.19	556.04	204.19	433.78	148.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 32

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 8.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	148.75	12.40	32.54	2.94	11.11	19.22	6.71	403.36	36.44	137.72	238.25	83.18	68.47	6.39	76.07	65.66	54.01	8.07
Medio Pb-Cu	287.66	23.97	5.44	0.56	1.25	1.11	1.07	130.41	13.42	29.96	26.61	25.65	22.14	2.35	16.55	7.33	16.66	
Relave	763.59	63.63	0.87	8.18	0.21	1.54	0.71	55.36	520.51	13.36	97.99	45.18	9.40	91.26	7.38	27.01	29.34	
Cabeza calculada			5.89	5.70	1.81	3.63	1.54	589.13	570.38	181.05	362.85	154.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 33

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 9.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	153.79	12.82	23.55	7.04	9.07	19.97	6.89	301.81	90.22	116.24	255.93	88.30	58.58	14.29	56.99	67.56	60.11	7.80
Medio Pb-Cu	280.17	23.35	2.06	1.6	1.27	1.08	0.24	48.10	37.36	29.65	25.22	5.60	9.33	5.92	14.54	6.66	3.81	
Relave	766.04	63.84	2.59	7.89	0.91	1.53	0.83	165.34	503.67	58.09	97.67	52.98	32.09	79.79	28.48	25.78	36.07	
Cabeza calculada			5.15	6.31	2.04	3.79	1.47	515.25	631.25	203.98	378.82	146.89	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 34

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 10.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	143.5	11.96	27.09	5.97	13.17	19.98	5.15	323.95	71.39	157.49	238.93	61.59	60.60	10.52	71.50	56.91	49.98	8.36
Medio Pb-Cu	260.48	21.71	3.07	0.66	1.67	2.04	0.7	66.64	14.33	36.25	44.28	15.19	12.47	2.11	16.46	10.55	12.33	
Relave	796.02	66.34	2.17	8.94	0.4	2.06	0.7	143.95	593.03	26.53	136.65	46.43	26.93	87.37	12.05	32.55	37.69	
Cabeza calculada			5.35	6.79	2.20	4.20	1.23	534.54	678.75	220.28	419.86	123.21	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 35

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 11.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	154.48	12.87	26.19	6.54	7.72	21.11	6.39	337.15	84.19	99.38	271.76	82.26	62.16	13.36	56.54	68.67	57.01	7.77
Medio Pb-Cu	271.48	22.62	3.71	0.83	1.58	1.06	0.66	83.93	18.78	35.74	23.98	14.93	15.48	2.98	20.34	6.06	10.35	
Relave	774.04	64.50	1.88	8.17	0.63	1.55	0.73	121.27	526.99	40.64	99.98	47.09	22.36	83.65	23.12	25.27	32.64	
Cabeza calculada			5.42	6.30	1.76	3.96	1.44	542.35	629.96	175.76	395.72	144.28	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 36

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 12.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	155.43	12.95	25.04	4.07	8.95	17.96	6.07	324.33	52.72	115.92	232.63	78.62	60.58	7.95	65.07	61.83	57.73	7.72
Medio Pb-Cu	280.37	23.36	4.97	1.49	1.11	1.24	0.61	116.12	34.81	25.93	28.97	14.25	21.69	5.25	14.56	7.70	10.47	
Relave	764.2	63.68	1.49	9.04	0.57	1.8	0.68	94.89	575.70	36.30	114.63	43.30	17.72	86.80	20.37	30.47	31.80	
Cabeza calculada			5.35	6.63	1.78	3.76	1.36	535.34	663.23	178.16	376.23	136.18	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 37

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 13.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	149.81	12.48	30.11	3.17	10.96	19.91	7.19	375.90	39.57	136.83	248.56	89.76	73.47	6.73	71.99	66.31	65.79	8.01
Medio Pb-Cu	259.69	21.64	4.08	0.49	1.79	1.33	0.3	88.29	10.60	38.74	28.78	6.49	17.26	1.80	20.38	7.68	4.76	
Relave	790.5	65.88	0.72	8.16	0.22	1.48	0.61	47.43	537.54	14.49	97.50	40.18	9.27	91.46	7.63	26.01	29.45	
Cabeza calculada			5.12	5.88	1.90	3.75	1.36	511.62	587.72	190.06	374.84	136.44	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 38

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 14.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	157.3	13.11	30.17	3.06	10.97	19.09	6.91	395.48	40.11	143.80	250.24	90.58	75.63	6.57	72.91	67.23	62.45	7.63
Medio Pb-Cu	286.66	23.89	3.25	1.03	1.63	1.07	0.17	77.64	24.60	38.94	25.56	4.06	14.85	4.03	19.74	6.87	2.80	
Relave	756.04	63.00	0.79	8.67	0.23	1.53	0.8	49.77	546.24	14.49	96.40	50.40	9.52	89.41	7.35	25.90	34.75	
Cabeza calculada			5.23	6.11	1.97	3.72	1.45	522.89	610.96	197.23	372.19	145.04	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 39

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 15.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	149.82	12.49	30.11	1.5	12.74	25.13	7.99	375.92	18.73	159.06	313.75	99.76	69.40	3.37	76.23	71.74	71.01	8.01
Medio Pb-Cu	275.15	22.93	6.13	0.61	1.6	1.08	0.34	140.56	13.99	36.69	24.76	7.80	25.95	2.51	17.58	5.66	5.55	
Relave	775.03	64.59	0.39	8.11	0.2	1.53	0.51	25.19	523.79	12.92	98.82	32.94	4.65	94.12	6.19	22.60	23.45	
Cabeza calculada			5.42	5.57	2.09	4.37	1.40	541.67	556.51	208.66	437.33	140.49	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 40

Prueba de la flotación bulk Pb-Cu 16.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1200	100.00																
Bulk Pb-Cu	151.17	12.60	32.04	2.85	11.14	20.16	7	403.62	35.90	140.34	253.97	88.18	68.86	6.33	79.09	69.37	53.33	7.94
Medio Pb-Cu	290.11	24.18	5.43	0.57	1.09	1.03	1.1	131.27	13.78	26.35	24.90	26.59	22.40	2.43	14.85	6.80	16.08	
Relave	758.72	63.23	0.81	8.19	0.17	1.38	0.8	51.21	517.83	10.75	87.25	50.58	8.74	91.25	6.06	23.83	30.59	
Cabeza calculada			5.86	5.68	1.77	3.66	1.65	586.11	567.51	177.44	366.12	165.36	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

4.4.1.2. Análisis de la Varianza para el Desplazamiento de Zinc

El ANOVA para el desplazamiento de Zn en el concentrado bulk demostró que el pH de flotación fue determinante para controlar el desplazamiento, con un valor de contribución de 72.59%, así también, el $ZnSO_4$ y las interacciones dobles y triples son determinantes para controlar el desplazamiento de zinc en el bulk de Pb-Cu. Los resultados del ANOVA se observan en la tabla 41, y la figura 35 representa la gráfica normal de efectos estandarizados, la cual representa gráficamente la influencia de las variables y sus interacciones, sobre el desplazamiento de Zn en la flotación bulk Pb-Cu.

Tabla 41

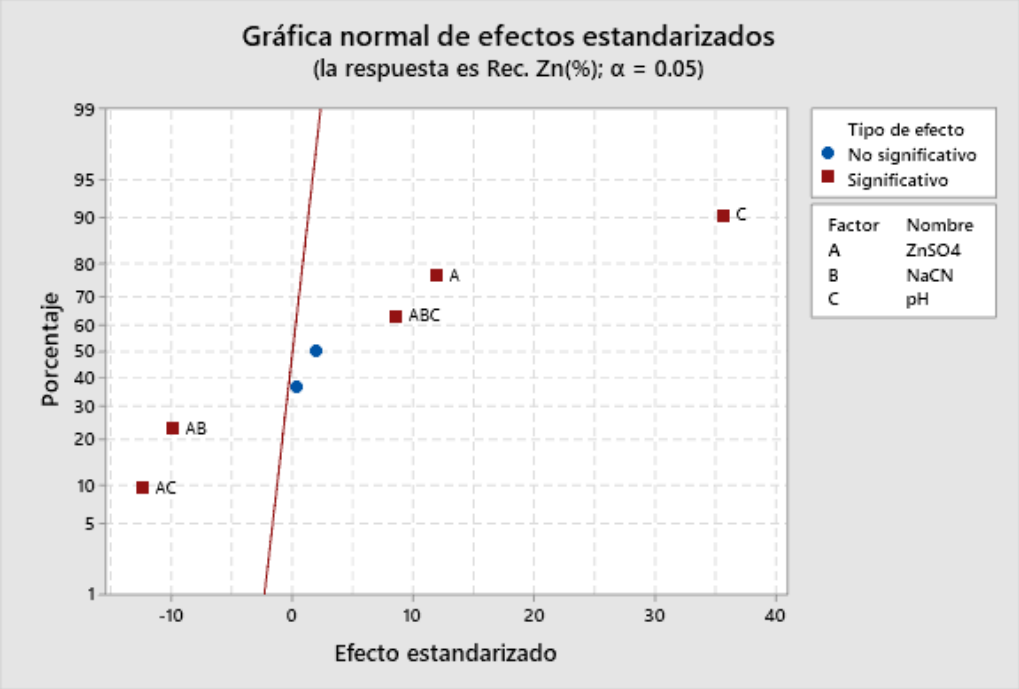
Anova de la flotación Pb-Cu.

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	1044.62	99.54%	1044.62	149.231	249.68	0
Lineal	3	846.33	80.65%	846.33	282.109	472	0
$ZnSO_4$	1	84.52	8.05%	84.52	84.52	141.41	0
NaCN	1	0.04	0.00%	0.04	0.037	0.06	0.809
pH	1	761.77	72.59%	761.77	761.77	1274.52	0
Interacciones de 2 términos	3	154.97	14.77%	154.97	51.658	86.43	0
$ZnSO_4$*NaCN	1	59.16	5.64%	59.16	59.157	98.98	0
$ZnSO_4$*pH	1	93.6	8.92%	93.6	93.605	156.61	0
NaCN*pH	1	2.21	0.21%	2.21	2.212	3.7	0.091
Interacciones de 3 términos	1	43.32	4.13%	43.32	43.315	72.47	0
$ZnSO_4$*NaCN*pH	1	43.32	4.13%	43.32	43.315	72.47	0
Error	8	4.78	0.46%	4.78	0.598		
Total	15	1049.4	100.00%				

Nota: Resaltando la contribución del pH como variable individual en la flotación.

Figura 35

Gráfica normal de efectos estandarizados – Recuperación de Zn en la flotación bulk Pb-Cu.



Nota: Se consideró un α = 0.05.

4.4.1.3. Valores para Mínimo Desplazamiento de Zinc en la Flotación Bulk Pb-Cu

Empleando el optimizador de respuestas del Minitab 19, se programó maximizar la recuperación de Pb, Cu, Ag, y minimizar la recuperación de Zn, tal y como se observa en la tabla 42. Los resultados del ajuste que, para minimizar la recuperación de Zn, se describen en la tabla 43.

Tabla 42

Mínimo valor de la recuperación de Zn en la flotación Pb-Cu.

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Rec. Au(%)	Máximo	62.3141	77.8875		1	1
Rec. Ag(%)	Máximo	67.4534	79.2900		1	1
Rec. Zn(%)	Mínimo		5.1387	20.2106	1	1
Rec. Cu(%)	Máximo	71.4714	94.3432		1	1
Rec. Pb(%)	Máximo	65.6464	95.7080		1	1

Nota: Se asumen los valores máximos para la recuperación de Au, Ag, Cu y Pb.

Tabla 43

Ajuste de variables independientes para el mínimo desplazamiento de Zn en la flotación Pb-Cu.

Solución	$ZnSO_4$	NaCN	pH	Rec. Au(%) Ajuste	Rec. Ag(%) Ajuste	Rec. Zn(%) Ajuste	Rec. Cu(%) Ajuste	Rec. Pb(%) Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	120	60	9	77.2209	78.3473	5.50859	94.0764	95.5289	0.966706

Nota: Se presenta valor mínimo de desplazamiento de Zn.

4.4.2. Diseños Experimentales para la Flotación de Zinc

Para evaluar la flotación de Zn, se tomaron en cuenta los parámetros de la prueba N°7 de flotación bulk Pb-Cu, con la finalidad de preparar una muestra representativa para evaluar la recuperación y calidad de Zn, para lo cual, se evaluaron las variables de dosificación de reactivos $CuSO_4$ (5%) y Z-11 (1%) bajo los parámetros establecidos en la tabla 44. La tabla 45 detalla la plantilla de diseño experimental factorial de 2 niveles, 2 factores y 2 réplicas, tal y como se representa en la tabla 45.

Tabla 44

Valores de las variables analizadas en la flotación Zn.

Variables	Valor mínimo	Valor máximo
$CuSO_4$ (g/TM)	150	300
Z-11 (g/TM)	40	80

Nota: La unidad de los datos es gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 45

Número de pruebas en la flotación Zn.

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	$CuSO_4$	Z-11
1	1	1	1	150	40
2	2	1	1	300	40
3	3	1	1	150	80
4	4	1	1	300	80
5	5	1	1	150	40
6	6	1	1	300	40
7	7	1	1	150	80
8	8	1	1	300	80

Nota: Pruebas donde se evalúan todas las combinaciones posibles de las variables con sus valores máximos y mínimos.

4.4.2.1. Resultados del Diseño Experimental de Flotación de Zn

La prueba metalúrgica N°6 del diseño de pruebas alcanzó los mejores resultados, logrando una recuperación de 97.61% de Zn con una calidad de 48.06%, dosificando 300 g/TM de $CuSO_4$ (5%), y 40 g/TM de Z-11 (1%). El total de los resultados del diseño de pruebas de flotación de Zn, se detallan en los balances metalúrgicos de las tablas 46 al 53.

Tabla 46

Prueba de la flotación Zn 1.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1000	100.00																
Concentrado Zn	167.21	16.72	0.93	37.74	1.03	2.45	2.11	15.55	631.05	17.22	40.97	35.28	75.47	76.38	81.35	38.18	56.54	5.98
Medio Zn	215.43	21.54	0.12	3.44	0.04	0.5	0.17	2.59	74.11	0.86	10.77	3.66	12.55	8.97	4.07	10.04	5.87	
Relave	617.36	61.74	0.04	1.96	0.05	0.9	0.38	2.47	121.00	3.09	55.56	23.46	11.98	14.65	14.58	51.78	37.59	
Cabeza calculada			0.21	8.26	0.21	1.07	0.62	20.61	826.16	21.17	107.30	62.40	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 47

Prueba de la flotación Zn 2.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1000	100.00																
Concentrado Zn	175.42	17.54	0.86	47.13	0.84	3.01	2.55	15.09	826.75	14.74	52.80	44.73	73.16	87.79	72.27	37.40	80.02	5.70
Medio Zn	255.13	25.51	0.15	3.48	0.11	0.92	0.17	3.83	88.79	2.81	23.47	4.34	18.56	9.43	13.76	16.62	7.76	
Relave	569.45	56.95	0.03	0.46	0.05	1.14	0.12	1.71	26.19	2.85	64.92	6.83	8.28	2.78	13.96	45.98	12.22	
Cabeza calculada			0.21	9.42	0.20	1.41	0.56	20.62	941.73	20.39	141.19	55.90	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 48

Prueba de la flotación Zn 3.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1000	100.00																
Concentrado Zn	148.75	14.88	0.89	40.17	1.05	1.17	1.89	13.24	597.53	15.62	17.40	28.11	53.54	79.22	66.96	14.27	67.80	6.72
Medio Zn	287.42	28.74	0.38	3.55	0.17	0.5	0.19	10.92	102.03	4.89	14.37	5.46	44.17	13.53	20.95	11.78	13.17	
Relave	563.83	56.38	0.01	0.97	0.05	1.6	0.14	0.56	54.69	2.82	90.21	7.89	2.28	7.25	12.09	73.95	19.04	
Cabeza calculada			0.25	7.54	0.23	1.22	0.41	24.72	754.25	23.32	121.99	41.47	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 49

Prueba de la flotación Zn 4.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1000	100.00																
Concentrado Zn	150.02	15.00	0.74	43.13	1.14	2.11	1.42	11.10	647.04	17.10	31.65	21.30	58.69	80.48	84.33	27.75	59.27	6.67
Medio Zn	291.14	29.11	0.23	3.51	0.09	0.7	0.33	6.70	102.19	2.62	20.38	9.61	35.40	12.71	12.92	17.87	26.73	
Relave	558.84	55.88	0.02	0.98	0.01	1.11	0.09	1.12	54.77	0.56	62.03	5.03	5.91	6.81	2.76	54.38	13.99	
Cabeza calculada			0.19	8.04	0.20	1.14	0.36	18.92	803.99	20.28	114.07	35.94	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 50

Prueba de la flotación Zn 5.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1000	100.00																
Concentrado Zn	170.86	17.09	0.9	38.09	1.2	2.5	1.8	15.38	650.81	20.50	42.72	30.75	74.02	77.09	84.59	38.61	53.15	5.85
Medio Zn	208.75	20.88	0.11	3.29	0.06	0.46	0.11	2.30	68.68	1.25	9.60	2.30	11.05	8.14	5.17	8.68	3.97	
Relave	620.39	62.04	0.05	2.01	0.04	0.94	0.40	3.10	124.70	2.48	58.32	24.82	14.93	14.77	10.24	52.71	42.88	
Cabeza calculada			0.21	8.44	0.24	1.11	0.58	20.78	844.18	24.24	110.63	57.87	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 51

Prueba de la flotación Zn 6.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1000	100.00																
Concentrado Zn	178.82	17.88	0.81	48.06	0.84	3.01	2.55	14.48	859.41	15.02	53.82	45.60	69.35	88.35	72.71	37.95	80.38	5.59
Medio Zn	255.13	25.51	0.14	3.53	0.11	0.92	0.17	3.57	90.06	2.81	23.47	4.34	17.10	9.26	13.59	16.55	7.65	
Relave	566.05	56.61	0.05	0.41	0.05	1.14	0.12	2.83	23.21	2.83	64.53	6.79	13.55	2.39	13.70	45.50	11.97	
Cabeza calculada			0.21	9.73	0.21	1.42	0.57	20.89	972.68	20.66	141.83	56.73	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 52

Prueba de la flotación Zn 7.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1000	100.00																
Concentrado Zn	153.45	15.35	0.73	39.94	0.98	1.23	2.04	11.20	612.88	15.04	18.87	31.30	53.26	79.45	69.01	16.05	73.03	6.52
Medio Zn	278.85	27.89	0.21	3.63	0.12	0.61	0.15	5.86	101.22	3.35	17.01	4.18	27.84	13.12	15.36	14.46	9.76	
Relave	567.7	56.77	0.07	1.01	0.06	1.44	0.13	3.97	57.34	3.41	81.75	7.38	18.89	7.43	15.63	69.49	17.22	
Cabeza calculada			0.21	7.71	0.22	1.18	0.43	21.03	771.44	21.79	117.63	42.87	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

Tabla 53

Prueba de la flotación Zn 8.

Componentes	Peso	% Peso	Ley					Metálico					Recuperación (%)					Ratio
			Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Ag (Oz/TC)	Au (g/TM)	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	Pb	Zn	Cu	Ag	Au	
Cabeza	1000	100.00																
Concentrado Zn	171.43	17.14	0.97	38.02	1.03	2.45	2.71	16.63	651.78	17.66	42.00	46.46	37.07	84.53	81.84	36.74	63.45	5.83
Medio Zn	224.89	22.49	0.45	2.89	0.04	0.8	0.17	10.12	64.99	0.90	17.99	3.82	22.56	8.43	4.17	15.74	5.22	
Relave	603.68	60.37	0.3	0.9	0.05	0.9	0.38	18.11	54.33	3.02	54.33	22.94	40.37	7.05	13.99	47.52	31.33	
Cabeza calculada			0.45	8.28	0.22	7.71	0.73	44.86	771.10	21.58	771.10	73.22	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son porcentaje (%), onzas por toneladas cortas (Oz/TC) y gramos por toneladas métricas (g/TM).

4.4.2.2. Análisis de la Varianza para la Recuperación de Zinc

El análisis de la varianza para la recuperación de Zn demostró que la variable dosificación de $CuSO_4$ (5%) ejerció una contribución de 51.72%, así también la interacción de los reactivos empleados contribuyó sobre la variable recuperación, con un valor de 45.18%, tal y como se representa en la tabla 54. Como resultado del análisis de los datos de la recuperación de Zn, se presenta el modelo que predice dicha variable respuesta, la cual presentó un coeficiente de correlación del 99.66%. El conjunto total de coeficientes de correlación del modelo ajustado se describe en la tabla 55.

Tabla 54

Anova de la flotación Zn – recuperación.

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	151.751	99.91%	151.751	50.5838	1551.24	0.000
Lineal	2	83.125	54.73%	83.125	41.5623	1274.58	0.000
$CuSO_4$	1	78.561	51.72%	78.561	78.5606	2409.2	0.000
Z-11	1	4.564	3.00%	4.564	4.564	139.96	0.000
Interacciones de 2 términos	1	68.627	45.18%	68.627	68.6267	2104.56	0.000
$CuSO_4$*Z-11	1	68.627	45.18%	68.627	68.6267	2104.56	0.000
Error	4	0.13	0.09%	0.13	0.0326		
Total	7	151.882	100.00%				

Nota: Resaltando la contribución del $CuSO_4$ como variable individual en la flotación.

También se obtuvo la ecuación de regresión, Rec. Zn(%) = 54.082 + 0.15894($CuSO_4$) + 0.4771(Z-11) - 0.001953($CuSO_4$*Z-11).

Tabla 55

Resumen de datos estadístico obtenido del Anova de la flotación Zn – Recuperación.

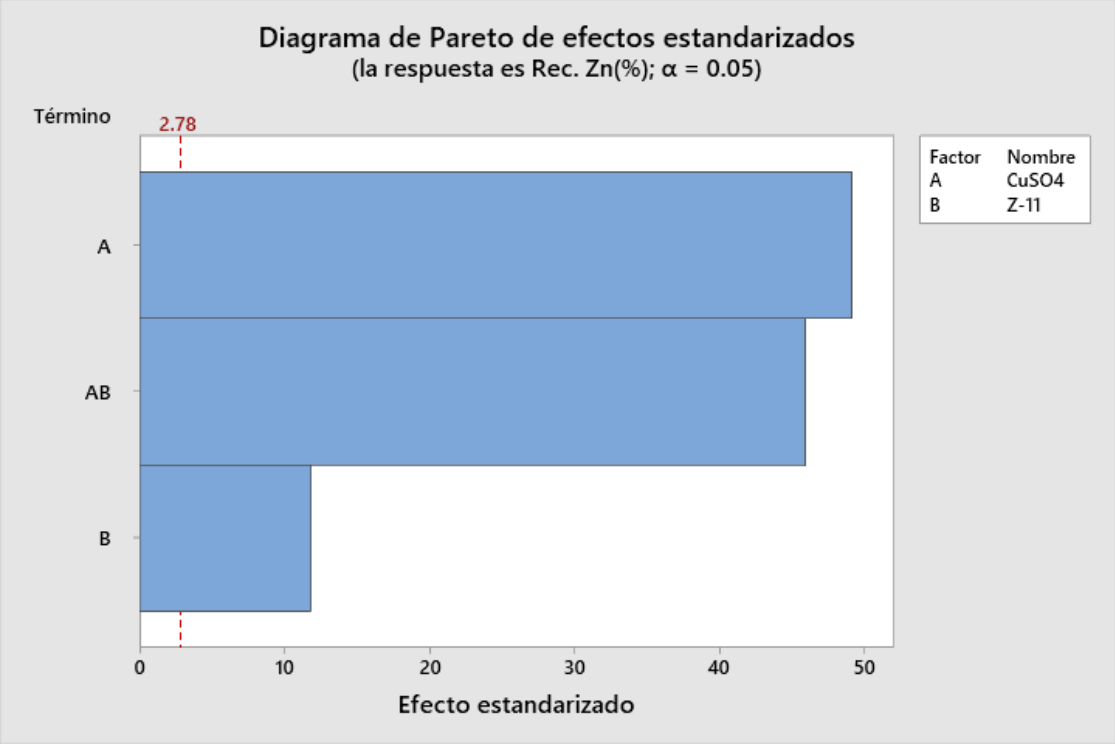
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
0.180578	99.91%	99.85%	0.521737	99.66%	29.77	0.17

Nota: El R-cuadrado predictivo obtenido demuestra la confiabilidad del ANOVA.

El diagrama de Pareto de la figura 36 representa gráficamente los efectos estandarizados de las variables estudiadas, con una confiabilidad del 95%, la cual demuestra que las variables estudiadas y sus interacciones, son determinantes para determinar la variable respuesta.

Figura 36

Diagrama de Pareto de la recuperación de Zn en la flotación Zn.

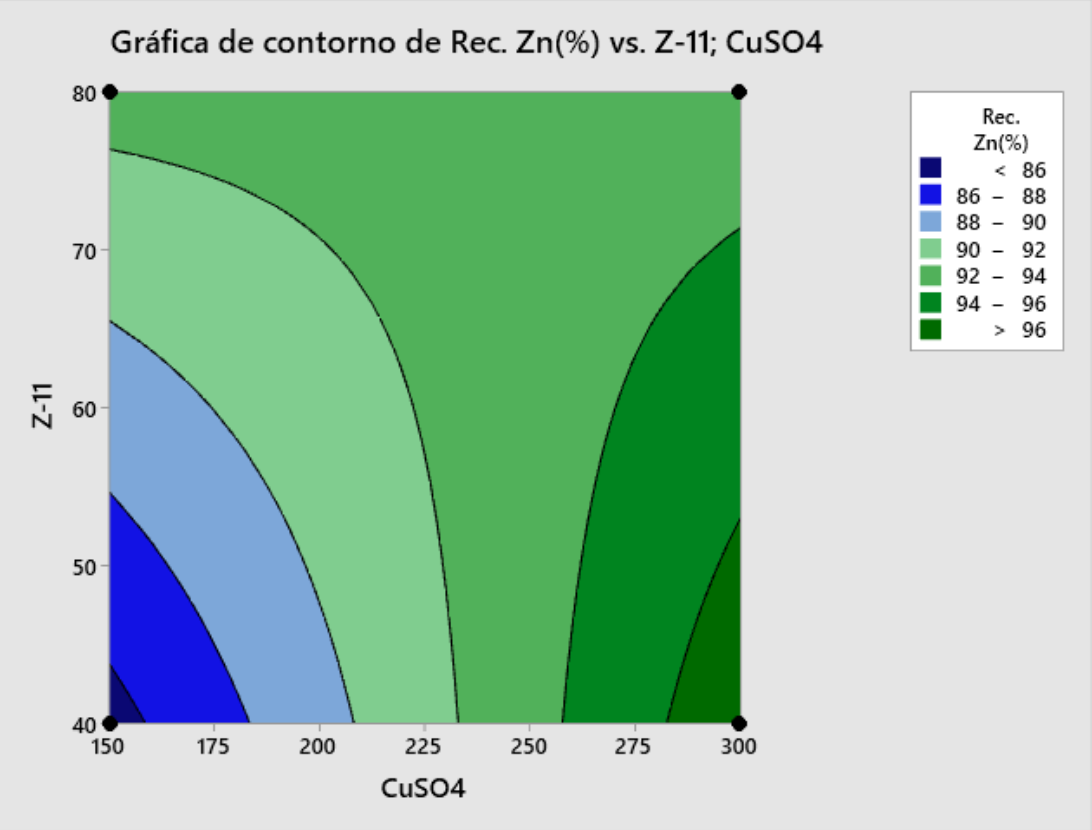


Nota: Se consideró un α = 0.05.

La gráfica de contornos de la figura 37 representa la recuperación en áreas sombreadas, en función de la dosificación de la dosificación de $CuSO_4$ (5%) y Z-11 (1%). Se puede observar en la gráfica el área verde oscuro, representa los mayores valores de recuperación. Con respecto a la dosificación de los reactivos empleados, la figura 38 representa a gráfica de efectos principales para la media de recuperación de Zn, en la cual se observa que a mayores dosificaciones de $CuSO_4$ y Z-11, la recuperación aumenta.

Figura 37

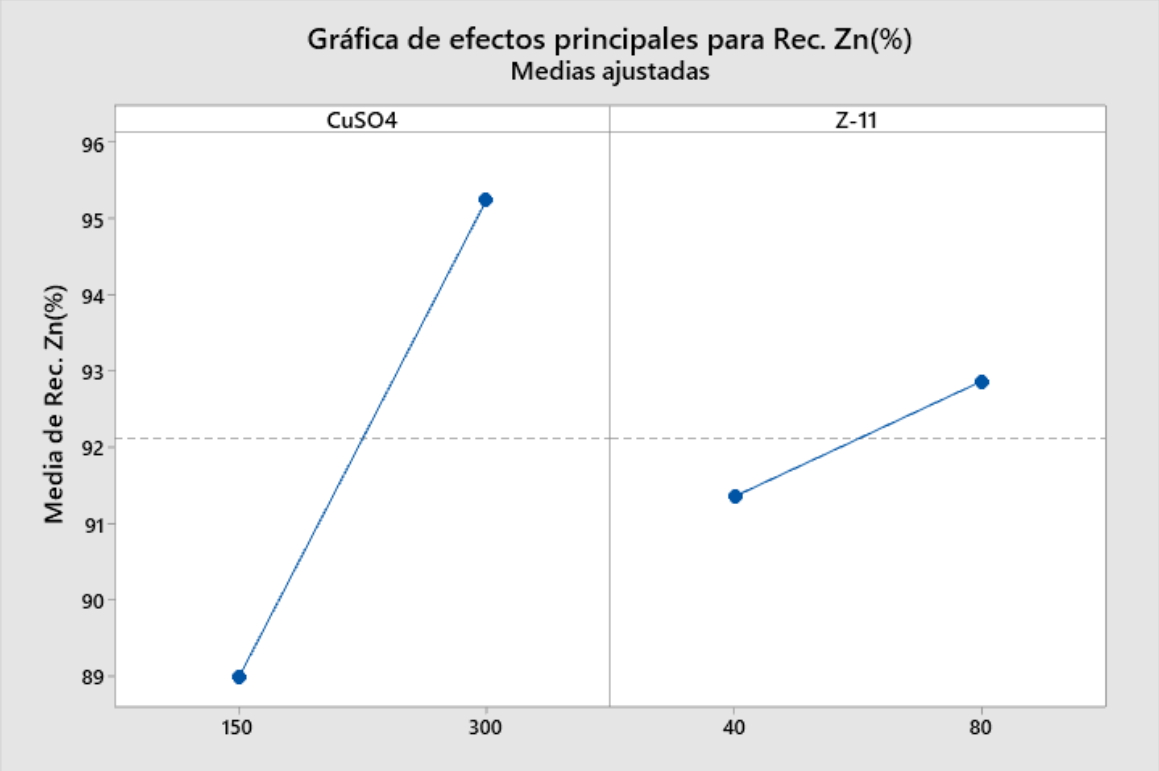
Gráfica de contorno de la recuperación de Zn en la flotación Zn.



Nota: Contornos de colores según la recuperación alcanzada.

Figura 38

Gráfica de efectos principales de la recuperación de Zn en la flotación Zn.



Nota: Ajusta según las variables principales.

4.4.2.3. Análisis de la Varianza para la Ley de Zinc en el Concentrado

El ANOVA para la calidad en el concentrado demostró que la mayor contribución la ejerce la dosificación del reactivo $CuSO_4$, con un valor de 43.55%, así también, la interacción de las variables contribuye con un valor de 35.12% y como se puede observar en la tabla 56. Como resultado del análisis de la varianza, se presentó un modelo matemático, el cual predice la calidad de zinc en el proceso de flotación, con un valor de coeficiente de correlación del 54.54%. El conjunto total de coeficientes de correlación se describe en la tabla 57.

Tabla 56

Anova de la flotación Zn – ley.

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	105.88	88.63%	105.88	35.293	10.4	0.023
Lineal	2	63.93	53.52%	63.93	31.964	9.42	0.031
$CuSO_4$	1	52.02	43.55%	52.02	52.02	15.33	0.017
Z-11	1	11.91	9.97%	11.91	11.907	3.51	0.134
Interacciones de 2 términos	1	41.95	35.12%	41.95	41.953	12.36	0.025
$CuSO_4$*Z-11	1	41.95	35.12%	41.95	41.953	12.36	0.025
Error	4	13.58	11.37%	13.58	3.394		
Total	7	119.46	100.00%				

Nota: Resaltando la contribución del $CuSO_4$ como variable individual en la flotación.

La ecuación de regresión, Ley Zn(%) = 16.94 + 0.1256($CuSO_4$) + 0.282(Z-11) - 0.001527($CuSO_4$*Z-11).

Tabla 57

Resumen de datos estadístico obtenido del Anova de la flotación Zn – ley.

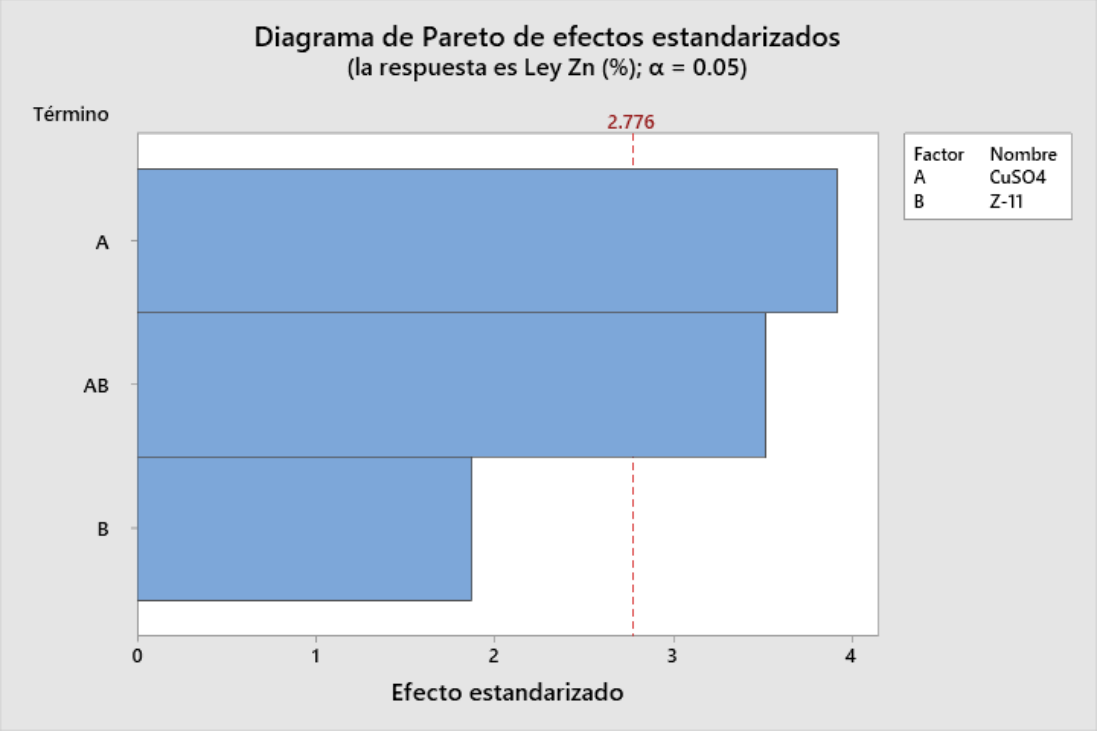
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
1.84229	88.63%	80.11%	54.3048	54.54%	66.93	37.33

Nota: El R-cuadrado predictivo obtenido demuestra la confiabilidad del ANOVA.

El diagrama de Pareto de la figura 39 representa gráficamente los efectos estandarizados de las variables estudiadas, con una confiabilidad del 95%, la cual demuestra la mayor contribución que ejercen la dosificación de sulfato de cobre, y la interacción de las variables estudiadas, sobre la variable respuesta.

Figura 39

Diagrama de Pareto de la ley de Zn en la flotación Zn.

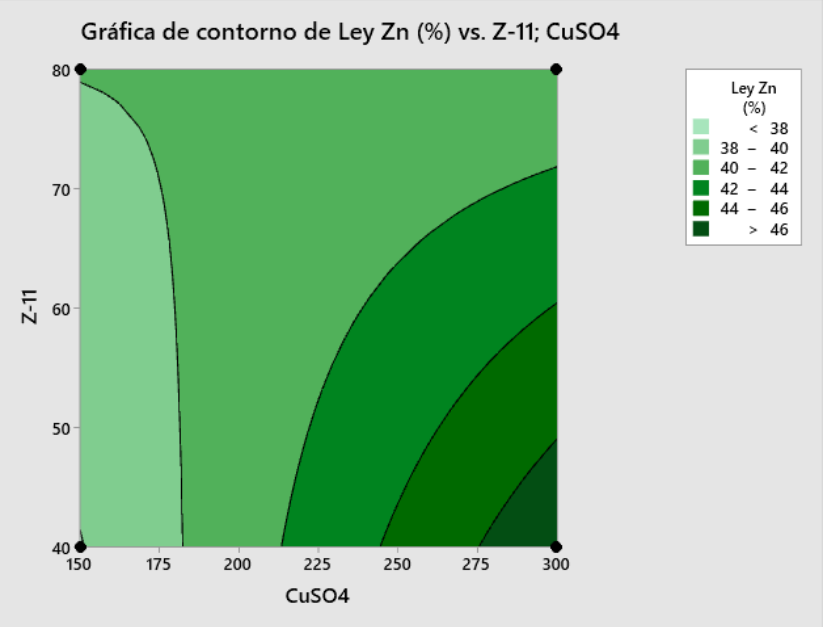


Nota: Se consideró un α = 0.05.

La gráfica de contornos de la figura 40 representa la ley del concentrado de Zn en áreas sombreadas, en función de la dosificación de la dosificación de $CuSO_4$ (5%) y Z-11 (1%). Se puede observar en la gráfica el área verde oscura, representa los mayores valores de calidad de concentrado. Con respecto a la dosificación de los reactivos empleados, la figura 41 representa la gráfica de efectos principales para la media de ley de Zn en el concentrado.

Figura 40

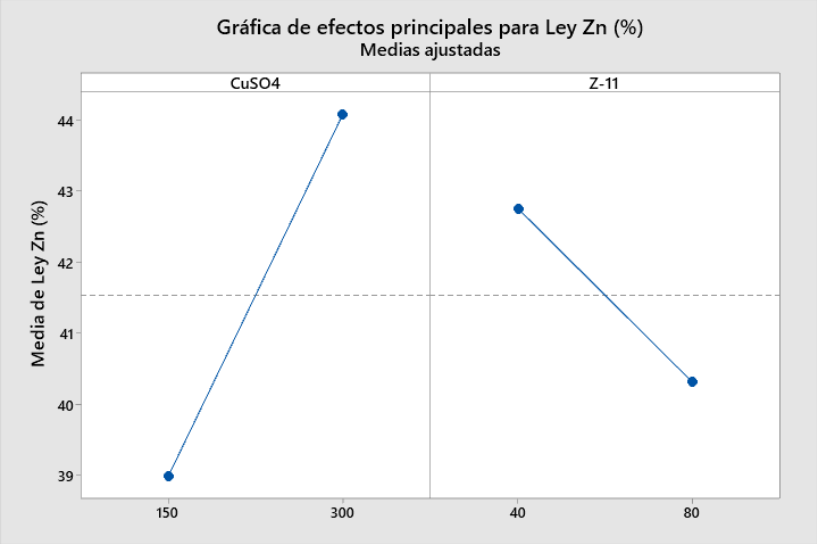
Gráfica de contorno de la ley de Zn en la flotación Zn.



Nota: Contornos de colores según la recuperación alcanzada.

Figura 41

Gráfica de efectos principales de la ley de Zn en la flotación Zn.



Nota: Ajusta según las variables principales.

4.4.2.4. Optimización de la flotación de zinc

Empleado el software estadístico minitab 19, se optimizaron las variables independientes para maximizar la calidad de Zn en el concentrado, tal y como se detalla en la tabla 58. Los valores de las variables optimizadas se describen en la tabla 59, así como también en la figura 42.

Tabla 58

Máximos valores de recuperación y ley de Zn.

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Ley Zn (%)	Máximo	37.7400	48.0600		1	1
Rec. Zn(%)	Máximo	85.2285	97.6140		1	1

Nota: Los valores de recuperación y ley se reportan en porcentaje (%).

Tabla 59

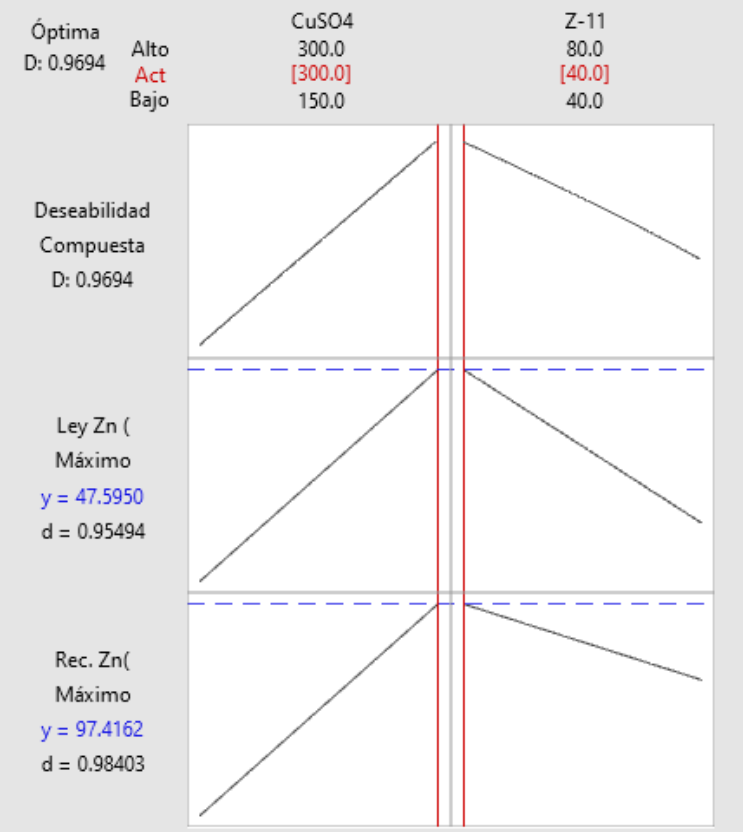
Ajuste de los variables independientes para maximizar la recuperación y ley de Zn.

Solución	$CuSO_4$	Z-11	Ley Zn (%) Ajuste	Rec. Zn(%) Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	300	40	47.595	97.4162	0.969378

Nota: Los valores de las variables $CuSO_4$ y Z-11 se reportan en g/TM.

Figura 42

Optimización de la flotación Zn.



Nota: Ajustado según las valores mínimos y máximos de las variables principales.

4.5. Valorización de Concentrados de Zinc en el Proceso Estándar

Se valorizó el concentrado de Zn del proceso estándar, con valores de 0.96% de Pb, 42.74% de Zn, 1.03% de Cu, 2.45 Oz/TC de Ag, y 2.71 g/TM de Au, tomando en cuenta el precio actual de los metales en el mercado internacional. La valorización del concentrado fue de 726.83 $/TM. El contrato de comercialización del concentrado de Zn se describe en la tabla 60.

Tabla 60

Contrato de comercialización del concentrado de Zn en los procesos estándar.

Datos por considerar:

Variable	Valor
Lote (TMH)	100
Agua	8%
Merma	3%
Maquila ($/TC)	178.94
Precio base ($/TM)	2500
Escalador - Arriba ($/TM)	0.18
Escalador - Abajo ($/TM)	0.12
Costo Zn ($/TM)	3123.5
Costo Ag ($/Oz)	23.74
Costo Au ($/Oz)	1782.7
Ley de Zn*	42.74%
Ley de Pb*	0.96%
Ley de Cu*	1.03%
Ley de Ag(oz/TC) *	2.45
Ley de Fe*	2.71

Pérdidas metalúrgicas

Metal	Pérdidas metalúrgicas	% a pagar
Zn(%)	8%	100%
Ag(Oz/TM)	4	100%

Penalización

Metal	Cantidad libre	Penalización	Cantidad límite para castigar	Castigo por impurezas
Pb	2.00%	5	1.00%	0.00
Cu	0.20%	5	0.10%	41.50

Bonificaciones y maquila

Variable	Valor
Pagos por Zn ($)	1085.10
Bonificación por Ag ($)	-36.80
Maquila de fundición ($/TM)	197.24
Escalador de Zn ($/TM)	112.23
Maquila total	309.47

Valorización

Valor	$
Valor del concentrado ($)	697.33
Valor del lote ($)	62229.96

Nota: Los datos de valorización son representados en $/mes, *ley en el concentrado.

4.5.1. Valorización de Concentrados de Zinc en el Proceso Propuesto

En base a la optimización de las variables en el proceso de flotación, se valorizó el concentrado de Zn, teniendo en cuenta las leyes: Zn = 48.06%, Cu = 0.84% y Ag = 2.55 Oz/TC. Teniendo en cuenta los valores actualizados del precio de los metales en el mercado internacional, el precio fue de 893.00 $/TM, tal y como se puede observar en el contrato de comercialización de la tabla 61.

Tabla 61

Contrato de comercialización del concentrado de Zn en el proceso propuesto.

Datos por considerar:

Variable	Valor
Lote (TMH)	100
Agua	8%
Merma	3%
Maquila ($/TC)	178.94
Precio base ($/TM)	2500
Escalador - Arriba ($/TM)	0.18
Escalador - Abajo ($/TM)	0.12
Costo Zn ($/TM)	3123.5
Costo Ag ($/Oz)	23.74
Costo Au ($/Oz)	1782.7
Ley de Zn*	48.06%
Ley de Pb*	0.81%
Ley de Cu*	0.84%
Ley de Ag(oz/TC) *	3.01
Ley de Fe*	2.55

Pérdidas metalúrgicas

Metal	Pérdidas metalúrgicas	% a pagar
Zn(%)	8%	100%
Ag(Oz/TM)	4	100%

Penalización

Metal	Cantidad libre	Penalización	Cantidad límite para castigar	Castigo por impurezas
Pb	2.00%	5	1.00%	0.00
Cu	0.20%	5	0.10%	32.00

Bonificaciones y maquila

Variable	Valor
Pagos por Zn ($)	1251.27
Bonificación por Ag ($)	-23.50
Maquila de fundición ($/TM)	197.24
Escalador de Zn ($/TM)	112.23
Maquila total	309.47

Valorización

Valor	$
Valor del concentrado ($)	886.30
Valor del lote ($)	79093.16

Nota: Los datos de valorización son representados en $/mes, *ley en el concentrado.

CAPÍTULO V: Discusión de Resultados

La microscopía óptica de luz reflejada de la muestra representativa logró identificar especies de Zn como la esfalerita con una distribución de 17.24%, de las cuales, el 99.51% se observaron cómo especies libres, además se logró identificar especies de Cu como calcopirita y bornita, con distribuciones del 5.37% y 0.48%, respectivamente, especies de plomo como galena con una distribución de 7.41%, y especies de oro libre y electrum en forma de trazas. La mayor distribución de las gangas hizo necesario realizar una microscopía electrónica.

La microscopía electrónica TIMA de una muestra representativa logró identificar que las especies sulfuradas de Zn correspondieron a las esfaleritas y marmatitas, determinando una distribución del 15.21%, valor que difiere de los identificados en la microscopia óptica, en poco menos del 2%, así también se pudo observar amarres mineralógicos como esfalerita-marmatita, esfalerita-marmatita-pirita, esfalerita-marmatita-calcita, y esfalerita. -marmatita-cuarzo. Además de las especies sulfuradas de Zn, se observó óxidos como la smithsonita con una distribución del 0.09%. Especies de minerales oxidados de plomo se observaron en forma de anglesita y cerusita, con valores de distribución de 0.04% y 0.12 %, respectivamente. La microscopía electrónica permitió identificar a detalle las gangas, identificando especies perjudiciales para el proceso de flotación, como la muscovita, clorita, biotita, calcita, epidota, granate, entre otros. Estas especies consideradas perjudiciales se observaron en porcentajes menores al 0.5%.

En base a la microscopía de la muestra de mineral representativo, se diseñaron pruebas de flotación por etapas, en una primera etapa se concentró Pb-Cu, evaluando las variables de dosificación de reactivos depresores de zinc como el sulfato de Zn, y cianuro de sodio, además de la granulometría del mineral. En esta primera etapa, se emplearon los reactivos convencionales,

tal y como lo propuso **Tiu et al. (2021)**, en la etapa de depresión de minerales de zinc, a diferencia de nuestro trabajo empleó la dextrina, carbohidrato obtenido de almidones. El trabajo presentado por el mencionado autor, presenta la principal diferencia de presentar un estudio de pilotaje de procesamiento, y, por otro lado, presentó el enfoque de mineralogía de procesos, empleando una microscopía electrónica tipo Qemscan.

El objetivo de la evaluación de las variables de dosificación de reactivos depresores de sulfato y cianuro, y la granulometría del mineral, fue minimizar el desplazamiento de Zn en el concentrado bulk Pb-Cu. Las pruebas más representativas del diseño factorial, corresponden a las de orden N° 7 y 15, las cuales emplearon 60 g/TM de NaCN, 120 g/TM de $ZnSO_4$, y un pH= 9, alcanzando valores mínimos de desplazamiento de 5.14% y 5.88%, respectivamente. El análisis de la varianza de los valores de desplazamiento de Zn el concentrado bulk Pb-Cu, determinó que el pH contribuye en un 72.59%, además la dosificación del reactivo $ZnSO_4$ en un 8.05%.

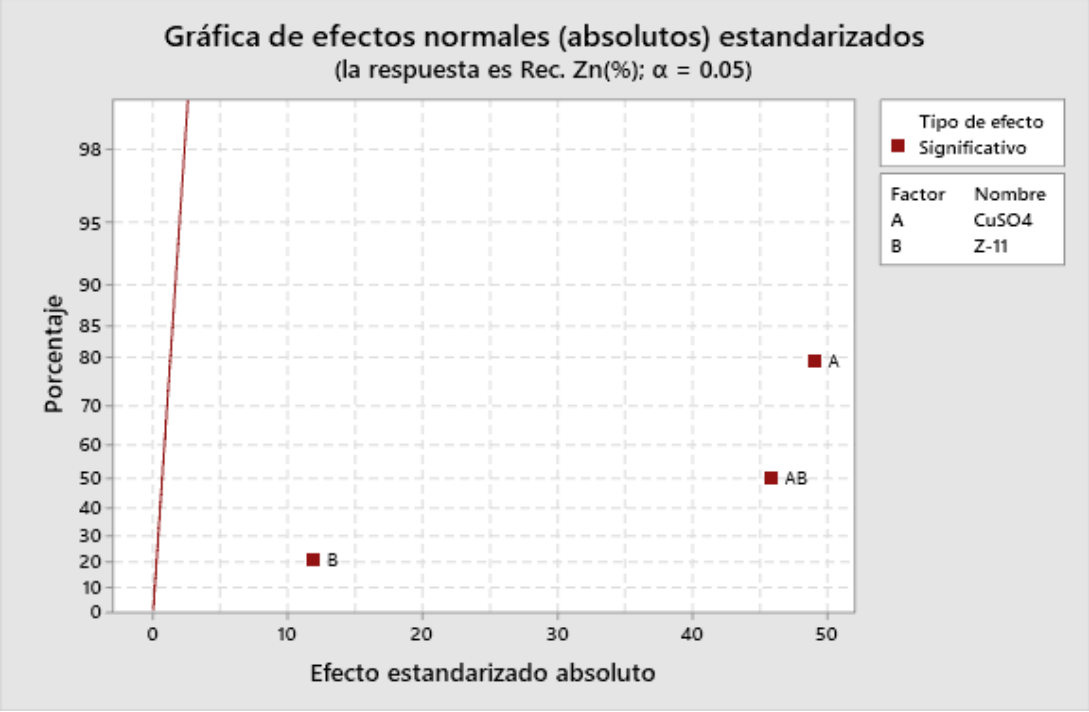
En base a los mejores resultados alcanzados en la primera etapa, se evaluó la etapa de flotación de Zn, con respecto a la recuperación y calidad del concentrado, en función a la dosificación de reactivos como $CuSO_4$ (5%) y Xantato Z-11(1%). Las mejores pruebas de diseño de flotación de Zn fueron las de orden 2 y 6, las cuales emplearon valores de 300 g/TM de $CuSO_4$, y 40 g/TM de Z-11, alcanzando recuperaciones de 97.22% y 97.61%, respectivamente. A diferencia del trabajo presentado por **Castro (2005)**, determinamos la variable alcalinidad de la pulpa como constante. Así también, con respecto a los resultados obtenidos, el autor alcanzó valores por debajo de los alcanzados en la presente investigación. Otra de las diferencias notorias con respecto a dicha investigación, es la presencia de marmatita como mena de Zn, además, la dosificación del reactivo $CuSO_4$ en la mejor prueba de flotación fue de 300 g/TM, valor menor que el determinado por **(Castro, 2005)**. El nivel de significancia de las variables de dosificación

de reactivos en la etapa de Zn se puede observar en el gráfico de efectos normales estandarizados de la figura 43.

Los resultados obtenidos no solo evidencian la optimización de la recuperación de zinc, sino también una mejora en la sostenibilidad del proceso. La reducción en la dosificación de reactivos como NaCN y $ZnSO_4$ disminuye la carga química del relave, contribuyendo a un menor impacto ambiental. Este enfoque es consistente con las tendencias actuales en procesamiento de minerales, donde la eficiencia metalúrgica debe complementarse con prácticas responsables y alineadas con las normativas ambientales vigentes.

Figura 43

Gráfica de efectos normales de la recuperación de Zn.



Nota: Se consideró un α = 0.05.

En la investigación de **Kyaw et al. (2021)** concluyeron que el efecto diferente del sulfato de cobre sobre la flotabilidad de la pirita y la esfalerita se muestra cuando se utilizan butil xantato de potasio y ditiofosfato de butilo sodio como colectores, lo cual constituye en una de las principales similitudes con respecto a la investigación realizada.

Las gráficas 44 y 45 representan la variabilidad de los resultados de recuperación y calidad de Zn obtenidos por el desarrollo de las pruebas de diseño.

Figura 44

Gráfica de probabilidad normal de la calidad de Zn.

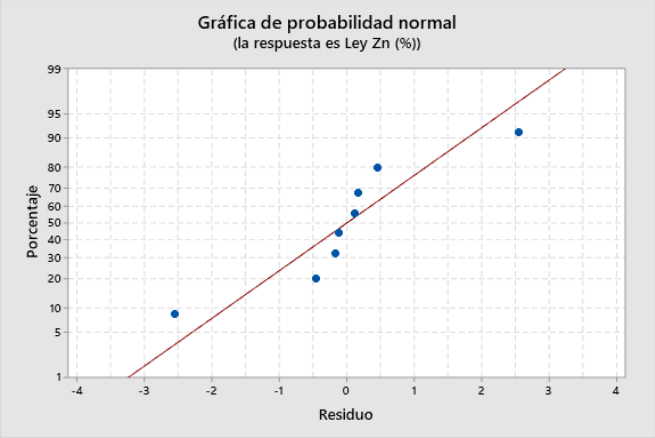
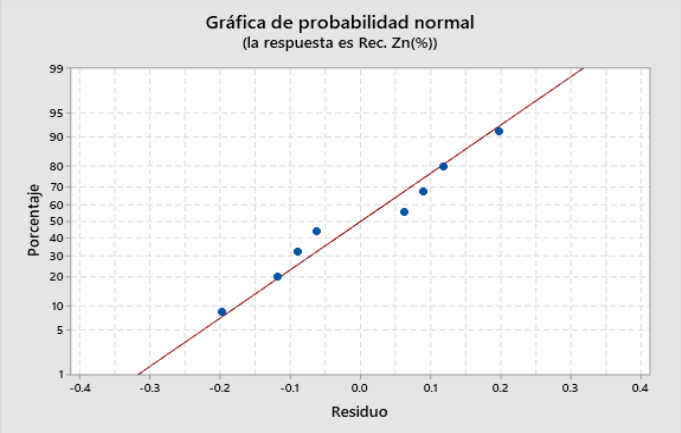


Figura 45

Gráfica de probabilidad normal de la recuperación de Zn.



CONCLUSIONES

- La microscopía óptica de la muestra representativa de mineral sulfurado polimetálico determinó la presencia de especies de minerales tipo cp, bn, py, po, ef, gn, Au, el, hm, gt, y GGs. Las especies de Zn que se identificaron al microscopio óptico corresponden a las esfaleritas marmatiticas, la cual representó una distribución volumétrica de 17.24%, y 99.51% de especies libres. También pudo identificarse especies de cobre como cp y bn, con distribuciones de 5.37% y 0.48% respectivamente, especies de Pb como gn con una distribución de 7.41%, además de trazas de Au y el.
- La microscopía TIMA de una muestra representativa identificó las especies como epidota, granate, cuarzo, muscovita, clorita, biotita, hematita, goethita, siderita, smithsonita, cerusita, anglesita, rutilo, y calcita. El cuarzo representó la ganga con mayor distribución, alcanzando un valor de 9.56%. Se determinó que las esfaleritas marmatiticas representaron un volumen de 15.21%, así también, la gn representó un volumen de 6.02%, y cp con un valor de 4.98%. Los valores reportados por la microscopía electrónica son similares en cuanto a los minerales sulfurados metálicos identificados en la microscopia óptica.
- El proceso de flotación bulk Pb-Cu jugó un rol fundamental en la flotación de zinc, ya que permitió reducir significativamente el desplazamiento del zinc en el concentrado de plomo y cobre. Se identificó que el pH de la pulpa, con un valor de contribución del 72.59%, además de las interacciones dobles de $ZnSO_4$*NaCN y $ZnSO_4$*pH, con valores de 5.64% y 8.92%, respectivamente. La mejor prueba del

diseño para evaluar el desplazamiento de Zn alcanzó un mínimo valor en la prueba N° 7, con un valor de 5.14%.

- La optimización de las variables en la etapa bulk minimizó las pérdidas de zinc, contribuyendo a una recuperación eficiente durante la flotación selectiva de zinc. La mejor prueba de flotación de Zn fue la N°6 del diseño para la flotación de Zn, alcanzando una recuperación de 97.61% con un grado de 48.06%, con una dosificación de 300 g/TM de $CuSO_4$, y 40 g/TM de Z-11. El análisis de la varianza para la recuperación de Zn indicó que la variable $CuSO_4$ fue determinante para recuperar Zn, con un valor de contribución del 43.55%, además la interacción doble de $CuSO_4$ - Z-11 contribuyó con un valor de 35.12%. El modelo que predice la recuperación de Zn en función de las variables estudiadas fue Rec. Zn (%) = 54.082 + 0.15894($CuSO_4$) + 0.4771(Z-11) - 0.001953($CuSO_4$*Z-11), con un coeficiente de correlación del 99.66 %.
- Los valores optimizados de las variables independientes de 300 g/TM de $CuSO_4$ y 40 g/TM de Z-11, para alcanzar una recuperación de 97.41% con una ley de 47.60% de Zn, los cuales corresponden a los valores calculados por el optimizador de variables del Minitab-19.
- El recalculo de la valorización del concentrado de Zn proyectado logró un incremento de 188.96 $/TM de concentrado, valores calculados con los datos optimizados de las variables estudiadas.

RECOMENDACIONES

- En base a los resultados obtenidos, se propone realizar pruebas de escalamiento a nivel pilotaje.
- Se propone evaluar reactivos sintéticos sustitutos del cianuro, las cuales en un corto plazo se insertarán en la industria minera metalúrgica.
- Realizar el estudio económico del proceso propuesto, y comparar la relación beneficio/costo.
- Realizar el estudio del tratamiento de los relaves, dado que parte de la ganga es sulfurada y se espera que tenga afinidad por la formación de lluvias ácidas.
- Evaluar económicamente la concentración en la última etapa de los valores metálicos de hierro, las cuales principalmente se encuentran asociados a la pirita y son fáciles de concentrar por flotación.
- Evaluar reactivos sustitutos del AR-3418, dado que, a pesar de ser un reactivo de alto costo, genera un alto potencial de riesgo a las enfermedades cancerígenas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arias, B. (2018). *Estudio de investigación para la flotación de óxidos de cobre.* Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa.

Azañero, A. (2015). *Flotación y concentracción de minerales.* Lima: Colecciones Jóvic.

Azañero, A., Aramburu, V., Quiñones, J., Puente, L., Cabrera, M. R., Falconi, V., & Quispe, J. d. (2010). Flotación de minerales polimetálicos sulfurados de Pb, Cu y Zn. *Revista del Instituto de investigación de la facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 13*(26), 51-58. https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v13i26.429

Bin, X., Shouguo, Z., Jintian, W., Yujuan, Z., Yongbin, Y., Qian, L., & Tao, J. (2022). A Comprehensive Recovery Process for Selective Separation and Enrichment of Copper, Zinc and Iron Minerals from a Polymetallic Ore and the Adsorption Mechanism of Collector Z-200. *Minerals, 12*(3). https://doi.org/10.3390/min12030384

Castillo, J. (2006). *Investigación Metalúrgica a nivel Planta Piloto.* Tecsup, Lima.

Castillo, J. (2014). *Programa Integral Concentración de Minerales.* Tecsup, Lima.

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.

Chirif, L. (2010). *Microscopía Óptica de Minerales.* INGEMMET, Lima.

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

Delgado, G. (2016). *Operaciones en planta concentradora de mineral polimetálico y óxidos de plomo-plata-cobre de Sociedad Minera Corona S.A.* Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.

Evans, C., Wightman, E., Manlapig, E., & Coulter, B. (2011). Application of process mineralogy as a tool in sustainable processing. *Minerals Engineering, 24*(12), 1242-1248. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.03.017

Fuerstenau, M., Jameson, G., & Yoon, R.-H. (2007). *Froth Flotation: A Century of Innovation.* Colorado: SME.

Ganoza, J. (2022). Flotación de partículas gruesas. *Minería*. https://doi.org/https://revistamineria.com.pe/raiz/flotacion-de-particulas-gruesas

Jianmin, L., Kaiwei, S., Xiaolin, Z., Jialei, L., & Dianwen, L. (2017). Effect of Combined Reagents of Sodium Citrate and Sodium Pyrophosphate on Flotation Separation of a Polymetallic Lead-Zinc Ore. *Guocheng Gongcheng Xuebao/The Chinese Journal of Process Engineering, 17*(3), 500-505. https://doi.org/10.12034/j.issn.1009-606X.216316

Kiraz, E. (2014). *Recovery of copper from oxide copper ore by flotation and leaching.* Middle East Technical University, Ankara.

Kyaw, Z., Tiagalieva, Z., Htet, Z., & Phyo, K. (2021). Improvement of reagent flotation modes of sphalerite and pyrite from deposits of copper-zinc pyrite, polymetallic copper-zinc pyrite and polymetallic ores. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 942*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/942/1/012004

Lamberg, P. (2011). *Particles - the bridge between geology and metallurgy.* Proceedings, Luleå University of Technology, Sweden.

Lane, G., Martin, C., & Pirard, E. (2008). Techniques and applications for predictive metallurgy and ore characterization using optical image analysis. *Minerals Engineering, 21*(7), 568-577. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.11.009

Lang, A., Aasly, K., & Ellefmo, S. (2018). Mineral characterization as a tool in the implementation of geometallurgy into industrial mineral mining. *Minerals Engineering, 116*, 114-122. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.10.021

Lishchuk, V., Koch, P., Ghorbani, Y., & Butcher, A. (2020). Towards integrated geometallurgical approach: Critical review of current practices and future trends. *Minerals Engineering, 145*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106072

Lotter, N. (2011). Modern Process Mineralogy: An integrated multi-disciplined approach to flowsheeting. *Minerals Engineering, 24*(12), 1229-1237. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.03.004

Melgarejo, J., Proenza, 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). https://doi.org/https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222010000100002

Osti, J., Lopes, M., Noguera, F., & Pereira, C. (2017). Avaliação da recuperação dos metais prata, chumbo e zinco presentes em rejeito de processamento hidrometalúrgico de zinco. *HOLOS, 6*(33). https://doi.org/10.15628/holos.2017.6393

Palafox, C., De la Fuente, D., Castillo, J., & Reyes, J. (2010). Rediseño del circuito de flotación de zinc usando modelación matemática. *XV Encuentro sobre Procesamiento de Minerales*, 1-14.

https://www.researchgate.net/publication/267295750_REDISENO_DEL_CIRCUITO_DE_FLOTACION_DE_ZINC_USANDO_MODELACION_MATEMATICA

Pérez, L., Brea, C., & Castroviejo, R. (2010). Innovación en las técnicas de microscopía óptica aplicadas a la industria minera. In J. Loredo, *Nuevos retos en la prospección e investigación de los recursos minerales* (pp. 521-562). Universidad Politécnica de Madrid.

Quispe, K. (2019). *Proceso de flotación del cobre reemplazando el RCS con bisulfito de sodio para mitigar la contaminación de los efluentes líquidos a nivel laboratorio en la Empresa Minera Nexa Resources S.A.C. Pasco – 2019.* Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco.

Ramos, J. C., & 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.

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.

Rodriguez, K. (2015). *Evaluacion de la flotacion de zinc en la planta concentradora austria duvaz s.a.* Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustin, 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.

Ruiz, J., Pons, J., Otaño, J., Hernández, R., Cardoso, L., & Hernández, A. (2018). Caracterización preliminar del depósito mineral Cajálbana para fines metalúrgicos. *Minería y Geología, 34*(3). https://doi.org/http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223555432006

Suther, S., Pownceby, M., Manuel, J., Ware, N., Donskoi, E., & Poliakov, A. (2004). Geometallurgical characterization of Australian iron ores - from ore to processed product. *Metallurgical plant design and operating strategie*, 351-360.

Tiu, G., Ghorbani, Y., Jansson, N., & Wanhainen, C. (2021). Tracking silver in the Lappberget Zn-Pb-Ag-(Cu-Au) deposit, Garpenberg mine, Sweden: Towards a geometallurgical approach. *Minerals Engineering, 167*(106889). https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106889

Torres, J. (2016). *Implementación de celdas columna en la flotación de minerales de estaño.* Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustin, Arequipa.

Williams, N., & Holtzhausen, S. (2001). The impact of ore characterization and blending on metallurgical plant performance. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurg, 101*(8), 437-446.

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de consistencia

<table>
<tr><th colspan="5">“CARACTERIZACIÓN GEOMETALÚRGICA APLICADA A LA OPTIMIZACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE ZINC MEDIANTE LA FLOTACIÓN DE MINERALES SULFURADOS EN LA PROVINCIA DE OYÓN”</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Problema general</th><th rowspan="2">Objetivo general</th><th colspan="3">Hipótesis</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Hipótesis general</th><th colspan="2">Variables de la hipótesis general</th></tr>
<tr><th>Nombre de la variable</th><th>Técnicas de recolección de datos</th></tr>
<tr><td rowspan="2">¿De qué manera la caracterización geometalúrgica de minerales sulfurados contribuye en la optimización de la recuperación de Zn mediante flotación, en la provincia de Oyón?</td><td rowspan="2">Caracterizar la muestra de mineral sulfurado para optimizar la recuperación de Zn en el proceso de flotación en la provincia de Oyón.</td><td rowspan="2">La caracterización geometalúrgica de los minerales sulfurados permitirá optimizar la recuperación de Zn mediante el proceso de flotación, en la provincia de Oyón.</td><td>Granulometría del mineral</td><td>El tamaño de partícula se reporta en micras, y se calcula con un juego de mallas de distintas aberturas</td></tr>
<tr><td>Dosificación de reactivos</td><td>Esta variable se reporta en g/TM, y se mide con la ayuda de una micropipeta.</td></tr>
<tr><th>Problemas específicos</th><th>Objetivos específicos</th><th>Hipótesis específicas</th><th colspan="2">Variables de las hipótesis específicas</th></tr>
<tr><th>Problema específico N°1</th><th>Objetivo específico N°1</th><th>Hipótesis específica N°1</th><th>Nombre de la variable</th><th>Técnicas de recolección de datos</th></tr>
<tr><td rowspan="3">¿Cómo podemos realizar la caracterización geometalúrgica de los minerales sulfurados en la provincia de Oyón?</td><td rowspan="3">Realizar la caracterización geometalúrgica de los minerales sulfurados en la provincia de Oyón.</td><td rowspan="3">La caracterización geometalúrgica permitirá identificar las especies de minerales involucrados, distribución volumétrica, grados de liberación y enlaces presentes, en los minerales sulfurados de la provincia de Oyón.</td><td>Especies y enlaces presentes</td><td>Se identifican en el microscopio óptico de luz reflejada</td></tr>
<tr><td>Distribución volumétrica</td><td>Distribución de las especies de minerales en porcentaje.</td></tr>
<tr><td>Grados de liberación</td><td>Estos datos se observan en el microscopio y se reportan en micrómetros (µm).</td></tr>
<tr><th>Problema específico N°2</th><th>Objetivo específico N°2</th><th>Hipótesis específica N°2</th><th>Nombre de la variable</th><th>Técnicas de recolección de datos</th></tr>
<tr><td rowspan="2">¿Qué variables contribuyen en la recuperación de zinc en el proceso de flotación?</td><td rowspan="2">Identificar las variables contribuyentes en la recuperación de zinc en el proceso de flotación.</td><td rowspan="2">Las variables de granulometría y dosificación de reactivos serán determinantes en la recuperación de zinc mediante el proceso de flotación.</td><td>Granulometría</td><td>El tamaño de partícula se reporta en micras, y se calcula con un juego de mallas.</td></tr>
<tr><td>Dosificación de reactivos</td><td>Esta variable se reporta en g/TM, y se mide con la ayuda de una micropipeta.</td></tr>
<tr><th>Problema específico N°3</th><th>Objetivo específico N°3</th><th>Hipótesis específica N°3</th><th>Nombre de la variable</th><th>Técnicas de recolección de datos</th></tr>
<tr><td rowspan="2">¿Cómo podemos optimizar la recuperación de zinc mediante diseños experimentales de flotación de minerales sulfurados de Oyón?</td><td rowspan="2">Optimizar la recuperación de zinc mediante diseños experimentales de la flotación de minerales sulfurados de Oyón.</td><td rowspan="2">Los diseños experimentales del proceso de flotación de minerales de sulfurados permitirán optimizar la recuperación de zinc en la provincia de Oyón.</td><td>Granulometría</td><td>El tamaño de partícula se reporta en micras, y se calcula con un juego de mallas.</td></tr>
<tr><td>Dosificación de reactivos</td><td>Esta variable se reporta en g/TM, y se mide con la ayuda de una micropipeta.</td></tr>
</table>