



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

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

Evaluación de la mineralización en el contacto argílico - caliza para mejorar la recuperación de cobre y oro, en el norte del Perú

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Geometalurgia

AUTOR

Julio Cesar CHIMBOR ESQUIVEL

ASESOR

Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

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

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

Referencia bibliográfica

Chimbor, J. (2026). *Evaluación de la mineralización en el contacto argílico - caliza para mejorar la recuperación de cobre y oro, en el norte del Perú*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Julio Cesar Chimbor Esquivel
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	80639115
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0005-5624-7306
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08608364
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-5818-8569
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Enrique Guadalupe Gómez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09191995
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Jesús Alberto Torres Guerra
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07219691
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Luis Américo Rivera Del Valle
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10647742
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.0.4.17. Flotación de Minerales C.0.1.7. Mineralogía y Petrología
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	Sin Financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Cajamarca Provincia: Hualgayoc Distrito: Hualgayoc Dirección: Paraje Coimolache 9045, Sector Predio La Jalca Latitud: -6.76556 Longitud: -78.6119
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2021 - 2026
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento De Minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05 Mineralogía: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.02





Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, DR. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la **UPG** N° 000233-2025-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es **«EVALUACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN EN EL CONTACTO ARGÍLICO - CALIZA PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE COBRE Y ORO, EN EL NORTE DEL PERÚ»**, presentado por el **bachiller** JULIO CESAR CHIMBOR ESQUIVEL, para optar el grado académico de MAGISTER EN GEOMETALURGIA, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **12 %** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado académico de MAGISTER EN GEOMETALURGIA.

Lima, 30 de Abril de 2026

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: Vidal Sixto Aramburú Rojas

DNI: 08608364

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

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

ÍNDICE



.....	I
ACTA DE SUSTENTACIÓN	II
ÍNDICE	III
DEDICATORIA	VII
AGRADECIMIENTOS.....	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	X
NOMENCLATURA	XI
LISTA DE TABLAS	XII
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE FIGURAS DE ANEXOS.....	XVI
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Situación problemática	1
1.2. Formulación del problema	2
1.2.1. Problema general	3
1.2.2. Problemas específicos	3
1.3. Justificación	3
1.3.1. Justificación teórica.....	4
1.3.2. Justificación práctica.....	5
1.4. Objetivos.....	7
1.4.1. Objetivo general.....	7
1.4.2. Objetivos específicos	7

1.5.	Hipótesis de la investigación	7
1.5.1.	Hipótesis general	7
1.5.2.	Hipótesis específicas	7
1.5.3.	Matriz de consistencia	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO		10
2.1.	Marco epistemológico	10
2.2.	Antecedentes de estudio	11
2.2.1.	Antecedentes internacionales	11
2.2.2.	Antecedentes nacionales	14
2.3.	Bases teóricas.....	15
2.3.1.	Geología General o Regional.....	15
2.3.2.	Geología de la Mina.....	16
2.3.3.	Definición del contacto argílico-caliza.....	17
2.3.4.	Composición mineralógica y asociación de minerales... 19	
2.3.5.	Efecto de la mineralogía sobre la recuperación de cobre y oro	19
2.3.6.	Importancia de la caracterización mineralógica	20
2.3.7.	Consideraciones metalúrgicas en yacimientos del norte del Perú.....	21
2.3.8.	Resumen geológico del tajo de Cerro Corona	21
2.3.9.	Dominios geológicos.....	23
2.3.10.	Alteraciones	24
2.3.11.	Aspecto geométrico futuro del tajo Cerro Corona	24
2.3.12.	Flotación de sulfuros de cobre.....	28
2.3.13.	Sulfuros de cobre y cobre-oro.....	31

2.3.14. Clasificación de los reactivos	33
2.3.15. Mineralogía automatizada: QEMSCAN	37
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	39
3.1. Tipo y diseño de la investigación	39
3.2. Variables de la investigación	40
3.2.1. <i>Variable independiente</i>	40
3.2.2. <i>Variable dependiente</i>	40
3.2.3. <i>Matriz de operacionalización de variables</i>	40
3.3. Unidad de análisis	42
3.4. Población y muestra	42
3.4.1. Población	42
3.4.2. Muestra	42
3.4.3. Selección de la muestra – muestreo	43
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	43
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1. Resultados	46
4.1.1. Análisis químico y mineralógico del mineral	46
4.1.2. Caracterización del mineral-identificación de fases minerales	47
4.1.3. Resultados de flotación selectiva	60
4.2. Análisis, interpretación y discusión de resultados	78
4.2.1. Análisis químico y mineralógico del mineral	78
4.2.2. Caracterización mineralógica y textural del mineral	79
4.2.3. Interpretación de pruebas metalúrgicas de flotación cobre-oro	81
Análisis e interpretación de la información	81

4.2.4. Análisis de la distribución del oro en el concentrado final	
.....	87
CONCLUSIONES.....	88
RECOMENDACIONES	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
ANEXOS	97
A.1. Soporte mineralógico y geoquímico de la asociación del oro.....	97

DEDICATORIA

A Dios, por brindarme fortaleza en los momentos de incertidumbre y por permitirme alcanzar esta etapa de mi vida.

A la familia Chimbor Esquivel, por ser un pilar fundamental en este camino.

Gracias por su apoyo incondicional, por las palabras de aliento en los momentos más difíciles y por brindarme siempre un espacio de cariño, confianza y fortaleza.

Esta meta también es suya.

AGRADECIMIENTOS

En este apartado quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que, de una u otra manera, hicieron posible la culminación de este trabajo de tesis.

A la **familia Chimbor Esquivel**, por ser un sostén invaluable en cada etapa de este proceso. Gracias por su apoyo constante, su confianza y el aliento que me brindaron incluso en los momentos más difíciles. Su presencia ha sido fundamental para alcanzar esta meta.

A la **Universidad Nacional Mayor de San Marcos**, mi alma mater, por brindarme una formación académica de calidad, por fomentar el pensamiento crítico y por permitirme crecer no solo como profesional, sino también como persona.

A todos los **profesores y profesoras** que me acompañaron a lo largo de estos años de formación, gracias por compartir su conocimiento, su experiencia y su pasión por la enseñanza. Cada clase, cada consejo y cada exigencia académica han dejado una huella significativa en mi trayectoria.

En especial, al asesor **Dr. Vidal Sixto Aramburú Rojas**, por su guía experta, su paciencia y su compromiso durante la elaboración de esta tesis. Su orientación fue clave para mantener el rumbo, superar obstáculos y alcanzar los objetivos planteados. Gracias por su dedicación y por confiar en mi trabajo.

A todos los que de alguna forma contribuyeron a este logro, mi más sincero reconocimiento y gratitud.

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo principal evaluar el comportamiento metalúrgico del mineral procedente del contacto entre una zona de alteración argílica y unidades calizas, con el fin de optimizar el proceso de flotación selectiva para la recuperación de cobre (Cu) y oro (Au). El estudio abarca la caracterización química, mineralógica y metalúrgica del material, así como la determinación de las mejores condiciones operativas para maximizar la recuperación de estos metales.

Mediante la investigación se evaluó el efecto del pH y la influencia de las variables operacionales como el porcentaje de sólidos y tiempo de flotación en la recuperación de cobre y oro a través de un diseño factorial 2^2 . Se realizaron ensayos experimentales de flotación a escala de laboratorio, variando los niveles de las dos variables para analizar su efecto individual y combinado sobre las recuperaciones metálicas.

Los resultados demostraron que El tiempo de flotación constituye el factor más influyente sobre la recuperación de cobre, mientras que con el apoyo del diseño factorial, el porcentaje de sólidos mostró un efecto más significativo en la recuperación del oro.

El mejor rendimiento metalúrgico se alcanzó con un pH de 10.5, un porcentaje de sólidos de 35 % y un tiempo de flotación de 12 minutos, logrando recuperaciones de 87.27% para el cobre y 54.64% para el oro. Estos resultados confirman la utilidad del diseño factorial como herramienta eficaz para optimizar procesos metalúrgicos y comprender la interacción entre las variables.

PALABRA CLAVE: flotación, recuperación de cobre y recuperación de oro.

ABSTRACT

This thesis aims to evaluate the metallurgical behavior of ore extracted from the contact zone between argillic alteration and limestone units, with the objective of optimizing the selective flotation process for the recovery of copper (Cu) and gold (Au). The study includes chemical, mineralogical, and metallurgical characterization of the ore, as well as the determination of optimal operating conditions to maximize metal recovery.

The research evaluated the effect of pH and the influence of operational variables such as percent solids and flotation time on the recovery of copper and gold through a 2^2 factorial design. Experimental flotation tests were conducted at a laboratory scale, varying the levels of the two variables to analyze their individual and combined effects on metal recoveries.

The results demonstrated that flotation time is the most influential factor in copper recovery, while, supported by the factorial design, the percent solids showed a more significant effect on gold recovery. Flotation time, although relevant, exhibited a moderate impact compared to the other factors.

The best metallurgical performance was achieved at a pH of 10.5, 35% solids, and a flotation time of 12 minutes, resulting in recoveries of 87.27% for copper and 54.64% for gold. These results confirm the usefulness of the factorial design as an effective tool for optimizing metallurgical processes and understanding the interaction between variables.

KEYWORD: Flotation, copper recovery and gold recovery.

NOMENCLATURA

NW-SE	Northwest-Southeast (Noroeste-Sureste)
IOCG	Iron Oxide Copper–Gold
%Ac(-)	Porcentaje acumulado pasante
%Ac(+)	Porcentaje acumulado retenido
°C	Grados centígrados
µm	micra o micrómetro
qz	cuarzo
cpy	calcopirita (CuFeS ₂ , mineral de cobre)
py	pirita (FeS ₂)
spec	Especularita (una variedad de hematita, Fe ₂ O ₃)
mag	Magnetita (Fe ₃ O ₄)
Apy	Arsenopirita
g/TM	Gramo por tonelada métrica
GGs	Gangas no opacas
Oz/TC	Onza por tonelada corta
BMA	Bulk Mineral Analysis
PMA	Particle Mineral Analysis

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	9
Matriz de consistencia.....	9
Tabla 2	32
Menas que presentan contenidos de cobre-oro.....	32
Tabla 3	36
Reactivos para la flotación de cobre-oro.....	36
Tabla 4	39
Clasificación y niveles de la investigación.....	39
Tabla 5	41
Operacionalización de Variables.....	41
Tabla 6	45
Matriz de instrumentos.....	45
Tabla 7	46
Resultados del análisis químico de cabeza para realizar las pruebas de flotación.....	46
Tabla 8	51
Caracterización mineralógica.....	51
Tabla 9	52
Distribución volumétrica porcentual del mineral en estudio	52
Tabla 10	53
Mineralogía modal (BMA)	53
Tabla 11	60
Condiciones de operación para el proceso de flotación de cobre-oro.....	60
Tabla 12	63
Balance metalúrgico de flotación Cu-Au a un pH de 9	63

Tabla 13	63
Balance metalúrgico de flotación Cu-Au a un pH de 9.5	63
Tabla 14	64
Balance metalúrgico de flotación Cu-Au a un pH de 10	64
Tabla 15	64
Balance metalúrgico de flotación Cu-Au a un pH de 10.5	64
Tabla 16	66
<i>Factores y Niveles</i>	66
Tabla 17	66
<i>Matriz de Codificación Real para las 4 Condiciones</i>	66
Tabla 18	67
Balance metalúrgico de flotación Cu-Au: 28% sólidos, 9 min flotación.....	67
Tabla 19	67
Balance metalúrgico de flotación Cu-Au: 35% sólidos, 9 min flotación.....	67
Tabla 20	68
Balance metalúrgico de flotación Cu-Au: 28% sólidos, 12 min flotación.....	68
Tabla 21	68
Balance metalúrgico de flotación Cu-Au: 35% sólidos, 12 min flotación.....	68
Tabla 22	69
Tabla de condiciones y resultados de pruebas metalúrgicas realizadas	69
Tabla 23	69
Respuestas: Recuperación de cobre (%) y Recuperación de oro (%)	69
Tabla 24	74
Coeficientes para la recuperación de cobre (Cu)	74

Tabla 25	75
Modelo de regresión lineal para la recuperación de cobre (Cu)	75
Tabla 26	75
ANOVA para la recuperación de cobre (Cu).....	75
Tabla 27	76
Coeficientes para la recuperación de oro (Au).....	76
Tabla 28	76
Modelo de regresión lineal para la recuperación de oro (Au).....	76
Tabla 29	76
ANOVA para la recuperación de oro (Au)	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Tajo cerro corona, muestra las tres zonas mineralizadas</i>	23
Figura 2 <i>Sección geológica, muestra las zonas y los dominios de mineralización</i>	27
Figura 3 <i>Procedimiento de la tecnología QEMSCAN</i>	38
Figura 4 <i>Principales asociaciones de oro Muestra de cabeza</i>	47
Figura 5 <i>Asignación de colores por mineral. Lectura QEMSCAN usando la función SMS (Specific Mineral Search)</i>	54
Figura 6 <i>Principales asociaciones de los minerales de Au</i>	54
Figura 7 <i>Ocurrencia de minerales Cu. Análisis cuantitativo y cualitativo(BMA y PMA)</i>	55
Figura 8 <i>Asociaciones vs liberación de la calcopirita en la muestra de cabeza</i>	57
Figura 9 <i>Asociaciones vs liberación de la calcopirita en la muestra de Relave CST</i> ...	58
Figura 10 <i>Asociaciones vs liberación de la calcopirita en la muestra de Relave RST</i>	59
Figura 11 <i>Curva de moliendabilidad del mineral argílico-caliza</i>	61
Figura 12 <i>Efecto del pH vs la recuperación de cobre</i>	65
Figura 13 <i>Efecto del pH vs la recuperación de oro</i>	65
Figura 14 <i>Gráfico de Pareto con efecto acumulado – Recuperación de Cobre (Cu)</i>	70
Figura 15 <i>Gráfico de efectos normales de cobre</i>	71
Figura 16 <i>Gráfico de interacción para Cu</i>	70
Figura 17 <i>Gráfico de Pareto con efecto acumulado – Recuperación de Oro (Au)</i>	71
Figura 18 <i>Gráfico de efectos normales de oro</i>	71
Figura 19 <i>Gráfico de interacción para Au</i>	73

LISTA DE FIGURAS DE ANEXOS

Figura A1	<i>Tipos morfológicos de pirit</i>	98
Figura A2	<i>Concentración de oro submicroscópico en pirita</i>	99

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación problemática

La geometalurgia, que es una disciplina que fusiona la geología con la metalurgia, facilita la comprensión de cómo las propiedades mineralógicas, texturales y estructurales de un depósito minero afectan el comportamiento metalúrgico de los minerales durante el proceso de extracción (Miller et al., 2009). En este marco, este análisis se enfoca en la valoración geometalúrgica del área de interacción entre la alteración argílica y las formaciones de caliza en un depósito tipo pórfido situado en el distrito minero de Hualgayoc, en la región de Cajamarca. Esta es una región de gran importancia histórica y económica para la extracción de cobre y oro en Perú.

El contacto entre litologías distintas, como las rocas intrusivas modificadas y las calizas, crea áreas de interacción con mineralogía compleja, existencia de sulfuros secundarios, y cambios notables en la distribución y vinculación de los metales de valor. Estos elementos pueden tener un impacto directo en la eficacia de los procesos de recuperación metalúrgica, particularmente en operaciones en las que se utilizan tecnologías de flotación tradicional (Brown & Johnson, 2015).

El distrito minero de Hualgayoc, ubicado en la región de Cajamarca, mantiene una significativa actividad de extracción de minerales cupríferos y auríferos vinculados a depósitos pórfidos y rocas sedimentarias calizas. En este lugar, la interrelación entre las áreas de alteración argílica y las calizas produce una mineralogía compleja que puede influir de manera significativa en los procesos de concentración y recuperación metalúrgica (Gonzales et al., 2018). La alteración argílica, marcada por la existencia de minerales arcillosos y sulfuros secundarios, y su interacción con la caliza, puede generar áreas de mineralización con cambios en la textura, nivel de liberación y la asociación

mineralógica, factores que influyen directamente en la eficacia de procedimientos como la flotación (Smith et al., 2017).

Este trabajo busca caracterizar geológica y mineralógicamente dicha zona de contacto, y establecer su influencia en la recuperación metalúrgica de cobre y oro. Para ello, se integrarán análisis petrográficos, mineralógicos, geoquímicos y pruebas metalúrgicas, con el objetivo de establecer un modelo geometalúrgico que contribuya a optimizar la planificación minera y la toma de decisiones en el procesamiento del mineral.

1.2. Formulación del problema

En la región norte de Perú, múltiples actividades mineras muestran cuerpos mineralizados vinculados a conexiones entre áreas de alteración de arcilla y estructuras de caliza. Estos vínculos pueden tener un impacto considerable en la concentración de metales como el cobre y el oro, a causa de las condiciones geoquímicas y estructurales que promueven la precipitación y el enriquecimiento de estos componentes. No obstante, la complejidad litológica y la transición entre la roca modificada y la caliza han obstaculizado una adecuada descripción del control mineralógico y metalogenético, lo cual ha restringido la eficacia de los procesos de recuperación en la planta.

Aunque existen campañas de exploración y explotación, se nota una escasa utilización del potencial de recuperación en estos contactos, a causa de una caracterización geoquímica y mineralógica deficiente. La ausencia de investigaciones minuciosas sobre el comportamiento de la mineralización en dichas interacciones obstaculiza la optimización de los procesos de extracción, impactando la rentabilidad y la sostenibilidad de los proyectos de minería.

1.2.1. Problema general

- ¿Cómo influye la evaluación mineralógica del yacimiento tipo pórfido sobre la recuperación de cobre y oro en la zona de contacto argílico-caliza?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿De qué manera la composición mineralógica de la zona de contacto argílico-caliza, influye sobre la recuperación de cobre y oro?
- ¿Cuáles son variables del proceso de flotación que influyen en la recuperación de cobre y oro a partir del mineral caracterizado?
- ¿De qué manera se puede optimizar la eficiencia del proceso de flotación en la recuperación de cobre y oro?

1.3. Justificación

La presente investigación se justifica por la necesidad de evaluar los procesos de recuperación de cobre y oro en yacimientos del norte del Perú, una región con alto potencial minero, especialmente en depósitos epitermales y sistemas porfídicos asociados a zonas de alteración hidrotermal. En este contexto, la zona de contacto entre unidades argílicas y calizas representa un entorno geológico complejo, donde los controles litológicos y estructurales influyen significativamente en la distribución y concentración de la mineralización metálica.

Estudios previos han demostrado que los contactos entre rocas alteradas y calizas pueden constituir trampas mineralizadas altamente favorables para la acumulación de sulfuros de cobre y oro. Sin embargo, en muchos casos, estos contactos no han sido suficientemente caracterizados, lo que ha llevado a una subestimación de su potencial económico y a una recuperación deficiente de metales durante el procesamiento.

En este sentido, la evaluación detallada de la mineralización en estos contactos permitirá comprender mejor los controles geológicos del depósito, identificar zonas de alta ley y ajustar los parámetros metalúrgicos para maximizar la recuperación de valores metálicos. Además, esta investigación contribuirá al desarrollo de modelos geometalúrgicos más precisos, que integren información estructural, litológica y mineralógica.

Asimismo, desde una perspectiva económica y ambiental, mejorar la recuperación de cobre y oro implica un uso más eficiente de los recursos, reduce los volúmenes de desechos y disminuye el impacto ambiental de las operaciones mineras, alineándose con los principios de sostenibilidad que hoy exige la industria.

Finalmente, esta tesis aportará conocimiento aplicado a la exploración y explotación de yacimientos en el norte del Perú, una región clave para la economía nacional, fortaleciendo la toma de decisiones en proyectos actuales y futuros.

1.3.1. Justificación teórica

La justificación teórica de esta investigación se basa en los principios de la metalogenia, la geología económica y la geometalurgia, disciplinas que abordan la génesis, distribución y aprovechamiento de los recursos minerales en función de sus características geológicas y mineralógicas.

Desde el punto de vista metalogénico, la mineralización de cobre y oro en sistemas hidrotermales está fuertemente controlada por factores litológicos, estructurales y alteraciones hidrotermales. En particular, los contactos entre zonas de alteración argílica y unidades carbonatadas, como la caliza, representan interfaces químicamente activas, donde pueden desarrollarse reacciones metasomáticas favorables para la precipitación de sulfuros metálicos. Estas interacciones están explicadas por modelos de reemplazo

metasomático y reactividad de roca huésped, donde la caliza actúa como un medio favorable debido a su carácter químicamente reductivo y su alta reactividad frente a fluidos hidrotermales ricos en metales y sulfuros.

Por otro lado, la alteración argílica, compuesta principalmente por minerales como caolinita, illita y esmectita, puede representar tanto barreras como canales para la migración de fluidos mineralizantes. El estudio del contacto entre estas zonas y las rocas carbonatadas permite identificar discontinuidades favorables para la acumulación de mineralización, así como las condiciones fisicoquímicas que controlan la formación de menas metálicas.

A nivel teórico, este trabajo se apoya también en los principios de la geometalurgia, que integra datos geológicos, mineralógicos y metalúrgicos para mejorar la eficiencia del procesamiento de minerales. El reconocimiento de asociaciones mineralógicas específicas y sus implicancias en la flotación, lixiviación o recuperación de cobre y oro es crucial para la optimización de la operación minera.

Además, el enfoque estructural complementa esta evaluación, ya que muchas de las mineralizaciones se concentran en zonas de fractura o fallamiento, que actúan como conductos preferenciales para los fluidos hidrotermales. El análisis estructural del contacto argílico-caliza puede revelar patrones repetitivos o controlados de mineralización, lo cual es fundamental para la generación de modelos predictivos.

1.3.2. Justificación práctica

La presente investigación tiene una clara relevancia práctica, ya que responde a una necesidad concreta de la industria minera: mejorar la recuperación de cobre y oro a partir de zonas geológicamente complejas, específicamente en los contactos entre alteraciones argílicas y unidades de caliza, comunes en depósitos del norte del Perú.

En muchos yacimientos, estas zonas de contacto son poco caracterizadas y subutilizadas, lo que puede llevar a una subestimación de leyes metálicas, una clasificación errónea del mineral, o incluso a la pérdida de material valioso durante el procesamiento. Evaluar detalladamente la mineralización en estas interfaces permitirá identificar sectores de alta ley, mejorar la planificación de la mina, y optimizar la selección de métodos de procesamiento adecuados según el tipo de roca y mineral presente.

Desde una perspectiva operativa, este estudio contribuirá directamente a: Reducir pérdidas metalúrgicas al entender mejor la distribución y comportamiento de la mineralización.

Mejorar la eficiencia de recuperación en las plantas de procesamiento, mediante ajustes en los parámetros de molienda, flotación o lixiviación.

Aumentar la rentabilidad del proyecto minero, al aprovechar de manera más eficaz zonas que antes eran tratadas como marginales o de baja prioridad.

Optimizar el diseño geometalúrgico, permitiendo una mejor correlación entre geología, mineralogía y respuesta metalúrgica.

Apoyar la toma de decisiones estratégicas, tanto en etapas de exploración avanzada como en operación y expansión de minas.

Además, este trabajo tiene un impacto positivo en términos de sostenibilidad y responsabilidad ambiental, ya que mejorar la recuperación implica procesar menos material para obtener la misma cantidad de metal, reduciendo el volumen de relaves y el consumo de insumos como energía, agua y reactivos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Determinar cómo influye la evaluación mineralógica del yacimiento tipo pórfido en la recuperación de cobre y oro en la zona de contacto argílico-caliza, con el fin de optimizar el proceso de flotación.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar la composición mineralógica de la zona de contacto argílico-caliza y su relación con la recuperación de cobre y oro.
- Evaluar las variables del proceso de flotación que afectan la recuperación de cobre y oro a partir del mineral caracterizado.
- Determinar las condiciones óptimas de las variables que influyen en el proceso de flotación para mejorar la recuperación de cobre y oro.

1.5. Hipótesis de la investigación

1.5.1. Hipótesis general

- La evaluación mineralógica detallada del yacimiento tipo pórfido influye significativamente en la recuperación de cobre y oro en la zona de contacto argílico-caliza, al permitir un diseño más eficiente del proceso de flotación.

1.5.2. Hipótesis específicas

- La composición mineralógica de la zona de contacto argílico-caliza afecta directamente la recuperación de cobre y oro, debido a la presencia de minerales que dificultan o facilitan el proceso de flotación.
- Variables del proceso de flotación como el pH, la dosificación de reactivos, la granulometría, el tiempo de residencia y el porcentaje de sólidos tienen un impacto significativo en la eficiencia de recuperación del cobre y oro.

- La optimización del proceso de flotación, basada en la caracterización mineralógica y el control de variables operativas, mejora la recuperación metálica de cobre y oro.

1.5.3. Matriz de consistencia

La matriz de consistencia para este estudio relaciona el problema, los objetivos, la hipótesis y las variables para asegurar coherencia metodológica, como se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1

Matriz de consistencia

“EVALUACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN EN EL CONTACTO ARGÍLICO-CALIZA PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE COBRE Y ORO, EN EL NORTE DEL PERÚ				
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Hipótesis	
			Variables de la hipótesis general	
			Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿Cómo influye la evaluación mineralógica del yacimiento tipo pórfido sobre la recuperación de cobre y oro en la zona de contacto argílico-caliza?	Determinar cómo influye la evaluación mineralógica del yacimiento tipo pórfido en la recuperación de cobre y oro en la zona de contacto argílico-caliza, con el fin de optimizar el proceso de flotación.	La evaluación mineralógica detallada del yacimiento tipo pórfido influye significativamente en la recuperación de cobre y oro en la zona de contacto argílico-caliza, al permitir un diseño más eficiente del proceso de flotación.	Especies de minerales y amarres mineralógicos Distribución volumétrica Grados de liberación	Se identifican a través de la observación de una muestra representativa en el equipo QEMSCAN. Se reportan en términos porcentuales como resultados de la identificación de las especies en el equipo QEMSCAN.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables de las hipótesis específicas	
Problema específico N°1	Objetivo específico N°1	Hipótesis específica N°1	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿De qué manera la composición mineralógica de la zona de contacto argílico-caliza, influye sobre la recuperación de cobre y oro?	Analizar la composición mineralógica de la zona de contacto argílico-caliza y su relación con la recuperación de cobre y oro.	La composición mineralógica de la zona de contacto argílico-caliza afecta directamente la recuperación de cobre y oro, debido a la presencia de minerales que dificultan o facilitan el proceso de flotación.	Especies de minerales y amarres mineralógicos Distribución volumétrica Grados de liberación	Se identifican a través de la observación de una muestra representativa en el equipo QEMSCAN. Se reportan en términos porcentuales como resultados de la identificación de las especies en el equipo QEMSCAN.
Problema específico N°2	Objetivo específico N°2	Hipótesis específica N°2	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿Cuáles son variables del proceso de flotación que influyen en la recuperación de cobre y oro a partir del mineral caracterizado?	Evaluar las variables del proceso de flotación que afectan la recuperación de cobre y oro a partir del mineral caracterizado.	Variables del proceso de flotación como el pH, la dosificación de reactivos, la granulometría, el tiempo de residencia y el porcentaje de sólidos tienen un impacto significativo en la eficiencia de recuperación del cobre y oro.	Porcentaje de sólidos Tiempo de flotación	Variabes del proceso de flotación como el porcentaje de sólidos y el tiempo de flotación tienen un impacto significativo en la eficiencia de recuperación del cobre y oro.
Problema específico N°3	Objetivo específico N°3	Hipótesis específica N°3	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿De qué manera se puede optimizar la eficiencia del proceso de flotación en la recuperación de cobre y oro?	Determinar las condiciones óptimas de las variables que influyen en el proceso de flotación para mejorar la recuperación de cobre y oro.	La optimización del proceso de flotación, basada en la caracterización mineralógica y el control de variables operativas, mejora la recuperación metálica de cobre y oro.	Porcentaje de sólidos Tiempo de flotación	Ensayos experimentales de flotación Balances metalúrgicos Análisis químico de concentrados y relaves

Nota: Esquema resumen de la investigación planteada.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco epistemológico

El presente estudio se enmarca en un enfoque epistemológico empírico-analítico, orientado a la comprensión objetiva de los fenómenos geológicos y metalúrgicos mediante la observación sistemática y la experimentación. Este paradigma parte de la premisa de que la realidad geológica puede ser medida, modelada y explicada a través de métodos científicos replicables y verificables.

Desde esta perspectiva, se busca identificar, caracterizar y explicar la distribución de la mineralización de cobre y oro en los contactos entre zonas de alteración argílica y calizas, a partir del estudio de datos geológicos, mineralógicos y metalúrgicos. Así, el conocimiento generado se fundamenta en la observación empírica de la naturaleza, lo que coincide con el planteamiento de Popper (2002), quien sostiene que la ciencia avanza mediante la formulación de hipótesis contrastables y su constante puesta a prueba mediante la experiencia.

En el ámbito de las ciencias geológicas y mineras, este enfoque es particularmente relevante, ya que permite establecer relaciones causales entre los procesos geológicos y la distribución de los recursos minerales (Holland, 2005). La epistemología empírico-analítica, aplicada al estudio de sistemas mineralizados, permite generar modelos predictivos sobre el comportamiento de la mineralización en función de las características litológicas, estructurales y geoquímicas del entorno.

Asimismo, el estudio adopta una postura instrumental y aplicada del conocimiento, en la medida en que se orienta a resolver un problema práctico: optimizar la recuperación de metales valiosos. En este sentido, se articula con el pensamiento de

Bunge (2007), quien argumenta que la ciencia aplicada transforma el conocimiento teórico en soluciones tecnológicas que responden a necesidades sociales y económicas concretas.

Por otro lado, el enfoque adoptado también reconoce la importancia del método inductivo-deductivo, donde se parte de observaciones particulares (como el análisis de muestras de mineral y características de contacto litológico) para formular generalizaciones, y a su vez se aplican principios teóricos para interpretar los datos específicos (Hempel, 1966). Esta interacción entre teoría y evidencia empírica es central para alcanzar conclusiones válidas y útiles en la geología económica.

2.2. Antecedentes de estudio

2.2.1. Antecedentes internacionales

Entender la mineralogía y las asociaciones de oro en la alimentación de flotación es crucial para optimizar las operaciones. Los cambios en la composición mineralógica del mineral influyen en la recuperación de minerales y metales, la elección de reactivos y también ayudan a identificar y explicar los posibles desafíos de procesamiento. La falta de caracterización mineralógica precisa del oro en los pórfidos de cobre-oro a menudo conduce a una baja recuperación del oro en relación con el cobre.

Los pórfidos de cobre y oro son las principales fuentes de cobre y oro en el mundo. Bulatovic (1997), “concluyó que la calcopirita es el principal mineral portador de cobre, mientras que el oro, con tenores bajos (1–2 g/t), presenta asociaciones complejas, muchas veces relacionadas con la pirita. Esta distribución heterogénea y su baja concentración hacen que el oro no sea económicamente recuperable mediante lixiviación directa. Sin embargo, la flotación ha demostrado ser efectiva como proceso de concentración previa.

Bulatovic destaca que una comprensión detallada de la mineralogía y las asociaciones del oro es fundamental para mejorar su recuperación durante la flotación”.

Las concentraciones de oro en estos minerales son inherentemente bajas (1-2 g/t) (Allan & Woodcock,2001; Leaver y Woolf,1934). “Estos autores, identificaron que las concentraciones de oro suelen oscilar entre 1 y 2 g/t, lo que reafirma la necesidad de procesos de concentración previos, como la flotación, antes de aplicar técnicas hidrometalúrgicas. Estos autores también destacaron la importancia de comprender la distribución del oro dentro de los minerales sulfurados para optimizar los circuitos metalúrgicos”. Siendo la fase dominante el sulfuro de cobre (Bulatovic,1997). El bajo grado de oro en estos minerales hace que no sea económico recuperarlos mediante lixiviación directa. Sin embargo, la espuma se ha utilizado a lo largo de los años en la concentración previa de cobre y oro para procesos hidrometalúrgicos posteriores (Fuerstenau et al., 2007). Por lo tanto, para una recuperación mejorada del oro por la flotación, es ideal tener un conocimiento considerable de la mineralogía y la asociación del oro en la alimentación de la flotación. La caracterización mineralógica debe poder identificar los minerales que contienen oro, mostrar cómo se distribuyen las partículas de oro en cada fracción y también cómo las partículas de oro están asociadas con los minerales de la ganga.

La mayoría de las plantas de flotación de cobre y oro están diseñadas con el objetivo de optimizar la recuperación y el grado del cobre bajo el supuesto de que el oro exhibirá un comportamiento similar (Bulatovic, 1997). Estas condiciones no producen una recuperación óptima del oro, debido a la diferencia en mineralogía, química de superficie, densidad y morfología entre el cobre y los minerales que contienen oro. Agorhom et al., 2012. “Determinaron que las partículas de oro tienden a asociarse más

frecuentemente con la pirita que con minerales de cobre como la calcopirita. Esta asociación complica la recuperación de oro, ya que la pirita suele ser considerada ganga y se intenta deprimir o rechazar en el proceso. Rechazar la pirita conlleva inevitablemente pérdidas significativas de oro”. En los minerales de cobre y oro de pórfido, las partículas de oro se asocian principalmente con pirita (que se considera como una ganga) en lugar de los principales minerales de cobre (por ejemplo, calcopirita, calcocita, etc.).

Las asociaciones de oro-pirita en los minerales de cobre-oro son problemáticas debido al requisito de minimizar el contenido de azufre en el concentrado de cobre final. Como mencionan Monte et al., 1997. “Evidenciaron que cualquier intento por eliminar la pirita del concentrado de cobre también reduce significativamente la recuperación del oro, debido a su fuerte asociación mineralógica. Por tanto, es esencial evaluar cuidadosamente las estrategias de depresión de sulfuros de hierro cuando se busca recuperar oro simultáneamente”. Cualquier intento de rechazar la pirita mediante la aireación o la adición de un depresor también provoca invariablemente pérdidas de oro.

Dentro de los depósitos de pórfido andino de cobre, Chile, calcopirita y pirita son los sulfuros primarios, pero la tennantita y la enargita también están presentes en los niveles superiores de estos depósitos. Pincheira et al., 1998. “Identificaron que, además de la calcopirita y la pirita, minerales como enargita, tennantita, arsenopirita y tetrahedrita están presentes y, en algunos casos, asociados al oro. Estas asociaciones son críticas, ya que la presencia de minerales arsenicales afecta negativamente tanto la recuperación como la calidad del concentrado final”. El depósito de El Indio enumera enargita y tennantita como minerales principales, calcopirita, arsenopirita y tetrahedrita se encuentran entre los minerales menores. La calcopirita se asocia principalmente con la enargita y también se informan asociaciones de oro con estos minerales. (Smith, 1986).

2.2.2. Antecedentes nacionales

«Controles de mineralización del pórfido Au-Cu Morococha – Minas Conga, Cajamarca – Perú» (Aliaga, 2012). “Esta tesis analiza el control de la mineralización tipo pórfido de oro-cobre en el área de Morococha–Minas Conga, en el norte del Perú. A través de cartografía detallada, estudios de litología, alteración e interpretación de venillas, se identificaron al menos dos pulsos magmáticos responsables de la mineralización. Los cuerpos intrusivos (microgranodioríticos y dioríticos) intruyen calizas del Cretácico medio-superior, afectadas por fallas NW-SE. La mineralización se encuentra en venillas y stockworks de cuarzo y magnetita en zonas con alteración potásica sobreimpuesta por clorítica”.

«Caracterización mineralógica y geoquímica de la alteración sericita-clorita y mineralización asociada en el proyecto Antakori Cu-Au-Ag Cajamarca – Perú» (Portocarrero, 2021). "Esta investigación se centra en el proyecto Antakori, ubicado al noroeste de Cajamarca, que comprende depósitos cupríferos-auríferos del Mioceno en rocas calcáreas y de cuarcitas. Se caracterizó la alteración metasomática tipo skarn, la cual presenta fases prógrada y retrógrada, así como una mineralización de cobre (Cu) asociada a la intrusión de pórfidos. Estos últimos presentan venillas y cuerpos de brechas hidrotermales con enriquecimiento metálico a profundidad."

«Geología y potencial de mineralización de yacimientos de cobre y oro tipo IOCG en la costa norte del Perú (paralelo 9°–12°)» (Revista Minería, 2021). “El artículo destaca la presencia de mineralización tipo IOCG (Iron Oxide Copper–Gold) en la costa norte del Perú, entre los paralelos 9° y 12°. Los autores mencionan la variabilidad composicional de los ensambles mineralógicos y geoquímicos y subrayan que, aunque esta tipología aún está en fase exploratoria, posee un gran potencial para depósitos de mediana a gran escala,

con leyes estimadas de $\text{Au} > 5 \text{ g/t}$ y $\text{Cu} > 1 \%$, o depósitos diseminados con valores de $\sim 1 \text{ g/t Au}$ y $0.3\text{--}0.5 \%$ Cu”.

2.3. Bases teóricas

2.3.1. Geología General o Regional

El área de estudio se emplaza dentro de la franja metalogenética del norte del Perú, reconocida mundialmente por albergar sistemas de pórfido de cobre y oro de gran envergadura. Regionalmente, la columna estratigráfica está constituida por secuencias sedimentarias del Cretácico superior, compuestas predominantemente por calizas y unidades siliciclásticas que fueron intensamente deformadas durante la orogenia andina. La arquitectura geológica regional está dominada por un sistema de fallamiento de rumbo andino (NW-SE) y fallas transversales de escala cortical, las cuales han actuado como los conductos primarios para el ascenso de magmas durante el Mioceno.

Estos eventos magmáticos, caracterizados por la intrusión de stocks de composición granodiorítica y diorítica, fueron los motores fundamentales para la circulación de fluidos hidrotermales. En el sector norte del país, esta actividad ha derivado en la formación de yacimientos complejos donde la interacción entre fluidos magmáticos y la roca encajante carbonatada ha facilitado la precipitación de sulfuros metálicos. La configuración regional, definida por la superposición de múltiples eventos hidrotermales y una tectónica activa, condiciona la distribución y heterogeneidad mineralógica observada. Este contexto regional establece las bases estructurales que, al interactuar con las condiciones locales de alteración, determinan la respuesta metalúrgica del mineral y representan un factor crítico para el diseño de estrategias de recuperación de cobre y oro a escala industrial (Benavides et al., 2018; Sillitoe, 2010).

2.3.2. Geología de la Mina

El yacimiento se localiza en el distrito minero de Hualgayoc, Cajamarca, y presenta un control litoestructural marcado por el contacto entre stocks intrusivos y formaciones carbonatadas cretácicas. La geología de la mina se caracteriza por una mineralización de tipo diseminado y *stockwork*, donde la interacción hidrotermal ha generado una zonificación de alteración definida. Un elemento determinante de esta geología es el desarrollo de un extenso halo de alteración argílica, compuesto principalmente por caolinita e illita, resultante de la alteración de feldespatos y la interacción con la caja caliza.

La mineralogía económica consiste en una asociación compleja de calcopirita y pirita, con un contenido de oro distribuido de forma no uniforme, frecuentemente ocluido en la pirita microcristalina. Desde una perspectiva técnica, esta configuración geológica en Hualgayoc es el factor raíz de la respuesta metalúrgica observada; la fragilidad de las arcillas (caolinita/illita) durante el proceso de conminución genera finos de alta superficie específica que favorecen el fenómeno de *slime coating* sobre los sulfuros de valor. Esta condición, sumada a la naturaleza refractaria del oro, inhibe la eficiencia de los colectores en la flotación selectiva. Por tanto, la geología de la mina no solo describe la distribución de los metales, sino que constituye el marco de restricción operativa que exige un control riguroso de las variables del circuito para asegurar la recuperación de oro y cobre (INGEMMET, 2020; Petersen, 1999).

2.3.3. Definición del contacto argílico-caliza

El contacto argílico-caliza es un área geológica donde se hallan dos litologías diferentes: una roca carbonatada (como la caliza) y una región modificada por procesos hidrotermales, que se distingue por una modificación argílica. Este tipo de interacción generalmente implica condiciones fisicoquímicas distintas que pueden propiciar la precipitación de minerales metálicos, en particular sulfuros de cobre y minerales que transportan oro.

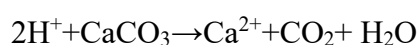
Alteración argílica

La modificación argílica es una clase de modificación hidrotermal que sucede en circunstancias ácidas (pH bajo) y temperaturas moderadas (100–300 °C). Se distingue por la creación de minerales arcillosos tales como: Esmeclita, alunita, illita y caolinita. Estos minerales sustituyen elementos iniciales de la roca anfitriona, deteriorando su estructura inicial. La modificación argílica puede funcionar como un canal de fluidos mineralizantes, y es habitual en sistemas pórfidos y epitermales.

Caliza y su rol geoquímico

La caliza es un sedimento compuesto en su mayoría por carbonato cálcico (CaCO_3). Su reacción con líquidos ácidos la hace una roca propicia para la precipitación de minerales. Cuando los fluidos hidrotermales ácidos originados en áreas de alteración argílica interactúan con la caliza, ocurre una neutralización del pH, creando así las condiciones ideales para la deposición de minerales metálicos.

Reacción típica



Este cambio brusco en las condiciones geoquímicas puede causar la precipitación de sulfuros metálicos (tales como calcopirita o bornita), así como la encapsulación del oro en minerales de ganga o en sulfuros de tamaño reducido.

Yacimientos Tipo Pórfido de Cobre-Oro

Los yacimientos tipo pórfido son sistemas hidrotermales ampliamente distribuidos a nivel mundial, asociados a intrusivos ígneos, principalmente andesíticos y dacíticos. Se caracterizan por poseer una mineralización diseminada de sulfuros metálicos, en especial de cobre, oro y molibdeno, concentrados en redes de vetillas y zonas de alteración hidrotermal.

En estos sistemas, el cobre se encuentra principalmente en forma de calcopirita, bornita y calcocita, mientras que el oro puede estar presente como oro libre, submicroscópico o encapsulado en sulfuros como piritita y arsenopiritita. La eficiencia en la recuperación de estos metales depende del entendimiento de la geometría del yacimiento, la mineralogía y las asociaciones minerales presentes (Sillitoe, 2010).

Alteración Hidrotermal y Zona Argílica

La alteración hidrotermal es el conjunto de cambios mineralógicos que ocurren como resultado de la interacción entre fluidos calientes y las rocas hospedantes. La zona de alteración argílica se caracteriza por el desarrollo de minerales arcillosos como la illita, caolinita y montmorillonita, además de cuarzo y alunita. Esta zona ocurre generalmente en las partes superiores del sistema y puede estar en contacto con rocas carbonatadas como la caliza, generando un contacto mineralógico complejo.

Este contacto argílico-caliza puede influir en la distribución del oro y el cobre, así como en la reología del mineral, afectando negativamente el proceso de flotación, por la

presencia de arcillas o carbonatos que actúan como diluyentes o depresores naturales (Williams et al., 1999).

2.3.4. Composición mineralógica y asociación de minerales

La composición mineralógica del mineral de alimentación es un factor clave en la eficiencia de recuperación de metales valiosos. La asociación mineralógica se refiere a la relación espacial y textural entre los minerales metálicos y la ganga. En los pórfidos, el oro suele encontrarse asociado a pirita, enargita, arsenopirita o como inclusiones submicroscópicas en sulfuros de cobre.

Cuando el oro está finamente diseminado o encapsulado en minerales de ganga, su recuperación por flotación puede verse limitada. Por tanto, una adecuada caracterización mineralógica mediante técnicas como microscopía óptica, DRX, SEM-EDS o QEMSCAN, es fundamental para optimizar la estrategia de procesamiento (Bulatovic, 1997; Allan & Woodcock, 2001).

2.3.5. Efecto de la mineralogía sobre la recuperación de cobre y oro

Las características mineralógicas del mineral —como el tamaño de grano, la textura, la alteración hidrotermal y la asociación con ganga— tienen un impacto directo sobre la recuperación de metales. La presencia de arcillas en zonas argílicas puede causar problemas como alta viscosidad de la pulpa, consumo excesivo de reactivos, arrastre de ganga o depresión del oro.

Asimismo, los minerales de ganga como carbonatos (calcita, dolomita) y arcillas pueden interactuar con los reactivos de flotación, reduciendo su efectividad. Estas condiciones requieren ajustes en los circuitos de flotación y, en algunos casos, la

implementación de procesos de limpieza, dispersión o acondicionamiento previo del mineral (Monte et al., 1997; Smith, 1986).

2.3.5.1. Influencia de la calcopirita en la recuperación de cobre y oro por flotación

La calcopirita (CuFeS_2) es el principal mineral portador de cobre y una de las fases más relevantes para la recuperación de oro en yacimientos tipo pórfido. Diversos estudios han demostrado que una fracción significativa del oro se encuentra en solución sólida o como inclusiones submicroscópicas dentro de la calcopirita, lo que condiciona directamente su comportamiento metalúrgico durante la flotación (Meinert, 2013; Cook et al., 2013).

La recuperación eficiente de cobre y oro depende del grado de liberación de la calcopirita, su asociación con minerales de ganga y el estado químico de su superficie. En zonas con alteración argílica, la presencia de arcillas puede recubrir la superficie de la calcopirita, disminuyendo su hidrofobicidad y afectando negativamente la recuperación de ambos metales (Bulatovic, 2007; Wills & Finch, 2016).

2.3.6. Importancia de la caracterización mineralógica

La caracterización mineralógica es la base para una metalurgia predictiva eficiente. Permite identificar los minerales valiosos, su distribución y liberación, y planificar la mejor estrategia para su procesamiento. Métodos modernos como el QEMSCAN, el Mineral Liberation Analyzer (MLA) y el SEM-EDS, permiten analizar con precisión las asociaciones minerales, el grado de liberación y la distribución de partículas de oro y cobre en el mineral.

Esto es especialmente relevante en zonas de contacto como la argílica-caliza, donde las variaciones litológicas y mineralógicas pueden afectar de manera significativa el comportamiento del mineral en planta (Arévalo & Toledo, 2013).

2.3.7. Consideraciones metalúrgicas en yacimientos del norte del Perú

En el contexto geológico del norte del Perú, los yacimientos tipo pórfido presentan mineralizaciones complejas, en muchos casos con zonas de transición entre alteraciones hidrotermales y secuencias carbonatadas. Estos contactos geológicos generan desafíos metalúrgicos que requieren de estudios detallados para comprender cómo la composición y textura mineralógica local afecta la recuperación de cobre y oro.

Por tanto, una evaluación integral que incluya estudios geometalúrgicos, pruebas de flotación selectiva, análisis mineralógico y modelado de recuperación, resulta indispensable para maximizar la eficiencia operativa en estos sistemas complejos (Pincheira et al., 1998; Castro et al., 2015).

2.3.8. Resumen geológico del tajo de Cerro Corona

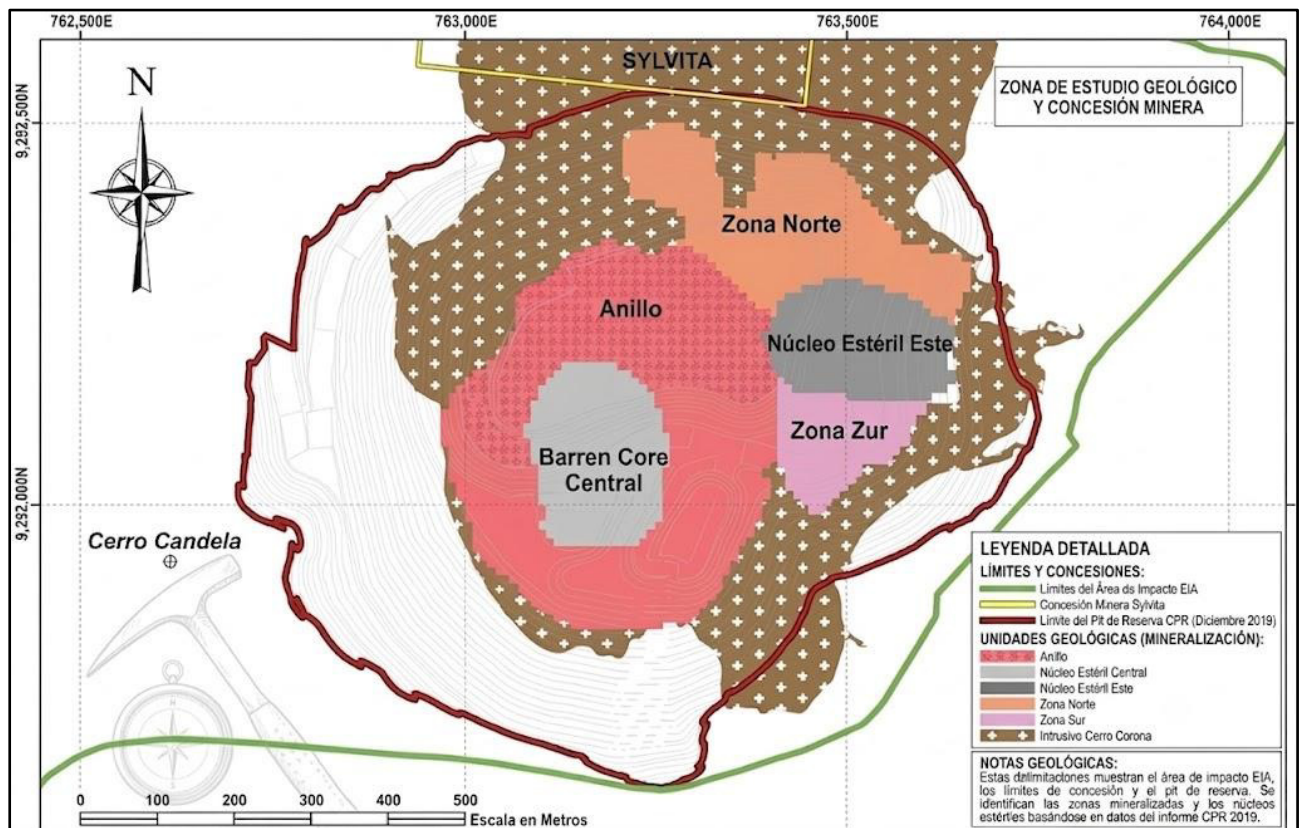
El yacimiento de cobre - oro de Cerro Corona se alberga en pórfido de diorita subvertical de forma cilíndrica, de 600 a 700 m de diámetro, emplazado en rocas calcáreas, margas y siliciclásticas del Cretáceo medio. Dentro del pórfido, la mineralización de cobre y oro se asocia principalmente a zonas que poseen un sistema de vetillas (stockwork) de cuarzo según la definición clásica de veta de tipo pórfido. El pórfido de Cerro Corona es inusual ya que posee un contenido de oro muy alto en comparación con otros yacimientos de cobre y oro.

Existen al menos dos fases de intrusión de dioritas, pero solo una se encuentra mineralizada. La diorita no mineralizada se considera por lo general la más reciente, y se

le denomina ‘testigo estéril’. El modelamiento geológico más reciente sugiere firmemente que el pórfido de Cerro Corona se encuentra compuesto, probablemente, de cuatro o cinco stocks, de los cuales los últimos dos son estériles. La mineralización temprana se encontraba acompañada de una alteración potásica moderada a avanzada, comúnmente superpuesta por una alteración argílica tardía y semi-extendida; y localmente, por un conjunto de alteraciones filicas estructuralmente controladas (cuarzo-sericita-pirita). El intrusivo se ha emplazado en la intersección de la estructura paralela andina y de la estructura normal andina (transandina), característica típica de la provincia metalogénica de Cajamarca. El sistema de fallas dominante que va del noreste al sudoeste y que recorre el intrusivo se denomina la Falla Mariela y tiene una relación importante con la distribución de mineralización. Existen tres zonas mineralizadas distintas dentro del yacimiento. Estas zonas se identifican como la Zona del Anillo, la Zona Norte y la Zona Sur (ver Figura 1). Cada una de estas zonas se trata por separado para efectos del modelamiento geológico y de recursos. Además de las zonas mineralizadas, el yacimiento se caracteriza por presentar varios dominios de acuerdo con el grado de oxidación e intemperización. Los procesos de lixiviación y oxidación supergénica en Cerro Corona han conducido al desarrollo de un manto de enriquecimiento de cobre débil a moderado, que ha permitido que el yacimiento se subdivida, desde la superficie hacia abajo, en una zona de óxidos, una zona mixta de óxidos y sulfuros, una zona de sulfuros secundarios enriquecidos (supergénica) y una zona de sulfuros primarios (hipogénica).

Figura 1

Tajo cerro corona, muestra las tres zonas mineralizadas



Nota: Elaboración propia, basado en los datos de zonificación geológica (2019).

2.3.9. Dominios geológicos

La oxidación, intemperización, lixiviación y posterior enriquecimiento secundario han llevado a la formación de cuatro dominios minerales con un comportamiento metalúrgico claramente distinto.

El dominio superior, el dominio de óxidos, se caracteriza por la remoción total de mineralización de cobre debido a oxidación y lixiviación. La mineralización de oro que se encuentra dentro del dominio de óxidos se caracteriza por una ley un tanto mayor y es fácil de procesar debido a la descomposición total de los minerales de sulfuros primarios. Todo el mineral que se encuentra debajo del dominio de óxidos comprende partes de la zona de sulfuros, que se divide en tres dominios según el grado de oxidación y el

consiguiente cambio en la composición mineralógica de los sulfuros. La zona de sulfuros tiene tres dominios principales, que de arriba hacia abajo son:

- El Dominio Mixto,
- El Dominio Supergénico y
- El Dominio Hipogénico.

El Dominio Supergénico es un manto de cobre enriquecido compuesto por calcocita-covelita-calcopirita con leyes en el rango de 1% de Cu.

El Dominio Hipogénico es la zona de sulfuros primarios.

2.3.10. Alteraciones

La alteración propilítica en profundidad se manifiesta en forma débil, siendo la potásica la mejor expuesta en el depósito, con sobre impresión de la alteración fílica (qz-ser-py), pero restringida al fracturamiento/fallamiento y con una sobreimpresión de alteración argílica, la cual se sobreimpone a la alteración propilítica y potásica respectivamente.

El halo periférico al intrusivo diorítico de Cerro Corona se observa rocas carbonatadas moderadamente marmolizadas y en algunos casos con débil presencia irregular de calcosilicatos, determinando un evento metamórfico tal vez débil y de baja temperatura.

2.3.11. Aspecto geométrico futuro del tajo Cerro Corona

El “Hoyo de Cerro Corona”

A medida que se desarrolle la explotación de la zona mineralizada económica, en Cerro Corona y se vaya profundizando el Tajo hasta llegar a la cota 3650, se podrá observar en las paredes del tajo relictos de calizas decalcificadas, calizas marmolizadas,

zonas de intercalación de caliza frescas con margas con cierta mineralización diseminada de pirita en su mayoría. Así mismo se podrá notar la diorita porfirítica de corona, principalmente con “stockwork” de venillas de qz-py-cpy a partir de la cota 3800 aproximadamente donde los sulfuros de cobre y hierro se harán notables. (Ver Figura 1)

Este aspecto geológico – mineralógico lo detallamos a continuación:

a. En la zona Norte del Tajo:

La pared final de este sector estará constituida por tramos subhorizontales de diorita porfirítica con débil “stockwork”, englobando bloques de caliza decalcificada-cloritizada con remanentes oxidados, esto en la parte superior correspondiente a la zona de oxidación, aproximadamente entre 20 m. Los componentes mineralógicos correspondientes a esta zona de oxidación corresponden generalmente a óxidos de hierro (jarosita, hematita, goethita), y óxidos de cobre en mínima proporción (calcantita, brocantita).

Seguidamente podemos observar una zona de stockwork de venillas de qz y débil mineralización supergénica, compuestas por calcocina, covelita, con cierta diseminación de pirita. Debajo de este nivel se observará una vasta zona hipogénica, correspondiente al “stockwork” de venillas de qz-cpy-py-spec-mag. Hasta la cota 3650.

Muy posiblemente la roca se presente con mayor dureza debido a la presencia de zonas de alteración potásica y silicificación aledaña y muy escasa presencia de zonas argílicas.

b. En la Zona Sur del Tajo:

Se va a observar en los niveles superiores la presencia de caliza marmolizada, con relictos de caliza decalcificada. Esto en los niveles correspondientes a la zona de oxidación.

En los niveles inferiores se podrá observar la diorita porfírica de Corona en contacto con la caliza adyacente. Esta zona presentará diseminación de pirita fina en las calizas y en el contacto con el intrusivo. La diorita porfírica de Corona presenta “stockwork” de venillas de qz-cc-cv-py correspondiente a la zona supergénica 10 m aproximadamente. Seguidamente se observará la mayor parte de esta pared hacia el fondo constituida por la diorita porfírica y “stockwork” de qz-cpy-py.

La dureza de esta roca se hará más pronunciada, por estar en zonas silicificadas y algunas zonas de débil manifestación argílica.

c. En la zona Este del Tajo:

Esta zona corresponde al “Núcleo estéril” del Este. En los niveles superiores se observará intrusivo con escasa presencia de “stockwork” de qz-óxidos de Hierro en contacto con calizas decalcificadas y tramos marmolizados. Este nivel superior corresponde a la zona de óxidos, donde predomina la zona argílica.

En los niveles sucesivos observará zonas hipógenas, con presencia de escaso “stockwork” de qz-py-mag-cpy en una zona de alteración argílica moderada a débil, la cual irá gradualmente en profundidad a potásica débil a fuerte. Esta mineralización no económica se manifiesta hasta por debajo de la cota 3650.

d. En la zona Oeste:

En la zona superior, la cual se observa actualmente corresponde a rocas de caliza marmolizada con intercalaciones de margas gris oscuras, con escasa presencia de diseminación de pirita fina. A partir del banco 3850 se observa contacto entre el intrusivo porfírico de Corona que presenta stockwork de qz-óxidos en un halo o nivel delgado, con ciertas calizas decalcificadas y oxidadas, correspondientes a los niveles superiores de oxidación.

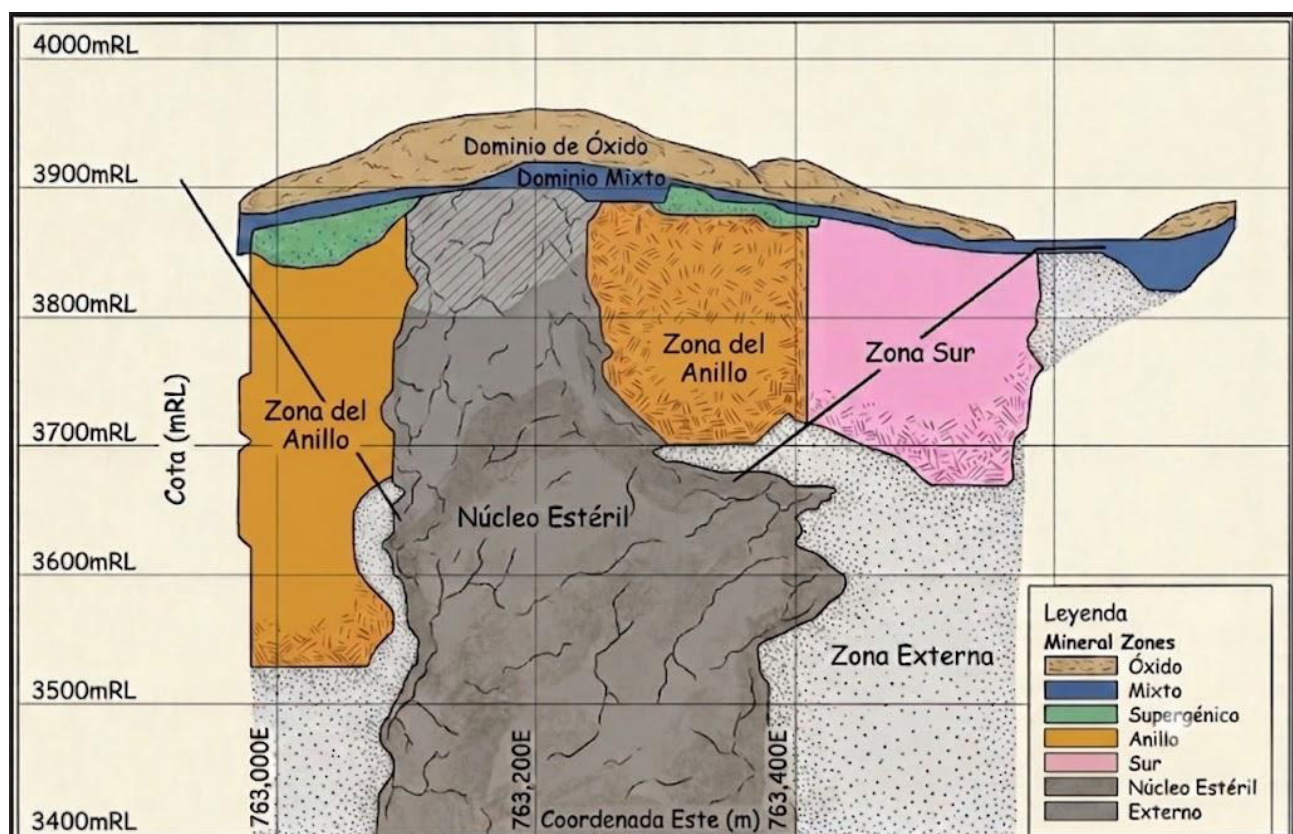
Seguidamente podemos observar este pórfido con mineralización en “stockwork” de qz-cc-cv-py correspondiente a la zona supergénica, la cual hace contacto con las calizas marmolizadas y margas. La presencia de sulfuros de hierro y cobre se hará notable.

Niveles más abajo se podrá observar el intrusivo de Corona con “stockwork” de qz-cpy-py-mg, correspondiente a la zona hipógena o primaria, esto hasta la cota 3650 que será el piso final del tajo.

La dureza de este sector se incrementará a profundidad debido al cambio gradual de la alteración en el pórfido desde argílico moderado hasta potásico de débil a fuerte hasta la cota 3650.

Figura 2

Sección geológica, muestra las zonas y los dominios de mineralización



Nota: Elaboración propia, adaptado de sección transversal geológica (2019).

Se debe mencionar además que el piso final del tajo, en la cota 3650 se podrá observar mineralización existente de cpy-py-mg-py-mo emplazada en el “stockwork” de qz y diseminada en la diorita, donde la roca será de mayor dureza que los niveles superiores, correspondiente a zonas centrales de alteración potásica, y silicificación a los bordes, con muy escasa o no presencia de zonas remanentes de alteración argílica.

De esta manera, finalizadas las actividades de explotación en Cerro Corona quedará un “hoyo de cono invertido”, el cual se puede observar en la Figura 2.

2.3.11.1 Recuperación de cobre y oro por flotación en yacimientos tipo pórfido

La recuperación metalúrgica de cobre y oro se define como el porcentaje del metal contenido en el mineral de alimentación que es recuperado en el concentrado final. En yacimientos tipo pórfido Cu–Au, la recuperación está fuertemente condicionada por la mineralogía del mineral, el grado de liberación de los sulfuros y la presencia de fases arcillosas o carbonatadas (Wills & Finch, 2016).

Estudios recientes indican que variaciones mineralógicas en zonas de contacto argílico–caliza pueden generar cambios significativos en la recuperación de cobre y oro, aun bajo condiciones operativas similares, lo que resalta la importancia de una evaluación mineralógica previa para la optimización del proceso de flotación (Lotter et al., 2018; Castro et al., 2015).

2.3.12. Flotación de sulfuros de cobre

El cobre ocupa el primer lugar entre los metales que se recuperan por flotación. La mayor parte proviene de los sulfuros tales como calcopirita, calcocina, bornita, covelina, tenantita, tetraedrita, enargita y varios otros. El resto viene de minerales

oxidados, tales como cuprita, malaquita, azurita, crisocola, chalcantita, brochantita y otros.

Hablando en forma general, los sulfuros de cobre son minerales de flotabilidad buena y pareja. Su flotabilidad natural empieza a disminuir solo cuando son afectados por la oxidación o por algunos fenómenos secundarios como son, por ejemplo, la depresión por lamas y productos de descomposición. La flotabilidad de las distintas especies varía de un yacimiento a otro y depende no solo de sus cambios superficiales sino también de sus condiciones geológicas de formación. Las formaciones primarias y más antiguas tienen sulfuros de mayor flotabilidad que las formaciones posteriores secundarias, y ya, la de los sulfuros sujetos a la erosión y oxidación queda afectada en forma más notoria. En este sentido es preciso decir que, por ejemplo, la calcopirita o bornita primarias, igual que la tenantita o tetraedrita del mismo origen, son más flotables que la calcocina, covelina o bornita de origen secundario (enriquecimiento secundario en los cobres porfiricos).

Minerales que contienen cobre

Minerales sulfurados principales:

Calcopirita (CuFeS_2): Es el mineral de cobre más abundante y representa la principal fuente de cobre en la mayoría de los depósitos pórfidos. Su estructura cristalina y composición química permiten una buena recuperación mediante procesos de flotación (Craig, 2002).

Bornita (Cu_5FeS_4): Mineral rico en cobre con un color característico y buena recuperabilidad metalúrgica. Es frecuente en la zona de alta temperatura de los depósitos pórfidos (Taylor & Eggleton, 2001).

Covelina (CuS) y Calcosina (Cu_2S): Minerales secundarios, suelen encontrarse en zonas de oxidación o alteración avanzada y pueden influir en la recuperación de cobre (Dutrizac & Jambor, 2000).

Minerales oxidados:

Azurita ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$) y Malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$): Minerales secundarios que se forman por la alteración de los sulfuros y son comunes en las zonas de oxidación. Su extracción puede requerir métodos hidrometalúrgicos diferentes a los sulfuros (Dutrizac, 2013).

En yacimientos pórfidos como el de Hualgayoc, la presencia y distribución de estos minerales en la zona de contacto argílico-caliza puede afectar la respuesta metalúrgica y la eficiencia en la recuperación del cobre.

2.3.13. Sulfuros de cobre y cobre-oro

Desde el punto de vista del procesamiento, los minerales de sulfuro de cobre y cobre-oro se pueden dividir en dos grupos principales, incluidos los minerales con un contenido moderado de pirita (por ejemplo, 5 a 15% del mineral total) y los minerales de sulfuro masivo donde el contenido de pirita puede ser hasta 95% del mineral.

Minerales que contienen cobre-oro

Calcopirita (CuFeS_2): Frecuentemente contiene oro en solución sólida o como partículas micronizadas incluidas en su estructura, dificultando la liberación del oro en el proceso metalúrgico (Meinert, 2013).

Bornita (Cu_5FeS_4): Puede contener cantidades significativas de oro, especialmente en depósitos pórfidos, donde el oro está finamente disperso o ligado a la matriz mineral (Liu et al., 2018).

Calcosina (Cu_2S) y Covelina (CuS): Pueden presentar inclusiones de oro o estar asociadas a zonas con mineralización aurífera secundaria.

Minerales auríferos asociados:

Oro nativo (Au): Se encuentra comúnmente en inclusiones microscópicas dentro de los sulfuros de cobre, lo que puede afectar la recuperación metalúrgica debido a la dificultad de liberar y recuperar el oro (Cox et al., 2007).

Electrum: Es una aleación natural de oro y plata, que puede encontrarse en depósitos pórfidos y alteraciones hidrotermales asociadas a los minerales de cobre.

La evaluación geometalúrgica de la zona de contacto argílico-caliza en yacimientos pórfidos es vital para identificar la distribución mineralógica del cobre y oro, lo que permite optimizar los procesos de concentración y recuperación

Tabla 2

Menas que presentan contenidos de cobre-oro

Mena	Fórmula química	Forma del oro presente	Ambiente geológico típico
Calcopirita	CuFeS_2	Oro en solución sólida o como partículas micronizadas	Depósitos tipo pórfido, vetas hidrotermales
Bornita	Cu_5FeS_4	Oro finamente disperso o ligado a la matriz mineral	Depósitos tipo pórfido
Calcosina	Cu_2S	Inclusiones de oro o asociación con mineralización secundaria	Enriquecimiento supergénico
Covelina	CuS	Inclusiones de oro o asociación con zonas auríferas secundarias	Zonas de oxidación, alteración hidrotermal
Enargita	Cu_3AsS_4	Oro como inclusiones microscópicas o asociado con sulfuros auríferos	Depósitos epitermales y pórfidos
Tetraedrita-Tenantita	$(\text{Cu},\text{Fe})_{12}(\text{Sb},\text{As})_4\text{S}_{13}$	Oro submicrométrico o en aleación con plata	Sistemas hidrotermales intermedios-altos

Nota: Meinert (2013), Cox et al., 2007 y Liu et al., 2018.

2.3.14. Clasificación de los reactivos

Son tres los principales grupos en los que se categorizan actualmente los reactivos de flotación. Estos conjuntos incluyen (Bulatovic, 2007):

- a. Los colectores**, que tienen como tarea principal otorgar características hidrofóbicas a las superficies de los minerales.
- b. Los modificadores**, que se utilizan para regular las condiciones de operación de los colectores y potencian su selectividad.
- c. Los espumantes**, que facilitan la creación de una espuma sólida, con un tamaño de burbujas adecuado para transportar los minerales hasta el concentrado.

Selectividad del proceso

Es esencial la selectividad al flotar menas de cobre-oro para optimizar la recuperación de ambos metales de gran valor, previniendo la recuperación excesiva de ganga o minerales no deseados. Esta selectividad está fuertemente influenciada por la mineralogía, la química del proceso y la adecuada selección y dosificación de reactivos (Fuerstenau & Han, 2003).

a. Superficie química del cobre-oro y su flotabilidad

Las superficies sulfídicas de minerales de cobre, como la calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4), calcosina (Cu_2S) y covelina (CuS), tienen un impacto directo en la interacción con reactivos de flotación. La existencia de grupos sulfurados en la superficie posibilita la adsorción de los colectores, lo que favorece la flotabilidad (Bulatovic, 2007).

La calcopirita suele oxidarse a nivel superficial, creando estratos que pueden restringir la adsorción de colectores y reducir su flotabilidad si no se regula el pH y las condiciones redox.

La bornita conserva una superficie más reactiva y estable, lo que promueve una flotabilidad más elevada.

La capacidad de flotación de los sulfuros de cobre se basa en el estado químico de su superficie, siendo la oxidación superficial un elemento crucial que puede reducir la eficacia de la flotación (Bulatovic, 2007).

b. El efecto del tamaño de partícula en la flotación

El tamaño de las partículas es un elemento crucial que influye en la recuperación y selectividad durante la flotación de minerales de cobre-oro. La molienda regula la liberación de minerales, facilitando la separación de los minerales de gran valor de la ganga (Wills & Finch, 2016).

Partículas de gran tamaño:

Suelen tener una recuperación reducida debido a su relación inferior entre superficie y volumen, lo que restringe la adhesión de las burbujas de aire y la eficacia del proceso de flotación. Además, las partículas de mayor grosor pueden tener una liberación mineralógica más reducida, lo que puede conducir a la recuperación de ganga no deseada (Wills & Finch, 2016).

Partículas finas:

Mejoran la liberación de minerales de gran valor, sin embargo, cuando las partículas son excesivamente pequeñas (<10 micras), pueden sufrir problemas de

sobreflotación y ser difíciles de recuperarse, debido a la elevada tensión superficial y el arrastre con el agua (Wills & Finch, 2016).

La recuperación en flotación se incrementa a medida que se disminuye el tamaño de la partícula hasta un límite, luego la flotación disminuye su eficiencia debido a la sobreflotación y a la adherencia de partículas pequeñas a la pulpa (Bulatovic, 2007).

c. Selección de colector y dosificación

En el proceso de flotación de sulfuros de cobre (calcopirita, bornita, calcosina), los colectores más empleados son los xantatos, gracias a su gran afinidad por superficies con sulfuros. El PAX (potassium amyl xanthate) y el SAX (sodium amyl xanthate) son ejemplos habituales (Wills & Finch, 2016).

Para potenciar la recuperación de minerales finos o de flotación complicada, se utilizan ditiofosfatos y recolectores terciarios como fosfinas o tioles, los cuales incrementan la selectividad y la recuperación.

Para el oro nativo o electrum relacionado, se emplean colectores particulares o mezclas con activadores que promueven la adsorción en la superficie metálica del oro.

La mezcla de xantatos y ditiofosfatos ha probado incrementar la recuperación y la selectividad en la flotación de sulfuros de cobre y oro (Bulatovic, 2007).

Tabla 3*Reactivos para la flotación de cobre-oro*

Tipo de reactivo	Función principal	Ejemplos comunes
Colectores	Favorecen la adhesión de los minerales útiles (Cu, Au) a las burbujas de aire.	Xantatos (PAX), tionocarbamato (Z-200), ditiocarbamatos, ditiofosfatos.
Espumantes	Generan y estabilizan la espuma en la celda de flotación.	MIBC (metil isobutil carbinol), alcoholes, poliglicoles
Activadores	Mejoran la reactividad de ciertos minerales que no responden bien a los colectores.	Sulfato de cobre (CuSO ₄) — activa esfalerita y molibdenita.
Depresores	Inhiben la flotación de minerales no deseados (ganga o sulfuros no valiosos).	Cianuro (NaCN), bisulfito de sodio (NaHSO ₃), goma guar (deprimir gangas).
Modificadores / Reguladores de pH	Ajustan el pH para optimizar la acción de otros reactivos	Cal (CaO), ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄), soda cáustica (NaOH)
Reactivos específicos para el oro	Aumentan la recuperación del oro libre o asociado	Colectores especializados (Aero 208, Aerophine 3418A)

Nota: Bulatovic (2007).**d. Selección del espumante para separación de cobre-oro**

El espumante es un agente crucial que estabiliza la espuma durante el proceso de flotación, facilitando la creación de burbujas firmes que llevan los minerales hidrofóbicos a la superficie para su recuperación. En el proceso de flotación de cobre-oro, el espumante debe ofrecer una espuma firme pero no excesiva, con el fin de optimizar la recuperación y la selectividad.

Tipos comunes de espumantes para flotar minerales de cobre-oro:

Los espumantes más populares son los alcoholes monohídricos y polímeros como el MIBC (metil isobutil carbinol), gracias a su excelente habilidad para generar espuma estable y de control sencillo.

Otros espumantes comprenden poliglicoles, éteres y ésteres, los cuales pueden utilizarse en función de la característica del mineral y las condiciones del proceso.

El MIBC es ampliamente conocido como el espumante favorito para flotar sulfuros de cobre, gracias a su estabilidad y baja toxicidad (Bulatovic, 2007).

Puntos de vista para la elección:

El espumante necesita ser adecuado para los colectores y depresores que se utilizan.

Es necesario regular la dosificación para prevenir una espuma excesiva o insuficiente, que podría impactar la selectividad y la recuperación.

El pH, la temperatura y la composición de la pulpa afectan el funcionamiento del espumante (Wills & Finch, 2016).

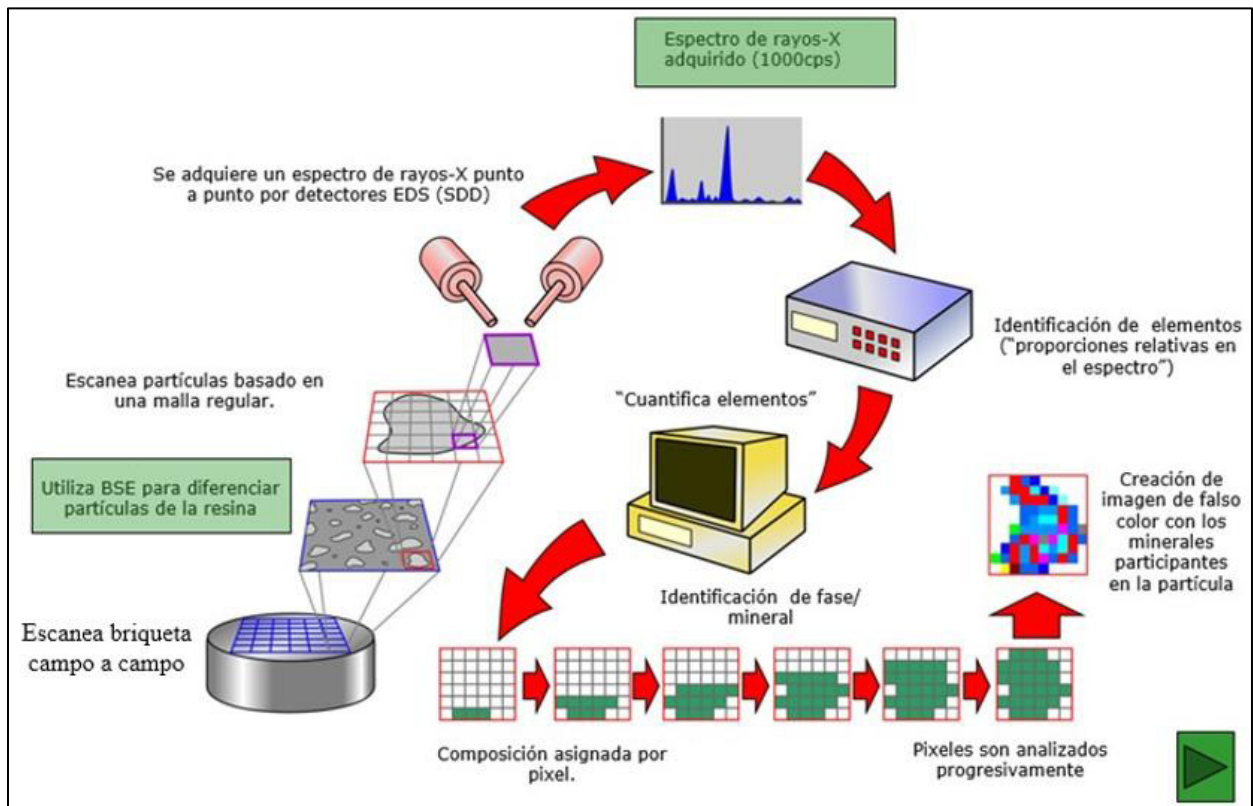
2.3.15. Mineralogía automatizada: QEMSCAN

El QEMSCAN fusiona:

Primero es el estudio de imágenes de electrones retrodispersados (BSE), las cuales se relacionan con imágenes en tonos de grises correspondientes al Z atómico medio del mineral. Continúa con la determinación de la composición química de los puntos excitados por el haz de electrones a través de la identificación de los rayos X propios de los elementos que componen el mineral.

Figura 3

Procedimiento de la tecnología QEMSCAN



Nota: Esquema del proceso de Mineralogía Automatizada (Flores, 2006).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de la investigación

Esta investigación se clasifica de la siguiente manera:

Tabla 4

Clasificación y niveles de la investigación

Clasificación de la Investigación	
Categoría	Tipo de Investigación
Enfoque	Cuantitativo
Alcance o Nivel	Explicativo (Causal)
Diseño	Experimental
Propósito	Aplicada

Nota. Adaptado de *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (pp. 6-141), por R. Hernández-Sampieri y C. Mendoza, 2018, McGraw-Hill e *Introducción a la metodología científica* (p. 23), por F. G. Arias, 2012, Editorial Episteme.

El estudio se llevó a cabo de manera experimental, dado que se utilizaron los conocimientos actuales sobre la caracterización del mineral, los procesos metalúrgicos de flotación de minerales de cobre y disseminados de oro, para solucionar problemas relacionados con la recuperación de Cobre y Oro.

El estudio fue de tipo experimental, ya que comprendió la caracterización mineralógica del mineral procedente de la zona de contacto entre arcillas y calizas, además del análisis de los equilibrios metalúrgicos de la planta, fundamentándose en las teorías y precedentes del tratamiento de minerales de cobre. Adicionalmente, se realizó el control, análisis e interpretación de las variables independientes y dependientes.

3.2. Variables de la investigación

Las variables consideradas en el proceso de separación de cobre y oro por el proceso de flotación se detallan a continuación:

3.2.1. Variable independiente

- % Sólidos
- Tiempo de flotación (min)

3.2.2. Variable dependiente

- Recuperación de cobre
- Recuperación de oro por flotación

Variables independientes constantes o controladas:

- Caracterización mineralógica.
- Mineralización en el contacto argílico-caliza.
- pH
- Densidad de pulpa (Kg/L)
- Tiempo de acondicionamiento (min)
- RPM de la celda de flotación (N° de vueltas por min.)
- Flujo de aire (L/min)

3.2.3. Matriz de operacionalización de variables

Se realizaron los balances metalúrgicos con los datos de las pruebas de flotación con el objetivo de analizar e identificar el impacto de las variables independientes y dependientes en la recuperación de cobre y oro, derivados de la fase de flotación de minerales. En el análisis de la información se utilizó el diseño factorial y el software Minitab 19 con el objetivo de valorar, interpretar y evaluar las variables.

Tabla 5*Operacionalización de Variables*

Variable	Tipo de variable	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida	Técnicas de recolección de datos / Instrumentos
Porcentaje de sólidos	Independiente	Condición de pulpa	Contenido de sólidos en la pulpa de flotación	% en peso	Preparación de pulpa Balanza digital Cálculo gravimétrico.
Tiempo de flotación	Independiente	Condición operativa	Duración del proceso de flotación	Minutos (min)	Cronómetro Registro experimental
Recuperación de cobre	Dependiente	Eficiencia metalúrgica	Porcentaje de cobre recuperado	%	Análisis químico Balance metalúrgico y hoja de cálculo
Recuperación de oro	Dependiente	Eficiencia metalúrgica	Porcentaje de oro recuperado	%	Análisis químico Balance metalúrgico y hoja de cálculo

Nota: Elaboración propia.

3.3. Unidad de análisis

La unidad de estudio se llevó a cabo con el mineral procedente de la zona de contacto Argílico-Caliza del yacimiento de Pórfido de Cobre, situado en el Distrito y Provincia de Hualgayoc-Cajamarca.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

Mineral proveniente de la región de contacto Argílico-Caliza del depósito tipo Pórfido de Cobre, situado en el Distrito y Provincia de Hualgayoc-Cajamarca.

El grupo de estudio quedó conformado por 150 muestras geológicas obtenidas de testigos de perforación ubicados en áreas de interacción entre la alteración argílica y caliza, en el área de estudio situada en el norte de Perú. Se han escogido estas muestras para su estudio geoquímico, mineralógico y metalúrgico, con la finalidad de evaluar la eficiencia de recuperación de cobre y oro.

3.4.2. Muestra

Estuvo compuesta por un conjunto representativo de rocas recolectadas en zonas con evidencias de alteración argílica en contacto con calizas, considerando criterios geológicos y de variabilidad mineralógica. Se tomaron aproximadamente entre 10 a 20 muestras iniciales, con un peso bruto de 1 a 5 kg cada una, las cuales fueron reducidas por cuarteo a una muestra analítica de 250 g, y posteriormente ensayadas (30–50 g) para análisis químicos, especialmente oro y cobre. El muestreo se ejecutó de forma sistemática o estratificada, según la distribución de las unidades litológicas y zonas mineralizadas.

3.4.3. Selección de la muestra – muestreo

Se aplicó un muestreo no aleatorio por criterios, dado que las muestras fueron escogidas de manera intencionada a partir de observadores de perforación y erupciones localizadas específicamente en el contacto entre arcilla y caliza. La elección se fundamentó en propiedades geológicas, mineralógicas y estructurales que señalaban un potencial superior de mineralización de cobre y oro. Este método permitió enfocar el análisis en las áreas más significativas y esenciales para los propósitos de la investigación.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para el desarrollo de la presente investigación, la estrategia metodológica central de recolección de datos estuvo fundamentada en la técnica de observación analítica, ejecutada de manera secuencial en etapas de campo y laboratorio. Esta técnica permitió recopilar información cuantitativa y sistemática sobre los atributos geológicos, mineralógicos y texturales del yacimiento porfídico. Se priorizó el análisis sistemático de la zona de contacto entre la alteración argílica y las unidades de caliza para correlacionar estas características con la respuesta metalúrgica del sistema.

Observación en Campo (Observación Directa Macroscópica)

En la etapa de trabajo de campo, se aplicó la observación directa y estructurada para identificar y describir las características litológicas, estructurales y mineralógicas de las rocas presentes en la zona de estudio. Esta observación permitió:

- Reconocer la distribución espacial del contacto argílico-caliza.
- Identificar visualmente los minerales metálicos presentes (como calcopirita, pirita, bornita) y sus asociaciones con minerales de ganga (cuarzo, carbonatos, arcillas).

- Registrar alteraciones hidrotermales características de la zona (argílica, silícica y propilítica).
- Recolectar muestras representativas para su posterior análisis en laboratorio.

Se emplearon fichas técnicas, mapas geológicos y herramientas de campo como brújulas, GPS y lupas de mano para documentar de manera sistemática las observaciones realizadas.

Observación en Laboratorio (Observación Indirecta o Instrumental)

Las muestras recolectadas fueron analizadas mediante técnicas de observación en laboratorio, orientadas a caracterizar la mineralización y su influencia en el proceso de recuperación de cobre y oro. La técnica aplicada incluyó:

- Análisis de imágenes mineralógicas (QEMSCAN): para cuantificar la distribución, asociación y grado de liberación de los minerales portadores de cobre y oro.

Esta técnica permitió relacionar las características mineralógicas del yacimiento con los resultados obtenidos en pruebas metalúrgicas, especialmente en el proceso de flotación, lo que facilitó el análisis de las variables que afectaron la recuperación de los metales de interés.

Registro y Sistematización de Datos

Todos los datos obtenidos mediante la observación fueron registrados en hojas de campo, bases de datos digitalizadas y formatos de análisis mineralógico. La información recolectada fue procesada y analizada para establecer correlaciones entre la mineralogía observada y la eficiencia del proceso de recuperación por flotación.

Tabla 6*Matriz de instrumentos*

Técnica	Instrumento(s)	Objetivo	Tipo de Datos Recolectados
Observación directa en campo	Fichas técnicas, mapas geológicos, brújula, GPS, lupa de mano	Identificar características litológicas, estructurales y mineralógicas del área de estudio.	Datos descriptivos sobre litología, alteración, mineralización y ubicación geográfica.
Recolección de muestras	Martillo geológico, bolsas de muestreo, etiquetas, coordenadas GPS	Obtener muestras representativas del contacto argílico-caliza para análisis en laboratorio.	Muestras físicas etiquetadas con datos de ubicación y contexto geológico.
Observación petrográfica	Microscopio óptico de polarización	Analizar texturas, asociaciones minerales y tipos de alteración.	Microtexturas, minerales presentes, alteraciones identificadas.
Análisis mineralógico automatizado	QEMSCAN	Cuantificar distribución, asociación y liberación de minerales de interés.	Datos experimentales sobre liberación, asociación y contenido mineral.
Sistematización de datos	Hojas de campo, software de bases de datos, formatos digitales de análisis	Registrar, organizar y analizar la información geológica y mineralógica recolectada.	Base de datos estructurada y relaciones entre mineralogía y recuperación metalúrgica

Nota: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Análisis químico y mineralógico del mineral

Análisis químico obtenido del mineral argílico-caliza.

Tabla 7

Resultados del análisis químico de cabeza para realizar las pruebas de flotación

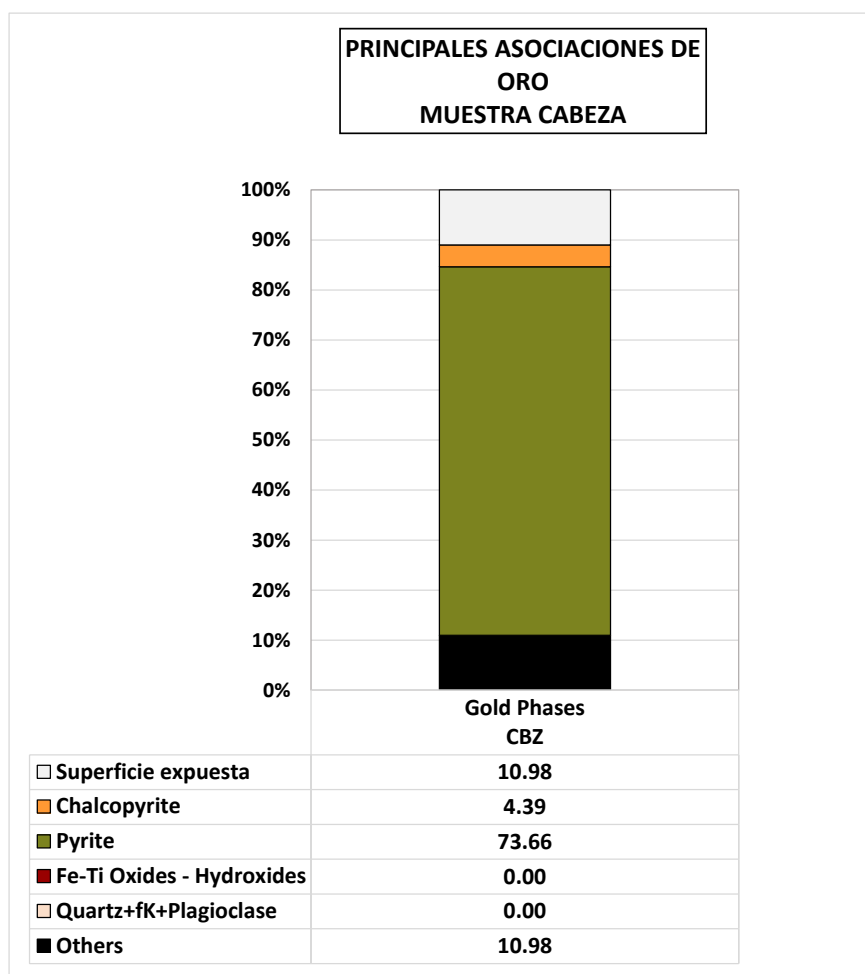
Muestra	Leyes							
	Cu (%)	Au (g/TM)	Fe (%)	S (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	LOI (%)
	0.49	0.83	6.2	3	30.1	8.2	20	2.8

Nota: Los análisis químicos se llevaron a cabo utilizando la técnica espectrometría ICP-AES, para Cu, Fe, S, Al, Ca, Mg, K, Na, SiO₂, As (300ppm), LOI por método gravimétrico y la técnica de ensayo al fuego con acabado por AAS para el Au.

El hierro total (%) está asociado a sulfuros como pirita o magnetita; su presencia puede influir en la flotación. El azufre total y soluble S (% total y soluble), indica contenido de sulfuros (como pirita, calcopirita); importante para la reactividad del mineral. Respecto a la sílice (SiO₂, %), está presente en ganga o zonas silicificadas; puede afectar la liberación de minerales metálicos. La alúmina (Al₂O₃, %), representa minerales arcillosos (como caolinita o illita). El calcio (CaO, %), representa la caliza (carbonato de calcio). Magnesio (MgO, % = 1.2%), asociado a dolomita o minerales de alteración propilítica. Potasio (K₂O, % = 1.1%), asociado a feldespatos o micas; puede indicar tipo de alteración (potásica vs. argílica). Pérdida por calcinación (LOI, (%), indica contenido de volátiles, como agua en arcillas o CO₂ en carbonatos; útil para caracterización general.

Figura 4

Principales asociaciones de oro Muestra de cabeza



Nota: Imagen proporcionada por el laboratorio de análisis mineralógico.

4.1.2. Caracterización del mineral-identificación de fases minerales

El análisis petrográfico realizado mediante microscopía óptica de polarización permitió identificar y caracterizar las fases minerales presentes en las muestras recolectadas en el contacto entre la alteración argílica y las unidades calizas. Este estudio se centró en la identificación de minerales metálicos (sulfuros), minerales de ganga, y minerales indicadores de alteración hidrotermal.

Bajo luz polarizada y en secciones delgadas, se identificaron las siguientes fases minerales principales:

Minerales metálicos (sulfuros)

- **Calcopirita (CuFeS_2):** Mineral principal portador de cobre. Se presenta en forma de granos subhedrales a euhedrales, frecuentemente asociados a pirita o cuarzo. Ocasionalmente forma inclusiones en carbonatos o arcillas.
- **Pirita (FeS_2):** Abundante en zonas de alteración argílica. Cristales subhedrales con bordes irregulares, a veces mostrando texturas de recrystalización. Asociada comúnmente con calcopirita, actuando como mineral de acompañamiento.
- **Bornita (Cu_5FeS_4):** Presente en menor proporción. Aparece en asociación directa con calcopirita o como producto de reemplazo parcial. Textura masiva o diseminada.

Minerales de ganga

- **Cuarzo (SiO_2):** Mineral predominante de la ganga. Se encuentra en forma de venillas y matriz intergranular. Baja birrefringencia y extinción ondulante característica.
- **Carbonatos (principalmente calcita):** Abundantes en la unidad caliza. Se reconocen por su alto relieve y colores de interferencia bajos. Frecuentemente alterados o reemplazados por arcillas.
- **Arcillas (caolinita, illita):** Indicadores claros de alteración argílica. Presentan texturas finamente granulares, en agregados masivos o como relleno de fracturas. Bajo relieve y colores de interferencia bajos.

Minerales accesorios y de alteración

- **Clorita:** Asociada a zonas de alteración propilítica periférica. Interferencia en tonos verdes a azules, en agregados fibrosos.
- **Sericita (mica fina):** Común en zonas con alteración intermedia a fuerte. Alta birrefringencia y láminas finas, fácilmente orientadas.
- **Óxidos de hierro (hematita, limonita):** Aparecen como productos de oxidación de sulfuros, especialmente en fracturas y bordes de granos.

4.1.2.1. Asociación y ocurrencia del oro en el mineral

El análisis mineralógico detallado, realizado mediante el equipo QEMSCAN, permitió establecer la forma de ocurrencia y asociación del oro en el mineral estudiado. A pesar de que el oro no fue identificado como partículas libres visibles, su presencia fue confirmada indirectamente a través de su asociación textural con minerales sulfurados, principalmente pirita microcristalina.

Los resultados del análisis modal por QEMSCAN (Tabla 10), así como las imágenes obtenidas mediante las funciones BMA y PMA, evidencian una alta proporción de pirita microcristalina, particularmente en la muestra CST, donde alcanza valores superiores al 30 %. Esta pirita presenta tamaños de grano finos, alta densidad de microfracturas y una íntima asociación con calcopirita, óxidos de hierro y minerales de alteración, lo que favorece la oclusión del oro en su estructura cristalina.

La ocurrencia del oro en forma de oro ocluido en pirita microcristalina es característica de sistemas hidrotermales con fuerte alteración argílica, donde el oro queda encapsulado a nivel submicroscópico dentro de la red cristalina de la pirita o en inclusiones extremadamente finas, imposibles de liberar por molienda convencional. Este

tipo de asociación explica la ausencia de oro libre y su comportamiento refractario parcial durante los procesos metalúrgicos.

Asimismo, la presencia de pirita microcristalina asociada a minerales de alteración como sericita, clorita y arcillas (caolinita–illita), observado con el equipo QEMSCAN, refuerza la interpretación de que el oro se encuentra química y texturalmente ligado a fases sulfuradas finas, lo cual condiciona su recuperación mediante flotación convencional.

Desde el punto de vista metalúrgico, esta forma de ocurrencia del oro implica que su recuperación estará estrechamente vinculada a la flotación de la pirita portadora, y no únicamente a la calcopirita. En consecuencia, el control de la liberación de la pirita microcristalina, el tamaño de molienda y la selección de reactivos adquieren un rol fundamental para maximizar la recuperación del oro asociado.

Tabla 8

Caracterización mineralógica

Calcopirita (CuFeS_2)	Sulfuro metálico	Isótropa, color amarillo latón, alto brillo metálico	Diseminada o asociada a pirita y cuarzo	Principal portador de cobre
Pirita (FeS_2)	Sulfuro metálico	Isótropa, color amarillo pálido, mayor dureza, sin alteración interna	Masiva o granular, asociada a calcopirita	Sulfuro acompañante; puede consumir reactivos en flotación
Bornita (Cu_5FeS_4)	Sulfuro metálico	Tono rojizo a pardo bajo luz reflejada, anisotropía débil	Asociada a calcopirita, en bordes o como reemplazo parcial	Portador secundario de cobre; indica zonas más ricas
Cuarzo (SiO_2)	Mineral de ganga	Incoloro, extinción ondulante, birrefringencia baja	En matriz o venillas; asociado a sulfuros	Ganga común; puede encerrar sulfuros
Calcita (CaCO_3)	Carbonato (caliza)	Interferencia de orden superior (blanco perlado), birrefringencia extrema, clivaje perfecto	Masiva o granular, con reemplazo parcial por arcillas	Roca huésped; contacto con argilización
Caolinita / Illita	Arcillas (alteración)	Bajo relieve, birrefringencia muy baja, aspecto terroso	Agregados masivos, relleno de fracturas o venillas	Indicadores de alteración argílica; afectan negativamente la flotación
Clorita	Silicato de Fe-Mg	Interferencia verde/azul, relieve moderado	Agregado fibroso o escamoso	Alteración propilítica; no afecta directamente, pero indica zonificación hidrotermal
Sericita	Mica fina	Interferencia plateada, birrefringencia alta	Láminas orientadas en zonas de alteración intensiva	Asociada a alteración intermedia; puede interferir en la flotación
Hematita / Limonita	Óxidos/hidróxidos	Color pardo rojizo, opacos, anisotropía débil o nula	Fracturas o bordes de sulfuros, producto de oxidación	Indicadores de oxidación; no deseados en mineral primario

Nota: Información proporcionada por el laboratorio de microscopía óptica.

En la Tabla 9 se muestra la distribución volumétrica porcentual del mineral en base a la caracterización mineralógica por microscopía óptica.

Tabla 9

Distribución volumétrica porcentual del mineral en estudio

Fase Mineral	Tipo	Distribución Volumétrica (%)	Observaciones
Cuarzo (SiO ₂)	Ganga / Silicato	30%	Principal componente de matriz; presente en venillas y diseminado.
Calcita (CaCO ₃)	Carbonato / Caliza	25%	Componente dominante en la unidad caliza; parcialmente reemplazada.
Arcillas (Caolinita, Illita)	Alteración / Arcillas	15%	Asociadas a alteración argílica avanzada; intersticiales y en fracturas.
Calcopirita (CuFeS ₂)	Sulfuro metálico	10%	Principal mineral de cobre; diseminada o asociada a cuarzo/pirita.
Pirita (FeS ₂)	Sulfuro metálico	8%	Mineral secundario; común en zonas de alteración.
Bornita (Cu ₅ FeS ₄)	Sulfuro metálico	3%	Mineral accesorio; presente en zonas localizadas con mayor Cu.
Sericita	Mica fina / Alteración	4%	Presente en zonas de fractura y alteración intermedia.
Clorita	Alteración propilítica	3%	Asociada a bordes o zonas de transición hidrotermal.
Óxidos (Hematita, Limonita)	Oxidación superficial	2%	Productos de alteración secundaria u oxidación de sulfuros.
TOTAL		100%	

Nota: Información proporcionada por el laboratorio de microscopía óptica.

La Tabla 10 muestra el análisis mineralógico modal por QEMSCAN se desarrolló mediante la adquisición de data usando la función BMA (Bulk Mineral Analysis).

Tabla 10

Mineralogía modal (BMA)

Minerales	CAB	CST	RST
Chalcopyrite	1.31	0.55	0.15
Bornite	0.01	0.01	0.01
Chalcocite	0.00	0.00	0.00
Covellite	0.01	0.01	0.00
Tennantite	0.0	0.04	0.00
Enargite	0.01	0.01	0.00
Pyrite	4.13	12.66	2.28
Microcrystalline Pyrite	8.16	33.74	4.97
Sphalerite	0.06	0.02	0.01
Magnetite	0.9	0.44	1.04
Hematite	1.32	0.49	1.7
Goethite-Limonite	4.78	3.06	5.57
Fe-Ti Oxides	0.29	0.23	0.27
Quartz	55.36	29.21	62.30
K-Feldspar	7.88	6.01	8.17
Plagioclase (Na-)	1.00	0.78	0.86
Montmorillonite	9.69	6.02	8.73
Micas	0.87	0.64	0.49
Si-Al Clays	0.8	1.09	0.55
Calcite	0.4	0.96	0.27
Apatite	0.37	0.28	0.31
Clinocllore	0.4	0.31	0.45
Clays	0.07	0.05	0.08
Other Sulphides	0.01	0.05	0.01
Other Silicates	0.4	0.21	0.33
Other Carbonates	0.06	0.07	0.05
Other Phosphates	0.01	0.01	0.01
Other Sulfates	0.01	0.02	0.01
Others	1.67	3.03	1.39
Total	100	100	100

Nota: Información proporcionada por el laboratorio de análisis mineralógico

Figura 5

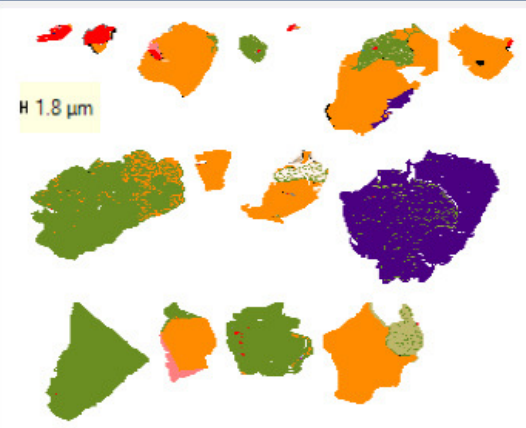
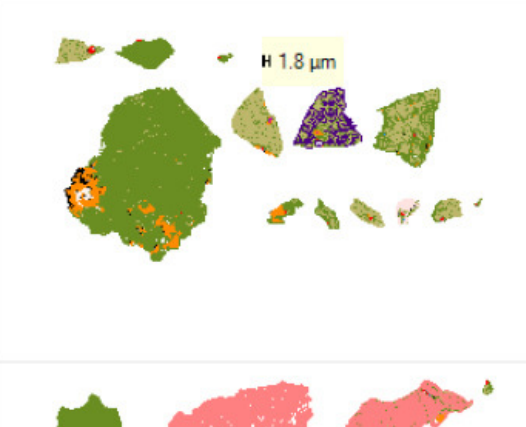
Asignación de colores por mineral. Lectura QEMSCAN usando la función SMS (Specific Mineral Search)

 Gold Phases	 Pyrite	 K-Feldspar
 Silver Phases	 Pyrite-Altered	 Microcline
 Chalcoppyrite	 Pyrite-Clay Mixed	 Plagioclase (Na-)
 Bornite	 Microcrystalline Pyrite	 Muscovite
 Covellite	 Magnetite	 Phlogopite
 Chalcocite	 Hematite	 Biotite
 Enargite	 Goethite-Limonite	 Illite
 Tennantite	 Quartz	 Clinocllore

Nota: Imagen proporcionada por el laboratorio de análisis mineralógico.

Figura 6

Principales asociaciones de los minerales de Au

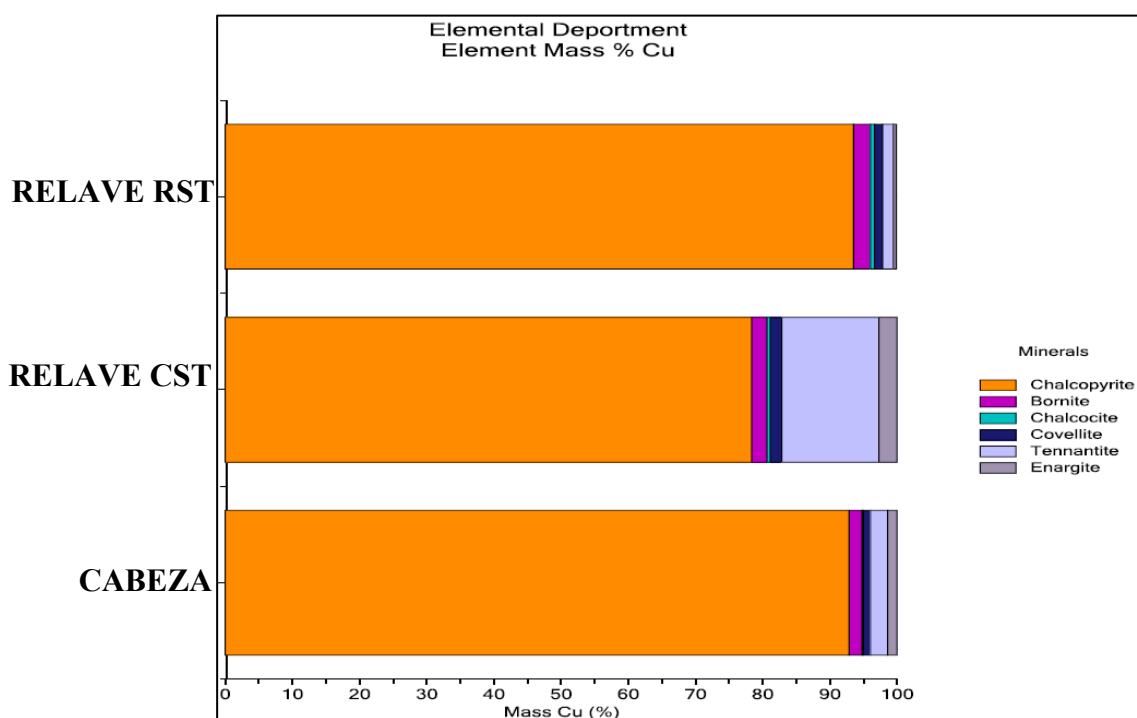
Flujo	Asociaciones de los minerales de Au	Partículas principales de Au y sus asociaciones
CAB	~41% Asociado a pirita microcristalina como finas inclusiones (<20µm).	
	~29% Ocurre como partículas libres (>40µm).	
	~19% Asociados a calcopirita como finas inclusiones (<10µm).	
	~10% Asociados a óxidos de Fe como fina inclusión (<10µm).	
	~1% Asociados a micas fina inclusión (<10µm).	
CST	~64% Asociado a pirita microcristalina como finas inclusiones (<20µm).	
	~16% Asociado a pirita como finas inclusiones (<20µm).	
	~5% Asociados a calcopirita como finas inclusiones (<10µm).	
	~10% Ocurre como partículas libres (>40µm).	
	~5% Asociados a cuarzo/feldespato-K como fina inclusión (<10µm).	
RST	~33% Asociados a pirita microcristalina como finas inclusiones (<5µm).	
	~10% Asociados a cuarzo/feldespato-K como fina inclusión (<10µm).	
	~10% Asociados a óxidos de Fe como fina inclusión (<10µm).	

Nota: Imagen proporcionada por el laboratorio de análisis mineralógico.

El análisis mineralógico cuantitativo por QEMSCAN se desarrolló mediante la adquisición de data usando BMA (Bulk Mineral Analysis) y cualitativo usando PMA (Particle Mineral Analysis), como se observa en la Figura 7.

Figura 7

Ocurrencia de minerales Cu. Análisis cuantitativo y cualitativo (BMA y PMA)



Nota: Imagen proporcionada por el laboratorio de análisis mineralógico.

CABEZA: se observa la ocurrencia mineralógica de pirita dentro de los valores habituales. Se observa considerable presencia de hematita ~1% y goethita ~5% (ver Tabla 10), las cuales presenta asociación con la calcopirita considerable.

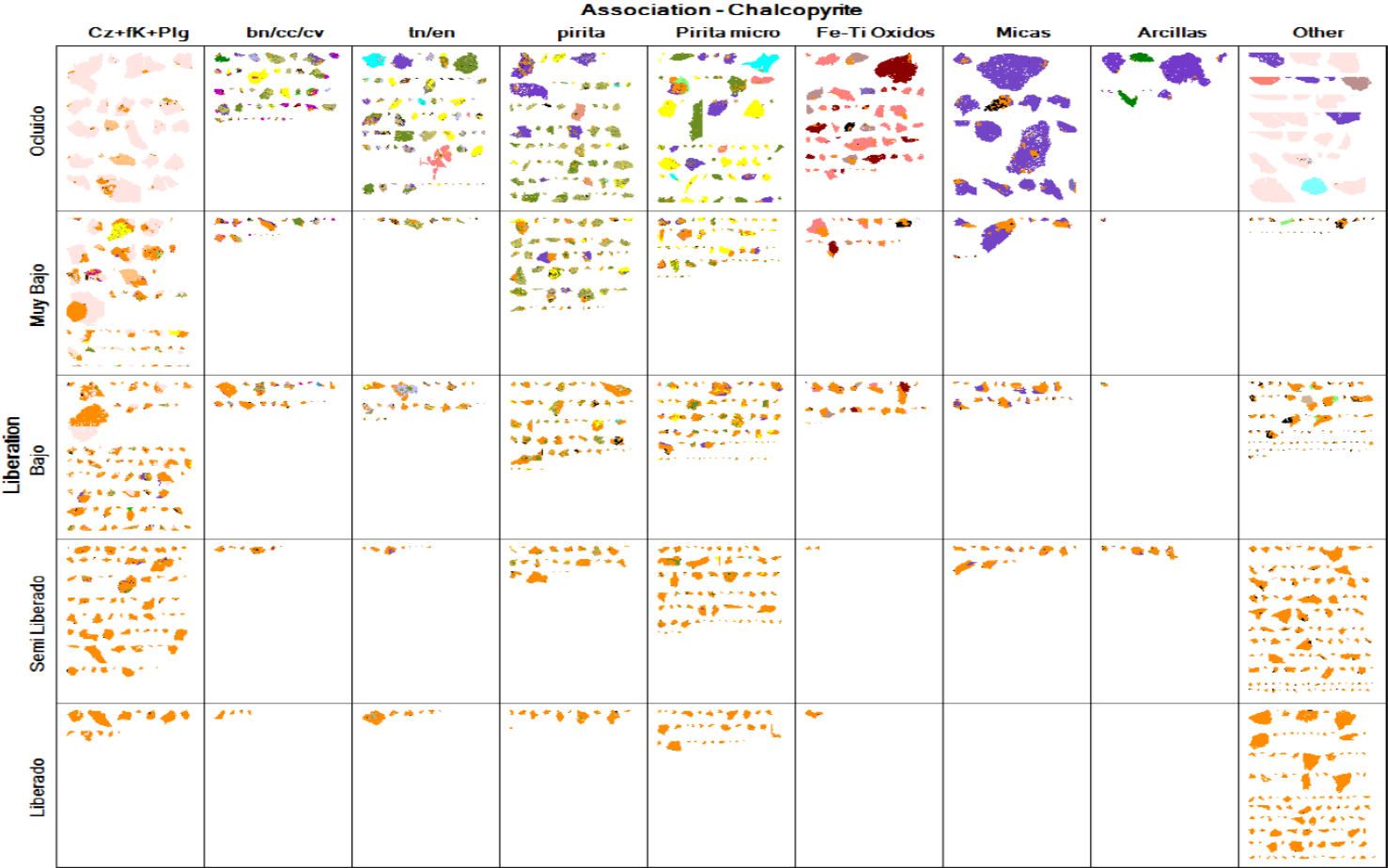
RELAVE RST: se observa que la calcopirita que no se recupero era gruesa (p80 ~60 μm) principalmente asociada a cuarzo, feldespato-K y óxidos de Fe, con intercrecimientos que no favorecían a la flotación de dichas partículas mixtas por el tamaño de las mismas partículas.

RELAVE CST: se observa partículas de calcopirita fina (p80 ~30 μm) principalmente asociada a pirita microcristalina, pirita, hematita, goethita y micas.

En ambos relaves se observa considerable cantidad de calcopirita libre con tamaños menores 30 μm . También en el RST considerable ocurrencia de partículas de calcopirita totalmente liberadas con tamaños mayores a 130 μm .

Figura 8

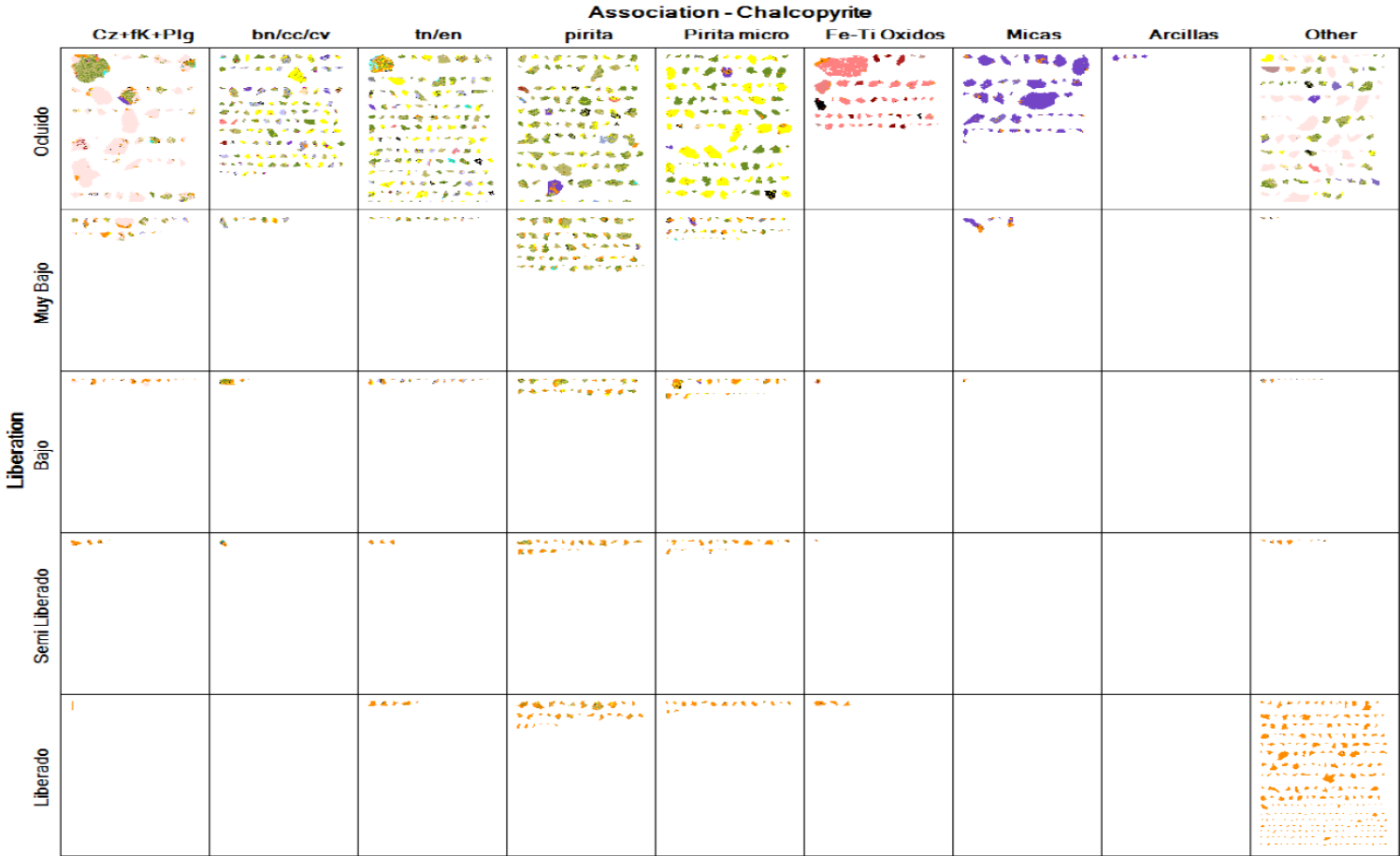
Asociaciones vs liberación de la calcopirita en la muestra de Cabeza.



Nota: Imagen proporcionada por el laboratorio de análisis mineralógico.

Figura 9

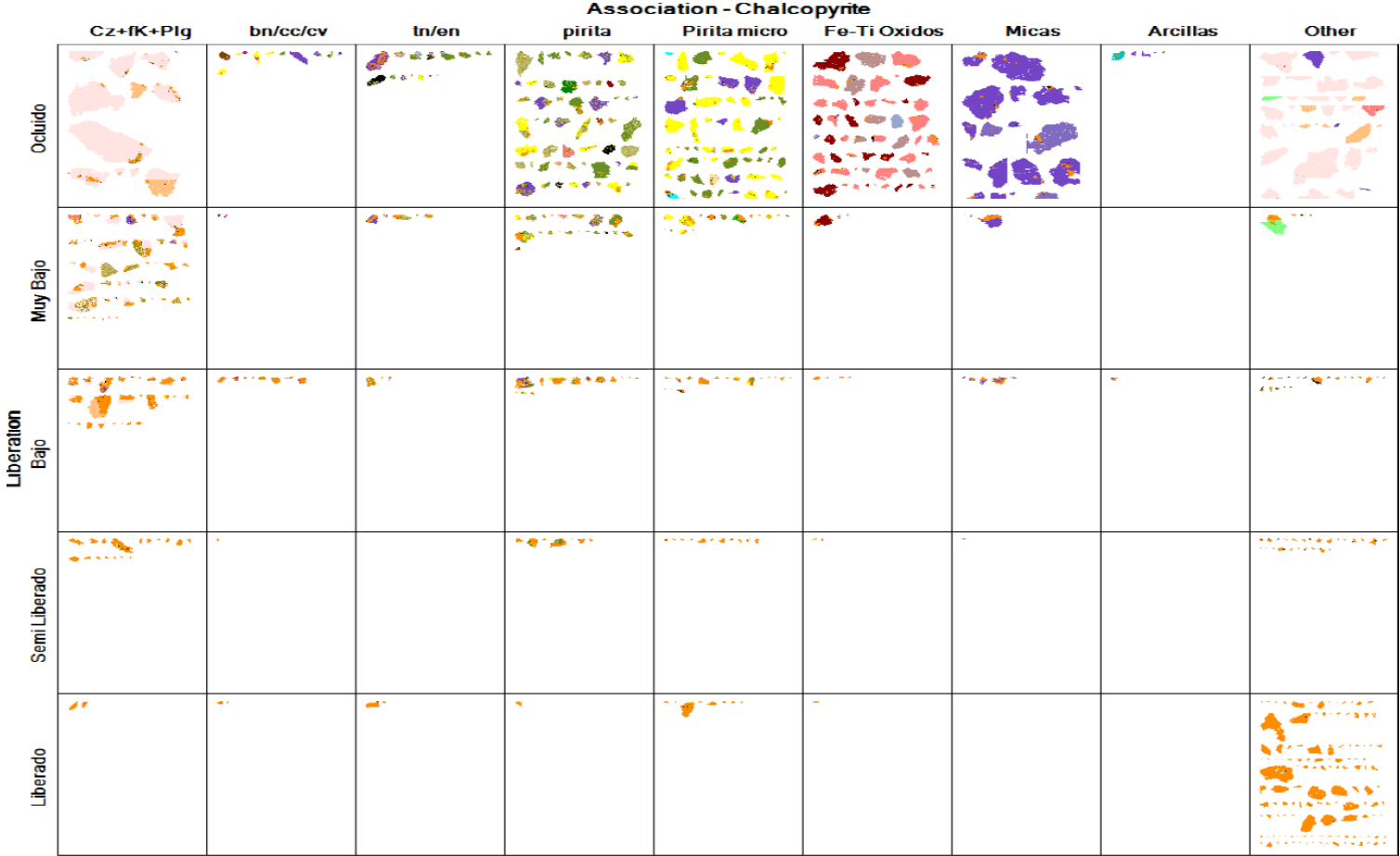
Asociaciones vs liberación de la calcopirita en la muestra de Relave CST



Nota: Imagen proporcionada por el laboratorio de análisis mineralógico.

Figura 10

Asociaciones vs liberación de la calcopirita en la muestra de Relave RST



Nota: Imagen proporcionada por el laboratorio de análisis mineralógico.

4.1.3. Resultados de flotación selectiva

Se realizaron pruebas metalúrgicas variando pH y dosis de reactivos, tiempo de flotación y % de sólidos. En la Tabla 11 se muestran las condiciones operativas para realizar las pruebas de flotación:

Tabla 11

Condiciones de operación para el proceso de flotación de cobre-oro

Parámetro	Colector Xantatos	Colector D-771	Colector AP-9865	Espumante H-2255
% de sólidos en pulpa	28 – 35 %	28 – 35 %	28 – 35 %	28 – 35 %
Dosis (g/t)	7.27 g/TM	4.59 g/TM	5.30 g/TM	9.72 g/TM
Tiempo óptimo de flotación	8 – 10 minutos	10 – 12 minutos	10 – 12 minutos	—
pH óptimo	10 – 10.5	9.5 – 10	9 – 10	9 – 10.5
Efecto del pH en recuperación	Alta recuperación de Cu a pH >10; baja selectividad con Fe (pirita)	Mejor selectividad Cu/Pirita a pH ~10	Alta recuperación de Au y Cu en rangos de pH 9–10	Mejora la estabilidad de espuma en todo el rango de pH
Observaciones operativas	Requiere control de pirita; fuerte colector para sulfuros	Mejor performance en minerales con ganga arcillosa	Efectivo en liberación fina de Au; buena penetración	Controlar exceso para evitar espumas muy persistentes

Nota: Elaboración propia.

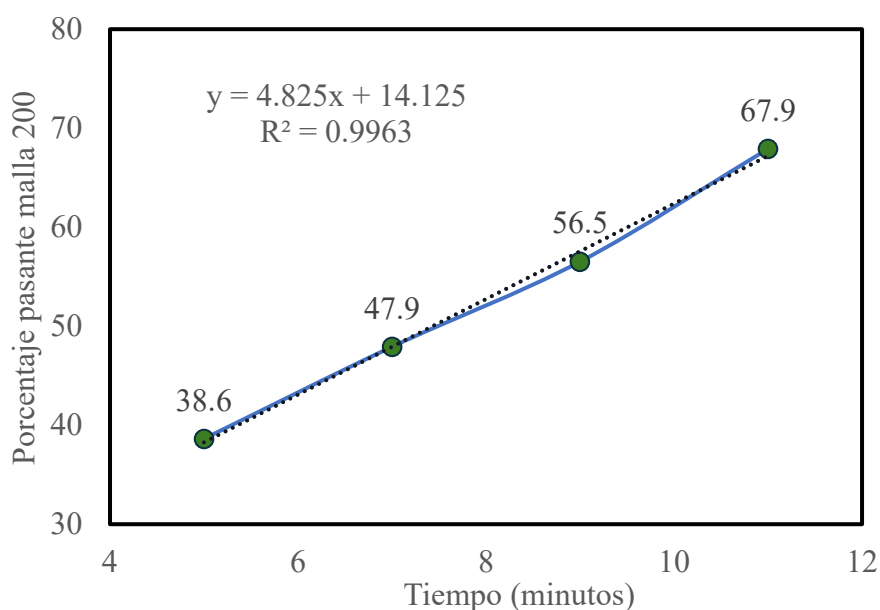
La Figura 11 muestra la curva de moliendabilidad que representa al tamaño de partícula del mineral a diferentes tiempos de molienda, donde esta se llevó a cabo en un molino de bolas tipo Denver (laboratorio), se realizaron cuatro pruebas de molienda en los tiempos 5, 7, 9 y 11 minutos.

Obteniendo de esta una ecuación de moliendabilidad ($y = 4.825x + 14.125$, $R^2 = 0.9963$).

El tamaño de partícula para realizar las pruebas de flotación fue de 55% menos malla 200.

Figura 11

Curva de moliendabilidad del mineral argílico-caliza



Nota: Elaboración propia.

4.1.3.1. Efecto del pH sobre la recuperación

Se determinó el efecto del pH en la eficiencia de recuperación de cobre y oro mediante el proceso de flotación, utilizando reactivos específicos (xantatos, D-771, AP-9865 y espumante H-2255) en muestras procedentes del contacto argílico-caliza.

Se utilizaron muestras representativas del mineral previamente chancadas, homogeneizadas y molidas a una granulometría primaria de 55% -malla 200 (aproximadamente 140 μm) y molienda secundaria al concentrado rougher de 88% -malla 325 (aproximadamente 50 μm).

La pulpa se preparó con 32 % de sólidos en peso, volumen total de flotación: 2 L.

El pH se ajustó utilizando soluciones de cal (Ca(OH)_2) para elevarlo, y ácido sulfúrico (H_2SO_4) para reducirlo.

Se evaluó el comportamiento metalúrgico variando el pH entre 9.0 y 10.5, manteniendo constantes los siguientes parámetros:

- Colector: AP-9865 (5.30 g/TM)
- Espumante: H-2255 (9.72 g/TM)
- % de sólidos en pulpa: 32%
- Tiempo de flotación: 11 minutos

En las Tablas del 12 al 15 se muestran los balances metalúrgicos realizados al obtener los datos de las experimentaciones, variando el pH (9, 9.5, 10 y 10.5) de la pulpa de flotación.

Tabla 12*Balance metalúrgico de flotación Cu-Au a un pH de 9*

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino (g)		Recuperación %		Ratio
			Cu	Au (g/TM)	Cu	Au	Cu	Au	
Cabeza	2000	100							
Concentrado Cu	48	2.5	15.30	17.20	7.34	0.000826	75.59	49.87	41.67
Relave	1952	97.6	0.122	0.425	2.372	0.000830	24.41	50.13	
Cabeza calculada			0.49	0.83	9.72	0.001655			

Nota: Elaboración propia.**Tabla 13***Balance metalúrgico de flotación Cu-Au a un pH de 9.5*

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino (g)		Recuperación %		Ratio
			Cu	Au (g/TM)	Cu	Au	Cu	Au	
Cabeza	2000	100							
Concentrado Cu	44	2.2	16.30	18.96	7.17	0.000834	76.72	51.32	45.45
Relave	1956	97.8	0.111	0.405	2.176	0.000791	23.28	48.68	
Cabeza calculada			0.47	0.81	9.35	0.001626			

Nota: Elaboración propia.

Tabla 14*Balance metalúrgico de flotación Cu-Au a un pH de 10*

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino (g)		Recuperación %		Ratio
			Cu	Au (g/TM)	Cu	Au	Cu	Au	
Cabeza	2000	100							
Concentrado Cu	40	2	18.21	20.22	7.28	0.000809	77.31	51.81	50.00
Relave	1960	98	0.109	0.38	2.138	0.000752	22.69	48.19	
Cabeza calculada			0.47	0.78	9.42	0.001561			

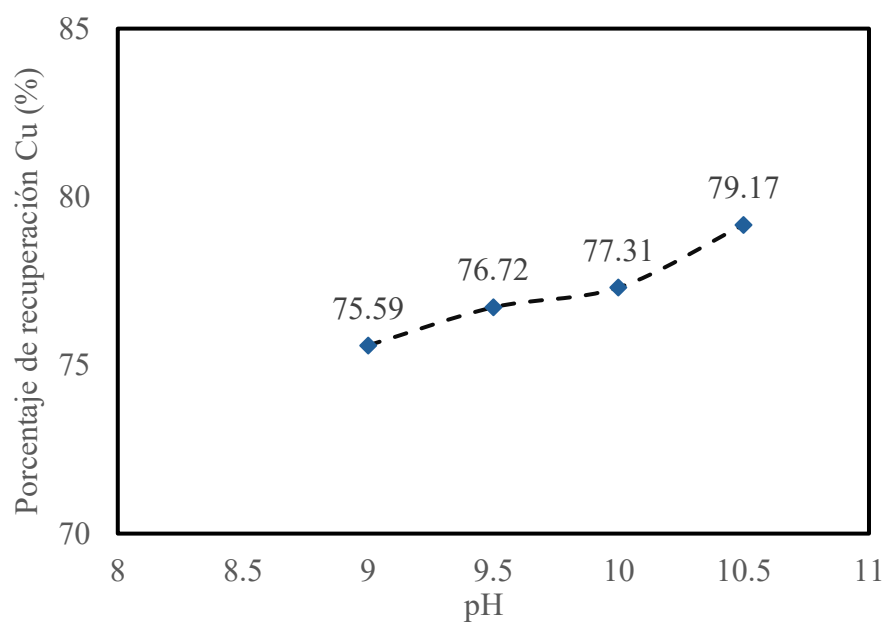
Nota: Elaboración propia.**Tabla 15***Balance metalúrgico de flotación Cu-Au a un pH de 10.5*

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino (g)		Recuperación %		Ratio
			Cu	Au (g/TM)	Cu	Au	Cu	Au	
Cabeza	2000	100							
Concentrado Cu	36	1.8	20.92	21.48	7.53	0.000773	79.17	52.01	55.56
Relave	1964	98.2	0.101	0.363	1.982	0.000713	20.83	47.99	
Cabeza calculada			0.48	0.74	9.51	0.001487			

Nota: Elaboración propia.

Figura 12

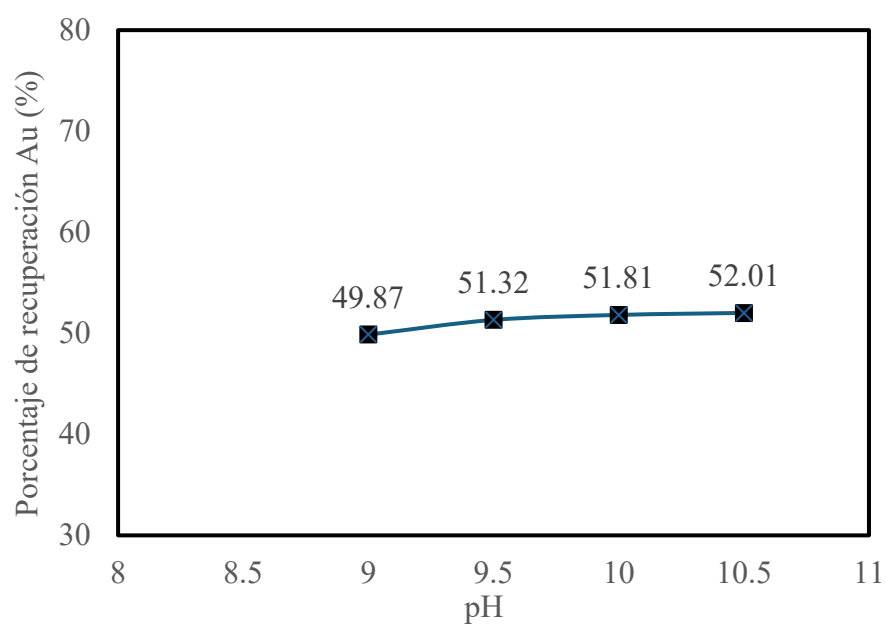
Efecto del pH vs la recuperación de cobre



Nota: Elaboración propia.

Figura 13

Efecto del pH vs la recuperación de oro



Nota: Elaboración propia.

4.1.3.2. Efecto del % de sólidos y tiempo de flotación

Se desarrollaron pruebas metalúrgicas de flotación donde se mantuvo el pH constante (10.5), así como el espumante H-2255 (9.72 g/TM), dosis de colector AP-9865 (5.30 g/TM), y se utilizó colector xantato isopropílico de sodio, variando los parámetros: porcentaje de sólidos (28, 30, 32 y 35%), y tiempo de flotación (9, 10, 11 y 12 minutos). Con la finalidad de evaluar la recuperación de cobre-oro, bajo las condiciones óptimas.

En las Tablas del 18 al 21 se muestran los balances metalúrgicos realizados al obtener los datos de las experimentaciones, variando el porcentaje de sólidos, tiempo de flotación manteniendo el pH de la pulpa.

Esto permitió realizar un diseño factorial 2^2 , obteniendo gráficas de efectos principales, interacción, Pareto, normal de efectos, ecuaciones de regresión y tablas ANOVA (ver Tabla 26 y 29).

Tabla 16

Factores y niveles

Factor	Descripción	Nivel bajo (-1) Nivel alto (+1)	
A	% de sólidos	28	35
B	Tiempo de flotación (min)	9	12

Nota: Elaboración propia.

Tabla 17

Matriz de Codificación Real para las 4 Condiciones

Prueba	Factor A: % de Sólidos	Factor B: Tiempo (min)
Condición 1	28%	9 min
Condición 2	35%	9 min
Condición 3	28%	12 min
Condición 4	35%	12 min

Nota: Elaboración propia.

Tabla 18*Balance metalúrgico de flotación Cu-Au: 28% sólidos, 9 min flotación*

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino (g)		Recuperación %		Ratio
			Cu	Au (g/TM)	Cu	Au	Cu	Au	
Cabeza	2000	100							
Concentrado Cu	36	1.8	20.94	22.31	7.54	0.000803	79.18	51.61	55.56
Relave	1964	98.2	0.096	0.382	1.894	0.000751	20.82	48.39	
Cabeza calculada			0.47	0.78	9.43	0.001554			

Nota: Elaboración propia.**Tabla 19***Balance metalúrgico de flotación Cu-Au: 35% sólidos, 9 min flotación*

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino (g)		Recuperación %		Ratio
			Cu	Au (g/TM)	Cu	Au	Cu	Au	
Cabeza	2000	100							
Concentrado Cu	34.5	1.73	21.33	23.46	7.36	0.000810	81.00	54.20	57.95
Relave	1966	98.27	0.088	0.348	1.73	0.000684	19.00	45.80	
Cabeza calculada			0.45	0.75	9.09	0.001494			

Nota: Elaboración propia.

Tabla 20*Balance metalúrgico de flotación Cu-Au: 28% sólidos, 12 min flotación*

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino (g)		Recuperación %		Ratio
			Cu	Au (g/TM)	Cu	Au	Cu	Au	
Cabeza	2000	100							
Concentrado Cu	33.5	1.68	22.35	23.78	7.49	0.000797	85.50	52.00	59.70
Relave	1966.5	98.33	0.065	0.374	1.27	0.000735	14.50	48.00	
Cabeza calculada			0.44	0.77	8.76	0.001532			

Nota: Elaboración propia.**Tabla 21***Balance metalúrgico de flotación Cu-Au: 35% sólidos, 12 min flotación*

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino (g)		Recuperación %		Ratio
			Cu	Au (g/TM)	Cu	Au	Cu	Au	
Cabeza	2000	100							
Concentrado Cu	34	1.7	23.98	23.89	8.15	0.000812	87.27	54.64	58.82
Relave	1966	98.3	0.061	0.343	1.189	0.000674	12.73	45.36	
Cabeza calculada			0.47	0.74	9.34	0.001486			

Nota: Elaboración propia.

Tabla 22*Tabla de condiciones y resultados de pruebas metalúrgicas realizadas*

Condición de Prueba	Recuperación Cu (%)	Recuperación Au (%)
pH 9.0	75.59	49.87
pH 9.5	76.72	51.32
pH 10.0	77.31	51.81
pH 10.5	79.17	52.01
28% sólidos, 9 min	79.18	51.61
35% sólidos, 9 min	81.00	54.20
28% sólidos, 12 min	85.50	52.00
35% sólidos, 12 min	87.27	54.64

Nota: Elaboración propia.**Tabla 23***Respuestas: Recuperación de cobre (%) y Recuperación de oro (%)*

Condición	Recuperación Cu (%)	Recuperación Au (%)	Notas
28% sólidos, 9 min	79.18	51.61	Condición 1
35% sólidos, 9 min	81.00	54.20	Condición 2
28% sólidos, 12 min	85.50	52.00	Condición 3
35% sólidos, 12 min	87.27	54.64	Condición 4

Nota: Proporcionada por el software Minitab 2019

Respuestas

- Recuperación de cobre (%)
- Recuperación de oro (%)

4.1.3.3. Análisis factorial de flotación selectiva cobre-oro (Minitab 2019)

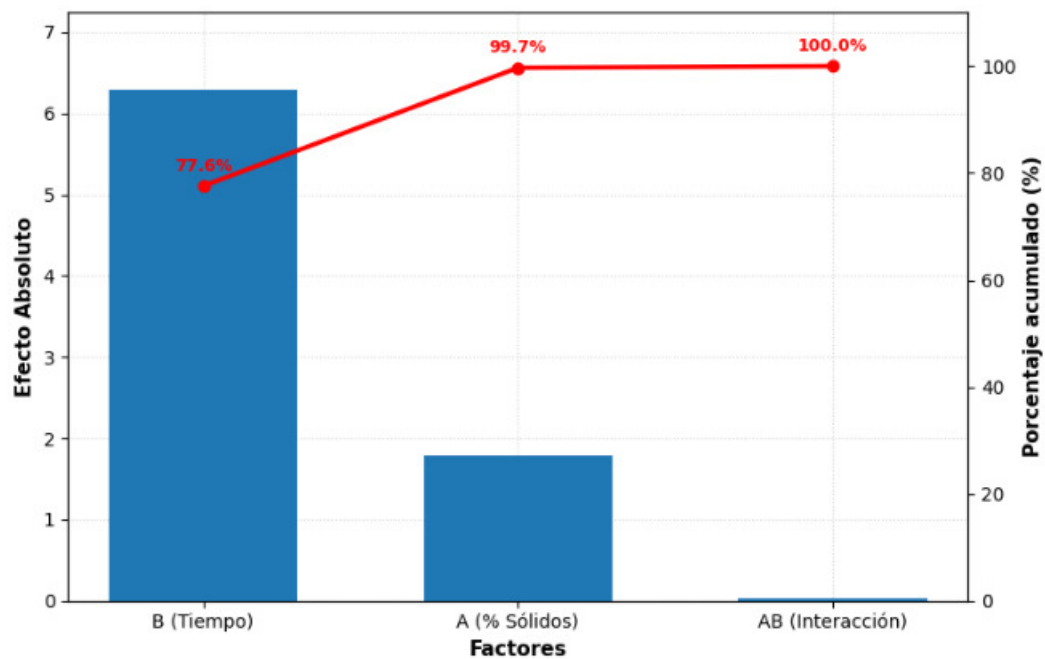
Resultados para Cobre (Cu)

Ecuación de regresión:

Recuperación Cobre (Cu) = 53.128 + 0.25643*%S + 2.09833*t (min)

Figura 14

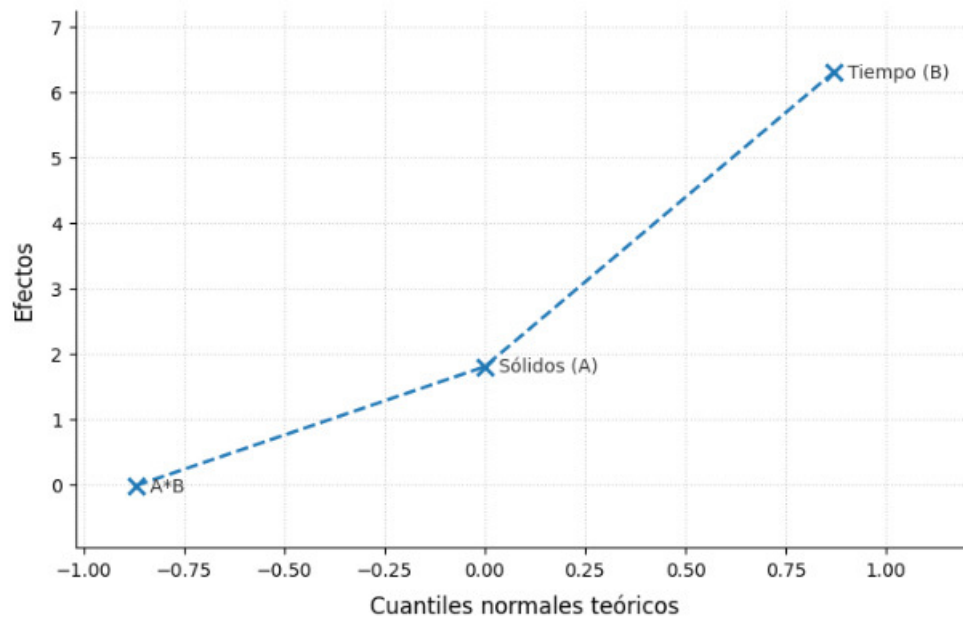
Gráfico de Pareto con efecto acumulado – Recuperación de Cobre (Cu)



Nota: Proporcionada por el software Minitab 2019.

Figura 15

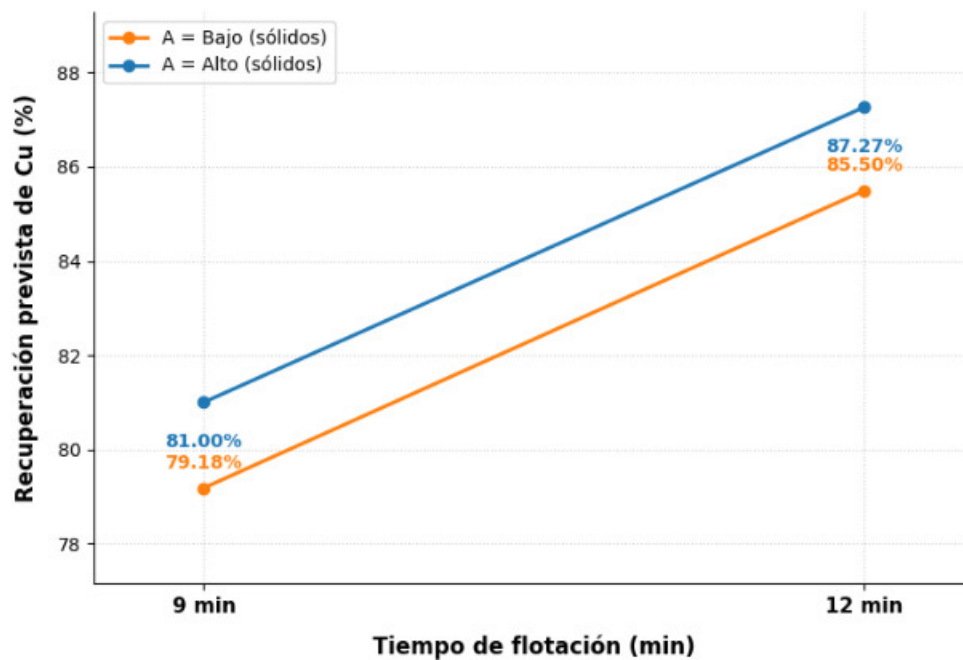
Gráfico de efectos normales de cobre



Nota: Proporcionada por el software Minitab 2019.

Figura 16

Gráfico de interacción para Cu



Nota: Proporcionada por el software Minitab 2019.

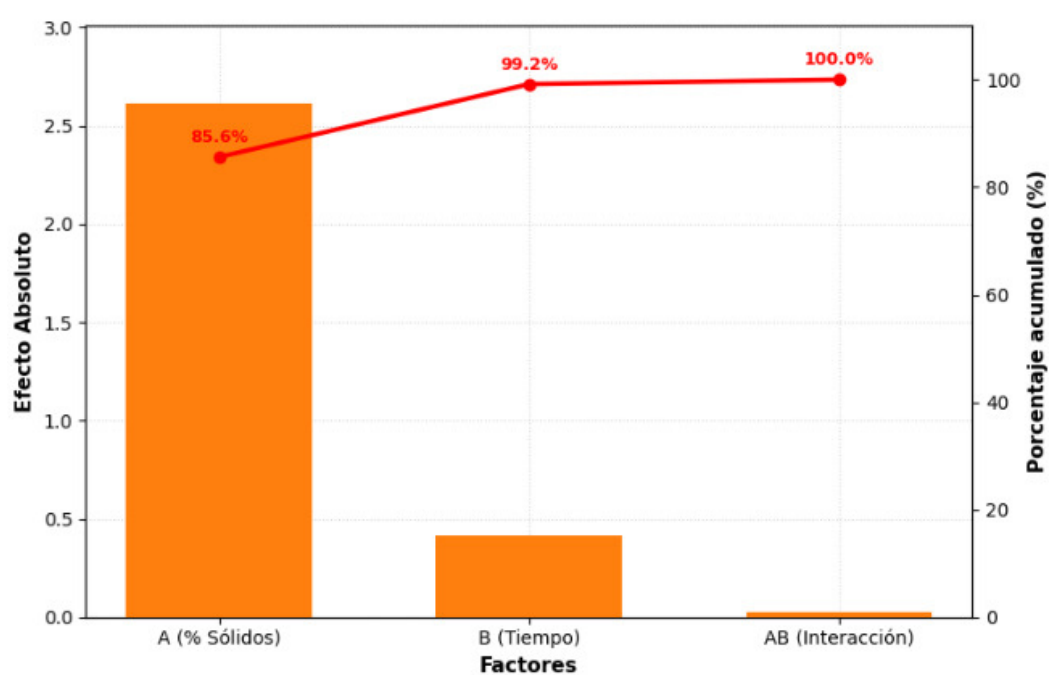
Resultados para Oro (Au)

Ecuación de regresión:

$$\text{Recuperación Oro (Au)} = 39.892 + 0.37357 * \%S + 0.13833 * t \text{ (min)}$$

Figura 17

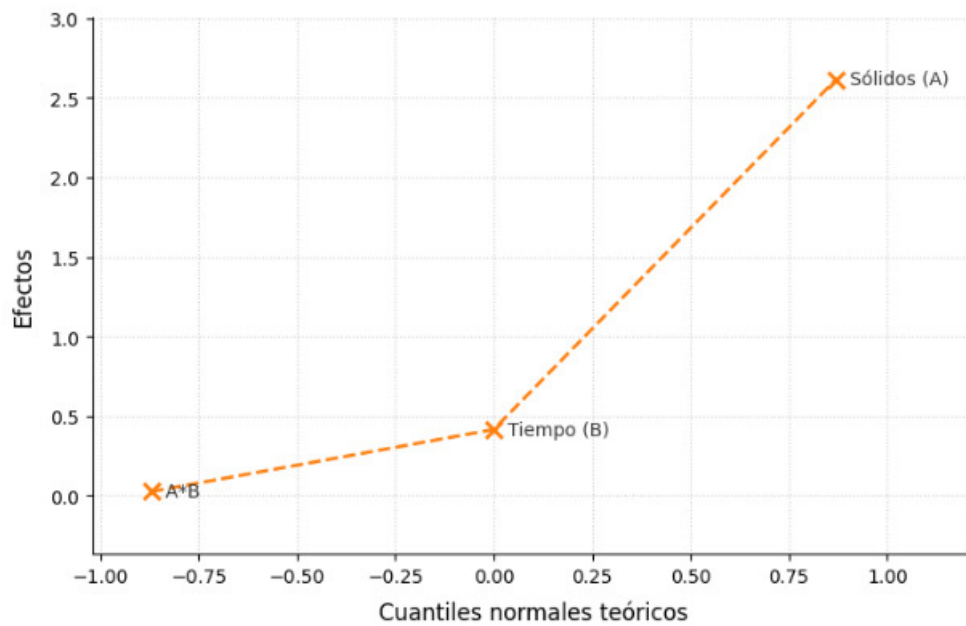
Gráfico de Pareto con efecto acumulado – Recuperación de Oro (Au)



Nota: Proporcionada por el software Minitab 2019.

Figura 18

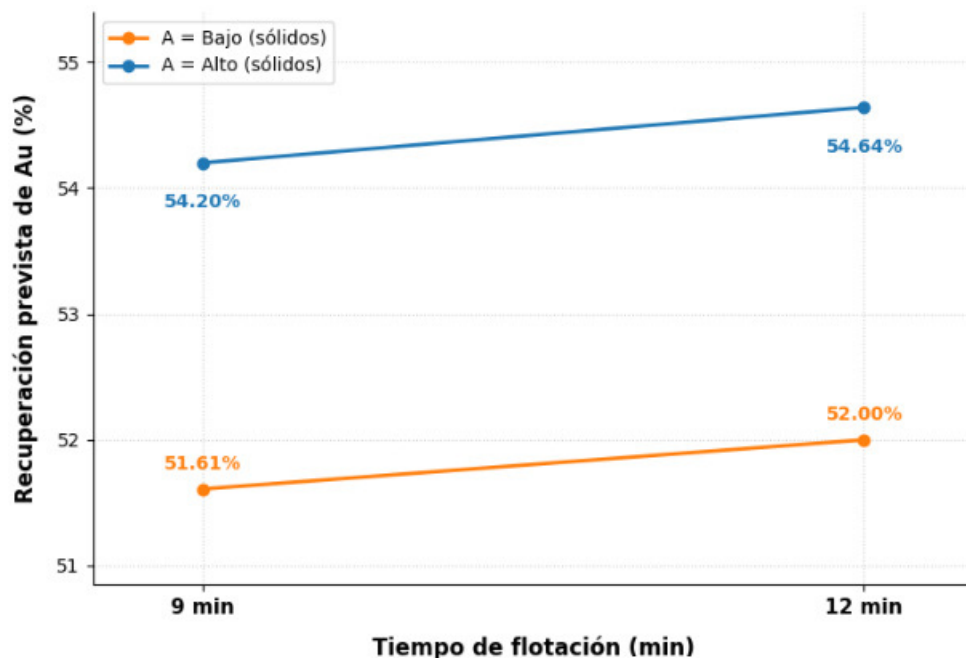
Gráfico de efectos normales de oro



Nota: Proporcionada por el software Minitab 2019.

Figura 19

Gráfico de interacción para Au



Nota: Proporcionada por el software Minitab 2019.

Los resultados indican una correlación positiva entre el porcentaje de sólidos y la recuperación de cobre, así como entre el tiempo de flotación y la recuperación total. En el caso del oro, los efectos son menos pronunciados, aunque el aumento del porcentaje de sólidos muestra una leve tendencia positiva.

El análisis muestra que el tiempo de flotación (Factor B) ejerce el efecto más significativo sobre la recuperación de cobre, seguido del porcentaje de sólidos (Factor A).

En el caso del oro, el efecto del porcentaje de sólidos es predominante, aunque de menor magnitud general.

Validación estadística de los modelos de regresión

Con el fin de validar los modelos de regresión lineal obtenidos para la recuperación de cobre y oro, se realizó el análisis de varianza (ANOVA). Este análisis permite determinar la significancia estadística de los factores considerados (% de sólidos y tiempo de flotación), así como la interacción entre ellos, verificando si los modelos explican adecuadamente la variabilidad de las respuestas.

Tabla 24

Coefficientes para la recuperación de cobre (Cu)

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	53.128	0.143	371.34	0.002	
%Sólidos	0.25643	0.00357	71.8	0.009	1
Tiempo de flotación (min)	2.09833	0.00833	251.8	0.003	1

Nota: Proporcionada por el software Minitab 2019.

Tabla 25*Modelo de regresión lineal para la recuperación de cobre (Cu)*

Modelo	S	R-cuad. (%)	R-cuad. (ajustado) (%)	PRESS	R-cuad. (pred) (%)	AICc	BIC
Recuperación de Cobre (Cu)	0.382	0.9966	0.9898	0.585	0.9863	-10.02	-12.44

Nota: Proporcionada por el software Minitab 2019.

Tabla 26*ANOVA para la recuperación de cobre (Cu)*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	2	42.8490	21.4245	34279.2	0.004
%Sólidos	1	3.2220	3.2220	5155.2	0.009
Tiempo de flotación (min)	1	39.6270	39.6270	63403.2	0.003
Error	1	0.0006	0.0006		
Total	3	42.8497			

$R^2 = 99.66\%$

R^2 ajustado = 98.98%

El análisis muestra que tanto el porcentaje de sólidos (A) como el tiempo de flotación (B) son factores estadísticamente significativos ($p < 0.05$), siendo el tiempo de flotación el de mayor impacto sobre la recuperación de cobre. La interacción A×B no resultó significativa ($p > 0.05$), lo que sugiere que los efectos principales actúan de forma principalmente independiente. El alto valor de R^2 indica un excelente ajuste del modelo a los datos experimentales.

Tabla 27*Coeficientes para la recuperación de oro (Au)*

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	39.892	0.143	278.83	0.002	
%Sólidos	0.37357	0.00357	104.6	0.006	1
Tiempo de flotación (min)	0.13833	0.00833	16.6	0.038	1

Nota: Proporcionada por el software Minitab 2019.**Tabla 28***Modelo de regresión lineal para la recuperación de oro (Au)*

Modelo	S	R-cuad. (%)	R-cuad. (ajustado) (%)	PRESS	R-cuad. (pred) (%)	AICc	BIC
Recuperación de Oro (Au)	0.326	0.985	0.9551	0.426	0.9401	-11.29	-13.71

Nota: Proporcionada por el software Minitab 2019.**Tabla 29***ANOVA para la recuperación de oro (Au)*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	2	7.0105	3.5052	5608.4	0.009
%Sólidos	1	6.8382	6.8382	10941.2	0.006
Tiempo de flotación (min)	1	0.1722	0.1722	275.6	0.038
Error	1	0.00062	0.00062		
Total	3	7.0111			

Nota: Proporcionada por el software Minitab 2019. $R^2 = 98.50\%$ $R^2 \text{ ajustado} = 95.51\%$

En el caso del oro, el porcentaje de sólidos (A) presenta un efecto positivo y relativamente significativo sobre la recuperación, mientras que el tiempo de flotación (B) y la interacción no resultaron estadísticamente significativos. No obstante, el coeficiente de determinación indica que el modelo lineal explica más del 95% de la variabilidad observada, por lo que el ajuste es adecuado para propósitos predictivos dentro del rango experimental.

4.2. Análisis, interpretación y discusión de resultados

4.2.1. Análisis químico y mineralógico del mineral

El análisis químico de la muestra de mineral argílico-caliza (Tabla 6) evidenció una ley de cobre de 0.49 % Cu y 0.83 g/t Au, lo que clasifica al material como un mineral de baja ley, típico de zonas de contacto entre rocas calizas y zonas de alteración hidrotermal, con contenidos significativos de sílice (30.1 %), cal ($\text{CaO} = 20\%$) y alúmina ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 8.2\%$). Estos resultados confirman la naturaleza mixta del mineral, compuesto por una matriz carbonatada con presencia de ganga silíceas y componentes arcillosos típicos de la alteración argílica. La alta pérdida por calcinación (LOI: 2.8 %) refleja contenido significativo de volátiles (agua y CO_2), característico de minerales arcillosos y carbonatados.

La presencia de Fe (6.2 %) y S (3 %) indica una abundancia de sulfuros, principalmente pirita y calcopirita, minerales directamente vinculados al potencial metalúrgico del yacimiento. Estos elementos, al estar asociados a fases sulfuradas, pueden influir en la selectividad durante la flotación, especialmente a pH alcalinos donde la pirita tiende a flotar junto al cobre si no se controla adecuadamente el medio.

El elevado contenido de SiO_2 y Al_2O_3 refleja la existencia de zonas silicificadas y arcillosas, que pueden afectar negativamente la liberación del cobre y, por tanto, la eficiencia de la flotación. Asimismo, el CaO (20 %) evidencia la predominancia de caliza, propia del ambiente de encajonamiento del mineral, lo cual tiene implicaciones tanto en la reactividad del mineral frente a reactivos (por su naturaleza básica) como en el control del pH durante el proceso.

Estos resultados indican que se trata de un mineral de baja ley de cobre, alta proporción de ganga no metálica, y con una composición compleja que puede requerir un control riguroso de las variables metalúrgicas para maximizar la recuperación.

4.2.2. Caracterización mineralógica y textural del mineral

La identificación óptica de fases minerales (Tabla 8 y Tabla 9) resalta una mineralogía típica de sistemas de alteración hidrotermal con transición entre ambientes argílicos y carbonatados. Se identificó:

- Calcopirita (10 %) como el mineral principal portador de cobre, con buena liberación (65 %) y tamaño promedio de grano entre 45–150 μm .
- Pirita (8 %), como sulfuro acompañante, que puede representar un problema metalúrgico por su competencia en consumo de colectores.
- Bornita (3 %), un mineral accesorio pero importante como indicador de zonas enriquecidas en cobre.
- Alta presencia de ganga silicatada (30 % cuarzo) y carbonatada (25 % calcita), que, aunque no afectan directamente la flotación, pueden contribuir al consumo excesivo de reactivos, especialmente bajo condiciones alcalinas.
- Las arcillas (15 %), principalmente caolinita e illita, representan un desafío operativo importante, ya que su alta reactividad superficial y textura intersticial dificultan la recuperación metalúrgica, al interferir con la estabilidad de la espuma y provocar arrastres.
- Desde un enfoque geometalúrgico, los minerales arcillosos presentes en el mineral de alimentación controlan el comportamiento reológico de la pulpa durante la flotación de cobre. Un mayor contenido de arcillas finas, especialmente arcillas hinchables, incrementa la viscosidad y el esfuerzo de cedencia de la pulpa, afectando la hidrodinámica de la celda y reduciendo la eficiencia de contacto burbuja-partícula. Paralelamente, estas arcillas interactúan con los reactivos de flotación mediante adsorción no selectiva, disminuyendo la disponibilidad efectiva de colectores y espumantes para los minerales de cobre. La combinación

de efectos reológicos y de consumo de reactivos explica la menor recuperación y selectividad observada en dominios geometalúrgicos con alto contenido de arcillas. Cabe destacar que, en el marco de esta tesis, no se emplearon dispersantes reológicos.

El grado de liberación de los sulfuros fue adecuado, especialmente para la calcopirita (65 %) de liberación a tamaños entre 45 y 150 μm , lo cual es aceptable para flotación sin requerir sobremolienda. Sin embargo, la pirita (40 %) presenta un menor grado de liberación, lo que podría explicar su flotación inadvertida a pH bajos, mientras que la bornita (50 %), por su textura asociada, requiere moliendas más finas para una recuperación eficiente. Las arcillas un 25 %, indicando la necesidad de controlar el grado de molienda y dosificación de reactivos para evitar arrastre de ganga al concentrado.

El estudio petrográfico y el análisis mediante QEMSCAN (Tablas 8 a 10) confirman la coexistencia de minerales metálicos y de ganga, predominando el cuarzo (30 %), calcita (25 %) y arcillas (15 %), seguidos por sulfuros de cobre y hierro (calcopirita 10 %, pirita 8 %, bornita 3 %).

La calcopirita (CuFeS_2) se identifica como el principal portador de cobre, mientras que la pirita (FeS_2) actúa como mineral acompañante, cuya abundancia podría generar competencia en la adsorción de colectores. La presencia de bornita, aunque minoritaria, sugiere una fase de enriquecimiento secundario, lo cual es favorable para la recuperación metálica.

Desde el punto de vista textural, se observa que los sulfuros se encuentran tanto disseminados como asociados a cuarzo y carbonatos, lo que condiciona el grado de liberación. El análisis QEMSCAN mostró que en los relaves (RST y CST) existen partículas de calcopirita parcialmente liberadas o asociadas a pirita y ganga silíceas, lo cual explica pérdidas metalúrgicas a tamaños gruesos ($\text{P}_{80} \approx 60 \mu\text{m}$).

En contraste, en las fracciones finas ($P_{80} \approx 30 \mu\text{m}$) la calcopirita se encuentra más liberada, aunque su recuperación puede limitarse por una menor cinética de flotación o por el exceso de arcillas que disminuyen la selectividad del colector.

Los resultados confirman que la liberación mineralógica es un factor crítico para la eficiencia metalúrgica y que la presencia de ganga arcillosa condiciona la respuesta del mineral en la flotación selectiva Cu–Au.

4.2.3. Interpretación de pruebas metalúrgicas de flotación cobre-oro

Análisis e interpretación de la información

Evaluación metalúrgica: flotación selectiva Cu–Au

Las pruebas metalúrgicas demostraron que el pH tiene un papel determinante en la eficiencia del proceso. Se observó un incremento progresivo en la recuperación de cobre y oro a medida que el pH se incrementó de 9.0 a 10.5. A pH 10.5, se alcanzaron las recuperaciones máximas: 87.27 % para Cu y 54.64 % para Au. Esto se debe a una mejor activación superficial de los sulfuros y una mayor depresión de la pirita, reduciendo su flotación no deseada.

En cuanto al porcentaje de sólidos, se observó que niveles de 32 a 35 % favorecieron la recuperación, ya que ofrecieron una buena dispersión de partículas y una interacción adecuada con los reactivos. En condiciones más diluidas (28 %), la eficiencia disminuyó, probablemente por la menor colisión entre partículas y burbujas.

Respecto a los reactivos, el colector AP-9865, en dosis de 4.40 – 6.20 g/TM, fue el más eficiente, especialmente en presencia de ganga arcillosa. Su comportamiento superó al de los xantatos tradicionales y al D-771 en términos de selectividad y recuperación, mostrando una alta afinidad tanto por la calcopirita como por pequeñas inclusiones de oro.

El espumante H-2255, en dosis de 9.72 g/TM, generó una espuma estable sin excesiva persistencia, facilitando una separación efectiva entre sulfuros y ganga.

Interacción de variables operativas

La interacción entre pH, porcentaje de sólidos, tipo y dosis de colector, y tiempo de flotación tuvo un efecto sinérgico en la recuperación metalúrgica. La mejor condición operativa encontrada fue:

- pH: 10.5
- % de sólidos: 35 %
- Xantatos: 7.27 g/TM
- D-771: 4.59 g/TM
- Colector: AP-9865 a 5.30 g/TM
- Espumante: H-2255 a 9.72 g/TM
- Tiempo de flotación: 12 minutos
- Recuperación obtenida: Cu: 87.27 %, Au: 54.64 %

Estos resultados indican que el sistema es altamente sensible a pequeñas variaciones en el pH y en la dosis de reactivos, por lo que se requiere un control riguroso en planta.

Efecto del pH

Los resultados (Tablas 12–15, Figuras 12 y 13) muestran que la recuperación de cobre aumenta con el incremento del pH, alcanzando su máximo en pH 10.5 (79.17 % Cu y 52.01 % Au).

A pH bajos (9.0–9.5) se obtiene buena flotación de Cu, pero con menor selectividad frente a la pirita. A medida que el pH aumenta, la adsorción selectiva del colector AP-9865 sobre la calcopirita mejora, reduciendo la flotación de la pirita.

Por tanto, el pH óptimo determinado experimentalmente fue 10–10.5, condición que equilibra la máxima recuperación de cobre con una buena selectividad Cu/Fe.

Efecto del % de sólidos y tiempo de flotación

Al evaluar simultáneamente el porcentaje de sólidos (28–35 %) y el tiempo de flotación (9–12 min), se observó una relación directa entre ambos factores y la recuperación.

El aumento del porcentaje de sólidos de 28 % a 35 % y el incremento del tiempo de flotación de 9 a 12 min generaron una mejora significativa en las recuperaciones, alcanzando 87.27 % Cu y 54.64 % Au en las condiciones más altas.

Esto se atribuye a:

Una mayor concentración de partículas útiles en la celda, que favorece la colisión burbuja–partícula.

Una mayor permanencia del mineral en la celda, lo que permite flotación de partículas finas y parcialmente liberadas.

No obstante, porcentajes de sólidos muy elevados (>35 %) podrían incrementar la viscosidad de la pulpa y disminuir la eficiencia de transporte de espuma, por lo que los valores obtenidos representan el óptimo metalúrgico para este tipo de mineral.

Análisis experimental secuencial de rampa cinética co-dependiente y modelo estadístico (Minitab 2019)

El modelo experimental secuencial de rampa cinética co-dependiente evaluó el efecto del porcentaje de sólidos (A) y del tiempo de flotación (B) sobre las recuperaciones de Cu y Au.

El modelo de regresión lineal obtenido fue:

Para el cobre (Cu)

$$\text{Recuperación Cobre (Cu)} = 53.128 + 0.25643 * \%S + 2.09833 * t \text{ (min)}$$

El análisis de Pareto y de efectos principales muestra que:

- El tiempo de flotación (B) es el factor más influyente.
- El porcentaje de sólidos (A) también tiene efecto positivo, aunque menor.
- La interacción AB es leve pero significativa, lo que indica que ambos factores actúan sinérgicamente en la mejora de la recuperación.

Esto se interpreta como una relación de dependencia operacional, donde el aumento del tiempo de flotación solo es eficaz si la pulpa tiene una densidad adecuada (alrededor del 32–35 %).

Para el oro (Au)

$$\text{Recuperación Oro (Au)} = 39.892 + 0.37357 * \%S + 0.13833 * t \text{ (min)}$$

En este caso:

- El % de sólidos (A) tiene un efecto positivo sobre la recuperación.
- El tiempo de flotación (B) presenta un efecto menor e incluso ligeramente negativo, lo que podría deberse a la liberación incompleta del oro o su presencia encapsulada en sulfuros.
- La interacción AB es leve pero significativa, en la que las condiciones extremas mejoran la recuperación combinada Cu–Au.

Evaluación de los modelos

Linealidad: Los gráficos de dispersión entre los valores observados y los predichos mostraron una tendencia lineal clara, confirmando la adecuación del modelo lineal propuesto.

Normalidad de residuos: Los residuos se distribuyen aleatoriamente en torno a cero sin patrones sistemáticos, lo que indica homocedasticidad.

Significancia global (Prueba F): En ambos modelos, la prueba F global presentó valores $p < 0.05$, confirmando que los factores incluidos explican de manera significativa la variabilidad de la respuesta.

Error cuadrático medio (ECM): Los valores bajos de ECM (<5) para ambos modelos indican una buena precisión de ajuste.

Coefficiente de determinación (R^2): Ambos modelos presentaron R^2 superiores al 90%, validando su fiabilidad para fines de predicción y optimización.

El análisis ANOVA confirma que:

Para cobre, el tiempo de flotación es el factor más influyente sobre la recuperación.

Para oro, el porcentaje de sólidos tiene un efecto principal más relevante, aunque de menor magnitud global.

Ambos modelos presentan buen ajuste, validez estadística y comportamiento coherente con la respuesta metalúrgica esperada, por lo que se consideran adecuados para describir el sistema de flotación Cu–Au bajo las condiciones experimentales evaluadas.

Los resultados obtenidos confirman que el mineral argílico-caliza presenta un comportamiento metalúrgico favorable, pese a su complejidad mineralógica. La asociación íntima entre calcopirita, pirita y ganga silícea exige un control estricto del pH y el tiempo de flotación.

La comparación con estudios previos sobre minerales de características similares (por ejemplo, depósitos de tipo skarn o pórfidos con alteración argílica) evidencia que los valores de recuperación alcanzados se encuentran dentro del rango superior (70–90 % Cu; 45–55 % Au), lo cual demuestra la buena respuesta del mineral al proceso de flotación selectiva.

Asimismo, el análisis mineralógico respalda los resultados metalúrgicos, ya que la calcopirita se encuentra en un estado de liberación adecuado a la granulometría de 55 % -200 malla. La presencia de arcillas, si bien podría afectar la estabilidad de espuma, fue controlada mediante la elección del espumante H-2255, que mantuvo una textura de espuma estable sin arrastre excesivo de ganga.

En síntesis, se confirma que las condiciones de operación seleccionadas permiten un equilibrio óptimo entre recuperación, selectividad y control de ganga, garantizando la viabilidad técnica del proceso de flotación Cu–Au para este tipo de mineralización.

4.2.4. Análisis de la distribución del oro en el concentrado final

El comportamiento metalúrgico del oro en el concentrado final no es uniforme y depende estrictamente de su mineralogía de asociación. Según el análisis de deportamiento elemental (*elemental deportment*) realizado mediante QEMSCAN, se ha determinado que el oro en el concentrado final presenta una distribución bimodal que limita la recuperación global:

- **Oro Asociado a Sulfuros (Oro Refractario):** Representa la mayor parte de la carga aurífera en el concentrado. El oro se encuentra ocluido submicroscópicamente en las estructuras cristalinas de la pirita microcristalina y, en menor medida, en la calcopirita (Agorhom et al., 2012). Al estar íntimamente ligado a la pirita, su recuperación depende directamente de la flotabilidad de este sulfuro de hierro. Cualquier intento de deprimir la pirita para mejorar la ley del concentrado de cobre resulta inevitablemente en pérdidas de oro (Monte et al., 1997).
- **Oro Libre / Expuesto:** Una fracción significativa del oro en el concentrado se encuentra como partículas libres o en los bordes de grano. Su presencia en el concentrado final suele ser errática debido a su alta densidad (19.3 g/cm^3), lo que facilita su pérdida por arrastre mecánico en las celdas de flotación o por una molienda que no permite la liberación completa de las partículas asociadas (Allan & Woodcock, 2001).

CONCLUSIONES

- Se determinó de manera concluyente que la evaluación mineralógica detallada y automatizada del yacimiento tipo pórfido influye significativamente en la recuperación de cobre y oro en la zona de contacto argílico-caliza, al cuantificar que el mineral de cabeza cuenta con una ley de 0.49% Cu y 0.83 g/TM Au, distribuida en una matriz compleja compuesta por 30.1% de sílice (SiO_2), 20% de cal (CaO) y 8.2% de alúmina (Al_2O_3). Esta caracterización permitió identificar que, mientras el cobre se encuentra como calcopirita liberada en un 65%, el oro presenta un comportamiento parcialmente refractario al estar ocluido en un 33.74% de pirita microcristalina y afectado negativamente por un 15% de lamarcillosas totales (caolinita e illita). El conocimiento exacto de estos valores mineralógicos fundamentó la optimización del proceso de flotación selectiva, permitiendo mitigar el efecto de la ganga mediante un pH alcalino de 10.5 y alcanzar recuperaciones metalúrgicas máximas de 87.27% para el cobre y 54.64% para el oro.
- Se analizó la composición mineralógica de la zona de contacto argílico-caliza y su relación directa con la recuperación de cobre y oro, mediante lo cual se constató que la calcopirita ($CuFeS_2$) es la mena cuprífera dominante (1.31% en la cabeza) con un grado de liberación del 65% en mallas primarias ($P_{80} \approx 140 \mu m$), garantizando su flotabilidad. En contraposición, se evidenció que el oro presenta un comportamiento refractario derivado de su oclusión textural en la pirita microcristalina, dado que el 64% de las fases de oro se encontraron como microinclusiones ocluidas ($< 20 \mu m$) dentro del 33.74% de pirita microcristalina reportada en las colas (CST), demostrando que la ley y asociación mineralógica local rigen y limitan la selectividad del proceso.

- Se evaluó las variables operacionales del proceso de flotación, estableciendo mediante ANOVA que el tiempo de flotación es el parámetro cinético principal para la recuperación de cobre ($p = 0.003$), siendo los 12 minutos el tiempo requerido para mejorar la captura de partículas mixtas. Por su parte, el % de sólidos resultó estadísticamente significativo para el oro ($p = 0.006$); en este sentido, se logró controlar satisfactoriamente la viscosidad y atenuar el impacto de recubrimiento (slime coating) provocado por el 15% de lamas arcillosas (caolinita e illita) operando al 35% de sólidos. Este % de sólidos se fijó como punto de equilibrio operativo para optimizar el tonelaje de tratamiento sin comprometer la recuperación; no obstante, se advierte que incrementar el % de sólidos por encima de este umbral debe abordarse con cautela, ya que mayores porcentajes podrían comprometer la hidrodinámica del sistema, aumentando la viscosidad de la pulpa y perjudicando la selectividad al favorecer el arrastre de ganga fina hacia el concentrado.
- Se determinó con precisión las condiciones óptimas de operación y el control de las variables del proceso de flotación mediante la validación estadística de un diseño factorial 2^2 en software Minitab, con lo cual se maximizó la eficiencia metalúrgica al fijar un medio alcalino regulado a pH de 10.5, una densidad de 35% de sólidos y 12 minutos. Este comportamiento interactivo quedó consolidado y modelado matemáticamente a través de las siguientes ecuaciones de regresión lineal multivariable con coeficientes de ajuste $R^2 > 98\%$:

$$\% \text{Rec. Cobre (Cu)} = 53.128 + 0.25643 * (\%S) + 2.09833 * (t)$$

$$\% \text{Rec. Oro (Au)} = 39.892 + 0.37357 * (\%S) + 0.13833 * (t)$$

(Donde %S representa el porcentaje de sólidos en peso y t corresponde al tiempo neto de flotación en minutos).

RECOMENDACIONES

- Integrar Pruebas de Flotación con Microburbujas: Desarrollar un programa de pruebas a nivel de laboratorio con el relave rougher y relave cleaner scavenger para evaluar la recuperación del oro ocluido en sulfuros finos mediante microburbujas. Tras optimizar los parámetros y validar la viabilidad técnica a esta escala, se recomienda el escalamiento a nivel piloto o industrial antes de enviar estos flujos a la relavera general.
- Gestionar el % de Sólidos: Mantener el 35% de sólidos como punto de equilibrio operativo para optimizar el tonelaje de tratamiento. Cualquier incremento debe someterse a un riguroso análisis técnico, ya que densidades superiores comprometen la hidrodinámica del sistema, aumentan la viscosidad y perjudican la selectividad.
- Controlar la Granulometría: Supervisar estrictamente el P_{80} para evitar la sobremolienda, dado que un exceso de finos incrementa el área superficial de la ganga arcillosa y potencia el slime coating sobre los sulfuros, reduciendo la ley del concentrado final.
- Adicionar Dispersantes para Arcillas: Implementar el uso de dispersantes específicos para neutralizar el efecto de las lamas (caolinita/illita), tales como el silicato de sodio o poliacrilatos de bajo peso molecular, los cuales reducen la viscosidad de la pulpa y mejoran la cinética de flotación.
- Seleccionar Colectores Selectivos: Evaluar la dosificación de colectores especializados como el ditiofosfato (ejemplo: Aerophine 3418A), debido a su alta

afinidad para inducir la flotación de pirita microcristalina aurífera sin comprometer la selectividad hacia el cobre.

- Monitoreo y Control del Potencial Redox (Eh): Se recomienda la implementación de un sistema de control de potencial de flotación en línea, orientando el proceso hacia un rango operativo de +50 mV a +150 mV (referencia electrodo de Hidrógeno Estándar, SHE). Mantener el potencial dentro de este rango es crítico para la estabilización de la superficie de la calcopirita y la activación controlada de la pirita microcristalina aurífera, evitando condiciones de sobre-oxidación ($Eh > +200$ mV) que podrían deprimir la pirita y, consecuentemente, reducir la recuperación de oro ocluido. Este control permitirá una cinética de recuperación más estable, minimizando la fluctuación en la ley del concentrado final debido a variaciones en la mineralogía de alimentación (Fuerstenau et al., 2007).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agorhom, E. A., Skinner, W., Addai-Mensah, J., & Zanin, M. (2012). The association of gold with pyrite in porphyry copper–gold ores and its influence on flotation behaviour. *Minerals Engineering*, 36–38, 95–103.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.03.020>
- Aliaga, J. A. (2012). *Controles de mineralización del pórfido Au–Cu Morococha – Minas Conga, Cajamarca – Perú* [Tesis de licenciatura/maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional.
- Allan, G. C., & Woodcock, J. T. (2001). A review of the flotation of native gold and electrum. *Minerals Engineering*, 14(9), 931–962.
[https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(01\)00101-3](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(01)00101-3)
- Alfonso, P., Anticoi, H., Yubero, T., Bascompta, M., Henao, L., Garcia-Valles, M., Palacios, S., & Yáñez, J. (2019). *The importance of mineralogical knowledge in the sustainability of artisanal gold mining: A mid-south Peru case*. *Minerals*, 9(6), 345. <https://doi.org/10.3390/min9060345>
- Arias, F. G. (2012). *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica* (6.ª ed.). Editorial Episteme.
- Benavides, J., Arévalo, R., & Castro, R. (2018). *Geología y Metalogenia de los Yacimientos de Cobre y Oro en el Norte del Perú*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
- Brown, C., & Johnson, L. (2015). Hydrothermal alteration and metal recovery in porphyry deposits. *Minerals Engineering*, 74, 1–12.
- Bunge, M. (2007). *La investigación científica. Su estrategia y su filosofía*. Siglo XXI Editores

- Bulatovic, S. M. (2007). *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice*. Elsevier.
- Castro, J., Sánchez, M., & López, R. (2015). Geometallurgical approach for improving flotation performance in complex copper ores. *Minerals Engineering*, 82, 111–120.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.04.012>
- Cox, D. P., Singer, D. A., & Menzie, W. D. (2007). *Deposit models for resource assessment*. U.S. Geological Survey.
- Craig, J.R. (2002). *Mineralogy of Copper*. In: Metals and Mineral Resources, Springer.
- Dutrizac, J.E., & Jambor, J.L. (2000). *Mineralogy of Secondary Copper Minerals*. Mineralogical Association of Canada.
- Dutrizac, J.E. (2013). *Copper Minerals and Their Extractive Metallurgy*. Elsevier.
- Flores, L. 2006. QEMSCAN. Evaluación Cuantitativa de Mineralogía, Imágenes BSE + Energía dispersiva de Rayos X. Generalidades del Método y Bibliografía. Informe (inédito). SGS Minerals S.A., Mineralogía Avanzada: 16 pp. Santiago.
- Fuerstenau, M. C., Jameson, G. J., & Yoon, R. H. (2007). *Froth flotation: A century of innovation*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
- Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. (2003). *Principles of Mineral Processing*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Galdos Postigo, R. A., Vallance, J., Baby, P., Salvi, S., Schirra, M., Velásquez, G., Viveen, W., Soto, R., & Pokrovski, G.S. (2023). *Origin and evolution of gold-bearing fluids in a carbon-rich sedimentary basin: A case study of the Alamarca epithermal Au-Ag-Cu deposit, northern Peru*. *Ore Geology Reviews*, 166, Article 105857. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105857>

- Geoinnovations Group. (s. f.). *Geología, alteración y mineralización de los porfidos Au–Cu de Minas Conga, norte del Perú (Cajamarca)*. Geoinnovations Group
- Gold Fields. (2019). *Gold Fields Mineral Resources and Mineral Reserves Supplement 2019: Cerro Corona Operation, Peru*. Competent Person's Report (CPR). <https://www.goldfields.com/>
- Gonzales, R., Pérez, M., & López, A. (2018). Mineralogical variability in contact zones of porphyry copper deposits, Cajamarca, Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 85, 150-162.
- Hempel, C. G. (1966). *Philosophy of Natural Science*. Prentice-Hall.
- Hernández-Sampieri, R., y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.
- Holland, H. D. (2005). *Geology and the evolution of life on Earth*. Geological Society of America.
- INGEMMET. (2020). *Geología de los cuadrángulos de la zona norte del Perú: Carta Geológica Nacional*. Boletín Serie A.
- Leaver, E. S., & Woolf, D. O. (1934). The occurrence of gold in copper sulphide ores. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 43, 1–22
- Liu, W., Zhang, J., Li, Y., & Liu, Y. (2018). Gold occurrence in bornite from porphyry copper-gold deposits: Evidence from mineral chemistry and ore textures. *Ore Geology Reviews*, 101, 351–366. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.08.006>

- Meinert, L. D. (2013). Mineralogical and textural controls on the distribution of gold in porphyry copper systems. *Economic Geology*, 108(3), 447–462.
<https://doi.org/10.2113/econgeo.108.3.447>
- Miller, J.D., et al. (2009). *Geometallurgy: Integrating geology and mineral processing*. Elsevier.
- Monte, M. B. M., Dutra, A. J. B., & Albuquerque, P. R. S. (1997). Influence of pyrite depression on gold recovery in copper flotation circuits. *International Journal of Mineral Processing*, 51(1–4), 135–146.
[https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(97\)00020-4](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(97)00020-4)
- Petersen, U. (1999). *Metallogenic Belts and Tectonic Evolution of the Peruvian Andes*. Society of Economic Geologists (SEG).
- Pincheira, J. L., González, R. M., & Soto, A. P. (1998). Mineralogy of Andean porphyry copper deposits in Chile. *Economic Geology Review*, 13(3), 45–62.
- Popper, K. (2002). *La lógica de la investigación científica* (10.^a ed.). Tecnos.
- Portocarrero, R. E. (2021). *Caracterización mineralógica y geoquímica de la alteración sericita-clorita y mineralización asociada en el proyecto Antakori Cu–Au–Ag, Cajamarca – Perú* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio institucional.
- Revista Minería. (2021). Geología y potencial de mineralización de yacimientos de cobre y oro tipo IOCG en la costa norte del Perú (9°–12°). *Revista Minería*, 72(493), 34–45.
<https://www.revistamineria.com.pe>

- Smith, T., et al. (2017). Impact of argillic alteration on flotation performance in porphyry copper ores. *Minerals*, 7(3), 43.
- Smith, T. E. (1986). Geology and mineralization of the El Indio gold–copper deposit, Chile. *Economic Geology*, 81(3), 578–600.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.3.578>
- Santos Polo, A., Guo, W., Rivera, F., Tassinari, C., Cerpa, L., & Kojima, S. (2019). *Early Jurassic arc-related magmatism associated with porphyry copper mineralization at Zafranal, southern Peru unraveled by zircon U-Pb ages*. *Andean Geology*, 46(3), 445. <http://dx.doi.org/10.5027/andgeov46n3-3041>
- Sillitoe, R. H. (2010). *Porphyry Copper Systems*. *Economic Geology*, 105(1), 3-41.
- Taylor, R.G., & Eggleton, R.A. (2001). *The Mineralogy of Copper Deposits*. Mineralogical Society.
- Tumialán de la Cruz, P. H. (2002–2008). *Compendio de yacimientos minerales del Perú*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. “Yacimientos de reemplazamiento y relleno en caliza” y “Controles y guías de mineralización en el Perú”
- Wills, B. A., & Finch, J. (2016). *Wills’ Mineral Processing Technology* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Vallance, J., Galdos, R., Balboa, M., Berna, B., Cabrera, O., Huisa, F., Baya, C., Van De Vyver, C., Viveen, W., Béziat, D., Salvi, S., Brusset, S., Baby, P., & Pokrovski, G. S. (2023). *Combined effect of organic carbon and arsenic on the formation of sediment-hosted gold deposits: A case study of the Shahuindo epithermal deposit, Peru*. *Economic Geology*, accepted.

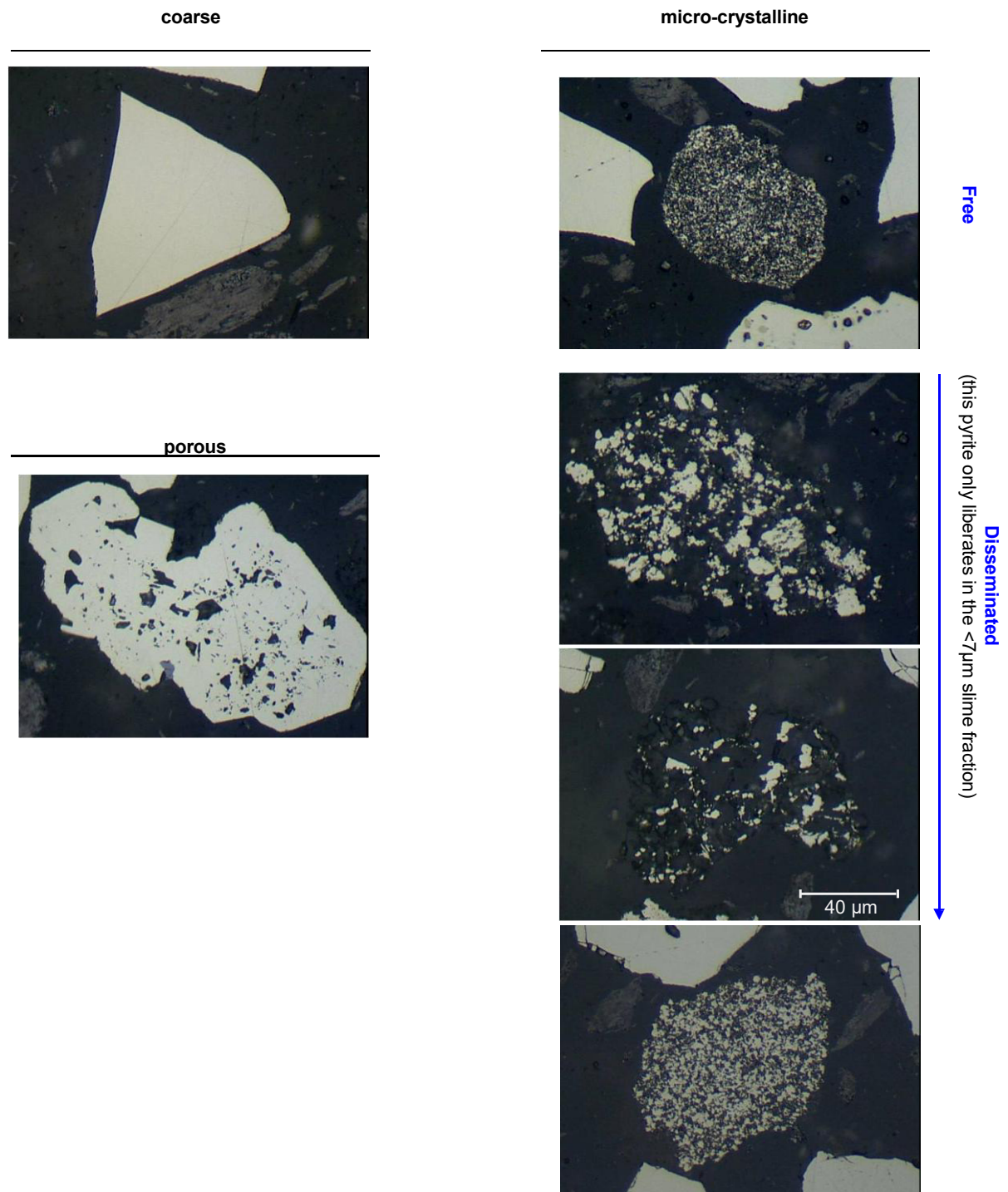
ANEXOS

A.1. Soporte mineralógico y geoquímico de la asociación del oro

Con el objetivo de identificar los principales tipos morfológicos de pirita presentes en los relaves de flotación (Cleaner Scavenger Tails, CST) del yacimiento Cerro Corona, se realizó una caracterización mineralógica detallada que permitió diferenciar pirita gruesa, pirita porosa y pirita microcristalina. Esta clasificación es fundamental para comprender la distribución del oro, dado que la capacidad de la pirita para incorporar oro en su estructura cristalina varía significativamente según su morfología, tamaño de grano y grado de defectos cristalinos. En particular, la pirita microcristalina presenta condiciones texturales favorables para la incorporación de oro submicroscópico, lo que influye directamente en su comportamiento metalúrgico.

Figura A1

Tipos morfológicos de pirita

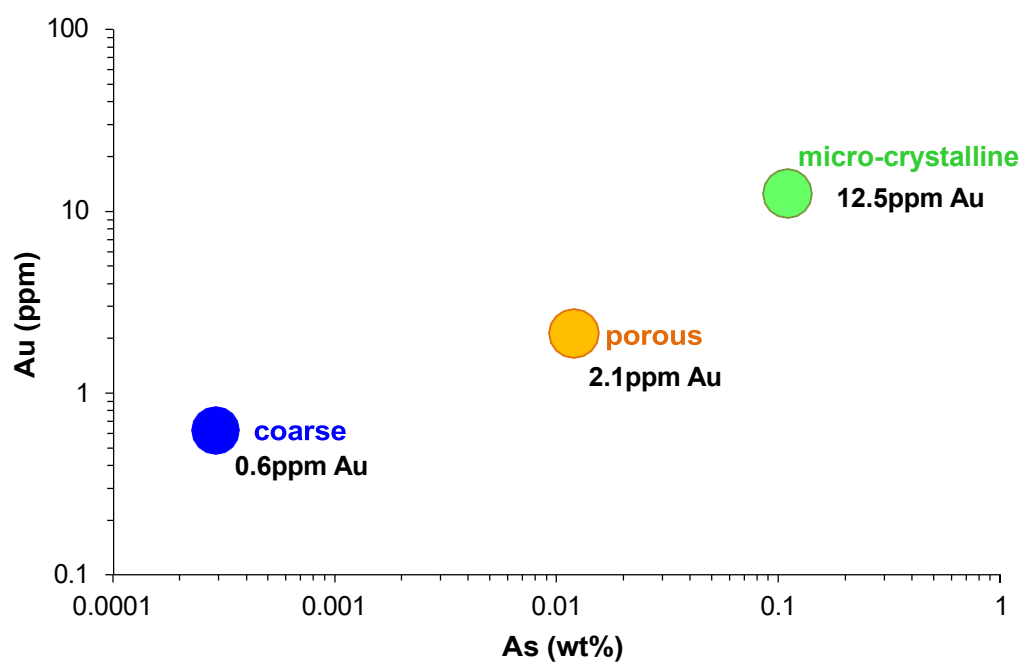


Nota: Tipos morfológicos de pirita identificados en los CST de Cerro Corona: pirita gruesa, porosa y microcristalina. La pirita microcristalina es la principal portadora de oro submicroscópico.

Con el propósito de evaluar los factores geoquímicos que controlan la incorporación del oro en la pirita, se analizó la relación entre el contenido de oro submicroscópico y los elementos traza, principalmente arsénico. La correlación entre Au y As es característica de sistemas auríferos con oro refractario, donde el arsénico facilita la incorporación del oro en solución sólida dentro de la red cristalina de la pirita. La Figura A2 muestra la relación entre el contenido de oro y arsénico para los distintos tipos de pirita analizados.

Figura A2

Relación Au–As en pirita



Nota: Relación entre el contenido de oro y arsénico en pirita, evidenciando una fuerte correlación positiva, especialmente en la pirita microcristalina.