



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

# **CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DEL PROCESO METALÚRGICO Y SU IMPACTO EN LA PRODUCCIÓN DE CONCENTRADOS DE CU Y MO EN CMDIC**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO  
LUCAS FRANCISCO CONTRERAS TORRES**

**PROFESOR GUÍA:  
IVAN MARCELO FERNANDEZ VERGARA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
BRIAN KEITH TOWNLEY CALLEJAS  
JULIAN MAXIMILIANO ORTIZ CABRERA**

**SANTIAGO DE CHILE  
2015**

## Resumen

En el presente trabajo se realizó una caracterización mineralógica del proceso de obtención de concentrados de Cu y Mo en la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi para determinar si el comportamiento real de las especies minerales encontradas en el yacimiento es el mismo que el comportamiento esperado. Se tomaron muestras en 8 puntos de tal forma de representar un flujo de material a lo largo de todo el proceso. Para conocer la mineralogía se realizaron análisis de XRD, XRD-XRF, Qemscan y extracción parcial, para la geoquímica se utilizaron datos de ICP-OES y absorción atómica. Las concentraciones obtenidas para los minerales mayores fueron similares para todas las técnicas, por este motivo, y la mayor resolución en las especies minerales menores, se utilizaron los resultados de Qemscan para los análisis posteriores. Es así como se determinó que las menas de Cu (calcopirita, bornita y calcosina/covelina) y Mo (molibdenita) tienen un comportamiento real que es igual al esperado, lo mismo se aplica para los principales minerales de ganga (cuarzo, pirita, muscovita, biotita, plagioclasas y feldespatos). Sin embargo, la pirofilita; perteneciente a la familia de los filosilicatos, tiene un comportamiento que se escapa del esperado, ya que luego de abandonar el proceso hacia el tranque de relaves su concentración aumenta notoriamente en el concentrado de Mo. La diferencia en el comportamiento de este mineral en comparación a los otros filosilicatos estaría determinada por la asociación de estos últimos a los sulfuros de Cu y poseer una estructura interna que presenta mayor cohesión entre las capas que los forman. Se encontró que la calcopirita controlaría el comportamiento del Zn, el Pb y el Sb, 3 *penalties* para el concentrado de Cu, al igual que el Bi el que estaría controlado por reemplazos en la estructura de la tenantita. La pirita por su parte controlaría parte del comportamiento del As, otro *penalty* para el concentrado de Cu. Con el factor de concentración, se calculó la concentración inicial máxima de cada *penalty* para que esté bajo el límite permitido en el concentrado final. Con esta información se pueden determinar bloques potencialmente problemáticos y prever su impacto antes de ser procesados.

## **Agradecimientos**

Los primeros agradecimientos son para Iván Fernández, guía durante este proceso, sin sus conocimientos, ideas, dedicación y disposición este trabajo no hubiese existido. Además, agradecerle todo el apoyo prestado durante mi estadía en Iquique. A los profesores Brian Townley y Julián Ortiz, por sus correcciones, comentarios y buena disposición.

A todas las personas que conocí en Collahuasi, cuyo apoyo fue fundamental para la realización de este trabajo (Osmar, Lucho Aedo, Luchito S., Aldo, José, Mauricio, Figueroa, Alejandro, Fernando, Diego y Ricardo).

A los amigos del colegio, Rusio, Bastián y Nacho por contar con su apoyo, amistad y compañía en todos los momentos importantes. A todos los amigos que la universidad puso en mi camino, con quienes conviví en terrenos, noches de estudio o tardes de relajo (Papo, Alberto, Pelaito, Menares, Javier, Curotto, Aralo, Flop y Chinese).

A mis hermanos y tíos por creer en mí, entregarme palabras de apoyo y ayudarme en todo lo que necesité.

A mis padres, esto y todo, es gracias a ustedes.

Y finalmente a Javiera, por ser todo y estar siempre.

# Tabla de Contenido

Resumen .....	i
Agradecimientos.....	ii
Tabla de Contenido .....	iii
Índice de Tablas.....	vi
Índice de Figuras.....	vi
Índice de Ilustraciones.....	ix
1. Introducción .....	1
1.1 Formulación del Problema .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Hipótesis de Trabajo.....	2
1.4 Metodología.....	3
1.4.1 Toma de muestras .....	3
1.4.2 Análisis a realizar .....	8
1.5 Limitaciones del estudio.....	8
2. Marco Geológico.....	9
2.1 Geología Distrito Collahuasi .....	9
2.1.1 Formación Collahuasi (Paleozoico) (Pzc).....	9
2.1.2 Formación Quehuita (Jurásico) (Jq).....	10
2.1.3 Formación Cerro Empexa (Cretácico) (Kcc).....	10
2.1.4 Rocas Cenozoicas .....	10
2.1.5 Estructuras.....	12
2.2 Rosario .....	12
2.2.1 Litofacies .....	12

2.2.2 Intrusiones .....	14
3. Marco Teórico.....	15
3.1 Descripción del proceso productivo .....	15
3.1.1 Perforación .....	15
3.1.2 Tronadura .....	16
3.1.3 Extracción, transporte y chancado .....	16
3.1.4 Molienda .....	17
3.1.5 Flotación .....	18
3.1.6 Mineroducto .....	18
3.1.7 Planta de filtrado e instalaciones de carguío.....	18
3.2 Mineralogía y el proceso productivo.....	19
3.3 Técnicas Analíticas .....	21
3.3.1 Qemscan.....	21
3.3.2 XRF .....	23
3.3.3 XRD.....	23
3.3.4 Microscopía .....	24
3.3.5 ICP-OES.....	26
3.3.6 Extracción Parcial.....	26
3.3.7 Otras Técnicas Analíticas .....	27
4. Antecedentes .....	28
4.1 Mineralogía del yacimiento.....	28
5. Resultados .....	29
5.1 Geoquímica.....	29
5.1.1 Elementos que se concentran .....	30
5.1.2 Elementos que no se concentran .....	34

5.1.3 Elementos que no varían .....	36
5.2 Mineralogía .....	37
5.2.1 Descripción Macroscópica .....	37
5.2.2 Descripción Microscópica .....	38
5.2.3 Difracción de rayos X .....	39
5.2.4 Difracción y Fluorescencia de Rayos X .....	41
5.2.5 Qemscan .....	42
5.2.6 Extracción Parcial .....	64
5.2.7 Comparación de Resultados Entre las Diferentes Técnicas .....	66
6. Discusiones .....	69
6.1 Determinación de comportamientos esperados y no esperados .....	69
6.2 Filosilicatos .....	70
6.3 Comportamiento Conjunto de Minerales y Elementos .....	73
6.4 Análisis de evolución de <i>penalties</i> .....	78
6.5 Factor de Concentración de la Pirofilita. ....	82
7. Conclusiones .....	85
Bibliografía .....	88
Apéndices .....	93
Apéndice A: Descripción Macroscópica .....	93
Apéndice B: Descripción microscópica .....	100
B.1 Cortes Transparentes .....	100
B.2 Cortes Pulidos .....	108

## Índice de Tablas

Tabla 1. Códigos y ubicación de las muestras correspondientes al punto 1 de muestreo...	6
Tabla 2. Proporción de las muestras en el compósito final correspondiente a la muestra del punto 1.....	7
Tabla 3. Extracciones limitantes para calcopirita, calcosina y covelina. ....	26
Tabla 4. Elementos analizados junto a la técnica utilizada y la cantidad de valores bajo el límite de detección (VBLD). ICP: ICP-OES, AAS: Absorción atómica, Vol: Volumetría, LECO: Detección Molecular Infrarroja Leco. ....	29
Tabla 5. Resumen comportamiento de elementos. ....	37
Tabla 6. Resumen de las descripciones de cortes pulidos y transparentes. ....	39
Tabla 7. Porcentaje de especies minerales en las muestras por XRD. ....	40
Tabla 8. Porcentaje de especies minerales en las muestras por técnica mixta de XRD y XRF.....	41
Tabla 9. Resultados de la mineralogía modal por Qemscan.....	43
Tabla 10. Parámetros utilizados y resultados obtenidos para la extracción parcial. ....	65
Tabla 11. Porcentaje de calcopirita y bornita en las muestras según técnica de extracción parcial.....	66
Tabla 12. Elementos considerados como impurezas y su concentración máxima permitida.....	78
Tabla 13. Factor de concentración y concentración crítica inicial para los <i>penalties</i> .....	82
Tabla 14. Factor de concentración de la pirofilita con los datos de Qemscan y XRD-XRF para este estudio y el realizado en el año 2013. ....	83

## Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama simplificado del proceso productivo. Los rectángulos rojos indican las etapas que se incluirán en la toma de muestras.....	3
Figura 2. Mapa geológico simplificado del distrito Collahuasi. Tomado de Masterman, 2004. ....	11
Figura 3. Columna estratigráfica del distrito Collahuasi (derecha) y Rosario (izquierda). Tomado de Masterman, 2004.....	13

Figura 4. Diagrama del proceso productivo de CMDIC. ....	15
Figura 5. Diagrama de funcionamiento del Qemscan .....	22
Figura 6. Evolución de la concentración de Bi y Mo a lo largo del proceso productivo. ...	31
Figura 7. Evolución de la concentración de Ag, Sb y Zn a lo largo del proceso productivo. .....	31
Figura 8. Evolución de la concentración de P y W a lo largo del proceso productivo .....	32
Figura 9. Evolución de la concentración de Cd, Co, Cu y Fe a lo largo del proceso productivo.....	32
Figura 10. Evolución de la concentración de S a lo largo del proceso productivo. ....	33
Figura 11. Evolución de la concentración de As y Te a lo largo del proceso productivo ...	33
Figura 12. Evolución de la concentración de Ca, Nb y Zr a lo largo del proceso productivo.....	34
Figura 13. Evolución de la concentración de Ga, La, Sc, Ti, V e Ytrio a lo largo del proceso productivo.....	35
Figura 14. Evolución de la concentración de Al, Ba, K, Mg, Mn, Na y Sr a lo largo del proceso productivo.....	35
Figura 15. Evolución de la concentración de Be y Li a lo largo del proceso productivo. ...	36
Figura 16. Evolución de la concentración de Cr y Ni a lo largo del proceso productivo...	36
Figura 17. Gráfico circular con la concentración de los minerales presentes en las muestras según Qemscan. ....	44
Figura 18. Mineralogía de ganga menor según Qemscan. ....	45
Figura 19. Evolución del cuarzo a lo largo del proceso productivo. ....	46
Figura 20. Evolución del feldespato potásico, la albita, la muscovita/sericita y biotita a lo largo del proceso. ....	47
Figura 21. Evolución del rutilo, plagioclasa, clorita y corindón a lo largo del proceso.....	47
Figura 22. Evolución de la calcopirita a lo largo del proceso. ....	48
Figura 23. Evolución de la calcosina/covelina, pirita y bornita a lo largo del proceso. ...	49
Figura 24. Evolución de la molibdenita a lo largo del proceso. ....	50
Figura 25. Evolución de la esfalerita, arcillas, pirofilita y anhidrita/yeso a lo largo del proceso. ....	50
Figura 26. Evolución de la cuprita, enargita/tenantita y pirrotina a lo largo del proceso. .....	51
Figura 27. Evolución de los óxidos de Fe, zircón, apatito y calcita a lo largo del proceso. .....	52

Figura 28. Imagen generada por Qemscam para la muestra de los frentes de carguío (P1). .....	54
Figura 29. Imagen generada por Qemscam para la muestra de la línea 1 de molienda para alimentación de flotación.....	55
Figura 30. Imagen generada por Qemscam para la muestra de la línea 2 de molienda para alimentación de flotación.....	56
Figura 31. Imagen generada por Qemscam para la muestra de la línea 3 de molienda para alimentación de flotación.....	57
Figura 32. Imagen generada por Qemscam para la muestra del material que va al tranque de relaves (P3).....	58
Figura 33. Imagen generada por Qemscam para la muestra de concentrado colectivo (P4).....	59
Figura 34. Imagen generada por Qemscam para la muestra de concentrado Rougher de molibdeno (P5).....	60
Figura 35. Imagen generada por Qemscam para la muestra de concentrado de Cu antes de filtrar (P6). ....	61
Figura 36. Imagen generada por Qemscam para la muestra de las telas de filtro (P7)....	62
Figura 37. Imagen generada por Qemscam para la muestra de concentrado de Cu que se va a embarque (P8). ....	63
Figura 38. Gráfico de razones de extracción limitante. ....	65
Figura 39. Concentraciones en cada etapa del proceso productivo según distintas técnicas para calcopirita (arriba), la molibdenita (al centro) y la muscovita (illita)/sericita (abajo). ....	67
Figura 40. Concentraciones en cada etapa del proceso productivo según distintas técnicas para la bornita (arriba), la pirita(al centro) y la pirofilita (abajo). ....	68
Figura 41. Gráfico Circular de la concentración de cada filosilicato durante todas las etapas muestreadas.....	71
Figura 42. Evolución del comportamiento de Cu con los minerales asociados. ....	73
Figura 43. Evolución del comportamiento del Mo y la molibdenita.....	74
Figura 44. Evolución del comportamiento del Zn y la esfalerita.....	74
Figura 45. Evolución del comportamiento del feldespato potásico, la biotita, la muscovita/sericita y la albita. ....	75
Figura 46. Evolución del comportamiento del K, Na, Al, Mg y Mn. ....	75
Figura 47. Evolución del comportamiento del As en conjunto con la pirita y la enargita/tenantita. ....	76

Figura 48. Evolución del comportamiento de la Ag, el Sb y el Pb.....	77
Figura 49. Evolución comportamiento del Fe en conjunto con calcopirita, pirita y óxidos de Fe. ....	77
Figura 50. Evolución del comportamiento del As junto a la enargita/tenantita y la pirita. ....	79
Figura 51. Evolución del comportamiento del Pb, Sb y Ag. ....	80
Figura 52. Evolución del comportamiento del Bi junto a esfalerita y enargita/tenantita	80
Figura 53. Evolución del comportamiento del Zn junto a la esfalerita. ....	81
Figura 54. Evolución del comportamiento del Co y Ni. ....	82

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Frente de alimentación donde se tomo la muestra M1. ....	5
Ilustración 2. Stock RS1-FLAMENCO donde se tomo la muestra M4.....	5
Ilustración 3. Divisor rotatorio .....	6
Ilustración 4. Muestra M1 perteneciente al Punto 1.....	93
Ilustración 5. Muestra M1 perteneciente al Punto 1.....	94
Ilustración 6. Muestra M2 perteneciente al Punto 1. ....	95
Ilustración 7. Muestra M2 perteneciente al Punto 1. ....	95
Ilustración 8. Muestra M3 perteneciente al Punto 1. ....	97
Ilustración 9. Muestra M3 perteneciente al Punto 1. ....	98
Ilustración 10. Muestra M4 perteneciente al Punto 1. ....	99
Ilustración 11. Muestra M4 perteneciente al Punto 1.. ....	100
Ilustración 12. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M1 del punto 1. ....	101
Ilustración 13. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M1 del punto 1. ....	101
Ilustración 14. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M1 del punto 1. ....	102
Ilustración 15. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M1 del punto 1.....	102
Ilustración 16. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M2 del punto 1.....	103
Ilustración 17. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M2 del punto 1.....	103
Ilustración 18. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M2 del punto 1.....	103

Ilustración 19. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M3 del punto 1.....	104
Ilustración 20. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M3 del punto 1. ....	104
Ilustración 21. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M3 del punto 1.....	105
Ilustración 22. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M4 del punto 1. ....	106
Ilustración 23. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M4 del punto 1 .....	106
Ilustración 24. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M4 del punto 1. ....	107
Ilustración 25. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M4 del punto 1.....	107
Ilustración 26. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M4 del punto 1. ....	107
Ilustración 27. Fotomicrografías de muestra M1 correspondiente al punto 1. ....	108
Ilustración 28. Fotomicrografías de muestra M2 correspondiente al punto 1.....	109
Ilustración 29. Fotomicrografías de muestra M3 correspondiente al punto 1.....	110
Ilustración 30. Fotomicrografías de muestra M4 correspondiente al punto 1.....	111
Ilustración 31. Fotomicrografías de compósito mina correspondiente a la muestra del punto 1.....	112

# **1. Introducción**

El presente documento trata sobre la importancia de conocer con certeza el comportamiento de la mineralogía y su evolución a lo largo del proceso de producción de concentrados.

## **1.1 Formulación del Problema**

En una mina, desde que es tronada, la roca atraviesa una serie de procesos que finalmente terminan con los minerales de mena separados de la mayoría de la ganga, con el fin de aumentar su concentración y así hacer que la ley del concentrado sea mayor, que finalmente es el producto que se comercializa.

La respuesta de la roca en cada una de las etapas de este proceso está determinado en mayor o menor medida por la mineralogía, ya sea en la etapa de chancado y molienda, donde la dureza de la roca depende de los minerales que la componen, las fracturas presentes y el grado de meteorización, o en la etapa de flotación, donde las características de la mena y ganga definirán el nivel de recuperación del elemento de interés.

La mineralogía del material con el que se alimenta la planta es conocida mediante la información contenida en el modelo geológico del yacimiento, realizado a partir de los datos entregados por el análisis de los sondajes rescatados.

El proceso productivo está diseñado para que las menas de Cu se concentren, y la ganga se vaya en los residuos. Al existir problemas de recuperación se hacen suposiciones a partir de esta premisa, pero: ¿es el comportamiento teórico o esperado igual al real?

Estos problemas en el proceso productivo afectan directamente la producción de la compañía. Es por esto que un conocimiento acabado de la mineralogía y su respuesta

durante el proceso productivo es clave para prevenir y sanear estos problemas de manera más rápida y efectiva.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo general es determinar la respuesta de la mineralogía a lo largo del proceso productivo e identificar especies capaces de generar problemas.

Los objetivos específicos que guiarán el desarrollo del objetivo general son:

- Realizar el muestreo de un flujo de producción.
- Caracterizar la mineralogía mediante análisis con las técnicas Qemscan, ICP-OES, extracción parcial, XRF, XRD, microscopía de luz transmitida y reflejada.
- Contrastar el comportamiento real de la mineralogía con el comportamiento esperado de las especies a lo largo del proceso productivo.
- Analizar el comportamiento de minerales y elementos de forma conjunta.
- Determinación de concentraciones críticas, al inicio del proceso, de elementos y minerales que puedan provocar problemas de recuperación.

## **1.3 Hipótesis de Trabajo**

En el proceso de producción de concentrados de Cu y Mo desarrollado en Collahuasi ocurren los siguientes fenómenos:

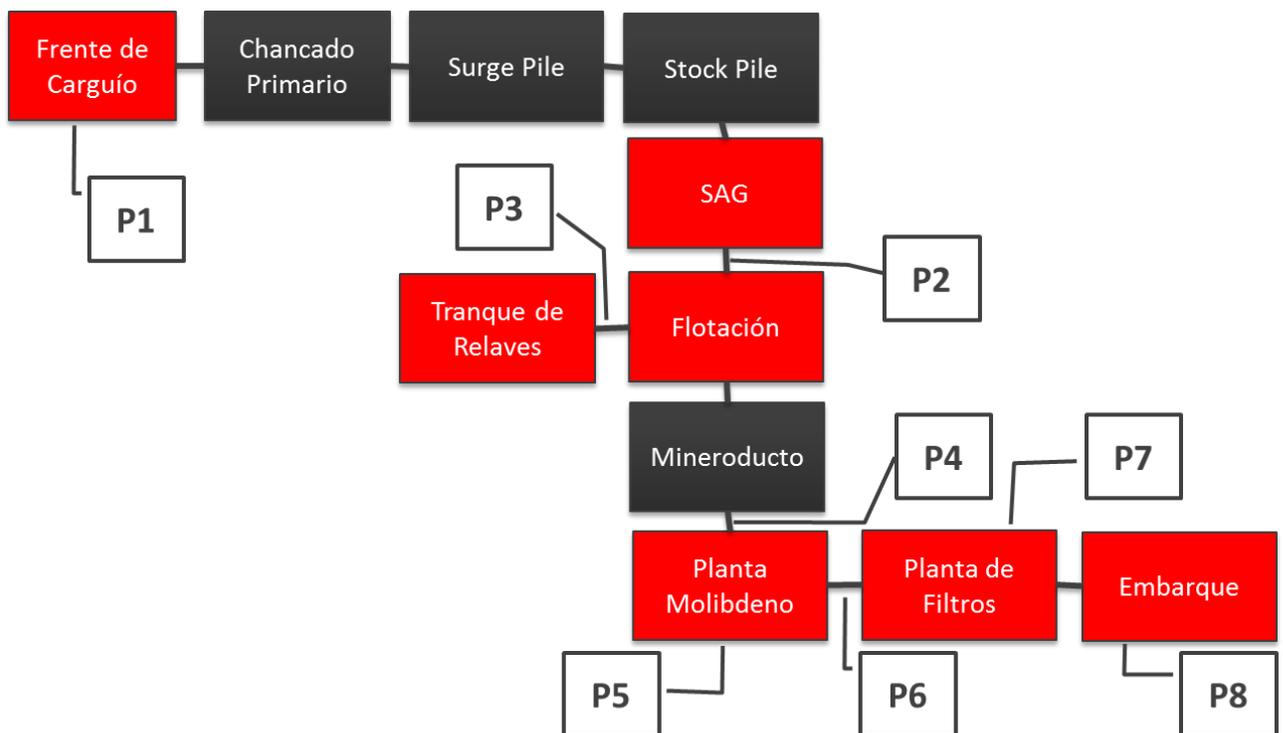
- El comportamiento de los elementos refleja el comportamiento de los minerales que los contienen, tanto por su composición como por fenómenos de sustitución iónica.
- La concentración de los minerales de mena aumenta en el concentrado colectivo.
- La concentración de los minerales de ganga disminuye en el concentrado colectivo y no vuelve a aumentar en etapas posteriores del proceso.
- La ganga que acompaña a la mena en los concentrados corresponde principalmente a minerales de la familia de los filosilicatos.

- El material residual de los procesos de concentración (tranque de relaves y filtros) no contiene molibdeno ni cobre en concentraciones sobre las esperadas.

## 1.4 Metodología

### 1.4.1 Toma de muestras

Para determinar las etapas muestreadas, se generó un diagrama simplificado del proceso productivo y se escogieron 8 puntos de muestreo, 2 correspondientes al principio y el final del proceso, los otros 6 correspondientes a puntos donde se separa material o el concentrado sufre algún proceso. La Figura 1 muestra las etapas y los puntos elegidos. A continuación se individualizará cada punto identificándolo con un número y se especificará a que parte de cada etapa corresponderá.



**Figura 1. Diagrama simplificado del proceso productivo. Los rectángulos rojos indican las etapas que se incluirán en la toma de muestras.**

**Punto 1, Frente de Carguío:** Muestra tomada de los frentes de carguío que alimentaron la planta el día del muestreo. Con esta muestra se espera caracterizar la mineralogía in situ.

**Punto 2, Flotación Colectiva:** Muestra correspondiente a la cabeza del proceso de flotación.

**Punto 3, Tranque de Relaves:** Muestra de la fase acuosa (pulpa) que se envía a los tranques de relave.

**Punto 4, entrada Planta de Molibdeno:** Muestra del concentrado colectivo enviado desde la planta mediante el mineroducto.

**Punto 5, Planta de Molibdeno:** Se muestreó el concentrado de Mo que se separó del concentrado colectivo.

**Punto 6, Planta de Molibdeno:** Muestra del concentrado de Cu que se envía a la planta de filtros.

**Punto 7, Planta de Filtros:** Se muestreó el material que queda en los filtros.

**Punto 8, Embarque:** Muestra del concentrado de Cu que se envía para ser vendido.

El muestreo se realizó de manera tal de seguir el material desde que es tronado hasta que se embarca para la comercialización. Tomando en consideración los tiempos de residencia del material en cada etapa del proceso se coordinó el muestreo para seguir el material desde que fue muestreado en las frentes de alimentación hasta que se embarcó en el puerto. Se utilizó el compósito de turno como unidad de muestreo ya que al abarcar una ventana temporal mayor se puede realizar de mejor manera la trazabilidad de las muestras a lo largo del proceso.

A continuación se detalla el procedimiento de obtención de las muestras en cada punto:

- Punto 1:

Se muestrearon 3 frentes de alimentación (Ilustración 1) y 2 stocks (Ilustración 2). El muestreo se realizó tomando incrementos con una pala en diferentes partes de la frente hasta llenar bolsas de aproximadamente 15 kg. La Tabla 1 indica el código asignado a cada muestra, la identificación espacial y el peso final luego de ser chancada bajo malla #10 y secada. Además se tomó una muestra de mano de manera aleatoria en la frente para la realización de descripción macroscópica y la obtención de cortes transparentes y pulidos.



**Ilustración 1. Frente de alimentación donde se tomó la muestra M1.**



**Ilustración 2. Stock RS1-FLAMENCO donde se tomó la muestra M4.**

**Tabla 1. Códigos y ubicación de las muestras correspondientes al punto 1 de muestreo.**

<b>Id Bolsa</b>	<b>Definición</b>	<b>Peso</b>
15-04-14 M1	muestra RF7-4105-708/SAL Alimentación PA20	12.8 kg
15-04-14 M2	muestra RF6-4240-604/SAL Alimentación PA11	13.36 kg
15-04-14 M3	muestra RF6-4255-613-616/SAL Alimentación PA12	17.49 kg
15-04-14 M4	muestra RS1-FLAMENCO/SME Alimentación PA05	12.77 kg
15-04-14 M5	muestra RS1-GAVIOTA /SAL Posible alimentación	13.27 kg

Producto del bajo nivel del Stock Pile, el material cargado al momento de muestrear, pasó directamente a la planta, por lo que la muestra de la frente de alimentación debe corresponder a la alimentación del día 15-04-14. Por lo señalado anteriormente se realizó un compósito, con ayuda de un divisor rotatorio (Ilustración 3), de 10 kg con las muestras M1 a M5 en la proporción correspondiente a la alimentación real de la planta para el turno A del 15 de Abril.



**Ilustración 3. Divisor rotatorio**

La Tabla 2 indica las proporciones de cada muestra de la frente en el compósito final que corresponde a la muestra del punto 1. A este compósito de 10 kg bajo malla #10 se le sacaron 2 porciones mediante un divisor rotatorio, 1 porción para pulverizar bajo malla #150 y obtener 2 sobres de 200 gr para enviar a análisis químico y otra porción bajo malla 60# para la realización de briquetas para análisis de microscopía de luz reflejada.

**Tabla 2. Proporción de las muestras en el compósito final correspondiente a la muestra del punto 1.**

<b>Id Bolsa</b>	<b>% en Alimentación</b>	<b>Peso en el compósito</b>
15-04-14 M1	13%	1.3 kg
15-04-14 M2	40%	4.0 kg
15-04-14 M3	26%	2.6 kg
15-04-14 M4	21%	2.1 kg
15-04-14 M5	0%	-

- Punto 2 y 3

En la planta de flotación se realiza un control diario mediante análisis de compósitos por turnos y diarios. Se aprovechó esta misma instancia de muestreo regular para obtener las muestras del punto 2 y 3. Para el punto 2 se tomaron muestras cada 4 horas para cada una de las 3 líneas de molienda tanto para el turno A como para el turno B, con este material se realizó un compósito de 500 gr correspondiente al día 15 de Abril para cada una de las líneas de alimentación. Para el punto 3 se obtuvieron muestras cada 4 horas del material que iba al tranque de relave y se realizó un compósito correspondiente al día 15 de Abril. Dada la humedad de la muestras dentro del proceso fue necesario que pasaran por un proceso de secado.

- Punto 4, 5, 6, 7 y 8

Desde Puerto Patache se entregaron las 5 muestras faltantes en bolsas de 500 gr. La muestra 4 correspondiente al concentrado colectivo, se obtuvo de la salida del mineroducto. La muestra 5 que es del concentrado de Mo corresponde al concentrado Rougher del proceso de flotación selectiva. La muestra 6 es el concentrado de Cu antes de filtrar, tomada a la salida de la flotación selectiva. La muestra 7 representa al concentrado de Cu que queda en la tela de filtro. La muestra 8 es del concentrado del Cu que se va a embarque.

El procedimiento de toma de muestras para los puntos anteriores es el siguiente:

Punto 4 y 5: Ambas muestras fueron tomadas con un cortador automático Harrison Cooper. La muestra es llevada al laboratorio donde es secada durante 2 horas. Se pasa la muestra por un tamiz #100, se homogeniza y se obtiene la masa deseada mediante incrementos con una pala JIS.

Punto 6: La muestra se toma del chute de traspaso de la correa que recibe el concentrado y lo deja caer sobre la correa transportadora que lleva el material hacia el almacenaje. Se toman mínimo 9 incrementos con una pala JIS, correspondientes a 3 incrementos en a la izquierda del flujo, 3 al centro y 3 a la derecha. Anterior al proceso de muestreo se verifica que no existan cuerpos ajenos al proceso dentro del chute que puedan contaminar la muestra.

Punto 7: Al no ser una muestra que se tome regularmente, no existe un procedimiento escrito que determine como se tomó esta muestra. Para obtenerla se obtuvo material de las distintas telas de filtros.

Punto 8: Se realiza un muestreo sistemático donde se toman 30 incrementos por sector del Stock Pile que se debe muestrear. Para obtener los incrementos se utiliza una sonda de muestreo que consiste en una pieza de acero inoxidable de 2 pulgadas de diámetro, cuyo extremo inferior posee una punta afilada para ayudar la inserción y su extremo superior posee un mango en forma de "T".

#### **1.4.2 Análisis a realizar**

Las muestras fueron enviadas a SGS Santiago para realizarles los siguientes análisis: Qemscan, ICP-OES, difracción de rayos X y absorción atómica para obtener los parámetros de extracción parcial. Además se confeccionaron cortes transparentes y pulidos para las rocas que componen la muestra del punto 1, así como también una briqueta del compósito correspondiente al punto 1.

### **1.5 Limitaciones del estudio**

Si bien los análisis químicos y mineralógicos entregaron datos cuantitativos, los resultados y conclusiones obtenidos a través de ellos tienen carácter cualitativo y difícilmente pueden representar fielmente la complejidad del yacimiento y el proceso, sin embargo, cumplen con el objetivo de verificar una serie de hechos que se asumen como estilizados, pero que en la práctica no lo son, lo anterior basado en el hecho de que la cantidad de muestras utilizadas en el estudio dista de un número suficiente para ser representativo del yacimiento. Sin embargo representan un momento particular y las conclusiones muestran el comportamiento real de la mineralogía para ese momento y

pueden servir como base para la realización de estudios posteriores cuyos alcances sean más específicos.

## **2. Marco Geológico**

Rosario, el yacimiento donde se enmarca el presente estudio, está ubicado en el distrito Collahuasi (20°58' S y 68°43' O). Este distrito está ubicado a 220 km de la ciudad de Iquique a través de las rutas 16, A-687 y A-97. Comprende un área de 1200 km<sup>2</sup> cercano a la cordillera occidental y alberga, incluyendo a Rosario, un cluster de 3 pórfidos de cobre-molibdeno, depósitos asociados de vetas epitermales de cobre-plata y depósitos exóticos de cobre (Masterman, 2003). Está emplazado en el altiplano chileno, entre los 3800 y 6200 m.s.n.m. Su clima es predominantemente árido, tipificado por una baja tasa de lluvia anual (150 mm al año en promedio) y nevazones escasas (pocos centímetros al año). Las estaciones incluyen variaciones normales de temperatura y precipitación entre invierno y verano. Durante el verano se produce un alza en las precipitaciones producto del invierno altiplánico (también conocido como invierno boliviano) (Masterman, 2003).

El distrito Collahuasi comprende tres dominios estratigráficos principales. El sistema de falla Domeyko, de rumbo norte, separa secuencias del Cretácico (Fm. Cerro Empexa) y Jurásico (Fm. Quehuíta) en el oeste de la Fm. Collahuasi (Permo-Triásica). Ignimbritas Cenozoicas cubre gran parte de la estratigrafía en el norte. En la parte este se encuentran estratosvolcanes andesíticos a lo largo de la falla Loa (Masterman, 2003).

### **2.1 Geología Distrito Collahuasi**

La Figura 2 muestra un mapa geológico simplificado y la Figura 3 es la columna estratigráfica del distrito Collahuasi, a continuación se detallan las formaciones del lugar.

#### **2.1.1 Formación Collahuasi (Paleozoico) (Pzc)**

Está caracterizada por andesitas, dacitas, riolitas y pequeñas intrusiones porfíricas del Pérmico al Triásico. Las unidades volcánicas están intercaladas con areniscas y escasos lentes de caliza.

La Fm. Collahuasi se emplazó sobre el basamento del Arequipa *Terrane* durante el Paleozoico tardío. La depositación ocurrió en una configuración continental, caracterizada por volcanismo dacítico y en menor medida andesítico (Masterman, 2003).

### **2.1.2 Formación Quehuita (Jurásico) (Jq)**

Son rocas sedimentarias que sobreyacen discordantemente sobre la Fm. Collahuasi. Consisten en un miembro inferior marino profundo de fangolitas y limonitas, y un miembro superior marino somero a subaéreo continental de calizas, areniscas calcáreas y conglomerados. Los fósiles del miembro inferior indican una edad Jurásica. Hay fallas de crecimiento en ambos miembros que indican que la depositación ocurrió en un ambiente extensional que fue primeramente marino profundo que fue se haciendo más somero a medida que ocurría la regresión marina (Masterman, 2003).

### **2.1.3 Formación Cerro Empexa (Cretácico) (Kcc)**

Es una secuencia de orientación norte-sur de lavas andesíticas y dacíticas, brechas volcánicas y una intercalación de arenitas rojas y conglomerados. Hacia el oeste sobreyace disconformemente la Fm. Quehuita (Masterman, 2003).

### **2.1.4 Rocas Cenozoicas**

En las partes este y norte del distrito Collahuasi podemos encontrar tres cuerpos ignimbríticos, las ignimbritas Huasco, Ujina y Pastillos, datadas en 17.1, 9.3 y 0.75 Ma respectivamente (Masterman, 2003).

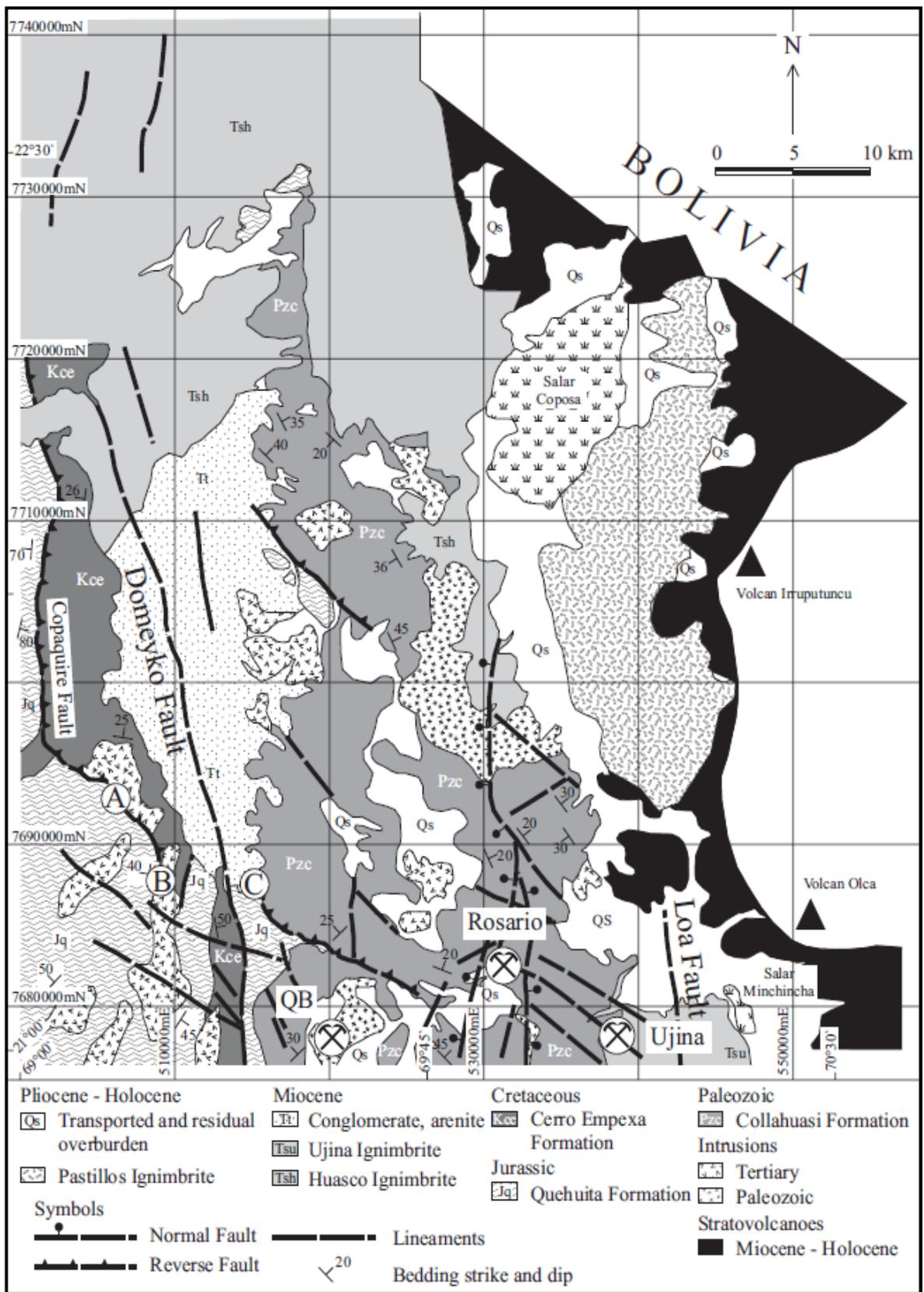


Figura 2. Mapa geológico simplificado del distrito Collahuasi. Tomado de Masterman (2004).

### **2.1.5 Estructuras**

A escala distrital, un sistema de fallas subverticales con rumbo desde norte-sur hasta nor-noreste cortó la estratigrafía volcánica sur de Rosario. Algunas tienen vetas localizadas de Cu-Ag-Au de alto grado. Otro grupo de fallas con rumbo noroeste (manteo 45°-60° SO) también tienen mineralización localizada de Cu-Ag-Au de alto grado en el depósito Rosario (Masterman, 2003).

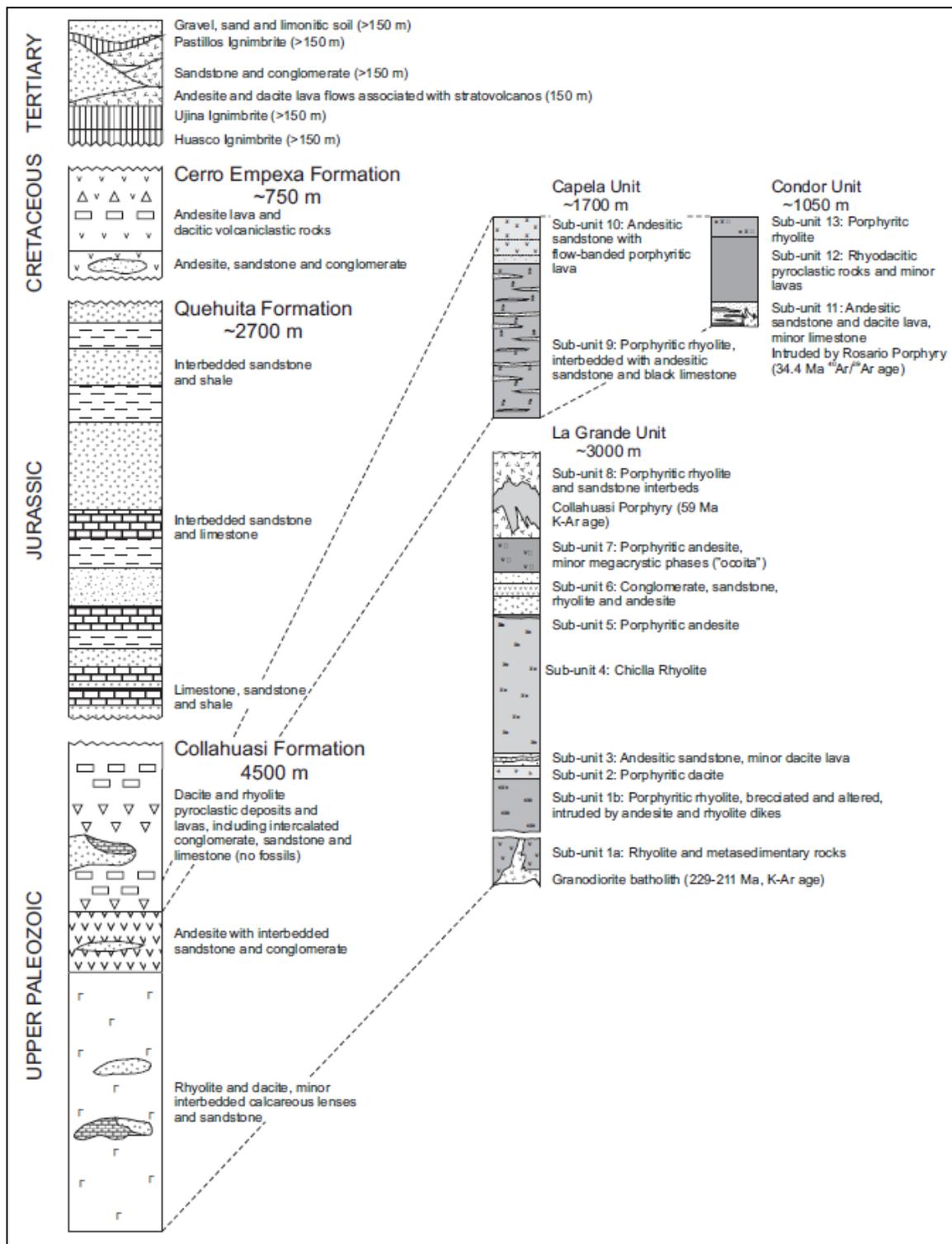
## **2.2 Rosario**

La mineralización de cobre está localizada dentro y alrededor de una cuarzo-monzonita porfídica, conocida como Pórfido Rosario. Este stock ha instruido un pórfido granodiorítico, el Pórfido Collahuasi. Ambos pórfidos intruyeron la Fm. Collahuasi (Masterman, 2003). Como roca huésped está la unidad Cóndor y la unidad La Grande. La unidad Cóndor consiste en intercalaciones de areniscas, dacitas y skarn, subyacentes a una secuencia volcánica riolítica que tiene más de 400 m de espesor. La unidad La Grande se distingue por sus facies de rocas volcánicas andesíticas y riolíticas. La Figura 3 muestra una columna estratigráfica del distrito Collahuasi.

### **2.2.1 Litofacies**

Las unidades estratigráficas en Rosario mantean desde los 30° a los 50° hacia el noreste. Las secuencias dominantes corresponden a litofacies coherentes y piroclásticas, litofacies volcanoclásticas estratificadas o no estratificadas y litofacies carbonatadas. Las litofacies pueden ser agrupadas en cuatro litofacies principales: facies volcánicas primarias, facies volcanogénicas, facies carbonatadas y las facies piroclásticas (Masterman, 2003).

Facies volcánicas primarias: Comprende principalmente andesita y brecha monomítica no estratificada. Se encuentran principalmente plagioclasa, biotita y hornblenda en la matriz. Los cristales son en su mayoría plagioclasas y se observa una incipiente alteración a sericita (Masterman, 2003).



**Figura 3. Columna estratigráfica del distrito Collahuasi (derecha) y Rosario (izquierda). Tomado de Masterman, 2004.**

Facies volcanogénicas sedimentaria: Esta asociación está caracterizada por clastos líticos volcánicos y los estratos individuales son <1 m de espesor. Estas unidades son principalmente areniscas tobáceas, grano soportadas y los cristales son en su mayoría

plagioclasas en una matriz clorítica. Los cristales de biotita remanentes están alterados a clorita (Masterman, 2003).

Facies carbonatadas: Consiste en calizas que han sido alteradas. Dentro del área de la mina, a una asociación calco-silicatada de granate, diópsido, actinolita, epidota, clorita y magnetita (Masterman, 2003).

Facies piroclásticas: Se encuentran dacitas y riódacitas *feldspar-phyric* (con fenocristales de feldespatos). Los ferromagnesianos primarios fueron reemplazados por biotita, clorita y sericita (Masterman, 2003).

## **2.2.2 Intrusiones**

### **2.2.2.1 Pórfido Collahuasi**

Su potencia varía entre 50m a más de 300m en profundidad. Son comunes los xenolitos de diorita, cuarzo y andesita. Los ferromagnesianos primarios fueron reemplazados por biotita hidrotermal, clorita y sericita. En la masa fundamental es posible encontrar hornblenda y biotita lejos del área de alteración (Masterman, 2003).

### **2.2.2.2 Pórfido Rosario**

Las apófisis someras del Pórfido Rosario se juntan a profundidades de 400 a 600m bajo la superficie para formar un cuerpo elongado de tendencia noroeste de 300 a 500 m de ancho y hasta 1500 m de largo. Está clasificado como una cuarzo monzonita. Se mantienen minerales ferromagnesianos primarios relictos. Los fenocristales de feldespatos de Ca-Na se ven turbios debido a alteración parcial a illita (Masterman, 2003).

### 3. Marco Teórico

#### 3.1 Descripción del proceso productivo

Para obtener el Cu y Mo contenido en los minerales, la roca debe pasar por una serie de etapas. Estas etapas conforman el proceso productivo. El proceso productivo en CMDIC se separa en una línea de sulfuros y otra de óxidos, teniendo una parte inicial común entre ambas. La línea de sulfuros será de especial interés producto que la mayoría del mineral que se trata corresponde a sulfuros. Es de estas etapas desde las cuales se obtendrán las muestras para realizar la caracterización mineralógica (JHG Ingeniería, 2009).

La Figura 4 muestra el proceso productivo incluyendo ambas líneas. Se procederá a explicar cada una de las etapas que componen el proceso productivo, tomando en consideración solo la línea de sulfuros.

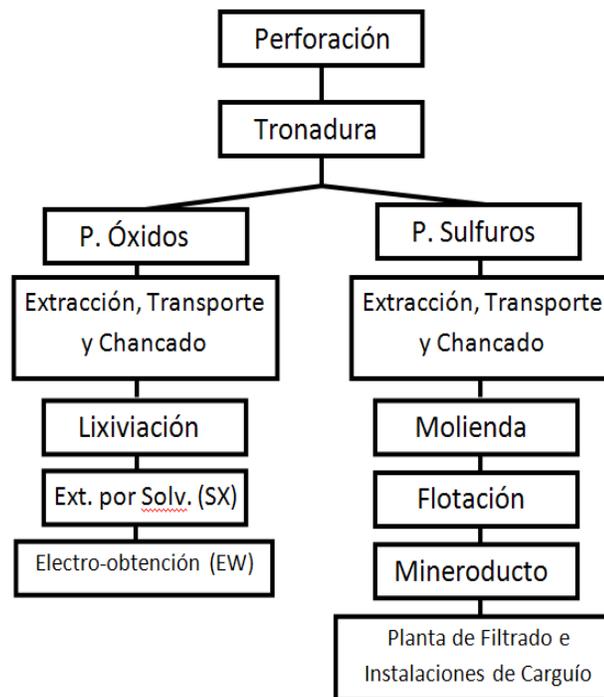


Figura 4. Diagrama del proceso productivo de CMDIC.

##### 3.1.1 Perforación

El objetivo del proceso de perforación es hacer una cavidad definida dentro de la roca que será removida, para luego colocar el explosivo que más tarde será detonado (Portal Minero, 2006).

En Collahuasi, el año 2004 se movieron 420.000 ton/día de material. Para poder hacerlo se necesitaron alrededor de 131 pozos diarios, de acuerdo a un plan de trabajo semanal y mensual (JHG Ingeniería, 2009). Actualmente se mueven 625.000 ton/día de material. De los cuales 220.000 ton/día corresponden a mineral (Saez, 2013).

### **3.1.2 Tronadura**

Se realiza con el fin de disminuir el tamaño de la roca para poder ser cargada y transportada por los camiones mineros a los botaderos o al chancado primario (Portal Minero, 2006).

Para el fracturamiento de la roca, se realizan tronaduras controladas, a partir de un programa de trabajo semanal y mensual.

Se obtiene un 60% del mineral bajo 4 pulgadas (JHG Ingeniería, 2009).

### **3.1.3 Extracción, transporte y chancado**

Las palas de carguío extraen la roca fracturada en la etapa anterior y lo descargan en camiones, los que la transportan hacia el chancador primario que se ubica en el área del rajo. Para el caso de la roca proveniente de la Mina Rosario, este chancador es del tipo giratorio, de 60' por 113', el cual es alimentado directamente desde la tolva de los camiones en un buzón alimentador. El chancador cuenta con un sistema de filtros de manga para el control de micropartículas. El material chancado es transportado por correas hasta un almacenamiento denominado Surge Pile, con capacidad viva de 20.000 ton. Los minerales sulfurados provenientes de Ujina pasan por un chancador primario de 60' por 89'. El mineral termina con un tamaño máximo de 70% bajo 2 pulgadas. La capacidad de tratamiento de los chancadores es de 140.000 toneladas por día (JHG Ingeniería, 2009).

Tanto el mineral proveniente del chancador primario de Ujina, como del Surge Pile, es transportado hasta un almacenamiento techado con capacidad de 200.000 toneladas, denominado Stock Pile (JHG Ingeniería, 2009).

### **3.1.4 Molienda**

La roca proveniente de la primera etapa de chancado es sometida a una etapa de molienda para reducir su tamaño hasta que el 80% sea menor a 210 micrones de manera tal de poder formar una pulpa con la adición de agua en el proceso (JHG Ingeniería, 2009).

El material se extrae mediante alimentadores perpendiculares respecto a la correa de alimentación, extrayendo material de diferentes zonas bajo el Stock Pile. Con esto se busca lograr una alimentación homogénea, que compense la segregación natural que se produce al descargar el material en el Stock Pile (JHG Ingeniería, 2009).

La planta concentradora de Collahuasi tiene tres líneas de molienda:

- Líneas 1 y 2 (JHG Ingeniería, 2009):
  - Dos molinos SAG (semi autógeno) de 32' de diámetro y 15' de largo, capacidad de procesamiento de 1200 tph.
  - Dos molinos de bolas de 22' de diámetro y 36' de largo.
  - Dos baterías de 8 hidrociclones conectados en circuito cerrado inverso con los molinos de bolas.
  
- Línea 3 (JHG Ingeniería, 2009):
  - Un molino SAG de 40' de diámetro y 22' de largo, tiene una capacidad de procesamiento de 4500 tph.
  - Dos molinos de bolas de 26' y 38' de largo.
  - Dos baterías de 10 hidrociclones operando en circuito cerrado inverso con los molinos de bolas.

En 2013 se procesaron 129.000 tpd de mineral. Alcanzando 47 Mton al año, significando 500.000 ton de cobre (Saez, 2013).

### **3.1.5 Flotación**

La flotación se define como un proceso físico-químico mediante el cual se produce la separación de los minerales de mena a recuperar y el resto de minerales que componen la roca original (Portal Minero, 2006).

Se introducen burbujas de aire a la pulpa proveniente de la molienda la cual contiene los reactivos necesarios para la flotación, incorporados en la etapa de molienda (Portal Minero, 2006).

La flotación se basa en las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas de cada especie mineral de interés. Las burbujas adicionadas llevan a la superficie las especies minerales de interés mientras que la ganga queda en la fase acuosa (Portal Minero, 2006).

Los relaves del circuito de flotación, o sea la fase acuosa sin valor comercial, son procesados en seis espesadores y posteriormente enviados por gravedad al tranque.

### **3.1.6 Mineroducto**

El producto de la etapa anterior es enviado a las instalaciones de embarque de concentrados ubicadas en el sector de Punta Patache. Se utilizan 2 tuberías de 8" y 7" que recorren un total de 200km. Ambas tuberías se utilizan indistintamente.

### **3.1.7 Planta de filtrado e instalaciones de carguío**

En el área de Punta Patache se ubican las instalaciones para el desarrollo de los procesos de filtración y secado del concentrado, el galpón de almacenamiento, el terminal mecanizado de embarque y las obras de manejo y disposición de las aguas de filtración (Portal Minero, 2006).

Acá se realiza un proceso de flotación selectiva para generar un concentrado de Mo. La ley promedio en 2013 fue 29% (Saez, 2013).

El proceso de filtrado se utiliza para realizar la extracción mecánica de líquidos de las pulpas para obtener sus sólidos y/o recuperación de un líquido de valor. El producto filtrado queda con una humedad del 9% (JHG Ingeniería, 2009). El 2013 se procesaron 4000 toneladas por día de concentrado (Saez, 2013).

### **3.2 Mineralogía y el proceso productivo**

La mineralogía está fuertemente ligada al proceso productivo, dado que es ésta la que determinará el comportamiento de la roca durante el proceso. Un acabado conocimiento de la mineralogía, sumado a otros estudios, llevará a planificar la planta de manera óptima para el tratamiento de los minerales encontrados en el yacimiento.

El creciente interés en la relación entre la mineralogía y el proceso productivo llevo al desarrollo de técnicas más automatizadas para cuantificar la mineralogía de las muestras (Baum et al, 2004).

Baum (2004), reconoce 2 problemas claves:

1. Las muestras deben ser representativas de lo que se desea muestrear.
2. No basta con conocer el contenido del elemento de valor. Será el contenido mineral, tamaño y texturas los que determinarán el comportamiento de la separación mineral.

Dice también, que el segundo problema ya está solucionado producto del desarrollo tecnológico en la medición mineral cuantitativa en la década del 90, teniendo como representantes el QEMSCAN y el MLA, ambos desarrollados en Australia.

Para poder obtener muestras representativas se debe seguir un protocolo de muestreo, siguiendo las directrices encontradas en trabajos como el de Gy y su teoría de muestreo. Tomando en consideración todas las fuentes de error posibles al momento de muestrear, desde el error intrínseco que tiene tomar una pequeña muestra para representar toda una población, llamado error fundamental, hasta el error producido por mal manejo del material o malos instrumentos para tomarlas.

En CMDIC los principales problemas de recuperación se presentan en la planta de molibdeno. Respecto a la recuperación de molibdeno, Cuthbertson (1961) cree que los minerales de arcilla, en particular los de tipo bentonítico, disminuyen la flotabilidad de la molibdenita. Bulatovic et al. (1999) indican en su trabajo que la presencia de arcillas afecta negativamente la flotabilidad durante el procesamiento de la mena en un pórvido de cobre/molibdeno, en particular su estudio se basó en menas que contenían caolinita, bramolita, illita y montmorillonita. Por otra parte, Triffet et al. (2008) indican que el talco, la andradita, la calcita y la anfíbola están correlacionados negativamente con la recuperación de molibdeno y la plagioclasa, montmorillonita, biotita/flogopita y el feldespatho potásico están correlacionados positivamente con la recuperación de molibdeno. Zanin et al. (2009) reportan que la recuperación de molibdenita es menor cuando la mineralización está asociada a un skarn en comparación a cuando está asociada a cuarzita, y disminuye aún más si hay presencia de iones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ .

Un denominador común es la presencia de filosilicatos como responsables de causar problemas en la flotación de los minerales de mena. Además, los filosilicatos son muy comunes ya que son el producto más habitual de la meteorización, la alteración hidrotermal y depositación sedimentaria. Debido a que se presentan mayoritariamente en un tamaño de grano muy fino, es muy difícil sacarlos del sistema y entran en el circuito de producción (Ndlovu et al, 2013). Las diferencias de carga entre las diferentes caras de los filosilicatos, producen interacciones borde-borde, cara-borde, cara-cara donde cada tipo de interacción tiene diferentes comportamientos (Ndlovu et al, 2013). Las asociaciones cara-borde y borde-borde son las que generan mayor problemática en el procesamiento de minerales ya que forman estructuras tridimensionales que aumentan el comportamiento coloidal (Tombácz and Szekeres, 2006; Gupta et al., 2011).

Uno de los efectos de los filosilicatos que causa mayor interés es en el rendimiento de la flotación de minerales. Su gran área superficial los hace particularmente reactivos y susceptibles a cambios. Forman *slime coatings* alrededor de las burbujas de aire y de los otros minerales producto de fuerzas electroestáticas de atracción entre ellos (Ndlovu et al, 2013). El impacto negativo de lo anterior se ve en la disminución de la recuperación de los minerales de mena.

### 3.3 Técnicas Analíticas

Para conocer la mineralogía, textura y granulometría, es necesario analizar las muestras. En este caso el análisis se realizó mediante diversas técnicas para complementar y validar los resultados obtenidos por cada una de ellas. Los métodos utilizados fueron Qemscan, una técnica mixta de fluorescencia y difracción de rayos X (XRF-XRD), ICP-OES y análisis de cortes transparentes y pulidos.

#### 3.3.1 Qemscan

El Qemscan (*Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy*) es un sistema automatizado que permite realizar análisis químicos y mapas minerales de alta resolución. Funciona gracias a un SEM (*Scanning Electron Microscope*) y cuatro espectrómetros de rayos X (EDS: *energy-dispersive X-ray spectrometers*). Al incidir el haz de electrones del SEM sobre la muestra se generan *backscattered electrons* (BSE) que son medidos para localizar las partículas individuales dentro de la muestra. Posterior a esto, se realiza un barrido sobre la superficie en una grilla de espaciamiento definida por el usuario, con una resolución comúnmente entre 0.2  $\mu\text{m}$  y 25  $\mu\text{m}$ . El haz de electrones genera la emisión de rayos X producto de la liberación de energía, emitida, por los electrones de alta energía dentro del elemento, que ocupan los espacios dejados por electrones de niveles energéticos más bajos, que son sacados fuera de su posición. Los espectros de rayos X obtenidos son comparados con una base de datos y de esta forma se identifican todas las fases minerales presentes en la muestra en cada espacio de la grilla (Ayling et al., 2012; Pirrie et al., 2012). La

Figura 5 muestra un diagrama esquemático del funcionamiento del Qemscan.



Figura 5. Diagrama de funcionamiento del Qemscan

El Qemscan tiene distintos modos de análisis, los que se detallan a continuación:

- **Análisis Mineralógico de Partículas (*Particle Mineral Analysis, PMA*):** Es un análisis de mapeo bi dimensional donde se mide el área de cada partícula, se realiza mediante un espaciado predefinido. Permite determinar imágenes de las partículas, mineralogía modal cuantitativa, estimación del tamaño de grano e información de asociación mineral (Gottlieb et al., 2000).
- **Análisis Mineralógico en Masa (*Bulk Mineral Analysis, BMA*):** El haz de electrones recorre la muestra mediante líneas paralelas equiespaciadas. Se utiliza para obtener una gran cantidad de datos ya que es más rápido que otros modos, sin embargo, no es posible contar con la imagen de la muestra, entrega la información de la mineralogía y las proporciones entre éstas (Gottlieb et al., 2000).
- **Búsqueda de Mineral Específico (*Specific Mineral Search, SMS*):** Este método sólo analiza una sub población de las partículas presentes. Basado en la premisa que la fase buscada emite más BSE que el resto de las fases. Esto permite que sólo se estimen puntos de la grilla que contengan la fase deseada. Este método se utiliza principalmente en menas con sulfuros de baja ley (Gottlieb et al., 2000).
- **Búsqueda de Mineral Traza (*Trace Mineral Search, TMS*):** Se identifica una fase mediante la acotación de la intensidad del BSE, analizando solo los puntos de la grilla que lo cumplan, maximizando la eficiencia del análisis y así poder detectar

fases que se encuentran en trazas (Qemscan operational modes, SGS Minerals services, 2013).

- *Field Scan*: Este modo de medición sirve para mapear secciones pulidas. Recolecta el espectro químico en un intervalo determinado del campo de visión. Cada campo de visión es entonces procesado para generar una única imagen integrada con colores que identifican a cada fase mineral presente en la muestra (Qemscan operational modes, SGS Minerals services, 2013).

Con Qemscan no es posible diferenciar entre polimorfos, esto producto de que la determinación del mineral se hace en base a la emisión de rayos X secundarios, los cuales dependen de los átomos y no de su ordenamiento espacial (estructura cristalina). Lo anterior lo diferencia de técnicas como el XRD. Mientras el Qemscan detecta la emisión de rayos X secundarios producto de la incidencia de un haz de electrones, el XRD se basa en la difracción de rayos X producto de las nubes de electrones que envuelven a los átomos individuales de los minerales y con esto caracteriza la estructura cristalográfica y la mineralogía. Producto de esto el XRD no es capaz de caracterizar material no cristalino (amorfo) mientras que el Qemscan no es afectado por eso (Ayling et al., 2012).

### **3.3.2 XRF**

La fluorescencia de rayos X (XRF) es un fenómeno en el cual, mediante la incidencia de rayos X sobre la muestra, se logra sacar un electrón de los niveles de energía más bajo del átomo el cual es reemplazado por un electrón de un nivel energético mayor. Esta diferencia de energía genera la emisión de un fotón de rayos X. Este fotón fluorescente es característico de cada elemento y la medición de su energía determina al elemento que lo emitió y la intensidad de los fotones indica la concentración de cada elemento. Dentro de sus limitaciones se encuentra el hecho de que detecta desde el Boro en adelante, y sus límites de detección son mayores para elementos livianos y menores para elementos pesados (Mukherjee, 2011).

### **3.3.3 XRD**

La difracción de rayos X (XRD) consiste en el bombardeo de rayos X a una muestra, cuya preparación involucra la conminución de la misma para que los granos queden orientados en distintas direcciones. Los rayos X se difractan según la ley de

Bragg y se registran los peaks de difracción. Cada fase cristalina tiene un espectro de difracción característico, por lo que quedan caracterizadas siempre y cuando no se produzcan problemas como el solapamiento de peaks o el efecto matriz, donde una fase altamente cristalina oscurece a una pobremente cristalina (Mukherjee, 2011).

### **3.3.4 Microscopía**

#### **3.3.4.1 Luz Transmitida**

El análisis de cortes transparentes se basa en el paso de luz polarizada por los granos minerales, una vez que la luz pasa por ellos vuelve a vibrar en varias direcciones. Posterior a esto se puede volver a colocar un polarizador antes que la luz llegue a los ojos (nícoles cruzados) o dejar pasar la luz directamente (nícoles paralelos). Es gracias a este fenómeno que se pueden identificar los minerales por las características ópticas distintivas de cada uno (Mukherjee, 2011). A continuación se listan las propiedades ópticas que son posibles de observar ya sea a nícoles paralelos o cruzados.

Nícoles Paralelos (Mukherjee, 2011):

- Color: Algunos minerales son incoloros (cuarzo, calcita, feldespato, etc.) y otros muestran colores como amarillo y café (biotita, turmalina), algunos son verdes, azules o rosados. El color de los minerales cambia de acuerdo a la orientación del corte respecto a las direcciones cristalográficas.
- Pleocroísmo: Cambio de color producto de absorción selectiva de diferentes longitudes de onda a diferentes direcciones de vibración.
- Forma y tamaño.
- Clivaje.
- Índice de refracción: Se observa de manera relativa al medio, alto índice implica observar bordes bien definidos en el mineral y un índice bajo se observa como bordes poco definidos.

Nícoles Cruzados (Mukherjee, 2011):

- Birrefringencia: Diferencia de los índices de refracción entre el rayo lento y rápido.
- Extinción.

- Color de Interferencia.
- Maclas.

### **3.3.4.2 Luz Reflejada**

Los minerales de mena deben ser analizados en un microscopio de luz reflejada. Su funcionamiento se basa en la iluminación de la muestra desde arriba para permitir la examinación de la luz reflejada por las superficies pulidas (Gribble, Hall, 1985). Las propiedades que se miden son tanto a nícoles paralelos como cruzados se listan a continuación.

Nícoles Paralelos (Gribble y Hall, 1985):

- Color: El color del mineral depende de que longitudes de onda refleja y absorbe.
- Reflectividad: Es la relación entre la intensidad de la luz reflejada por la superficie pulida del mineral y la intensidad de la luz incidente.
- Pleocroísmo: Propiedad de algunos minerales no cúbicos de cambiar de color al girar la platina a nícoles paralelos.
- Birreflectancia: Es la variación de la reflectividad de un mineral según su orientación.
- Dureza:
  - Rayas de pulido: Si la dureza es muy baja presentará rayas de pulido.
  - Relieve diferencial: Los minerales más duros resaltan más que los de menor dureza, lo que se evidencia en los bordes entre distintos granos. Este borde es tenue si la diferencia de dureza es poca y en el caso contrario estará bien marcada.

Nícoles Cruzados (Gribble y Hall, 1985):

- Anisotropía: La anisotropía óptica en reflexión se produce por la diferencia de reflectividades en las dos direcciones de vibración de la luz en un cristal. Esto se observará al girar la platina y observando cómo se extingue y como la iluminación aumenta a un máximo en distintas posiciones.
- Reflejos Internos: Aparecen exclusivamente en los minerales de reflectividad muy baja (transparente y semiopacos). Parte de la luz penetra a través del mineral reflejándose en cualquier discontinuidad interna tales como planos de macla, exfoliaciones y fracturas.

### 3.3.5 ICP-OES

Esta técnica está basada en la emisión espontánea de fotones desde los iones y átomos que han sido excitados. La muestra puede ser introducida directamente al instrumento si se trata de algún líquido o gas, en el caso de ser sólida debe ser preparada de tal forma de que se presente en forma de solución. La solución de muestra es convertida en un aerosol y se dirige al canal central del plasma. En su núcleo, el *inductively coupled plasma* (ICP) mantiene temperaturas de aproximadamente 10000K lo que produce que el aerosol sea llevado a estado plasmático. Los elementos a analizar son liberados como átomos libres, promoviéndolos a estados excitados para luego emitir fotones y volver a su estado base. Las longitudes de onda de los fotones se utilizan para determinar los elementos de los cuales fueron originados. El número total de fotones es directamente proporcional a la concentración del elemento que los originó en la muestra (Hou & Jones, 2000).

### 3.3.6 Extracción Parcial

Este análisis corresponde a un método químico de cuantificación de Cu, Fe y S, mediante distintas etapas de ataques con ácidos distintos desarrollado por BHP (Williams, Gilligan y Preece, 2000). La cantidad liberada de Cu depende de la especie mineral y el ácido utilizado. Estos valores se determinaron experimentalmente y son conocidos como “extracciones limitantes”. La Tabla 3 indica las extracciones limitantes de 3 especies minerales: calcopirita (cpy), calcosina (cc) y covelina (cov).

Tabla 3. Extracciones limitantes para calcopirita, calcosina y covelina.

Ataque Acido	Cpy	Cc	Cov
CuT	1 (100%)	1 (100%)	1 (100%)
NaCN (CNCu)	0.094 (9.4%)	0.990 (99%)	0.960 (96%)
Fe <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (FSCu)	0.046 (4.6%)	0.510 (51%)	0.035 (3.5%)

Las razones de extracciones limitantes son las razones de CNCu/CuT y FSCu/CuT. Asumiendo que todo el cobre contenido en la muestra proviene de las 3 especies minerales mencionadas anteriormente se plantean el siguiente sistema de ecuaciones para conocer la mineralogía normativa de la muestra:

$$c_{py} + c_v + c_c = 1$$

$$0.094 * c_p + 0.960 * c_v + 0.990 * c_c = \frac{CNCu}{CuT}$$

$$0.046 * c_p + 0.035 * c_v + 0.510 * c_c = \frac{FSCu}{CuT}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior se obtienen los *Copper Source Ratio* (CSR) que indican la razón del total de cobre que proviene de cada especie y que multiplicados por el valor analítico CuT entregan el *Copper Source Percent* (CSP) que corresponde a la cantidad de cobre (ley de cobre) que proviene de cada mineral.

El análisis de extracción parcial además contempla la obtención del CuS (cobre soluble), As (arsénico asociado a sulfuros de Cu-As), Fe (hierro común con la digestión de CuT), FeT (hierro total de la muestra), S (azufre total de la muestra) y S<sup>2-</sup> (azufre en forma de sulfuro).

En Collahuasi, dada la naturaleza hipógena del yacimiento, se modificó el método y se calcula además la bornita, con ayuda de las extracciones limitantes de este mineral.

### 3.3.7 Otras Técnicas Analíticas

Adicionalmente a los análisis solicitados al laboratorio, éste realiza una reconciliación de sus resultados utilizando las siguientes técnicas:

- Absorción Atómica
- Volumetría
- Detección Molecular Infrarroja Leco

## 4. Antecedentes

### 4.1 Mineralogía del yacimiento

Existen estudios anteriores que tratan el tema de la mineralogía del yacimiento, ya sea enfocado netamente en la mineralización, las arcillas o con alcances más amplios. Esta sección se concibió como un recopilatorio de esta información existente para poder contar con nociones sobre la mineralogía primaria, alteración y mineralización del yacimiento.

- (1) GEOMAQ - Descripciones calcográficas y conteo mineralógico de sulfuros -2007: Se realiza la descripción de cortes pulidos y su conteo modal. El resultado de este estudio indica mineralización de pirita, calcopirita, covelina, calcosina, digenita, bornita y molibdenita. Se encuentran texturas de intercrecimiento donde los minerales reemplazan a la pirita. También es posible observar la alteración de bornita a calcosina-digenita. Se observa bastante la asociación calcosina-digenita y posterior alteración a covelina.
- (2) GABGEO - Mineralogía de muestras para biolixiviación - 2012: Para el análisis petrográfico se tienen las siguientes especies minerales y porcentajes: cuarzo (42%), ortoclasa (11%), plagioclasa (18%), biotita (1%), sericita (22%), clorita (2%), caolinita (2%). Por su parte, el análisis de difracción de rayos X: cuarzo (33%), ortoclasa (14%), sericita/muscovita (18%), clinocloro (3%), caolinita (3%), pirita (1%), calcopirita (3%), calcosina (0,1%), molibdenita (0.1%).
- (3) ASD Clay Alteration Study Rosario - 2004: Se realizó un estudio de arcillas utilizando espectroscopia infrarroja donde se encontraron las siguientes especies y asociaciones: montmorillonita, illita, caolinita, sericita, clorita, illita/sericita, montmorillonita/illita, pirofilita.
- (4) Carla Carrasco, Fabián Marêchal - Caracterización geológica de las fallas/vetas de las fases 4 y 5 de la mina Rosario - 2010: Se caracterizó la mineralización y los filosilicatos encontrándose: sericita + illita, sericita, illita y caolinita + illita siendo la illita el mineral que más se repite. En cuanto a la mineralización se encontró: calcopirita, bornita, enargita, pirita, calcosina, molibdenita y covelina.

## 5. Resultados

### 5.1 Geoquímica

Para obtener las concentraciones de los elementos en la roca se realizó un análisis de ICP-OES, además de contar con datos de absorción atómica para algunos elementos. Para el caso de valores bajo el límite de detección se optó por dejar la mitad de este límite como el valor del elemento en la muestra. Por otro lado, para elementos donde se tenían concentraciones sobre el límite de detección, se utilizó el valor obtenido por otra técnica. Para el punto 2 se tienen los resultados de las tres muestras correspondientes a cada línea de alimentación. Con los valores de alimentación de cada una de estas líneas para el día 15 de Abril se obtiene una proporción del 22% para la línea 1, 16% para la línea 2 y 62% para la línea 3. Con estas proporciones se generó el valor de cada elemento para el punto 2. La Tabla 4 indica qué elementos se analizaron, con qué técnica y a cuantas muestras se les realizó el ajuste del límite inferior de datos.

**Tabla 4. Elementos analizados junto a la técnica utilizada y la cantidad de valores bajo el límite de detección (VBLD). ICP: ICP-OES, AAS: Absorción atómica, Vol: Volumetría, Leco: Detección Molecular Infrarroja Leco.**

Elemento	Técnica	VBLD	Elemento	Técnica	VBLD
<b>CuT</b>	AAS-Vol	-	<b>Na</b>	AAS	-
<b>Fe</b>	AAS	-	<b>Nb</b>	ICP	4
<b>Ag</b>	ICP	-	<b>Ni</b>	ICP	-
<b>Al</b>	AAS	-	<b>P</b>	ICP	-
<b>As</b>	ICP	-	<b>Pb</b>	ICP	-
<b>Ba</b>	ICP	-	<b>S</b>	ICP-Leco	-
<b>Be</b>	ICP	5	<b>Sb</b>	ICP	1
<b>Bi</b>	ICP	3	<b>Sc</b>	ICP	-
<b>Ca</b>	AAS	-	<b>Se</b>	ICP	3
<b>Cd</b>	ICP	-	<b>Sn</b>	ICP	4
<b>Co</b>	ICP	-	<b>Sr</b>	ICP	-
<b>Cr</b>	ICP	-	<b>Te</b>	ICP	1
<b>Ga</b>	ICP	-	<b>Ti</b>	AAS	-
<b>K</b>	AAS	-	<b>V</b>	ICP	-
<b>La</b>	ICP	-	<b>W</b>	ICP	-
<b>Li</b>	ICP	3	<b>Ytrio</b>	ICP	-
<b>Mg</b>	AAS	-	<b>Zn</b>	ICP	-
<b>Mn</b>	ICP	-	<b>Zr</b>	ICP	-
<b>Mo</b>	ICP	-			

Se prefirieron los datos de AAS por sobre los de ICP producto de la recomendación del laboratorio, que indicaba que los datos de AAS han sido históricamente más certeros. Esto fue así para todos los elemento analizados por AAS a excepción del Mn, ya que tenía 4 datos bajo el límite de detección y el ICP por su parte, ninguno.

Para el caso del Cu y el S, dado los altos contenidos presentes en las muestras correspondientes a concentrados, se debió determinar la concentración mediante volumetría para el primero y por detección molecular infrarroja Leco para el segundo.

Para poder visualizar en un mismo gráfico distintos elementos, con unidades diferentes o con valores distanciados en órdenes de magnitud es que se normalizaron los valores tomando como base la concentración inicial en el yacimiento (punto 1). Se eligió este punto ya que es el primero y desde el cual se concentran o no los elementos a lo largo del proceso. Producto de lo anterior, el eje “y” de los gráficos corresponde al factor de concentración y el eje “x” representa cada punto de proceso.

Basado en los factores de concentración para los puntos 4, 5, 6, 7 y 8 (desde el concentrado colectivo al embarque, incluyendo el concentrado Rougher de Mo) podemos separar los elementos en 3 grupos:

- Elementos que se concentran: Cuando el factor de concentración es mayor a 1
- Elementos que no se concentran: Cuando el factor de concentración es menor que 1.
- Elementos que no sufren mayores cambios: Cuando el factor de concentración antes y después del punto 4 (concentrado colectivo) es similar.

### **5.1.1 Elementos que se concentran**

Los elementos que aumentan su proporción dentro de las muestras desde el punto 4 corresponden a: Ag, As, Bi, Cd, Co, Cu, Fe, Ga, Mo, P, Pb, S, Sb, Se, Sn, Te, W, Zn.

De acuerdo a su comportamiento desde el punto 4 al 8 estos elementos pueden volver a dividirse:

- Mayor concentración en el punto 5 (Figura 6, Figura 7, Figura 8 ): Ag, Bi, Mo, P, Sb, W y Zn.

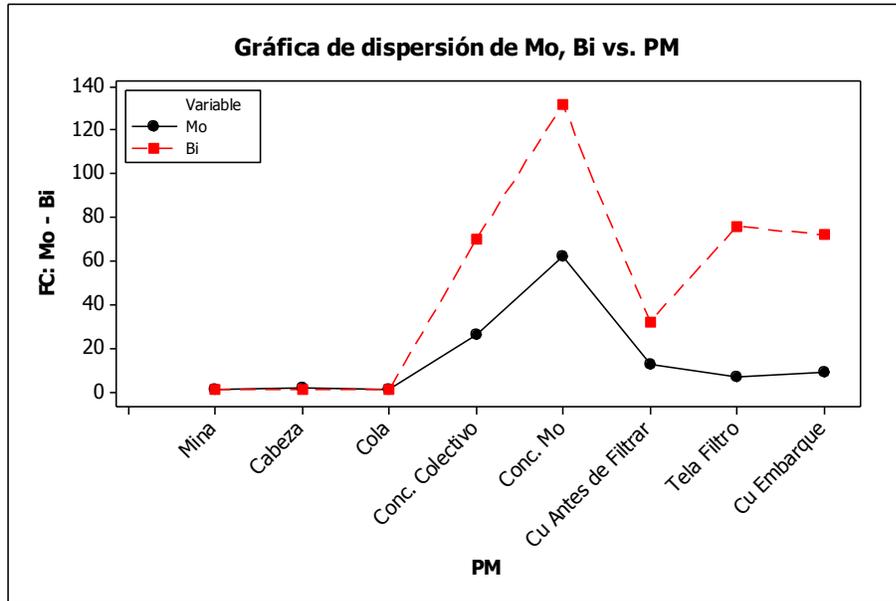


Figura 6. Evolución de la concentración de Bi y Mo a lo largo del proceso productivo.

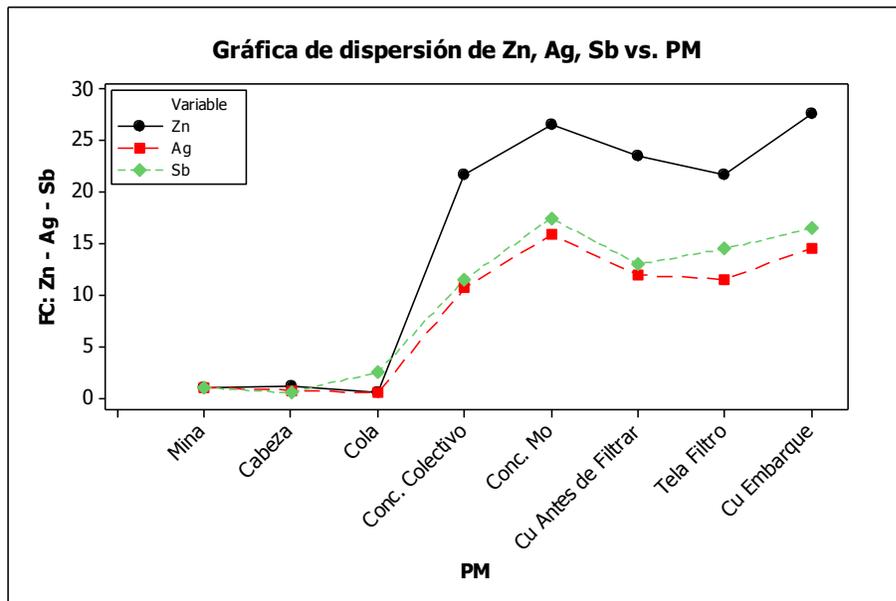


Figura 7. Evolución de la concentración de Ag, Sb y Zn a lo largo del proceso productivo.

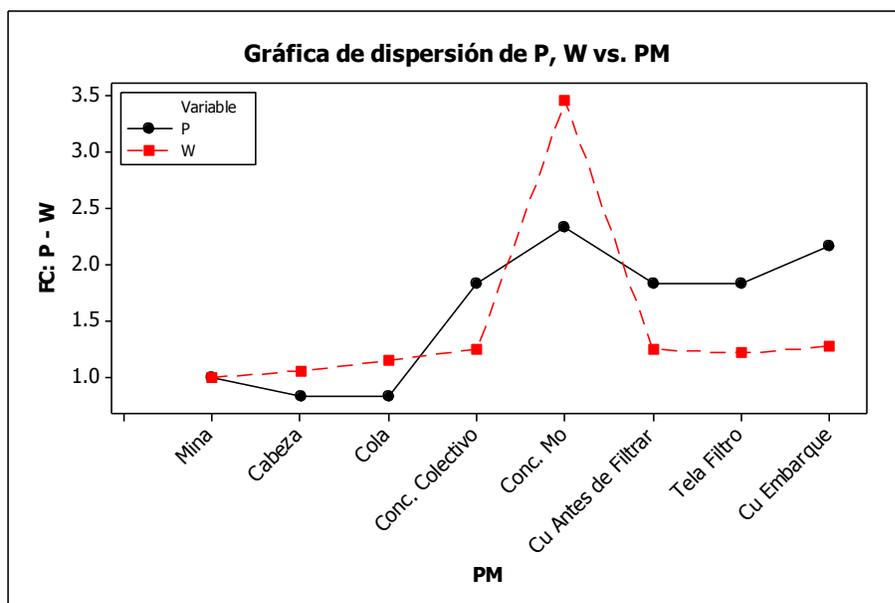


Figura 8. Evolución de la concentración de P y W a lo largo del proceso productivo

- Bajan su concentración en el punto 5 (Figura 9): Ga, Cd, Co, Cu y Fe.

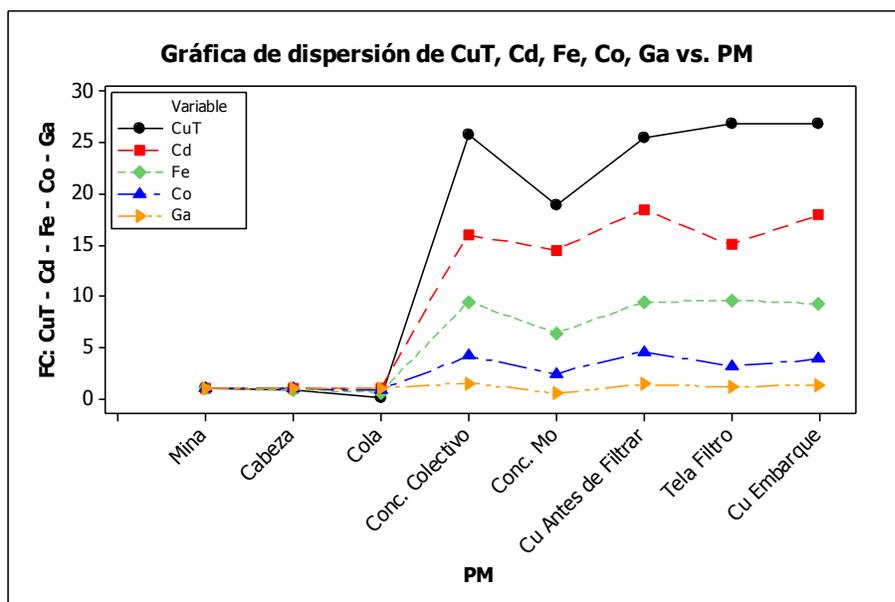


Figura 9. Evolución de la concentración de Cd, Co, Cu y Fe a lo largo del proceso productivo.

- No cambian su concentración pasado el punto 4 (Figura 10): S.

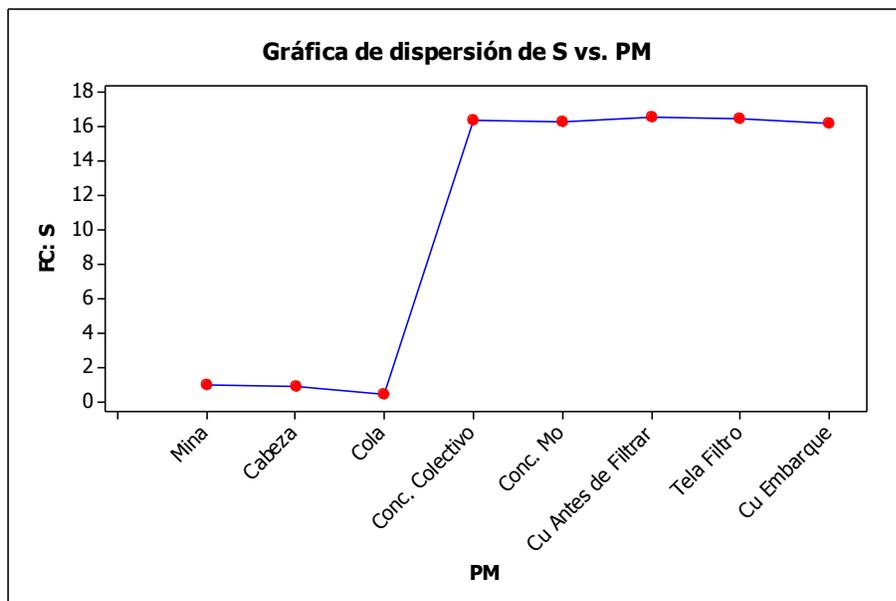


Figura 10. Evolución de la concentración de S a lo largo del proceso productivo.

- No cumplen ninguna de las condiciones anteriores (Figura 11): As, Pb, Se, Sn y Te.

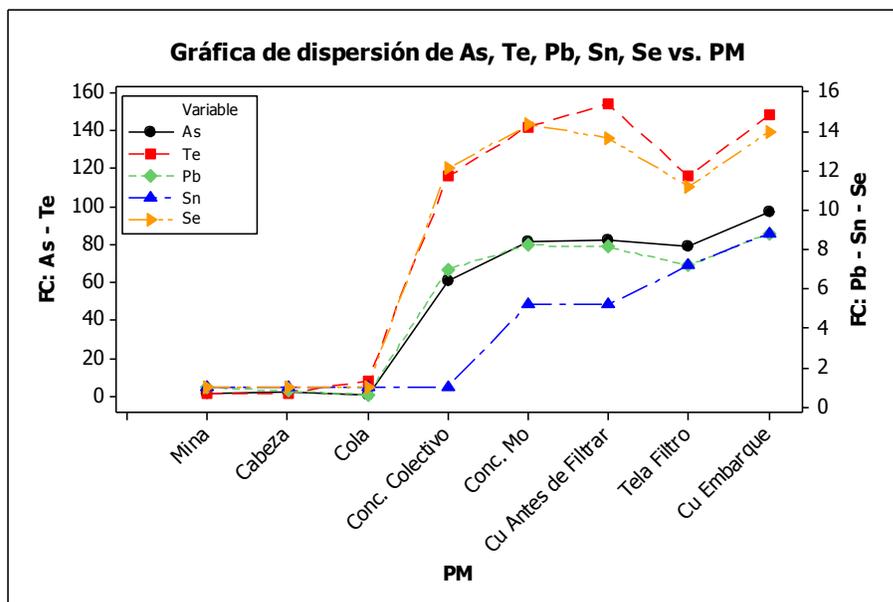


Figura 11. Evolución de la concentración de As, Pb, Se, Sn y Te a lo largo del proceso productivo

### 5.1.2 Elementos que no se concentran

Corresponde a los elementos cuyo contenido disminuye en las etapas donde se muestrearon concentrados (punto 4 al 8). Estos elementos son: Al, Ba, Be, Ca, K, La, Li, Mg, Mn, Na, Nb, Sc, Sr, Ti, V, Y, Zr.

Como en el caso anterior, podemos separar estos elementos según su comportamiento en el punto 5.

- Aumento de concentración en el punto 5 (Figura 12): Ca, Nb, y Zr.

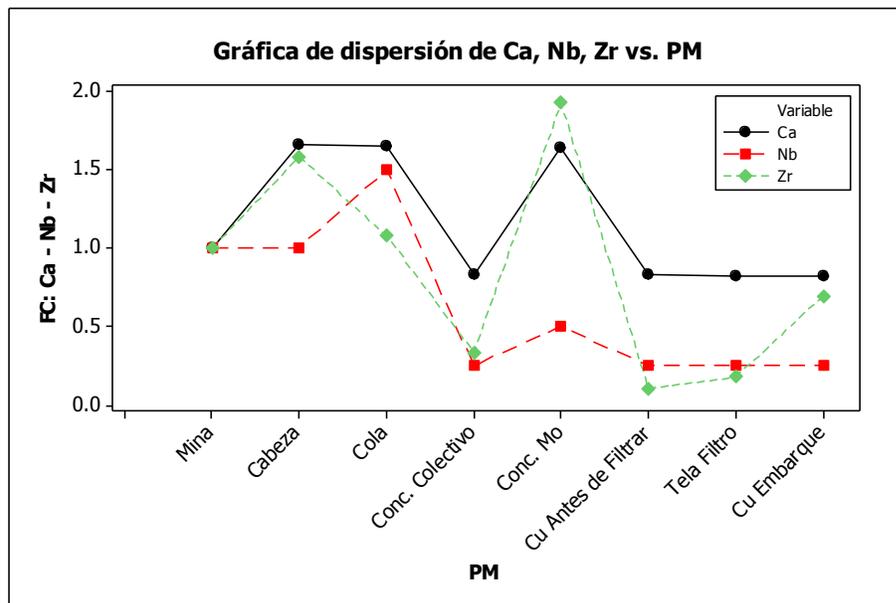


Figura 12. Evolución de la concentración de Ca, Nb y Zr a lo largo del proceso productivo.

- Elementos que disminuyen su concentración en el punto 5 (Figura 13): La, Sc, Ti, V e Y.

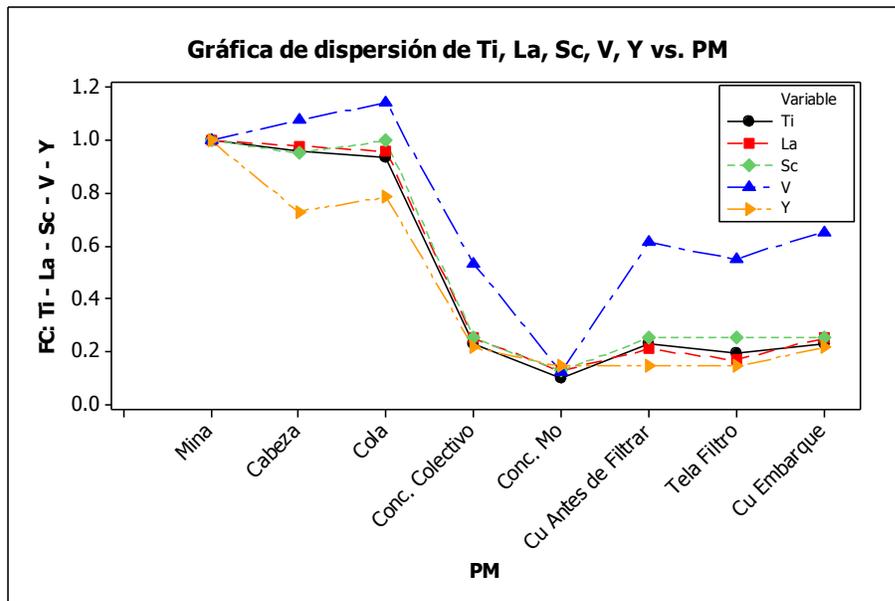


Figura 13. Evolución de la concentración de Ti, La, Sc, V e Ytrio a lo largo del proceso productivo.

- Elementos que no cumplen ninguna de las 2 condiciones anteriores (Figura 14, Figura 15): Al, Ba, Be, K, Li, Mg, Mn, Na y Sr.

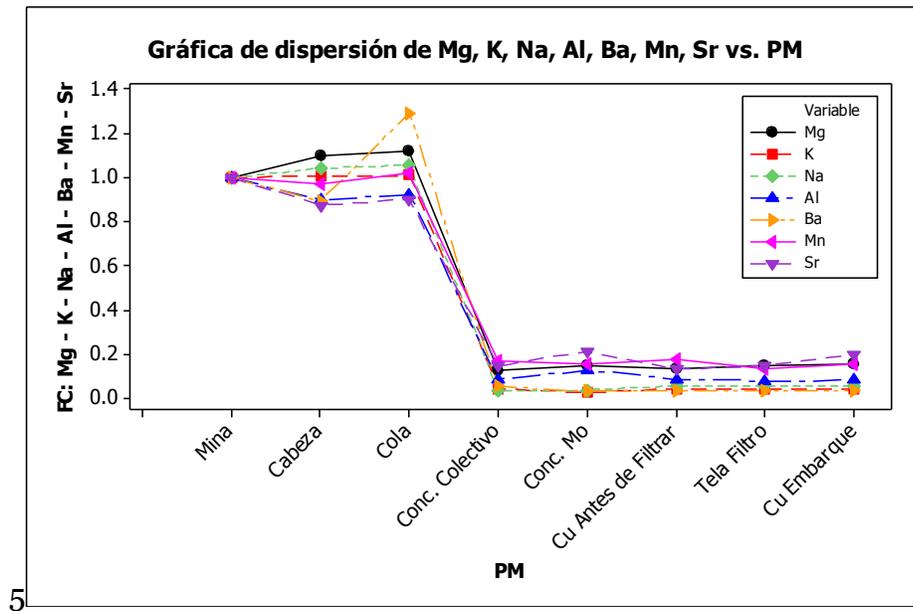


Figura 14. Evolución de la concentración de Al, Ba, K, Mg, Mn, Na y Sr a lo largo del proceso productivo.

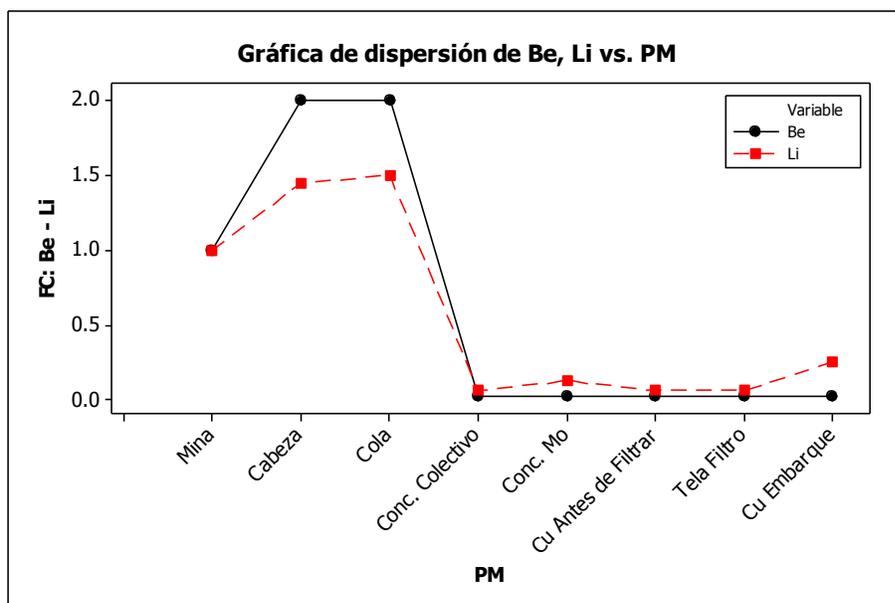


Figura 15. Evolución de la concentración de Be y Li a lo largo del proceso productivo.

### 5.1.3 Elementos que no varían

Estos elementos mantienen el factor de concentración antes y después del punto 4, que separa las muestras de concentrado con las que no lo son. Corresponden a Cr y Ni.

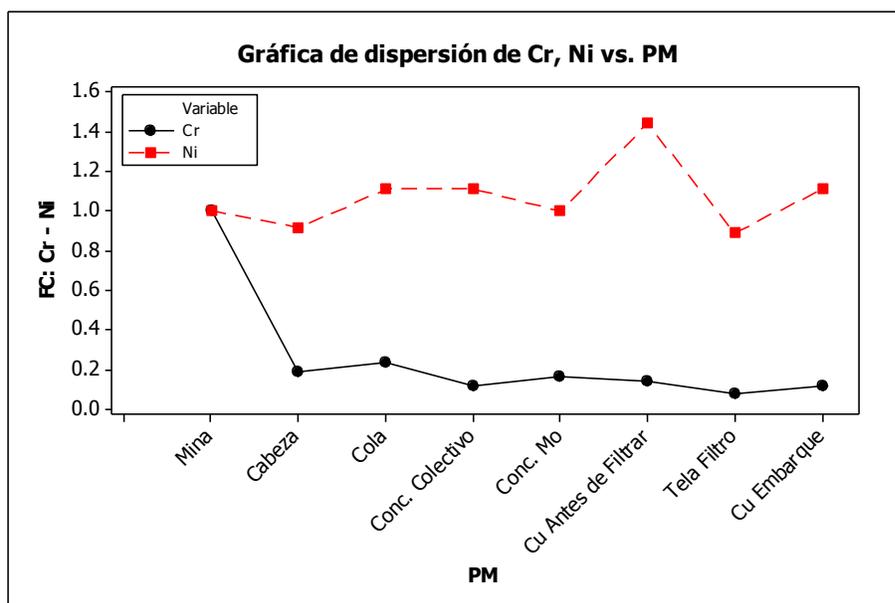


Figura 16. Evolución de la concentración de Cr y Ni a lo largo del proceso productivo.

La Tabla 5 resume lo expuesto agrupando los elementos en las diferentes categorías.

**Tabla 5. Resumen comportamiento de elementos.**

	<b>Mayor concentración se encuentra en P5</b>	<b>Bajan su concentración en P5</b>	<b>Elementos que no cumplen ninguna de las 2 condiciones</b>
<b>Aumentan concentración a lo largo del proceso</b>	Mo, Ag, Zn, Sb, P, Bi, W	Cu, Fe, Cd, Co, Ga	S, As, Pb, Se, Sn, Te
<b>Disminuyen concentración a lo largo del proceso</b>	Ca, Nb, Zr	La, Sc, Ti, V, Y	Al, K, Na, Mg, Mn, Sr, Ba, Be, Li
<b>No sufren mayores cambios de concentración a lo largo del proceso</b>	-	-	Cr, Ni

## **5.2 Mineralogía**

### **5.2.1 Descripción Macroscópica**

La descripción macroscópica de las cuatro muestras de mano llevó a determinar lo siguiente:

Mineralización compuesta en orden decreciente de pirita, calcopirita, bornita, digenita, molibdenita. Nunca pasa del 5%, lo más común es 1-2%. Generalmente se

presenta diseminada, aunque una muestra (M3) además presenta mineralización en vetillas.

La alteración principal es cuarzo sericita, observándose arcillas en la totalidad de las muestras, la intensidad varía de débil a intensa y es pervasiva.

Casi no se observan plagioclasas y muy pocos minerales máficos, sin poder diferenciarlos. El cuarzo y el feldespato potásico son los que están presentes en mayor proporción, con más cuarzo que feldespato en la mayoría de las muestras. El resto de minerales que se observan son principalmente arcillas y sericita. La muestra M4 presenta clorita.

Las descripciones individuales de cada muestra como también imágenes de éstas se pueden encontrar en el Apéndice A: Descripción Macroscópica.

### **5.2.2 Descripción Microscópica**

La descripción de cortes transparentes y pulidos de las muestras M1 a M4 que compositadas corresponden a la muestra del punto 1 se resumen en la Tabla 6. La descripción completa se encuentra en el Apéndice B: Descripción microscópica.

**Tabla 6. Resumen de las descripciones de cortes pulidos y transparentes.**

	<b>Transparente</b>	<b>Pulido</b>
<b>M1</b>	De minerales primarios hay cuarzo y feldespato muy alterado y vestigios de plagioclasas.  También existe cuarzo de alteración, caracterizado por menor tamaño de grano.  Biotita y sericita de alteración.	Se observa mineralización de bornita, calcopirita y pirita. Algunos cristales de bornita tienen los bordes azulados. La mineralización es principalmente diseminada y corresponde al 3-5% de la roca.
<b>M2</b>	No se observa mineralogía primaria.  Pequeños cuarzos de alteración.  Sericita/mica blanca por toda la muestra.	Mineralización de calcopirita, pirita y calcosina. Corresponde al 5% de la roca
<b>M3</b>	Solo cuarzo y feldespatos como mineralogía primaria, estos últimos altamente alterados  Hay cristales de cuarzo de alteración muy pequeños y asociados a poca sericita. Otra población de mayor tamaño que está cubierto en gran parte por sericita. Una vetilla de cuarzo de mayor tamaño donde la sericita rellena los espacios entre los granos.	Existe calcopirita, pirita y calcosina. No se observa bornita. La mineralización se encuentra diseminada en su mayoría pero existe también asociada a una vetilla. La mineralización es 10% de la muestra.
<b>M4</b>	Como minerales primarios hay cuarzo y relictos de plagioclasa.  La mineralogía de alteración está compuesta de clorita, biotitas, biotitas verdes y sericita. Los últimos 2 minerales cubren casi el 70-80% del corte.	Mineralización de calcopirita, pirita y bornita. Mineralización diseminada y asociada a vetilla. 10-15% de la roca es mineralización.

Adicionalmente se describió una briqueta preparada con el material que compone la muestra del punto 1. En ésta se encontró que la mineralización corresponde al 15% de la muestra, en su mayoría no está asociada a la ganga y principalmente es calcopirita, también hay molibdenita, covelina, bornita y pirita.

### **5.2.3 Difracción de rayos X**

Al igual que para la geoquímica, la muestra P2 se calculó ponderando los valores de alimentación de las 3 líneas de molienda (Línea 1, 22%, Línea 2, 16% y Línea 3, 62%).

La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos. Para las muestras P1 a P3 se observa predominancia de minerales de ganga, como cuarzo, ortoclasa, albita, y muscovita. En menor cantidad hay clinocloro y pirita. En las muestras P4 a P8 estos minerales prácticamente desaparecen, apareciendo solo pequeñas cantidades de cuarzo y biotita.

**Tabla 7. Porcentaje de especies minerales en las muestras por XRD.**

	Mina	Cabeza	Cola	Conc. Colectivo	Conc. Mo	Cu. Antes Filtrar	Tela Filtro	Cu Embarque
Fase	P1 (%)	P2 (%)	P3 (%)	P4 (%)	P5 (%)	P6 (%)	P7 (%)	P8 (%)
Cuarzo	48.89	46.70	43.98	0.00	0.00	1.34	1.15	1.59
Albita	12.90	10.56	13.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Calcopirita	2.50	2.27	0.39	68.88	57.66	79.69	80.13	74.14
Ortoclasa	17.07	19.30	17.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Muscovita	16.08	18.95	19.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Clinocloro	0.62	1.26	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pirita	1.94	0.92	1.42	16.34	10.10	10.73	9.10	15.02
Butlerita	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Molibdenita	0.00	0.02	0.20	1.07	31.99	0.32	0.40	0.40
Cuprita	0.00	0.02	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bornita	0.00	0.00	0.00	10.79	0.00	6.76	9.07	8.66
Calcosina	0.00	0.00	0.00	2.81	0.00	0.00	0.00	0.00
Biotita	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.16	0.10	0.15
Talco	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
Sepiolita	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00
Pirofilita	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.05	0.04

En relación a la mena, la calcopirita es la fase mineral predominante aumentado de casi 2% hasta 70%-80% y con una marcada disminución en la muestra P5, lo cual también ocurre con la bornita, la que incluso no está presente en esta muestra. La molibdenita aumenta su concentración en relación a las muestras P1 a P3 en la muestra P4 y aumenta aún más en P5 para disminuir considerablemente en las muestras posteriores. La cuprita desaparece desde la muestra de concentrado colectivo (P4) y es también esta muestra la única que presenta calcosina. Desde las muestras P6 a P8 aparece pirofilita en muy baja concentración. En P5 aparece talco y sepiolita, ausentes en el resto de las muestras.

## 5.2.4 Difracción y Fluorescencia de Rayos X

Se realizó otro análisis que combina resultados de difracción y fluorescencia de rayos X para obtener valores semicuantitativos de la mineralogía.

La muestra del punto 2 se calculó ponderando los resultados de cada una de las líneas de alimentación por los porcentajes de alimentación de cada línea al proceso (22% Línea 1, 16% Línea 2 y 62% Línea 3).

**Tabla 8. Porcentaje de especies minerales en las muestras por técnica mixta de XRD y XRF.**

	Mina	Cabeza	Cola	Conc. Colectivo	Conc. Mo	Cu. Antes Filtrar	Tela Filtro	Cu Embarque
Fase	P1 (%)	P2 (%)	P3 (%)	P4 (%)	P5 (%)	P6 (%)	P7 (%)	P8 (%)
Cuarzo	45.88	40.60	37.82	0.00	0.00	1.33	1.34	0.00
Muscovita	6.51	6.74	3.85	1.59	0.00	4.53	4.93	1.89
Albita	13.15	12.28	14.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Anortita	1.03	3.26	1.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sanidina	3.41	4.27	7.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Clinocloro	0.00	1.79	2.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Illita	9.33	12.74	18.49	1.32	2.40	1.72	1.21	3.37
Bornita	0.00	0.21	0.00	5.90	1.07	5.43	4.49	6.88
Molibdenita	0.10	0.28	0.11	1.70	23.53	0.64	0.49	0.45
Ortoclasa	14.63	10.88	6.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Caolin grupo	0.58	0.67	1.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hematita	0.44	0.33	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ulvospinel	0.81	0.96	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pirita	0.00	0.00	0.00	6.98	8.32	10.40	9.90	7.41
Calcopirita	2.14	1.64	0.20	79.97	61.07	74.62	75.75	78.02
Biotita	1.41	2.20	3.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pirofilita	0.60	0.92	0.69	2.54	3.61	1.34	0.72	1.98
Laumonita	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00
Butlerita	0.00	0.23	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos. Se observa como los principales minerales de ganga en las muestras de los puntos 1 al 3 corresponden a cuarzo, muscovita, illita, albita y ortoclasa. En los puntos 4 al 8 los minerales recién mencionados en su mayoría desaparecen, indicando que salen del proceso hacia el tranque de relaves (punto 3). La calcopirita y la bornita aumentan su concentración

desde el punto 4 (concentrado colectivo) y disminuyen en el concentrado de Mo, muestra que presenta el mayor porcentaje de molibdenita.

### **5.2.5 Qemscan**

Los resultados de Qemscan entregan una batería de minerales mucho más amplia que la difracción de rayos X. La calcopirita y las menas de Cu aumentan desde la muestra P4, disminuyen en P5 y en las posteriores se ve una concentración similar a la de P4. La ganga mayoritaria, cuarzo, feldespatos, plagioclasas y muscovita se va en el material al tranque de relaves (P3). Las mayores diferencias se encuentran en la ganga que está presente en menor concentración. El cálculo de la muestra P2 se realizó de la misma forma que en etapas anteriores, esto es:  $P2: 0.22 * P2A + 0.16 * P2B + 0.62 * P2C$ .

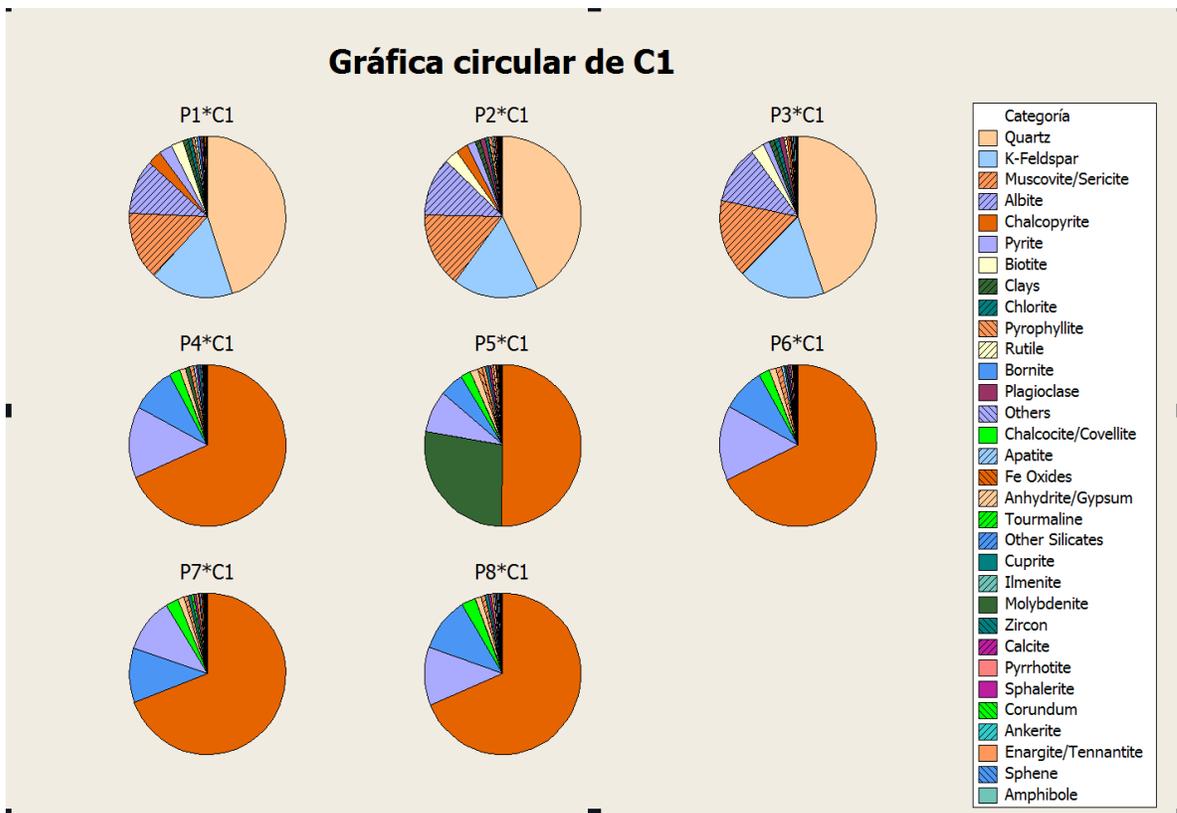
La Tabla 9 muestra los resultados de la mineralogía entregada por Qemscan.

**Tabla 9. Resultados de la mineralogía modal por Qemscan (en %).**

	Chalcopyrite	Chalcocite/Covellite	Bornite	Enargite/Tennantite	Cuprite	Pyrite	Pyrrhotite	Molybdenite	Sphalerite
P1	2.90	0.23	0.47	0.00	0.04	2.68	0.02	0.02	0.01
P2	2.32	0.16	0.19	0.00	0.02	1.89	0.02	0.04	0.01
P3	0.42	0.06	0.02	0.00	0.06	1.31	0.01	0.01	0.00
P4	68.60	2.25	9.04	0.22	0.44	14.26	0.07	0.86	0.45
P5	50.17	2.04	4.91	0.67	0.58	8.44	0.06	27.55	0.56
P6	67.93	2.28	8.77	0.30	0.40	14.98	0.08	0.38	0.34
P7	69.20	2.64	11.10	0.43	0.64	10.78	0.07	0.31	0.47
P8	68.69	2.91	10.94	0.48	0.60	11.70	0.07	0.27	0.55
	Galena	Quartz	Plagioclase	K-Feldspar	Biotite	Amphibole	Pyroxene	Tourmaline	Other Silicates
P1	0.00	44.91	0.33	17.20	2.56	0.00	0.01	0.05	0.04
P2	0.00	42.65	0.93	17.76	2.97	0.16	0.01	0.05	0.04
P3	0.00	44.78	1.01	17.73	2.82	0.17	0.01	0.05	0.05
P4	0.01	1.28	0.03	0.47	0.15	0.00	0.00	0.00	0.01
P5	0.01	1.71	0.02	0.28	0.11	0.00	0.00	0.00	0.01
P6	0.00	1.47	0.04	0.48	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00
P7	0.00	1.26	0.04	0.30	0.13	0.00	0.00	0.00	0.02
P8	0.01	1.17	0.01	0.40	0.13	0.00	0.00	0.00	0.01
	Muscovite/Sericite	Chlorite	Albite	Epidote	Clays	Calcite	Ankerite	Anhydrite/Gypsum	Sulphates
P1	13.71	0.88	10.90	0.00	1.05	0.02	0.01	0.09	0.02
P2	15.01	0.83	11.66	0.06	1.10	0.07	0.06	0.10	0.01
P3	15.76	1.02	11.65	0.03	1.06	0.07	0.06	0.06	0.01
P4	0.85	0.05	0.25	0.00	0.04	0.01	0.01	0.05	0.02
P5	0.53	0.04	0.18	0.00	0.17	0.01	0.00	0.49	0.00
P6	1.19	0.10	0.32	0.04	0.05	0.01	0.01	0.06	0.00
P7	1.02	0.09	0.16	0.00	0.05	0.01	0.01	0.07	0.00
P8	0.97	0.07	0.21	0.03	0.05	0.01	0.00	0.07	0.00
	Apatite	Rutile	Ilmenite	Fe Oxides	Corundum	Sphene	Pyrophyllite	Zircon	Others
P1	0.20	0.51	0.04	0.20	0.01	0.00	0.54	0.02	0.33
P2	0.21	0.48	0.03	0.26	0.01	0.03	0.55	0.01	0.31
P3	0.23	0.50	0.05	0.31	0.00	0.03	0.32	0.01	0.30
P4	0.10	0.18	0.00	0.21	0.00	0.00	0.02	0.00	0.05
P5	0.19	0.05	0.00	0.27	0.00	0.01	0.88	0.00	0.04
P6	0.12	0.09	0.00	0.19	0.01	0.00	0.09	0.04	0.04
P7	0.11	0.06	0.01	0.25	0.54	0.00	0.06	0.01	0.14
P8	0.12	0.11	0.00	0.27	0.06	0.00	0.05	0.00	0.03

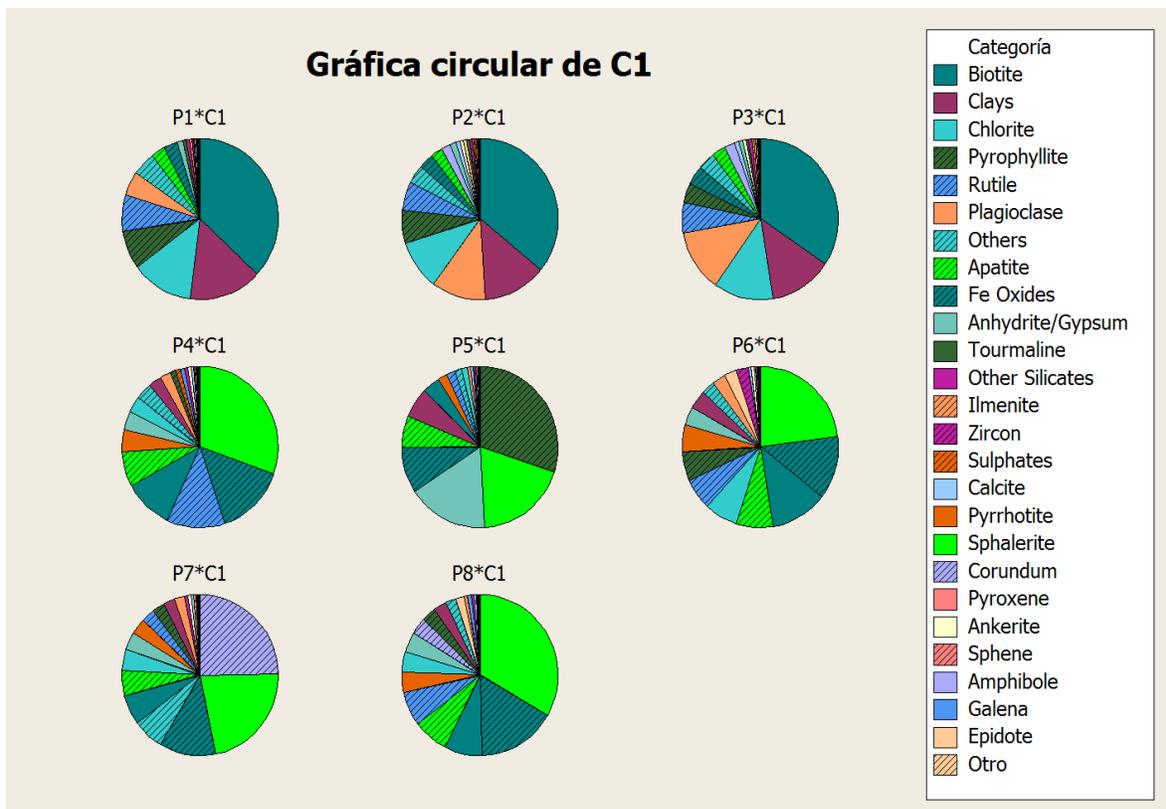
### 5.2.5.1 Mineralogía modal

Para poder apreciar de mejor forma los datos se realizaron gráficas circulares para cada una de las muestras. En la Figura 17 se observa como predominan minerales distintos en las muestras P1 a P3 y P4 a P8. Para las primeras 3 muestras existe gran porcentaje de cuarzo, feldespato potásico, muscovita y albita. Las muestras siguientes, desde P4 a P8, presentan minerales de mena en mayor proporción, siendo la calcopirita, bornita y molibdenita los predominantes además de pirita.



**Figura 17. Gráfico circular con la concentración de los minerales presentes en las muestras según Qemscan.**

Dada la gran cantidad de minerales identificados, no es posible observar que sucede con los que están en menor proporción. Por esto en la Figura 18 se quitaron los minerales mayores, ya sean de mena o ganga para así observar el comportamiento de las especies restantes a lo largo del proceso.



**Figura 18. Mineralogía de ganga menor según Qemscan.**

En la Figura 18 se observa como la mineralogía de ganga de las muestras P1 a P3 es muy similar, siendo biotita, arcillas, clorita, pirofilita, rutilo y plagioclasa las fases con mayor concentración. Las muestras P4, P6, P7 y P8 tienen similitud de minerales de ganga, tanto en composición como concentración y la muestra P5 difiere del resto mostrando aumento de pirofilita y anhidrita/yeso.

Para dejar más clara la evolución de las fases minerales se realizaron gráficos de concentración versus etapa del proceso. En los gráficos se agruparon los minerales según concentraciones similares y no se graficaron los siguientes: galena, anfíbola, piroxeno, turmalina, “otros silicatos”, epidota, ankerita, sulfatos, ilmenita, esfeno y “otros” por presentar resultados muy bajos o nulos y “otros silicatos” por representar más de un mineral o familia mineralógica. El comportamiento de los minerales se puede separar en 4 categorías:

- I. Minerales que abandonan el proceso hacia el tranque de relaves.
- II. Minerales que aumentan su concentración desde la muestra P4.
- III. Minerales cuya mayor concentración se encuentra en la muestra P5.
- IV. Minerales que tienen otro comportamiento.

## I. Minerales que abandonan el proceso hacia el tranque de relaves.

El cuarzo pasa de aproximadamente 45% en la mina y alimentación de la planta a un 1% en los concentrados. La muestra del relave (P3), en concordancia con lo anterior, contiene un 44.8% de cuarzo indicando que la mayoría de este mineral se va en ésta etapa (Figura 19). El comportamiento del feldespato potásico, la biotita, la albita y la muscovita/sericita es prácticamente el mismo, su concentración varía muy poco en las muestras P1, P2 y P3 significando su abandono del proceso hacia el tranque de relaves (Figura 20).

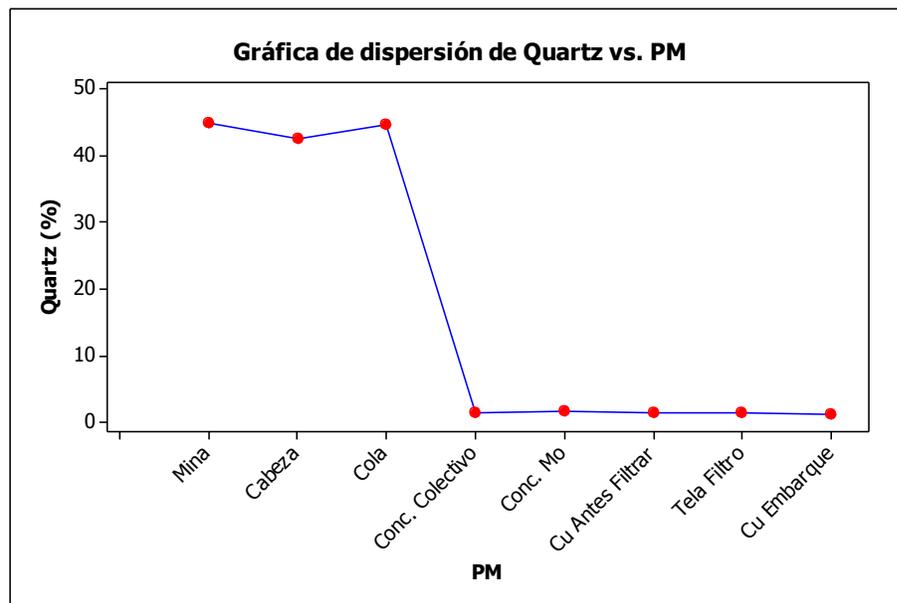


Figura 19. Evolución del cuarzo a lo largo del proceso productivo.

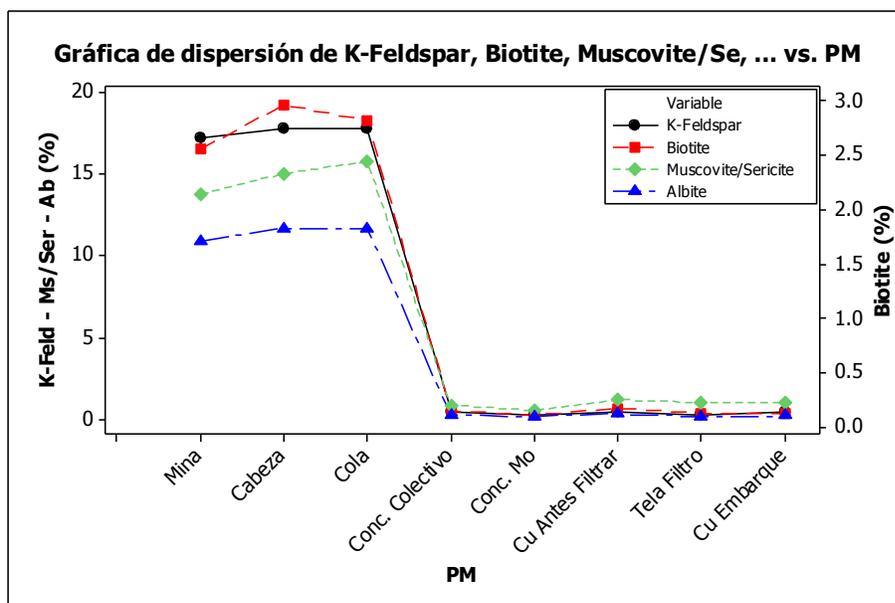


Figura 20. Evolución del feldespato potásico, la albita, la muscovita/sericita y biotita a lo largo del proceso.

La plagioclasa tiene la concentración más alta en la muestra P3, indicando que se va del proceso hacia el tranque de relaves, lo mismo sucede con la clorita y el rutilo. Estos minerales tienen concentraciones entre 0% y 0.1% en el resto del proceso (Figura 21).

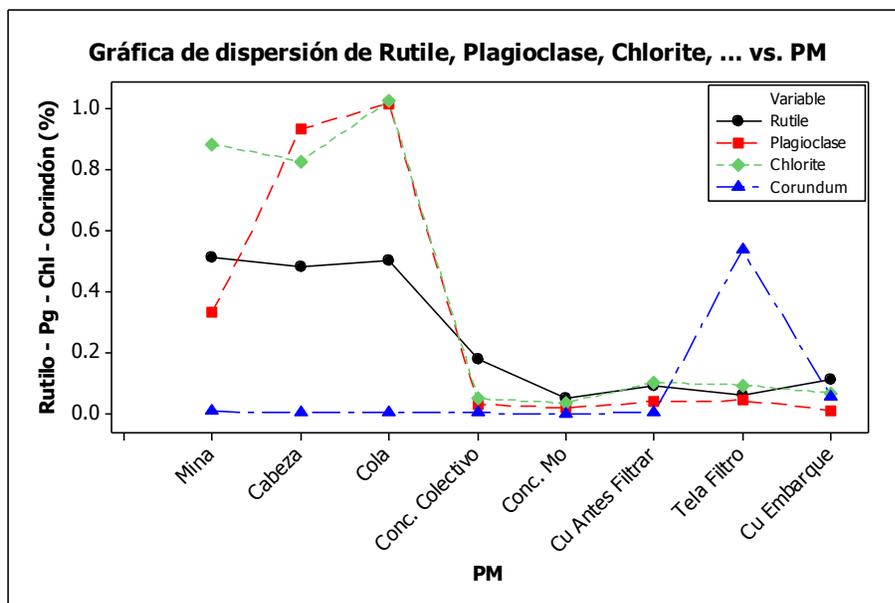


Figura 21. Evolución del rutilo, plagioclasa, clorita y corindón a lo largo del proceso.

La calcita que había presente en la muestra de alimentación de flotación (P2) se va mayoritariamente al tranque de relave y no sufre variaciones en el resto del proceso estando en torno al 0% (Figura 27).

## II. Minerales que aumentan su concentración desde la muestra P4.

La calcopirita, que ronda el 2.7% en las muestras P1 y P2, aumenta desde la muestra P4 hasta 70% y se mantiene en esa concentración, a excepción en la muestra P5, donde disminuye al 50%. En el material que va al tranque de relaves se registra una concentración de 0.42% (Figura 22).

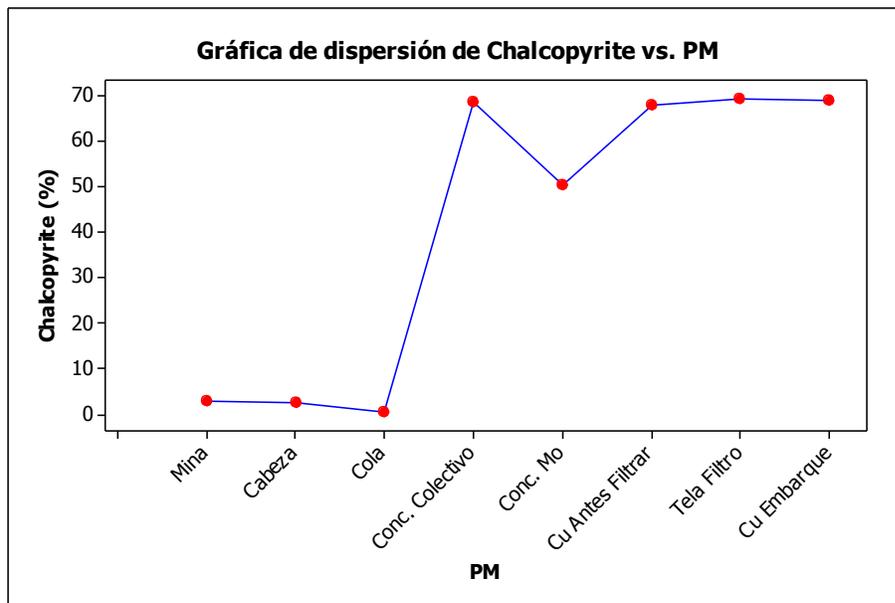


Figura 22. Evolución de la calcopirita a lo largo del proceso.

La cuprita tiene poca concentración en las muestras P1 (mina), P2 (cabeza) y P3 (cola), luego su concentración aumenta en las etapas subsiguientes, pero no se observa una relación entre concentración y etapa del proceso (Figura 26).

La calcosita/covelina aumenta levemente su concentración desde la muestra P4 hasta P8, sin embargo, la concentración en P1 y P2 es menor y aún más en P3 (Figura 23).

La bornita tiene una concentración menor a 0.5% en las muestras de la mina y alimentación, al tranque de relaves se va 0.02% y se logra concentrar a 9% en la muestra P4, luego disminuye su concentración en el concentrado de Mo para después aumentar hasta 9% en promedio en las etapas siguientes (Figura 23).

La pirrotina, con muy baja concentración en las muestras P1 a P3, se mantiene casi constante en torno al 0.1% en las muestras P4 a P8 (Figura 26).

La pirita presente en las muestras P1 y P2 se va en gran parte en el tranque de relaves, pasa de 2.68%-1.89% a 1.31% respectivamente. Desde el concentrado colectivo en adelante el comportamiento es tendiente a aumentar su proporción en la muestra, sin embargo, en el concentrado de Mo se observa una disminución de la concentración comparada con la etapa anterior y posterior (Figura 23).

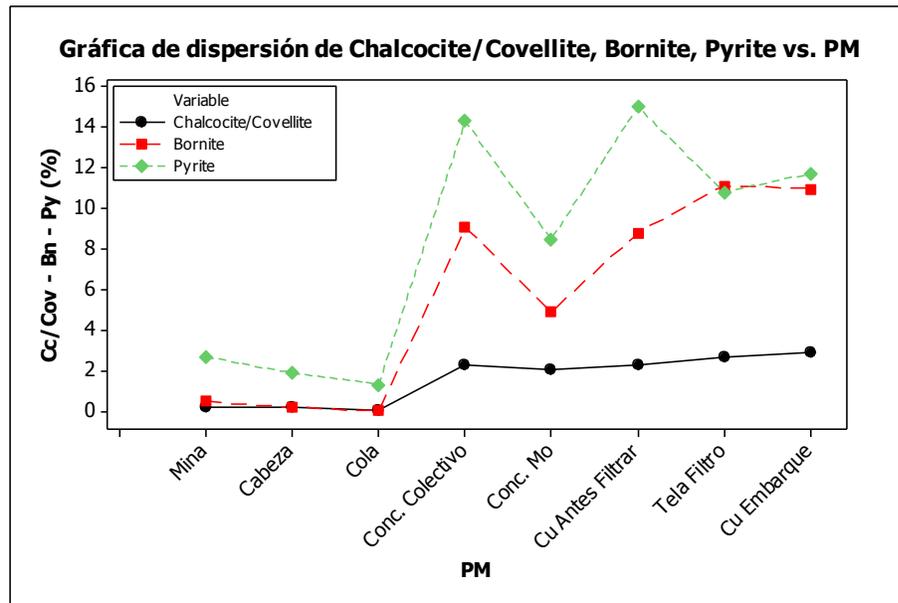
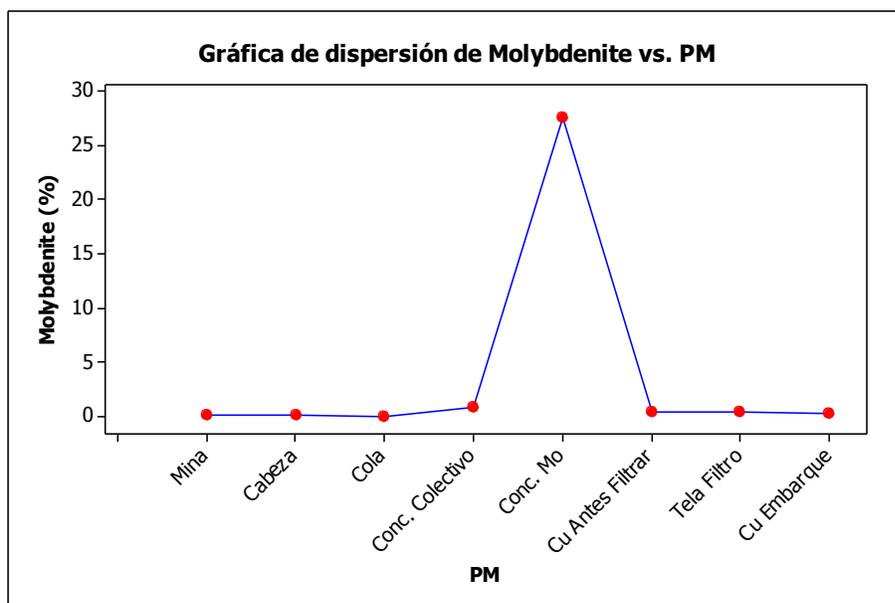


Figura 23. Evolución de la calcosina/covelina, pirita y bornita a lo largo del proceso.

### III. Minerales que su mayor concentración se encuentra en la muestra P5.

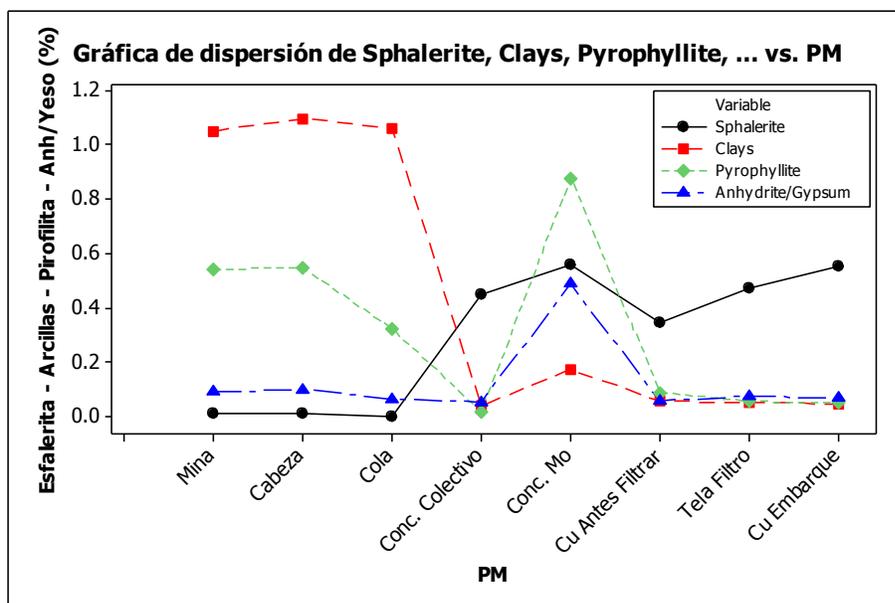
La molibdenita se concentra notoriamente en la muestra P5 correspondiente al concentrado Rougher de Mo, pasa de 0.03% aproximadamente en las muestras P1 y P2 a 0.86% en la muestra P4 y 28% en la muestra P5, luego en el concentrado de Cu se observan concentraciones rondando el 0.3% (Figura 24).



**Figura 24. Evolución de la molibdenita a lo largo del proceso.**

Las arcillas tienen una concentración sobre un 1% en la mina y en el material que se va al tranque de relaves (P3). Se produce un aumento desde 0.04% en el concentrado colectivo a 0.17% en el concentrado de Mo (Figura 25).

La anhidrita/yeso aumenta su concentración de aproximadamente 0.1% en las etapas previas a 0.5% en el concentrado de Mo (Figura 25).



**Figura 25. Evolución de la esfalerita, arcillas, pirofilita y anhidrita/yeso a lo largo del proceso.**

La pirofilita tiene un 0.55% de concentración en la alimentación de flotación, en el concentrado colectivo 0.02% para luego aumentar a 0.88% en el concentrado de Mo (Figura 25).

El apatito en el concentrado colectivo es menor al que se encuentra en las muestras P1 y P2, pasando de un 0.21% a 0.1%. En el concentrado de Mo aumenta hasta un 0.17% (Figura 27).

La enargita es casi inexistente en los puntos P1, P2 y P3. En el concentrado colectivo su concentración comienza a aumentar para llegar al máximo en el concentrado de Mo (0.7%) y posteriormente disminuir a 0.3% para luego alcanzar 0.48% en el concentrado de Cu a embarque (Figura 26).

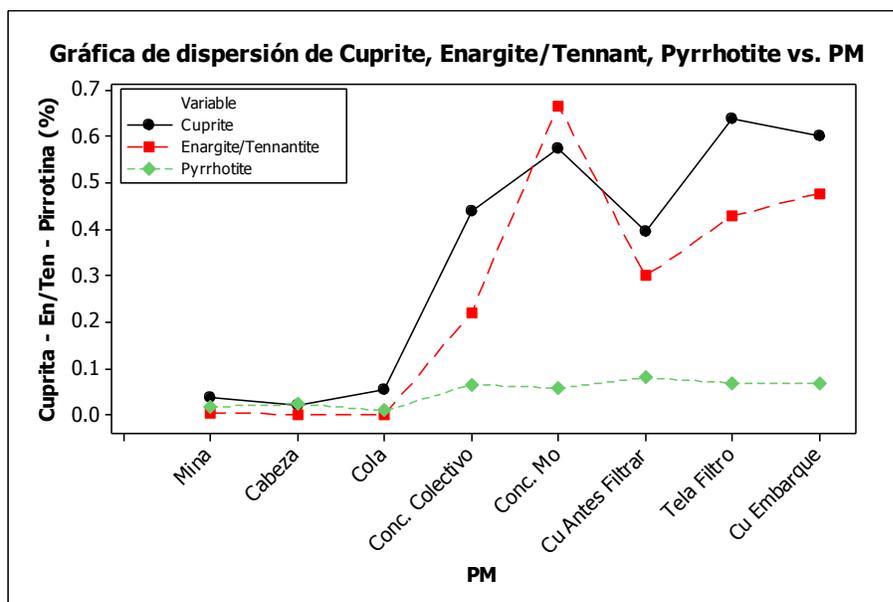


Figura 26. Evolución de la cuprita, enargita/tenantita y pirrotina a lo largo del proceso.

#### IV. Minerales que tienen otro comportamiento.

La concentración de corindón es bajísima durante todo el proceso, entre 0 y 0.01%, sin embargo se registra una concentración de 0.56% en la muestra P7 (tela de filtros) y 0.06% en el concentrado a embarque (Figura 21).

La concentración de zircón es baja en todo el proceso, sin embargo se nota un leve aumento en P6 correspondiente al concentrado antes de filtrar (Figura 27).

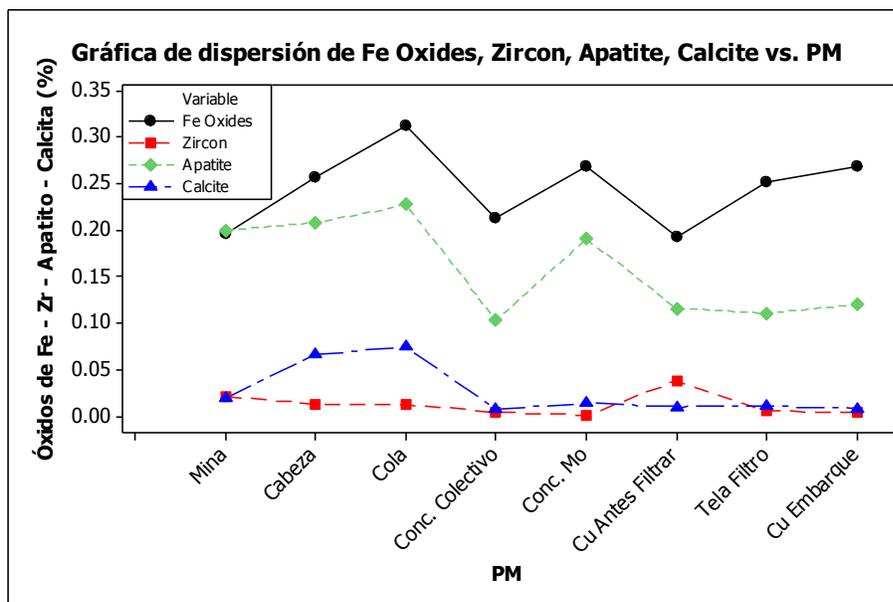


Figura 27. Evolución de los óxidos de Fe, zircón, apatito y calcita a lo largo del proceso.

Los minerales agrupados en “Fe Oxides” se van en el material hacia el tranque de relave (P3) donde se observa la mayor concentración (0.33%), posteriormente se produce un alza de la concentración en P5, P7 y P8 estando en torno al 0.27% y los puntos más bajos son el del concentrado colectivo y el concentrado de Cu antes de filtrar (Figura 27).

La esfalerita tiene una concentración de 0.01 en las muestras de mina y alimentación, no se va nada en relave y posteriormente se observan concentración en torno al 0.5% (Figura 25).

### 5.2.5.2 Liberación de sulfuros de Cu y granulometría

Qemscan entrega imágenes en colores falsos con las partículas de sulfuros de cobre separadas por granulometría y nivel de liberación. En estas imágenes es posible observar que ganga acompaña a los sulfuros de cobre cuando no están completamente liberados.

En la muestra de la mina (Figura 28), se tienen sulfuros de cobre liberado principalmente en el menor tamaño de grano, las partículas mayores de bornita están asociadas a calcopirita. Los niveles de liberación intermedio muestran en su mayoría un tamaño de grano pequeño y algunos granos mayores, sobre #65. Para la fracción no liberada, tenemos asociaciones de cuarzo-muscovita/sericita, pirofilita-arcillas, pirita-cuarzo, muscovita/sericita, cuarzo, clorita-biotita y feldespato potásico. El sulfuro de Cu que aparece junto a estas asociaciones es la calcopirita.

Para el caso de las muestras de las tres líneas de alimentación (Figura 29, Figura 30, Figura 31), es posible observar como los sulfuros de cobre liberados corresponden principalmente a calcopirita y bornita, estando esta última presente en la fracción más fina y en tamaños mayores en asociación con la calcopirita. Los grados de liberación intermedios se encuentran en la fracción más fina principalmente, apareciendo unos granos más grandes, para el rango 20% de liberación, asociados a pirita, cuarzo, muscovita/sericita y albita, siendo la calcopirita el sulfuro predominante. Por su parte los sulfuros no liberados corresponden a calcopirita asociada a cuarzo, muscovita/sericita, feldespato potásico, plagioclasa-biotita, cuarzo-muscovita/sericita y albita.

El Cu que se va en el relave corresponde en los menores tamaños a cobre libre (sulfuros de Cu liberados), donde también se observa molibdenita (Figura 32). A tamaños mayores se ve que es calcopirita menos liberada y asociada a minerales como sericita y cuarzo. En el caso de sulfuros no liberados se observan en todas las clases de tamaños, asociados a cuarzo, sericita, albita, pirita, plagioclasa, clorita, feldespato potásico, biotita.

En la muestra de concentrado colectivo (Figura 33), el cobre no liberado, corresponde principalmente a calcopirita asociada a pirita, sericita, cuarzo, albita y esfalerita en todas las fracciones de tamaño. En niveles de liberación superiores se tienen los mismos minerales, más apatito y rutilo, también asociado a la calcopirita. La esfalerita se ve asociada tanto a calcopirita como bornita.

En el concentrado Rougher de Mo los sulfuros no liberados están asociados principalmente a molibdenita (Figura 34), la cual se observa en la fracción de tamaño más pequeña para todos los niveles de liberación. Es posible notar la presencia de pirita y pirofilita asociada a sulfuros de Cu.

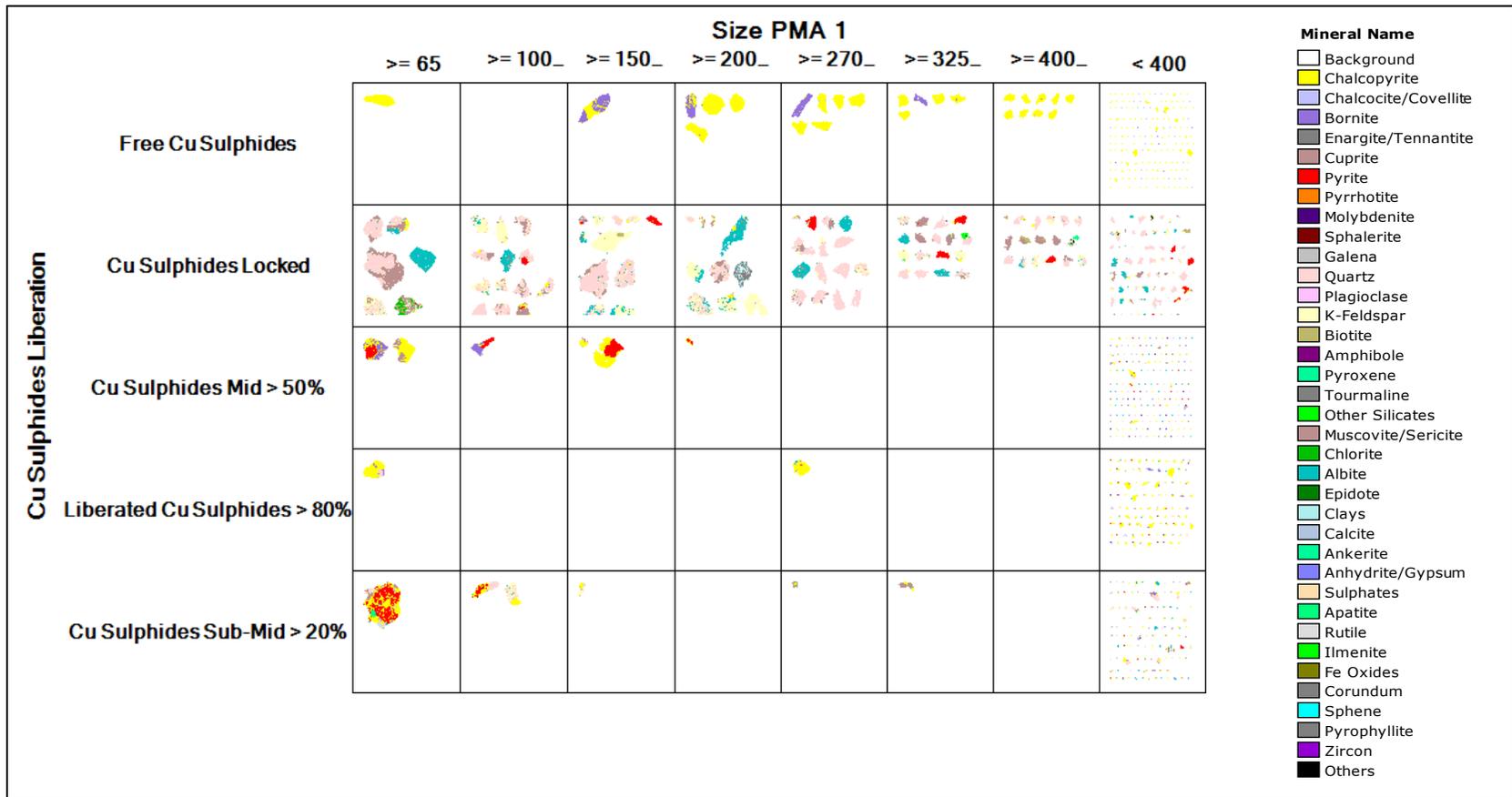


Figura 28. Imagen generada por Qemscam indicando las asociaciones de los sulfuros de cobre según grado de liberación y tamaño de grano para la muestra de los frentes de carguío (P1).

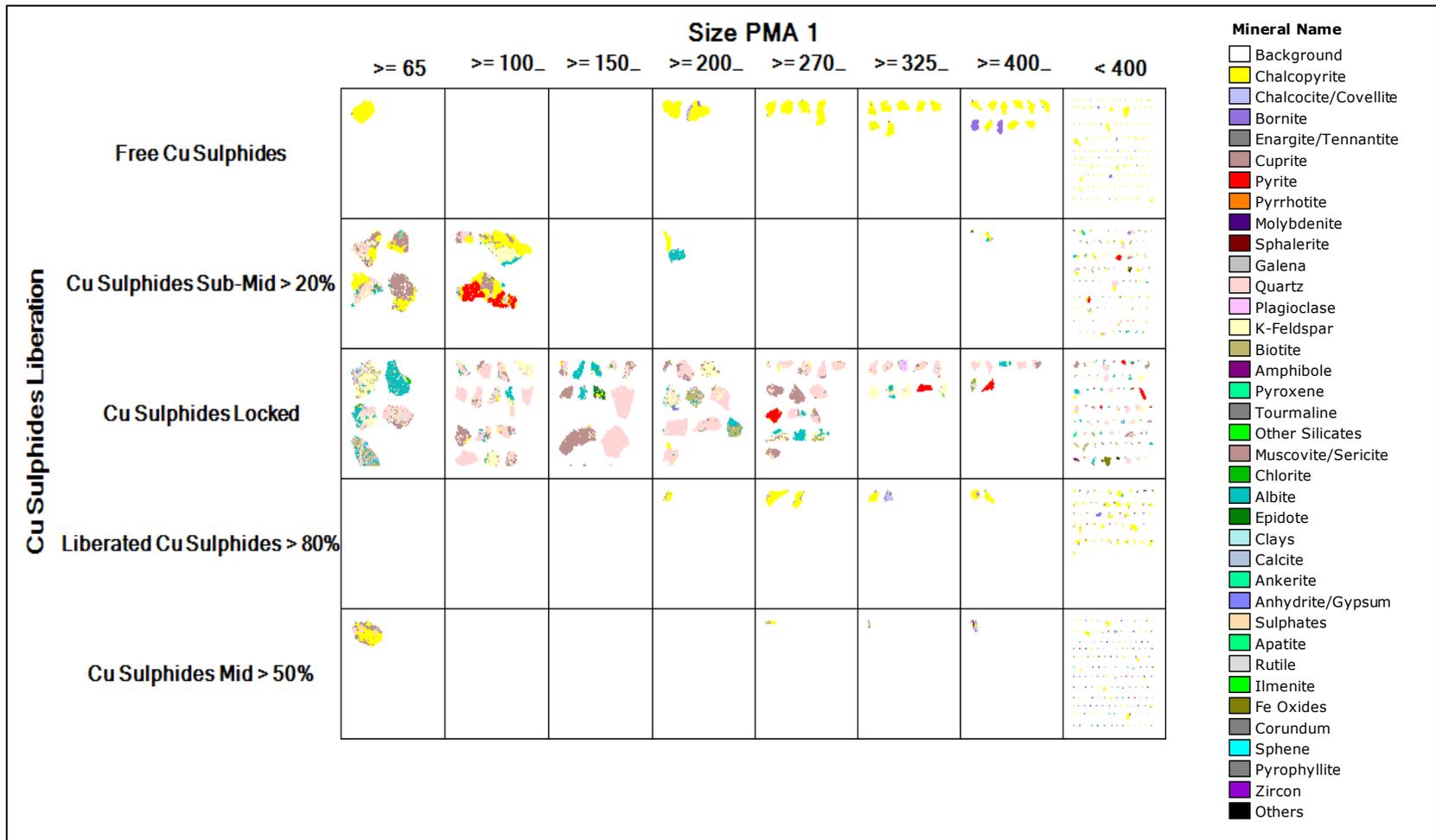


Figura 29. Imagen generada por Qemscan indicando las asociaciones de los sulfuros de cobre según grado de liberación y tamaño de grano para la muestra de la línea 1 de molienda para alimentación de flotación.

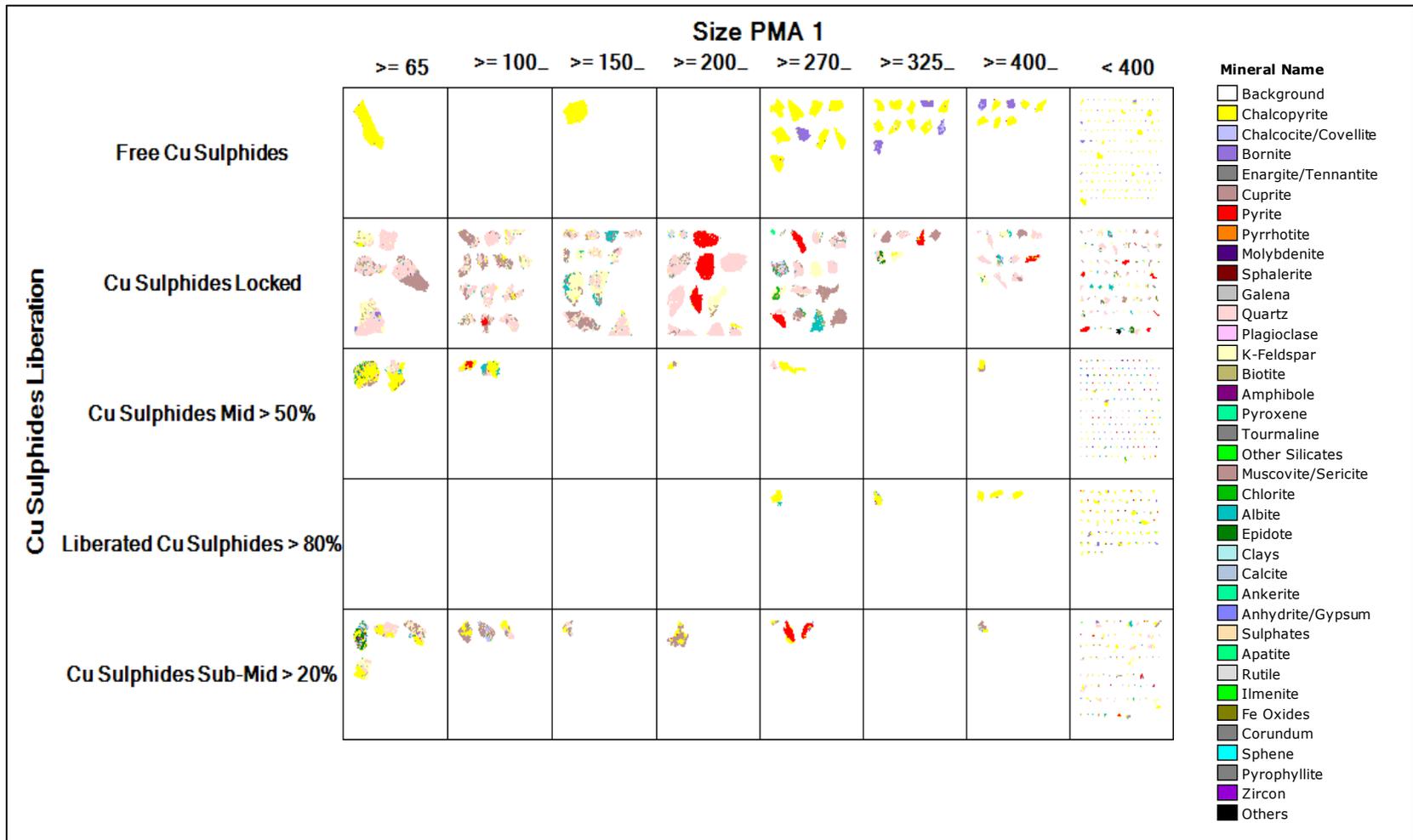


Figura 30. Imagen generada por Qemscan indicando las asociaciones de los sulfuros de cobre según grado de liberación y tamaño de grano para la muestra de la línea 2 de molienda para alimentación de flotación.

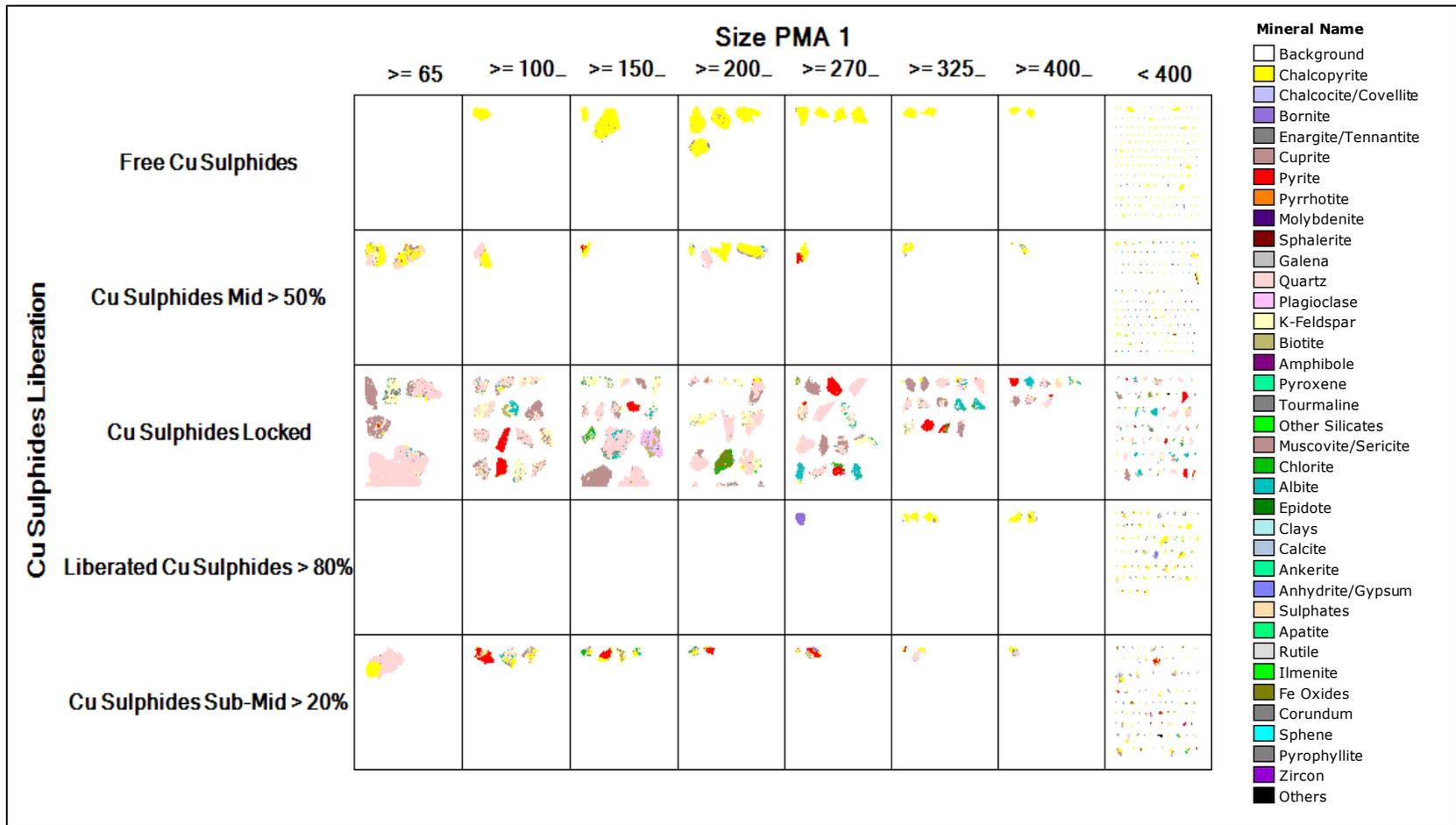


Figura 31. Imagen generada por Qemscam indicando las asociaciones de los sulfuros de cobre según grado de liberación y tamaño de grano para la muestra de la línea 3 de molienda para alimentación de flotación.

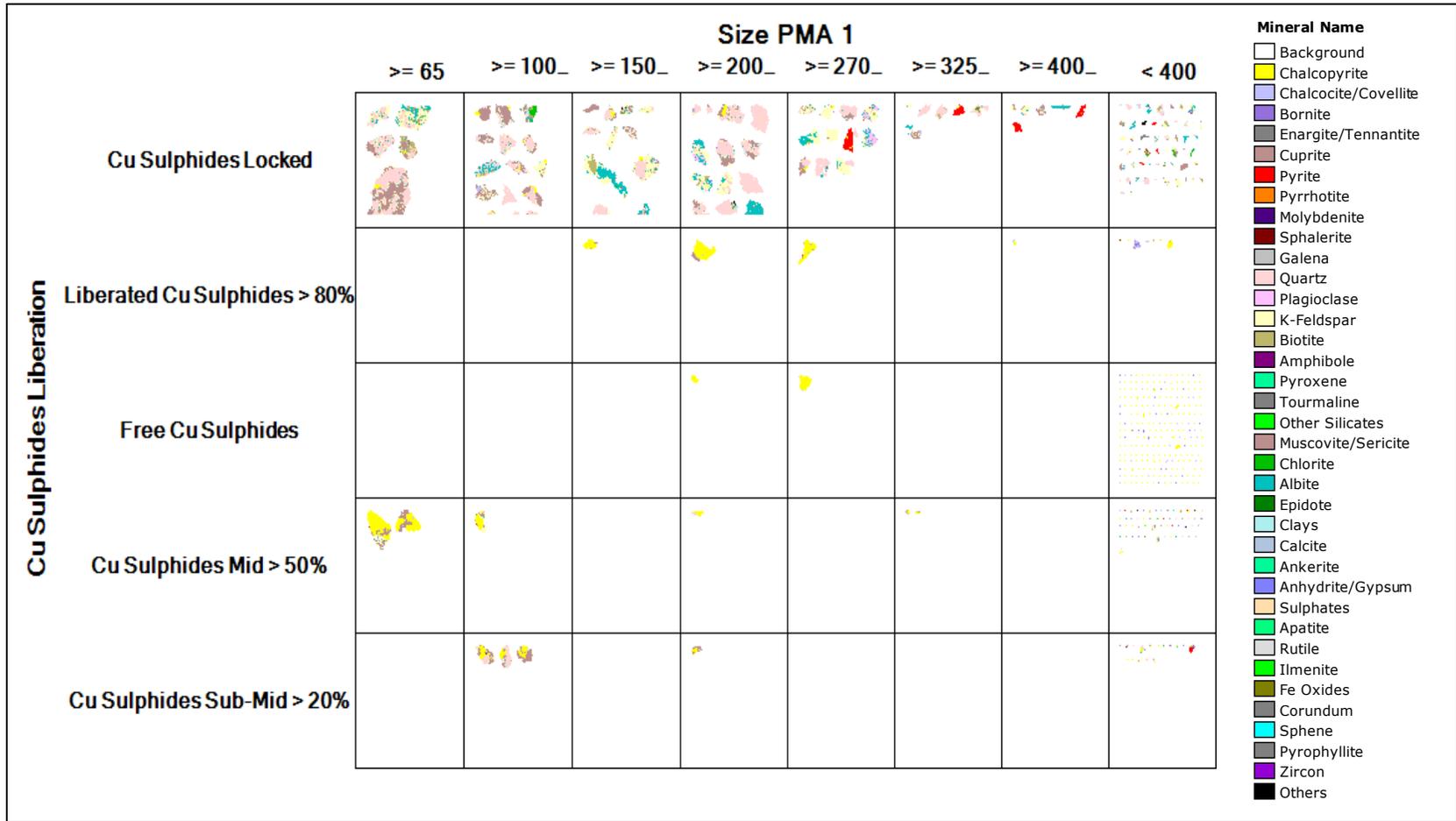


Figura 32. Imagen generada por Qemscam indicando las asociaciones de los sulfuros de cobre según grado de liberación y tamaño de grano para la muestra del material que va al tranque de relaves (P3).

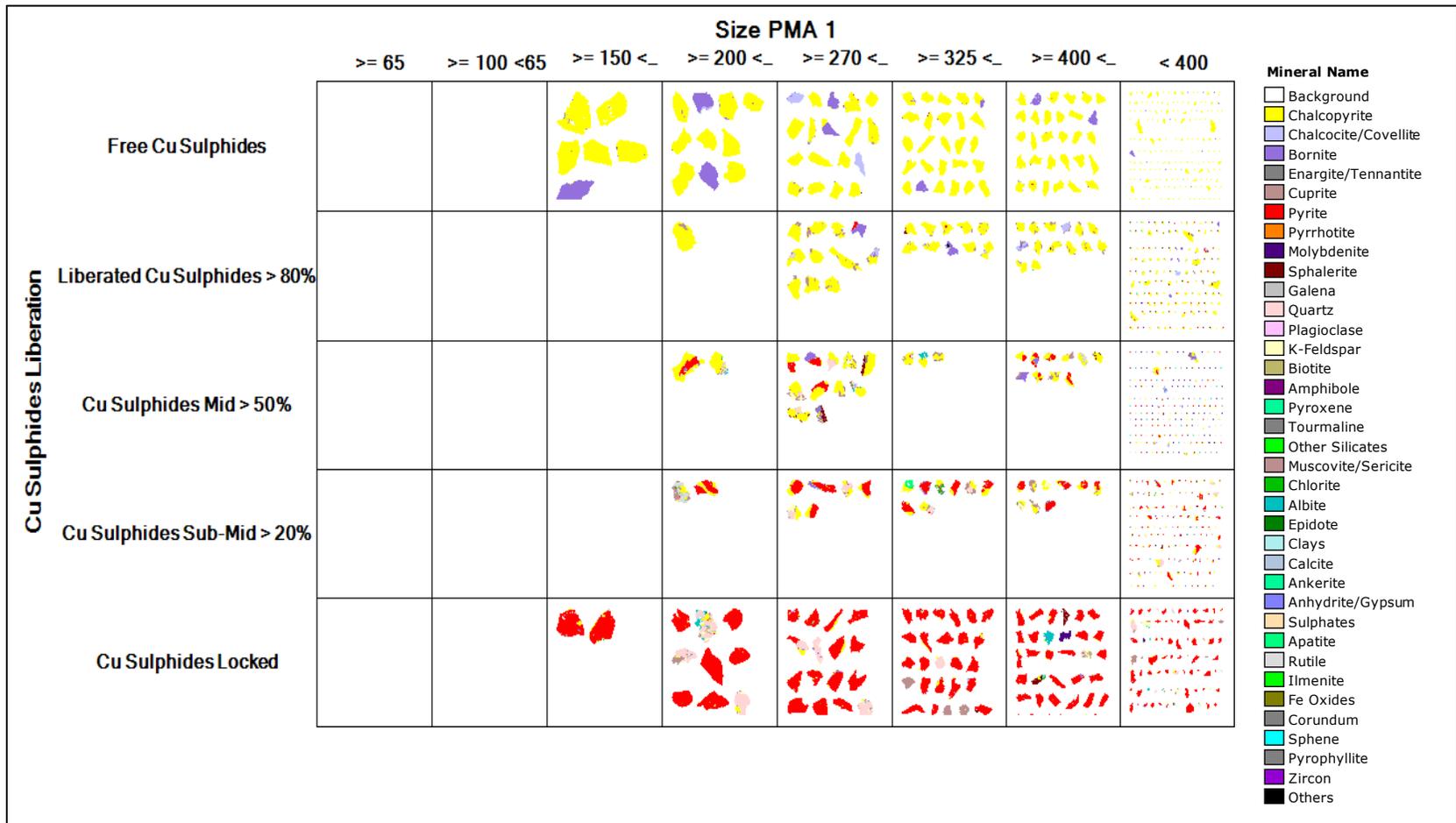


Figura 33. Imagen generada por Qemscam indicando las asociaciones de los sulfuros de cobre según grado de liberación y tamaño de grano para la muestra de concentrado colectivo (P4).

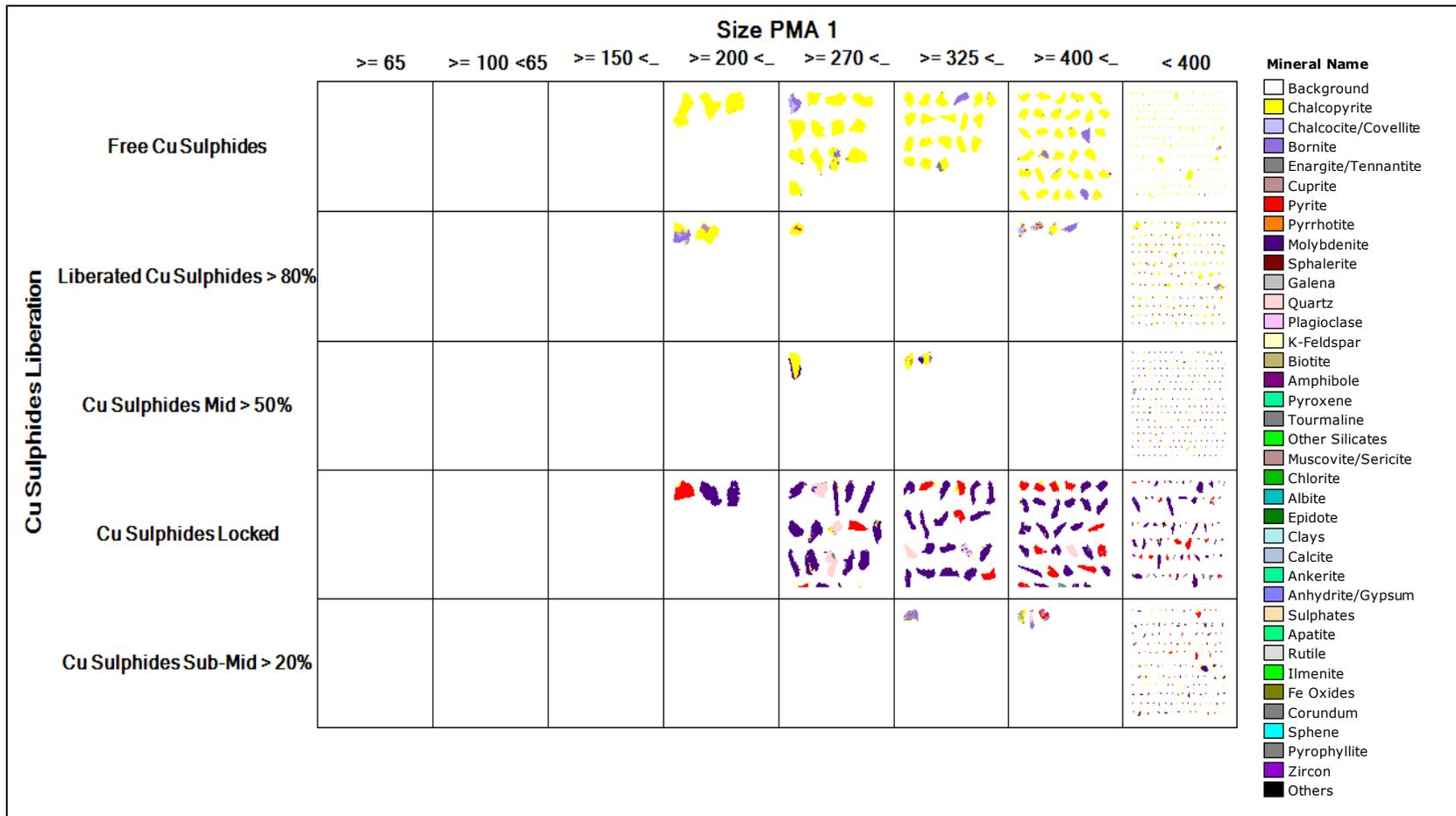


Figura 34. Imagen generada por Qemscam indicando las asociaciones de los sulfuros de cobre según grado de liberación y tamaño de grano para la muestra de concentrado Rougher de molibdeno (P5).

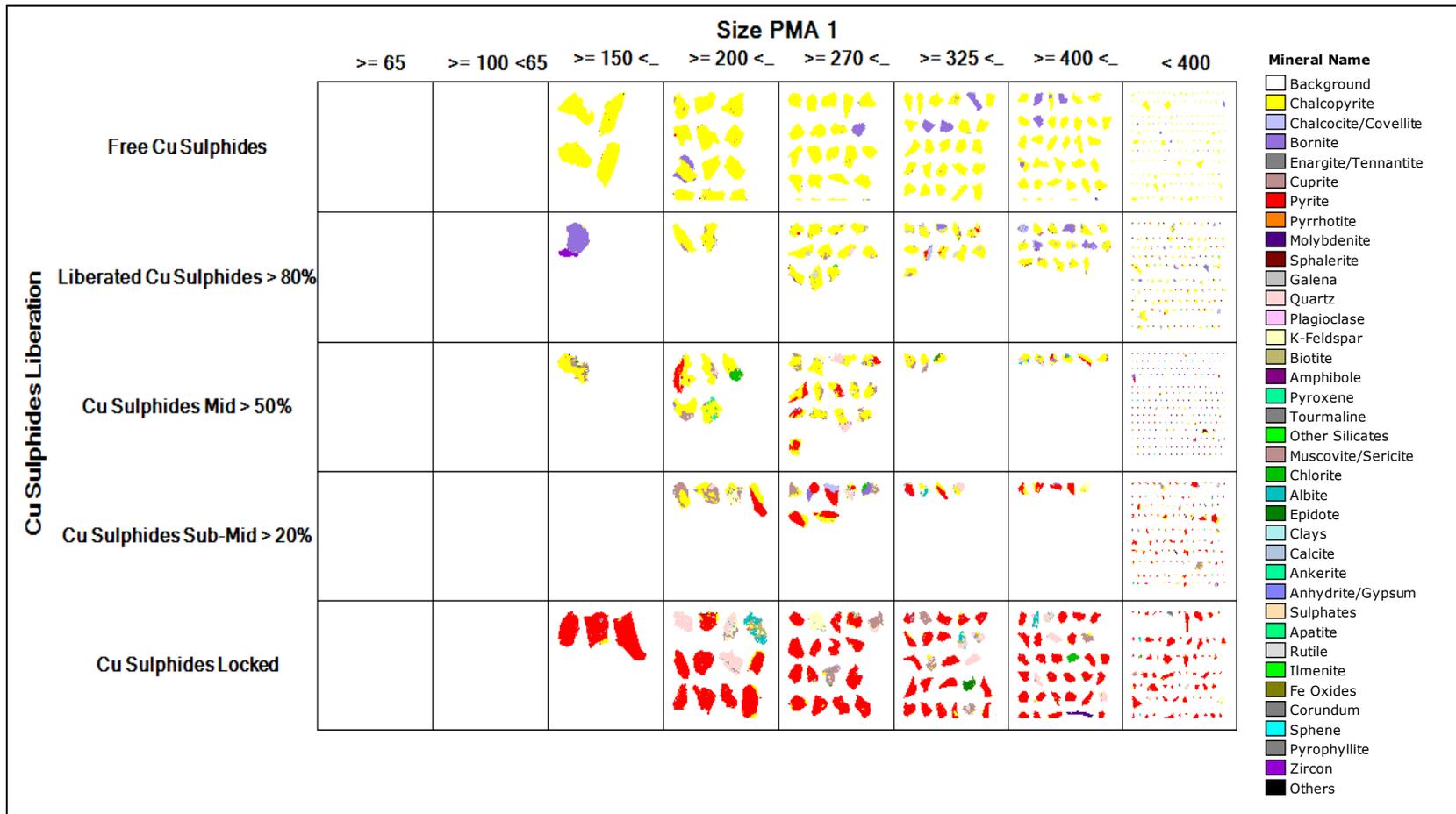


Figura 35. Imagen generada por Qemscam indicando las asociaciones de los sulfuros de cobre según grado de liberación y tamaño de grano para la muestra de concentrado de Cu antes de filtrar (P6).

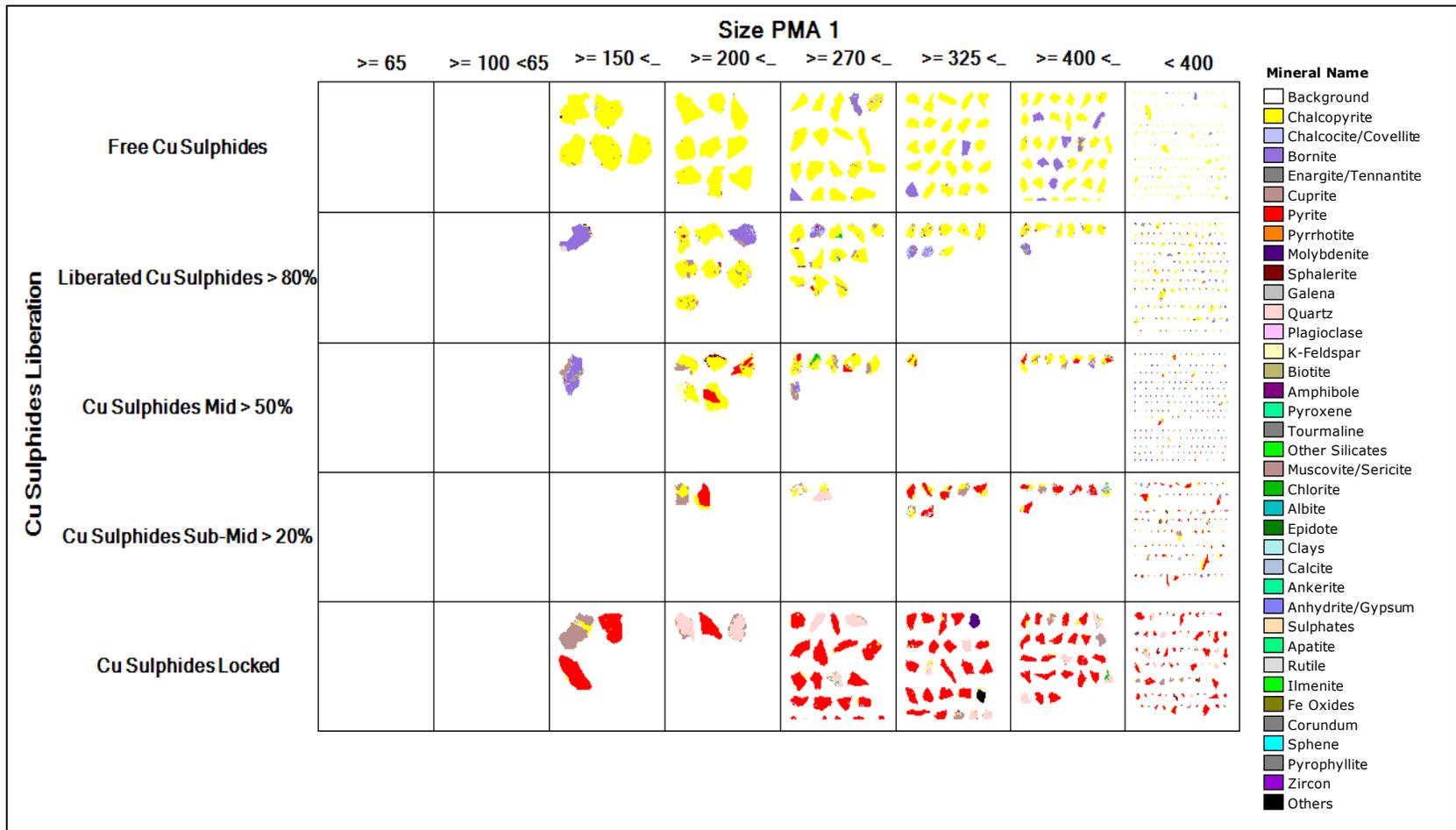


Figura 36. Imagen generada por Qemscam indicando las asociaciones de los sulfuros de cobre según grado de liberación y tamaño de grano para la muestra de las telas de filtro (P7).

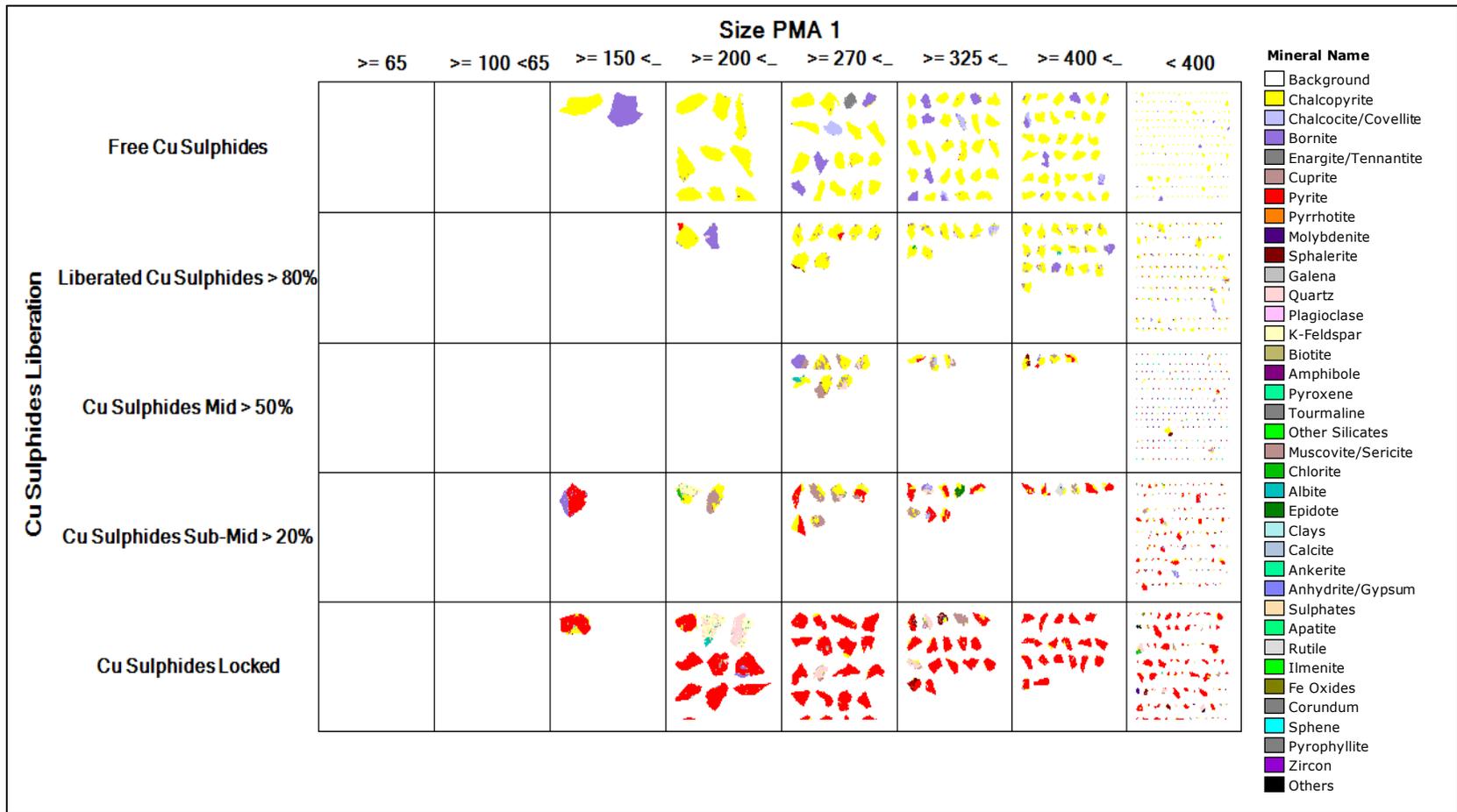


Figura 37. Imagen generada por Qemscam indicando las asociaciones de los sulfuros de cobre según grado de liberación y tamaño de grano para la muestra de concentrado de Cu que se va a embarque (P8).

En el concentrado de Cu antes de filtrar los sulfuros liberados corresponden a calcopirita, bornita y menor calcosina/covelina. Se observan asociaciones de calcopirita-bornita, bornita-calcosina/covelina en la fracción correspondiente a 80% de liberación, junto a pirita, cuarzo, clorita, pero muy escasos. Los sulfuros sin liberar y hasta 50% de liberación corresponden en gran medida a calcopirita aunque es posible observar bornita-pirita y calcosina/covelina-pirita; la ganga además es clorita, cuarzo, muscovita/sericita, apatito, albita. En los menores tamaños de grano es posible observar esfalerita asociada a calcopirita y molibdenita (Figura 35).

La muestra correspondiente al concentrado de Cu en la tela de filtro presenta calcopirita y bornita como principales sulfuros de Cu liberados. La calcosina/covelina se asocia con bornita en la sección de 80% de liberación y la ganga es principalmente muscovita/sericita. Para las fracciones de liberación restantes se observa que es la pirita el principal mineral de ganga. Además se observa muscovita/sericita-cuarzo, muscovita/sericita, cuarzo, clorita y arcillas-pirita. En la fracción de menor tamaño se observa la presencia de molibdenita y esfalerita junto a calcopirita (Figura 36).

En el concentrado de cobre al embarque, se observa que para los sulfuros liberados y con 80% de liberación la principal especie es calcopirita, seguido de bornita que se encuentra en asociación con calcosina/covelina. También se aprecia enargita/tennantita. Las poblaciones con menor y nula liberación están asociadas a minerales como pirita, pirita-esfalerita, rutilo, esfalerita, cuarzo, muscovita/sericita y corresponden en su gran mayoría a calcopirita. También hay bornita y calcosina/covelina. En la fracción de menor tamaño, se observa la presencia de molibdenita y esfalerita (Figura 37).

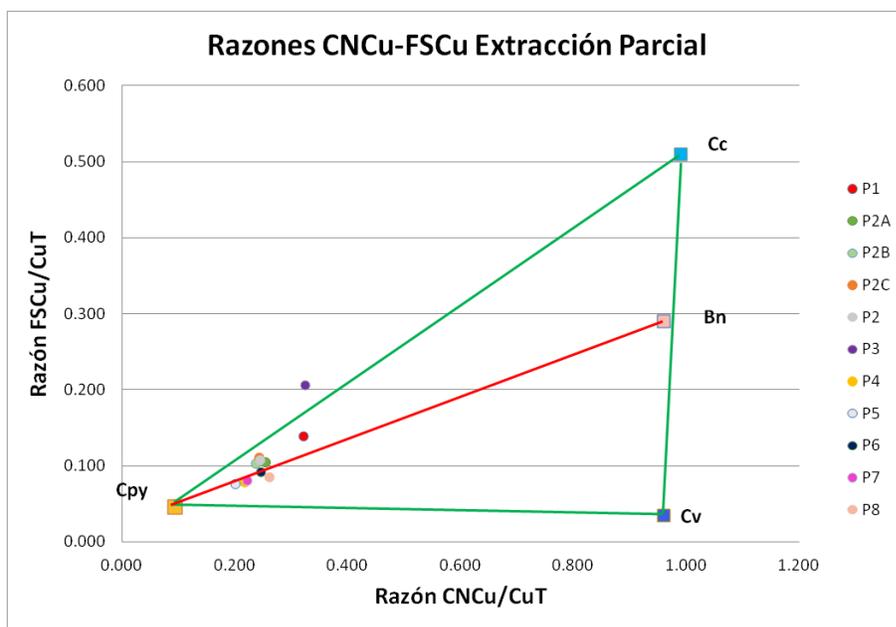
### **5.2.6 Extracción Parcial**

Para el cálculo de la mineralogía según extracción parcial se utilizó la planilla Excel con que cuenta la compañía. Se ingresaron los datos de cobre total (TCu ó CuT), FSCu, CNCu, S<sup>2-</sup>, S, Fe, TFe (hierro total), As y CuS. Con esto se obtuvieron las razones CNCu/TCu y FSCu/CuT y los CSP de la calcopirita y la bornita. Los valores de P2 se obtuvieron ponderando las muestras P2A, P2B y P2C por 0.22, 0.16 y 0.62 respectivamente. Todo lo anterior esta resumido en Tabla 10.

**Tabla 10. Parámetros utilizados y resultados obtenidos para la extracción parcial.**

Muestra	TCu (%)	FSCu (%)	CNCu (%)	S2 (%)	S (%)	Fe (%)	CuS (%)	As (%)	T Fe (%)	CNCu/TCu	FSCu/CuT	CSP Cpy	CSP Bn
P1	1.17	0.16	0.38	1.95	2.06	2.59	0.06	0.0004	2.59	0.32	0.14	0.86	0.31
P2A	1.01	0.11	0.26	1.54	1.56	2.00	0.06	0.0005	2.00	0.25	0.10	0.80	0.20
P2B	1.11	0.11	0.26	1.77	1.76	2.14	0.07	0.0004	2.14	0.24	0.10	0.90	0.20
P2C	1.00	0.11	0.25	1.73	1.69	2.24	0.08	0.0011	2.24	0.24	0.11	0.81	0.19
P2	1.02	0.11	0.25	1.69	1.67	2.17	0.07	0.0009	2.17	1.02	0.11	0.82	0.19
P3	0.17	0.03	0.05	0.78	0.77	1.43	0.02	0.0002	1.43	0.33	0.21	0.12	0.04
P4	30.17	2.38	6.63	34.10	34.60	24.91	0.62	0.0243	24.91	0.22	0.08	25.17	4.94
P5	22.11	1.68	4.50	33.10	34.00	18.31	0.57	0.0327	18.31	0.20	0.08	18.79	3.24
P6	31.46	2.89	7.80	33.50	34.10	24.89	0.71	0.0389	24.89	0.25	0.09	25.34	6.02
P7	29.84	2.41	6.67	34.30	34.00	25.60	0.78	0.0328	25.60	0.22	0.08	24.77	4.99
P8	31.40	2.69	8.26	33.40	33.80	23.39	0.67	0.0316	23.39	0.26	0.09	24.83	6.49

Las razones de extracciones limitantes fueron graficadas para determinar visualmente la mineralogía de las muestras. En este gráfico (Figura 38) se observa como la gran mayoría de las muestras se acercan al extremo de la calcopirita sobre la línea que une la calcopirita con la bornita, denotando su naturaleza hipóxena.



**Figura 38. Gráfico de razones de extracción limitante.**

La muestra P3 se escapa del triángulo, y según la experiencia de la compañía, esto podría deberse a la presencia de óxidos de Cu en esa muestra, o bien, que los sulfuros se encuentren oxidados. La muestra P1 que se encuentra alejada del resto de las muestras, más cercana a la bornita, indicaría mayor concentración de este mineral dentro de la misma.

Con los valores de CSP para calcopirita y bornita es posible conocer la concentración de cada mineral en la muestra dividiendo este valor por la cantidad de Cu contenido en cada uno, 34.6% en la calcopirita y 63.6% en la bornita. La Tabla 11 muestra el resultado de hacer este ejercicio.

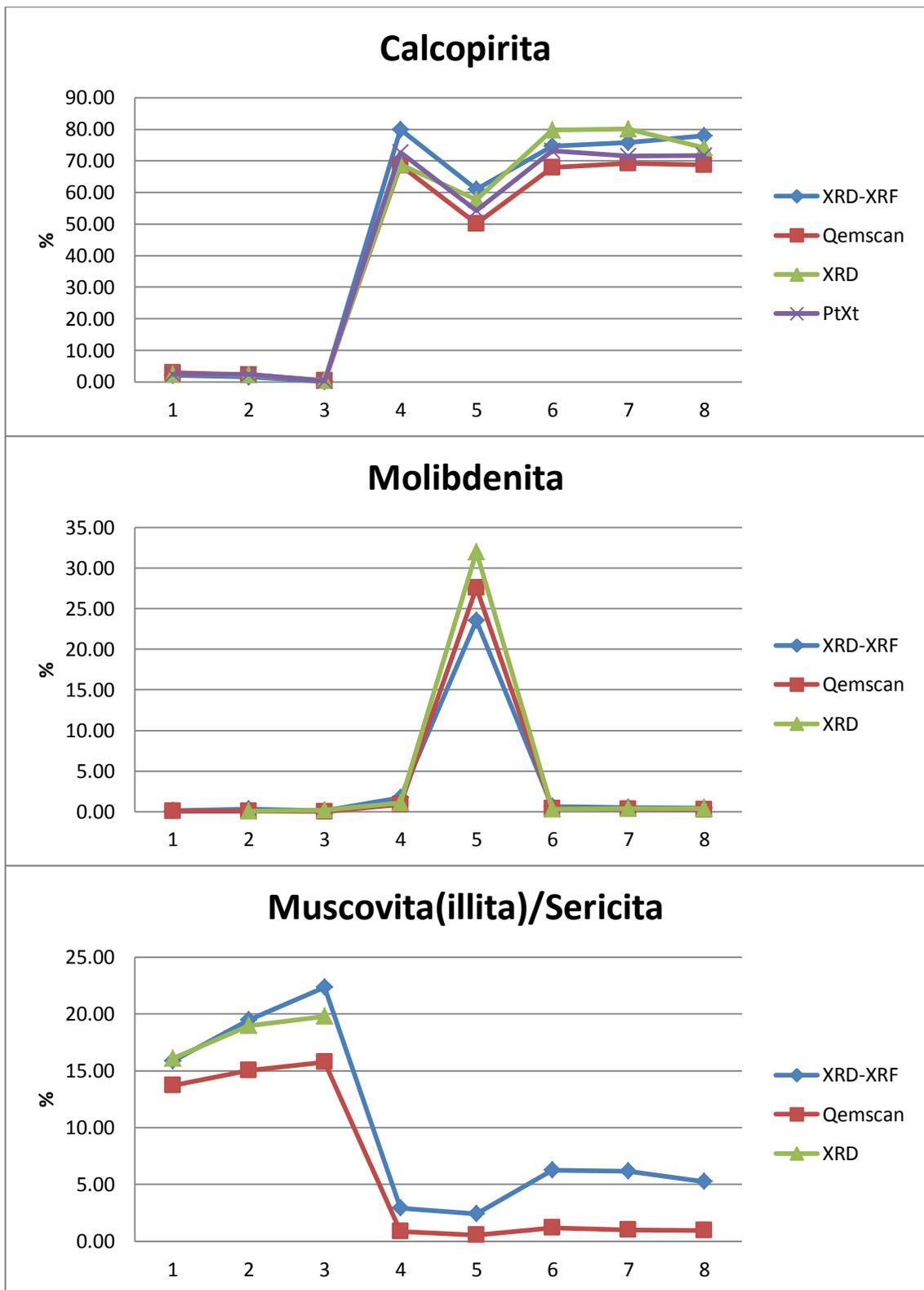
**Tabla 11. Porcentaje de calcopirita y bornita en las muestras según técnica de extracción parcial.**

<b>Muestra</b>	<b>CSP Cpy</b>	<b>CSP Bn</b>	<b>Cpy %</b>	<b>Bn %</b>
<b>P1</b>	0.86	0.31	2.48	0.49
<b>P2</b>	0.82	0.19	2.38	0.3
<b>P3</b>	0.12	0.04	0.35	0.07
<b>P4</b>	25.17	4.94	72.73	7.77
<b>P5</b>	18.79	3.24	54.31	5.09
<b>P6</b>	25.34	6.02	73.24	9.46
<b>P7</b>	24.77	4.99	71.59	7.84
<b>P8</b>	24.83	6.49	71.76	10.21

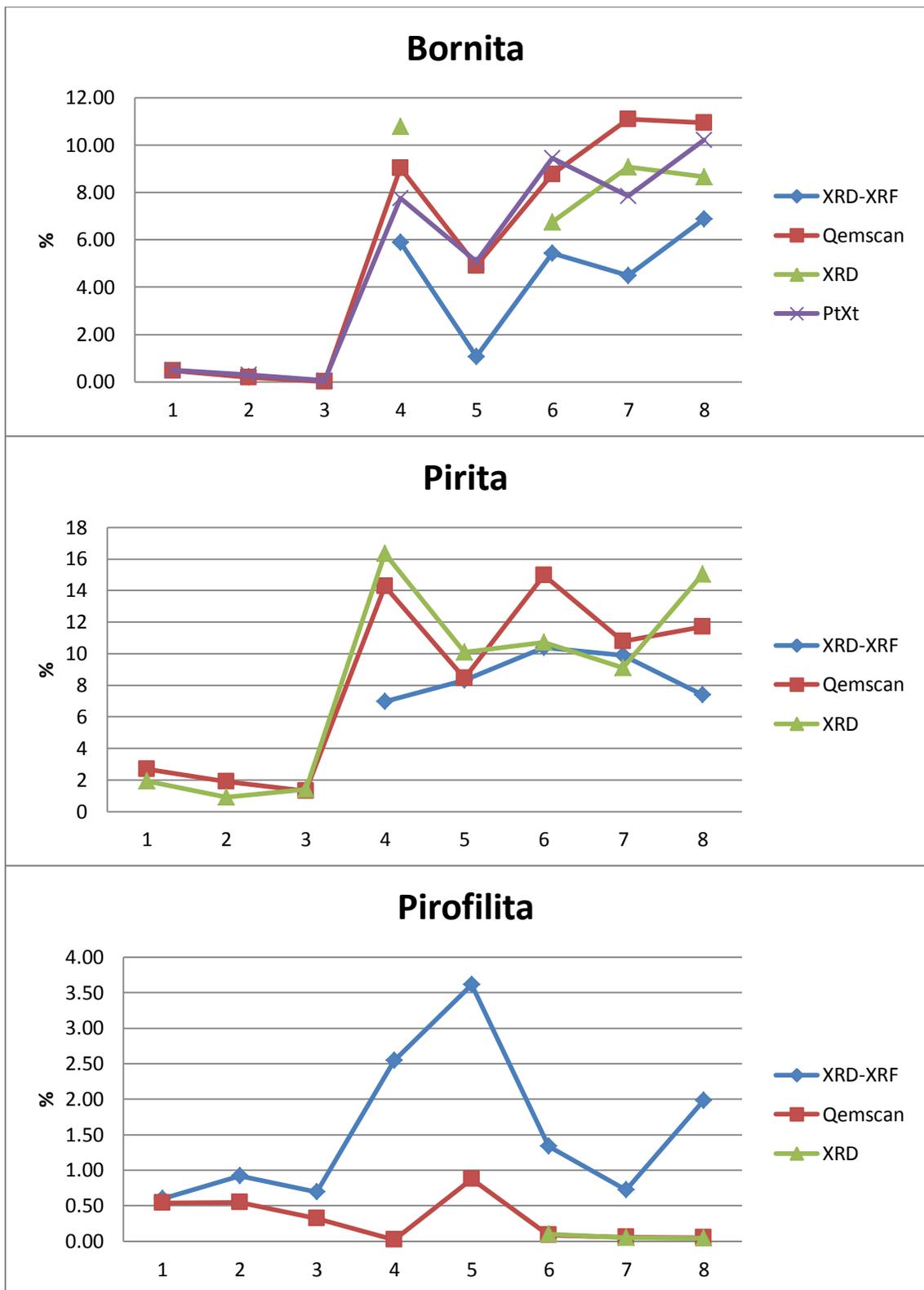
En la Tabla 11 se observa como el porcentaje de calcopirita y bornita aumenta desde la muestra de concentrado colectivo (P4) hasta la del concentrado a embarque (P8) disminuyendo en el concentrado Rougher de Mo (P5). También es posible notar que una baja proporción de estos sulfuros se va al tranque de relaves (P3).

### **5.2.7 Comparación de Resultados Entre las Diferentes Técnicas**

Se graficaron las concentraciones a lo largo del proceso productivo para la calcopirita, bornita, molibdenita, pirita, pirofilita y muscovita (illita)/sericita determinadas por cada una de las técnicas utilizadas. Se encontró que la concentración (Figura 39) de la calcopirita, molibdenita y muscovita (illita)/sericita tiene el mismo comportamiento independientemente de la técnica utilizada. Para el caso de la bornita y la pirita (Figura 40), el Qemscan es la única técnica que entrega valores en todas las etapas muestreadas, dejando en manifiesto su mejor resolución para menores concentraciones. El caso donde se observan mayores diferencias es con la pirofilita (Figura 40), puesto que el XRD entrega valores mayores a los del Qemscan en todas las etapas. Con base en lo mencionado en el presente párrafo, se eligieron los datos entregados por Qemscan para realizar los análisis al comportamiento de los minerales.



**Figura 39.** Concentraciones en cada etapa del proceso productivo según difracción de rayos X (XRD), técnica mixta de fluorescencia y difracción de rayos X (XRD-XRF), Qemscan y extracción parcial (PtXt) para la calcopirita (arriba), la molibdenita (al centro) y la muscovita (illita)/sericita (abajo).



**Figura 40.** Concentraciones en cada etapa del proceso productivo según difracción de rayos X (XRD), técnica mixta de fluorescencia y difracción de rayos X (XRD-XRF), Qemscan y extracción parcial (PtXt) para la bornita (arriba), la pirita (al centro) y la pirofilita (abajo).

## 6. Discusiones

### 6.1 Determinación de comportamientos esperados y no esperados.

Lo que se espera del proceso en líneas generales, es que la ganga, en su mayoría, se vaya en el tranque de relaves (P3), y no vuelva a aumentar a lo largo del proceso y que aumente la concentración de menas en el concentrado colectivo (P4) y que en el concentrado Rougher de Mo (P5) aumente la concentración de molibdenita y disminuya la concentración de menas de Cu. El proceso de filtrado solo busca quitar agua al concentrado de Cu, por lo que la muestra de concentrado de Cu antes de filtrar debiese ser igual a la muestra de concentrado de Cu al embarque (P8).

Con base en lo anterior podemos definir cuales minerales se comportan en este estudio de acuerdo a lo esperado.

Las menas de Cu: calcopirita, bornita y calcosina/covelina, se comportan de manera muy cercana a lo ideal, sus concentraciones aumentan notablemente en la muestra (P4), disminuyen en el concentrado de Mo (P5) y las diferencias entre el concentrado de Cu antes de filtrar y al embarque no son significativas para la calcopirita y la calcosina/covelina. Para la bornita se tiene que aumenta su concentración en la tela de filtro (P7) y en el concentrado de Cu al embarque (P8). La cuprita y la enargita/tenantita también son menas de Cu, pero su comportamiento se escapa un poco de lo esperado, ambas aumentan su concentración en la muestra P4 pero en la muestra P5 su concentración es mayor, luego disminuye y vuelve a aumentar en la tela de filtro.

La molibdenita también tiene un comportamiento que se acomoda a lo esperado, su concentración aumenta en el concentrado colectivo (P4 - 0.86%) en relación a la concentración que se tiene en las muestras de los frentes de alimentación (P1 - 0.02%) y la alimentación de la flotación (P2 - 0.04%) incluso tomando en consideración que entre el 25% y 50% se va en el tranque de relaves (P3 - 0.01%). Posteriormente su concentración aumenta 32 veces entre la muestra P4 y P5 para luego disminuir en las muestras siguientes y mantenerse en torno al 0.3%.

El cuarzo, el feldespato potásico, la muscovita/sericita, la albita, la biotita, las arcillas, la clorita, el rutilo, la calcita y la plagioclasa, como se espera de los minerales de

ganga, abandonan el proceso hacia el tranque de relaves (P3). Las concentraciones de estos minerales desde el concentrado colectivo (P4) en adelante disminuye notoriamente en relación a las etapas anteriores del proceso (P1 y P2).

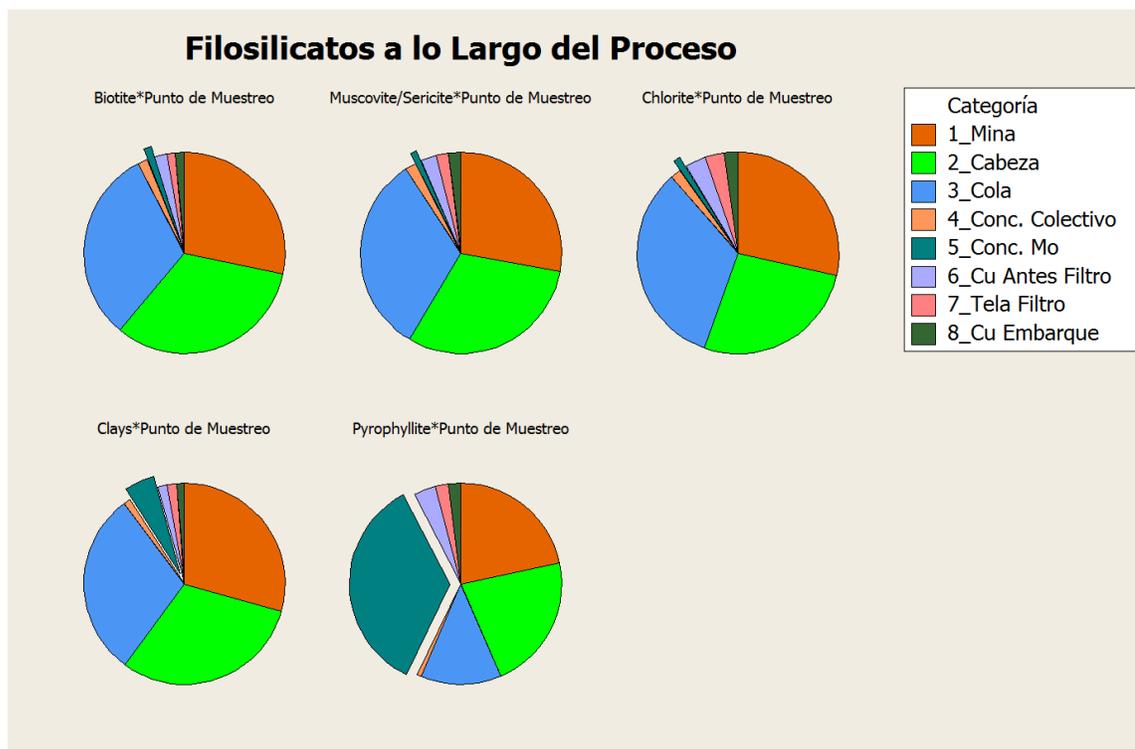
Los minerales: pirofilita, anhidrita/yeso, esfalerita, corindón y apatito no se comportan de acuerdo a lo esperado. Para el caso de la pirofilita, se observa como abandona el proceso y su porcentaje en el concentrado colectivo es muy bajo (P4 - 0.02%) sin embargo en el concentrado Rougher de Mo (P5) aumenta 44 veces su concentración y en el resto de los puntos del proceso su concentración es menor a 0.1%. La anhidrita/yeso en la muestra P5 aumenta 10 veces su concentración en relación al punto anterior (P4), punto en el cual su concentración (0.05%) era la mitad de la encontrada en las muestras P1 y P2. Si bien el apatito disminuye su concentración en el concentrado colectivo (P4), esta vuelve a aumentar solo en la muestra P5, el resto de las muestras sigue casi con la misma concentración que la muestra P4. Esto es producto de la adición de apatito para el proceso de flotación selectiva de Mo. El corindón, prácticamente inexistente en el proceso, aumenta su concentración en la muestra de la tela de filtros (P7) de 0%-0.01% en las etapas anteriores a 0.54% en esta etapa, llama la atención el abrupto aumento en esta etapa, que tendría su explicación en la acumulación de material en las telas de filtros, que se utilizan entre 1900 a 2500 ciclos. La esfalerita aumenta su concentración en el concentrado colectivo (P4); de 0.01% en las muestras P1 y P2 a 0.45% en este punto, aumenta nuevamente en el concentrado Rougher de Mo (P5) y es menor en las etapas posteriores, o sea, su comportamiento se asemeja al de la molibdenita.

## 6.2 Filosilicatos

Los filosilicatos identificados por Qemscan son arcillas, biotita, muscovita/sericita, pirofilita y clorita. Además, la difracción de rayos X determinó la existencia de sepiolita y talco, otros filosilicatos, en el concentrado Rougher de Mo (P5).

La sepiolita es un filosilicato cuya formación está relacionada a la infiltración de agua entre los sedimentos del suelo, por lo que se trataría de un mineral somero, inconsistente con la procedencia de las muestras utilizadas en este estudio. Por otra parte fue detectado por la difracción de rayos X en una sola muestra igual que el talco, razón por la cual no se puede seguir su evolución a lo largo del proceso y no serán considerados en este análisis.

Contrario a lo planteado en la hipótesis de trabajo, todos los filosilicatos disminuyen considerablemente su concentración en la muestra P4, que corresponde al concentrado colectivo, incluso, en la Figura 41 se observa como todos tienen una concentración muy similar en las muestras P1, P2 y P3 indicando que en P3 salen del proceso.



**Figura 41. Gráfico Circular de la concentración de cada filosilicato durante todas las etapas muestreadas.**

Pese a que la biotita, muscovita/sericita y clorita tienen muy baja concentración en la muestra P4 se aprecia un leve aumento de la concentración en las muestras P6 a P8. Recordando la sección 5.2.5.2 Liberación de sulfuros de Cu y granulometría, en ésta se indicó que los sulfuros de cobre no liberados estaban asociados principalmente a minerales como los anteriores en esta parte del proceso. De lo anterior es que no abandonan el proceso hacia el concentrado de Mo y se mantienen en el concentrado de Cu aumentando su proporción.

Con las arcillas y la pirofilita, especialmente con esta última, ocurre algo especial. Ambos minerales aumentan su concentración en el concentrado Rougher de Mo (P5), mientras las arcillas aumentan su concentración por sobre la muestra anterior del proceso (concentrado colectivo - P4), no logran superar los valores observados en las muestras del frente de carguío y alimentación. Por su parte, la pirofilita, además de

aumentar su concentración por sobre la de la muestra anterior (P4) aumenta su concentración por sobre las muestras de frente de carguío y alimentación de la flotación. O sea gran parte de la pirofilita abandona el proceso pero luego se concentra a niveles por sobre los originales.

Con lo anterior queda claro que el comportamiento de los filosilicatos en el proceso productivo de CMDIC no es el mismo para todos los minerales que componen esta familia.

Una diferencia que distingue a estos filosilicatos tiene relación con las asociaciones mineralógicas que forman. Mientras en las imágenes generadas por Qemscan para la liberación de sulfuros y granulometría, se observa como la muscovita/sericita, clorita y biotita estaban asociadas a la calcopirita no liberada, las arcillas no aparecían asociadas con sulfuros de Cu y se apreciaba muy poca pirofilita asociada a sulfuros de Cu. Esto decanta en la posibilidad de que las arcillas y la pirofilita estén asociadas a la molibdenita o se encuentren como partículas libres y ese sea el motivo del aumento en la concentración en la muestra P5.

Otra diferencia es con respecto a la estructura de los filosilicatos. Se pueden dividir en 2 grupos dependiendo del ordenamiento de octaedros y tetraedros que conforman su estructura: tetraedro-octaedro (TO) y tetraedro-octaedro-tetraedro (TOT). Dentro de la clasificación TOT podemos agrupar los minerales que nos atañen dependiendo de la forma en que están unidas las capas:

- **Enlaces de van der Waals:** La pirofilita cae dentro de esta clasificación, las capas TOT son eléctricamente neutras y ocurren muy pocas sustituciones iónicas.
- **Catión intercapa:** La biotita y la muscovita tienen sus capas TOT unidas por un catión mediante un enlace covalente producto del desbalance de cargas que producen las sustituciones de  $Al^{3+}$  por  $Si^{4+}$ .
- **Capa octaédrica intercapa:** La clorita tiene sus capas TOT, negativamente cargadas, unidas mediante puentes de hidrógeno con una capa octaédrica cargada positivamente.

Por la forma de unión, es más fácil separar las capas de la pirofilita que la de los otros minerales, lo que significaría mayor presencia de pirofilita en forma laminar con un área muy grande para su volumen, lo que favorecería su flotación junto a la molibdenita por su parecido. Las arcillas no entraron en este análisis producto de la incerteza de que arcillas específicas componen esta categoría definida por Qemscan.

### 6.3 Comportamiento Conjunto de Minerales y Elementos

Dada la composición de los minerales, es de esperar que exista una relación entre el comportamiento de ciertos minerales con ciertos elementos. Además se debe tomar en consideración las posibles sustituciones iónicas que ocurren en el mundo mineral.

En el caso de Cu, en la Figura 42, es posible observar como el comportamiento de este es muy similar al de la calcopirita y la bornita. La calcosina/covelina y la cuprita tienen un comportamiento algo diferente, pero dada su baja concentración no se ve reflejado en el comportamiento del Cu.

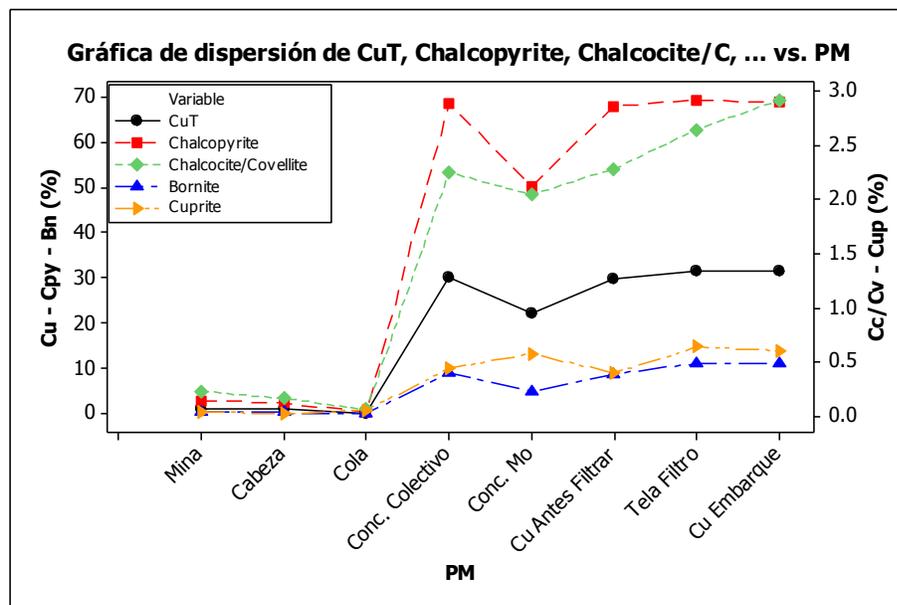


Figura 42. Evolución del comportamiento de Cu con los minerales asociados.

La molibdenita es el mineral que contiene Mo. En la Figura 43, se aprecia como la molibdenita explica el comportamiento del Mo. El valor del Mo está por sobre el valor máximo reportado, en la muestra de concentrado Rougher de Mo, por el método ICP-OES, el cual indicó >10000 ppm.

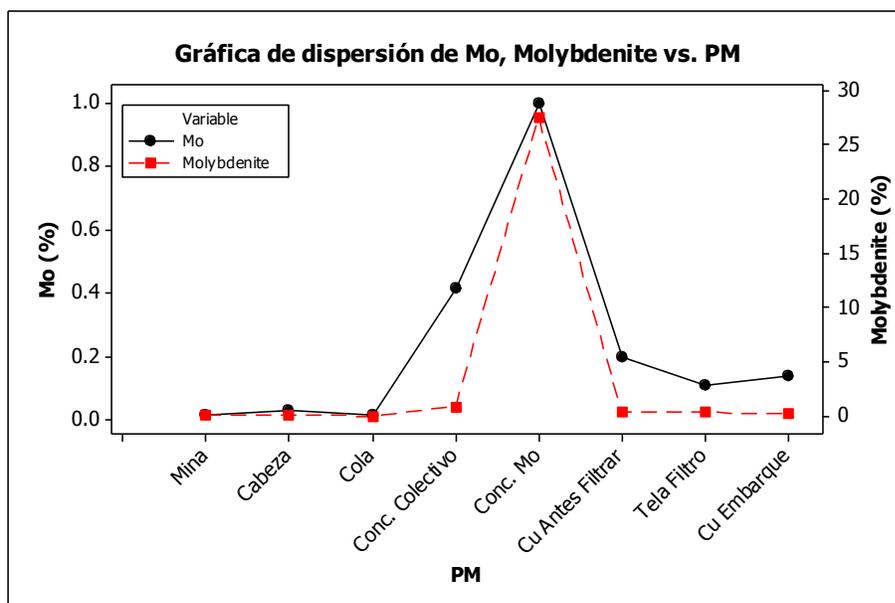


Figura 43. Evolución del comportamiento del Mo y la molibdenita.

La esfalerita contiene Zn en su fórmula. Sin embargo, en la Figura 44, se observa cómo no es capaz de explicar completamente el comportamiento del Zn. El resto del Zn puede ser producto de sustituciones de Zn dentro de otros minerales, como por ejemplo en la calcopirita, donde el Zn reemplaza al Cu o el Fe (Taseska et al, 2008).

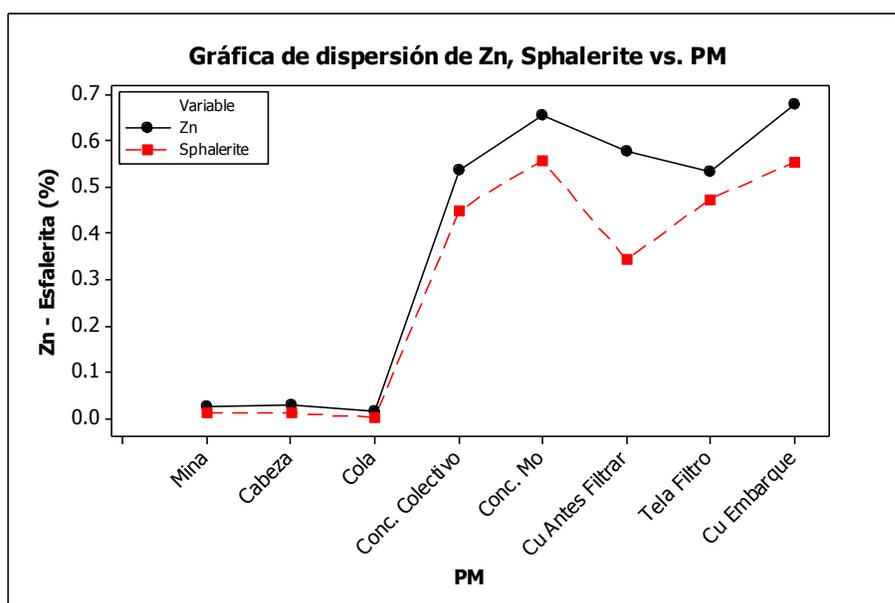


Figura 44. Evolución del comportamiento del Zn y la esfalerita.

En la Figura 45 y en la Figura 46, se observa como el feldespato potásico, la biotita, la muscovita/sericita y la albita, siendo los minerales de ganga; junto al cuarzo,

que están en mayor proporción, son los minerales responsables de explicar el comportamiento de elementos como el K, Al, Na, Mg y Mn.

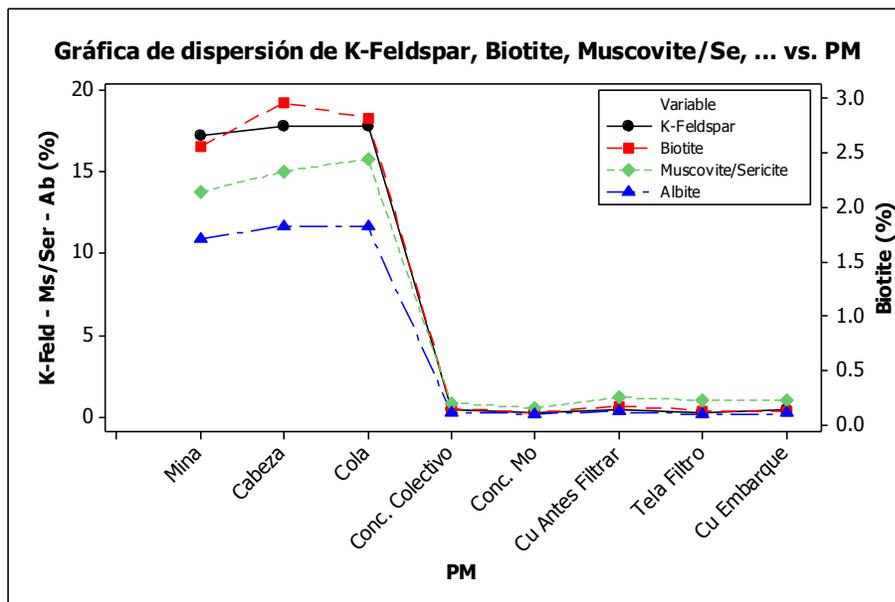


Figura 45. Evolución del comportamiento del feldespato potásico, la biotita, la muscovita/sericita y la albite.

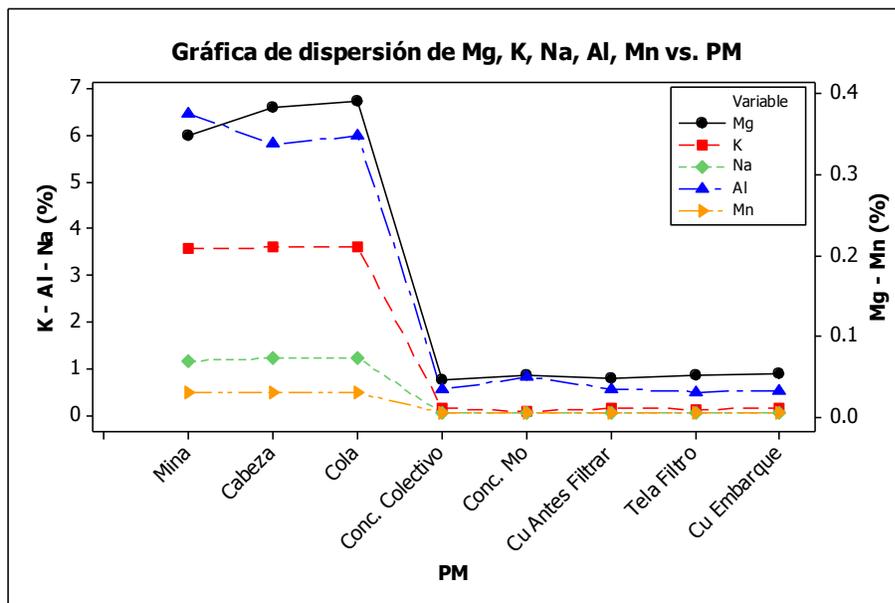


Figura 46. Evolución del comportamiento del K, Na, Al, Mg y Mn.

Los resultados mineralógicos indicaron la existencia de enargita/tenantita como aquellos minerales que su fórmula contiene As. La evolución del As no muestra la misma variabilidad que la de la enargita/tenantita por lo que si bien parte del As viene de este mineral, se necesita de la existencia de otra fuente que aporte para explicar el comportamiento de él. La pirita es el mejor candidato a ser esta otra fuente dado que existe la sustitución de As dentro de su estructura (Deer et al, 2011) y porque su

comportamiento, como se puede observar en la Figura 47, se complementa con el de la enargita/tenantita.

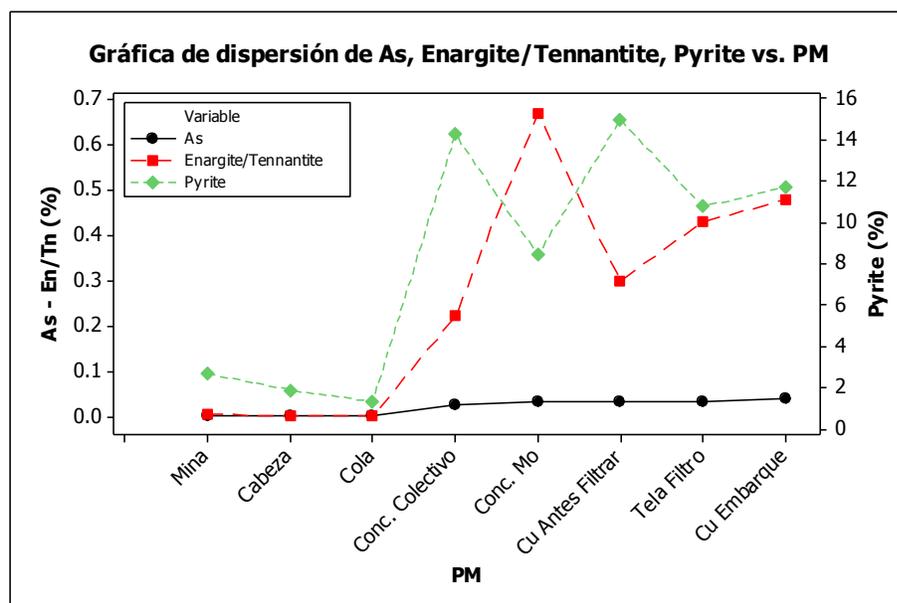


Figura 47. Evolución del comportamiento del As en conjunto con la pirita y la enargita/tenantita.

Si bien no se reportó ningún mineral que contenga Pb, Sb o Ag el comportamiento de estos tres elementos lleva a pensar la existencia de algún mineral que los posea como impurezas o inclusiones. La Figura 48 muestra el similar comportamiento de estos elementos, los cuales se concentran en el proceso desde el concentrado colectivo (P4) en adelante. Mocchi-Cecchi et al. (2002) y Taseska et al. (2008) nombran a estos elementos como impurezas comunes en la calcopirita y dado que este es el mineral más abundante en el proceso desde el concentrado colectivo pareciese ser el responsable de la ocurrencia de estos.

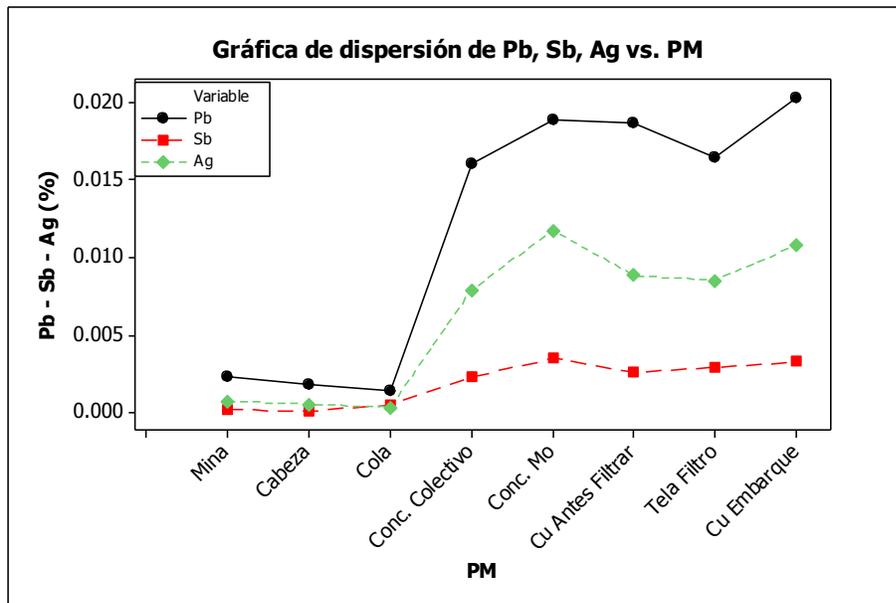


Figura 48. Evolución del comportamiento de la Ag, el Sb y el Pb.

La calcopirita y la pirita son los minerales principales responsables del comportamiento del Fe al presentar de las concentraciones más altas a lo largo del proceso. Esto queda de manifiesto en la Figura 49, donde se observa como el comportamiento del Fe sigue las mismas líneas que el de la calcopirita y la pirita. La escasez de óxidos de Fe hace que su influencia sea despreciable.

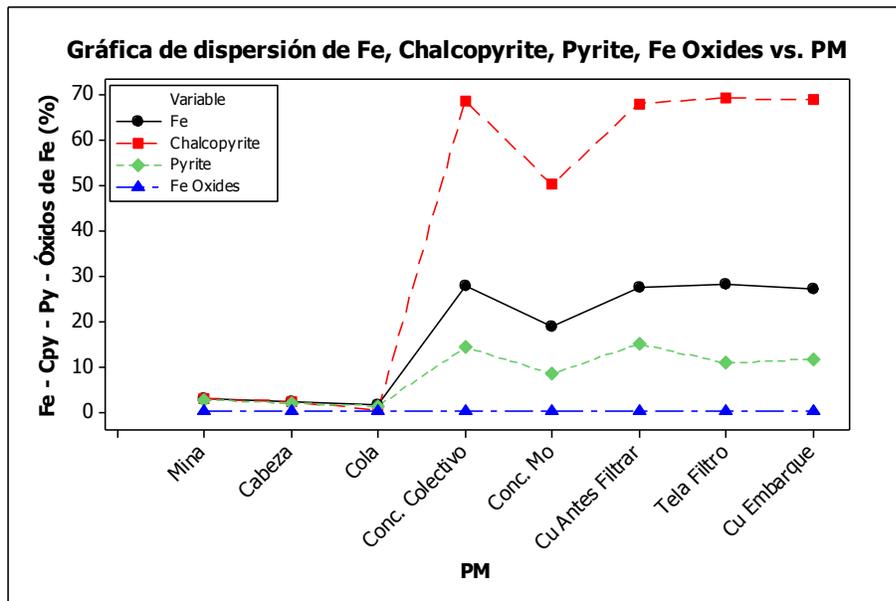


Figura 49. Evolución comportamiento del Fe en conjunto con calcopirita, pirita y óxidos de Fe.

## 6.4 Análisis de evolución de *penalties*

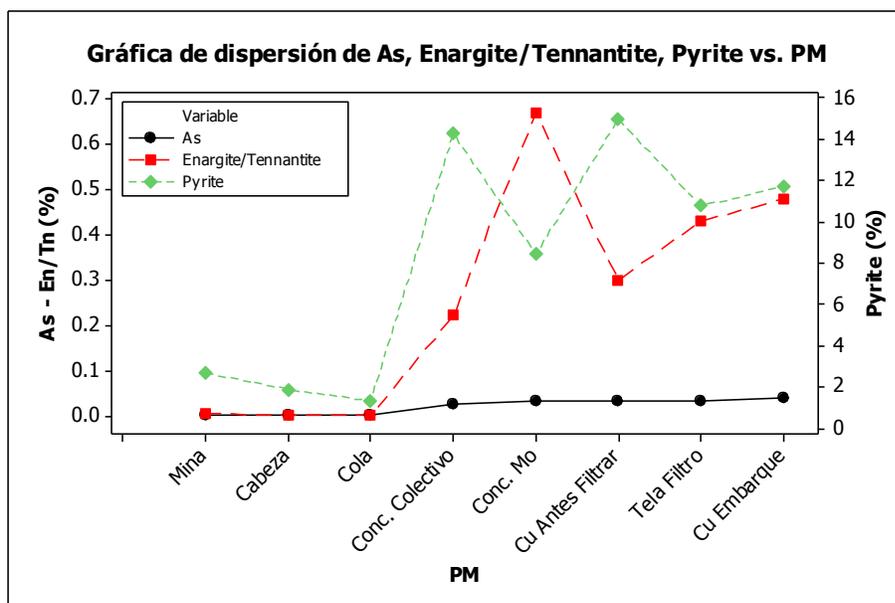
Para la venta de concentrados se necesita que ciertos elementos estén bajo una concentración determinada, ya que sobre esta concentración se empiezan a cobrar multas. La Tabla 12 indica los elementos considerados como impurezas y su concentración permitida en el concentrado final.

**Tabla 12. Elementos considerados como impurezas y su concentración máxima permitida en concentrado final.**

<b>Elemento</b>	<b>Concentración Permitida</b>
<b>As</b>	0.2%
<b>Bi</b>	0.03%
<b>Sb</b>	0.05%
<b>Pb</b>	1%
<b>Zn</b>	3%
<b>Ni+Co</b>	0.5%

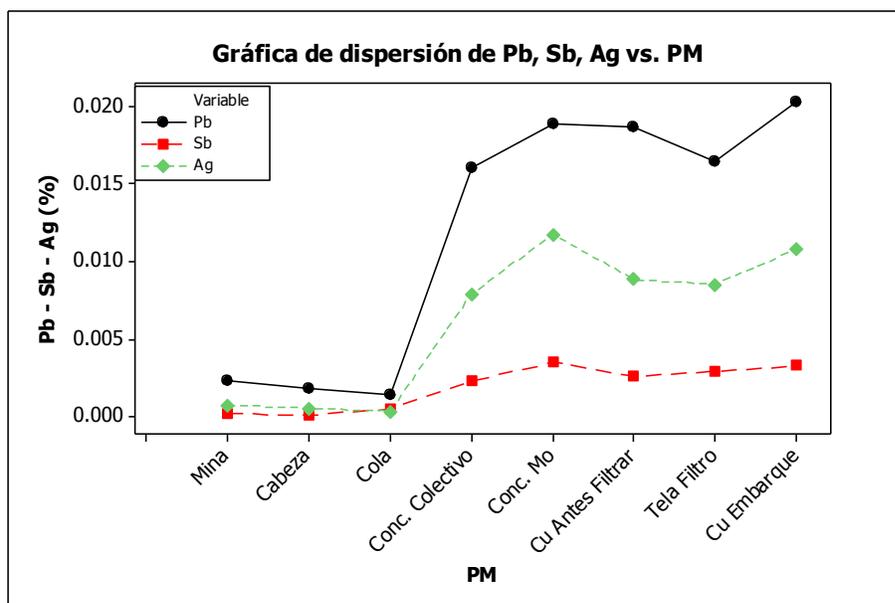
Al graficar estos elementos en función de cada etapa del proceso es posible observar que todos aumentan su concentración. Como se trató en el punto 6.3 esto es debido a que pertenecen a la estructura de algún mineral (e.g Zn en esfalerita) o están presentes como impurezas dentro de la estructura cristalina del mineral (e.g As en pirita).

La Figura 50 muestra la evolución del As junto a la enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ )/ tenantita ( $\text{Cu}_6[\text{Cu}_4(\text{Fe},\text{Zn})_2]\text{As}_4\text{S}_{13}$ ) y la pirita. Como fue planteado en la sección anterior, la enargita/tenantita no explica completamente el comportamiento del arsénico y al ser este una impureza común en la pirita se propone como otro mineral que controle su comportamiento.



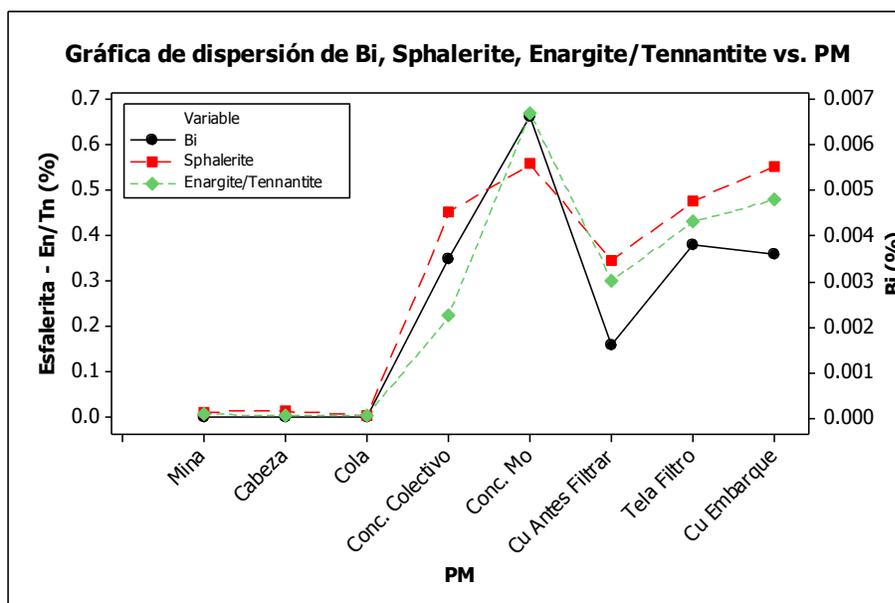
**Figura 50. Evolución del comportamiento del As junto a la enargita/tenantita y la pirita.**

Dado el comportamiento similar que presentan el Pb y el Sb, se propone la existencia de minerales que contengan ambos elementos que dadas las bajas concentraciones no fueron reportados por ninguno de los análisis realizados. Además si agregamos a la Ag es posible observar que el comportamiento de ésta conversa bastante bien con el del Pb y el Sb como se aprecia en la Figura 51. Lo anterior agrega la posibilidad de encontrar minerales que contengan a los tres elementos en su estructura, sin dejar de lado la posibilidad de que no exista una relación geológica y su existencia se explique por sustituciones independientes en algunos minerales que se concentren en el proceso.



**Figura 51. Evolución del comportamiento del Pb, Sb y Ag.**

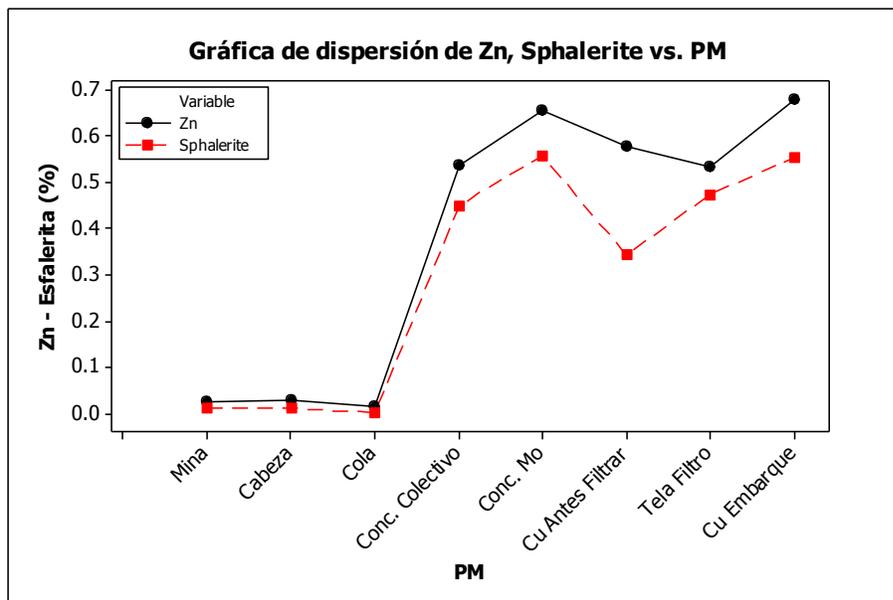
Ya que el Bi no pertenece a la fórmula química de ningún mineral común en el ambiente de este yacimiento se procedió a calcular la correlación existente del elemento con todos los minerales presentes en los resultados analíticos. La mayor correlación se obtuvo con 2 especies minerales, enargita/tenantita 0.944 y esfalerita 0.915. En la Figura 52 se observa la evolución del Bi junto a estas 2 especies. El Bi es un elemento que sustituye comúnmente en la tenantita, lo que apoya el resultado de la correlación, favoreciendo que sea este mineral el que controle el comportamiento del Bi.



**Figura 52. Evolución del comportamiento del Bi junto a esfalerita y enargita/tenantita**

El aumento de la concentración del Zn desde la muestra correspondiente al concentrado colectivo se correlaciona de muy buena manera con el comportamiento de

la esfalerita (ZnS). Lo anterior queda de manifiesto en la Figura 53, por lo que la concentración de Zn dependería de la concentración de esfalerita.



**Figura 53. Evolución del comportamiento del Zn junto a la esfalerita.**

El *penalty* que corresponde a la suma de Co y Ni también se concentra en el punto 4, el concentrado colectivo, pero su comportamiento está dado por el del Co, ya que el Ni permanece relativamente constante a lo largo del proceso. En la Figura 54, se observa que este *penalty* se comporta similar a las menas de Cu, aumentando su concentración en el concentrado colectivo para luego mostrar una disminución en el concentrado de Mo, lo que indicaría que el Co está contenido en estas menas como sustituciones iónicas.

Dado que los elementos *penalties* se concentran a lo largo del proceso existe un valor crítico al inicio del proceso a partir del cual se obtengan concentraciones sobre las aceptadas al final del proceso. Este valor se obtiene de dividir la concentración máxima permitida por el factor de concentración del elemento. Se calcularon los valores iniciales críticos utilizando como factor de concentración el cociente entre la concentración en el concentrado de Cu que se va a embarque (punto 8) y el promedio de la concentración en los frentes de carguío (punto 1) y alimentación a flotación (punto 2).

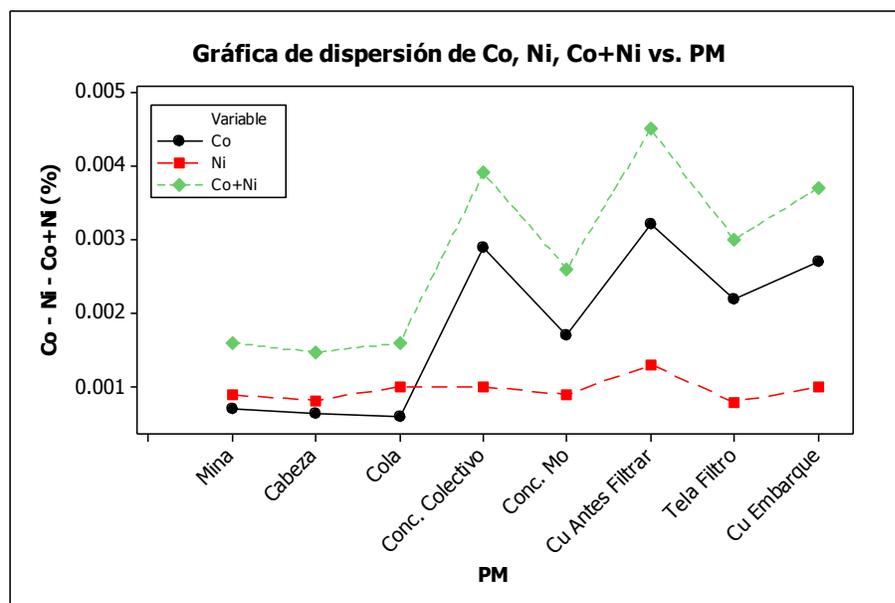


Figura 54. Evolución del comportamiento del Co y Ni.

La Tabla 13 contiene los valores críticos iniciales. Estos valores no son aplicables al yacimiento completo producto de la cantidad de información utilizada pero es una metodología aplicable a un estudio que abarque mayor volumen. Los casos más críticos son los del Sb, el Bi y el As ya que con una pequeña concentración inicial se puede superar el límite permitido.

Tabla 13. Factor de concentración y concentración crítica inicial para los *penalties*.

<i>Penalty</i>	Factor de Concentración	Concentración Permitida (%)	Concentración Crítica Inicial (ppm)	Concentración Crítica Inicial (%)
Co + Ni	2.4	0.50%	2083.3	0.2083
Pb	9.8	1.00%	1020.4	0.1020
Sb	22	0.05%	22.7	0.0023
Zn	25.9	3.00%	1158.3	0.1158
As	61.9	0.20%	32.3	0.0032
Bi	72.0	0.03%	4.2	0.0004

## 6.5 Factor de Concentración de la Pirofilita.

El año 2013 se realizó un estudio mineralógico para determinar la concentración de pirofilita en el concentrado colectivo y en el concentrado de Mo para verificar si el concentrado colectivo tenía las altas concentraciones que se observaban en el

concentrado de Mo y disminuían su recuperación. El estudio contó con información de Qemscan y la técnica mixta de fluorescencia y difracción de rayos X. La metodología utilizada es distinta, ya que no se realizó un muestreo que siguiera un flujo durante el proceso, se tomaron muestras de días diferentes en las etapas nombradas anteriormente.

Se calculó el factor de concentración de la pirofilita para ese estudio, tanto para Qemscan como XRF-XRD, promediando las concentraciones en ambas etapas muestreadas y obteniendo un factor de concentración para cada técnica. Estos factores de concentración se compararon con los obtenidos en este estudio, que se calcularon realizando el cociente entre los valores de concentración de pirofilita en las muestras de concentrado Rougher de Mo y concentrado colectivo.

**Tabla 14. Factor de concentración de la pirofilita con los datos de Qemscan y XRD-XRF para este estudio y el realizado en el año 2013.**

Estudio 2013		Presente Estudio	
Concentrado Colectivo		Concentrado Colectivo	
Qemscan (%)	XRD-XRF (%)	Qemscan (%)	XRD-XRF (%)
1.02	5.11	0.02	2.54
1.02	7.16		
1.54	7.66		
1.24	5.22		
Concentrado de Mo		Concentrado Rougher de Mo	
Qemscan (%)	XRD-XRF (%)	Qemscan (%)	XRD-XRF (%)
40.63	45.07	0.88	3.61
41.42	47.39		
25.99	32.17		
17.44	25.03		
20.82	29.01		
24.2	5.7	44.0	1.4

En la Tabla 14 se presentan los factores de concentración encontrados en este estudio y en el estudio mineralógico realizado en el año 2013. Una similitud entre ambos estudios es que el factor de concentración cambia radicalmente dependiendo de la

técnica utilizada siendo menor para los datos obtenidos mediante difracción y fluorescencia de rayos X. Dependiendo de la técnica utilizada se pueden deducir condiciones contrapuestas. Por una parte, los datos de XRD-XRF indicarían que la concentración de pirofilita crece producto de la recirculación de material para aumentar la concentración de molibdenita. Por su lado, los datos de Qemscan indicarían que es en el concentrado Rougher de molibdeno donde se concentra en mayor medida la pirofilita y en el proceso de aumentar la concentración de molibdenita ésta se iría hacia el concentrado de Cu.

Producto de lo disímil que pueden ser las conclusiones dadas las diferencias en los resultados obtenidos por cada técnica y ya que la pirofilita provocó un problema en la recuperación de molibdenita es necesario determinar con certeza cuál de las dos técnicas es más exacta para la cuantificación de este filosilicato y así poder conocer en qué etapa del proceso es cuando se produce un aumento de la concentración no deseado de este mineral.

## 7. Conclusiones

En las primeras etapas del proceso productivo, representadas por las muestras correspondientes a mina (P1), alimentación (P2) y tranque de relaves (P3), son los minerales de ganga, como cuarzo, plagioclasa, feldespato, muscovita y biotita, los que están presentes en mayor proporción. Desde el concentrado colectivo (muestra P4) el panorama cambia y son las menas de Cu (calcopirita y bornita principalmente) y Mo (molibdenita) los minerales que presentan mayor concentración.

Al contrastar el comportamiento real de los minerales con el esperado, se observó que coincidían para las especies más relevantes, dado el contexto de una mina que produce concentrado de Cu y Mo; la calcopirita y la bornita, junto a las otras menas de Cu, aumentan su concentración en el concentrado colectivo y la disminuyen en el concentrado Rougher de Mo. Si bien el material que va al tranque de relaves contiene estos minerales, las concentraciones encontradas se encuentran dentro de los rangos esperables en la producción de concentrados en CMDIC. Por su parte, la concentración de la molibdenita aumenta notoriamente en la muestra del concentrado Rougher de Mo mientras que en las otras etapas del proceso la concentración es apenas mayor en comparación a la encontrada en los frentes de carguío. Mientras la mayoría de la ganga se va hacia el tranque de relaves y disminuye su concentración en el concentrado colectivo, la pirofilita y lo que Qemscan clasifica como arcillas después de disminuir su concentración en la muestra de concentrado colectivo aumentan en el concentrado Rougher de Mo.

De particular interés es el comportamiento de los filosilicatos ya que en la bibliografía se encontró que eran los minerales que causaban mayores problemas en el proceso de producción de concentrados. Los análisis reportaron 5 minerales pertenecientes a esta familia: muscovita, biotita, clorita, arcillas y pirofilita. El comportamiento de estos minerales no es el mismo, mientras la muscovita, la biotita y la clorita se van hacia el tranque de relaves y no vuelven a aumentar su concentración, la pirofilita y las arcillas luego de abandonar el proceso hacia el tranque de relaves sufren un proceso de concentración en el concentrado Rougher de Mo. Las diferencias entre la pirofilita y la biotita, muscovita y clorita es que estos últimos se ven asociados a los sulfuros de Cu en las imágenes generadas por Qemscan y además poseen enlaces covalentes entre sus capas, a diferencia de la pirofilita que tiene capas unidas por enlaces de Van der Waals.

Comparando los datos de concentración de pirofilita de este estudio con uno realizado el año 2013 no fue posible determinar en qué parte del proceso de flotación de Mo se produce el mayor efecto de concentración ya que dependiendo de la técnica analítica utilizada (Qemscan o XRD-XRF) la conclusión es distinta. Se recomienda realizar un estudio específico para la pirofilita, primero definir qué técnica analítica tiene mayor exactitud en su determinación y para luego calcular con certeza su factor de concentración desde el frente de carguío al concentrado colectivo como también desde el concentrado colectivo a las diferentes etapas de flotación de molibdeno para esclarecer en que parte del proceso se produce el mayor aumento de concentración.

Las variaciones en la concentración de los elementos son concordantes con los minerales que los contienen en su fórmula estructural. Hay casos como el del As y Zn donde la enargita/tenantita y la esfalerita, respectivamente, no explican completamente el comportamiento de cada elemento. En estos casos se propone que el control de estos está asociado además a otro mineral. Además existen casos como el del Pb, el Sb y el Bi en que los análisis no reportaron ningún mineral que los contenga en su fórmula estructural. La pirita sería el mineral que explicaría junto a la enargita/tenantita el comportamiento del As producto de la presencia de este elemento como impurezas en ella. La calcopirita determina parte del comportamiento del Zn junto a la esfalerita y todo el comportamiento del Pb y el Sb porque estos elementos se encuentran reemplazando al Cu o el Fe en la calcopirita. El Bi tiene la más alta correlación con la enargita/tenantita y además es común su sustitución en la tenantita.

Los elementos mencionados en el párrafo anterior son considerados como *penalties* si se encuentran sobre cierta concentración determinada. Es por esto que se recomienda develar con mayor certeza su proveniencia y control durante el proceso de producción de concentrados.

También se debe tener en consideración que las conclusiones obtenidas se hicieron aceptando una relación de causalidad entre las muestras, cuando también cabe la posibilidad que producto del bajo número de muestras estas relaciones sean de casualidad.

Es recomendable la realización de un estudio similar a este, pero que la cantidad de muestras que se analicen sean las necesarias para obtener resultados extrapolables a todo el yacimiento. Dado el alto costo de las técnicas utilizadas en este estudio, para poder obtener y analizar más muestras se deben utilizar técnicas menos costosas.

Incluso; por la relación existente entre mineralogía y geoquímica, no utilizar información mineralógica y sólo usar geoquímica. Con resultados que sean aplicables al yacimiento, es posible determinar potenciales sectores conflictivos, ya sea por la concentración de pirofilita o de elementos *penalties* y tener controlados estos factores que desencadenan en problemas en la producción de concentrados.

## Bibliografía

- Alruiz, O., Morell, S., Suazo, C., & Naranjo, A. (2009). A novel approach to the geometallurgical modelling of the Collahuasi grinding circuit. *Minerals Engineering*, 22, 1060-1067.
- Ayling, B., Rose, P., Petty, S., Zemach, E., & Drakos, P. (2012). QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy): Capability and Application to Fracture Characterization in Geothermal Systems. *37 Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. California: Stanford University.
- Baum, W., Lotter, N., & Whittaker, P. (2004). Process Mineralogy - A new generation for ore characterization and plant optimization. *SME Annual Meeting*. Denver, Colorado.
- Becker, M., Harris, P., Wiese, J., & Bradshaw, D. (2009). Mineralogical characterisation of naturally floatable gangue in Merensky Reed ore flotation. *International Journal of Minerals Processing*, 93, 246-255.
- Bonvin, D., Yellepeddi, R., & Buman, A. (2000). Applications and perspectives of a new innovative XRF-XRD spectrometer in industrial process control. *Advances in X-Ray Analysis*, 42, 126-127.
- Bradshaw, D., Triffett, B., & Kashuba, D. (2011). The role of process mineralogy in identifying the cause of the low recovery of chalcopyrite at KUCC. *Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)* (págs. 73-80). Trondheim: Springer.
- Bulatovic, S., Wyslouzil, D., & Kant, C. (1999). Effect of clay slimes on copper, molybdenum flotation from porphyry ores. *Copper 99 – Cobre 99 International Environment Conference*. Arizona.
- Craig, J., & Vaughan, D. (1981). *Ore microscopy and ore petrography*. John Wiley & Sons.
- Deer, W., Howie, R., Zussman, J., Bowles, J., & Vaughan, D. (2011). *Rock-Forming Minerals, Volume 5A: Non-Silicates: Oxides, Hydroxides and Sulphides*.

- Evans, C., & Napier-Munn, T. (2013). Estimating error in measurements of mineral grain size distribution. *Minerals Engineering*, *52*, 198-203.
- Evans, C., Wightman, E., Manlapig, E., & B., C. (2011). Application of process mineralogy as a tool in sustainable processing. *Minerals Engineering*, *24*, 1242 - 1248.
- Gottlieb, P., Wilkie, G., Sutherland, D., Ho-Tun, E., Suthers, S., Jenkins, B., & Rayner, J. (2000). Using Quantitative Electron Microscopy for Process Mineralogy Applications. *Journal of Mineralogy*, 24-25.
- Gribble, C., & Hall, A. (1985). *A Practical Introduction to Optical Mineralogy*. United Kingdom: George Allen & Urwin.
- Guag-yi, L., Yi-ping, L., Hong, Z., Zhan-fang, C., & Zheng-he, X. (2012). A novel approach for preferential flotation recovery of molybdenite from a porphyry copper-molybdenum ore. *Minerals Engineering*, *36-38*, 37-44.
- Hoal, K., Stammer, J., Appleby, S., Botha, J., Ross, J., & Botha, P. (2009). Research in quantitative mineralogy: Examples from diverse applications. *Minerals Engineering*, *22*, 402-408.
- Hou, X., & Jones, B. (2000). Inductively coupled Plasma/Optical Emission Spectrometry. En *Encyclopedia of Analytical Chemistry* (págs. 9468-9485). Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- JHG Ingenieria. (15 de Enero de 2014). *dcmel\_oo\_mel*. Obtenido de <http://www.jhg.cl/desarrollo/interactivos/ProyectosM/Collahuasi/collahuasi.html>
- Knorr, K. (2011). Advances in quantitative X-Ray mineralogy - Mixed crystals in bauxite. *Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)* (págs. 377 - 382). Trondheim: Springer.
- Lane, G., & Martin, C. P. (2008). Techniques and applications for predictive metallurgy and ore characterization using optical image analysis. *Minerals Engineering*, *21*, 568-577.

- Long, G., Peng, Y., & Bradshaw, D. (2012). A review of copper-arsenic mineral removal from copper concentrates. *Minerals Engineering*, 36-38, 179-186.
- Lotter, N. (2011). Modern Process Mineralogy: an integrated multi-disciplined approach to flowsheeting. *Minerals Engineering*, 24, 1229-1237.
- Lotter, N., Kormos, L., Oliveira, J., Fragomeni, D., & Whiteman, E. (2011). Modern Process Mineralogy: Two case studies. *Minerals Engineering*, 24, 638-650.
- Loubser, M., & Verryyn, S. (2008). Combining XRF and XRD analyses and sample preparation to solve mineralogical problems. *South African Journal of Geology*, 111, 229-238.
- Masterman, G. J. (Junio de 2003). Structural and Geochemical Evolution of the Rosario Copper-Molybdenum Porphyry Deposit and Related Copper-Silver Veins, Collahuasi District, Northern Chile. Ph.D, Australia: Universidad de Tasmania.
- Masterman, G., Cooke, D., Berry, R., Walshe, J., Lee, A., & Clark, A. (2005). Fluid Chemistry, Structural Setting, and Emplacement History of the Rosario Cu-Mo Porphyry and Cu-Ag-Au Epithermal Veins, Collahuasi District, Northern Chile. *Economic Geology*, 835-862.
- Moggi-Cecchi, V., Cipriani, C., Rossi, P., Ceccato, D., Rudello, V., & Somacal, H. (2002). Trace Elements Contents and Distribution Maps of Chalcopyrite: a Micro-PIXE Study. *Periodico di Mineralogia*, 101-109.
- Mukherjee, S. (2011). *Applied Mineralogy: Applications in Industry and Environment*. Kolkata: Springer.
- Ndlovu, B., Farrokhpay, S., & Bradshaw, D. (2013). The effect of phyllosilicate minerals on mineral processing industry. *International Journal of Mineral Processing*, 125, 149-156.
- Oghazi, P., & Palsson, B. (2011). Comparing the mineralogical characterisation of iron ore by using QEMSCAM and PTA. *Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)* (págs. 479-483). Trondheim: Springer.

- Pirrie, D., Butcher, A., Power, M., Gottlieb, P., & Miller, G. (2004). Rapid quantitative mineral and phase analysis using automated scanning electron microscopy (QemSCAN); potential applications in forensic geoscience. *Geological Society, Special Publications*, 123-136.
- Portal Minero. (2006). *Manual General de Minería y Metalurgia* (Vol. 1). Chile: Portal Minero Ediciones.
- Raghavan, S., & Hsu, L. (1984). Factors affecting the flotation recovery of molybdenite from porphyry copper ores. *International Journal of Mineral Processing*, 12, 145-162.
- Saez, S. (15 de Marzo de 2014). Exhibits VPO DIC 2013\_env\_finanzas. Iquique, Tarapaca.
- SGS Minerals Services. (2013). *QEMSCAN Operational Modes*. SGS Group Management SA.
- Smith, A., Viljoem, K., Schouwstra, R., Roberts, J., Scharlwyk, C., & Gutzmer, J. (2013). Geological variations in the Merensky Reef at Bafokeng Rasimone Platinum Mine and its influence on flotation performance. *Minerals Engineering*, 52, 155-168.
- Taseska, M., Makreski, P., Stibilj, V., Jacimovic, R., Stafilov, T., & Jovanovski, G. (2008). Determination of Trace Elements in Chalcopyrite (CuFeS<sub>2</sub>) by ko-Instrumental Neutron Activation Analysis After Matrix Elements Removal. *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 141-147.
- Triffett, B., Veloo, C., Adair, B., & Bradshaw, D. (2008). An investigation of the factors affecting the recovery of molybdenite in the Kennecott Utah Copper bulk flotation circuit. *Minerals Engineering*, 40, 832-840.
- Urqueta, E., Kyser, T., Clark, A., Stanley, C., & Oates, C. (2009). Litho geochemistry of the Collahuasi porphyry Cu-Mo and epithermal Cu-Ag (-Au) cluster, northern Chile: Pearce element ratio vectors to or. *Geochemistry: Exploration, Environment Analysis*, 9, 9-17.

Williams, M., Gilligan, J., & Preece, R. (2000). *Final Report on the Application of Partial Extraction Techniques to Determine Copper & Iron Sulphide Distribution Within the Escondida Norte Porphyry Copper Deposit*. Escondida Norte, Mel & BHP Copper Growth & Technology.

Zanin, M., Ametov, I., Grano, S., Zhou, L., & Skinner, W. (2009). A study of mechanisms affecting molybdenite recovery in a bulk copper/molybdenum flotation circuit. *International Journal of Mineral Processing*, 93, 256-266.

# Apéndices

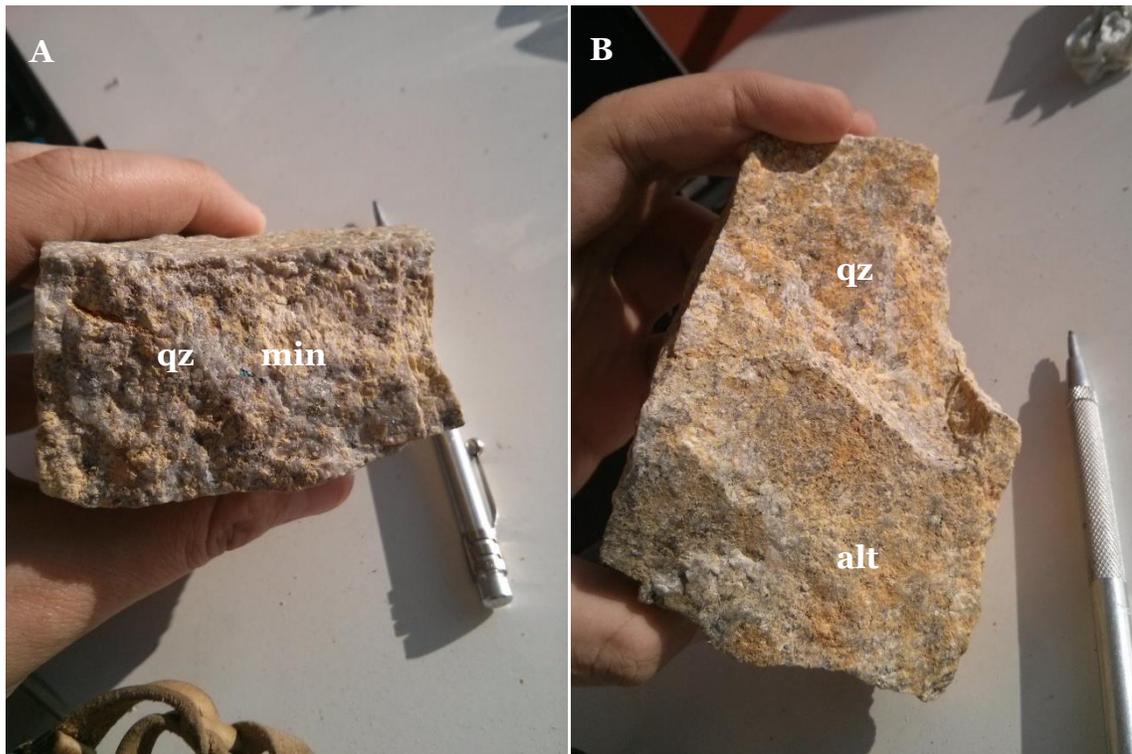
## Apéndice A: Descripción Macroscópica

### *Muestra M1*

Poco porcentaje de plagioclasas, la gran mayoría es cuarzo y en menor medida feldespatos. No se observan minerales máficos. La alteración no afecta al cuarzo y en menor medida al feldespato, el resto de los minerales, posiblemente plagioclasas y máficos están alterados a un mineral blanco y blando, por lo que se podría tratar de arcillas. Se observan vetillas de cuarzo. La alteración correspondería a cuarzo sericita.

La mineralización es diseminada, abarcando alrededor del 1% de la roca. La mineralización en orden decreciente es calcopirita, pirita, bornita, digenita, covelina.

El tamaño de los minerales alterados es del orden de los 2-3 mm, de cara basal redondeada y algunos tienen cara basal cuadrada. La mayoría tienen cierta esfericidad, pero también los hay alargados.



**Ilustración 4. Muestra M1 perteneciente al Punto 1. En la imagen A se observa cuarzo (qz) y un poco de mineralización (min). En B se observan vetillas de cuarzo (qz) y como toda la roca presenta alteración (alt) tornándose anaranjada.**



**Ilustración 5. Muestra M1 perteneciente al Punto 1. Acercamiento a las vetillas de cuarzo observadas en la imagen B.**

### ***Muestra M2***

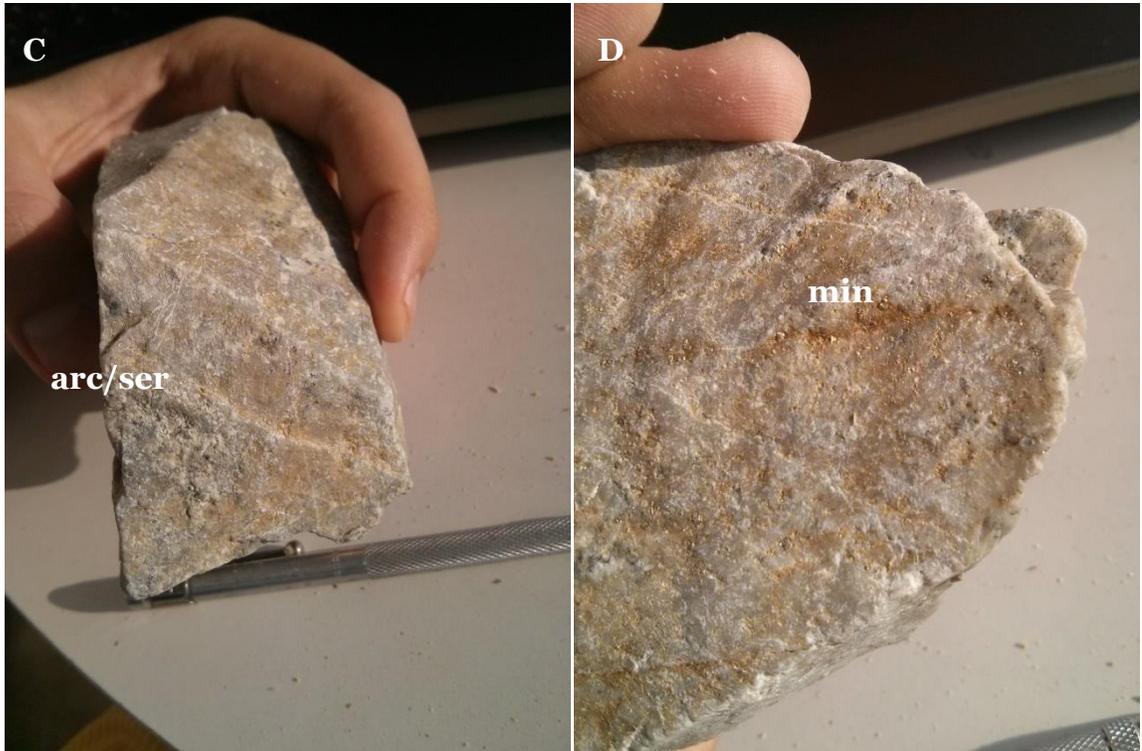
El protolito es difícil de diferenciar dado que la alteración es pervasiva e intensa. De lo poco que se puede observar se diferencia la presencia de cuarzo y feldespato con un tamaño de grano muy fino, difícil de diferenciar entre ellos, sin embargo, no hay vestigios de plagioclasa.

Los minerales máficos representan el 1% de la roca. La alteración está caracterizada por un mineral muy blando y blanco, además es pervasiva, afectando a toda la roca, con zonas donde la dureza de ésta es muy baja y se disgrega en un polvo blanco.

La mineralización es diseminada y del orden del 2-3% del total de la roca, siendo en orden decreciente pirita, calcopirita, bornita. Podría tener molibdenita en muy baja proporción. Los bordes de los sulfuros se encuentran oxidados.



**Ilustración 6. Muestra M2 perteneciente al Punto 1. La imagen A es una toma general de la muestra, donde se observan zonas alteradas y que el grano es muy fino. En B se aprecia una zona de baja dureza y color claro que sería arcillas o sericita.**



**Ilustración 7. Muestra M2 perteneciente al Punto 1. En la imagen C es posible observar una zona de sericita o arcillas, caracterizada por su poca dureza y facilidad de disgregación. En B se observan pequeños granos minerales de pirita/calcopirita.**



### ***Muestra M3***

Presenta vetillas de cuarzo de entre 2 y 3 mm.

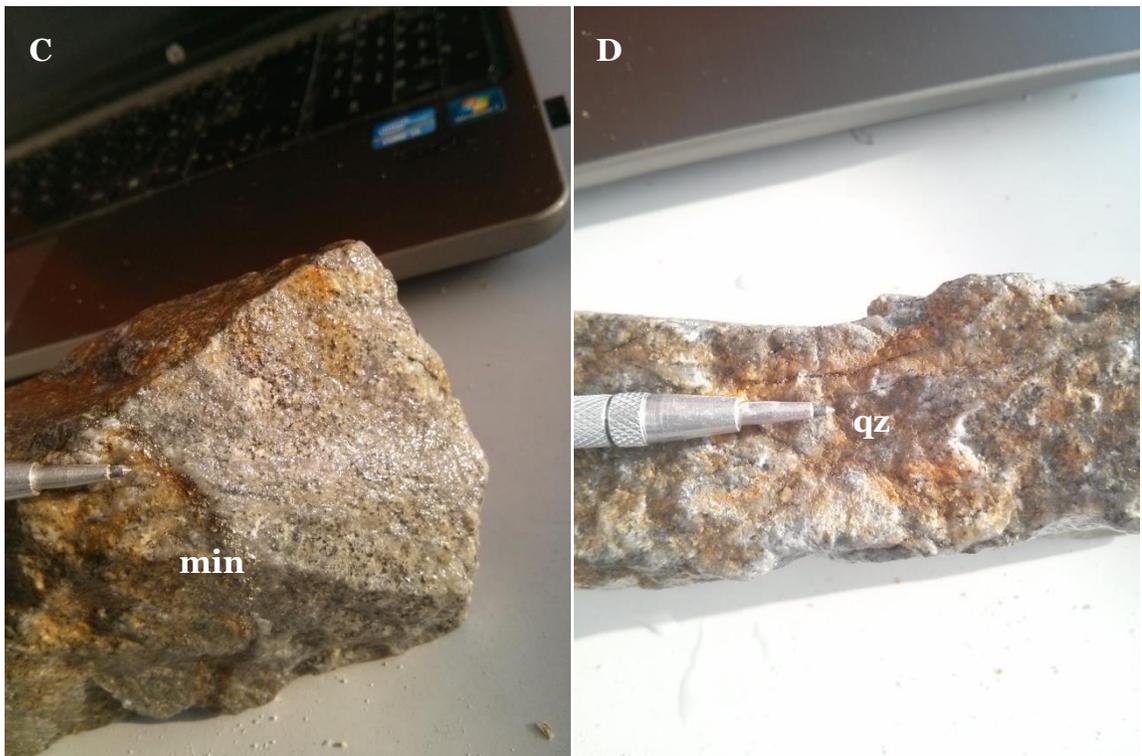
El protolito está muy alterado, por lo que cuesta diferenciar su composición, en pequeñas ventanas menos alteradas se observa que el cuarzo y el feldespato son los minerales principales, también es posible observar cristales de plagioclasas alterados.

Se observa alteración selectiva de las plagioclasas, sin embargo algunos sectores de la roca presentan cúmulos de arcilla. Los minerales máficos representan un 5% de la roca, son de muy pequeño tamaño, menos a 1 mm

Hay mineralización diseminada, en vetillas, asociada a las vetillas de cuarzo. La mineralización corresponde principalmente a pirita y calcopirita y en menor medida bornita, digenita. La mineralización es del orden del 5% de la roca. La cantidad de pirita y calcopirita es similar, siendo mayor la pirita.



**Ilustración 8. Muestra M3 perteneciente al Punto 1. En ambas fotografías es posible notar la alta intensidad de la alteración y su carácter pervasivo.**



**Ilustración 9. Muestra M3 perteneciente al Punto 1. En C la punta del rayador indica una pequeña vetilla de mineralización (min). La imagen D muestra pequeñas vetillas de cuarzo (qz).**

### ***Muestra M4***

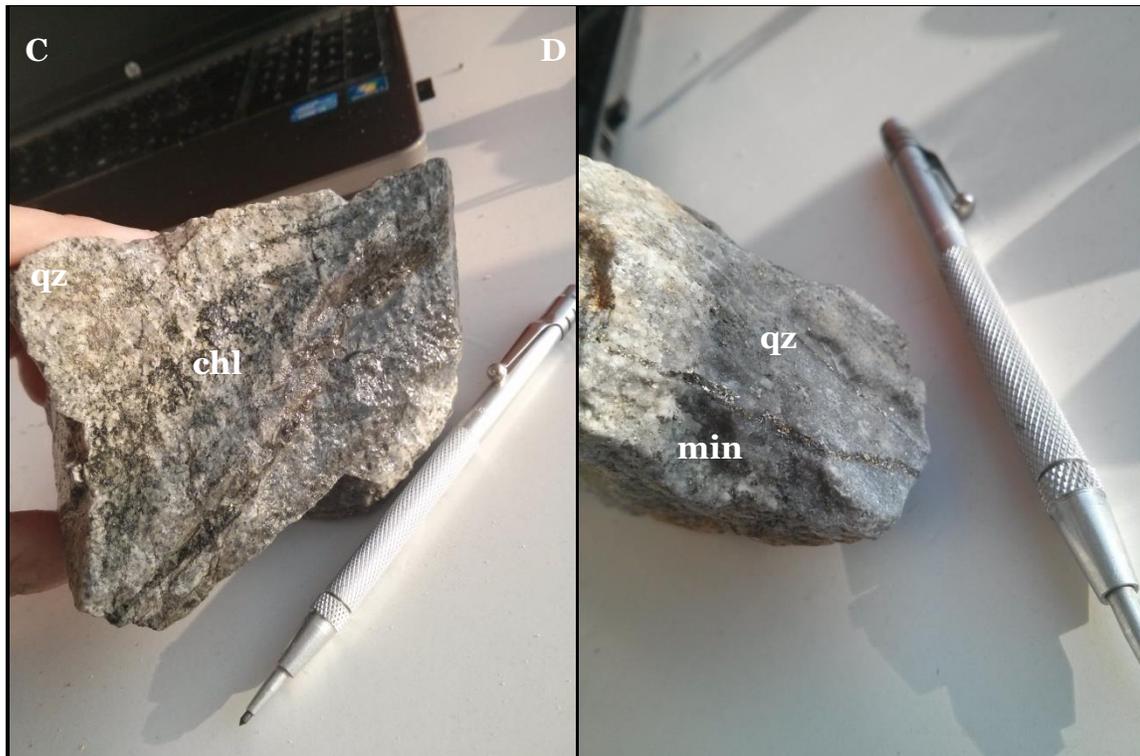
Tiene una veta de entre 1-3mm de grosor, de un mineral negro de baja dureza y se observa mineralización asociada a ella, de calcopirita. Se podría tratar de clorita.

Dado lo débil de la alteración se observa de mejor manera el protolito, donde el cuarzo y el feldespato son los minerales principales, poca presencia de plagioclasas. Se observan minerales verdosos diseminados, posiblemente minerales asociados a alteración sericita gris verde, como la clorita.

La mineralización es diseminada y asociada a vetillas, es del orden del 3% y corresponde principalmente a calcopirita, pirita, bornita, digenita y molibdenita.



**Ilustración 10. Muestra M4 perteneciente al Punto 1. En ambas fotos es posible observar pequeños cristales de mineralización que se presentan como manchones oscuros en la roca.**



**Ilustración 11. Muestra M4 perteneciente al Punto 1. La foto C muestra un sector de la roca con clorita (chl) y cuarzo (qz). En D se nota una vetilla de mineralización (min) y que gran parte de la roca es cuarzo (qz).**

## **Apéndice B: Descripción microscópica**

Imágenes de toma de muestras en la mina: falta M2 M3 (M5)

### **B.1 Cortes Transparentes**

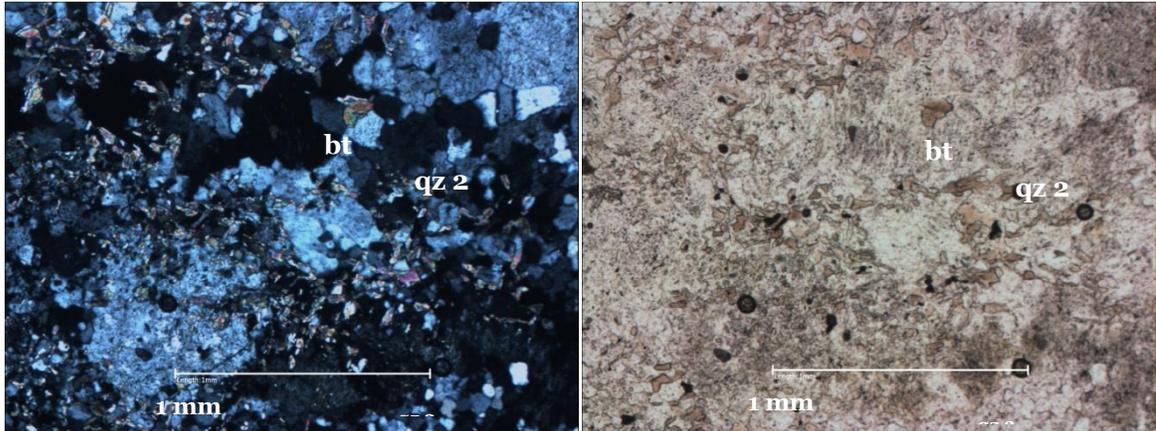
#### ***Muestra M1***

Se observan 2 poblaciones de cuarzo, identificadas por su tamaño y alteración. Hay un cuarzo primario de mayor tamaño que no presenta caras limpias, se ve un poco alterado y presenta gran cantidad de opacos dentro de los cristales. En los bordes se puede ver un mineral transparente que al cruzar los nicoles se ve negro sin importar la orientación (isótropo) y dentro se ven tablitas de minerales opacos. El cuarzo de alteración, más pequeño, más limpio y con menos opacos dentro de los cristales se presenta en casi la totalidad de la roca (75%%) ocupando los espacios entre los minerales primarios, como también en pequeñas vetillas.

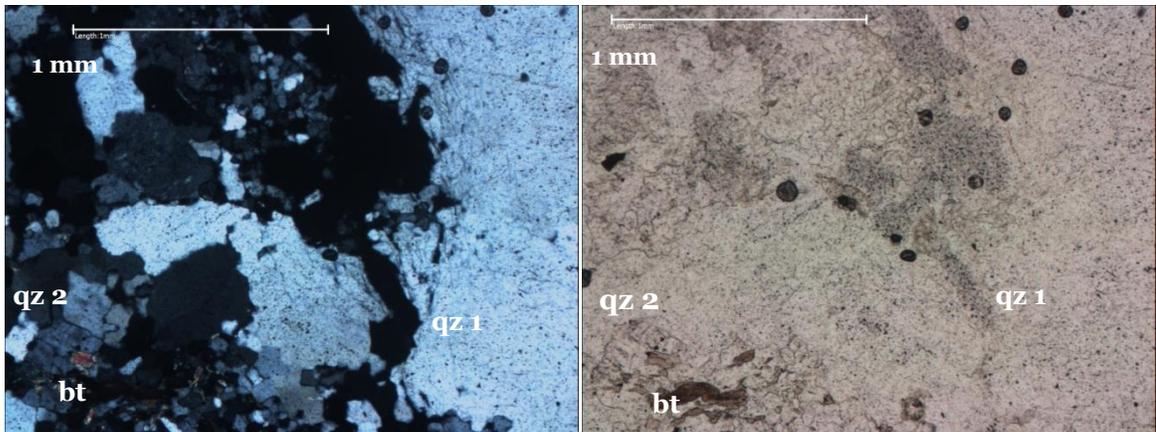
Se observa también la presencia de pocas biotitas, de pequeño tamaño, aisladas entre los cuarzos de alteración y asociadas a otros minerales blancos, mucho más alterados, que parecen ser feldspatos.

Las plagioclasas están totalmente alteradas a algún filosilicato, cuyo color de interferencia es alto, tamaño de grano muy pequeño y hace que toda la superficie de los cristales de plagioclasas se vea sucia. Se observan relictos de las maclas de las plagioclasas.

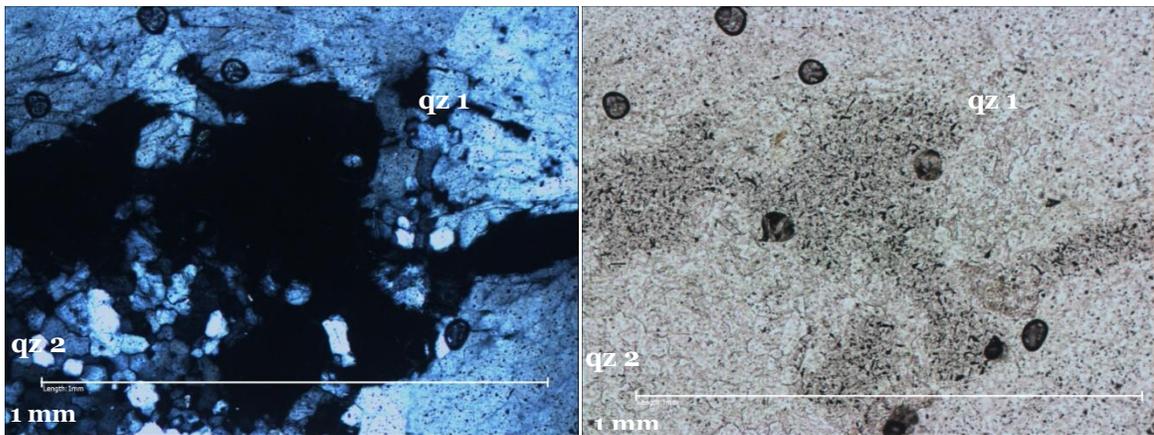
Opacos alrededor del 10%.



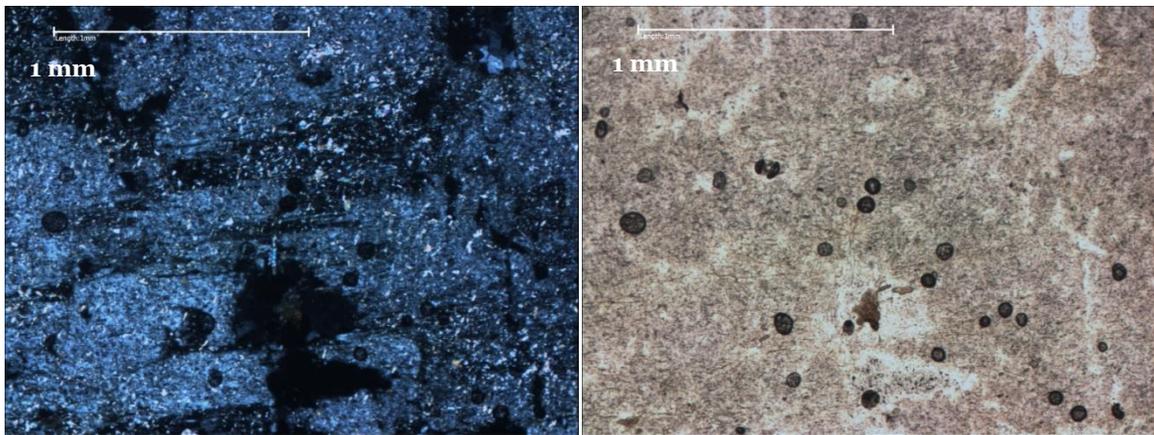
**Ilustración 12.** Fotomicrografía correspondiente a la muestra M1 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda. Se observa biotita (bt) con su pleocroísmo de café oscuro a claro y color de interferencia enmascarado, también es posible notar el cuarzo de alteración (qz 2). En la imagen a nicoles paralelos es posible observar la alteración general de la muestra, donde se observan manchones oscuros en toda la muestra.



**Ilustración 13.** Fotomicrografía correspondiente a la muestra M1 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda. Se observa biotita (bt), cuarzo de alteración (qz 2) y cuarzo primario (qz 1) el cual es notoriamente de mayor tamaño que el cuarzo de alteración.



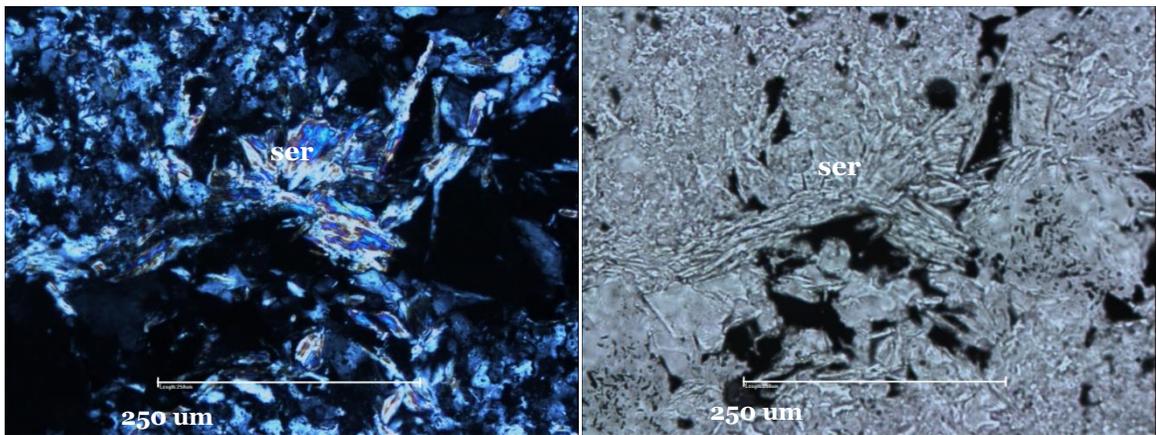
**Ilustración 14.** Fotomicrografía correspondiente a la muestra M1 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda. Se observa cuarzo de alteración (qz 2) y cuarzo primario (qz 1).



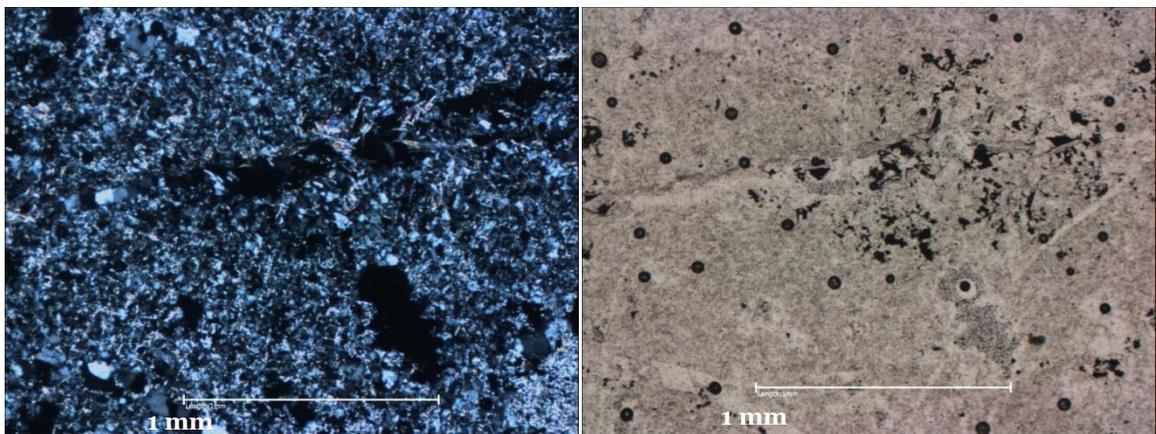
**Ilustración 15.** Fotomicrografía correspondiente a la muestra M1 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda. Se observan los vestigios de un cristal de plagioclasa, en la imagen a nicoles cruzado es posible diferenciar una parte de una macla polisintética. En la imagen a nicoles paralelos se observa que la alteración es intensa y como el cristal esta casi en su totalidad alterado a sericita.

### ***Muestra M2***

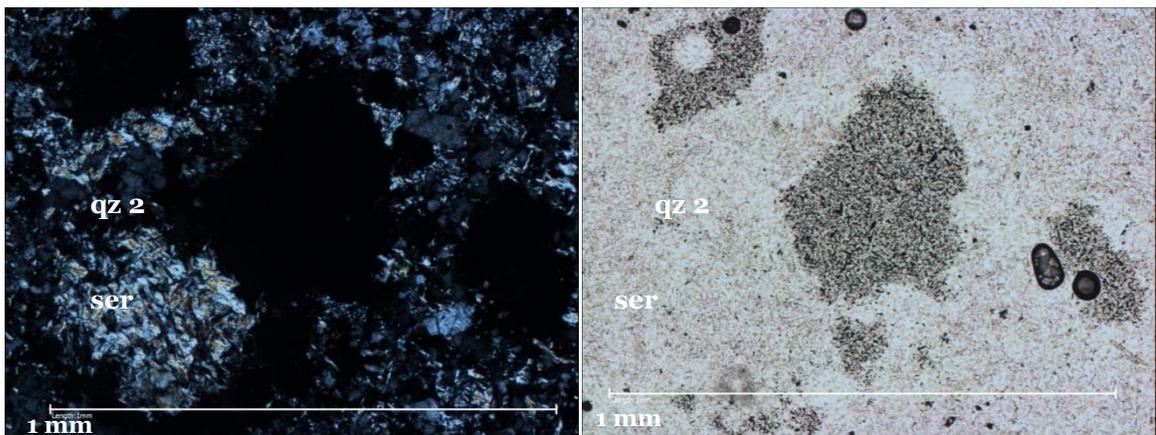
No se observa nada de mineralogía primaria. Hay pequeños cristales de cuarzo en los cuales, la mayoría tiene su cara cubierta por algún mineral muy pequeño con color de interferencia alto y hace que se los cuarzos tengan aspecto sucio, lo más probable es que se trate de sericita o algún filosilicato. Se observan alrededor de un 5% de minerales opacos con formas poligonales. También se observa una masa transparente con cristales opacos en su interior, que al cruzar los nicoles se ve negro sin importar la orientación.



**Ilustración 16.** Fotomicrografía correspondiente a la muestra M2 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda. Se observan cristales de sericita (ser) de mayor tamaño.



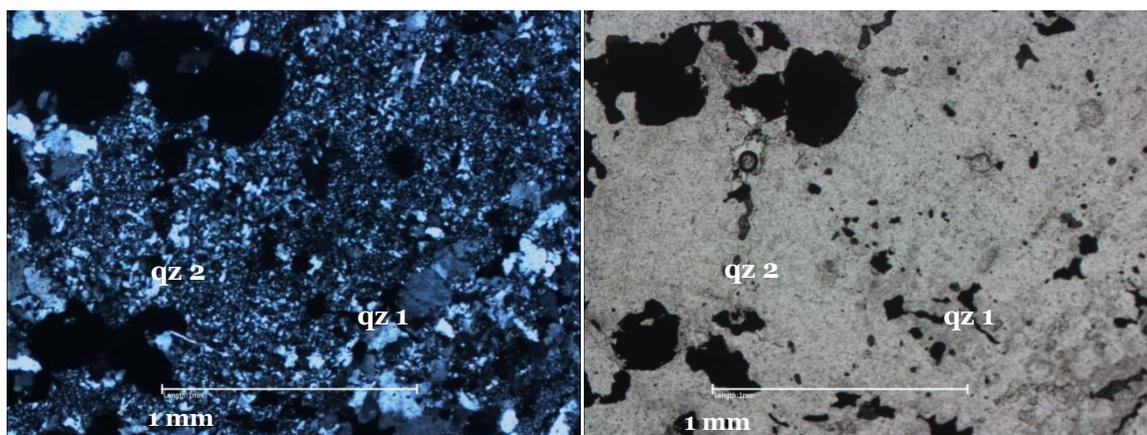
**Ilustración 17.** Fotomicrografía correspondiente a la muestra M2 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda. Se observa lo intensa de la alteración, solo es posible diferenciar los pequeños cristales de sericita a nicoles cruzados y en paralelos se observan solo manchones más oscuros. Algunos pequeños cristales de cuarzo sobresalen de entre la capa de sericita.



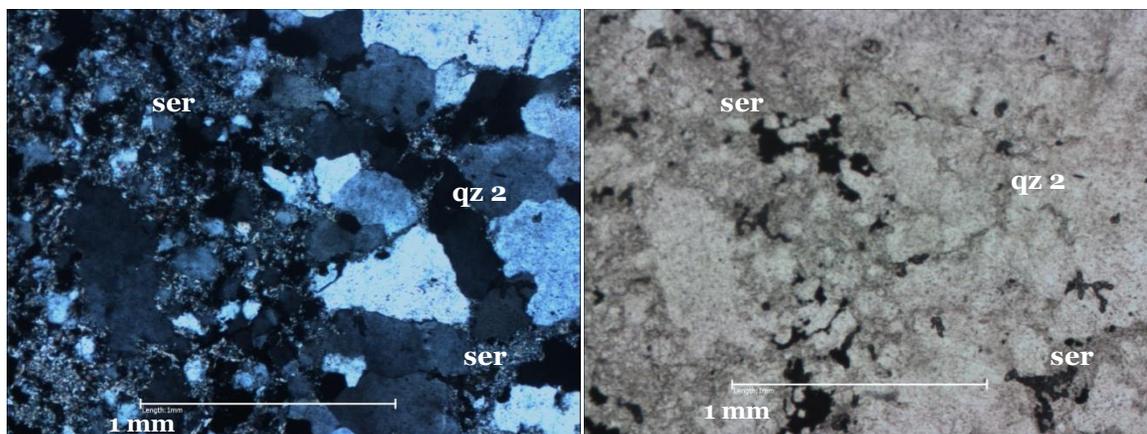
**Ilustración 18.** Fotomicrografía correspondiente a la muestra M2 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda. Se aprecia un cúmulo de cristales de sericita (ser) y pequeños cristales de cuarzo de alteración (qz 2).

### ***Muestra M3***

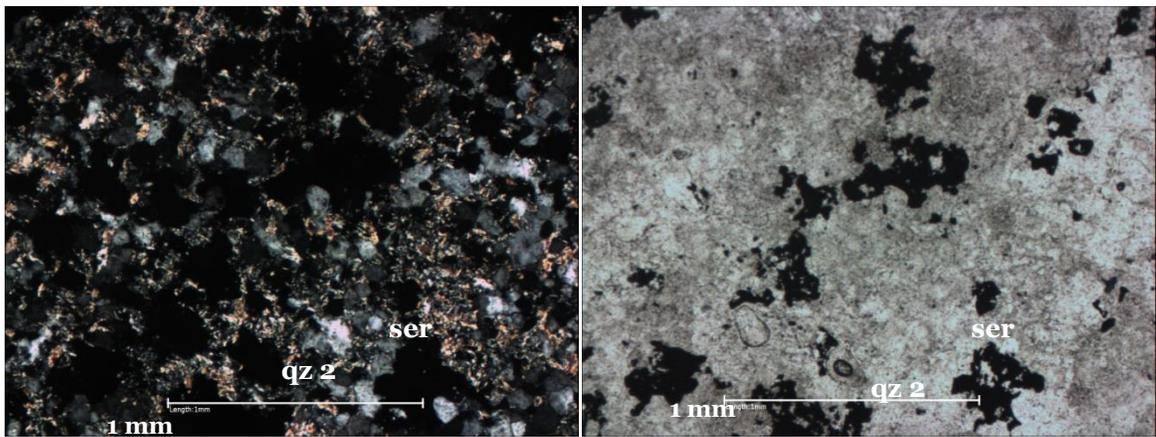
Solo se ven cristales de cuarzo primario. Todo el resto de la mineralogía corresponde a cuarzo de alteración, con tamaño de grano mucho más pequeño que los primarios y un mineral de tamaño de grano bastante menor, con color de interferencia alto, se distinguen ciertas formas aciculares y están por sobre todo el cuarzo de alteración y entre los granos. Asociado a la mineralización (opacos de forma poligonal) se observa un cuarzo cuyo tamaño de grano es mucho más pequeño que el resto. También se observa una vetilla de cuarzo, de tamaño de grano mayor y los intersticios entre los cristales están relleno del mineral blanco/café de tamaño de grano pequeño y color de interferencia alto, que podría ser sericita o algún filosilicato. Los opacos ocupan alrededor del 10% de la muestra.



**Ilustración 19.** Fotomicrografía correspondiente a la muestra M3 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda. En sectores del corte el tamaño de grano del cuarzo era mucho menor que el resto del cuarzo de alteración (qz 2) y el cuarzo primario (qz 1).



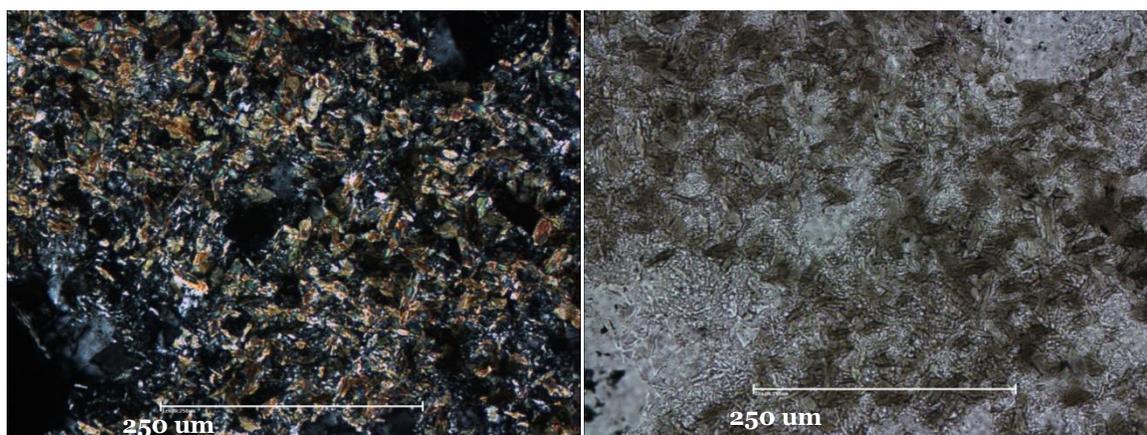
**Ilustración 20.** Fotomicrografía correspondiente a la muestra M3 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda. Se observa una vetilla de cuarzo de alteración (qz 2) en la cual la sericita (ser) se encuentra entre los granos de cuarzo y no sobre ellos como en el sector izquierdo de las imágenes.



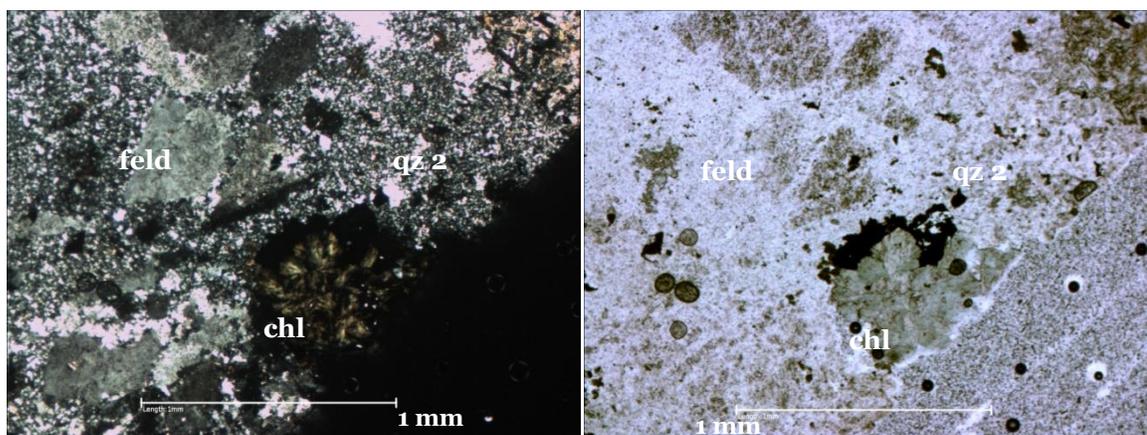
**Ilustración 21. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M3 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda. Los minerales opacos se encuentran ocupando el espacio entre los cristales de cuarzo (qz 2) y sericita (ser).**

### **Muestra M4**

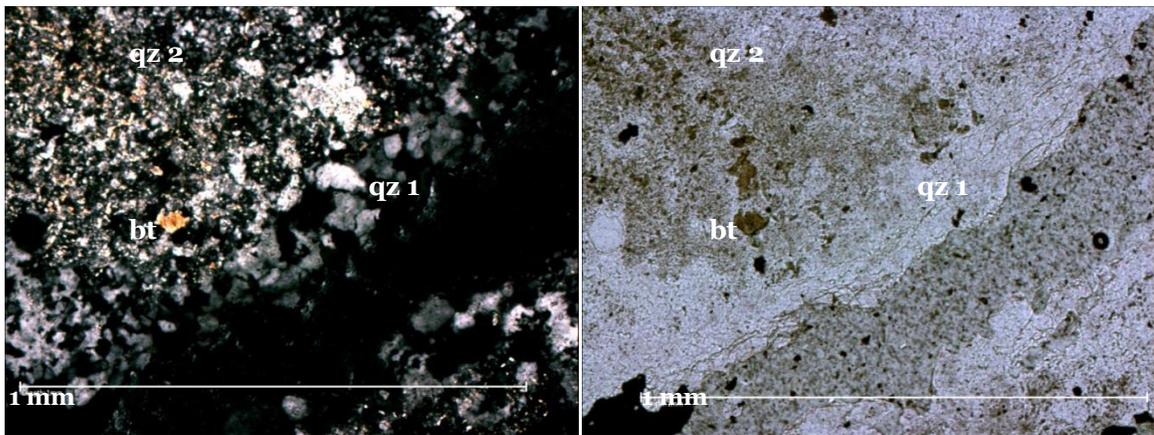
De minerales primarios solo se observan relictos de plagioclasas alteradas a sericita/filosilicato y algo de cuarzo y feldespato alterado, que se diferencia del resto por estar más “sucio” y tener un tamaño mayor. La gran mayoría de la muestra corresponde a cuarzo de alteración o recristalización del cuarzo preexistente. También hay presencia de un mineral verde, con color de interferencia café, con leve pleocroísmo de verde a incoloro que está asociado a la mineralización. También se observan pequeños cristales café que parecen ser biotitas o biotitas alteradas, ya que algunas se ven verdosas, tienen leve pleocroísmo y el color de interferencia se encuentra enmascarado en los cristales de mayor tamaño. Casi todo el corte está recubierto por este último mineral como también de sericita/filosilicato, encontrándose ambos en contacto.



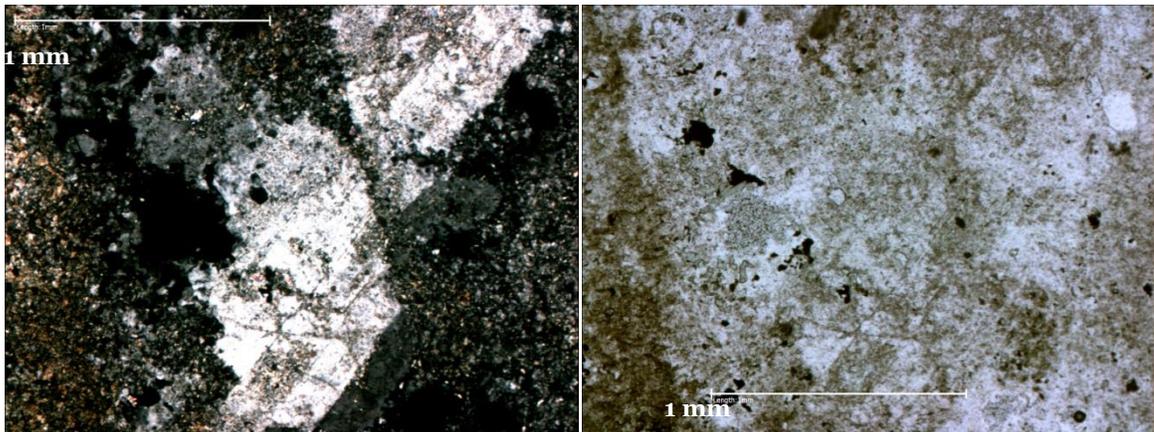
**Ilustración 22. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M4 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda.**



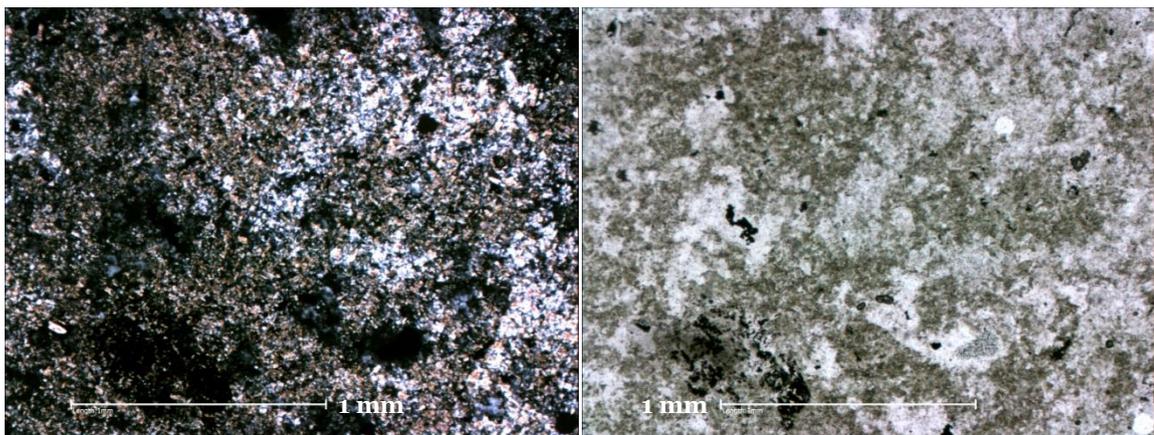
**Ilustración 23. Fotomicrografía correspondiente a la muestra M4 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda. Se observan cristales de clorita (chl), feldespato (feld) y cuarzo secundario (qz 2) con tamaño de grano menor.**



**Ilustración 24.** Fotomicrografía correspondiente a la muestra M4 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda. Se observa un cristal de biotita (bt) de mayor tamaño que el resto de biotita que se ve en la esquina superior izquierda de las imágenes. Hay cuarzo primario (qz 1) y cuarzo secundario (qz 2).



**Ilustración 25.** Fotomicrografía correspondiente a la muestra M4 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda. Se observan los relictos de un cristal de plagioclasa, se diferencia la macla polisintética y la forma tabular del cristal. Está alterado a sericita en su mayoría.

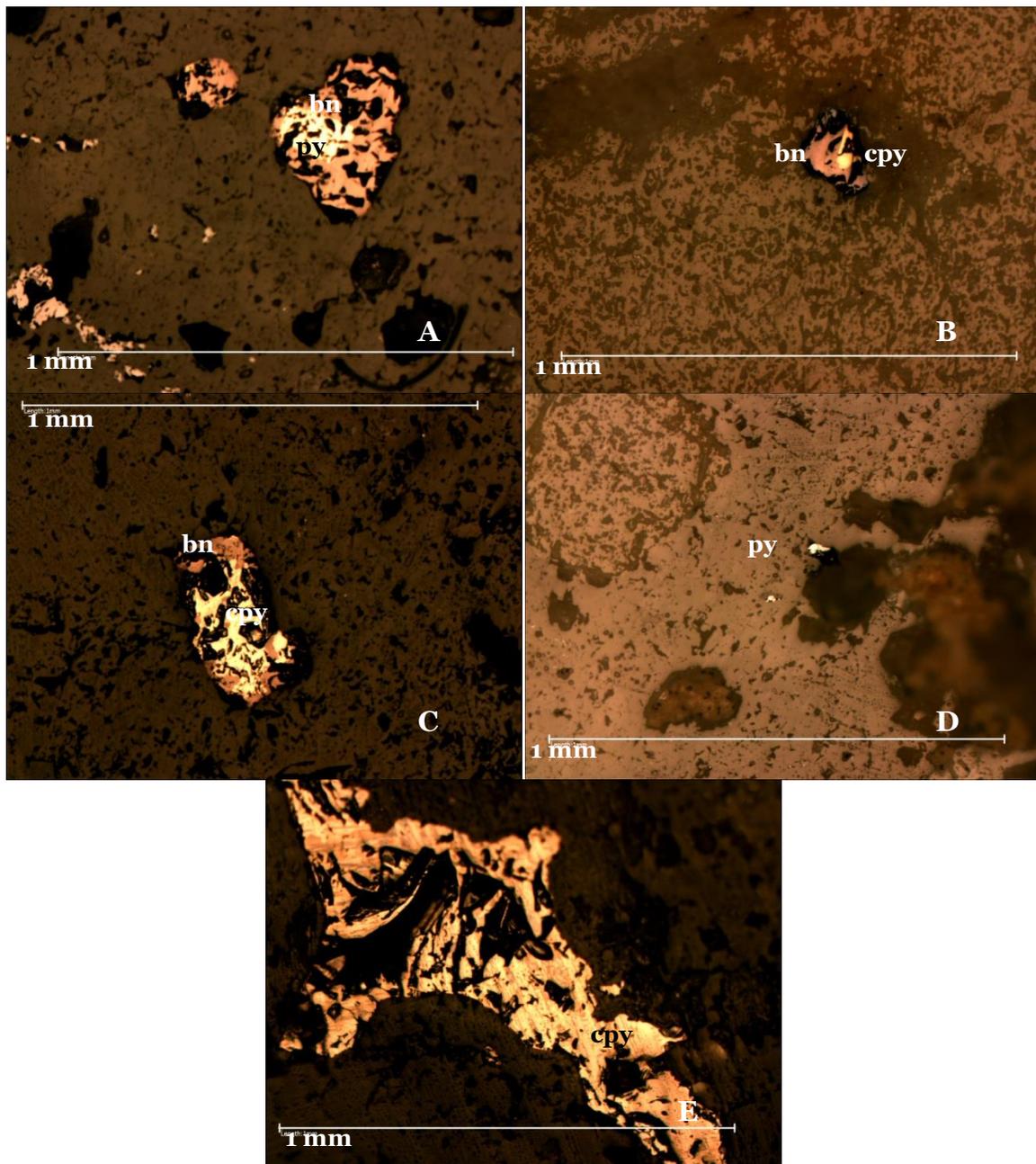


**Ilustración 26.** Fotomicrografía correspondiente a la muestra M4 del punto 1, nicoles cruzados a la derecha y nicoles paralelos a la izquierda. Se observan cristales de sericita en contacto con otro mineral (biotita alterada probablemente).

## B.2 Cortes Pulidos

### *Muestra M1*

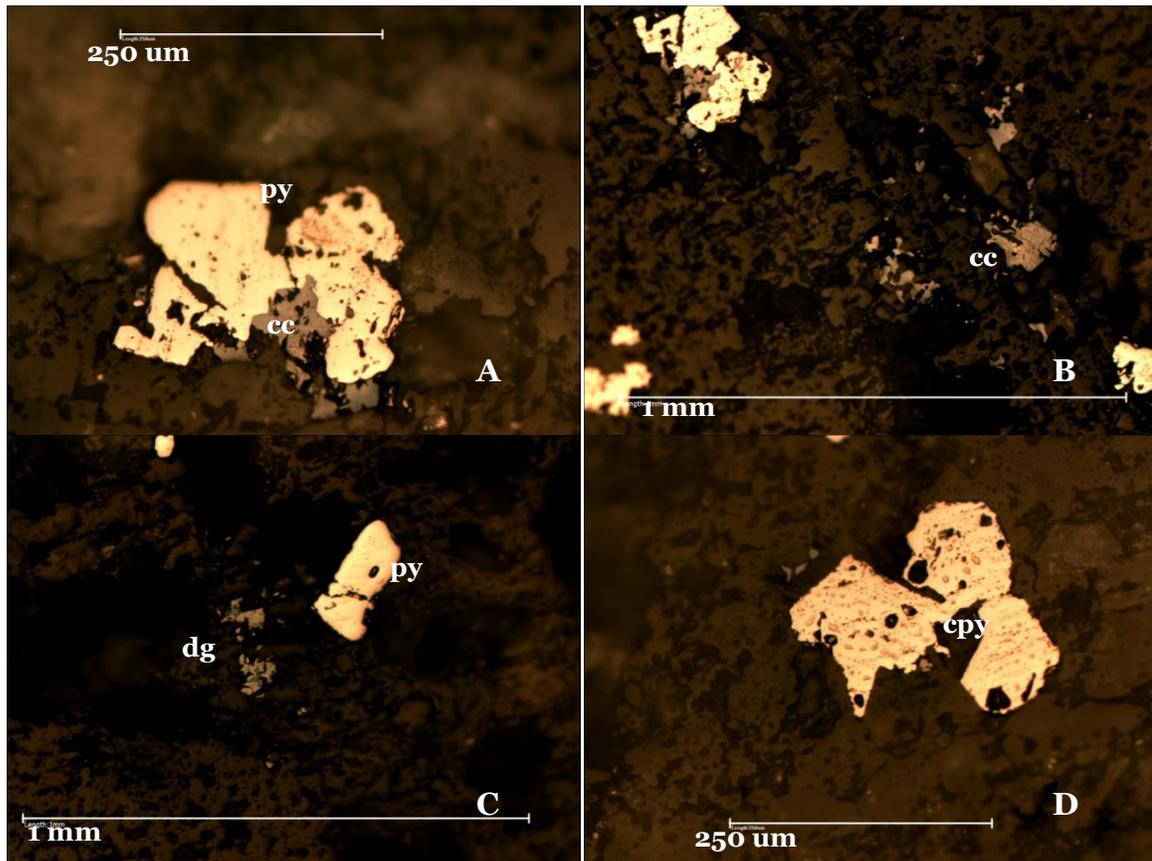
Se observa mineralización de bornita y calcopirita, separadas y creciendo juntas. También se observan granos de pirita. Algunos cristales de bornita tienen los bordes azulados o morados. La mayoría de la mineralización es bornita intercrecida con calcopirita. La mineralización es diseminada y no se observa asociada a nada en particular. Es del orden del 3-5%. Hay cristales mayores de calcopirita.



**Ilustración 27.** Fotomicrografías de muestra M1 correspondiente al punto 1. Se observa mineralización de pirita (py), bornita (bn) y calcopirita (cpy), estando estas dos últimas asociadas.

### **Muestra M2**

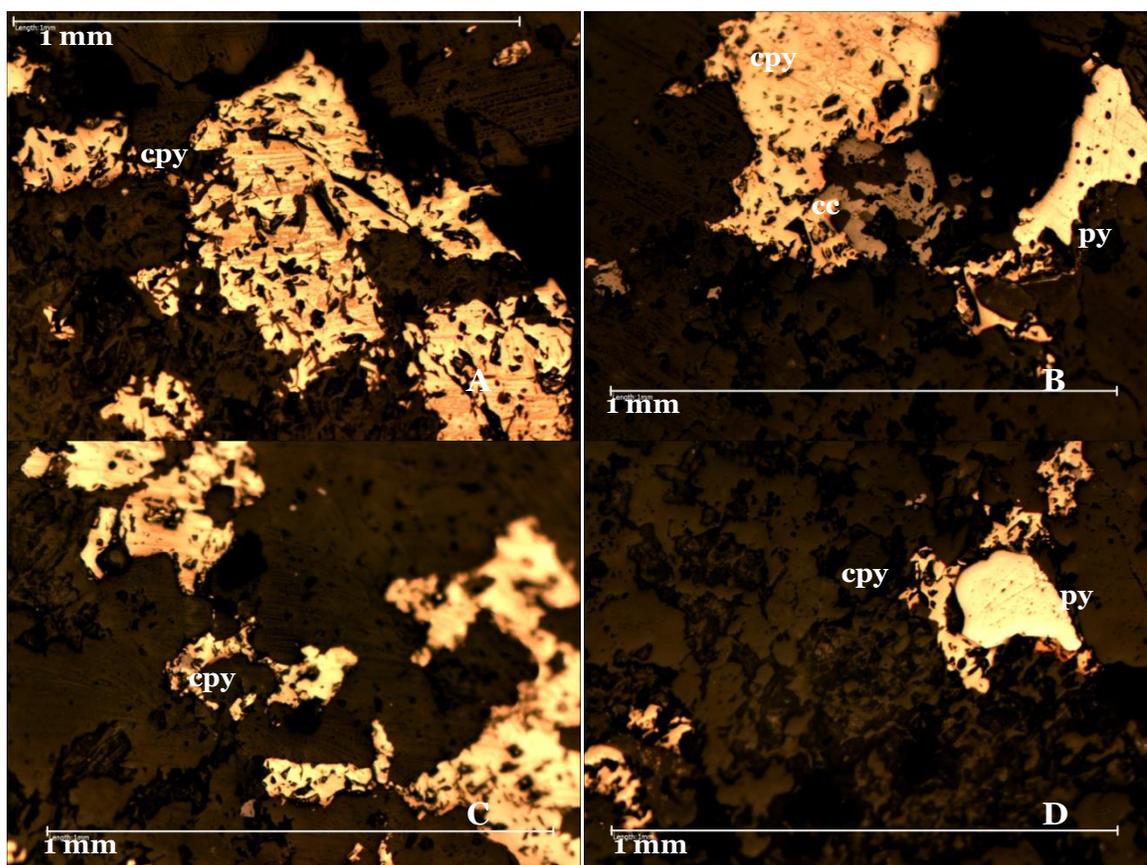
Es calcopirita o pirita, no se observan hábitos cúbicos, el color es amarillo bien claro, con alta reflectividad. La foto 1 además tiene un mineral gris azulado, con birrefringencia y sin anisotropía, con reflectividad más baja por lo que se trataría de calcosina. La mineralización es diseminada, en algunos sectores se observa cierta tendencia como vetillas de mineralización, pero muy difuso. También hay muy poca digenita. Donde la mineralización es del orden del 5% del total de la roca.



**Ilustración 28.** Fotomicrografías de muestra M2 correspondiente al punto 1. Se observa mineralización de calcosina (cc), pirita (py), calcopirita (cpy) y digenita (dg).

### **Muestra M3**

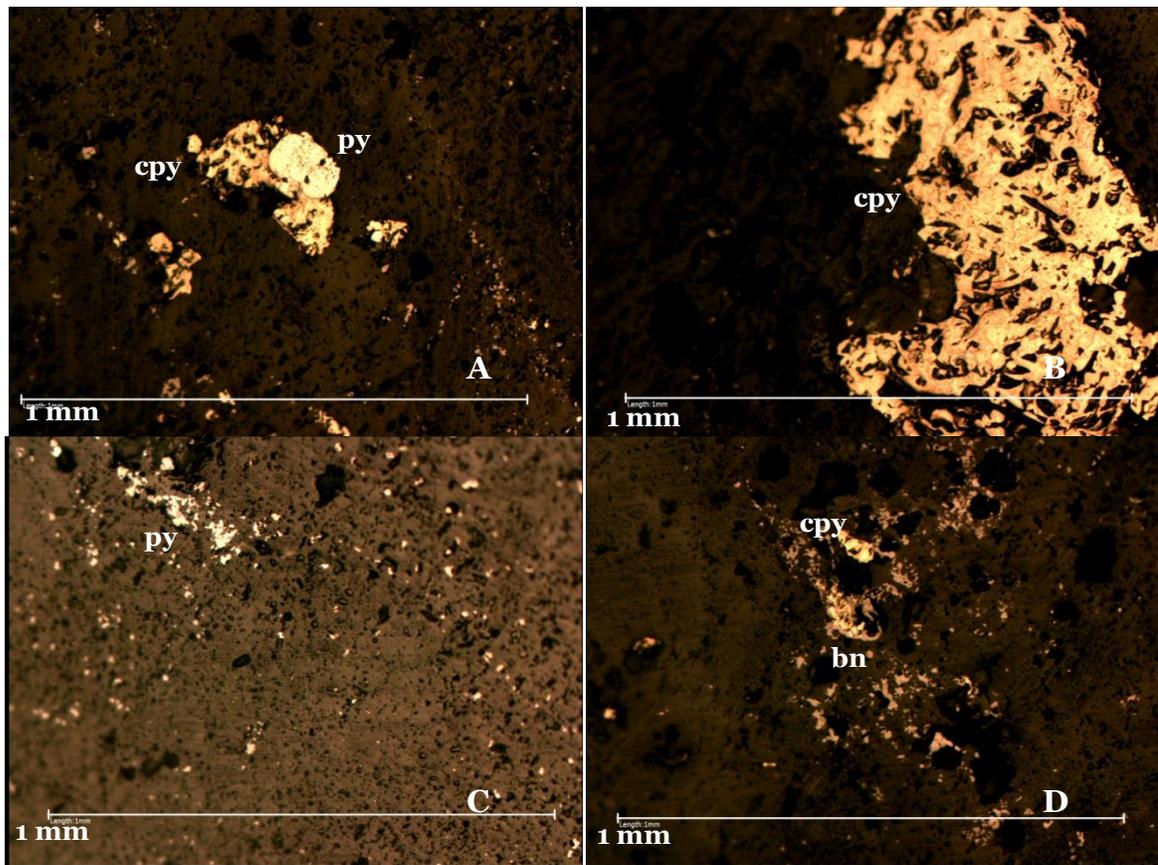
La mayor cantidad de mineralización está en forma de calcopirita, siendo el 70% de la mineralización, 25% py y el otro 5% calcosina No se observó bornita. La mineralización es alrededor del 10% de la muestra. Presentándose de forma diseminada, y formando agregados de mayor tamaño rellenando espacios alrededor de granos de minerales silicatados. Hay un mineral gris claro, sin birrefringencia, sin anisotropía y alta reflectividad que acompaña a algunos granos de cpy o py. Parte de la mineralización estaba asociada a una vetilla.



**Ilustración 29. Fotomicrografías de muestra M3 correspondiente al punto 1. Se observa mineralización de pirita (py), calcopirita (cpy) y calcosina (cc).**

### **Muestra M4**

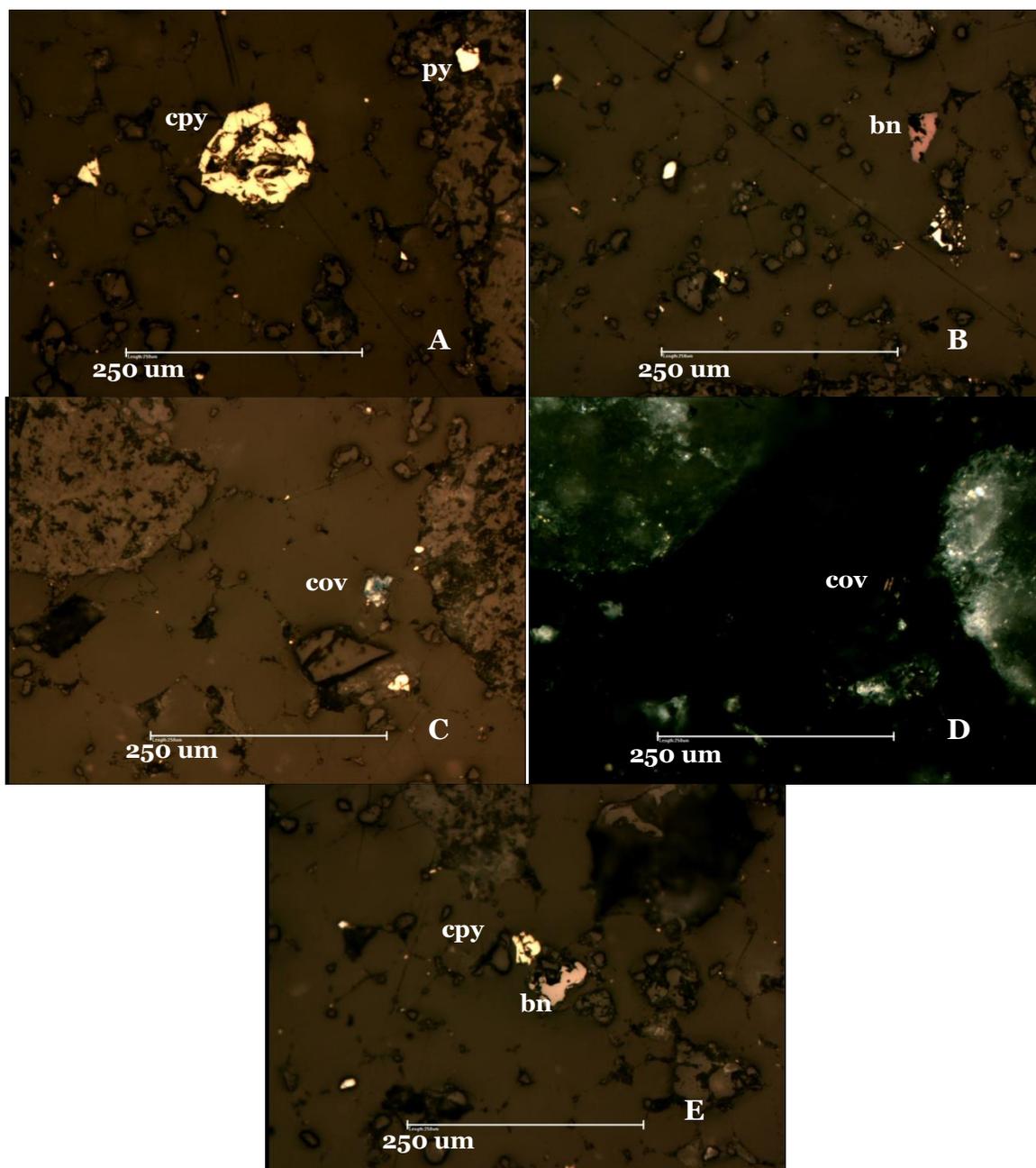
Mineralización de cpy mayoritariamente (60%), seguido de py (25%), el 15% restante se divide entre lo que podría ser bornita o molibdenita, se observa un mineral gris claro, con alta reflectividad, con poca o nula birrefringencia y sin anisotropía, algunas veces se distinguen tonos rosáceos. La mineralogía se observa diseminada en su mayoría, pero asociada a una vetilla es donde se encuentran los agregados mineralizados de mayor tamaño. En el resto de la roca la mineralización es diseminada sin encontrarse asociada a nada en particular. El mineral gris (foto 5) se encuentra asociado a la cpy, creciendo en los bordes y hacia el centro es cpy, por lo que la posibilidad de que sea bornita y no molibdenita es mayor.



**Ilustración 30. Fotomicrografías de muestra M4 correspondiente al punto 1. Se observa mineralización de pirita (py), calcopirita (cpy) y bornita (bn).**

### **Compósito mina. Muestra P1**

Se observan gran cantidad de silicatos, muy pocos asociados a mineralización, la que corresponde al 10-15% de la muestra. La mineralización esta principalmente como granos individuales, de muy pequeño tamaño. La gran mayoría corresponde a cpy (80%), mientras que el resto se divide entre molibdenita, covelina (se observa la anisotropía extrema anaranjada) y bornita.



**Ilustración 31. Fotomicrografías de compuesto mina correspondiente a la muestra del punto 1. Se observa mineralización de pirita (py), calcopirita (cpy), bornita (bn) y covelina (cov).**