ASCE MAGAZINE ISSN: 3073-1178

Revista ASCE Magazine, Periodicidad: Trimestral , Volumen: 5, Número: 2, Año: 2026 páginas 4073-4094

Doi: https://doi.org/10.70577/asce.v5i2.1127

Recibido: 2026-04-30

Aceptado: 2026-05-30

Publicado: 2026-06-30

Influencia de la mineralogía del contacto argílico-caliza en la recuperación de cobre y oro mediante flotación en el norte del Perú

Influence of argillic-limestone contact mineralogy on copper and gold recovery by flotation in northern Peru

Autor(s)

Julio Cesar Chimbor Esquivel[1]
julio.chimbor@unmsm.edu.pe
https://orcid.org/0009-0005-5624-7306
Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Vidal Sixto Aramburú Rojas[2]
varambur@unmsm.edu.pe
https://orcid.org/0000-0001-5818-8569
Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Luis Miguel Soto Juscamayta[3]
lsotoj@unmsm.edu.pe
https://orcid.org/0009-0008-7861-8296
Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Cómo citar

Chimbor Esquivel, J. C., Aramburú Rojas, V. S., & Soto Juscamayta, L. M. (2026). Influencia de la mineralogía del contacto argílico-caliza en la recuperación de cobre y oro mediante flotación en el norte del Perú. *ASCE MAGAZINE*, *5*(2), 4073–4094. https://doi.org/10.70577/asce.v5i2.1127

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Resumen

La recuperación de cobre y oro en sistemas tipo pórfido asociados a contactos argílico-caliza presenta desafíos debido a la complejidad mineralógica. El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de la mineralogía en la recuperación de Cu y Au mediante flotación selectiva en el norte del Perú. Se desarrolló una investigación experimental a escala de laboratorio, incluyendo caracterización química (0.49 % Cu y 0.83 g/TM Au), análisis mineralógico mediante microscopía óptica y QEMSCAN, y pruebas metalúrgicas bajo un diseño factorial 2^2, evaluando pH (9–10.5), porcentaje de sólidos (28–35 %) y tiempo de flotación (9–12 min). Los resultados evidenciaron una mineralogía compleja dominada por cuarzo (30 %), calcita (25 %), arcillas (15 %) y sulfuros, con presencia significativa de pirita microcristalina (hasta 33.74 %), en la cual el oro se encuentra encapsulado. La recuperación de Cu aumentó de 75.59 % a 79.17 % y la de Au de 49.87 % a 52.01 % al incrementar el pH hasta 10.5. Asimismo, bajo condiciones óptimas de 35 % de sólidos y 12 minutos de flotación, se alcanzaron recuperaciones máximas de 87.27 % Cu y 54.64 % Au. Los modelos estadísticos mostraron altos coeficientes de ajuste (R^2 > 95 %), confirmando la significancia de las variables evaluadas. Se concluye que la mineralogía controla el desempeño metalúrgico y que la optimización de variables operativas permite mejorar significativamente la recuperación en sistemas complejos.

Palabras clave: flotación selectiva, mineralogía, cobre, oro, geometalurgia.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Abstract

The recovery of copper and gold in porphyry systems associated with argillic–limestone contacts present significant challenges due to mineralogical complexity. The objective of this study was to evaluate the influence of mineralogy on Cu and Au recovery through selective flotation in northern Peru. An experimental laboratory-scale study was conducted, including chemical characterization (0.49% Cu and 0.83 g/t Au), mineralogical analysis using optical microscopy and QEMSCAN, and metallurgical tests under a 2^2, factorial design, evaluating pH (9–10.5), solid percentage (28–35%), and flotation time (9–12 min). The results revealed a complex mineralogy dominated by quartz (30%), calcite (25%), clay (15%), and sulfides, with a significant presence of microcrystalline pyrite (up to 33.74%), in which gold is encapsulated. Cu recovery increased from 75.59% to 79.17% and Au recovery from 49.87% to 52.01% as pH increased to 10.5. Additionally, under optimal conditions of 35% solids and 12 minutes of flotation, maximum recoveries of 87.27% Cu and 54.64% Au were achieved. Statistical models showed high goodness-of-fit (R^2 > 95%), confirming the significance of the evaluated variables. It is concluded that mineralogy controls metallurgical performance and that the optimization of operational variables significantly improves recovery in complex systems.

Keywords: selective flotation, mineralogy, copper, gold, geometallurgy.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

La recuperación de cobre y oro en depósitos tipo pórfido constituye uno de los principales desafíos en la metalurgia extractiva, especialmente cuando estos metales se encuentran asociados a mineralogías complejas y zonas de contacto litológico (Agorhom et al., 2013; Finch & Tan, 2023). En particular, los contactos entre zonas de alteración argílica y unidades calizas representan ambientes geológicos donde se desarrollan asociaciones mineralógicas heterogéneas, que afectan significativamente la eficiencia de los procesos de concentración, como la flotación (Sillitoe, 2010; Reich et al., 2015).

En estos sistemas, el cobre se presenta principalmente en sulfuros como la calcopirita, mientras que el oro suele encontrarse finamente diseminado o asociado a minerales como la pirita, frecuentemente en forma submicroscópica o encapsulada (Cook et al., 2009; Deditius et al., 2014). Esta condición limita su liberación durante la molienda y reduce su recuperación simultánea, debido a diferencias en su comportamiento fisicoquímico y en sus asociaciones mineralógicas (Wills & Finch, 2016; Bulut et al., 2019).

Desde el enfoque geometalúrgico, la complejidad del contacto argílico-caliza se relaciona con la interacción de procesos hidrotermales y reacciones geoquímicas que modifican la textura, composición y distribución de los minerales. La presencia de arcillas puede afectar negativamente la flotación, mientras que los carbonatos pueden interferir en la química del proceso, reduciendo la eficiencia de recuperación (Parbhakar-Fox et al., 2013; Cruz et al., 2015).

Minerales auríferos refractarios: concepto y relevancia

Los minerales auríferos refractarios representan una categoría importante dentro de los recursos minerales de oro, caracterizada por presentar bajas recuperaciones mediante los procesos convencionales de cianuración. Esta condición se debe principalmente a que el oro se encuentra asociado o encapsulado dentro de minerales sulfurados, lo que impide su liberación durante las etapas de molienda y lixiviación (Aylmore & Muir, 2001; Adams, 2016).

Desde el punto de vista metalúrgico, un mineral se considera refractario cuando la recuperación de oro mediante cianuración directa es inferior al 70–75 %. Esta situación ocurre frecuentemente cuando el oro se encuentra finamente diseminado dentro de minerales como la pirita, arsenopirita

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

o pirrotita, donde la estructura cristalina del sulfuro actúa como una barrera que impide la interacción entre el oro y el cianuro (Adams, 2016).

Mineralogía del contacto argílico-caliza y su influencia metalúrgica

El contacto entre zonas de alteración argílica y unidades calizas constituye una interfaz geoquímica activa donde ocurren procesos de neutralización y precipitación de sulfuros metálicos. Estas condiciones favorecen la formación de asociaciones mineralógicas complejas, en las cuales el cobre y el oro pueden encontrarse distribuidos de manera heterogénea en diferentes fases minerales (Hedenquist et al., 2022; Zhao et al., 2025).

La presencia de minerales arcillosos como caolinita, illita y esmectita, propios de la alteración argílica, puede generar efectos adversos en la flotación, tales como el recubrimiento de partículas, aumento de la viscosidad de la pulpa y consumo elevado de reactivos. Asimismo, los minerales carbonatados presentes en la caliza pueden actuar como diluyentes o modificadores del pH, afectando la selectividad del proceso (Zhou et al., 2021; Cruz et al., 2022).

Estas condiciones hacen que la recuperación de cobre y oro dependa en gran medida de la comprensión de la mineralogía del sistema, especialmente en términos de asociaciones minerales, grado de liberación y distribución textural.

Flotación de sulfuros de cobre-oro en sistemas complejos

La flotación es el principal método de concentración para minerales sulfurados de cobre y oro, basado en las diferencias de propiedades superficiales entre los minerales. Sin embargo, en sistemas complejos como los contactos argílico-caliza, la eficiencia del proceso puede verse afectada por factores mineralógicos y operativos (Wills & Finch, 2016; Li et al., 2022).

El oro, en muchos casos, se encuentra asociado a la pirita en lugar de minerales de cobre, lo que dificulta su recuperación cuando se busca deprimir sulfuros de hierro para mejorar la calidad del concentrado. Esta situación genera un conflicto metalúrgico entre la recuperación de cobre y oro, requiriendo estrategias de optimización que consideren estas asociaciones (Xing et al., 2021; Bulut et al., 2019).

Además, variables como el pH, el porcentaje de sólidos y el tiempo de flotación influyen

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

significativamente en la eficiencia del proceso, siendo necesario evaluar su efecto de manera integrada para maximizar la recuperación metálica (Zhang et al., 2020).

Importancia de la caracterización mineralógica

El norte del Perú es una región con alto potencial para la explotación de depósitos de cobre y oro, donde los sistemas tipo pórfido presentan mineralizaciones complejas asociadas a contactos litológicos. Sin embargo, la falta de caracterización detallada de estas zonas ha limitado la eficiencia de los procesos de recuperación en muchas operaciones.

La optimización de los procesos metalúrgicos en estos sistemas no solo permite mejorar la rentabilidad de los proyectos mineros, sino también contribuye a un uso más eficiente de los recursos y a la reducción del impacto ambiental, al disminuir las pérdidas de metales en relaves.

El presente artículo tiene como objetivo evaluar la influencia de la mineralogía del contacto argílico-caliza en la recuperación de cobre y oro, mediante la caracterización química, mineralógica y metalúrgica del mineral, así como el análisis de variables operativas del proceso de flotación.

Para ello, se estudiaron muestras provenientes del norte del Perú, con el propósito de determinar las condiciones óptimas de operación que permitan maximizar la recuperación metálica y aportar al desarrollo de estrategias geometalúrgicas aplicadas a sistemas mineralizados complejos.

Material y métodos

Tipo y diseño de estudio

La presente investigación corresponde a un estudio experimental aplicado a nivel de laboratorio, orientado a evaluar el comportamiento metalúrgico de minerales provenientes del contacto argílico-caliza en un sistema tipo pórfido Cu–Au. El diseño experimental permitió analizar la influencia de variables operativas en la recuperación de cobre y oro mediante el proceso de flotación selectiva.

El estudio se desarrolló bajo un diseño factorial 2^2, el cual permitió evaluar el efecto de variables como el porcentaje de sólidos y el tiempo de flotación sobre la recuperación metálica. Este tipo de diseño es ampliamente utilizado en investigaciones metalúrgicas para optimizar condiciones de operación y establecer relaciones entre variables independientes y dependientes.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Población y muestra

La población del estudio estuvo conformada por minerales provenientes de la zona de contacto entre alteración argílica y unidades calizas, ubicadas en un depósito tipo pórfido en el norte del Perú. Este tipo de mineralización se caracteriza por presentar asociaciones complejas de sulfuros de cobre y minerales portadores de oro.

La muestra utilizada fue obtenida mediante muestreo representativo del material mineralizado, aplicando procedimientos de homogenización, cuarteo y reducción de tamaño para garantizar su representatividad. Posteriormente, el material fue acondicionado mediante secado y molienda, obteniéndose una muestra compuesta destinada a los análisis químicos, mineralógicos y pruebas metalúrgicas.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la obtención de información experimental se emplearon técnicas de caracterización mineralógica, análisis químico y pruebas metalúrgicas de laboratorio.

La caracterización mineralógica se realizó mediante microscopía óptica y técnicas automatizadas, con el objetivo de identificar las especies minerales presentes, su distribución y el grado de liberación de los sulfuros de cobre y minerales auríferos.

Asimismo, se efectuaron análisis químicos para determinar las leyes de cobre y oro en el mineral de cabeza, concentrados y relaves, lo que permitió evaluar el desempeño del proceso de flotación y calcular los balances metalúrgicos correspondientes.

Procedimiento experimental

El procedimiento experimental se desarrolló en etapas secuenciales. En primer lugar, se realizó la caracterización química y mineralógica del mineral de cabeza, con el fin de identificar las fases minerales presentes y su asociación con los metales de interés.

Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas de molienda para determinar la granulometría adecuada que permita un grado óptimo de liberación de los minerales valiosos.

En una segunda etapa, se realizaron ensayos de flotación selectiva, evaluando diferentes condiciones operativas de pH, porcentaje de sólidos y tiempo de flotación. Estas pruebas permitieron obtener concentrados de cobre-oro y relaves, a partir de los cuales se determinó la recuperación metálica.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Finalmente, se analizaron los resultados mediante balances metalúrgicos, con el objetivo de determinar las condiciones óptimas de operación que maximicen la recuperación de cobre y oro.

Análisis de datos

Los resultados obtenidos durante las pruebas metalúrgicas fueron evaluados mediante balances metalúrgicos y análisis estadístico. Se emplearon herramientas de análisis como el diseño factorial y análisis de varianza (ANOVA), con el fin de determinar la influencia y significancia de las variables operativas sobre la recuperación de cobre y oro.

Asimismo, se desarrollaron modelos de regresión para describir la relación entre las variables independientes (porcentaje de sólidos y tiempo de flotación) y las variables dependientes (recuperación de cobre y oro), permitiendo identificar las condiciones óptimas del proceso.

Consideraciones experimentales

Durante el desarrollo de los ensayos se mantuvieron condiciones controladas de operación, tales como pH de la pulpa, granulometría, porcentaje de sólidos y tiempo de residencia, con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Las pruebas se realizaron en equipos de laboratorio convencionales para flotación de minerales, utilizando reactivos adecuados para la recuperación de sulfuros de cobre y minerales auríferos.

Limitaciones del estudio

El estudio se desarrolló a escala de laboratorio utilizando muestras representativas de una zona específica de mineralización. Por lo tanto, los resultados obtenidos reflejan condiciones particulares del material analizado y de los parámetros evaluados.

Sin embargo, los resultados constituyen una base técnica importante para futuras investigaciones y para la aplicación de estrategias de optimización del proceso a escala industrial en sistemas geometalúrgicos similares.

Análisis de Resultados con Representaciones Gráficas

A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos en la investigación sobre la evaluación de la mineralización en el contacto argílico-caliza para mejorar la recuperación de cobre y oro mediante flotación selectiva. El análisis integra la información proveniente de la caracterización química y mineralógica del mineral, así como los resultados de las pruebas

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

metalúrgicas de flotación y el análisis factorial de las variables operativas.

Las representaciones gráficas y tablas permiten visualizar el comportamiento metalúrgico del sistema, así como la influencia de las variables evaluadas sobre la recuperación de los metales valiosos.

Caracterización mineralógica del mineral

El análisis químico del mineral de cabeza se presenta en la Tabla 1, donde se observa un contenido de cobre de 0.49 % y oro de 0.83 g/TM, acompañado de altos contenidos de SiO_2 (30.1 %) y CaO (20 %), lo que evidencia una matriz dominada por ganga silicatada y carbonatada.

Tabla 1

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

Muestra	Leyes							
	Cu (%)	Au (g/TM)	Fe (%)	S (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	LOI (%)
	0.49	0.83	6.2	3	30.1	8.2	20	2.8

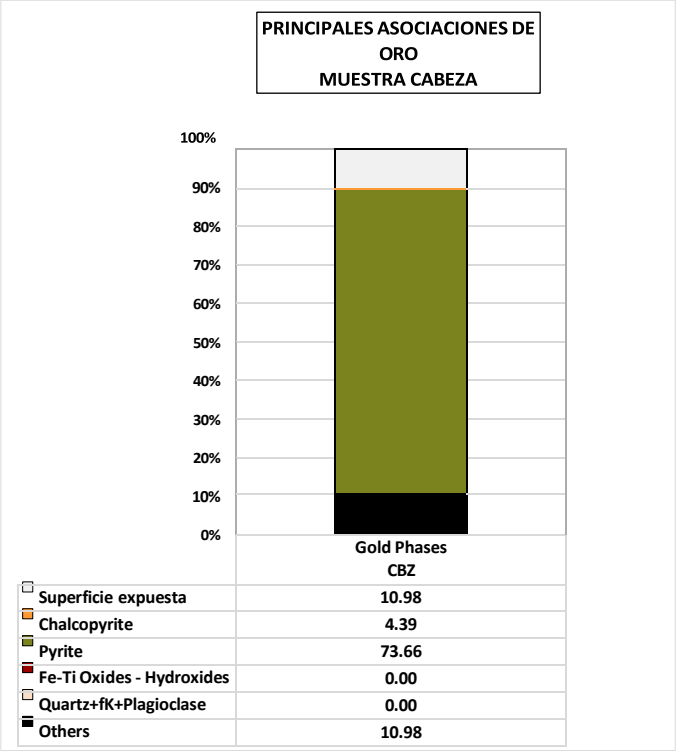
Nota: Los análisis químicos se llevaron a cabo utilizando la técnica espectrometría ICP-AES, para Cu, Fe, S, Al, Ca, Mg, K, Na, SiO_2, LOI, As (300ppm) y la técnica de ensayo al fuego con acabado por AAS para el Au.

La distribución de las asociaciones del oro se muestra en la Figura 1, donde se evidencia que el oro no se presenta como partículas libres, sino asociado a minerales sulfurados, principalmente pirita.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Figura 1

Principales asociaciones de oro Muestra de cabeza1



La caracterización mineralógica mediante microscopía óptica permitió identificar las principales fases minerales, las cuales se presentan en la Tabla 2, destacando la predominancia de cuarzo (30 %), calcita (25 %) y arcillas (15 %), así como la presencia de calcopirita (10 %) y pirita (8 %).

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Tabla 2

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

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_5FeS_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%	

El análisis mineralógico modal mediante QEMSCAN (Tabla 3) muestra una alta proporción de pirita microcristalina, especialmente en el concentrado, lo que confirma que el oro se encuentra principalmente encapsulado en esta fase mineral.

Tabla 3

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

Minerales	Cabeza	CST	RST
Calcopirita	1.31	0.55	0.15
Bornita	0.01	0.01	0.01
Calcocita	0.00	0.00	0.00
Covelita	0.01	0.01	0.00
Tennantita	0.0	0.04	0.00
Enargita	0.01	0.01	0.00
Pirita	4.13	12.66	2.28
Pirita Microcristalina	8.16	33.74	4.97
Esfalerita	0.06	0.02	0.01
Magnetita	0.9	0.44	1.04
Hematita	1.32	0.49	1.7
Goethita-Limonita	4.78	3.06	5.57
Óxidos de Fe-Ti	0.29	0.23	0.27

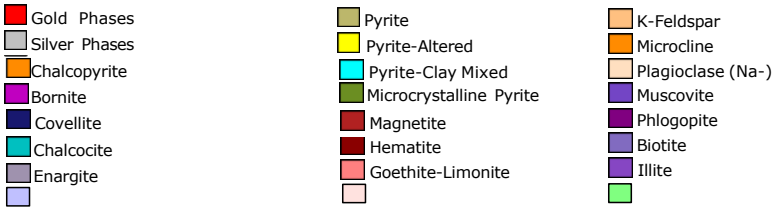
Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Cuarzo	55.36	29.21	62.30
Feldespato potásico (K)	7.88	6.01	8.17
Plagioclasa (Na-)	1.00	0.78	0.86
Montmorillonita	9.69	6.02	8.73
Micas	0.87	0.64	0.49
Arcillas de Si-Al	0.8	1.09	0.55
Calcita	0.4	0.96	0.27
Apatita	0.37	0.28	0.31
Clinocloro	0.4	0.31	0.45
Arcillas	0.07	0.05	0.08
Otros Sulfuros	0.01	0.05	0.01
Otros Silicatos	0.4	0.21	0.33
Otros Carbonatos	0.06	0.07	0.05
Otros fosfatos	0.01	0.01	0.01
Otros Sulfatos	0.01	0.02	0.01
Otros	1.67	3.03	1.39
Total	100	100	100

Las Figuras 2, 3 y 4 presentan la caracterización cualitativa y cuantitativa del mineral, evidenciando la asociación de la calcopirita con pirita, óxidos de hierro y minerales de ganga.

Figura 2

Lectura QEMSCAN usando la función SMS (Specific Mineral Search)



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Tennantite Quartz Clinochlore

Figura 3

Grano libre de calcopirita (cp) y pirita (py) (c). Grano libre mixto binario de gangas y pirita (GGs/py) y grano libre de sericita (ser) (d)

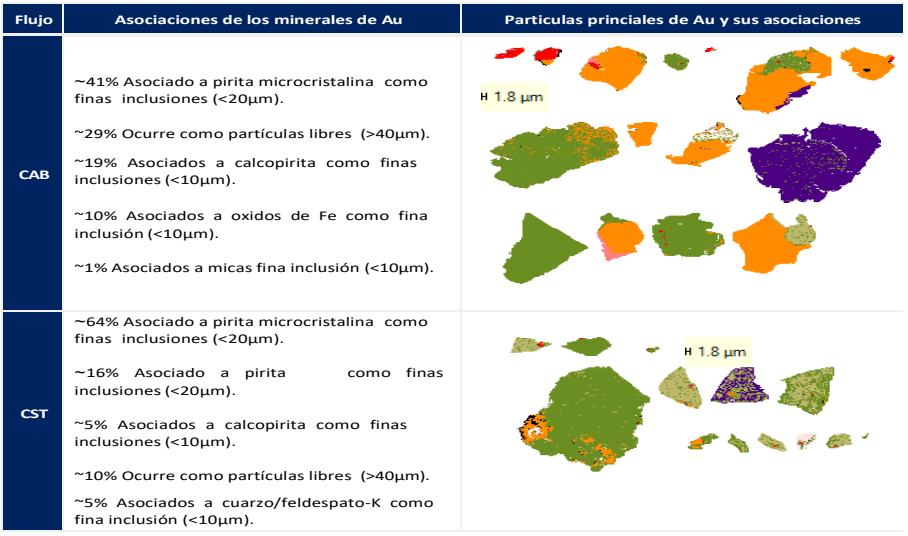
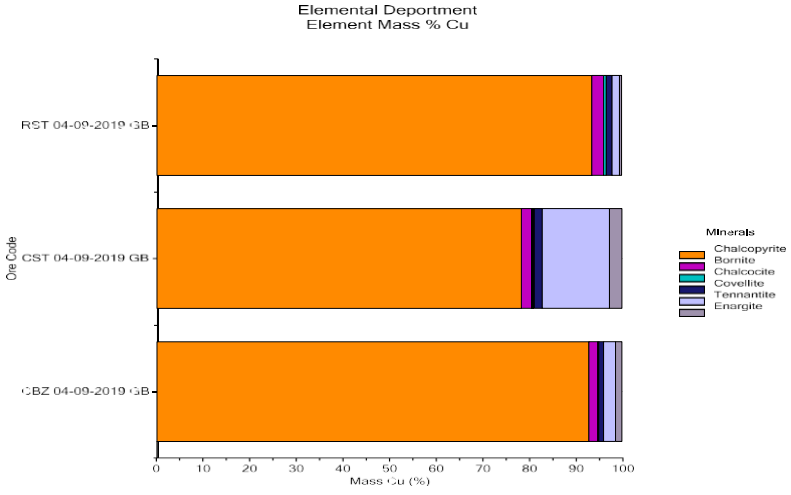


Figura 4

Análisis cuantitativo y cualitativo para minerales de Cu (BMA y PMA)



Asimismo, el grado de liberación de la calcopirita se presenta en las Figuras 5, 6 y 7, donde se observa que las partículas finas (<30 µm) presentan mayor asociación con sulfuros, mientras que partículas gruesas (>130 µm) muestran liberación incompleta.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Figura 5

Asociaciones vs liberación de la calcopirita en la muestra

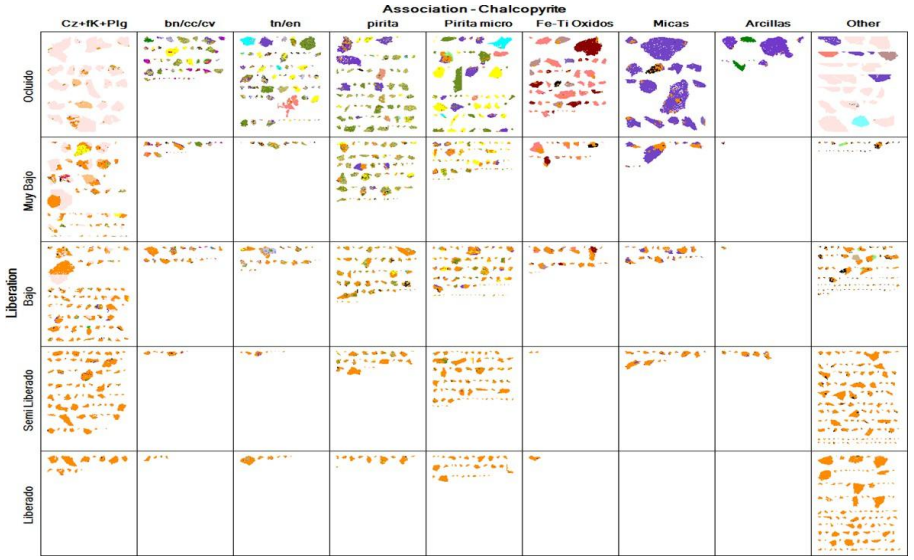
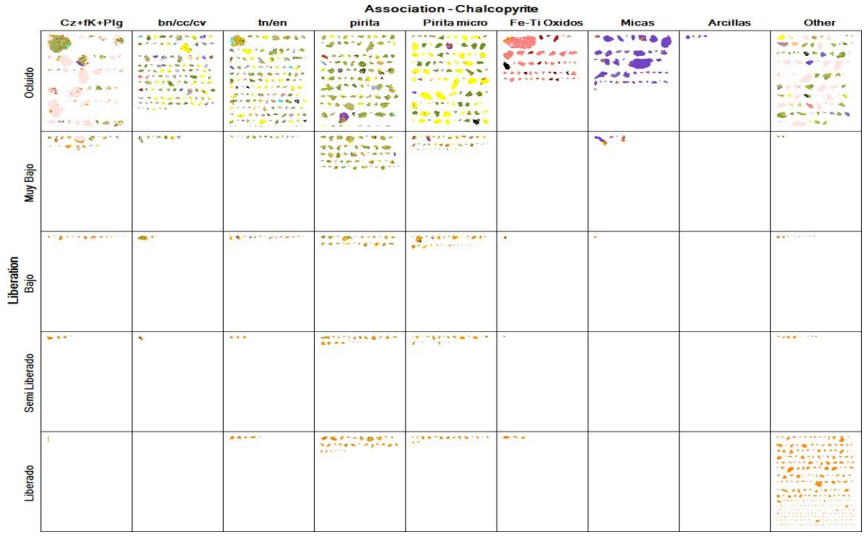


Figura 6

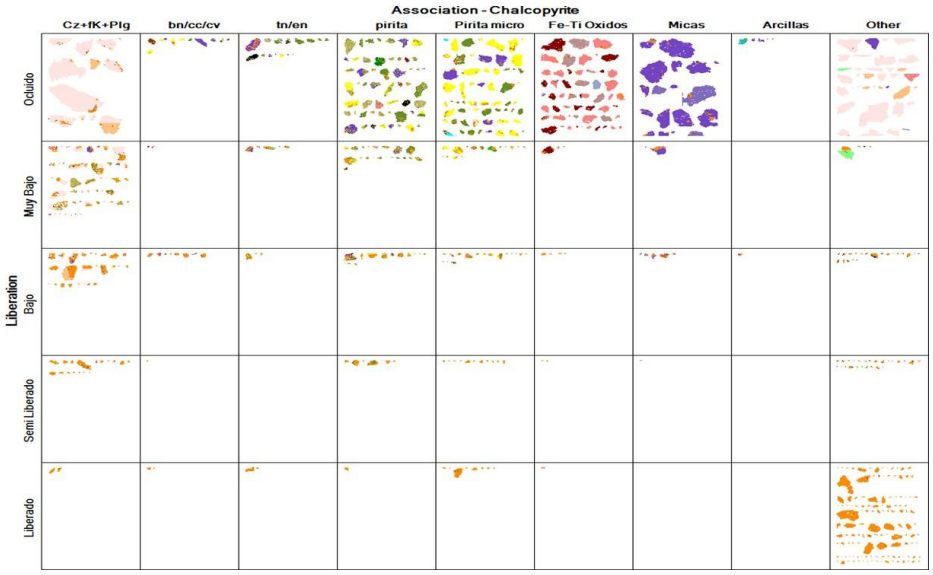
Asociaciones vs liberación de la calcopirita en la muestra



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Figura 7

Asociaciones vs liberación de la calcopirita en la muestra



Estos resultados indican que el oro presenta un comportamiento parcialmente refractario, debido a su asociación con pirita microcristalina y su baja liberación.

Resultados de las pruebas de flotación

En función de la caracterización mineralógica, se realizaron pruebas de flotación selectiva con el objetivo de evaluar la recuperación de cobre y oro.

Las condiciones operativas empleadas se presentan en la Tabla 4, donde se detallan los rangos de pH, porcentaje de sólidos y dosificación de reactivos utilizados en el proceso.

Tabla 4

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

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

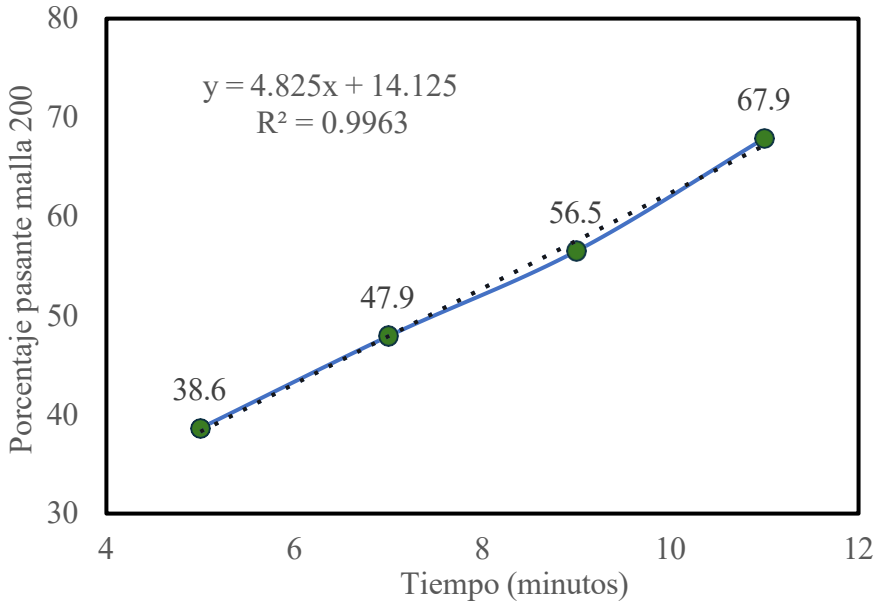
Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

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

La curva de moliendabilidad del mineral se muestra en la Figura 8, donde se establece un tamaño óptimo de 55 % -200 malla para las pruebas de flotación.

Figura 8

Asociaciones vs liberación de la calcopirita en la muestra



Efecto del pH en la recuperación de Cu y Au

Los resultados de los balances metalúrgicos obtenidos a diferentes valores de pH se presentan en las Tablas 5 a 8.

Tabla 5

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			

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Tabla 6

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			

Tabla 7

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			

Tabla 8

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			

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Se observa que la recuperación de cobre incrementa desde 75.59 % a pH 9 hasta 79.17 % a pH 10.5, mientras que la recuperación de oro aumenta de 49.87 % a 52.01 %.

Estos resultados indican que condiciones ligeramente alcalinas favorecen la flotación de sulfuros de cobre y la recuperación del oro asociado.

Discusión e interpretación

A Los resultados obtenidos en este estudio confirman que la recuperación de cobre y oro en el contacto argílico-caliza está fuertemente condicionada por la mineralogía del sistema, en concordancia con lo reportado para depósitos tipo pórfido, donde la complejidad mineralógica y las asociaciones texturales controlan el desempeño metalúrgico (Agorhom et al., 2013; Sillitoe, 2010). La presencia dominante de ganga silicatada (≈30 % de cuarzo), carbonatada (≈25 % de calcita) y arcillas (≈15 %) genera un entorno desfavorable para la flotación, debido a efectos como el recubrimiento de partículas y la interferencia en la química de la pulpa, tal como ha sido descrito en sistemas con alta alteración argílica (Zhou et al., 2021; Cruz et al., 2022).

Desde el punto de vista mineralógico, la identificación de pirita microcristalina en proporciones significativas (hasta 33.74 % en el concentrado) confirma que el oro se encuentra principalmente encapsulado en sulfuros de hierro, lo que explica su comportamiento parcialmente refractario. Este resultado es consistente con lo reportado por Reich et al. (2015) y Deditius et al. (2014), quienes indican que el oro submicroscópico en pirita limita su liberación y recuperación mediante procesos convencionales. En este contexto, la recuperación de oro obtenida (máximo 54.64 %) refleja las limitaciones inherentes a su asociación mineralógica, en contraste con el cobre, cuya recuperación alcanzó valores de hasta 87.27 %, debido a su presencia predominante como calcopirita parcialmente liberada.

Asimismo, el análisis de liberación mostró que la calcopirita presenta intercrecimientos con cuarzo, arcillas y óxidos de hierro, lo que reduce su eficiencia de recuperación, especialmente en tamaños gruesos (>130 μm). Este comportamiento coincide con lo reportado por Wills y Finch (2016), quienes destacan que la liberación incompleta constituye una de las principales limitantes en la flotación de sulfuros complejos.

En cuanto a las variables operativas, el incremento del pH hasta 10.5 generó una mejora en la recuperación de cobre (79.17 %) y oro (52.01 %), lo que puede atribuirse a una mayor estabilidad de los sulfuros y a una mejor selectividad frente a la pirita. Este comportamiento es consistente con

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

estudios que indican que condiciones alcalinas favorecen la flotación de sulfuros de cobre, aunque pueden limitar la recuperación de oro cuando este se encuentra asociado a sulfuros de hierro (Xing et al., 2021).

Por otro lado, el porcentaje de sólidos (35 %) y el tiempo de flotación (12 min) mostraron ser variables críticas, incrementando la recuperación de cobre en más de 8 % respecto a condiciones iniciales y de oro en aproximadamente 3 %. Este comportamiento evidencia la importancia de la cinética de flotación y la probabilidad de colisión partícula-burbuja, tal como ha sido ampliamente documentado en estudios sobre optimización de flotación (Zhang et al., 2020).

El análisis factorial permitió confirmar que el tiempo de flotación es el factor más influyente en la recuperación de cobre, mientras que el porcentaje de sólidos tiene mayor impacto en la recuperación de oro. Esta diferenciación refuerza la existencia de un conflicto metalúrgico entre ambos metales, donde la optimización de condiciones para uno no necesariamente maximiza la recuperación del otro, tal como ha sido descrito en sistemas Cu-Au con presencia significativa de pirita (Bulut et al., 2019).

Finalmente, desde un enfoque geometalúrgico, los resultados obtenidos demuestran que la integración de la caracterización mineralógica con el análisis de variables operativas permite establecer relaciones directas entre la mineralogía y la respuesta metalúrgica del mineral. Este enfoque es clave para el diseño de estrategias de procesamiento en depósitos complejos, donde la variabilidad mineralógica controla la eficiencia del proceso, tal como señalan Hedenquist et al. (2022)

Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que la mineralogía del contacto argílico-caliza ejerce un control determinante sobre la recuperación de cobre y oro, debido a la compleja asociación entre sulfuros, ganga silicatada y carbonatada. El análisis químico evidenció leyes de 0.49 % Cu y 0.83 g/TM Au, acompañadas de altos contenidos de SiO_2 (30.1 %) y CaO (20 %), así como Al_2O_3 (8.2 %), lo que confirma la presencia significativa de minerales arcillosos. Esta composición mineralógica condiciona la respuesta metalúrgica del sistema, generando efectos adversos como baja liberación, recubrimiento de partículas y consumo elevado de reactivos, factores que impactan directamente en la eficiencia del proceso de flotación.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

La caracterización mineralógica mediante microscopía óptica y QEMSCAN permitió establecer que el oro no se encuentra como fase libre, sino principalmente asociado a pirita microcristalina, alcanzando valores de hasta 33.74 % en el concentrado (CST). Esta forma de ocurrencia explica su comportamiento parcialmente refractario y su dependencia directa de la flotación de sulfuros de hierro. Asimismo, se identificó que la calcopirita (principal mineral de cobre) presenta asociaciones complejas con cuarzo (hasta 55.36 % en cabeza), feldespatos y óxidos de hierro, así como intercrecimientos que limitan su liberación, especialmente en partículas gruesas (>130 µm), mientras que en tamaños finos (<30 µm) se observa una mayor asociación con pirita y arcillas.

Desde el punto de vista operativo, el pH mostró una influencia significativa en la recuperación metálica, observándose un incremento progresivo de la recuperación de cobre desde 75.59 % a pH 9 hasta 79.17 % a pH 10.5, mientras que la recuperación de oro aumentó de 49.87 % a 52.01 %. Estos resultados evidencian que condiciones alcalinas favorecen la estabilidad de los sulfuros y mejoran la selectividad del proceso, aunque con limitaciones en la recuperación de oro debido a su asociación con pirita.

El efecto del porcentaje de sólidos y el tiempo de flotación fue aún más significativo, alcanzándose recuperaciones máximas de 87.27 % de Cu y 54.64 % de Au bajo condiciones de 35 % de sólidos y 12 minutos de flotación. En comparación, condiciones iniciales de 28 % de sólidos y 9 minutos presentaron recuperaciones de 79.18 % Cu y 51.61 % Au, lo que evidencia un incremento de +8.09 % en cobre y +3.03 % en oro. Estos resultados confirman que la cinética de flotación y la concentración de pulpa son variables críticas para maximizar la recuperación en sistemas mineralógicos complejos.

Referencias Bibliográficas

Adams, M. D. (2016). Gold ore processing: Project development and operations (2nd ed.). Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2013-0-16489-2

Agorhom, E. A., Skinner, W., & Zanin, M. (2013). Influence of gold mineralogy on its flotation recovery in a porphyry copper–gold ore. Chemical Engineering Science, 99, 127–138. https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.05.037

Aylmore, M. G., & Muir, D. M. (2001). Thiosulfate leaching of gold—A review. Minerals Engineering, 14(2), 135–174. https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00172-2

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Bulut, G., Yenial, U., & Emiroğlu, M. (2019). Beneficiation of refractory gold ores containing sulfide minerals by flotation. Minerals Engineering, 142, 105894. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105894

Cook, N. J., Ciobanu, C. L., & Mao, J. (2009). Textural control on gold distribution in As-free pyrite from the Dongping, Huangtuliang and Hougou gold deposits, North China Craton. Chemical Geology, 264(1–4), 101–121. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.02.020

Cruz, N., Peng, Y., Wightman, E., & Xu, N. (2015). The interaction of clay minerals with gypsum and its effects on copper–gold flotation. Minerals Engineering, 77, 121–130. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.005

Cruz, N., Peng, Y., Wightman, E., & Xu, N. (2022). The effect of carbonate minerals on the flotation of copper ores: A review. Minerals Engineering, 187, 107810. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107810

Deditius, A. P., Utsunomiya, S., Ewing, R. C., Chryssoulis, S. L., Venter, D., Kesler, S. E., & Becker, U. (2014). Decoupled geochemical behavior of As and Cu in hydrothermal systems: Implications for gold incorporation in pyrite. Geochimica et Cosmochimica Acta, 140, 644–670. https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.05.021

Finch, J. A., & Tan, Y. H. (2023). On limits to flotation cell size. Minerals, 13(3), 411. https://doi.org/10.3390/min13030411

Hedenquist, J. W., Arribas, A., & Reynolds, T. J. (2022). Exploration implications of multiple formation processes in porphyry and epithermal systems. Economic Geology, 117(3), 609–635. https://doi.org/10.5382/econgeo.4956

Li, J., Yang, H., & Zhao, R. (2022). Mineralogical characteristics and recovery process optimization analysis of a refractory gold ore with gold particles mainly encapsulated in pyrite and arsenopyrite. Chemie der Erde – Geochemistry, 82(4), 125941. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2022.125941

Parbhakar-Fox, A., Lottermoser, B. G., & Bradshaw, D. J. (2013). Evaluating waste rock mineralogy and microtexture during kinetic testing for improved acid rock drainage prediction. Minerals Engineering, 52, 111–124. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.02.012

Reich, M., Deditius, A., Chryssoulis, S., Li, J., Ma, C., Parada, M. A., Barra, F., Mittermayr, F., & Lagos, M. (2015). “Invisible” gold in pyrite and arsenopyrite: Evidence for submicroscopic

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

gold and implications for ore processing. Chemical Geology, 399, 63–76. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.02.004

Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. Economic Geology, 105(1), 3–41. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3

Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery (8th ed.). Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/C2013-0-16363-1

Xing, Y., Xu, M., & Gui, X. (2021). Effect of pyrite on the flotation of gold-bearing ores. Minerals Engineering, 170, 106997. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106997

Zhang, W., Honaker, R., & Groppo, J. (2020). A review of factors that influence the flotation of fine particles. Minerals Engineering, 146, 106154. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106154

Zhao, H., Han, Y., Liu, Y., Mao, G., Chen, L., Cui, Y., Liu, Y., Liu, Y., Jiang, Q., & Wang, L. (2025). Chronology and petrogenesis of the Yangjiayu Complex: Evidence from zircon U–Pb dating and geochemistry. Minerals, 15(3), 321. https://doi.org/10.3390/min15030321

Zhou, Z., Shi, Q., Feng, Q., & Li, H. (2021). Effect of clay minerals on flotation and its mechanism: A review. Minerals Engineering, 170, 107050. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107050

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional