

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



T E S I S

**Optimización del proceso de flotación de minerales sulfurados para la
recuperación de plomo-plata en Matucana – Lima – 2024**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

Autores:

Bach. Johann Remigio CALZADA ROSAS

Bach. Araceli Margarita ARIVILCA CASTAÑEDA

Asesor:

Dr. Antonio Florencio BLAS ARAUCO

Cerro de Pasco - Perú – 2026

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



T E S I S

**Optimización del proceso de flotación de minerales sulfurados para la
recuperación de plomo-plata en Matucana – Lima – 2024**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Hildebrando Anival CONDOR GARCIA
PRESIDENTE

Dr. Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO
MIEMBRO

Mg. Edgar Yoni AIRE MENDOZA
MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión
Facultad de Ingeniería
Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 370-2026-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

"Optimización del Proceso de Flotación de Minerales Sulfurados para la Recuperación de Plomo-Plata en Matucana – Lima - 2024"

Apellidos y nombres de los tesisistas

Bach. Johann Remigio CALZADA ROSAS

Bach. Araceli Margarita ARIVILCA CASTAÑEDA

Apellidos y nombres del Asesor:

Dr. Antonio Florencio, BLAS ARAUCO

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Metalúrgica

Índice de Similitud

19 %

APROBADO

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

Cerro de Pasco, 15 de enero del 2026



Firmado digitalmente por PALOMINO
SIDRO Ruben Edgar FAU
20154805046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 15.01.2026 15:58:31 -05:00

DEDICATORIA

A Dios por derramar su bendición sobre nosotros y guiarnos por el camino de la sabiduría.

A nuestros padres por apoyarnos en nuestra educación y crecimiento profesional, también a nuestros familiares y amistades que estuvieron durante este proceso.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión por habernos aceptado ser parte de ella, y abrirnos las puertas de su seno científico para poder estudiar nuestra carrera, así como también a los diferentes docentes al que nos brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante.

A nuestro asesor de tesis, el Dr. Blas Arauco Antonio Florencio, por habernos brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como por su paciencia al guiarnos durante el desarrollo de la investigación.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo optimizar el proceso de flotación de minerales de plomo y plata (Pb-Ag) mediante la evaluación de variables operativas críticas, como el pH y la dosificación de reactivos, con el fin de mejorar la recuperación metálica y reducir los costos asociados al consumo de insumos.

La investigación corresponde al tipo aplicado, porque hace uso de los conocimientos en la práctica. El método de investigación empleado es cuantitativo experimental, sustentado en el diseño de experimentos (DOE) y análisis estadístico inferencial, lo que permite manipular variables de operación y medir sus efectos sobre la recuperación y la ley del concentrado.

Se trabajó con un lote de mineral con tamaño de partículas del 50 % -200 malla, en el cual se identificaron mediante microscopía minerales como PbS y plata nativa, con concentraciones de 12,32% y 0,08%. Las pruebas de flotación realizadas a diferentes granulometrías evidenciaron que una distribución de 55,85% -200 malla permitió alcanzar recuperaciones de 83,89% de Pb y 88,23% de Ag, con leyes de 60,14% de Pb y 38,75 Oz-Ag/TC.

Posteriormente, se aplicó un diseño experimental para optimizar la dosificación de reactivos y la alcalinidad. La prueba número 7 resultó ser la más eficiente, logrando recuperaciones de 91,15% de Pb y 89,88% de Ag. Se concluye que la dosificación del colector AR-1242 fue determinante para los resultados obtenidos, recomendándose operar a un pH de 8, con 100 g/TM de AR-3418 y 60 g/TM de AR-1242, condiciones que permiten alcanzar leyes de 63.45% de Pb y 39.33 Oz-Ag/TC.

Palabras claves: Diseño de experimentos (DOE); Recuperación metálica y Efectividad de colectores.

ABSTRACT

The present research work aims to optimize the flotation process of lead and silver (Pb-Ag) minerals by evaluating critical operational variables, such as pH and reagent dosing, in order to improve metal recovery and reduce costs associated with input consumption.

The research is of an applied type, because it makes use of knowledge in practice. The research method employed is experimental quantitative, supported by the design of experiments (DOE) and inferential statistical analysis, which allows manipulating operational variables and measuring their effects on recovery and concentrate grade.

A batch of ore with a particle size of 50% -200 mesh was worked on, in which minerals such as PbS and native silver were identified through microscopy, with concentrations of 12.32% and 0.08%. Flotation tests conducted at different granulometries showed that a distribution of 55.85% -200 mesh allowed achieving recoveries of 83.89% Pb and 88.23% Ag, with grades of 60.14% Pb and 38.75 Oz-Ag/TC.

Subsequently, an experimental design was applied to optimize reagent dosage and alkalinity. Test number 7 proved to be the most efficient, achieving recoveries of 91.15% Pb and 89.88% Ag. It is concluded that the dosage of the collector AR-1242 was decisive for the results obtained, recommending operation at a pH of 8, with 100 g/TM of AR-3418 and 60 g/TM of AR-1242, conditions that allow achieving grades of 63.45% Pb and 39.33 Oz-Ag/TC.

Keywords: Design of Experiments (DOE); Metal Recovery and Collector Efficiency.

INTRODUCCION

El proceso de recuperación de plomo a partir de los minerales sulfurados se lleva a cabo mediante el proceso de flotación, la cual responde eficientemente cuando se configuran eficientemente los parámetros del proceso, las cuales tienen relación con la mineralogía.

En la actualidad, las diversas menas de plomo y plata se van tornando cada vez más complejas, lo que exige optimizar los procesos en función de las variables independientes que gobiernan el proceso.

La caracterización de un mineral determina y cuantifica las fases presentes y define cuáles son los minerales de interés y ganga, así también cuantifica la distribución de las especies en el yacimiento, además, permite el análisis de estructuras rocosas definiendo la granulometría de liberación, y también permite conocer las propiedades físicas y químicas de estos minerales, generando información para la definición de rutas de procesamiento.

La tendencia mundial en la industria de procesamiento de minerales, como en otras industrias, es optimizar todos los procesos involucrados. El sistema de flotación de minerales se compone básicamente del equipo, los reactivos químicos y operaciones, por lo tanto, en cada una de ellas se debe llevar a cabo las optimizaciones empleando metodologías y técnicas apropiadas.

Diversos métodos de optimización se conocen en la actualidad, y la facilidad de la operación de paquetes estadísticos permiten obtener resultados confiables con un mínimo de pruebas, por lo que el presente estudio representa la optimización de la recuperación y calidad del concentrado de flotación de Pb-Ag, de tal manera que los resultados obtenidos sean replicados en el procesamiento de los minerales sulfurados de Pb-Ag, en Matucana, permitiéndole aumentar los ingresos por procesamiento de estos yacimientos.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, Se presenta la determinación del problema, formulación, objetivos, hipótesis, variables, justificación, así como también la importancia de la presente investigación.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO: Presentamos los antecedentes, bases teóricas sobre la recuperación del Pb-Ag y definición de términos básicos de la investigación., Formulación de la Hipótesis e identificación de variables.

CAPITULO III: METODOLOGÍA Y TÉCNICA DE LA INVESTIGACIÓN, Se presenta el tipo, método, diseño de la investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos, técnicas de procesamiento y análisis de datos, Tratamiento estadístico, Orientación ética.

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN, Se presenta la descripción del trabajo de campo, presentación, análisis e interpretación de resultados, prueba de hipótesis, discusión de resultados.

Finalmente se proporciona las conclusiones, recomendaciones, una lista de referencias bibliográficas y anexos.

INDICE

Página

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCION

INDICE

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema	1
1.2. Delimitación de la investigación.	2
1.2.1. Delimitación espacial.....	2
1.2.2. Delimitación Temporal	3
1.2.3. Delimitación Conceptual	3
1.3. Formulación del problema.....	4
1.3.1. Problema general	4
1.3.2. Problema específico	4
1.4. Formulación de objetivos	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. Justificación de la investigación	5
1.6. Limitaciones de la investigación	5

1.6.1. Temporal.....	5
1.6.2. Espacial.....	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio	6
2.2. Bases teórica – científicas	10
2.2.1. Caracterización de minerales sulfurados	10
2.2.2. Análisis minero gráfico en la mineralurgia y metalurgia extractiva.....	17
2.2.3. Flotación de minerales	21
2.3. Definición de términos básicos	32
2.4. Formulación de hipótesis.....	33
2.4.1. Hipótesis general.....	33
2.4.2. Hipótesis específicas.....	33
2.5. Identificación de variables.....	34
2.5.1. Variable Independiente	34
2.5.2. Variables dependientes	34
2.6. Definición operacional de variables e indicadores.....	34

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación	36
3.2. Nivel de investigación	36
3.3. Métodos de investigación.....	36
3.4. Diseño de investigación.....	37
3.5. Población y muestra	37
3.5.1. Población.....	37

3.5.2. Muestra	37
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	37
3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.....	38
3.7.1. Validación de instrumentos.....	38
3.7.2. Evaluación de la confiabilidad.....	38
3.8. Técnica de procesamiento y análisis de datos	38
3.9. Tratamiento estadístico.....	39
3.10. Orientación ética filosófica y epistémica.	39

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo	40
4.1.1. Ensayo químico del mineral de cabeza.....	41
4.1.2. Microscopia óptica de una muestra representativa	41
4.1.3. Prueba de Moliendabilidad	47
4.1.4. Diseño experimental factorial para la flotación Pb-Ag.....	53
4.1.5. Pruebas de flotación.....	54
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	58
4.2.1. Resultados de las pruebas de flotación	58
4.2.2. Anova de la recuperación de Pb.....	67
4.2.3. Optimización de las variables del proceso de flotación Pb-Ag	70
4.3. Prueba de hipótesis	72
4.4. Discusión de resultados	73
4.4.1. Contraste de resultados:	75

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Diseño factorial de extracción de antimonio	18
Tabla 2 Operacionalización de variables	35
Tabla 3 Ensayos químicos	41
Tabla 4 Especies mineralógicas encontradas en la muestra.....	41
Tabla 5 Volumetría de los minerales	42
Tabla 6 Liberación de los minerales	43
Tabla 7 Liberación de los minerales	45
Tabla 8 Moliendabilidad	48
Tabla 9 Condiciones de operación de la flotación para evaluar la granulometría	49
Tabla 10 Prueba de flotación a 50% - 200 Malla.....	50
Tabla 11 Prueba de flotación a 55% - 200 Malla.....	50
Tabla 12 Prueba de flotación a 60% - 200 Malla.....	51
Tabla 13 Prueba de flotación a 65% - 200 Malla.....	51
Tabla 14 Prueba de flotación a 70% - 200 Malla.....	52
Tabla 15 Rango de los valores de las variables a analizar	54
Tabla 16 Orden de las pruebas del diseño	54
Tabla 17 Prueba de 1 del diseño	59
Tabla 18 Prueba de 2 del diseño	59
Tabla 19 Prueba de 3 del diseño	60
Tabla 20 Prueba de 4 del diseño	60
Tabla 21 Prueba de 5 del diseño	61
Tabla 22 Prueba de 6 del diseño	61
Tabla 23 Prueba de 7 del diseño	62

Tabla 24 Prueba de 8 del diseño	62
Tabla 25 Prueba de 9 del diseño	63
Tabla 26 Prueba de 10 del diseño	63
Tabla 27 Prueba de 11 del diseño	64
Tabla 28 Prueba de 12 del diseño	64
Tabla 29 Prueba de 13 del diseño	65
Tabla 30 Prueba de 14 del diseño	65
Tabla 31 Prueba de 15 del diseño	66
Tabla 32 Prueba de 16 del diseño	66
Tabla 33 Tabla de resultados	67
Tabla 34 Anova de la recuperación de plomo	67
Tabla 35 Resumen del modelo.....	68
Tabla 36 Coeficiente de codificación	68
Tabla 37 Parámetros	71
Tabla 38 Datos considerados para la optimización.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Mapa de la provincia de Huarochirí	2
Figura 2 Mapa del distrito de Huarochirí.....	3
Figura 3 Intercrecimiento de minerales	20
Figura 4 Volumetría de los minerales	42
Figura 5 Liberación de los minerales	44
Figura 6 Enlaces de las especies	46
Figura 7 Micrografía con presencia de Py y Gn	46
Figura 8 Micrografía con presencia de py,Ag, gn y GGs	47
Figura 9 Gráfica de la moliendabilidad	48
Figura 10 Comparativa de la granulometría con la recuperación y ley	53
Figura 11 Descarga de la pulpa hacia la celda de flotación	55
Figura 12 Adición de reactivo.....	55
Figura 13 Tiempo de acondicionamiento	56
Figura 14 Recolección de espuma cargada de Pb-Ag.....	56
Figura 15 Descarga hacia la celda de $\frac{3}{4}$	57
Figura 16 Concentrado final	57
Figura 17 Diagrama de Pareto para la recuperación de Pb	68
Figura 18 Gráfica de interacciones	69
Figura 19 Gráficos factoriales para la recuperación de Pb	69
Figura 20 Gráficos de diagnóstico de residuos “4 en 1”	70
Figura 21 Grafica de superficie.....	71
Figura 22 Grafica de contorno	72
Figura 23 Optimización del proceso de flotación Pb-Ag.....	72

Figura 24 Gráfica de distribución 73

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

Los yacimientos con gran volumen de reservas son explotados y procesados por empresas que disponen los recursos y medios suficientes aplicando tecnologías que les permiten desarrollar procesos eficientes en los aspectos tecnológicos con sus consecuentes beneficios económicos; en contra parte, los pequeños yacimientos son desarrollados por empresarios e inversionistas con recursos escasos, e inclusive utilizando tecnología artesanal, con dificultades que son superadas a base de gran criterio y habilidades técnicas de los profesionales y técnicos.

Las actividades mineras de explotación en la zona de Matucana, se lleva a cabo por la extracción de minerales de plomo – plata, en forma de galena argentífera, la cual es procesada en plantas de alquiler en La Oroya. El proceso de flotación se lleva a cabo con escasos medios tecnológicos y sobre todo con dificultades en el dominio del proceso en cuanto al control metalúrgico permanente con equipos e instrumentos que permitan optimizar las variables que tienen efecto directo en el proceso.

Figura 2 Mapa del distrito de Huarochirí



Nota: el gráfico representa el mapa del distrito de Huarochirí, tomado de (Benites, 2022)

b) Clima:

Con respecto al clima, Matucana es un territorio seco; presenta una temperatura promedio al año de 14.5°C, el límite superior registrado es de 26.0°C y el límite inferior llega a 8.0°C. Las precipitaciones comienzan en diciembre y son más fuertes en el mes de febrero, posteriormente la intensidad se reduce y llega a culminar en el mes de abril. El verano se inicia desde el mes de abril hasta noviembre; generalmente el día es caluroso y en las noches hace frío (Benites, 2022).

1.2.2. Delimitación Temporal

El tiempo estimado para el siguiente estudio es de 4 meses, entre los trabajos de recopilación bibliográfica, trabajos de muestreo, pruebas metalúrgicas en laboratorio y escalamiento en planta de acopio, digitalización e interpretación de datos, redacción y corrección de tesis.

1.2.3. Delimitación Conceptual

La presente tesis está enmarcada dentro del aspecto de la investigación sobre la optimización de la recuperación y calidad de Pb-Ag en el proceso de flotación de minerales sulfurados, por lo tanto, dentro de los aspectos conceptuales que se

desarrollan se considera: Caracterización de minerales, variables del proceso de flotación de minerales sulfurados de Pb-Ag, optimización de procesos.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿De qué manera podemos realizar la optimización la recuperación de Pb-Ag en el proceso de flotación de minerales sulfurados de Matucana - Lima - 2024?

1.3.2. Problema específico

- a) **PE1:** ¿Cómo podemos identificar las especies de minerales presentes, distribución volumétrica, grados de liberación y enlaces presentes empleando microscopía óptica, en los minerales sulfurados de Matucana – Lima - 2024?
- b) **PE2:** ¿De qué forma podemos determinar la influencia de los reactivos de flotación en la recuperación de Pb-Ag empleando el software estadístico Minitab 19?
- c) **PE3:** ¿Cómo optimizamos la recuperación de Pb-Ag en el proceso de flotación de minerales, empleando el software estadístico Minitab 19?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Optimizar la recuperación de Pb-Ag en el proceso de flotación de minerales sulfurados de Matucana.

1.4.2. Objetivos específicos

- a) **OE1:** Identificar las especies de minerales presentes, distribución volumétrica, grados de liberación y enlaces presentes empleando microscopía óptica, en los minerales sulfurados de Matucana.

- b) **OE2:** Determinar la influencia de los reactivos de flotación en la recuperación de Pb-Ag empleando software estadístico de Minitab 19.
- c) **OE3:** Optimizar la recuperación de Pb-Ag en el proceso de flotación de minerales empleando el software estadístico Minitab 19.

1.5. Justificación de la investigación

La optimización de la recuperación de Pb-Ag en el proceso de flotación de minerales sulfurados de Matucana, se justifica porque permitirá aumentar los ingresos de los mineros de la zona mencionada por ventas de concentrados de mejor calidad y mayor contenido metálico, de tal manera que la información obtenida del estudio a nivel de laboratorio se replique en planta para los siguientes procesos a través de un modelo que predice el comportamiento de las variables estudiadas.

1.6. Limitaciones de la investigación

1.6.1. Temporal

Dentro de las limitaciones encontramos el tiempo para realizar el trabajo de campo y documental; ya que el tiempo empleado para la investigación fue alrededor de 4 meses antes del proceso del mineral en la planta concentradora (Minera Perú Sol S.A.C.)

1.6.2. Espacial

Dentro de las limitaciones encontramos con los permisos de la organización para el tratamiento de datos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

(Demetrio Tapia Ajata, 2012, pág. 39); en la tesis **Mejoramiento De La Recuperación De Plata De Los Minerales De Mina Poopó; Universidad Técnica de Oruro**. Afirma que el mineral de la mina Poopó es considerada la más compleja, por el alto contenido de zinc y plata. Esto se refleja en la muestra de recuperación de plata en el concentrado de plomo que es 25,59% con 5 884 g/t de plata, la recuperación de plata en el concentrado de zinc es 46,80% con 462 g/t. El valor económico de plata en el concentrado de zinc no es favorable, en comparación de producir concentrado de plomo – plata con alto contenido de plata. Ya que el análisis químico del mineral indicaba que el contenido de zinc y plata son superiores al de plomo; se afirma que tendríamos que flotar plata con contenido de plomo. En la investigación se realizó pruebas a nivel laboratorio y planta para evaluar la recuperación de plata, se usó 7 como colector AEROPHINE 3418. Luego de seis campañas se lograron resultados favorables alcanzando recuperaciones de 42,32%.

(Diaz Valverde, 2023) en su tesis **Caracterización Mineralógica De Mineral Polimetálico Para Optimizar La Recuperación De Plomo - Plata En El Proceso De Flotación En La Zona Alto Andina Del Perú** nos manifiesta que su investigación tiene como objetivo optimizar la tasa de recuperación de plomo plata (Pb-Ag) en el proceso de flotación de la mena polimetálica en la zona Alto Andina del Perú, mediante la caracterización mineralógica-metalúrgica, el diseño experimental de pruebas metalúrgicas evaluando variables independientes de dosificación de reactivos y pH, y la obtención de un blending adecuado en el proceso de flotación, utilizando una línea metodológica experimental, por ello se realizó el estudio de caracterización cualitativa y cuantitativa de las tres bocaminas en extracción, asimismo, la recopilación de los datos mediante un muestreo sistematizado de acuerdo al estándar del laboratorio metalúrgico , donde se clasificaron y codificaron las muestras de acuerdo a sus características para realizar los ensayos correspondientes en el laboratorio químico, con los cuales se realizó una evaluación analítica a través del programa de análisis y control estadístico de procesos Minitab, permitiendo optimizar la tasa de recuperación de plomo - plata en el proceso de flotación. El análisis de los efectos estandarizados permitió identificar que la interacción de las diferentes variables son las que ejercen mayor influencia en la calidad y recuperación del plomo y plata, por ende, para la obtención de un mejor performance metalúrgico en la recuperación de plomo y plata en el blending, el consumo de colector mezcla (AP 3418 y AR- 404) resultó 27 gr/TM; asimismo, el consumo de colector AR-242 es 8 gr/TM con un pH óptimo de 11.10. La determinación de las leyes de la cabeza de plomo y plata en la conformación del blending resultó 1,228% y 3,226 Oz/TC respectivamente, por consiguiente, los porcentajes de blending es 35% tajo 1, 39% tajo 2 y 26% tajo 3; por lo tanto, estos

parámetros se obtiene una recuperación de 83.29 % de plomo y 83.67 % de plata en el concentrado en el proceso de flotación.

(RIQUELME GUTIÉRREZ & TORRE QUISPE, 2022) en su tesis denominado **Evaluación De Los Colectores A-3418 Y Z-6 Para Recuperar El Cobre De Los Minerales Mixtos De La Planta De Beneficios Jesús S.A.C- Nazca** nos manifiesta que el trabajo de investigación, se orientó al proceso de flotación de minerales mixtos de cobre, disminuyendo la dosificación del colector A-3418 o reemplazando parte de su dosificación por el Z-6 para mejorar la recuperación de cobre, de esta manera disminuye el costo relevante del A-3418 al ser un reactivo costoso frente a otros, se reporta que la recuperación de cobre en minerales mixtos de cobre de la planta de beneficio Jesús S.A.C. se encuentra entre 88% a 90% de cobre. El trabajo de investigación se realizó experimentalmente en el laboratorio de procesamiento de minerales de la UNSAAC, simulando las pruebas metalúrgicas de flotación con las variables que se manejan en planta, efectuando las mismas características de flotación, ya sea densidad de pulpa, pH, circuito de flotación, dosificación entre otros. Se realizaron diversas pruebas metalúrgicas manipulando la dosificación de los colectores A-3418 y Z-6 y compararlas con la prueba estándar, cuyo resultado final es que sustituyendo 10g/t de A-3418 por Z-6 se obtiene la mayor recuperación de cobre a nivel de laboratorio, alcanzando el 89.57% de cobre en el concentrado, cuyo valor es 1.4% más de cobre que la obtenida en la prueba estándar. Realizando una evaluación económica se logra mejorar los beneficios \$ 756.30, utilizando el contenido metálico y las variables de estudio como soporte de apoyo. Entonces este resultado aumenta el beneficio - costo del proceso y mejora la recuperación. Por lo tanto, se determinó para el proceso de flotación de cobre mixto reemplazar la dosificación que se le quita al

AEROPHINE 3418 por el Xantato Z-6 para el proceso de flotación de minerales mixtos a nivel de laboratorio en la Planta de Beneficio Jesús S.A.C.

(Alvarado Dávila & Plasencia Fernández, 2016) en su tesis **Influencia De La Dosificación De Los Colectores AP-3418 Y AR-404 Sobre La Recuperación De Plomo Y Zinc Por Flotación Selectiva De Un Mineral Polimetálico De La Empresa Minera Occidental 2 De Cajamarca, S.R.L.** estudió la influencia de la dosificación de los colectores AP-3418 y AR-404 sobre la recuperación de plomo y zinc por flotación selectiva de un mineral polimetálico, del nivel 2 de la veta murciélagos de la empresa Minera Occidental 2 de Cajamarca S.R.L. El estudio experimental se realizó en una celda de flotación de laboratorio, modelo Denver D-12, utilizando mineral con una granulometría 60% -200 mallas con una ley de 4.48% de plomo y 14.82% de Zinc. El resultado del estudio de la flotación concluyó que, la recuperación de plomo sin uso de colectores es de 32.29 % y con la dosificación de los dos colectores, la recuperación es de 50.29 %. Para la recuperación de zinc sin uso de colectores es de 49.38 % y con la dosificación de los dos colectores la recuperación es de 56.50%. Los resultados son confirmados mediante análisis de varianza para un nivel de confianza de 95%. De esto se concluye que la recuperación de plomo por la influencia del colector AP-3418 es de $F_0 = 179.59$ es mayor al $F_{0.05;2;18} = 3.55$, y la influencia del colector AR-404 es de $F_0 = 622.69$ es mayor al $F_{0.05;2;18} = 3.55$ y con la influencia de los colectores AP-3418 y AR-404 es de $F_0 = 70.87$ es mayor al $F_{0.05;4;18} = 2.93$, obtenido de manera tabular. Esto confirma la aceptación de la hipótesis alterna, por lo tanto, la influencia de estos colectores de manera individual como en conjunto si afectan significativamente en la recuperación de plomo. Los resultados son confirmados mediante análisis de varianza para un nivel de confianza de 95%. De esto se concluye que la recuperación de zinc por la influencia del colector AP-3418 es de $F_0 = 123.46$ es mayor al $F_{0.05;2;18} = 3.55$, y la

influencia del colector AR-404 es de $F_0=312.89$ es mayor al $F_{0.05;2;18}= 3.55$ y con la influencia de los colectores AP-3418 y AR- 404 es de $F_0= 492.51$ es mayor al $F_{0.05;4;18}= 2.93$, obtenido de manera tabular. Esto confirma la aceptación de la hipótesis alterna, por lo tanto, la influencia de estos colectores de manera individual como en conjunto si afectan significativamente en la recuperación de zinc.

2.2. Bases teórica – científicas

2.2.1. Caracterización de minerales sulfurados

a) *Propiedades físicas*

Las características físicas de los minerales son esenciales para identificarlos rápidamente, ya que muchos pueden distinguirse con solo observarlos. Estas características se clasifican en:

- ✓ Características de resistencia
- ✓ Características ópticas
- ✓ Características basadas en su aspecto

A continuación, se detallarán todas estas características de resistencia, ópticas y basadas en su aspecto (Fenoll, 2002).

- **Dureza del mineral:** La dureza es una propiedad distintiva que se refiere a la resistencia que presenta la superficie de un mineral al ser rayada. Esta resistencia depende de la cohesión del mineral, que a su vez está determinada por su estructura y composición química. Cuanto más fuerte sea el enlace entre sus componentes, mayor será su dureza. La dureza puede variar según la dirección en el mineral, lo que hace que su determinación precisa sea complicada. Para facilitar esta identificación, se utiliza la escala de Mohs, la escala de Mohs se basa en 10 minerales de referencia a los que se les asigna un número entero.

Comparando las durezas de estos minerales, es posible determinar la dureza de cualquier otro mineral. El mineral con un número más alto puede rayar a los minerales con números más bajos (Moreno & Ibáñez, 2018).

➤ **Fractura del mineral:** La fractura de un mineral se refiere a cómo se rompe a lo largo de una superficie no uniforme. Dependiendo de cómo se vea esta superficie de rotura, se pueden distinguir varios tipos para describir las caras que resultan de la rotura. Estos son los principales tipos:

✓ **Concoidea:** Es la fractura más frecuente, caracterizada por una rotura limpia, cóncava y curvada.

✓ **Subconcoidea:** Similar a la anterior (concoidea), pero con una curvatura menos marcada.

✓ **Desigual:** Se produce cuando la superficie de rotura es irregular.

✓ **Recortada:** Parecida a la desigual, pero con puntos afilados en la línea de rotura.

✓ **Astillada:** Ocurre cuando la fractura resulta en una rotura de aspecto fibroso o en forma de aguja.

✓ **Terrosa:** Se presenta cuando hay una fractura en un material poco consolidado (Murciego, 2016).

➤ **Exfoliación de un mineral:** La exfoliación es la capacidad de un mineral para romperse siguiendo direcciones preferentes a lo largo de planos de debilidad en su estructura reticular, resultando en superficies planas y brillantes. Esta característica es una consecuencia de la disposición interna de los átomos del mineral. Representa los puntos de

debilidad donde los enlaces atómicos son más débiles, y el mineral se rompe a lo largo de planos que son paralelos a esta dirección, existen diferentes grados de exfoliación que se pueden clasificar de la siguiente manera:

- ✓ **Excelente:** El mineral se rompe formando finas láminas en una sola dirección.
 - ✓ **Perfecta:** El mineral se divide en formas regulares definidas por los planos de exfoliación.
 - ✓ **Buena:** Los planos de exfoliación son menos evidentes y no siempre son completamente rectos.
 - ✓ **Imperfecta:** No existe un plano de exfoliación claro. La ruptura del mineral se produce en superficies irregulares.
 - ✓ **Muy imperfecta:** No se observa exfoliación en el mineral (Murciago, 2016).
- **Tenacidad del mineral:** La tenacidad de un mineral se refiere a su capacidad para resistir ser roto, molido, doblado o desgarrado, es decir, su cohesión. Se pueden identificar varios tipos de tenacidad en los minerales:
- ✓ **Frágil:** Un mineral que se rompe con facilidad o se pulveriza con poco esfuerzo.
 - ✓ **Maleable:** Un mineral que puede ser martillado para formar láminas delgadas.
 - ✓ **Sectil:** Un mineral que puede ser cortado para producir virutas delgadas con un cuchillo.
 - ✓ **Dúctil:** Un mineral que puede ser estirado para formar un hilo.

- ✓ **Flexible:** Un mineral que puede ser doblado bajo presión, pero no vuelve a su forma original una vez que se retira la presión.
- ✓ **Elástico:** Un mineral que recupera su forma original después de ser deformado al cesar la fuerza aplicada (Cornelis & Cornelius, 2018).
- **Peso específico:** El peso específico es una medida que indica la relación entre el peso de un mineral y el peso de un volumen equivalente de agua a 4°C, que es la temperatura a la cual el agua alcanza su densidad máxima de 1g/cm³. Este valor es constante para un mineral específico, lo que lo convierte en un dato importante para su identificación. El peso específico depende principalmente de dos factores:
 - ✓ La composición de los átomos que forman el mineral.
 - ✓ La forma en que estos átomos están organizados o empaquetados.

La mayoría de los minerales que componen las rocas tienen un peso específico cercano a 2,7. Aunque en términos físicos el peso específico y la densidad son conceptos diferentes, a menudo se usan indistintamente en la práctica. La densidad se define como la masa por unidad de volumen de un material y se expresa generalmente en gramos por centímetro cúbico (g/cm³) (Reinoso, 2019).

- **Brillo del mineral:** El brillo de un mineral es una propiedad que describe cómo se ve la superficie del mineral cuando refleja la luz. Esta propiedad está relacionada con la intensidad de la reflexión luminosa y no tiene que ver con el color del mineral. Los términos utilizados para describir el brillo buscan ser descriptivos, pero pueden requerir algo de

práctica para ser utilizados correctamente. En general, se puede clasificar el brillo en dos categorías principales:

- **Metálico:** Se refiere al brillo que presenta un mineral similar al de los metales, reflejando la luz de manera completa y brillante.
- **No metálico:** Cuando el brillo del mineral no es metálico, se intenta clasificar de la siguiente manera:
 - ✓ **Vítreo:** Similar al brillo del vidrio.
 - ✓ **Adamantino:** Brillo similar al del diamante.
 - ✓ **Graso:** Brillo similar al aceite sobre una superficie.
 - ✓ **Sedoso:** Brillo suave y sedoso, como el de la seda.
 - ✓ **Resinoso:** Brillo similar al de la resina o al ámbar.
 - ✓ **Terroso:** Brillo opaco y terroso, como el de la tierra o la arcilla.

Esta clasificación ayuda a describir y comparar el aspecto de diferentes minerales en términos de su brillo superficial (Cornelis & Cornelius, 2018).

➤ **Transparencia de un mineral:** La propiedad de transparencia de un mineral describe cómo la luz atraviesa su estructura cristalina y está relacionada con su brillo. Aquí se describen los diferentes grados de transparencia de los minerales:

- **Transparentes:** Permiten ver con claridad el contorno de un objeto que se encuentra detrás de ellos.
- **Semitransparentes:** La transparencia es parcial, no permitiendo ver con precisión el contorno de objetos detrás de ellos.

- **Translúcidos:** Permiten el paso de la luz, pero no es posible distinguir claramente los objetos que se encuentran detrás de ellos.
- **Semi translúcidos:** Dejan pasar la luz especialmente por sus bordes más delgados, pero no de manera completa.
- **Opacos:** Impiden completamente el paso de la luz, no permitiendo ver a través de ellos en absoluto.

Aunque la transparencia no es una propiedad fundamental para identificar minerales, puede ser útil en ciertos casos. Es importante mencionar que algunos minerales que son naturalmente transparentes o translúcidos pueden volverse opacos debido a inclusiones o alteraciones en su estructura cristalina (Cornelis & Cornelius, 2018).

- **Color de un mineral:** El color de los minerales se determina por cómo la luz los ilumina y cómo absorben distintas longitudes de onda de la luz. Algunos minerales tienen un color inherente debido a la cantidad significativa de un elemento específico, como el hierro, que actúa como un pigmento potente. En cambio, en otros minerales, el color proviene de impurezas presentes en ellos, siendo estos minerales denominados alochromáticos (Nesse, 2012).
- **Raya de un mineral:** La raya de un mineral se refiere al color del polvo que se produce al rayarlo, rasparlo o pulverizarlo sobre una superficie no pulida de porcelana. Cuando un mineral tiene variaciones de color, la raya puede ayudar a identificar un color constante para el mineral, unificando así sus variaciones de color (Nesse, 2012).
- **Hábito cristalino de un mineral:** El hábito cristalino de un mineral se refiere a la forma natural en la que los minerales se presentan en la

naturaleza. A continuación, se describen los hábitos cristalinos más comunes:

- **Columnar:** Se presenta alargado en una dirección y tiene una forma similar a columnas.
- **Prismático:** Alargado en una dirección, similar a un prisma.
- **Tabular:** Alargado en dos direcciones.
- **Laminar:** Alargado en una dirección con bordes delgados.
- **Hojoso:** Similar a las hojas y se puede separar fácilmente en láminas.
- **Botroidal:** Formado por grupos de masas globulares.
- **Granular:** Compuesto por un conjunto de granos.
- **Masivo:** Compacto, con una forma irregular y sin un hábito cristalino distintivo (Cornelis & Cornelius, 2018).

b) Propiedades magnéticas

Los minerales que son intensamente atraídos por un imán se conocen como ferromagnéticos, como la magnetita. Los minerales que son atraídos de manera leve se llaman paramagnéticos, como la hematita y la siderita. Por otro lado, los minerales que no son atraídos por un imán se denominan diamagnéticos, como el azufre y el cuarzo (Cornelis & Cornelius, 2018).

c) Propiedades eléctricas

Los metales puros, los sulfuros y los óxidos pueden conducir corriente eléctrica, mientras que la mayoría de los minerales son conductores pobres o dieléctricos. Algunos minerales, especialmente aquellos con ejes polares que carecen de simetría central, pueden generar cargas eléctricas opuestas en sus extremos cuando se someten a presión, un fenómeno conocido como

piezoelectricidad, como en el caso del cuarzo. Además, hay cristales que se cargan eléctricamente en ciertas caras cuando se exponen a cambios de temperatura, un proceso denominado piroelectricidad (Cornelius & Cornelius, 2018).

2.2.2. Análisis minero gráfico en la mineralurgia y metalurgia extractiva

La identificación de minerales puede ser una tarea desafiante, considerando que hay más de 2500 especies minerales conocidas hasta ahora, cada una subdividida en 10,000 a 15,000 variedades con nombres específicos. Aunque algunas especies han sido descartadas, se añaden constantemente nuevos minerales a la lista. Después de identificar un mineral, se consulta la literatura especializada para obtener información sobre su composición química, propiedades físicas y otros datos relevantes. Las propiedades físicas como dureza, clivaje, brillo y fracturamiento son fundamentales para el comportamiento de las menas, especialmente en la mineralurgia. Las diferencias en la textura y propiedades magnéticas, radioactividad, color, reflectividad, y resistividad eléctrica son utilizadas en procesos de separación y selección de minerales. La textura de una mena es crucial para la eficiencia de la molienda y concentración, ya que afecta la liberación de los minerales. El análisis mineralógico es esencial durante el desarrollo de un yacimiento y para mejorar el rendimiento de una planta metalúrgica, proporcionando información sobre la pureza de los concentrados y las causas de pérdida de minerales valiosos en productos intermedios y colas (Marin, 2019).

a. Minerales opacos y propiedades ópticas

Un mineral se considera opaco cuando absorbe la máxima cantidad de luz y transmite la mínima cantidad de luz. Las propiedades ópticas se refieren a aquellas relacionadas con la interacción de los minerales con la luz. Entre ellos tenemos:

Tabla 1 Diseño factorial de extracción de antimonio

Tipo de nicol	Analizador	Propiedad
Nicoles paralelos	Sin analizador	Color Reflectancia Pleocroísmo
Nicoles cruzados	Con analizador	Anisotropía Macla Reflexiones internas

Nota: Recuperado de (Chirif, 2010)

b. Propiedades de los minerales con nicoles paralelos

- **Color:** La mayor cantidad de minerales opacos bajo la luz reflejada presentan un color que va del blanco al gris, se consideran no coloreados. El color del mineral varía de acuerdo con los minerales que lo rodean, así como el tipo de iluminación y el nivel del pulido.

El color es una de las propiedades más importantes para identificar minerales opacos.

- **Pleocroísmo:** El pleocroísmo se refiere al cambio de color o intensidad de color que muestra un mineral al girar la platina del microscopio. Este fenómeno ocurre debido a la absorción desigual de la luz por el mineral en diferentes orientaciones. La mayoría de los minerales ferromagnesianos tienden a tener pleocroísmo.
- **Reflectancia:** La reflectancia es el porcentaje de luz incidente que se refleja desde una superficie y varía dependiendo de la orientación cristalográfica de la sección observada (si el mineral es anisótropo) y de la intensidad de la iluminación. Se clasifica en tres niveles: alta, media y baja. En un mineral sin color, se percibirá de color blanco si su reflectancia es alta y de color gris si es baja. Considerando los minerales de ganga, por ser minerales transparentes, reflejan un porcentaje muy bajo de la luz que incide en ellos, por lo que aparecerán con colores grises muy oscuros (Chirif, 2010).

c. **Propiedades de los minerales con nicoles cruzados**

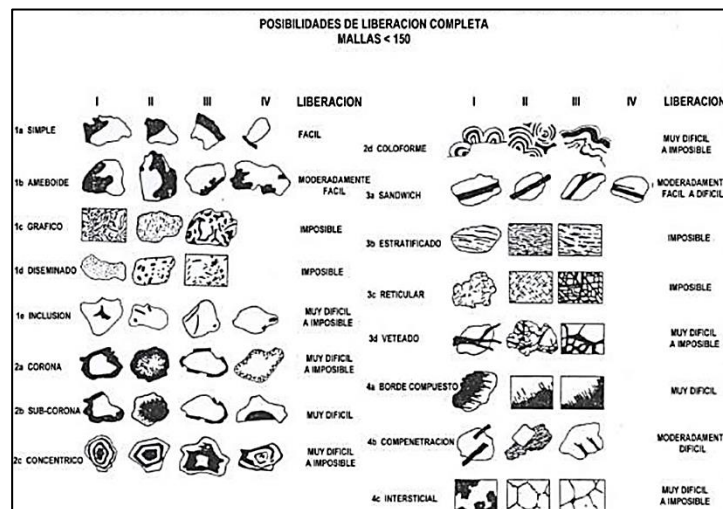
- **Anisotropía:** La anisotropía se refiere a la variación de color que presenta un mineral al girar la platina con nicol cruzados. En minerales opacos anisótropos, no se observan las cuatro posiciones de extinción y otras cuatro de máxima iluminación como en los minerales anisótropos transparentes; en su lugar, se produce un cambio de color. Según su comportamiento con luz polarizada, los minerales opacos pueden clasificarse en isótropos, débilmente anisótropos y anisótropos.
- **Reflexiones internas:** Las reflexiones internas son características de todos los minerales que no son completamente opacos, surgidas por la reflexión de la luz en planos internos de la muestra. Aunque la mayoría de los minerales transparentes exhiben esta propiedad, solo algunos minerales opacos la presentan, lo que resulta útil para su identificación. Estas reflexiones, que se observan más fácilmente en los bordes de grano, suelen ser blancas o de colores variados en minerales transparentes de la ganga, y pardas, pardo-rojizas o rojas en minerales opacos más comunes.
- **Maclas:** En los cristales anisótropos, las maclas se reconocen fácilmente debido a la diferente orientación de los individuos que las componen. Esta característica resulta muy útil en el reconocimiento de ciertos minerales opacos (Chirif, 2010).

d. **Inter crecimientos o amarres de granos**

En el análisis de las características geométricas de un material suelto, se abordan diversos aspectos como tamaño, forma y relaciones entre componentes y agregados. Esta complejidad ha llevado a tratar conjuntos de estas características por separado, utilizando términos como textura, estructura, trama e inter

crecimientos. La textura engloba las características geométricas representativas de todo el grano, determinadas por su grado de cristalinidad, granularidad, forma de los cristales y sus relaciones mutuas. Por otro lado, los inter crecimientos describen la disposición espacial de los componentes minerales de un agregado, siendo la característica más elemental. A diferencia de las propiedades ópticas y físicas, que dependen de la naturaleza del mineral, las propiedades morfológicas varían según las condiciones de formación, proporcionando información útil para interpretaciones genéticas. El estudio de los inter crecimientos permite establecer la secuencia de formación de los minerales y proporciona pautas para un tratamiento metalúrgico adecuado. Por tanto, es importante utilizar clasificaciones objetivas de los tipos de intercrecimientos, como las propuestas por Smirnov, Amstutz y Canchaya & Cardozo, para facilitar el registro y análisis de los intercrecimientos (Chirif, 2010).

Figura 3 *Intercrecimiento de minerales*



Nota: Recuperado de (Chirif, 2010).

e. Grado de liberación

Las partículas minerales pueden existir en dos formas: como partículas liberadas, compuestas por un único mineral, o como partículas mixtas, formadas

por dos o más minerales. Un factor crucial para determinar la viabilidad de beneficiar un mineral es su grado de liberación. Este se calcula como la proporción entre la cantidad del mineral presente en partículas liberadas y la cantidad total de mineral, incluyendo tanto partículas liberadas como partículas mixtas.

La evaluación del grado de liberación de un mineral específico generalmente se describe en relación con la distribución de este mineral en las partículas mixtas. Esto implica la clasificación de las partículas en diferentes clases según el porcentaje de dicho mineral que contienen.

De esta forma, es posible determinar la cantidad de mineral presente en partículas liberadas, la cantidad en partículas que contienen entre un 80 % y un 90 % del mineral, y así sucesivamente hasta la clase 0.01 – 10, que corresponde a las partículas con menor grado de liberación. Estos datos se suelen visualizar mediante curvas de liberación (Manzaneda, 2010).

2.2.3. Flotación de minerales

La flotación por espumas es un proceso de concentración de minerales que implica tanto aspectos físicos como químicos. Este procedimiento implica tratar químicamente una suspensión de partículas minerales finamente molidas para crear condiciones propicias que favorezcan la unión de ciertas partículas minerales a las burbujas de aire. El propósito es separar diferentes especies minerales presentes en una suspensión acuosa, aprovechando su afinidad (hidrofílica) o repulsión (hidrofóbica) hacia el agua. Las especies minerales valiosas constituyen una minoría en la mezcla, mientras que la mayoría de las especies son no valiosas o estériles. Las partículas con carácter hidrofílico tienden a mojarse y permanecer en suspensión en la pulpa, eventualmente hundiéndose, mientras que aquellas con carácter hidrofóbico evitan el mojado y pueden adherirse a las burbujas de aire para ascender. Aunque algunas de

estas propiedades son naturales en ciertos minerales, pueden ser inducidas o realizadas mediante la adición de reactivos específicos durante el proceso de flotación (Huallpa, 2018).

a) Minerales *hidrofílicos*

Los minerales mojables por el agua, tales como óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y otros similares, comúnmente forman la mayor parte de los minerales estériles o ganga. Estos minerales tienen la propiedad de mojarse con el agua, lo que les permite permanecer en suspensión en la pulpa y, eventualmente, hundirse (Azañero, 2015).

b) Minerales *hidrofóbicos*

Los minerales que no son fácilmente mojables por el agua, o que son poco mojables, incluyen metales nativos, sulfuros metálicos, así como especies como grafito, carbón bituminoso, talco y otros. Estos minerales tienen la característica de evitar el mojado por parte del agua, lo que les permite adherirse a las burbujas de aire y ascender durante el proceso de flotación por espumas.

Además, es importante destacar que los minerales hidrofóbicos tienden a ser aerofílicos, es decir, tienen afinidad con las burbujas de aire, mientras que los minerales hidrofílicos suelen ser aerofóbicos, lo que significa que no se adhieren fácilmente a las burbujas de aire (Azañero, 2015).

c) Proceso de la flotación por espumas

Los minerales hidrofílicos e hidrofóbicos presentes en una suspensión acuosa pueden ser separados después de haber sido finamente molidos y tratados con reactivos químicos que realzan sus propiedades respectivas. Al pasar burbujas de aire a través de la pulpa, las partículas hidrofílicas tienden a mojarse y caer al fondo de la celda de flotación, permitiendo así la separación de los componentes útiles de

los estériles. Este proceso puede dividir un mineral que, en los casos más simples, consta de dos componentes: uno valioso y otro estéril, en dos productos distintos: un concentrado que contiene la parte valiosa y un relave que contiene la parte estéril (Higidio, 2018).

d) Elementos de la flotación

- **Fase sólida:** Esta etapa consiste en los materiales sólidos que se pretenden separar, en este caso minerales, que comúnmente poseen una estructura cristalina. Dicha estructura es el resultado de la organización química de las moléculas, iones y átomos constituyentes, cada uno de los cuales forma un cuerpo completo. En el proceso de flotación, respecto a los sólidos, se destacan los siguientes factores:
 - ✓ Características de la superficie expuesta al aire en la ruptura del sólido (tipo de superficie, fuerzas residuales de enlace).
 - ✓ Defectos en la estructura cristalina.
 - ✓ Presencia de impurezas provenientes de los sólidos, líquidos y gases (Vila, 2011).
- **Fase líquida:** En esta etapa, el agua se destaca debido a su amplia disponibilidad y bajo costo; además, sus propiedades específicas la convierten en un medio ideal para estas separaciones, la estructura molecular del agua, investigada mediante espectroscopia, es bastante compleja; se estima que aproximadamente el 46% de los enlaces son covalentes y el 54% son iónicos. Es importante resaltar la presencia de impurezas y contaminantes en todo tipo de agua, ya sea natural o industrial. En primer lugar, la dureza del agua, causada por sales de calcio, magnesio y sodio, es una forma común de contaminación natural. Estas sales y otros tipos de contaminantes no solo

pueden alterar las características de flotabilidad de ciertos minerales, sino que también suelen provocar un consumo considerable de reactivos de flotación, con los cuales a menudo forman sales solubles. Además de la contaminación inorgánica, la contaminación orgánica también puede ser significativa y peligrosa, especialmente cuando se trata de aguas residuales (Vera, 2019).

➤ **Fase gaseosa:** En esta etapa, se utiliza aire, que se introduce en la pulpa ya sea neumática o mecánicamente, con el fin de generar burbujas que sirven como puntos de adhesión para las partículas sólidas. La función del aire en el proceso de flotación presenta distintos aspectos, siendo los principales:

- ✓ El aire tiene un impacto químico en el proceso de flotación.
- ✓ Actúa como medio de transporte para llevar las partículas minerales hasta la superficie de la pulpa.

El aire es una mezcla de gases compuesta principalmente por nitrógeno (78.10%) y oxígeno (20.96%), con cantidades reducidas de dióxido de carbono (0.04%) y gases inertes como el argón y otros (Azañero, 2015).

e) **Factores que intervienen en el proceso de flotación**

En todo proceso de flotación intervienen cuatro factores esenciales, estas son:

➤ **La pulpa:** Se trata de una combinación de agua y mineral molido, siendo el componente esencial en el proceso de flotación al contener todos los elementos presentes en el mineral. La suspensión debe cumplir ciertos requisitos, como que el mineral esté adecuadamente triturado, con un tamaño que no supere la malla 48 ni sea menor a la malla 270. Dentro de este rango de tamaño de partículas, es posible recuperar de manera eficaz las partículas de los sulfuros valiosos. El producto obtenido del circuito de molienda, el overflow de los ciclones, consiste en una mezcla de sulfuros valiosos, ganga y agua tras la

trituration y molienda, y debe mantener una densidad y pH apropiados (Vila, 2011).

- **Pulpa espesa:** Una pulpa con alta densidad sugiere una molienda gruesa, con partículas mayores a la malla 48. Cuando esta pulpa se introduce en los sistemas de flotación, es probable que no flote o lo haga muy poco. Esto se debe a que los reactivos y el aire tienen dificultades para levantar partículas grandes, incluso cuando se añade un exceso de reactivos. Además, esta pulpa tiende a asentarse en el fondo de las celdas de flotación, lo que puede obstruir el impulsor de la celda, bloquear las tuberías y generar más problemas operativos, como el desbordamiento de los canales y el bloqueo de las bombas. Como resultado, los sulfuros valiosos podrían perderse en los relaves debido a una liberación incompleta.
- **Pulpa fina:** Cuando la pulpa contiene partículas muy pequeñas (inferiores a la malla 270), la recuperación de los sulfuros valiosos puede ser ineficiente, ya que estos se perderían formando lamas que ensucian el concentrado o relave. Debido a la consistencia acuosa de la pulpa, es importante que el operador de flotación asegure que las espumas se desplacen correctamente desde los bancos de limpieza y que no se produzca un exceso de espuma en el banco scavenger. Si la pulpa es demasiado fina, también estará muy diluida, lo que indica que estamos procesando menos tonelaje del necesario, lo que resulta en una pérdida de capacidad (Troncoso & Suárez, 2017).
- **Los reactivos:** Son compuestos químicos utilizados para extraer los minerales de sulfuro valiosos, mientras se evita que la ganga e impurezas se recuperen. Con el empleo de estos reactivos, es posible aislar los minerales valiosos, como los modificadores, colectores y espumantes (Azañero, 2015).

- **La agitación:** La agitación de la pulpa es crucial para generar espumas de aire necesarias en el proceso de flotación. También facilita una mezcla homogénea de los reactivos con los componentes minerales presentes en la pulpa dentro de la celda. Además, esta agitación previene que los sólidos en la pulpa se depositen, manteniéndolos en suspensión (García, 2012).
 - **El aire:** El aire desempeña un papel crucial en la creación de burbujas que transportan los minerales de sulfuro valiosos hacia la superficie de la celda, formando las espumas. Además, contribuye a la agitación de la pulpa (Azañero, 2015).
- f) **Reactivos de flotación:** Los reactivos de flotación son esenciales y determinantes en el proceso de flotación, ya que este proceso no puede llevarse a cabo sin su intervención. Al ser introducidos en el sistema, desempeñan funciones específicas que permiten la separación de los minerales valiosos de la ganga, garantizando así un proceso de flotación selectivo y eficiente.

En este proceso se emplea una diversidad de reactivos en distintas cantidades, y se añaden al circuito de flotación en diferentes fases. Generalmente, se sigue la siguiente secuencia: primero se incorporan los reguladores de pH, depresores y activadores, seguidos por el colector y, finalmente, el espumante. Sin embargo, esta secuencia puede variar según las características específicas de la flotación. Es esencial considerar el tiempo de reacción de los reactivos con las partículas minerales, así como su concentración, el lugar y la manera en que se añaden al circuito.

Es importante revisar periódicamente la calidad de los reactivos utilizados. En flotación, el rendimiento de los reactivos, ya sean colectores o espumantes, está

fuertemente influenciado por la composición y la estructura mineralógica de la mena (De la Rosa, 2013).

➤ **Modificadores:** Los modificadores desempeñan un papel específico en el proceso de flotación al controlar la acción de los colectores. Preparan las superficies de los minerales para la adsorción o desorción de ciertos reactivos y crean condiciones adecuadas en la pulpa para lograr una flotación efectiva. En otras palabras, alteran o modifican la superficie de los minerales de sulfuro y la ganga para favorecer o impedir la acción de los colectores.

Se clasifican según su función de la siguiente manera:

- **Depresores:** Tienen como función principal reducir la flotabilidad de ciertos minerales, volviendo su superficie más hidrofílica o evitando la adsorción de colectores que podrían hidrofobizarla, lo cual inhibiría la colección de estos minerales. Estos reactivos evitan la flotación de algunos sulfuros, al tiempo que permiten la flotación de otros. Además, aumentan la hidratación de la superficie del mineral, separando de él los iones del colector.
- **Activadores:** Estos reactivos incrementan la flotabilidad de ciertos minerales al facilitar la adsorción de un colector, restableciendo así la flotabilidad de un mineral previamente oxidado o deprimido. A diferencia de los depresores, estos reactivos tienen una función activante que potencia la unión entre los colectores y la superficie mineral. Los iones de estos reactivos se integran en la estructura del mineral o forman compuestos en su superficie, disminuyendo su hidratación y favoreciendo la adhesión del colector al mineral. Esto genera una nueva superficie en el mineral, haciéndolo apto para la flotación.

- **Modificadores de pH:** Son reactivos que ajustan la acidez o alcalinidad de la pulpa. Modifican la concentración de iones de hidrógeno en la pulpa para aumentar o disminuir la adsorción del colector según sea necesario. La efectividad de los agentes de flotación generalmente se basa en la concentración de iones de hidrógeno o hidroxilo en la pulpa. El objetivo principal en la investigación de flotación es determinar el pH óptimo para cualquier combinación de reactivos y mineral. La mayoría de las plantas de flotación que procesan minerales sulfurados operan con una pulpa alcalina para lograr una metalurgia óptima y minimizar la corrosión (Apaza, 2017).
- **Colectores:** Los colectores son sustancias químicas orgánicas con moléculas que tienen un grupo polar y otro no polar. Se adhieren principalmente a los sulfuros y al aire, con menor afinidad hacia la ganga. Al adsorberse en la superficie del mineral, la parte no polar se orienta hacia el agua y la polar hacia el mineral, creando una capa impermeable en la superficie del mineral. Es crucial combinar adecuadamente colectores y modificadores para lograr los mejores resultados metalúrgicos.

En una celda de flotación, los colectores primero interactúan con los sulfuros, formando una capa delgada sobre ellos. Luego, se adhieren a una burbuja de aire cercana y ascienden hacia la superficie, transportando consigo los sulfuros adheridos.

- **Xantato:** Son colectores aniónicos ampliamente utilizados y se comercializan en forma de pellets. Son de los primeros colectores orgánicos solubles en agua. En solución acuosa, los xantatos se hidrolizan y forman ácidos xantogénicos. La hidrólisis se intensifica con la

disminución del pH, siendo las soluciones en medios alcalinos más estables. Su capacidad colectora es más potente cuanto mayor es el número de átomos de carbono en la molécula. Aunque no son selectivos, tienen afinidad por los sulfuros en el siguiente orden: Fe, Zn, Pb, Cu, Ag. En exceso, favorecen la flotación de la ganga (Madrid, 2005).

- **Espumante:** El espumante tiene como objetivo generar una espuma que retenga las burbujas con partículas minerales hasta que se extraigan de la celda de flotación. Son compuestos tensoactivos heteropolares que se pueden adherir a la interfaz agua-aire. Los espumantes facilitan la formación de espuma, lo que permite separar partículas hidrófobas e hidrófilas.

El papel principal de los espumantes es estabilizar las pequeñas burbujas de aire formadas en la pulpa debido a la agitación o la inyección de aire. Esto previene que las burbujas se fusionen (coalescencia) y que, al llegar a la superficie, la espuma no se rompa. Además, aportan elasticidad, facilitando que las burbujas asciendan y lleguen intactas a la interfaz agua-aire.

En la práctica de la flotación, se ha observado que una espuma con partículas es más estable que una espuma sin partículas.

❖ **Efectos de los espumantes**

- ✓ Favorecen la formación de burbujas más pequeñas, mejorando la distribución de las burbujas de aire en la celda de flotación.
- ✓ Evitan la coalescencia o unión de las burbujas de aire.
- ✓ Reducen la velocidad de ascenso de las burbujas hacia la superficie de la pulpa.
- ✓ Refuerzan la resistencia de la película de la burbuja y la estabilidad de la espuma al llegar a la superficie.

✓ Modifican la acción del colector.

❖ **Actividad de los espumantes:** El espumante envuelve las burbujas de aire, evitando que se fusionen y formen burbujas más grandes que ascenderían rápidamente y se romperían en la superficie. Esta capa de espumante protege las burbujas pequeñas entre sí, y al llegar a la superficie, evita que se rompan prematuramente (Tobón, 2013).

- g) **Parámetros de flotación:** Son variables que deben mantenerse estables o ajustarse ligeramente durante el procesamiento del mineral. La flotación es un proceso con múltiples variables, y su definición y descripción cuantitativa aún requieren de más investigaciones y clarificación de diversos aspectos.
- a. **Granulometría del mineral:** se busca el tamaño óptimo de la partícula mineral, para obtener un grado de concentrado con una buena recuperación.
 - b. **Tiempo de flotación:** es el período que la pulpa debe estar en las máquinas de flotación para obtener un concentrado de calidad y una recuperación óptima. Un tiempo de flotación corto disminuye la recuperación del mineral valioso, mientras que un tiempo prolongado puede diluir excesivamente los concentrados.
 - c. **Densidad de pulpa:** es la relación de sólidos en la pulpa, se expresa en % sólidos o gramos por litro.
 - d. **Nivel de pulpa:** es la altura dada para la superficie de la pulpa en la celda de flotación. Influye en la calidad y recuperación de los concentrados.
 - e. **Dispersión:** se refiere a la agitación intensa de las partículas dentro de la pulpa. El objetivo es separar las partículas de ganga para que sean más susceptibles de ser mojadas por el agua, reduciendo así su capacidad para flotar.

- f. pH:** es un indicador de la acidez o alcalinidad de la pulpa mineral. El pH está influenciado por la naturaleza del mineral, las sustancias presentes en el agua y la composición y cantidad de reactivos utilizados.
 - g. Dosificación de reactivos:** Es la cantidad de reactivo, medida en peso, añadida a la pulpa por cada tonelada de mineral. Se expresa en kilogramos de reactivo por tonelada métrica de mineral. La dosificación de reactivos debe ajustarse cuando cambia la ley del mineral alimentado o cuando varía el tonelaje del mineral. Es crucial que la dosificación sea precisa, ya que un exceso de colector puede llevar a la flotación de las gangas, mientras que un exceso de depresor puede deprimir las menas (Villalta, 2022).
 - h. Controles de flotación:** Aunque el proceso de flotación puede parecer simple, tiene cierto grado de complejidad debido a las variaciones en las leyes del mineral de cabeza a lo largo del día. Para ser llevado a cabo de manera eficiente, es necesario mantener un control constante.
- h) Recuperación y radio de concentración:**

Estos son parámetros que reflejan la eficacia y la selectividad de la flotación. La recuperación se refiere al porcentaje del mineral valioso que se recupera en el concentrado. La razón de concentración indica cuántas unidades de mineral de cabeza se necesitan para obtener una unidad de concentrado. Desde el punto de vista técnico, no es recomendable aumentar la concentración hasta alcanzar un enriquecimiento máximo, ya que a medida que el concentrado se vuelve más rico, la recuperación disminuye.

Las pérdidas aumentan en proporción aritmética hasta cierto punto; después de este punto, aumentan en proporción geométrica. Desde una perspectiva económica, este límite se puede determinar comparando el valor de un concentrado más rico

con los costos operativos y las pérdidas de mineral valioso necesarias para aumentar la ley del concentrado.

i) Alimentación de reactivos

Es crucial suministrar los reactivos en las cantidades y ubicaciones correctas. En cada planta, las dosis de reactivos se determinan en función de la ley del mineral de cabeza y del tipo de concentrado deseado. Por lo tanto, una mala medición de los reactivos puede afectar significativamente el proceso de flotación (Troncoso & Suárez, 2017).

2.3. Definición de términos básicos

- ✓ **Mineral:** Sustancia homogénea originada por un proceso genético natural con composición química, estructura cristalina y propiedades físicas constantes.
- ✓ **Mena:** Está constituida por especies mineralógicas valiosas y cuyo aprovechamiento constituye el motivo fundamental de la explotación minera.
- ✓ **Ganga:** Esta constituida principalmente de especies terrosas o pétreas, principalmente cuarzo.
- ✓ **Mineral cabeza:** Es el mineral bruto que se alimenta a la planta de tratamiento o beneficio.
- ✓ **Ley:** Contenido de metal valioso en una mena, expresado generalmente en porcentaje o en gramos de metal por tonelada de mena.
- ✓ **Deslamado (Desliming en inglés):** “Es un procedimiento común que se realiza en el procesamiento de minerales principalmente para eliminar partículas finas (partículas de limo) que consumen cantidades excesivas de colector debido a sus grandes áreas de superficie y que recubren minerales valiosos que dificultan el contacto burbuja-mineral”.

- ✓ **Flotación:** “Explica el mecanismo mediante el cual actúan los colectores y los modificadores, las condiciones para que un compuesto químico sea colector de un determinado mineral, y debe establecer la condición fisicoquímica que producirá un mejor rendimiento del proceso”.
- ✓ **Proceso de flotación:** “Todas las técnicas o métodos de separación, físicos o químicos se basan sobre las diferencias en las propiedades de los materiales, cuyo proceso de separación y concentración, aprovecha las diferencias en las propiedades fisicoquímicas de superficies de los minerales”.
- ✓ **Reactivos de flotación:** “Son sustancias químicas que sirven para la recuperación de los sulfuros valiosos, despreciando o deprimiendo a la ganga e insolubles. Mediante el uso de reactivos podemos seleccionar los elementos de valor en sus respectivos concentrados”.
- ✓ **Regulador de pH:** “El pH indica el grado de acidez o de alcalinidad de la pulpa, lo cual tiene como propósito incrementar o decrecer la adsorción del colector como se desee salvo raras excepciones, la efectividad de todos los agentes de flotación depende grandemente de la concentración de hidrógeno”.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Optimizamos el proceso de flotación realizando diseños experimentales, en el programa estadístico Minitab 19; permitiendo la recuperación de Pb-Ag en Matucana

2.4.2. Hipótesis específicas

- a) **HE1:** La microscopia óptica favorece identificar las especies de minerales presentes, distribución volumétrica, grados de liberación y enlaces presentes en los minerales sulfurados de Matucana.

- b) **HE2:** Los métodos estadísticos nos favorece a determinar la influencia de la dosificación de reactivos de flotación sobre la recuperación y calidad de Pb-Ag en el concentrado de flotación.
- c) **HE3:** Los métodos estadísticos nos permite optimizar la recuperación y calidad de Pb-Ag en el proceso de flotación de minerales.

2.5. Identificación de variables

2.5.1. Variable Independiente

Optimización Del Proceso De Flotación De Minerales Sulfurados

2.5.2. Variables dependientes

La Recuperación De Pb-Ag En Matucana – Lima - 2024

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

En el estudio se realizó experimentos de flotación para optimizar la recuperación de Pb - Ag. Se aplicaron métodos como caracterización de minerales, diseños experimentales y los balances para analizar la influencia de la dosificación en los reactivos como el colector (AR-3418 & AR-1242) y la alcalinidad de la pulpa. Los resultados se analizaron utilizando Minitab 19.

Tabla 2 Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Factores
<p>VARIABLE INDEPENDIENTE</p> <p>Optimización Del Proceso De Flotación De Minerales Sulfurados</p>	<p>Mejora del proceso de flotación que consiste extraer los minerales que se desean mientras se deprimen aquellos que no se quieren recuperar utilizando los reactivos de flotación.</p>	<p>Realización de diferentes pruebas metalúrgicas</p>	<p>Análisis volumétrico por vía clásica</p>	<p>Leyes obtenidas del Pb - Ag</p>	<p>✓ Granulometría ✓ pH ✓ AR-3418 ✓ AR-1242</p>
<p>VARIABLE DEPENDIENTE</p> <p>La recuperación de Pb-Ag en Matucana – Lima - 2024</p>	<p>Proceso fundamental para aumentar la rentabilidad de la operación minera separando el material valioso (Pb-Ag) de los contaminantes.</p>	<p>Valores obtenidos en los balances metalúrgicos</p>	<p>Determinación de la recuperación del Pb-Ag</p>	<p>Pb (%) Ag(Oz/TC)</p>	<p>✓ Recuperación del Pb-Ag ✓ Calidad del Pb-Ag</p>

Nota: Considerando las dimensiones de las variables

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es **aplicada**; Tamayo (2006), describen este tipo de investigación como la aplicación o utilización de los conocimientos adquiridos, a la vez que se adquieren otros, después de implementar y sistematizar la práctica basada en investigación.

3.2. Nivel de investigación

El nivel de la investigación es aplicativo, dado que busca resultados en base a teorías existentes y antecedentes de la flotación Pb-Ag.

3.3. Métodos de investigación

El método de la investigación es cuantitativo experimental (Lifeder, 2022) que consiste en la identificación de las variables relevantes para la investigación, en el diseño de experimentos y en la observación de los cambios que estas sufren o generan tras la ejecución de los mismos y para el análisis de los resultados de experimentación se prefieren los instrumentos estadísticos, los cuales aportan datos exactos y permiten observar patrones que no pueden ser detectados a simple vista.

3.4. Diseño de investigación

El diseño de investigación es experimental, porque mediante la revisión de antecedentes y teorías sobre estudios de flotación de minerales, se realizarán pruebas metalúrgicas preliminares, con la finalidad de poder seleccionar las variables más influyentes en el resultado, de esta manera lograr optimizar la recuperación de Pb-Ag en Matucana – lima.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población de estudio corresponde al mineral proveniente de la bocamina en el distrito de Matucana, provincia y departamento de Lima. Por otro lado, las pruebas de caracterización y metalurgia se desarrollarán en la ciudad de Lima.

3.5.2. Muestra

Se llevó a cabo un muestreo aleatorio simple, obteniéndose aproximadamente 100 kg de material de la bocamina en extracción en Matucana, con el fin de evaluar la mineralogía de la muestra para su posterior procesamiento en laboratorio.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

A. Técnicas

- ✓ Información bibliográfica sobre la optimización del proceso de flotación de Pb-Ag.
- ✓ Dosificación de reactivos en la flotación de Pb-Ag.
- ✓ Obtener una muestra representativa del mineral polimetálico del distrito donde se realizará la investigación.
- ✓ Pruebas metalúrgicas de flotación de minerales de Pb-Ag.

B. Instrumentos

- ✓ Microscopía óptica de minerales por luz reflejada.

- ✓ Diseños experimentales de flotación usando Minitab 19.
- ✓ Colectores como el AR-3418 y AR-1242.

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

Se ha elegido herramientas que permitan obtener datos precisos y reproducibles en el proceso experimental. Estos instrumentos fueron:

- a) **Equipos de laboratorio:** Celda de flotación, Balanza analítica, Potenciómetro.
- b) **Reactivos:** Colectores (AR 3418 – AR 1242), Espumantes (MIBC), Modificador de pH (cal)
- c) **Instrumentos de medición de parámetros operacionales:** Medidor de pH, Software de procesamiento de datos (Excel, Minitab 19).

3.7.1. Validación de instrumentos

Los equipos y reactivos utilizados han sido calibrados y recibieron el mantenimiento oportuno, para cumplir los estándares de precisión y confiabilidad, del siguiente modo:

- a. Calibración de equipos: Balanza analítica calibrada y potenciómetro verificado con soluciones buffer.

3.7.2. Evaluación de la confiabilidad

La confiabilidad se mide en función de la repetibilidad y reproducibilidad de los experimentos:

3.8. Técnica de procesamiento y análisis de datos

Se ejecutará el procesamiento de la data obtenida por las pruebas de flotación de minerales sulfurados en laboratorio empleando software estadístico Minitab 19, además, los balances metalúrgicos se realizarán en hojas de cálculo. El análisis estadístico correspondiente corresponde al análisis de la varianza de la recuperación y calidad de Pb-Ag obtenido en el desarrollo del diseño factorial de experimentos.

a) Pruebas de repetibilidad: Realizando experimentos bajo las mismas condiciones.

3.9. Tratamiento estadístico

En un primer nivel de análisis, se aplicaron técnicas propias de la estadística descriptiva, como la elaboración de tablas, histogramas y de diagramas circulares. Estas, además de facilitar la ordenación y comparación de los datos, nos permiten conocer los parámetros de las muestras con las que trabajamos. Los recuentos necesarios para la elaboración de estos cálculos se han realizado con el programa Minitab 19

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica.

La investigación cumple con los estándares de comportamiento ético esperado, como normas éticas se consideró:

- ✓ El cuidado y protección de las personas, medio ambiente y la propiedad durante el desarrollo de los trabajos de perforación diamantina.
- ✓ La información obtenida de otros autores es citada, respetando la propiedad de estos.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

El alza de los precios de los metales en los últimos años ha generado la necesidad de optimizar los procesos metalúrgicos de recuperación de los valores de interés comercial, por ello es necesario identificar las especies de minerales que se encuentran involucrados en un determinado proceso.

El mineral de explotación en la zona de Matucana, se lleva a cabo por la extracción de minerales de plomo – plata, en forma de galena argentífera, la cual es procesada en plantas de alquiler (Perú Sol) en la Oroya.

La cantidad de muestra para la investigación es de aproximadamente 100 kg de la bocamina en extracción en Matucana; para así poder evaluar la mineralogía de la muestra para su procesamiento en laboratorio.

El lote de mineral sulfurado se redujo de tamaño en una chancadora de mandíbulas de 5x6 marca RLD a nivel de laboratorio, y una chancadora de rodillos, hasta alcanzar una granulometría de 100 % - 10 Malla. El material preparado fue

muestreado hasta obtener aproximadamente un 1 kg de mineral para cada una de las diferentes pruebas.

4.1.1. Ensayo químico del mineral de cabeza

Se realizaron los ensayos químicos correspondientes de una muestra representativa del lote de mineral muestreado, para determinar las leyes de Pb y Ag mediante métodos volumétricos y vía seca, respectivamente. Las leyes reportadas por el laboratorio fueron de 10,25% de Pb, y 5,27 Oz-Ag/TC, tal y como se puede observar en la tabla 3.

Tabla 3 Ensayos químicos

Elemento	Pb (%)	Ag (Oz/Tc)
Ley	10,25	5,27

Nota: Datos representados en porcentaje y onzas por toneladas cortas.

Fuente: Elaborado por los tesisistas

4.1.2. Microscopia óptica de una muestra representativa

Se elaboró una briqueta debidamente pulida empleando 4.5 gramos de mineral y aglutinante (resina), la cual se observó al microscopio óptico de luz polarizada identificando especies de valores económicos como la galena principalmente, y trazas de plata nativa. El total de las especies de minerales identificados se describen en la tabla 4.

Tabla 4 Especies mineralógicas encontradas en la muestra

Minerales	Fórmula	Abreviatura
Galena	PbS	Gn
Plata nativa	Ag	Ag
Pirita	FeS ₂	Py
Pirrotita	Fe _{1-x} S	Po
Goethita	FeO.OH	Goe
Ilmenita	FeTiO ₃	Ilm
Gangas	-	GGs

Nota: Con la presentación de sus respectivas abreviaturas.

Fuente: Elaborado por los tesisistas

a) **Distribución volumétrica**

La distribución de la galena se estimó en un 12.32 %, y 0.08% corresponde a la plata nativa identificada en el microscopio, especies que corresponden a la de valor económico. La muestra se observó con poca presencia de sulfuros de hierro como la pirita con una distribución de 2.22 %, y la pirrotita con un valor de 1.24%, y las gangas no metálicas representaron una distribución de 79.33 %, tal y como se observa en la tabla 5. Así mismo, la figura 4 representa un gráfico de distribución comparativo de las especies observadas al microscopio.

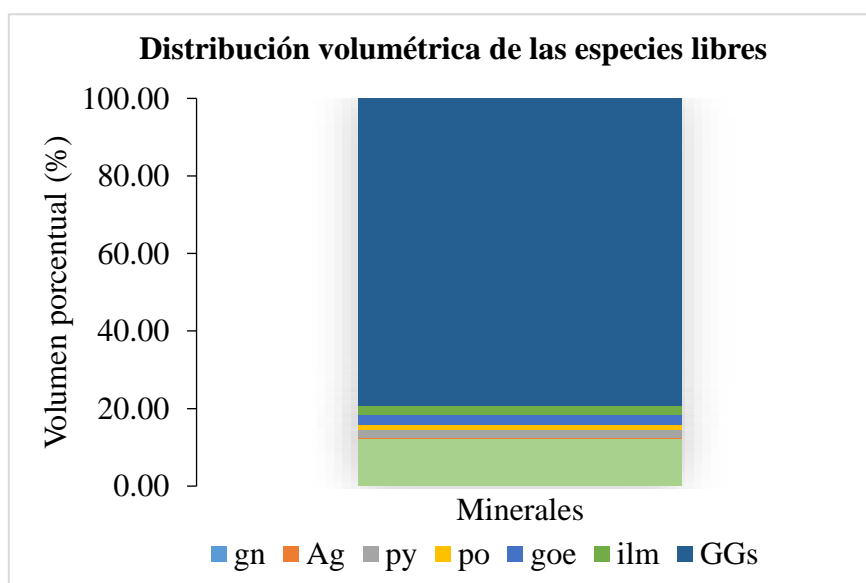
Tabla 5 Volumetría de los minerales

Minerales	Volumen porcentual (%)
Galena	12,32
Plata nativa	0,08
Pirita	2,22
Pirrotita	1,24
Goethita	2,48
Ilmenita	2,33
Gangas	79,33
Total	100,00

Nota: Datos representados en porcentaje.

Fuente: Elaborado por los tesisistas

Figura 4 Volumetría de los minerales



Nota: Gráfico de una barra con capas según el mineral.

Fuente: Elaborado por los tesisistas

b) Grados de liberación de los minerales identificados

Las especies de galena y plata nativa se identificaron con grados de liberación del 93,90% y 50% respectivamente, siendo los enlaces que forman con otras especies, el motivo por el cual no se encuentran liberadas completamente. Por otro lado, las especies sulfuradas de hierro como la pirita y pirrotita, presentaron grados de liberación de 62,71% y 75,76%, respectivamente, tal y como se observa en la tabla 6.

Tabla 6 Liberación de los minerales

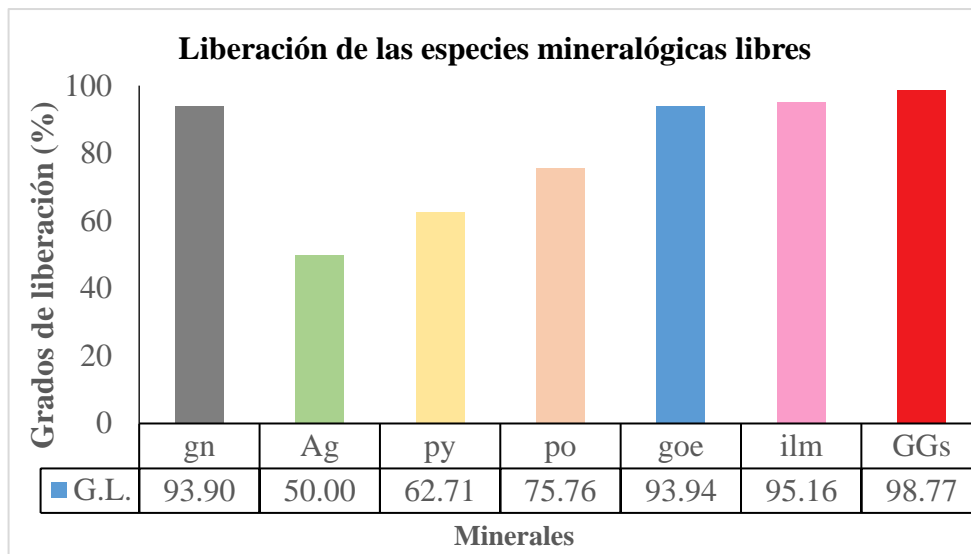
Minaerales	Grado de liberación (%)
Galena	93,90
Plata nativa	50,00
Pirita	62,71
Pirrotita	75,76
Goethita	93,94
Ilmenita	95,16
Gangas	98,77

Nota: Datos representados en porcentaje.

Fuente: Elaborado por los tesisas

La figura 5 representa un gráfico de barras comparativo de los grados de liberación del total de las especies identificadas en el microscopio óptico, observándose que, de las especies sulfuradas identificadas, solo la galena presenta valores de liberación superior al 90%, al igual que las especies de goethita, ilmenita, y las especies de gangas.

Figura 5 Liberación de los minerales



Nota: Gráfico de barras por mineral.

Fuente: Elaborado por los testistas

c) Partículas entrelazadas y posibilidades de liberación

Se observaron partículas mixtas de galena con plata nativa, pirita, y gangas, además de observar en enlace triple de galena-pirita-gangas. La tabla 7 representa el total de las partículas mixtas identificadas y sus posibilidades de liberación. La figura 6 representa un gráfico de distribución porcentual comparativo de las partículas entrelazadas identificadas en el laboratorio, donde se puede observar que los enlaces de galena-gangas y galena-pirita-gangas representan la mayor distribución de los enlaces de galena.

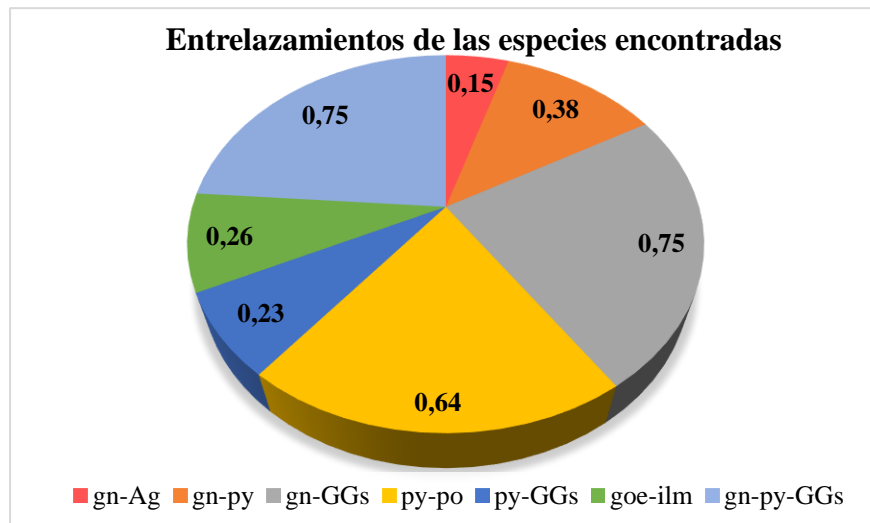
Tabla 7 Liberación de los minerales

Minerales entrelazados	Tipo entr.	Num part.	Dist. Porc. (%)	Posibilidades de liberación completa
Partículas libres		2577	96,84	
gn-Ag	1aII	1	0,04	Fácil
	3aI	3	0,11	Moderadamente fácil a difícil
gn-py	1aII	2	0,08	Fácil
	1bIII	2	0,08	Moderadamente fácil
	3aI	6	0,22	Moderadamente fácil a difícil
gn-GGs	1aII	1	0,03	Fácil
	3aIV	5	0,19	Moderadamente fácil a difícil
	1bII	6	0,23	Moderadamente fácil
	4aII	8	0,30	Muy difícil
py-po	1bIV	1	0,04	Moderadamente fácil
	3aII	2	0,07	Moderadamente fácil a difícil
	4bI	5	0,19	Moderadamente difícil
	2bIII	9	0,34	Muy difícil
py-GGs	1bIII	2	0,08	Moderadamente fácil
	2bIV	4	0,15	Muy difícil
goe-ilm	4aI	3	0,11	Muy difícil
	1cIV	4	0,15	Imposible
	4bIII	1	0,04	Moderadamente difícil
gn-py-GGs	1aIII	2	0,07	Fácil
	1bII	4	0,15	Moderadamente fácil
	4aI	6	0,23	Muy difícil
	3cIII	7	0,26	Imposible
TOTAL		2661	100,00	

Nota: Datos representados en porcentaje.

Fuente: Elaborado por los tesisistas

Figura 6 Enlaces de las especies

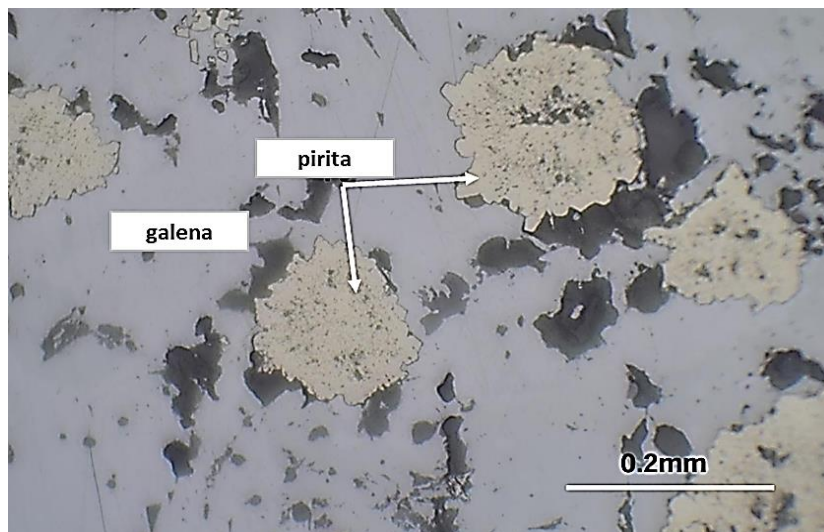


Nota: Gráfico circular de los entrelazamientos.

Fuente: Elaborado por los tesisistas

En las figuras 7, 8, y 9 se representan las principales micrografías que se obtuvieron en los ensayos de microscopía óptica de luz reflejada.

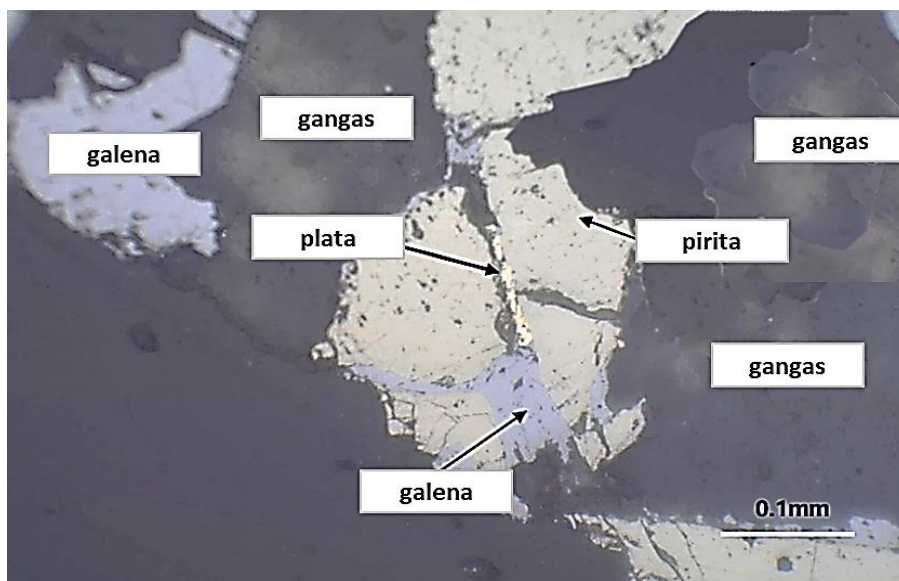
Figura 7 Micrografía con presencia de Py y Gn



Nota: Con aumento de 0.2 mm.

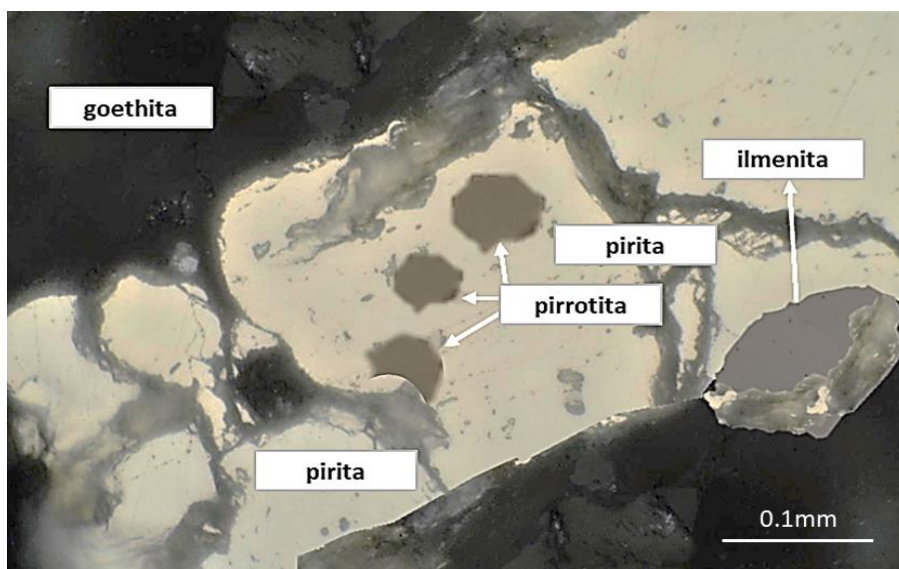
Fuente: Elaborado por los tesisistas

Figura 8 Micrografía con presencia de py,Ag, gn y GGs



Nota: Con aumento de 0.1 mm.
Fuente: Elaborado por los tesistas

Figura9 Micrografía con presencia de goe, ilm, py y po



Nota: Con aumento de 0.1 mm.
Fuente: Elaborado por los tesistas

4.1.3. Prueba de Moliendabilidad

Se determinó la variable granulometría en función de los tiempos de molienda, empleando un molino de bolas de laboratorio, 1 kg de muestra y una relación S/L de 2/1 como parámetros de operación estándar. Se realizaron 5 pruebas de molienda, para

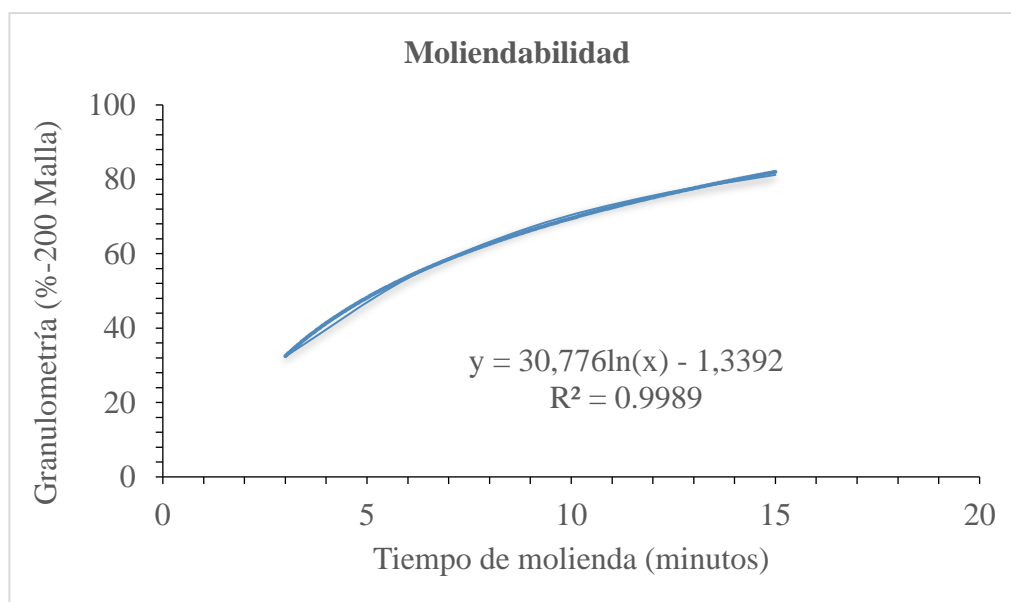
tiempo de 3,6,9,12, y 15 minutos, reportando sus valores respectivos de granulometría en la tabla 8. Con los resultados obtenidos de las pruebas de moliendabilidad se elaboró una curva de moliendabilidad empleando hojas de cálculo, y se ajustó el modelo: Granulometría (%-200 Malla) = $30.776\ln(t) - 1.3392$, tal y como se representa en la figura 9.

Tabla 8 Moliendabilidad

Tiempo de molienda (minutos)	Granulometría (% - 200 Malla)
3	32,37
6	53,41
9	67,1
12	75,62
15	81,2

Nota: Datos representados en porcentaje según el tiempo.
Fuente: Elaborado por los tesistas

Figura 9 Gráfica de la moliendabilidad



Nota: El R-cuadrado muestra la confiabilidad de la ecuación.
Fuente: Elaborado por los tesistas

a) Evaluación de la granulometría de flotación

Se desarrollaron pruebas de flotación de Pb-Ag en función a la granulometría del mineral, empleando un equipo de flotación Denver a nivel de laboratorio y una celda de 2 lt de capacidad. Las pruebas se desarrollaron para granulometrías de 50,23%, 55,85%, 60,38%, 65,22%, y 70,49%, operando el equipo bajo los parámetros descritos en la tabla 9.

Tabla 9 Condiciones de operación de la flotación para evaluar la granulometría

Variable	Datos
Peso mineral	1000 g
% Sólidos	35
pH	8
AR-3418	50 g/TM
AR-1242	30 g/TM
MIBC	20 g/TM

Nota: Datos considerados a partir de pruebas de laboratorio previas.

Fuente: Elaborado por los tesisistas

Tabla 10 Prueba de flotación a 50% - 200 Malla

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	148,75	14,88	58,23	35,51	866,17	528,21	83,59	78,67	6,72
Medio Pb-Ag	287,66	28,77	2,13	1,04	61,27	29,92	5,91	4,46	
Relave	563,59	56,36	1,93	2,01	108,77	113,28	10,50	16,87	
Cabeza calculada			10,36	6,71	1036,22	671,41			

Nota: Los datos están en gramos, porcentaje y onzas por toneladas cortas

Fuente: Elaborado por los tesistas

Tabla 11 Prueba de flotación a 55% - 200 Malla

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	157,23	15,72	60,14	38,75	945,58	609,27	83,89	88,23	6,36
Medio Pb-Ag	254,11	25,41	3,16	0,95	80,30	24,14	7,12	3,50	
Relave	588,66	58,87	1,72	0,97	101,25	57,10	8,98	8,27	
Cabeza calculada			11,27	6,91	1127,13	690,51			

Nota: Los datos están en gramos, porcentaje y onzas por toneladas cortas

Fuente: Elaborado por los tesistas

Tabla 12 Prueba de flotación a 60% - 200 Malla

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	156,33	15,63	53,14	24,51	830,74	383,16	81,38	74,38	6,40
Medio Pb-Ag	234,74	23,47	1,95	1,55	45,77	36,38	4,48	7,06	
Relave	608,93	60,89	2,37	1,57	144,32	95,60	14,14	18,56	
Cabeza calculada			10,21	5,15	1020,83	515,15			

Nota: Los datos están en gramos, porcentaje y onzas por toneladas cortas

Fuente: Elaborado por los tesisistas

Tabla 13 Prueba de flotación a 65% - 200 Malla

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	163,45	16,35	51,14	21,33	835,88	348,64	79,24	67,74	6,12
Medio Pb-Ag	250,33	25,03	2,47	1,88	61,83	47,06	5,86	9,14	
Relave	586,22	58,62	2,68	2,03	157,11	119,00	14,89	23,12	
Cabeza calculada			10,55	5,15	1054,82	514,70			

Nota: Los datos están en gramos, porcentaje y onzas por toneladas cortas,

Fuente: Elaborado por los tesisistas

Tabla 14 Prueba de flotación a 70% - 200 Malla

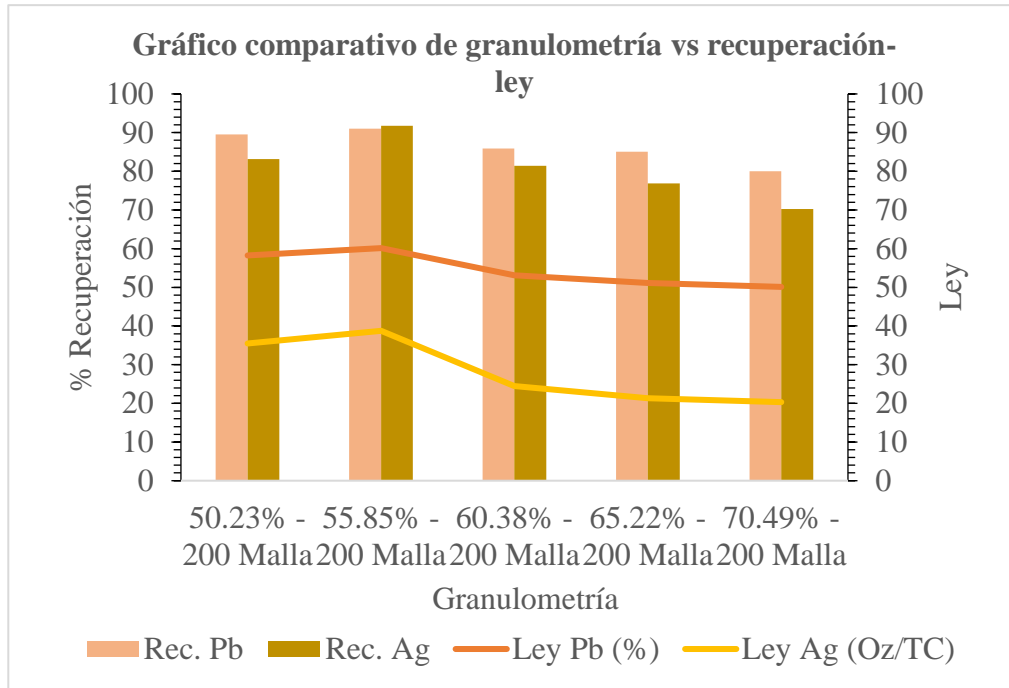
Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	160,24	16,02	50,11	21,33	802,96	341,79	77,42	66,08	6,24
Medio Pb-Ag	254,78	25,48	1,04	1,03	26,50	26,24	2,55	5,07	
Relave	584,98	58,50	3,55	2,55	207,67	149,17	20,02	28,84	
Cabeza calculada			10,37	5,17	1037,13	517,20			

Nota: Los datos están en gramos, porcentaje y onzas por toneladas cortas,

Fuente: Elaborado por los tesisistas

El gráfico de barras de la figura 10 representa los valores de recuperación de Pb y Ag, y la calidad del concentrado obtenidos en cada prueba de flotación a distintas granulometrías.

Figura 10 Comparativa de la granulometría con la recuperación y ley



Nota: Los gráficos de barras y líneas corresponden a la recuperación y ley
Fuente: Elaborado por los tesisistas

Los resultados de las pruebas de flotación demostraron que a una granulometría de 55,85 % se alcanzó una recuperación de 91,01% de Pb con una calidad de 60,14 de Pb en el concentrado, además se logró recuperar 91,73% de Ag con una ley de 38,75 Oz-Ag/TC, El total de los resultados de las pruebas metalúrgicas se representan en los balances metalúrgicos de las tablas 10, 11, 12, 13 y 14.

4.1.4. Diseño experimental factorial para la flotación Pb-Ag

Se elaboró un diseño experimental factorial de 3 factores, 2 niveles, y 2 réplicas, con la finalidad de evaluar la contribución de las variables pH, dosificación de reactivos AR-3418 y AR-1242, sobre las variables respuesta de recuperación y calidad del concentrado Pb-Ag, Para la elaboración y el análisis estadístico se usó el paquete

estadístico Minitab 19 y se programó los valores mínimos y máximos de las variables en estudio, tal y como se describe en la tabla 15. La plantilla del diseño experimental desarrollado se representa en la tabla 16.

Tabla 15 Rango de los valores de las variables a analizar

Variable	Valor mínimo	Valor máximo
pH	8	9,5
AR-3418 (g/TM)	50	100
AR-1242 (g/TM)	30	60

Nota: Valores mínimos y máximos a controlar en el diseño,

Fuente: Elaborado por los tesisistas

Tabla 16 Orden de las pruebas del diseño

Orden	Bloques	pH	AR-3418 (g/TM)	AR-1242 (g/TM)
1	1	8	50	30
2	1	9,5	50	30
3	1	8	100	30
4	1	9,5	100	30
5	1	8	50	60
6	1	9,5	50	60
7	1	8	100	60
8	1	9,5	100	60
9	1	8	50	30
10	1	9,5	50	30
11	1	8	100	30
12	1	9,5	100	30
13	1	8	50	60
14	1	9,5	50	60
15	1	8	100	60
16	1	9,5	100	60

Nota: La conjugación de las tres variables y sus réplicas nos dan 16 pruebas

Fuente: Elaborado por los tesisistas

4.1.5. Pruebas de flotación

Para realizar pruebas de flotación se utilizó una celda de laboratorio marca Denver y un pH-metro marca oakton pH 2100 series, y una pulpa al 35% de sólidos, Se realizó la prueba en la celda Denver con un circuito de flotación primaria de plomo

para lo cual se utilizó como colector para la galena a los reactivos en estudio, Las condiciones para trabajar la celda primaria de plomo fueron las siguientes:

- a) Una vez descargada la pulpa en la celda de flotación (como se muestra en la imagen), se ajusta la velocidad de agitación.

Figura 11 Descarga de la pulpa hacia la celda de flotación



Nota: La figura representa la descarga de la pulpa a la celda de flotación

Fuente: Elaborado por los tesisistas

- b) Al minuto se adiciona el depresor en este caso el NaCN al 0,75% para deprimir el fierro presente en la muestra a razón de 5gr/TM.
- c) Luego se adiciona el reactivo AR-3418 como colector de plomo (según el orden las pruebas experimentales).

Figura 12 Adición de reactivo



Nota: La figura representa la adición del reactivo

Fuente: Elaborado por los tesisistas

- d) Después se adiciona el reactivo AR-1242 como colector de la plata (según el orden las pruebas experimentales).
- e) Seguido se adiciona el MIBC como espumante para la flotación del mineral durante el tiempo determinado.
- f) A continuación, se ajusta el pH (trabajamos con un pH de 8 – 9,5) según el orden de pruebas del diseño experimental.
- g) Dejamos que se acondicione la pulpa durante 5 minutos.
- h) Una vez pasado el tiempo liberamos la entrada de aire.

Figura 13 *Tiempo de acondicionamiento*



Nota: La figura representa el tiempo de acondicionamiento
Fuente: Elaborado por los tesistas

- i) Al observar que las burbujas estén bien formadas se procede recolectar las espumas cargadas de Pb-Ag, Por un tiempo de 5 minutos.

Figura 14 *Recolección de espuma cargada de Pb-Ag*



Nota: La figura representa la recolección de la espuma cargada
Fuente: Elaborado por los tesistas

- j) Pasado el tiempo obtenemos nuestro concentrado de Pb y nuestro relave general de la prueba.
- k) El concentrado obtenido se pasa a una celda más pequeña con el fin de realizar la limpieza respectiva.

Las condiciones para trabajar la celda de limpieza de plomo fueron las siguientes:

- a) El concentrado obtenido se descargó en una celda de $\frac{3}{4}$ de litro.

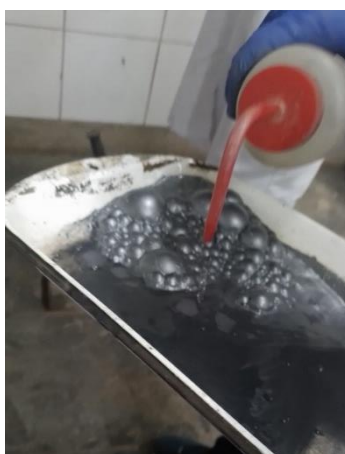
Figura 15 Descarga hacia la celda de $\frac{3}{4}$



Nota: La figura representa la descargar del mineral hacia la celda de $\frac{3}{4}$ de litro.
Fuente: Elaborado por los tesistas.

- b) Una vez en la celda se acondiciona durante de 1 minuto y se procede a flotar durante de 2 minutos, obteniéndose así nuestro concentrado final de plomo y el relave de esta.

Figura 16 Concentrado final



Nota: La figura representa el concentrado final obtenido en la limpieza.
Fuente: Elaborado por los tesistas.

- c) Finalmente dejamos secar en el horno cada una de las muestras obtenidas para posteriormente prepararlo y enviarlo al laboratorio químico para su respectivo análisis.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.2.1. Resultados de las pruebas de flotación

La mejor prueba desarrollada fue la de orden 7, en la cual se alcanzó una recuperación de 91.15 % de Pb con una calidad de 63,45%, y 89.88 % de Ag con una ley de 39,33 Oz/TC, por otro lado, los valores más bajos reportados corresponden a la prueba de orden 2, El total de los resultados de las pruebas del diseño se representan en los balances metalúrgicos de las tablas del 17 al 32.

Tabla 17 Prueba de 1 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	153,66	15,37	54,41	30,64	836,06	470,81	83,10	77,58	6,51
Medio Pb-Ag	251,14	25,11	1,96	1,27	49,22	31,89	4,89	5,26	
Relave	595,20	59,52	2,03	1,75	120,83	104,16	12,01	17,16	
Cabeza calculada			10,06	6,07	1006,11	606,87			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 18 Prueba de 2 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	150,24	15,02	52,94	25,41	795,37	381,76	80,91	76,22	6,66
Medio Pb-Ag	238,77	23,88	1,87	0,97	44,65	23,16	4,54	4,62	
Relave	610,99	61,10	2,34	1,57	142,97	95,93	14,54	19,15	
Cabeza calculada			9,83	5,01	982,99	500,85			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 19 Prueba de 3 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	157,46	15,75	59,87	33,22	942,71	523,08	87,79	83,73	6,35
Medio Pb-Ag	244,12	24,41	2,33	1,37	56,88	33,44	5,30	5,35	
Relave	598,42	59,84	1,24	1,14	74,20	68,22	6,91	10,92	
Cabeza calculada			10,74	6,25	1073,80	624,75			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 20 Prueba de 4 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	160,33	16,03	55,67	30,41	892,56	487,56	83,69	79,11	6,24
Medio Pb-Ag	244,15	24,42	2,54	1,20	62,01	29,30	5,81	4,75	
Relave	595,52	59,55	1,88	1,67	111,96	99,45	10,50	16,14	
Cabeza calculada			10,67	6,16	1066,53	616,31			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 21 Prueba de 5 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	158,44	15,84	60,12	34,12	952,54	540,60	88,58	82,20	6,31
Medio Pb-Ag	256,32	25,63	2,37	1,53	60,75	39,22	5,65	5,96	
Relave	585,24	58,52	1,06	1,33	62,04	77,84	5,77	11,84	
Cabeza calculada			10,75	6,58	1075,32	657,65			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 22 Prueba de 6 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	140,39	14,04	55,75	31,66	782,67	444,47	86,16	79,32	7,12
Medio Pb-Ag	241,12	24,11	1,29	1,01	31,10	24,35	3,42	4,35	
Relave	618,49	61,85	1,53	1,48	94,63	91,54	10,42	16,34	
Cabeza calculada			9,08	5,60	908,41	560,36			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 23 Prueba de 7 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	158,45	15,85	63,45	39,33	1005,37	623,18	91,15	89,88	6,31
Medio Pb-Ag	251,13	25,11	2,57	1,03	64,54	25,87	5,85	3,73	
Relave	590,42	59,04	0,56	0,75	33,06	44,28	3,00	6,39	
Cabeza calculada			11,03	6,93	1102,97	693,33			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 24 Prueba de 8 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	148,73	14,87	56,41	32,15	838,99	478,17	87,06	82,98	6,72
Medio Pb-Ag	249,33	24,93	1,67	1,23	41,64	30,67	4,32	5,32	
Relave	601,94	60,19	1,38	1,12	83,07	67,42	8,62	11,70	
Cabeza calculada			9,64	5,76	963,69	576,25			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 25 Prueba de 9 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	148,22	14,82	53,22	29,85	788,83	442,44	82,62	75,48	6,75
Medio Pb-Ag	253,47	25,35	1,85	1,35	46,89	34,22	4,91	5,84	
Relave	598,31	59,83	1,99	1,83	119,06	109,49	12,47	18,68	
Cabeza calculada			9,55	5,86	954,78	586,15			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 26 Prueba de 10 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	154,77	15,48	53,66	23,15	830,50	358,29	83,32	73,70	6,46
Medio Pb-Ag	240,12	24,01	1,53	1,42	36,74	34,10	3,69	7,01	
Relave	605,11	60,51	2,14	1,55	129,49	93,79	12,99	19,29	
Cabeza calculada			9,97	4,86	996,73	486,18			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 27 Prueba de 11 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	152,46	15,25	57,44	34,16	875,73	520,80	85,21	80,73	6,56
Medio Pb-Ag	250,44	25,04	2,59	1,22	64,86	30,55	6,31	4,74	
Relave	597,10	59,71	1,46	1,57	87,18	93,74	8,48	14,53	
Cabeza calculada			10,28	6,45	1027,77	645,10			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 28 Prueba de 12 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	157,46	15,75	53,69	31,22	845,40	491,59	81,04	77,89	6,35
Medio Pb-Ag	258,30	25,83	3,11	1,15	80,33	29,70	7,70	4,71	
Relave	584,24	58,42	2,01	1,88	117,43	109,84	11,26	17,40	
Cabeza calculada			10,43	6,31	1043,17	631,13			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 29 Prueba de 13 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	160,27	16,03	60,55	31,14	970,43	499,08	88,42	78,79	6,24
Medio Pb-Ag	245,51	24,55	2,44	1,55	59,90	38,05	5,46	6,01	
Relave	594,22	59,42	1,13	1,62	67,15	96,26	6,12	15,20	
Cabeza calculada			10,97	6,33	1097,49	633,40			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 30 Prueba de 14 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	143,65	14,37	57,41	32,64	824,69	468,87	85,90	77,48	6,96
Medio Pb-Ag	244,11	24,41	1,23	1,22	30,03	29,78	3,13	4,92	
Relave	612,24	61,22	1,72	1,74	105,31	106,53	10,97	17,60	
Cabeza calculada			9,60	6,05	960,03	605,18			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 31 Prueba de 15 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	150,67	15,07	62,84	40,12	946,81	604,49	89,16	89,28	6,64
Medio Pb-Ag	258,77	25,88	3,01	0,98	77,89	25,36	7,33	3,75	
Relave	590,56	59,06	0,63	0,80	37,21	47,24	3,50	6,98	
Cabeza calculada			10,62	6,77	1061,91	677,09			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 32 Prueba de 16 del diseño

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Metálico		Recuperación		Ratio
			Pb (%)	Ag (Oz/TC)	Pb	Ag	Pb	Ag	
Cabeza	1000,00	100,00							
Bulk Pb-Ag	145,67	14,57	55,47	31,17	808,03	454,05	85,59	79,97	6,86
Medio Pb-Ag	251,33	25,13	1,96	1,67	49,26	41,97	5,22	7,39	
Relave	603,00	60,30	1,44	1,19	86,83	71,76	9,20	12,64	
Cabeza calculada			9,44	5,68	944,12	567,78			

Nota: El valor de las variables considerado en la prueba se muestra en la tabla 16.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

Tabla 33 Tabla de resultados

Orden	Bloques	pH	AR-3418 (g/TM)	AR-1242 (g/TM)	% Rec Pb	%Rec Ag
1	1	8	50	30	83,10	77,58
2	1	9,5	50	30	80,91	76,22
3	1	8	100	30	87,79	83,73
4	1	9,5	100	30	83,69	79,11
5	1	8	50	60	88,58	82,20
6	1	9,5	50	60	86,16	79,32
7	1	8	100	60	91,15	89,88
8	1	9,5	100	60	87,06	82,98
9	1	8	50	30	82,62	75,48
10	1	9,5	50	30	83,32	73,70
11	1	8	100	30	85,21	80,73
12	1	9,5	100	30	81,04	77,89
13	1	8	50	60	88,42	78,79
14	1	9,5	50	60	85,90	77,48
15	1	8	100	60	89,16	89,28
16	1	9,5	100	60	85,59	79,97

Nota: tabla con las recuperaciones obtenidas en cada prueba

Fuente: Elaborado por los tesistas

4.2.2. Anova de la recuperación de Pb

Habiendo procesado los datos, se llegó a obtener las siguientes tablas y las figuras, para posterior análisis e interpretaciones. La tabla del análisis de la varianza de los resultados de recuperación de Pb se detalla en la tabla 33.

Tabla 34 Anova de la recuperación de plomo

Fuente	GL	SC Ajust,	MC Ajust,	Valor F	Valor p
pH	1	31,248	31,248	17,79	0,001
AR-3418	1	8,526	8,526	4,85	0,048
AR-1242	1	73,702	73,702	41,95	0,000
Error	12	21,082	1,757		
Falta de ajuste	4	8,116	2,029	1,25	0,363
Error puro	8	12,966	1,621		
Total	15	134,558			

Nota: Según los valores de P se determina que variable es más influyente en el proceso que son las variables AR-1242 y pH por ser más cercanos a cero.

Fuente: Elaborado por los tesistas.

Tabla 35 Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
1,32544	84,33%	80,42%	72,15%

Nota: el R- cuadrado (ajustado) es muy prometedor.

Fuente: Elaborado por los tesistas.

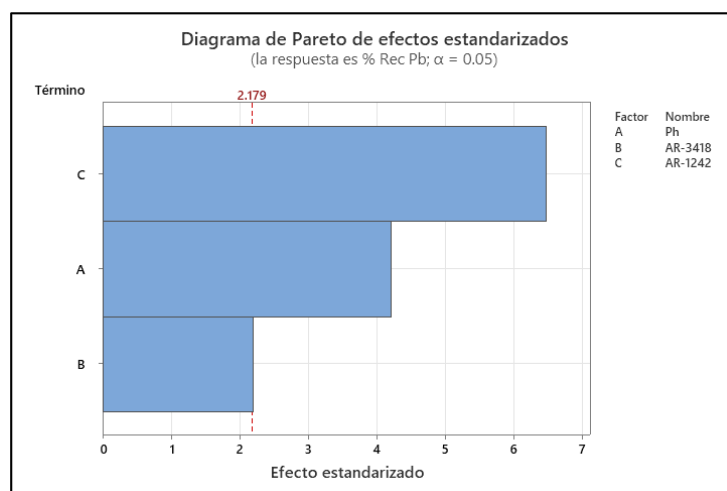
Tabla 36 Coeficiente de codificación

Término	Efecto	Coef	EE del coef,	Valor T	Valor p	FIV
Constante		85,606	0,331	258,35	0,000	
pH	-2,795	-1,398	0,331	-4,22	0,001	1,00
AR-3418	1,460	0,730	0,331	2,20	0,048	1,00
AR-1242	4,293	2,146	0,331	6,48	0,000	1,00

Nota: el valor más significativo es el de AR-1242.

Fuente: Elaborado por los tesistas.

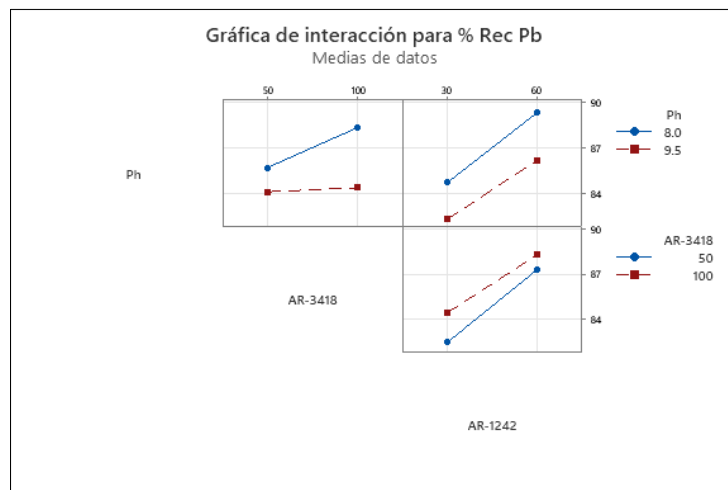
Figura 17 Diagrama de Pareto para la recuperación de Pb



Nota: Con un efecto estandarizado 2,179 como base, *Fuente* Elaborado por los tesistas.

El gráfico de Pareto de la figura 17 representa el orden de influencia de las variables independientes y sus interacciones, demostrando que la variable AR-1242 es más significativo para recuperar Pb-Ag, seguido de las variables pH y AR-3418.

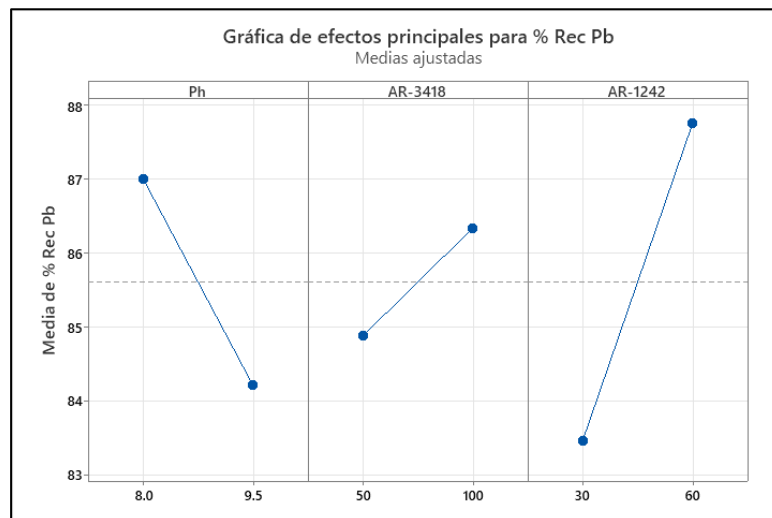
Figura 18 Grafica de interacciones



Nota: mientras el diagrama de Pareto muestra cuales de las variables son las más importantes, la gráfica de interacción muestra visualmente cómo se comportan juntas, ilustra de forma didáctica el efecto de los colectores AR-1242 y AR-3418 a un Ph 8 a 9.5

Fuente: Elaborado por los tesisistas

Figura 19 Gráficos factoriales para la recuperación de Pb

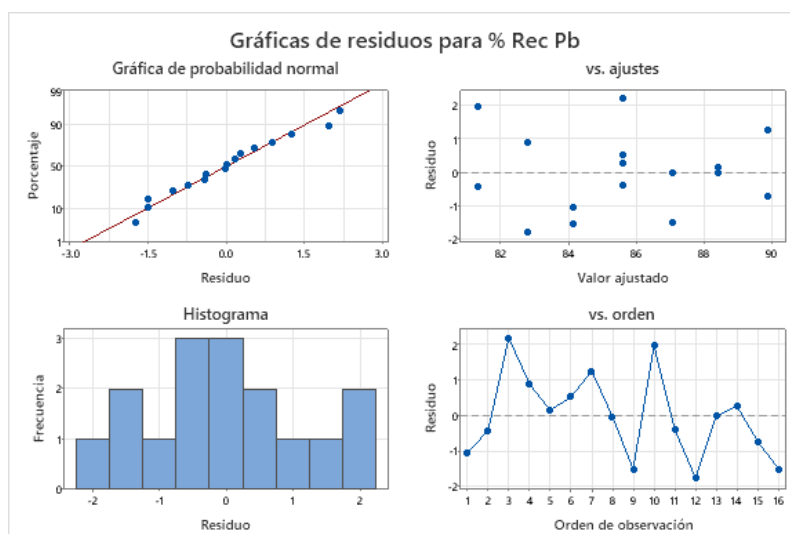


Nota: Considerando el rango de valores de las tres variables,

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

La gráfica factorial de la figura 18 representa la influencia de las variables independientes estudiadas, sobre la recuperación de Pb, observándose que, al incrementar la alcalinidad de la pulpa, los valores de recuperación disminuyen, de lo contrario, el aumento de la dosificación de colectores aumenta la recuperación de Pb.

Figura 20 Gráficos de diagnóstico de residuos “4 en 1”



Nota: esta grafica demuestra que el modelo matemático está plenamente valido y estadísticamente confiable

Fuente: Elaborado por los tesisistas

a) Ecuación de regresión de primer orden

Como resultado del desarrollo experimental se ajustó un modelo matemático que predice la recuperación de Pb en función de las variables independientes estudiadas, tal y como se describe en la ecuación

$$\% \text{ Rec Pb} = 93,28 - 1,863 \text{ Ph} + 0,0292 \text{ AR-3418} + 0,1431 \text{ AR-1242}$$

Cuando se realizó la regresión con los valores no codificados, se obtiene un modelo matemático de primer orden, resultando que la constante del modelo matemático es positiva (93,28) que viene a ser el promedio del vector respuesta, el valor positivo indica que se encuentra en el mínimo, y se debe maximizar hasta el óptimo tomando en cuenta el factor con mayor significancia.

4.2.3. Optimización de las variables del proceso de flotación Pb-Ag

Se programó la optimización de las variables independientes en el software estadístico Minitab 19, determinando los valores óptimos de las variables estudiadas

que se representan en la tabla 41, así también, la figura 20 representa el gráfico de optimización de las variables.

Tabla 37 Parámetros

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
% Rec Pb	Máximo	80,91	91,15		1	1
%Rec Ag	Máximo	73,70	89,88		1	1

Nota: el objetivo es alcanzar 91,15 % de recuperación de Pb

Fuente: Elaborado por los tesisistas

Tabla 38 Datos considerados para la optimización

Solución	pH	AR-3418	AR-1242	% Rec Pb Ajuste	%Rec Ag Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	8	100	60	89,88	89,58	0,927219

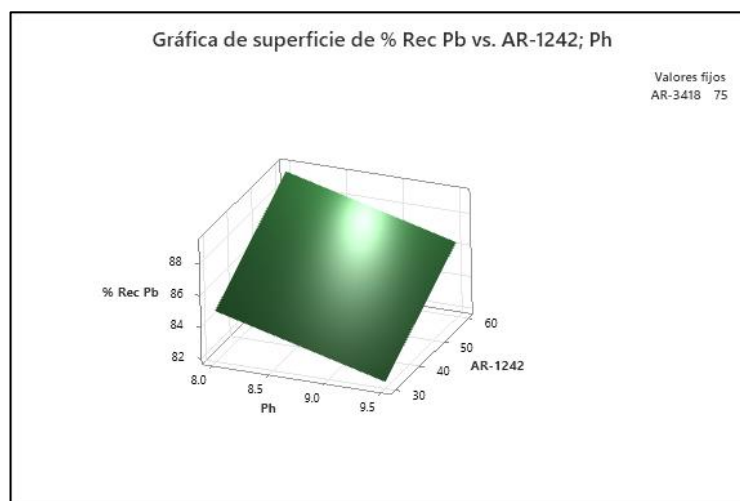
Nota: Considerando los valores de la mejor prueba de flotación.

El modelo estadístico confirma que las condiciones son muy cercanas al óptimo experimental que se obtuvo en las pruebas reales (Pb = 91,15 % y Ag = 89,88 %) La diferencia entre los valores experimentales y los valores “ajustados” se debe a que el modelo suaviza las curvas y calcula un promedio esperado, no reproduce exactamente cada dato observado.

La deseabilidad compuesta (0,927) indica que el modelo considera este punto como altamente favorable para maximizar ambas respuestas al mismo tiempo (cercano a 1, que es el valor ideal).

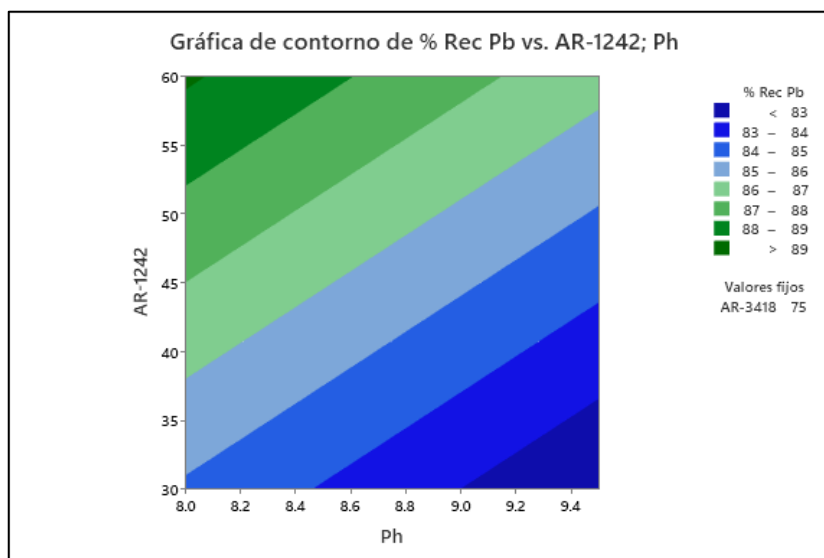
Fuente: Elaborado por los tesisistas

Figura 21 Gráfica de superficie



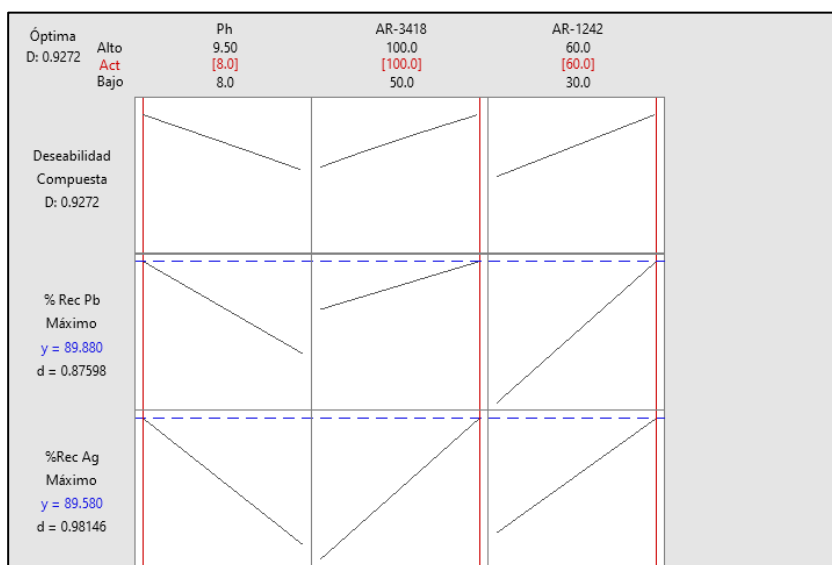
Nota: Esta gráfica te permite observar en tres dimensiones el comportamiento simultáneo del pH y la dosificación del colector AR-1242 sobre el porcentaje de recuperación de plomo, *Fuente:* Elaborado por los tesisistas

Figura 22 Grafica de contorno



Nota: Esta grafica de contorno 2D delimita visualmente el rango de trabajo seguro para Matucana, *Fuente:* Elaborado por los tesisistas

Figura 23 Optimización del proceso de flotación Pb-Ag



Nota: Considerando el rango de valores de las tres variables operativas, *Fuente:* Elaborado por los tesisistas

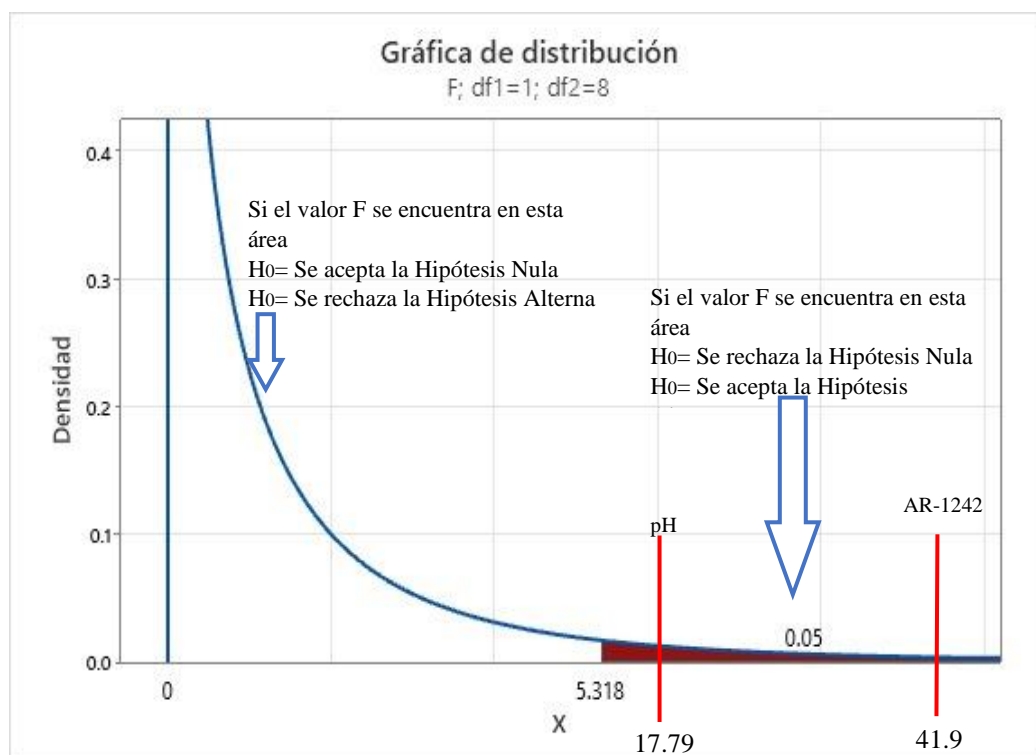
4.3. Prueba de hipótesis

- **Hipótesis nula H_0 :** La Optimización del proceso de flotación de minerales sulfurados no influye en la recuperación de Pb-Ag en Matucana – Lima – 2024
- **Hipótesis alterna H_a :** La Optimización del proceso de flotación de minerales sulfurados influye en la recuperación de Pb-Ag en Matucana – Lima – 2024
- **Significancia:** $\alpha = 0,05$

En el momento que se realizó el análisis en la muestra, los balances metalúrgicos y la influencia de los colectores evaluados para la recuperación de Pb – Ag; tal como; se indica en la Tabla 33, se afirma que el valor P (0,00; 0,001) para AR-1242 y pH respectivamente, al ser menor al 5% prefijado.

Se rechaza la hipótesis nula (H_0), porque indica que la Optimización del proceso de flotación de minerales sulfurados no influye en la recuperación de Pb-Ag en Matucana – Lima - 2024; y se acepta la hipótesis alterna (H_a) indicando que la Optimización del proceso de flotación de minerales sulfurados influye en la recuperación de Pb-Ag en Matucana – Lima – 2024.

Figura 24 Gráfica de distribución



Nota: distribución F para ratificar la tabla 12.

Fuente: Elaborado por los tesisistas.

4.4. Discusión de resultados

Los análisis mediante microscopía óptica de luz reflejada revelaron que la muestra de mineral de cabeza de Matucana posee una concentración de 12.32% de galena (PbS) y 0.08% de plata nativa (Ag). El estudio mineralógico determinó un

escenario sumamente favorable para la flotación, dado que el 93.90% de las especies de galena se identificaron en estado libre, mientras que la plata nativa exhibió un 50% de grado de liberación. Este elevado grado de liberación inicial explica por qué, incluso en las pruebas granulométricas preliminares, se alcanzaron eficientemente concentraciones y recuperaciones elevadas. No obstante, la presencia de partículas binarias complejas y enlaces del tipo galena-pirita (gn-py) con un 0.38% de volumen, galena-gangas (gn-GGs) con un 0.75%, y sobre todo el intercrecimiento triple de galena-pirita-gangas (Gn-Py-GGs) con un 0.75% de volumen, justificó la necesidad de definir una molienda controlada y un esquema riguroso de reactivos. Esto evitó que las especies valiosas se perdieran en el relave asociadas a la pirita o a la roca estéril (gangas).

Durante la evaluación de la molienda preliminar, se demostró que el tamaño de partícula óptimo se sitúa en una distribución de 55.85% -Malla 200. Bajo esta condición granulométrica, se obtuvo un balance metalúrgico preliminar sobresaliente con recuperaciones de 83.89% de Pb y 88.23% de Ag, y leyes de concentrado bulk de 60.14% de Pb y 38.75 Oz-Ag/TC. Al contrastar estos datos con las pruebas a moliendas más finas (65% y 70% -Malla 200), se observó un decremento en la eficiencia metalúrgica:

- ✓ A 65% -Malla 200, la recuperación de plomo cayó a 79.24% y la de plata a 67.74%.
- ✓ A 70% -Malla 200, las recuperaciones disminuyeron aún más, alcanzando 77.42% de Pb y 66.08% de Ag.

A través del Diseño de Experimentos (DOE) y el análisis de varianza (ANOVA) procesado en Minitab 19, se determinó el impacto individual e interactivo del pH y de los colectores AR-3418 y AR-1242.

- ✓ El Colector AR-1242: El ANOVA demostró que la dosificación del colector AR-1242 fue el factor con mayor porcentaje de contribución sobre la recuperación de Pb y Ag, además de tener una contribución del 35.10% directamente sobre la ley (calidad) de Pb en el concentrado. Esto comprueba que el AR-1242 actúa de forma altamente selectiva sobre las fracciones argentíferas y plomosas de la pulpa.
- ✓ El pH y el Colector AR-3418: Contribuyeron significativamente con el 33.54% y el 20.84% respectivamente en la recuperación de plomo.

La Prueba N° 7 del diseño experimental validó físicamente estas interacciones en el laboratorio, obteniendo resultados reales extraordinarios: una recuperación de 91.15% de Pb y 89.88% de Ag, con una ley de concentrado de 63.45% de Pb y 39.33 Oz-Ag/TC. El modelo matemático de optimización multivariable de Minitab predice que las condiciones ideales de operación se consolidan a un pH moderado de 8.0, utilizando 100 g/TM del colector AR-3418 y 60 g/TM del colector AR-1242. Este punto óptimo proyecta valores de recuperación teórica de 89.88% de Pb y 89.58% de Ag (con leyes estimadas de 63.15% de Pb y 39.73 Oz-Ag/TC). La mínima discrepancia entre el óptimo experimental de la Prueba 7 y el óptimo matemático ajustado se atribuye a que el software suaviza las curvas de respuesta para calcular un promedio probabilístico esperado, lo cual ratifica la consistencia científica y la alta confiabilidad del diseño estadístico para ser escalado a nivel de planta industrial.

4.4.1. Contraste de resultados:

Al comparar la presente investigación con los antecedentes nacionales e internacionales, se constata la superioridad y selectividad del esquema de reactivos propuesto para Matucana:

Contraste con (Diaz Valverde, 2023): En su investigación en la zona Alto Andina del Perú con un mineral polimetálico complejo de cabeza de 1.228% de Pb y

3.226 Oz/TC de Ag, logró recuperaciones de 83.29% de Pb y 83.67% de Ag operando con un pH marcadamente alcalino de 11.10 y utilizando una mezcla de AP-3418, AR-404 y AR-242. Nuestros resultados (91.15% Pb y 89.88% Ag) superan su performance metalúrgico. Esto se debe a que trabajar a un pH moderado de 8.0 evita la sobredepresión de la galena que suele ocurrir en medios extremadamente alcalinos, y a que la combinación específica de AR-3418 y AR-1242 resultó sumamente más selectiva para la mineralogía específica de Matucana.

Contraste con (Demetrio Tapia Ajata, 2012): En su estudio en la mina Poopó (mineral complejo de zinc-plata-plomo), donde se evaluó el colector AEROPHINE 3418 a nivel de planta y laboratorio, reportó recuperaciones de plata de apenas 42.32% en el concentrado de plomo debido a la extrema complejidad del zinc. En comparación, el mineral de Matucana, al no presentar una interferencia crítica de sulfuros de zinc complejos en la cabeza y al usar de manera sinérgica el colector AR-1242, permitió elevar la recuperación de plata a casi un 90%.

CONCLUSIONES

- ❖ La microscopía óptica de luz reflejada de una muestra representativa identificó las especies minerales de galena, plata nativa, pirita, pirrotita, goethita, ilmenita y gangas, Las especies de galena se identificaron ocupando un volumen de 12,32 % y 93,90 % de las especies se observaron cómo libres, y con respecto a la plata nativa, esta se observó ocupando un volumen de 0,08% y 50 % de grados de liberación, Así también, se identificaron los enlaces de partículas binarias de gn-Ag, gn-py, y gn-GGs, ocupando volúmenes de 0,15%, 0,38%, y 0,75%, respectivamente, además se pudo observar un enlace triple del tipo Gn-Py-GGs ocupando un volumen de 0,75%.
- ❖ El ANOVA de la recuperación de Pb determinó la mayor contribución de la dosificación de reactivos AR-1242, lo cual demostró la sensibilidad de la variable respuesta a la dosificación de dicho reactivo, así también, las variables de dosificación de AR-3418 y pH, contribuyeron con un valor de 20,84% y 33,54%, respectivamente, Así también, el ANOVA de la ley de Pb determinó la mayor contribución de la dosificación de reactivo AR-1242 con un valor de 35,10% de contribución.
- ❖ Las optimizaciones de las variables independientes fueron: pH=8, 100g/TM de AR-3418, y 60 g/TM de AR-1242, pronosticando valores de recuperación de 89,88% de Pb y 89,58% de Ag, con un grado de 63,15 % de Pb y 39,73 Oz-Ag/TC. lo que demuestra la consistencia del modelo y su aplicabilidad en la operación industrial. La diferencia entre los valores experimentales y los valores “ajustados” se debe a que el modelo suaviza las curvas y calcula un promedio esperado, sin reproducir exactamente cada dato observado, lo cual es propio de los métodos estadísticos de predicción.
- ❖ Los resultados evidencian que la combinación de pH moderado (≈ 8) y dosificación balanceada de AR-1242 y AR-3418 maximiza la recuperación y calidad del concentrado Pb-Ag, alcanzando valores superiores a los reportados en otros contextos nacionales e

internacionales. La comparación con los antecedentes confirma que, aunque las condiciones mineralógicas y operativas varían, el papel de los colectores y el control del pH son factores universales en la optimización de la flotación de sulfuros metálicos.

RECOMENDACIONES

- ❖ Realizar pruebas de flotación a nivel de pilotaje para recuperar Pb-Ag y ajustar las variables optimizadas.
- ❖ Realizar pruebas de diseños experimentales evaluando la influencia de variables como la dosificación y tipo de espumante, % de sólidos, flujo de aire, entre otras.
- ❖ Realizar pruebas de flotación empleando colectores de tipo xantato, las cuales ofrecen la ventaja por ser más baratos.
- ❖ Realizar la evaluación económica del proceso propuesto, para determinar la rentabilidad del procesamiento de estos tipos de yacimientos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Apaza, E, (2017), *Estudio microscópico de mineral y aplicación de dióxido de carbono como modificador de Ph en flotación plomo-plata, Empresa Minera Bateas, Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.*
- Azañero, A, (2015), *Flotación y concentración de minerales*, Lima: Colecciones Jóvic,
- Benites, J, (2022), *Análisis de las propiedades del concreto $f'c=175$ Kg/cm² adicionando fibras naturales del Maguey para uso peatonal Matucana - Lima 2021*, Lima: Universidad César Vallejo.
- Caballero Matos, Y., & Arellan Mayta, , E, (2014), *Evaluación del Circuito de Plomo en Minera Huinac S,A,C*, Huacho: Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión,
- Canchanya Ramos, A, D., & Yance Ambrosio, N, (2019), *Selección del Método de Flotación Separación cobre/plomo de Acuerdo a la Caracterización Geometalúrgica del Concentrado Bulk en la Planta Concentradora Ana Maria Compañía Minera Brexia Goldplata Peru S,A,C*, Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Pru,
- Chirif, H, (2010), *Microscopía Óptica de Minerales, Boletín N° Serie J, Tópicos de Geología*, Lima, Perú: INGEMMET,
- Cisneros, E., & Tito, I, (2021), *Diseño Vial Adicionando Desechos de Concreto en la Subrasante del Pavimento Flexible de la Carretera Central, Chosica – Matucana, Lima 2021*, Lima: Universidad César Vallejo,
- Cornelis, K., & Cornelius, H, (2018), *Manual de mineralogía* (Cuarta ed., Vol, II), Barcelona, España: Editorial Reverté,
- Cortez Villa, C, (2019), *Flotación de Zinc sin el Uso de Cal para la Recuperación de Concentrado de Zinc, en la Unidad de Producción Andaychagua - Compañía*

- Minera Volcan S,A,A, -2019, Cerro de Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión,*
- De la Rosa, J, (2013), *Flotación selectiva de minerales sulfuros de plomo-zinc en presencia de reactivos naturales del tipo Quebracho*, Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México,
- Fenoll, P, (2002), *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, Madrid: Sociedad Española de Mineralogía,
- García, R, (2012), *Evaluación por modelación CFD del proceso de flotación en una celda de agitación mecánica y del efecto de la granulometría en la recuperación de mineral*, Santiago de Chile: Universidad de Chile,
- Higidio, J, (2018), *Proceso de flotación por espuma y su influencia en el aumento de la recuperación del concentrado de zinc y plomo, unidad minera Andaychagua de Volcan compañía minera S,A,A - Junin 2016*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional José Faustino Sanchez Carrión, Huacho,
- Huallpa, M, (2018), *Concentración por flotación de minerales sulfurados: plata, plomo, cobre, zinc y oro en minerales polimetálicos*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Retrieved from https://repositorio.uni.edu.pe/bitstream/20,500,14076/13255/1/huallpa_am.pdf
- Madrid, I, (2005), *Efecto de iones calcio, pH, tamaño de partícula y colectores no polares en la flotabilidad de molibdenita*, Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Potosí,
- Manzaneda, J, (2010), *Aplicación de microscopía en el procesamiento de minerales por flotación*, Lima: Universidad Nacional de Ingeniería,
- Marin, K, (2019), *Análisis microscópico de minerales para la identificación de componentes mineralógicos*, Huacho: Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión,

- Merino Valenzuela, P, F, (2019), *Flotación de Cobre Soluble en Planta Concentradora, Division Salvador-Codelco*, Concepción: Universidad de Concepción ,
- Moreno, H., & Ibáñez, S, (2018), *La escala de Mohs, dureza de los minerales*, Valencia: Universitat Politècnica de València,
- Murciego, A, (2016), *Manual básico de reconocimiento macroscópico de algunos minerales y rocas*, Castilla y León: Escuela Politécnica Superior de Zamora,
- Nesse, W, (2012), *Introduction to mineralogy*, New York: Oxford University Press,
- Ramos Samanez, J, C., & Orihuela Gutiérrez, A, (2017), *Caracterización y Evaluación de Pruebas Metalúrgicas de Flotación de un Mineral Complejo Polimetálico del Distrito de Palca-Huancavelica*, Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos,
- Reinoso, J, (2019), *Determinación de los parámetros operacionales para la concentración de oro en un espiral*, Cuenca: Universidad del Azuay,
- Sandoval Lara, P, A, (2020), *Propuesta Técnica para el Procesamiento Mineral Polimetálico Proveniente de la Región de Coquimbo* , Concepción: Universidad Andrés Bello,
- Song, B, D, (2021), Electronic structure and flotation behavior of Ag-bearing galena, *Journal of Alloys and Compounds*, 868,
- Tobón, C, (2013), *Estudio de la Hidrofobicidad de oro nativo y su efecto en la Flotación espumante directa*, Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín,
- Troncoso, C., & Suárez, A, (2017), Control del Nivel de Pulpa en un Circuito de Flotación Utilizando una Estrategia de Control Predictivo, *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 14(3), 234-245, doi:10.1016/j.riai.2017.04.003
- Vera, C, (2019), *Evaluación del efecto de nuevos reactivos colectores y depresores para mejorar la recuperación del proceso de flotación en los circuitos de plomo y zinc de*

la planta concentradora Antonio Raymondi, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa,

Vila, C, (2011), *Estudio del efecto del pH sobre el potencial de la pulpa y flotación de minerales sulfurados en la planta concentradora Chumpe de la CIA, Minera Corona S,A*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo,

Villalta, V, (2022), *Análisis de la optimización de los parámetros y factores que afectan la flotación de la molibdenita en la planta de molibdeno en la concentradora Cuajone*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa,

Zhang, Y, C, (2021), Sulfidizing behavior of complex lead-silver ore: A flotation study, *Minerals* , 11(4),

ANEXOS

Anexo N° 1: ley de cabeza



H&F LABORATORIOS SAC
DESDE 1999

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

REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO

Solicitante : JOHANN CALZADA - ARACELI ARIVILCA
Tipo de Muestra : MINERAL
Procedencia : -
Fecha de Recepción : 29 de marzo del 2024
Referencia : H&F 114 /2024

DENOMINACIÓN DE MUESTRA:	RESULTADOS DE ANÁLISIS	
	Pb %	Ag Oz/Tc
Mineral	10.25	5.27

Lima, 05 de abril del 2024

H&F LABORATORIOS SAC
SERVICIOS ANALITICOS

ALBINO HUAYTALLA M.
GERENTE GENERAL

Anexo N° 2: Mejor prueba granulométrica



H&F LABORATORIOS SAC
DESDE 1999

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

REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO

Solicitante : JOHANN CALZADA - ARACELI ARIVILCA
Tipo de Muestra : Mejor prueba de evaluación de la granulometría
Procedencia : -
Fecha de Recepción : 30 de marzo del 2024
Referencia : H&F 114 /2024

DENOMINACIÓN DE MUESTRA:	RESULTADOS DE ANÁLISIS	
	Pb %	Ag Oz/TC
Mejor prueba de eval. de la granulometría		
- Bulk Pb-Ag	60.14	38.75
- Medio Pb-Ag	3.16	0.95
- Relave	1.72	0.97

Lima, 05 de abril del 2024

H&F LABORATORIOS SAC
SERVICIOS ANALÍTICOS

ALBINO HUAYTALLA M.
GERENTE GENERAL



Anexo N° 3: preparación de reactivos

Fuente: Elaborado por los tesistas



Anexo N° 4: Dosificación de reactivos

Fuente: Elaborado por los tesistas



Anexo N° 4: acondicionamiento de la pulpa

Fuente: Elaborado por los tesistas



Anexo N° 4: recolección de burbujas cargadas

Fuente: Elaborado por los tesistas



Anexo N° 4: pruebas de laboratorio

Fuente: Elaborado por los tesistas