

## La Importancia de la Caracterización Mineralógica en la Minería.

Abraham G. Lomelí, Ma. Teresa Pineda Méndez\*\*

<sup>1</sup>CORPORACIÓN QUÍMICA PLATINUM. Carretera Federal 45, Km 161+200, Int. 6 Col. Ejido Los Sauces, Silao, Gto

[mtpineda@platinum-corp.com.mx](mailto:mtpineda@platinum-corp.com.mx)

### RESUMEN

La caracterización mineralógica es fundamental para optimizar los procesos metalúrgicos y mejorar la recuperación de metales en las operaciones de procesamiento. En el presente trabajo, se destacará la relevancia de la microscopía electrónica de barrido (SEM) como una de las técnicas clave para obtener información detallada sobre la textura, morfología y composición de los minerales. A través de imágenes de alta resolución, el SEM permite identificar la liberación de minerales valiosos y su asociación con la ganga, información crucial para diseñar proyectos de investigación metalúrgica. También se hará énfasis a la técnica por difracción de rayos x, la cual es fundamental en la caracterización mineralógica, ya que permite identificar las fases cristalinas presentes en un mineral.

Se presentan tres casos de estudio reales aplicados en investigaciones metalúrgicas, donde la caracterización mineralógica ha permitido mejorar el comportamiento de los minerales en diversas condiciones del procesamiento. Estos casos ilustran cómo la integración de técnicas avanzadas de análisis puede marcar la diferencia en la toma de decisiones y en la optimización de las operaciones metalúrgicas.

**PALABRAS CLAVE:** *caracterización, mineralogía, optimización.*

## ANTECEDENTES

La caracterización mineralógica es el estudio detallado de los minerales presentes en una muestra, enfocándose en su composición química, estructura cristalina, textura y asociación mineral. Este análisis es clave para entender el comportamiento de los minerales en los procesos metalúrgicos, permitiendo una optimización de los métodos de beneficio, recuperación de metales y eficiencia operativa. (Petersen, 2020).

En Corporación Química Platinum desarrollamos proyectos de investigación, en donde la caracterización mineralógica se ha convertido en una herramienta fundamental para el éxito de nuestros estudios. Nuestra labor no solo se centra en la mejora de procesos metalúrgicos tradicionales, sino también en la innovación y desarrollo de nuevas tecnologías que optimicen la extracción y recuperación de metales.

En los proyectos de investigación que hemos realizado, la caracterización mineralógica ha sido clave en varios casos exitosos, que destacan la importancia de esta herramienta en la optimización de los procesos metalúrgicos. Se trabajó con tres diferentes tipos de minerales, los cuales presentaban una problemática en los procesos metalúrgicos. Estos ejemplos destacan cómo la caracterización mineralógica ha sido un factor determinante en la optimización de nuestros proyectos de investigación. Al identificar las características particulares de cada mineral, hemos podido diseñar soluciones técnicas específicas que maximizan la recuperación de metales y minimizan los costos operativos. A continuación, se detallan estos tres casos de estudio:

### Caso 1

La primera muestra mineral analizada, corresponde a un caso en donde el objetivo fue optimizar la recuperación de valores, especialmente de cobre, para lo cual se requirió hacer un estudio de caracterización por Microscopía Electrónica de Barrido y microanálisis acoplado, que, a la vez, fue de utilidad para hacer una comparativa entre fotomicrografías con un estudio mineragráfico, usando un microscopio óptico de luz reflejada y las fotomicrografías obtenidas por el SEM.

### Caso 2

La segunda muestra mineral se analizó para ver las posibilidades de recuperación de oro y plata, realizando un estudio de caracterización por Microscopía Electrónica de Barrido y microanálisis acoplado, para determinar las especies portadoras de los elementos de interés, así como los tamaños de partícula, liberación y asociación con otros minerales no deseables.

### Caso 3

El objetivo de análisis de esta muestra mineral fue analizar las posibilidades de recuperación de cobre, para lo cual, se requirió de un estudio de caracterización mineralógica por la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido y microanálisis acoplado y determinar las especies portadoras del elemento de interés. También se requiere deprimir el fierro, para concentrarlo en un circuito independiente. Para esto,

se realizó un estudio de caracterización mineralógica por la técnica de difracción de rayos X, a una muestra de colas de una prueba de flotación, para determinar las especies portadoras de hierro.

## **METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Las muestras minerales utilizadas en estos tres estudios fueron proporcionadas directamente de los procesos operativos del cliente, las cuales, han sido previamente trituradas y molidas de acuerdo con el tamaño de partícula que corresponde al p80 establecido en el proceso del cliente. Para garantizar un análisis adecuado y representativo, se siguieron los siguientes pasos:

### 1. Preparación de las probetas:

- 1.1 Se encapsularon las muestras minerales en resina epóxica, lo que permite obtener una probeta estable y bien definida para el análisis.
- 1.2 La superficie de la probeta fue cuidadosamente pulida utilizando una serie de lijas de diferente granulometría, comenzando con las más gruesas y progresando hacia las más finas.
- 1.3 Para lograr un acabado espejo, que es esencial para obtener imágenes de alta resolución en la microscopía electrónica de barrido (SEM), se emplearon pastas de diamante con distintos tamaños de grano.
- 1.4 Para el caso del estudio por la técnica de difracción de rayos X, la muestra fue preparada y homogeneizada de tal manera que pasara el 100% por la malla 325 para su montaje correcto y así evitar orientaciones preferenciales.

### 2. Análisis mineralógico:

- 2.1 Posteriormente, las probetas con acabado espejo fueron sometidas a análisis mineralógicos utilizando técnicas avanzadas como la microscopía electrónica de barrido (SEM), permitiendo identificar la distribución de minerales de interés y sus características microestructurales.
- 2.2 La muestra que se preparó para el análisis por difracción de rayos X fue colocada en un portamuestras y sometida al difractor. Los patrones de difracción obtenidos fueron comparados con bases de datos cristalográficas para identificar las fases minerales presentes en la muestra.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

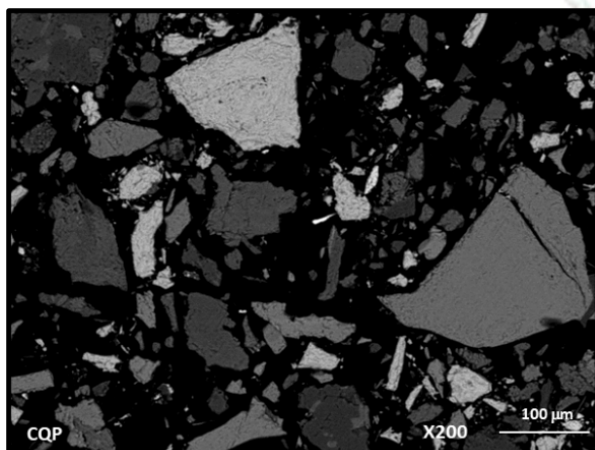
### Caso 1

La tabla 1 muestra los análisis de cabeza general de esta muestra mineral.

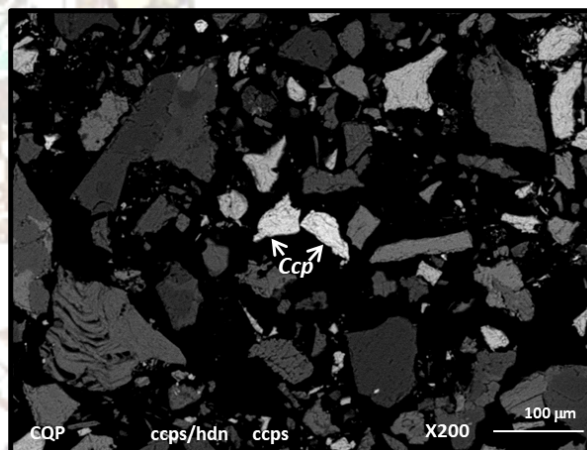
**Tabla 1.** Análisis de cabeza general.

Au (g/Ton)	Ag (g/Ton)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)
0.2279	21.2472	0.087	0.698	0.501	18.145

Como característica general, se observa que la muestra está mayormente constituida por **hedenbergita** y **óxidos de hierro**. Otras especies que se presentan en bajísimas proporciones corresponden a Feldespatos, pirita, cuarzo y calcita. Especies de importancia que alcanzan a observarse son la **Calcopirita**. En general se observa un alto grado de liberación de las especies. En las Figuras 1 y 2 se presentan los aspectos generales de esta muestra.



**Figura 1.** Aspecto general que muestra un alto grado de liberación de las partículas en general, hedenbergita y óxidos de hierro. 200 X.



**Figura 2.** Al centro, partículas libres de Calcopirita entre partículas de hedenbergita y óxidos de hierro. 200 X.

### **Especies minerales de Cobre**

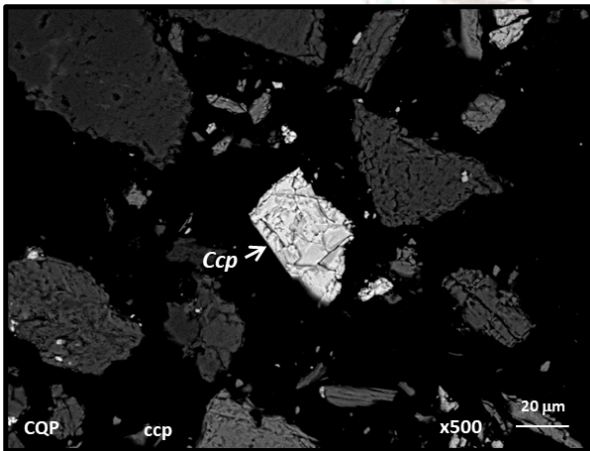
Se encontró como única especie de cobre a la **Calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>)**

Las partículas de Calcopirita presentan un grado de liberación de 70%, y las uniones son de tipo simple con Hedenbergita (CaFeSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>). En la Tabla 2 se indican las relaciones texturales la Calcopirita.

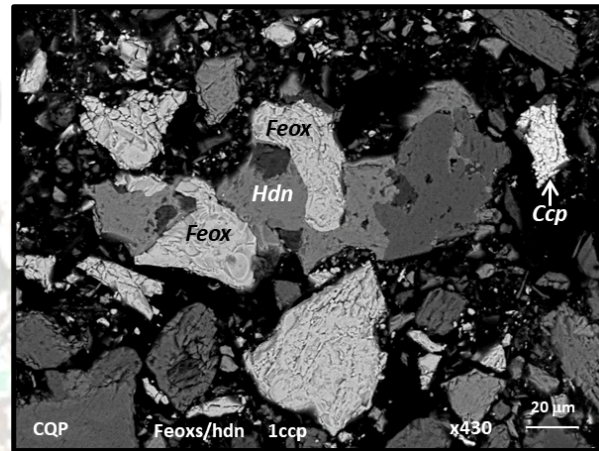
**Tabla 2.** Características texturales de la calcopirita.

Asociación	Proporción %	Tipo de unión	Tamaño (mm)	
			Promedio	Variación
Calcopirita libre	70%	Libre	15	2 - 40
Calcopirita-hedenbergita	30%	Simple (tipo 1a)	25	20 - 30

Las figuras 3 y 4 muestran imágenes sobre las relaciones texturales de la calcopirita.

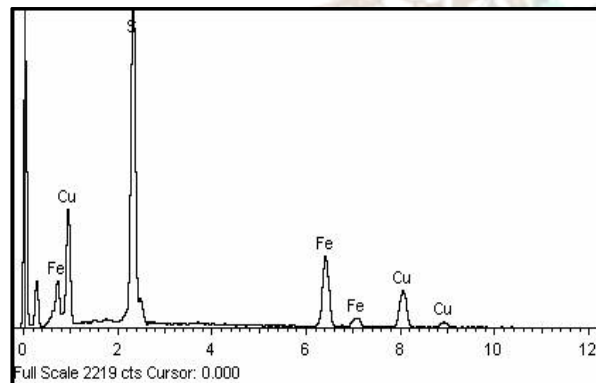


**Figura 3.** Al centro, partícula de Calcopirita libre. 500 X.



**Figura 4.** Al centro, unión simple entre óxidos de hierro y hedenbergita. A la derecha, Calcopirita libre. 430 X.

La figura 5 muestra el espectro de microanálisis de la fase de mayor interés, en este caso, la calcopirita.



**Figura 5.** Espectro de microanálisis correspondiente a calcopirita.

### Wurtzita como otro mineral de interés

Otra especie que podría ser de interés por su posible afectación a la calidad del concentrado de cobre corresponde a un sulfuro de zinc, el cual puede llegar a contener en su composición una pequeña proporción de hierro en solución sólida, lo cual podría indicar que se trata de Wurtzita, y se distingue de la Esfalerita, ya que esta última normalmente presenta una mayor cantidad de hierro; además, no se observó un clivaje plenamente distintivo asociado a la Esfalerita. Otra diferencia de la Wurtzita es que posee una estructura cristalina hexagonal, mientras que la estructura de la Esfalerita es cúbica.

En este caso la Wurtzita presenta un grado de liberación del 90%, y la pequeña fracción asociada ocurre con hedenbergita, es decir, el 10%. Los tamaños de partícula varían entre 5 y 45 micrómetros con un promedio de 20.

La figura 6 muestra una comparación entre una fotomicrografía de un estudio minerográfico, obtenida de un microscopio óptico de luz transmitida (figura 6 A), y la relación textural de la wurtzita, la cual, se obtuvo a través de un microscopio electrónico de barrido (figura 6 B).

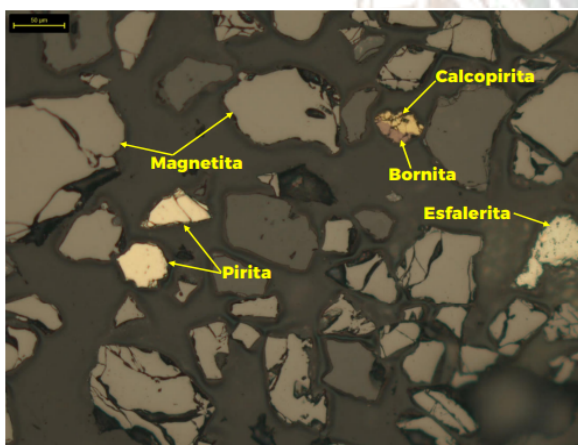


Figura 6 A. Fotomicrografía tomada con microscopio óptico de luz reflejada y objetivo de 20X con nicolas.

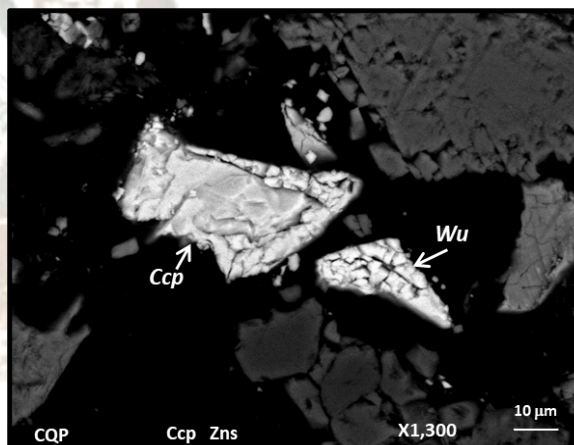


Figura 6 B. Al centro, partículas libres de Calcopirita y de Wurtzita. 1,300 X.

La figura 7 muestra el espectro de microanálisis de la fase wurtzita.

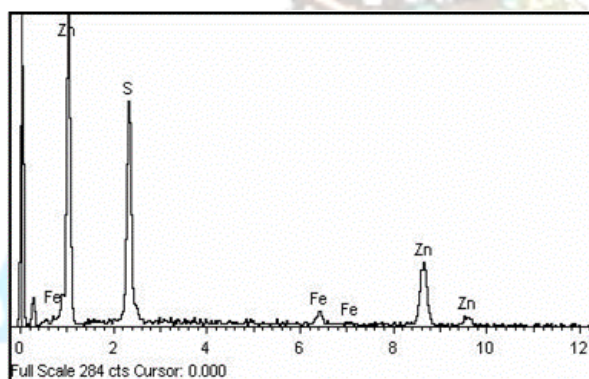


Figura 7. Espectro de microanálisis correspondiente a Wurtzita.

## Pruebas Experimentales de Flotación

Después de analizar el estudio de caracterización mineralógica, se corrieron varias pruebas experimentales de flotación, buscando mejorar los grados de los concentrados, así como optimizar las recuperaciones. La tabla 3 muestra una comparación entre la prueba STD y la prueba con las mejores condiciones de flotación. Cabe mencionar que, el p80, jugó un papel muy importante para la obtención de mejores resultados.

**Tabla 3.** Comparación de resultados con condiciones STD y condiciones propuestas por CQP.

Prueba	p80 (µm)	Peso (g)	GRADO				% RECUPERACIÓN			
			Au (g/Ton)	Ag (g/Ton)	Cu (%)	Zn (%)	Au	Ag	Cu	Zn
STD	160.4	87.3	2.0	163.9	9.2	3.5	89.7	86.6	84.7	58.2
CQP	125.6	60.4	5.2	294.7	14.2	3.4	94.7	83.9	95.3	17.4

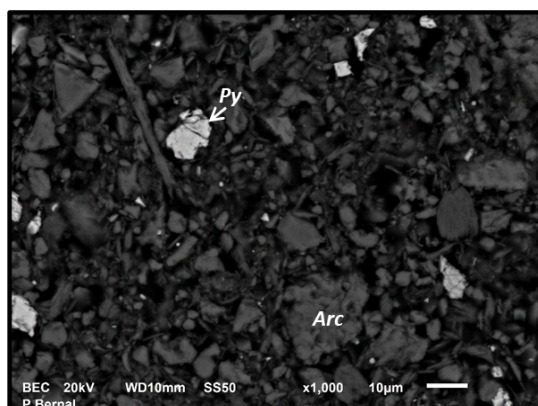
## Caso 2

La tabla 4 muestra los análisis de cabeza general de esta muestra mineral.

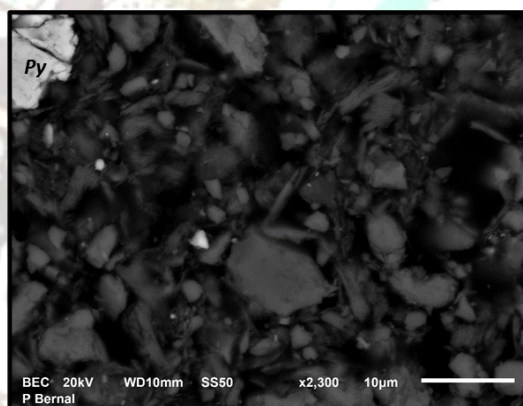
**Tabla 4.** Análisis de cabeza general.

Au (g/Ton)	Ag (g/Ton)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	C (%)
6.126	14.9051	0.054	0.007	0.015	2.66	0.46

Como característica general, se observa que la muestra está mayormente constituida por **arcillas del tipo de la caolinita**, además de material fino de cuarzo y pirita. En las Figuras 8 y 9 se presentan los aspectos generales



**Figura 8.** Aspecto general que muestra principalmente fino material arcilloso, cuarzo fino y pirita. 1,000X.



**Figura 9.** Aspecto general que muestra principalmente fino material arcilloso, cuarzo fino y pirita. 2,300X.

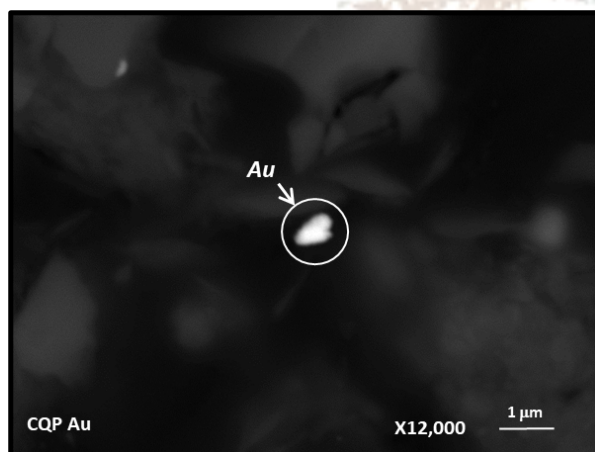
### Especies minerales de Au

La especie encontrada corresponde a **Oro nativo (Au)**. La tabla 5 muestra las relaciones texturales.

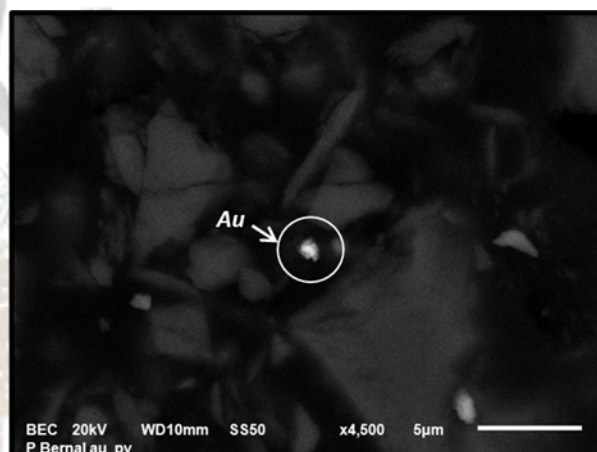
**Tabla 5.** Características texturales del Oro nativo.

Asociación	Proporción %	Tipo de unión	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	
			Promedio	Variación
Oro nativo	100	Libre pero rodeado estrechamente por fino material arcilloso	<1	<1

Las figuras 10 y 11 muestran la especie de Oro nativo.



**Figura 10.** A mayor magnificación, se aprecian los contornos de la partícula de Oro nativo y su envolvimiento con el material arcilloso, 12,000X.



**Figura 11.** Al centro, esta partícula de Oro nativo presenta las mismas características y su envolvimiento por material fino arcilloso. 4,500X.

### Especies minerales de plata

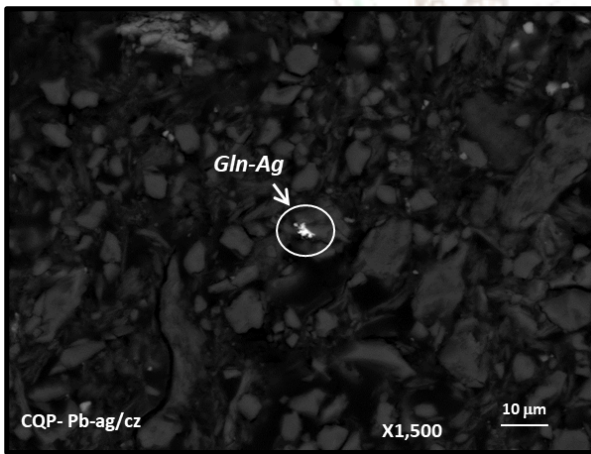
La especie que contiene plata corresponde a **Galena argentífera (Pb, Ag)S**. La Galena convencional contiene 86.6% de plomo y 13.4% de azufre, pero en algunos casos, como el presente, se detecta la presencia de plata y se le conoce como "Galena argentífera". En estos casos, el plomo puede ser sustituido por la plata en la estructura cristalina. La tabla 6 muestra las relaciones texturales.

Las figuras 12 y 13 muestran las imágenes de las relaciones texturales de las especies con plata, en este caso la especie fuertemente dominante es la Galena argentífera.

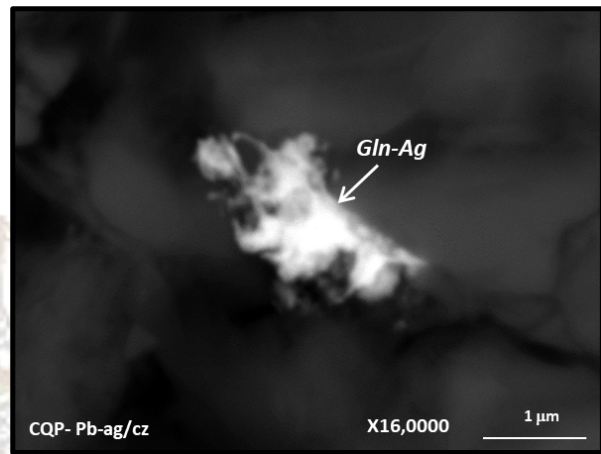


**Tabla 6.** Características texturales de la Galena argentífera.

Asociación	Proporción %	Tipo de unión	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	
			Promedio	Variación
Galena argentífera libre	100	Libre pero rodeada estrechamente por fino material arcilloso	1	<1-3

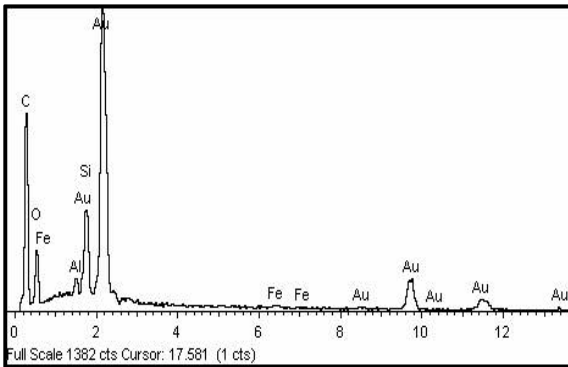


**Figura 12.** Galena Argentífera rodeada estrechamente por fino material arcillosos. 1,500 X.

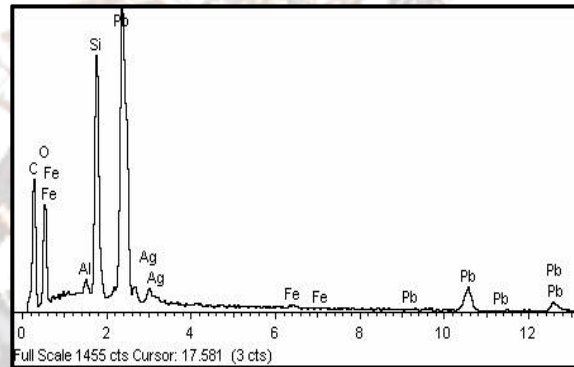


**Figura 13.** Detalle del contacto de la Galena Argentífera con partículas de arcilla. 16,000 X.

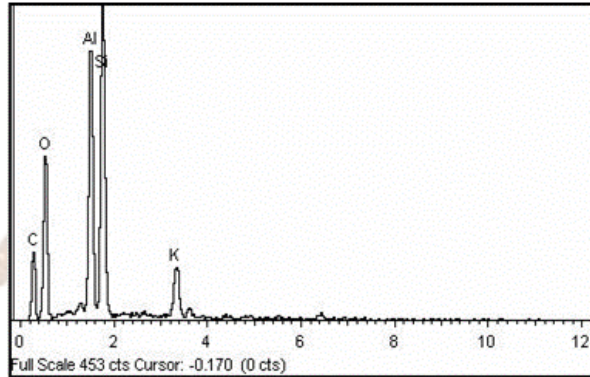
Las figuras 14-16 muestran los espectros de microanálisis de las fases de mayor interés.



**Figura 14.** Espectro de microanálisis correspondiente a Oro nativo.



**Figura 15.** Espectro de microanálisis correspondiente a Galena Argentífera.



**Figura 16.** Espectro de microanálisis correspondiente a material arcilloso del tipo de la caolinita.

### Pruebas Experimentales de Flotación

Después del análisis del estudio de caracterización mineralógica, se procedió a realizar pruebas cinéticas de flotación, a seis minutos, con el objetivo de optimizar las recuperaciones de Au y Ag. La tabla 7 muestra la prueba estándar, mientras que en la tabla 8 se observa la prueba que tuvo la mejor recuperación de los valores de interés. El p80 con el que se realizaron las pruebas experimentales de flotación fue de 97.2 micrómetros.

**Tabla 7.** Prueba STD.

Minuto	Peso (g)	GRADO		% RECUPERACIÓN	
		Au (g/Ton)	Ag (g/Ton)	Au	Ag
0.5	30.9	68.7	236.6	38.4	44.2
1.0	52.5	60.3	198.4	57.3	62.9
2.0	74.8	49.9	158.9	67.6	71.8
3.0	96	40.5	129.8	70.4	75.3
4.0	114.9	34.8	111.8	72.4	77.6
5.0	130.1	31.2	101.0	73.5	79.4
6.0	148.7	27.7	90.1	74.6	80.9

**Tabla 8.** Prueba con mejores grados en productos y mejor recuperación.

Minuto	Peso (g)	GRADO		% RECUPERACIÓN	
		Au (g/Ton)	Ag (g/Ton)	Au	Ag
0.5	18	179.5	369.6	45.3	45.8
1.0	36.3	125.9	270.5	64.1	67.6
2.0	62.4	83.4	183.1	72.9	78.6
3.0	83.5	65.5	144.0	76.6	82.7

4.0	98.7	57.0	125.7	78.9	85.4
5.0	115.7	49.4	110.0	80.1	87.6
6.0	131.8	44.0	98.8	81.2	89.5

### Caso 3

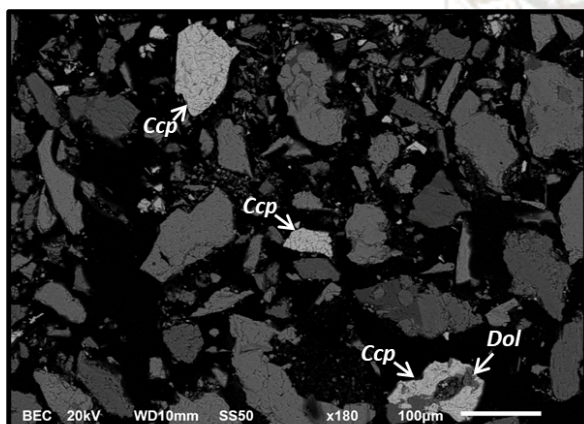
La tabla 9 muestra los análisis de cabeza general de esta muestra mineral.

**Tabla 9.** Análisis de cabeza general.

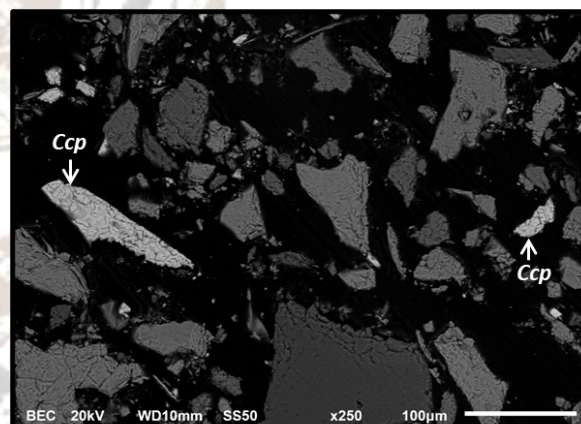
Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)
0.037	0.676	0.278	32.884

Como característica general, se observa que la muestra está mayormente constituida por **cuarzo**, **hedenbergita**, **dolomita**, y **pirita**, seguido de una importante cantidad de **Calcopirita**. Otra especie que se presenta en bajísimas proporciones es la Arsenopirita y se encuentra libre.

En las Figuras 17 y 18 se presentan los aspectos generales de esta muestra.



**Figura 17.** Dos partículas libres de calcopirita entre cuarzo y hedenbergita; abajo, otra partícula asociada a la dolomita. 1,800 X.



**Figura 18.** Dos partículas libres de calcopirita entre cuarzo y hedenbergita. 1,800 X.

### Especies minerales de Cobre

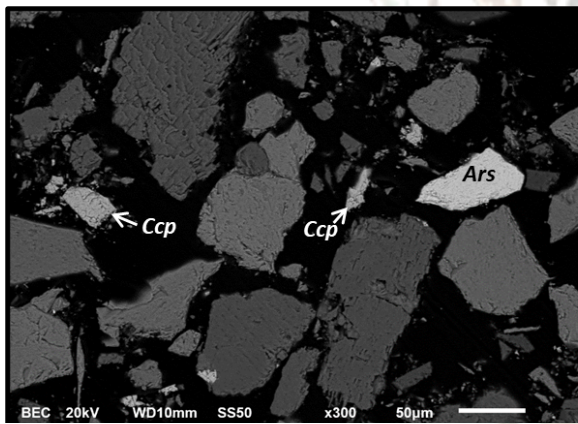
Se encontró de manera abundante la especie de cobre **Calcopirita** ( $CuFeS_2$ )

Las partículas de **Calcopirita** presentan un grado de liberación de 70%, y las uniones son de tipo simple con Dolomita ( $CaMg(CO_3)_2$ ) y Hedenbergita ( $CaFeSi_2O_6$ ).

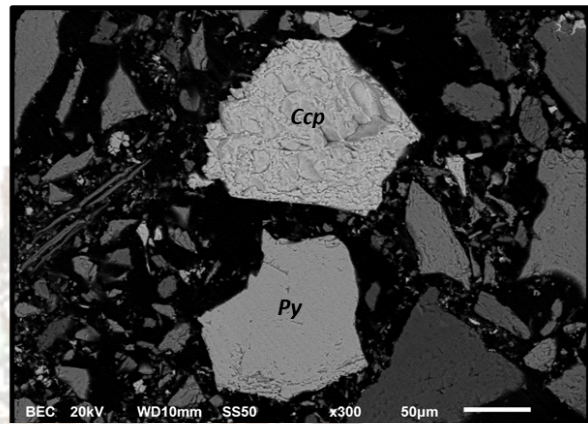
**Tabla 10.** Características texturales de la calcopirita.

Asociación	Proporción %	Tipo de unión	Tamaño (µm)	
			Promedio	Variación
Calcopirita libre	70%	Libre	40	10 - 80
Calcopirita-hedenbergita	19%	Simple (tipo 1a y 1b)	30	15 - 70
Calcopirita-Dolomita	11%	Simple (tipo 1a y 1b)	40	30 - 80

Las figuras 19 y 20 muestran imágenes sobre la calcopirita

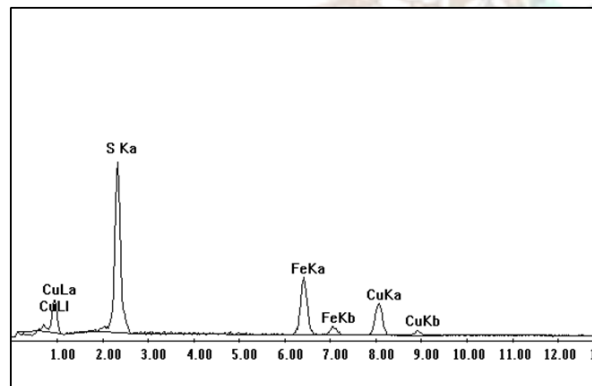


**Figura 19.** Dos partículas libres de calcopirita y otra de arsenopirita. 1000 X.



**Figura 20.** Partículas libres de calcopirita y otra de pirita entre cuarzo y hendebergita. 1000 X.

La figura 20 muestra los espectros de microanálisis de la fase de mayor interés.



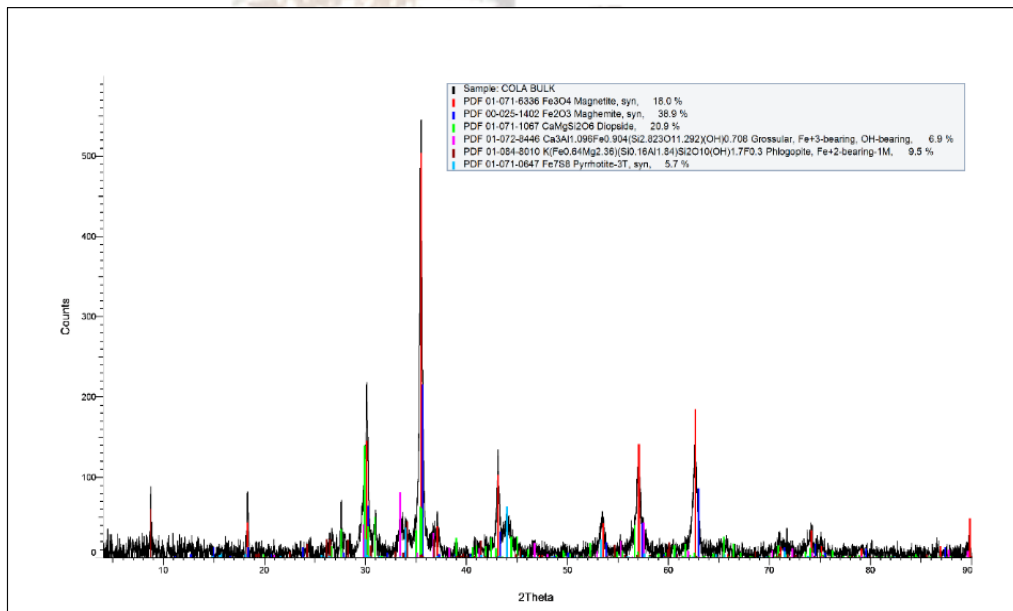
**Figura 21.** Espectro de microanálisis de la calcopirita.

Las especies de hierro identificadas por difracción de rayos X, corresponden a los minerales que se reportan en la tabla 11.

**Tabla 11.** Difracción de rayos X de la muestra de colas.

Mineral	Fórmula	Sistema Cristalino	% Proporción Aproximada	JPDC
Magnetita	$Fe_3O_4$	Cúbico	18	071-6336
Maghemita	$Fe_2O_3$	Hexagonal	38.9	025-1402
Diópsido	$CaMgSi_2O_6$	Monoclínico	20.9	071-1067
Grosularita	$Ca_3Al_{1.096}Fe_{0.904}(Si_{2.823}O_{11.292})(OH)_{0.708}$	Cúbico	6.9	072-8446
Flogopita	$K(Fe_{0.64}Mg_{2.36})(Si_{0.16}Al_{1.84})(Si_2O_{10})(OH)_{1.7}F_{0.3}$	Monoclínico	9.5	084-8010
Pirrotita	$Fe_7O_8$	Hexagonal	5.7	071-0647

La figura 22 muestra el difractograma correspondiente a la muestra de colas.



**Figura 22.** Difractograma de rayos X que muestra la presencia de Magnetita, Maghemita, Diópsido, Grosular, Flogopita y Pirrotita (Hex).

### Pruebas Experimentales de Flotación

Se realizaron varias pruebas de flotación, buscando optimizar las recuperaciones de cobre. La tabla 12 muestra una comparación entre la prueba STD y la prueba con las mejores condiciones de flotación.

**Tabla 12.** Comparación de resultados con condiciones STD y condiciones propuestas por CQP.

Prueba	Peso (g)				
		Cu (%)	Fe (%)	Cu	Fe
STD	42.4	13.6	19.7	84.6	2.6
CQP	52.3	11.7	18.8	92.5	3.1

## CONCLUSIONES

### Caso 1:

- La especie cobre se presenta únicamente como calcopirita, en donde sus partículas presentan un grado de liberación del 70%. La fracción asociada presenta uniones de tipo simple, es decir, de fácil liberación.
- La presencia de wurtzita actúa como un activador de zinc, perjudicando al concentrado de cobre.
- La determinación de un p80 más fino permitió liberar el 30% de las asociaciones de unión simple de calcopirita, aumentando significativamente la recuperación de cobre.
- El control óptimo de parámetros de pH permitió neutralizar las especies de zinc, obteniendo un concentrado más limpio de cobre.

### Caso 2:

- Las partículas de oro tienen tamaños menores a 1 micrómetro y, aunque se observan libres, están estrechamente rodeadas por material arcilloso fino, lo que genera un efecto de envolvimiento.
- Las partículas de plata son ligeramente más grandes, con tamaños menores a 3 micrómetros, y se observan mayormente libres, pero también están en contacto con partículas de arcilla fina, lo que les otorga una apariencia envolvente.
- El uso de un agente dispersante en las pruebas experimentales de flotación ayudó a incrementar el grado en los concentrados y aumentar las recuperaciones de Au y Ag.

### Caso 3:

- La especie cobre se presenta únicamente como Calcopirita, en donde sus partículas presentan un grado de liberación del 70%. La fracción asociada presenta uniones de tipo simple, es decir, de fácil liberación y esto aunado a los relativamente grandes tamaños de partícula de la Calcopirita.
- El pico de mayor intensidad corresponde a la especie de maghemita, cristalizado en el sistema hexagonal.
- El uso de reactivos más selectivos para el cobre, la aceleración de su cinética y controlando parámetros de pH para neutralizar las especies de hierro, permitieron optimizar la recuperación de Cu.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a Orion Productos Industriales y a Corporación Química Platinum por las facilidades brindadas para poder llevar a cabo estas investigaciones y contribuir en las soluciones de las problemáticas de los clientes.

## REFERENCIAS

Boyle, R. W. (1987). *Gold: History and Genesis of Deposits*. Springer Science & Business Media.

Scott, S. D., & Kissin, S. A. (1973). Argentinian galena: A laboratory study. *The Canadian Mineralogist*, 12(1), 53-64.

Scott, S. D., & Kissin, S. A. (1973). Argentinian galena: A laboratory study. *The Canadian Mineralogist*, 12(1), 53-64.

Hurlbut, C. S., & Klein, C. (1985). *Manual of Mineralogy* (20th ed.). John Wiley & Sons.

Coey, J. M. D. (1988). *Maghemite*. In *Magnetic oxides* (pp. 439-455). Springer.

