



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



CARACTERIZACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE MINERALES DE COBRE DE LA ZONA DE MIXTOS Y DE ENRIQUECIMIENTO SECUNDARIO, DIVISIÓN GABRIELA MISTRAL, CODELCO, CHILE

Memoria para optar al Título de Geólogo

Cristian Andrés Ávila Gajardo

Profesor Patrocinante: Dr. Oscar Alfonso Jerez Riveros

Profesores Comisión: Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado
Msc. Abraham Elías González Martínez

Profesional Guía: Sr. Claudio Nicolás Vargas

Concepción, 2024

Dedicado a mi familia...

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Objetivo general.....	1
1.2.2. Objetivos específicos.....	1
1.3. Ubicación y accesos	2
1.4. Metodología de trabajo	2
1.4.1. Etapa I.....	2
1.4.2. Etapa II.....	4
1.4.3. Etapa III.....	5
1.5. Trabajos anteriores	6
1.6. Agradecimientos	7
2. GEOLOGÍA DISTRITAL	8
2.1. Generalidades	8
2.2. Unidades intrusivas	9
2.2.1. Complejo Plutovolcánico de Sierra Mariposas.....	9
2.2.2. Complejo Intrusivo de Pampa Elvira.....	9
2.2.3. Intrusivos Básicos.....	9
2.3 Unidades estratificadas	9
2.3.1. Paleozoico	9
2.3.1.1. Formación Cas.....	9
2.3.1.2. Estratos El Bordo.....	10
2.3.1.3. Estrados de Quebrada Escondida.....	10
2.3.2. Mesozoico	10
2.3.2.1. Grupo Purilactis.....	10
2.3.3 Cenozoico	11
2.3.3.1. Formación Tambores.....	11
2.3.3.2. Depósitos Coluviales.....	11
2.3.3.3. Depósitos Aluviales.....	11

2.4 Estructuras	11
2.4.1. Sistema NE – NNE.....	12
2.4.2. Sistema NW – NNW.....	12
2.4.3. Sistema EW.....	12
3. GEOLOGÍA YACIMIENTO GABRIELA MISTRAL	14
3.1. Generalidades	14
3.2. Unidades litológicas	14
3.2.1. Secuencia Volcánico – Sedimentaria (SV).....	14
3.2.2. Complejo Intrusivo Pampa Elvira (GD).....	15
3.2.3. Diorita Fina (DF).....	15
3.2.4. Filones Microdioríticos (FM).....	16
3.2.5. Complejo Intrusivo Gaby.....	16
3.2.5.1. Pórfido Tonalítico Crowded (PT).....	16
3.2.5.2. Pórfido Gaby (PG).....	17
3.2.5.3. Brecha Ígnea (BI).....	17
3.2.5.4. Brecha Hidrotermal (BH).....	17
3.2.6. Pórfido Diorítico (PD).....	18
3.2.7. Gravas (GR).....	18
3.3. Alteraciones	20
3.3.1. Alteraciones hidrotermales y supérgena.....	20
3.3.1.1. Alteración Potásica (K).....	20
3.3.1.2. Alteración Sericítica (Ser).....	20
3.3.1.3. Alteración Argílica (Arg).....	20
3.3.1.4. Alteración Clorítica (Clo).....	21
3.3.2. Alteraciones Operacionales.....	21
3.3.2.1. Alteración Potásica – Sericítica (K – Ser).....	21
3.3.2.2. Alteración Argílico – Sericítica (Arg – Ser).....	21
3.3.2.3. Alteración Clorítico – Sericítica (Clo – Ser).....	21
3.4. Mineralización	22
3.4.1. Etapas de mineralización.....	23
3.4.1.1. Mineralización hipógena.....	23
3.4.1.2. Mineralización supérgena.....	24
3.4.2. Perfil de mineralización.....	27
3.4.2.1. Zona de Gravas.....	27
3.4.2.2. Zona Lixiviada.....	28

3.4.2.3. Zona de Oxidación.....	28
3.4.2.4. Zona Mixta.....	28
3.4.2.5. Zona de Enriquecimiento Supérgeno	28
3.4.2.6. Zona de Mineralización Hipógena.....	28
3.4.2.7. Filones.....	29
3.4.3. Unidades de mineralización.....	29
3.4.3.1. Distribución de unidades de Óxidos.....	31
3.5. Estructural.....	31
3.5.1. Sistema NE.....	31
3.5.2. Sistema NW.....	33
3.5.3. Sistema NS.....	33
3.5.4. Sistema EW.....	33
3.6. Controles geológicos de la mineralización.....	35
3.6.1. Sectores Norte y Centro.....	36
3.6.2. Sector Sur.....	36
3.6.3. Sector Oeste.....	36
4. HIDROMETALURGIA EN DIVISIÓN GABRIELA MISTRAL.....	37
4.1. Hidrometalurgia.....	37
4.2. Proceso de lixiviación actual en División Gabriela Mistral.....	37
4.3. Lixiviación de minerales de cobre.....	40
4.3.1. Lixiviación de minerales oxidados de cobre.....	40
4.3.2. Lixiviación de minerales sulfurados de cobre.....	40
4.4. Variables que condicionan el proceso de lixiviación.....	41
5. RESULTADOS.....	44
5.1. Caracterización y distribución geológica	44
5.1.1. Tratamiento de base de datos.....	44
5.1.2. Distribución de menas de mixtos y enriquecimiento secundario.....	46
5.1.2.1. Litología y alteración.....	46
5.1.2.2. Profundidad.....	50
5.1.2.3. Mineralización.....	52
5.1.3. Análisis y caracterización geológica.....	59
5.1.3.1. Mixtos.....	59
5.1.3.2. Enriquecimiento secundario.....	65
5.1.4. Metalogénesis de la zona de mixtos y enriquecimiento.....	70

5.2. Caracterización mineralógica.....	72
5.2.1. Selección de muestras.....	72
5.2.2. Microscopio óptico.....	73
5.2.3. Mineralogía automatizada QEMSCAN®.....	79
5.3. Potencial de recuperación con lixiviación ácida.....	89
5.3.1. Cobre soluble a 1 y 5 horas.....	89
5.3.2. Δ CuS de Mixtos.....	91
5.3.3. Δ CuS de Enriquecimiento.....	96
5.4. Definición de subunidades.....	101
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
6.1. Conclusiones.....	103
6.2. Recomendaciones.....	104
7. REFERENCIAS.....	105
ANEXOS.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1 Mapa de ubicación y accesos a División Gabriela Mistral.....	3
2. 1 Mapa Geológico Distrital del Proyecto Gaby (actual División Gabriela Mistral).....	13
3. 1 Modelo litológico año 2017 del yacimiento Gabriela Mistral nivel 2580.....	19
3. 2 Modelo de alteración año 2017 del yacimiento Gabriela Mistral nivel 2580.....	22
3. 3 Modelo de mena año 2017 del yacimiento Gabriela Mistral nivel 2580.....	30
3. 4 Diagrama de rosa de 480 fallas del yacimiento.....	32
3. 5 Sistemas de fallas principales que afectan el yacimiento.....	34
3. 6 Distribución de sectores en función de los controles de mineralización.....	35
4. 1 Diagrama Eh-pH del sistema Cu-S-H ₂ O a 25°C con estabilidad de minerales de Cu.....	41
4. 2 Serie de Bowen con cinética de lixiviación.....	42
5. 1 Distribución de la totalidad de sondajes del yacimiento.....	45
5. 2 Distribución de la zona de mixto por litología y alteración.....	46
5. 3 Distribución de leyes en función de la litología y alteración para la zona de mixtos.....	47
5. 4 Distribución de la zona de enriquecimiento secundario por litología y alteración.....	48
5. 5 Distribución de leyes en función de la litología y alteración para la zona de enriquecimiento.....	49
5. 6 Gráfico de barras apiladas con la distribución de las menas en relación con la profundidad.....	50

5.	7	Gráfico de barras apiladas con la distribución de Enriquecimiento y Mixtos en relación con la profundidad.....	51
5.	8	Mapas de contorno según intensidades de mineralización de los óxidos arcillas con cobre y óxidos negros de la zona de mixtos.....	52
5.	9	Mapas de contorno según intensidades de mineralización de los óxidos atacamita y crisocola de la zona de mixtos.....	53
5.	10	Mapas de contorno según intensidades de mineralización de minerales de enriquecimiento para la zona de mixtos.....	54
5.	11	Mapas de contorno según intensidades de mineralización de sulfuros primarios para la zona mixtos.....	55
5.	12	Mapas de contorno según intensidades de mineralización de minerales de ganga para la zona de mixtos.....	56
5.	13	Mapas de contorno según intensidades de mineralización de sulfuros secundarios para la zona de enriquecimiento.....	57
5.	14	Mapas de contorno según intensidades de mineralización de sulfuros primarios para la zona de enriquecimiento.....	58
5.	15	Gráficos de distribución log-logística de 3 parámetros para mena de mixto.....	60
5.	16	Gráficos de método del Codo y Silueta para la zona de mixtos.....	61
5.	17	Gráfico de dispersión de la razón de solubilidad y cobre soluble con <i>clustering</i> para la zona de mixtos.....	62
5.	18	Mapa con distribución de <i>clusters</i> de la zona de mixto.....	63
5.	19	Mapa con la distribución de las poblaciones definidas para la zona de mixtos.....	64
5.	20	Gráficos de distribución log-logística de 3 parámetros para mena de enriquecimiento.....	65
5.	21	Gráficos de método del Codo y Silueta para la zona de enriquecimiento.....	66
5.	22	Gráfico de dispersión de la razón de solubilidad y cobre soluble con <i>clustering</i> para la zona de enriquecimiento.....	66
5.	23	Mapa con distribución de <i>clusters</i> de la zona de enriquecimiento.....	67
5.	24	Mapa con la distribución de las poblaciones definidas para la zona de enriquecimiento.....	68
5.	25	Mapa con la distribución de las poblaciones definidas para las zonas de mixtos y de enriquecimiento secundario.....	69
5.	26	Perfil de enriquecimiento supérgeno del yacimiento Gabriela Mistral.....	70
5.	27	Mapa con la distribución de las muestras seleccionadas.....	73
5.	28	Granos de calcopirita (Cpy) y calcosina (Cc) en nicoles paralelos (NP).....	74
5.	29	Calcopirita (Cpy) y calcosina (Cc) en proceso de enriquecimiento.....	74
5.	30	Magnetita (Mgt) siendo reemplazada por hematita (Hm).....	75
5.	31	Calcosina (Cc) reemplazando calcopirita (Cpy) y grano de pirita.....	76
5.	32	Granos de calcosina (Cc) y calcopirita (Cpy) en nicoles cruzados (NC).....	76
5.	33	Calcosina (Cc) y covelina reemplazando bornita (Bn).....	77
5.	34	Calcosina (Cc) y covelina (Cv) reemplazando calcopirita (Cpy).....	77
5.	35	Grano mineral de calcosina (Cc).....	78
5.	36	Calcosina (Cc) y covelina (Cv) en proceso de enriquecimiento.....	78
5.	37	Calcosina (Cc) y covelina (Cv) en reemplazo de bornita (Bn) y calcopirita (Cpy).....	79
5.	38	Asociación mineral de M1.....	81

5.	39	Asociación mineral de M2.....	81
5.	40	Asociación mineral de M3.....	82
5.	41	Asociación mineral de M4.....	83
5.	42	Asociación mineral de M5.....	84
5.	43	Asociación mineral de M6.....	84
5.	44	Asociación mineral de M7.....	86
5.	45	Asociación mineral de M8.....	87
5.	46	Asociación mineral de M9.....	88
5.	47	Asociación mineral de M10.....	88
5.	48	Gráfico de dispersión de razón de solubilidad a1 y 5 horas para mena de mixtos.....	89
5.	49	Gráfico de dispersión de razón de solubilidad a1 y 5 horas para mena de enriquecimiento...	90
5.	50	Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para mena de mixtos.....	91
5.	51	Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para óxidos atacamita y crisocola de la mena de mixtos.....	92
5.	52	Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para óxidos arcillas con cobre y óxidos negros de la mena de mixtos.....	93
5.	53	Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para sulfuros secundarios de la mena de mixtos.....	94
5.	54	Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para sulfuros primarios de la mena de mixtos.....	95
5.	55	Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para mena de enriquecimiento.....	97
5.	56	Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para sulfuros secundarios de la mena de enriquecimiento.....	98
5.	57	Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para sulfuros primarios de la mena de enriquecimiento.....	99
5.	58	Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para mena de enriquecimiento.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
3. 1 Código de unidades de mineralización.....	29
4. 1 Características principales de los diferentes tipos de lixiviación.....	38
5. 1 Muestras seleccionadas para análisis QEMSCAN®.....	72
5. 2 Resultados de la mineralogía modal en porcentajes para la zona de mixtos con la técnica QEMSCAN®.....	80
5. 3 Resultados de la mineralogía modal en porcentajes para la zona de enriquecimiento con la técnica QEMSCAN®.....	85

RESUMEN

La División Gabriela Mistral (DGM) perteneciente a la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO), corresponde a un yacimiento del tipo pórfido cuprífero que presenta un importante desarrollo de la zona de óxidos de baja ley que son procesados por hidrometalurgia. Actualmente, las fases de explotación están llegando a los límites con las zonas de minerales mixtos y de enriquecimiento secundario, sin embargo, solo se conocen como volúmenes de mineralización. Por ello, en este trabajo se buscó caracterizar estas zonas e identificar cómo se distribuyen en el yacimiento, y estimar el potencial de recuperación que tienen estas zonas bajo el proceso actual de lixiviación ácida, utilizando para ello, el análisis de datos de pruebas de solubilidad de cobre a 1 y 5 horas. La metodología de este trabajo se basó en la recopilación bibliográfica del área de estudio, que incluye informes de geología regional hasta informes técnicos internos de la División, y análisis de base datos de sondajes históricos del yacimiento con interpretación gráfica y estadística mediante el uso de programas como Mintab® y Surfer®. Adicionalmente se seleccionaron muestras de rechazo de sondajes y se realiza una caracterización mineralógica por microscopía óptica y mineralogía automatizada QEMSCAN® utilizando el método PMA (*Particle Mineral Analysis*) en el Instituto de Geología Economía Aplicada. La caracterización geológica del yacimiento indica, a partir de la distribución de los datos, comportamiento y distribución de los minerales, que existen tres poblaciones en la zona de mixtos y dos en la zona de enriquecimiento, cuya distribución está controlada principalmente por parámetros estructurales que permiten el desarrollo de ambientes de acidez variable, que condicionan la precipitación de minerales de la zona de mixtos y de enriquecimiento. La caracterización mineralógica permite identificar y describir minerales, sus texturas y asociaciones minerales, así como obtener datos cuantitativos y estadísticos sobre la mineralogía, donde destacan procesos de enriquecimiento de cobre, evidenciado por el reemplazo de calcopirita por minerales de covelina y calcosina, y la abundante presencia de minerales de alteración como sericita y arcillas. El potencial de recuperación para la zona de mixtos viene dado por la fracción oxidada y por la presencia de calcosina, donde la población con mayor presencia de este mineral indica un incremental en la recuperación de cobre en el tiempo, mientras que para la zona de enriquecimiento secundario solo viene dado por la calcosina, que es el mineral que presenta el mayor potencial de recuperación, a diferencia de la covelina, calcopirita y bornita, que son refractarios bajo el proceso de lixiviación actual. Se determina una subdivisión de unidades en la zona de mixtos basado en los parámetros geológicos y el aporte de la calcosina en las poblaciones identificadas, donde se define un Mixto Primario y un Mixto Secundario. El estudio geológico de las zonas de mixtos y de enriquecimiento secundario proporcionan una visión integral de los procesos supérgenos, reflejando el equilibrio dinámico entre la oxidación y reducción, y las diferentes variables que lo controlan. Se sugiere realizar pruebas adicionales para comprender la respuesta de los minerales a la lixiviación.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

La División Gabriela Mistral (DGM) perteneciente a la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO), corresponde a un yacimiento del tipo Pórfido Cuprífero que presenta un importante desarrollo de la zona de oxidación con mineralización de crisocola, atacamita, arcillas con cobre y óxidos negros, junto con un desarrollo de sulfuros hipógenos. La explotación se efectúa a rajo abierto y actualmente solo se procesan los minerales oxidados de cobre (Cu) de baja ley. El tratamiento del mineral se conforma por las etapas de chancado (primario, secundario y terciario), curado en tambores acidificadores, lixiviación en pilas dinámicas, disposición de ripios, extracción por solventes (SX) y electroobtención (EW), para producir cátodos de Cu de alta calidad química y muy buen aspecto físico.

Los factores geológicos de un yacimiento tienen repercusiones en las aristas mineras y metalúrgicas involucradas en el procesamiento del mineral de interés. Para este yacimiento en particular, está adecuadamente caracterizada la zona de oxidación, y aunque, el conocimiento geológico de la zona de mixtos y de enriquecimiento secundario está definido y modelado, no ha sido estudiado a detalle. Actualmente, las fases de explotación están llegando a los límites de estas zonas más profundas, sin embargo, estas se conocen solo como volúmenes de mineralización. Por ello, en este trabajo se busca caracterizar estas zonas de mixtos y de enriquecimiento secundario, e identificar cómo se distribuyen en el yacimiento. Adicionalmente, se estimará el potencial de recuperación que tienen bajo el proceso actual de lixiviación ácida mediante el análisis de datos existentes, correspondientes a pruebas de solubilidad de cobre a 1 y 5 horas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Ampliar el conocimiento geológico de la zona de mixtos y de enriquecimiento secundario, mediante la caracterización mineral de estas zonas y determinar su máximo potencial de recuperación mediante lixiviación ácida.

1.2.2. Objetivos específicos

- Filtrar e interpretar base de datos histórica de sondajes del yacimiento.

- Describir características geológicas de las zonas de mixtos y de enriquecimiento secundario
- Seleccionar y preparar muestras de rechazo de sondajes para realizar descripción mineralógica mediante Microscopía Óptica y mineralogía automatizada QEMSCAN®.
- Analizar el comportamiento del cobre soluble a 1 y 5 horas, y determinar potencial de recuperación.
- Evaluar la generación de subunidades dentro de la zona de mixtos y de enriquecimiento secundario.

1.3. Ubicación y accesos

La División Gabriela Mistral se ubica en la comuna de Sierra Gorda, provincia de El Loa, Región de Antofagasta, Chile, a 900 km al norte de Santiago, 210 km al noreste de la ciudad de Antofagasta y a 120 km al suroeste de Calama. Está emplazada en el flanco oriental de la Cordillera de Domeyko, con altitud promedio es de 2.660 m s.n.m.

Los accesos a faena se muestran en la Figura 1.1. Se puede llegar desde Calama por la Ruta B-23 en dirección sur, ruta que une Calama - San Pedro de Atacama. En el kilómetro 12, hay un desvío que pone en contacto la Ruta B- 23 con la ruta B-255, que corresponde a un camino de tierra compacta, en buen estado, por el cual se recorren 104 km hacia el suroeste. El viaje por esta ruta tiene una duración aproximada de 1 hora y 30 minutos. Desde la ciudad de Antofagasta se accede por la Ruta 26, en dirección este, hasta la intersección con la carretera Panamericana Ruta 5, la cual se recorre en dirección noreste hasta la localidad de Baquedano. Luego, por la Ruta B-385, en dirección este, se transita por 114 km, hasta el Salar de Elvira, donde comienza el recorrido por un camino de ripio de 17 km en dirección norte. El recorrido por esta ruta demora aproximadamente 2 horas y 30 minutos.

1.4. Metodología de trabajo

1.4.1. Etapa I

Recopilación de información bibliográfica general del área de estudio, para la contextualización en términos relacionados al yacimiento Gabriela Mistral, como la geología distrital de la zona, la geología a nivel de yacimiento, etapas de mineralización, estructuras mayores y menores que afectan el área, y el proceso completo para la obtención del mineral.

Conjuntamente, se realiza una compilación y estudio de trabajos previos relacionados con la geometalurgia aplicada en el yacimiento, colección de datos y metodología para extrapolar información e inferir comportamiento metalúrgico.

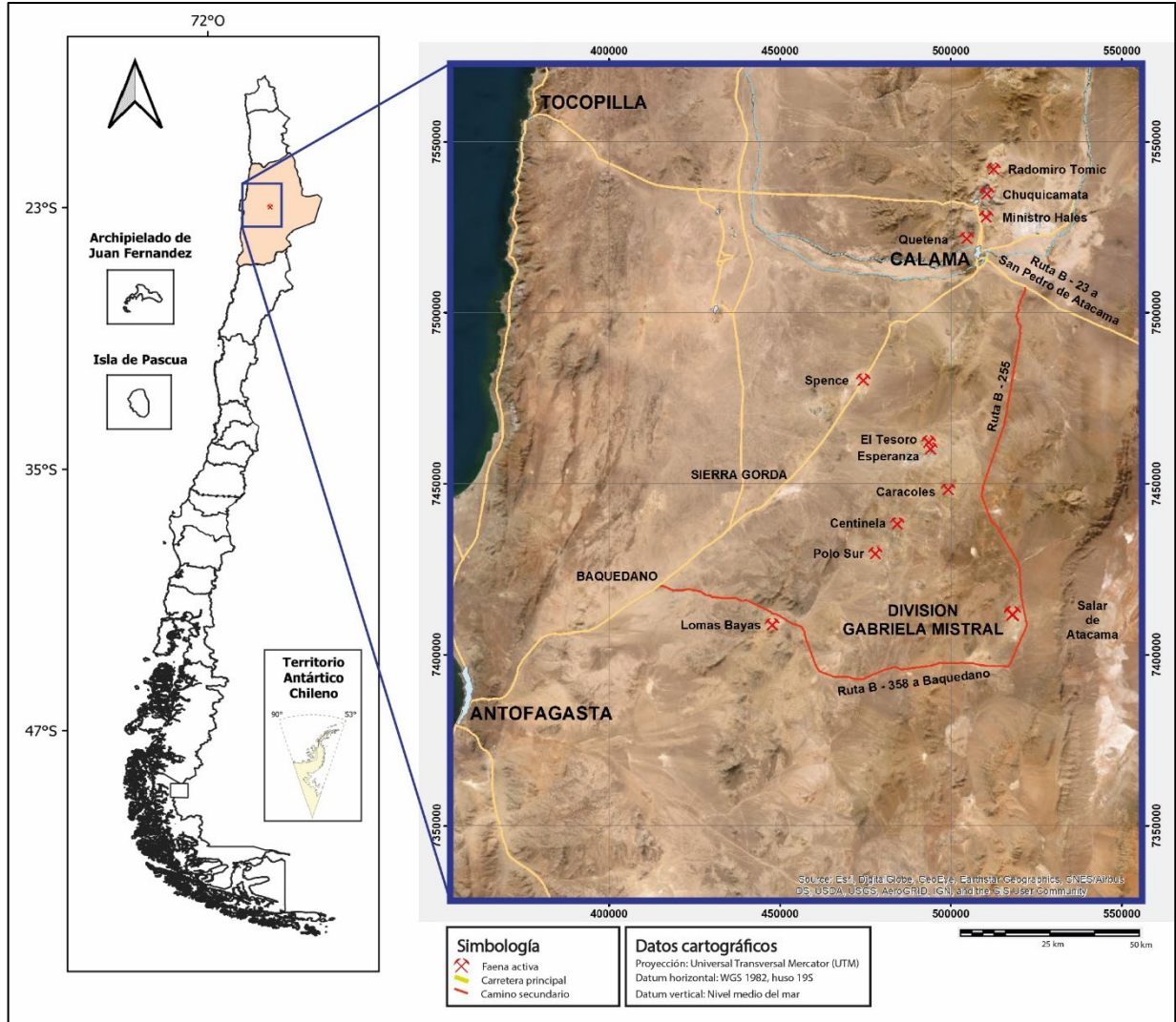


Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos a División Gabriela Mistral.

1.4.2. Etapa II

Análisis de base de datos con información de sondeos históricos del yacimiento, que involucra la filtración de datos de interés. Además, se realiza la interpretación gráfica y estadística de las variables a tratar mediante el programa Minitab®. A partir de esta información se caracteriza geológicamente las zonas de mixtos y de enriquecimiento secundario, con las variables de litología, mena, alteraciones, mineralización y su ocurrencia, y se describe su distribución en el yacimiento, por medio de la

observación del modelo 3D existente en el programa Leapfrog Geo® y la creación de mapas de isocontenido en el programa Surfer®.

Asimismo, se realiza la selección, recolección y preparación de muestras de rechazo de sondaje (sobres AQ) para caracterización mineralógica por microscopía óptica y mineralogía automatizada QEMSCAN®.

a. Microscopio Óptico

La microscopía óptica de luz transmitida y reflejada es una de las técnicas utilizadas para la determinación de las propiedades ópticas, identificación de los minerales, estudio de texturas y relaciones entre los minerales y la clasificación de rocas. Para la descripción calcográfica y petrográfica, se utiliza la luz transmitida en la identificación de minerales silicatados, mientras que para la identificación de minerales metálicos (opacos) se usa la luz reflejada.

El equipo usado pertenece al Instituto de Geología Económica Aplicada y corresponde al microscopio Nikon modelo OPTIPHOT 2-POL con sistema de luz polarizada y reflejada, equipado con objetivos 5×, 10×, 20× y 40×. Además, se utiliza un cámara digital acoplada a microscopio marca Nikon® modelo DS-Fi3: 5.9 de alta resolución para la obtención de fotomicrografías que evidencian minerales y texturas características manipuladas a través del programa NIS-Elements Viewer 4.5. de marca Nikon®.

b. QEMSCAN®

El análisis cuantitativo de la mineralogía mediante microscopía electrónica de barrido o QEMSCAN® (*Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy*) es una técnica analítica automatizada que permite el ordenamiento espacial de información inferida en base a espectros químicos, con el fin de obtener información cuantitativa y estadística como la abundancia de cada fase mineral, tamaño y forma de partículas, cálculo de áreas reactivas, entre otras características (Tapia, 2023).

El equipo corresponde a un microscopio electrónico de barrido compuesto por una fuente de emisión de electrones, bombas rotatorias, una columna de lentes electromagnéticos, una cámara, además de detectores de emisiones y procesadores de pulso. Específicamente, el equipo utilizado en este trabajo corresponde al modelo FEI Quanta 650 QEMSCAN-TM del Instituto de Geología Económica Aplicada. Los resultados obtenidos son revisados en el programa IDiscover 5.3.

La muestra granular se dispone en una briqueta mezclada con resina epoxy, cuya superficie a analizar es pulida y cubierta con una delgada capa de grafito, lo que permite la conducción del haz de electrones primarios que impactará sobre cada partícula expuesta. El mapeo y cuantificación de las fases se realiza mediante la combinación de las emisiones de electrones retrodispersados BSE (*Back-Scattered Electrons*) y rayos X EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectrometry*).

La superficie de la briqueta es escaneada dentro de una cuadrícula que determina el área a caracterizar. El haz recorre rápidamente cada campo generando una imagen BSE diferenciando cada partícula del *background* (resina) lo que permite que sólo las partículas sean analizadas por rayos X. La obtención de estos espectros se realiza punto por punto en las direcciones X e Y con un espaciamiento regular PS (*Point Spacing*) que se determina previo a la lectura, y que depende del tamaño promedio de las partículas. Las señales detectadas en cada punto alimentan una librería que contiene diferentes fases minerales, y se clasifican según con la que tengan una mayor coincidencia (Andaur, 2023). Como resultado, se obtienen imágenes pixeleadas 2D y en falso color, limitadas por una resolución de 5 μm , donde cada píxel conserva su información elemental de brillo BSE.

Para este estudio en particular, se utilizó el método PMA (*Particle Mineral Analysis*), técnica que analiza todas las partículas de la briqueta, entregando resultados cuantitativos que permiten conocer la mineralogía modal, aporte elemental (por estequiometría), ocurrencia de elementos de interés, grados de liberación de las fases, tamaño de granos y asociaciones minerales.

1.4.3. Etapa III

Interpretación de los resultados de análisis de cobre soluble a 1 y 5 horas para las menas de mixtos y de enriquecimiento. Se estima el potencial de recuperación de Cu para las diferentes zonas, y se proponen subunidades para la zona de mixtos y subunidades para la zona de enriquecimiento secundario en función de sus características geológicas y comportamiento geometalúrgico.

Se realizan las conclusiones del trabajo y se ofrecen recomendaciones para estudios futuros.

1.5. Trabajos anteriores

A continuación, se realiza un resumen de diversos autores, cuyos trabajos de investigación son relevantes y han contribuido al entendimiento geológico del yacimiento.

Behn y Skarmeta (1998) realizan la primera compilación de la información geológica, estructural y geofísica del yacimiento Gaby y su distrito y/o entorno, entregando información del cuerpo mineralizado.

Fam y otros (1999) realizan un informe de Estudio Geológico Distrital e Interpretación de zonas cubiertas.

Plaza (2001), en su memoria “Geología del pique y galerías del Proyecto Gaby”, hace levantamientos geológicos y geotécnicos del pique y galerías, caracterización metalúrgica de las marinas, conciliación y mejora del Modelo Geológico y Modelo de Bloques 2001.

Rojas y otros (2004) realizan actividades complementarias sobre los aspectos geológicos y geometalúrgicos, complementando la información requerida para el desarrollo de la ingeniería básica.

Méndez (2009), en el marco de su memoria de título, estudió la geología de la zona de sulfuros hipógenos del pórfido cuprífero Gaby.

Basso y Mpodozis (2012) confeccionan la Carta Cerro Quimal en la Región de Antofagasta a escala 1:100.000 que contiene la representación gráfica de la geología regional de la zona ubicada entre los 23°-23°30'S y los 68°30'-69°O en la Región de Antofagasta.

Vergara (2015) realiza un estudio de la relación entre algunas variables físico-metalúrgicas y los procesos geológicos del yacimiento, con el fin de robustecer el modelo geometalúrgico de la Minera.

Donoso (2018), en su memoria de título, realiza una caracterización mineralógica del yacimiento Gaby, con énfasis en la distribución de arcillas.

1.6. Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a CODELCO, División Gabriela Mistral por brindarme la oportunidad de desarrollar mi memoria en sus dependencia. Mis sinceros agradecimientos a cada uno de los integrantes de la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo.

En particular, agradecer al Superintendente de Geología, Claudio Nicolás Vargas, por su guía y disposición a resolver todas mis dudas. A mi tutor Hugo López Tobar, por sus constantes palabras motivacionales y desafiantes, y por su gran actitud positiva en la cotidianidad. A don Fernando

Guerra Basulto, por compartirme su experiencia, anécdotas e historias en su extensa carrera en Gaby, y por cada una de las conversaciones entabladas en la oficina que compartimos durante mi estadía. A don Luis Plaza, por compartir su vasto conocimiento del yacimiento y su experiencia en terreno como supervisor. A los geólogos de turno Darwin Ledezma y Ángel Muñoz, y a Joanna Adaos y Marcelo Meza, por resolver mis dudas cuando lo necesitaba, por su carisma y amabilidad. Finalmente, a mis compañeras memoristas Claudia Agurto y Teresa Alcayaga por su amistad durante estos meses en faena.

Del departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Concepción, agradezco a cada uno de los docentes y auxiliares que fueron parte de mi formación académica. En particular, al Dr. Óscar Figueroa, por potenciar mis habilidades de enseñanza. A la Dra. Fernanda Álvarez por su rápida gestión como jefa de carrera cuando lo necesitaba, por su cercanía y preocupación en este periodo. A don Mauricio, don Pedro y don Iván, por excelente disposición en terreno. Agradezco a Oscar Jerez, por aceptar ser mi profesor guía de esta memoria, por resolver mis dudas y darme acceso al Instituto de Geología Económica Aplicada para la realización de ensayos de laboratorio.

Agradezco de corazón a mi familia por el apoyo incondicional brindado. A mis padres Mónica y Cesar, por su amor y apoyo en cada etapa de mi vida, por darme su confianza y poner todo a disposición para que pudiera estudiar lejos de casa. A mi hermano Sebastián, por enseñarme la actitud positiva con la que hay que afrontar la vida y sus desafíos. Por último, agradezco a las amistades que pude forjar durante mis años de estudio. A mis amigos, por el apoyo constante, por la mentalidad desafiante a superarnos día a día, por su pasión a la geología y por cada una de las divertidas historias compartidas.

2. GEOLOGÍA DISTRITAL

2.1. Generalidades

Durante el Paleozoico superior, eventos volcánicos de carácter explosivos depositaron andesitas, riolitas y tobas de composición ácida a intermedia. Estas unidades se reconocen como Estratos de Quebrada Escondida y se asocian a las volcanitas de la Formación Cas y Estratos El Bordo (Rojas y otros, 2004).

Desde el Pérmico al Triásico, se originaron stocks granodioríticos y lavas riolíticas a tobáceas, producto del emplazamiento de complejos ígneos intrusivos e intrusivo-efusivo de composición ácida a intermedia, que intruyen a las unidades del Paleozoico. Estas unidades se asocian al Complejo Intrusivo Pampa Elvira y Complejo Volcánico Sierra Mariposa (Rojas y otros, 2004).

El registro geológico comprendido entre el Pérmico y el Cretácico Superior está ausente en esta área, producto de grandes eventos erosivos que generaron una laguna estratigráfica (Donoso, 2018). Durante el Cretácico Superior, potentes sedimentos de areniscas rojas, de origen continental, se depositaron en mares someros, que se asocian a la Formación Purilactis, cuya distribución es al noroeste del área (Rojas y otros, 2004).

En el Paleógeno, cuerpos de composición diorítica, microdiorítica y tonalítica intruyeron a las rocas volcánicas e ígneas más antiguas, eventos responsables de la mineralización en el yacimiento (Rojas y otros, 2004). Durante el Cenozoico ocurren procesos distensivos y ciclos erosivos, relacionados a la Fase Quechua (Jansen y Quinzio, 1979), que acumularon sedimentos durante el Mioceno-Plioceno, y generaron extensos depósitos subhorizontales de gravas que se distribuyen por gran parte del área, correspondientes a la Formación Tambores, y dieron origen al relieve actual expresado en amplias cuencas y cordones montañosos (Rojas y otros, 2004).

En el Cuaternario, depósitos coluviales y aluviales recientes de poco espesor, rellenan los cauces de drenajes y cubren laderas de cordones de cerros donde afloran las rocas del basamento pre-Mioceno. En la parte más baja de la superficie actual de la Pampa Elvira, se desarrolla una pequeña cuenca endorreica en la cual se han acumulado y precipitado materiales salinos que constituyen el Salar de Elvira (Donoso, 2018).

A continuación, se describen las principales unidades geológicas definidas en la zona, y los rasgos estructurales más importantes.

2.2. Unidades Intrusivas

2.2.1. Complejo Plutovolcánico de Sierra Mariposas

Definido por Davidson y otros (1985). Está compuesto por dioritas de grano medio, granodioritas de anfíbol-biotita, granitos porfídicos y cuarzomozonitas a monzogranitos. Aflora al sur del yacimiento (Fam y otros, 1999). Las dataciones radiométricas realizadas en rocas de esta unidad en los sectores de Sierra Mariposa y Salar de los Morros, datan edades en roca total de 234 ± 7 Ma, 285 ± 9 Ma y 261 ± 7 Ma, equivalente al Pérmico-Triásico Medio (Mpodozis y otros, 1993).

2.2.2. Complejo Intrusivo de Pampa Elvira

Definido por Mpodozis y otros (1993). Esta unidad comprende diferentes tipos de granodioritas, granitos rosados, cuarzomonzonitas, monzogranitos, dioritas gruesas y localmente piroxenita de olivino en el sector del Cerro Pampa Elvira. Afloran principalmente en los sectores noroeste y noreste de la zona distrital (Mpodozis y otros, 1993). La edad de este complejo corresponde al Pérmico, obtenida a través de dataciones radiométricas realizadas en monzogranitos y granodioritas, de edades entre 277 ± 6 Ma y 258 ± 8 Ma, y en granito rosado de 277 ± 9 Ma (Mpodozis y otros, 1993).

2.2.3. Intrusivos Básicos

Definido por el Mpodozis y otros (1993). Su litología principal corresponde a dioritas finas y microdioritas que afloran al oeste del rajo Gaby, y se extiende por 3 km hacia el norte, a lo largo de una serie de cerros isla rodeados de gravas de la Formación Tambores. La edad mínima de estos intrusivos corresponde al Eoceno inferior, en base a correlación con intrusivos similares expuestos en el sector Polo Sur a 40 km al noroeste del distrito, que intruyen rocas andesíticas de la Formación Cinchado de edad Cretácico Superior-Eoceno inferior (Mpodozis y otros, 1993).

2.3. Unidades Estratificadas

2.3.1. Paleozoico

2.3.1.1. Formación Cas

Definida por Ramírez y Gardeweg (1982). Está compuesta principalmente por tobas riolíticas cristalino-líticas de color gris. Afloran en el sector noroeste del área, en los alrededores del Cerro Zeus y en sectores restringidos en los llanos al sur del Cerro Pampa Elvira (Muñoz, 2018). Su localidad tipo se encuentra en las cercanías de Socaire, en el borde este del Salar de Atacama

(Ramírez y Gardeweg, 1982). Su edad se determina por su relación de contacto con un intrusivo de edad Pérmico que lo corta, lo que permite acotar una edad mínima Carbonífero superior-Pérmico para la formación (Fam et al., 1999).

2.3.1.2. Estratos El Bordo

Definida por Fortt (1981). Se compone de andesitas porfídicas finas de anfíbol-piroxenos de color gris verdoso oscuro, tobas andesíticas-dacíticas finas de color gris verdoso y, en menor proporción, intercalaciones de riolitas, riodacitas y tobas riolíticas cristalinas. Debido a su carácter volcánico, se presenta de forma masiva, sin desarrollo de estratificación visible. Esta unidad aflora al noroeste del yacimiento, y al noreste del Cerro “14 de Febrero”, a lo largo de franjas discontinuas de dirección NE. Es cortada por granitos y granodioritas del Complejo Intrusivo Pampa Elvira de edad Pérmico, lo que permite asignarle una edad mínima Carbonífero superior-Pérmico inferior (Mpodozis, 1993).

2.3.1.3. Estratos de Quebrada Escondida

Definida por Mpodozis (1993). Corresponde a una secuencia de origen predominantemente volcánico con algunas intercalaciones sedimentarias, constituida por: tobas riolíticas cristalino-líticas y niveles silíceos con textura fluidal; tobas finas con sedimentos tobáceos sinos y fisibles, con delgadas intercalaciones de areniscas calcáreas en la parte intermedia; y una secuencia de areniscas, areniscas tobáceas, y tobas finas riolíticas fisibles que sobreyacen andesitas porfídicas de la base. Los afloramientos más extensos se ubican en el nor-noreste del área, en ambos costados del curso medio y superior de la quebrada Escondida, a lo largo de una franja de orientación NNE de aproximadamente 1 km de ancho y 5 km de largo. Fam y otros (1999) le asignan edad Cretácico Inferior, debido a su relación de contacto concordante con areniscas rojas sobreyacentes de Grupo Purilactis, sin embargo, sondajes de diamantina demostraron que esta unidad está intruida por granodioritas datadas en 277 ± 4 Ma, por lo que la edad mínima de Estratos de Quebrada Escondida es Pérmico inferior.

2.3.2. Mesozoico

2.3.2.1. Grupo Purilactis

Definida por Charrier y Reutter (1994). Los autores la separan en 3 formaciones. De base a techo son: Formación Tonel, Formación Purilactis y Formación Yesífera superior. Aflora en el sector nor-noreste del área, a lo largo de una franja continua de aproximadamente 2 km de ancho, con

extensión de 15 km en dirección N30°E. En el área, hay afloramientos que corresponden a una secuencia de rocas sedimentarias de origen continental de color rojizo, que se correlacionan con la Formación Purilactis (Fam y otros, 1999). Según Charrier y Reutter (1994), esta secuencia sedimentaria continua se habría depositado en un periodo de tiempo comprendido entre el Cretácico Superior y el Eoceno.

2.3.3. Cenozoico

2.3.3.1. Formación Tambores

Definida por Dingman (1963). Secuencia de areniscas y conglomerados polimícticos, subhorizontales pobremente estratificados, y niveles de ceniza en su parte superior. Gran parte del distrito se encuentra cubierta por estos depósitos de grava que rellenan las depresiones del relieve antes desarrollado, que alcanzan espesores de 330 m en las zonas de mayor desarrollo (Rojas y otros, 2006). En el curso superior de la quebrada Escondida y sus tributarios, que corresponden a la parte alta del relleno de gravas, se reconocen niveles lenticulares de tobas cineríticas blanquecinas, cuyas biotitas han sido datadas por el método K/Ar en $9,6 \pm 5$ Ma, que indica una edad mínima del Mioceno Superior-Plioceno (Mpodozis y otros, 1993).

2.3.3.2. Depósitos Coluviales

Depósitos coluviales que cubren laderas de cordones de cerros donde afloran las rocas del basamento pre-Mioceno y rellenan los sistemas de drenajes actuales, compuestas por gravas, arenas, arcillas y limos. Se asignan al Pleistoceno-Holoceno, debido a que los procesos que los originan aún están activos (Basso y Mpodozis, 2012).

2.3.3.3. Depósitos Aluviales

Corresponden a gravas, arenas, arcillas y limos principalmente de origen aluvial, que conforman extensos piedemontes y llanuras, y depósitos salinos. Se propone una edad de formación Holocena, debido a que corresponden a drenajes activos (Basso y Mpodozis, 2012).

2.4. Estructuras

Fam y otros (1999) reconocen a nivel distrital dos sistemas estructurales principales de orientación NE-NNE y NW-NNW, y un tercer sistema de orientación EW, de menor importancia, descritas a continuación.

2.4.1. Sistema NE – NNE

La estructura principal corresponde a la Falla Pampa Elvira, expuesta en forma parcial en el sector NW, de forma semicircular, reconocida en una extensión de aproximadamente 80 km, con su extremo sur en el Salar de Verónica y su extremo norte en el Llano de Mariposas. A nivel distrital su traza se encuentra expuesta por aproximadamente 5 km con rumbo entre N35°E y N50°E con marcadas inflexiones de carácter local.

En el área del yacimiento Gabriela Mistral, se ha interpretado a través de sondajes, un esquema dominante de fallas NE con desarrollo de fallas de extensión oblicua de dirección NS. Ambas tendencias serían de carácter normal (Behn y Skarmeta, 1998).

En la zona cubierta del yacimiento, se sugiere una marcada tendencia NNE a NE para la distribución de la mineralización y alteración, aunque las estructuras del sistema no presenten evidencias de mineralización de importancia.

2.4.2. Sistema NW – NNW

Constituye el segundo sistema en importancia, con una tendencia general variable entre N20°W y N60°W. Algunas estructuras de este sistema contienen mineralización visible de cobre en superficie y controlan además el emplazamiento de diques andesíticos-microdioríticos que intruyen a rocas granodioríticas del Paleozoico Superior.

Las fallas tienen corridas que van hasta los 400 m y potencia centimétrica a métrica con rellenos típicos de arcillas, sulfatos y jarosita.

Las estructuras de este sistema que cruzan la Falla Pampa Elvira no producen deslizamientos en su traza.

2.4.3. Sistema EW

Se manifiesta sólo en el control de emplazamiento de diques andesíticos y microdioríticos que intruyen a granodioritas y monzogranitos del Paleozoico Superior.

La Figura 2.1 exhibe la distribución de las diferentes unidades geológicas y las principales estructuras que las afectan.

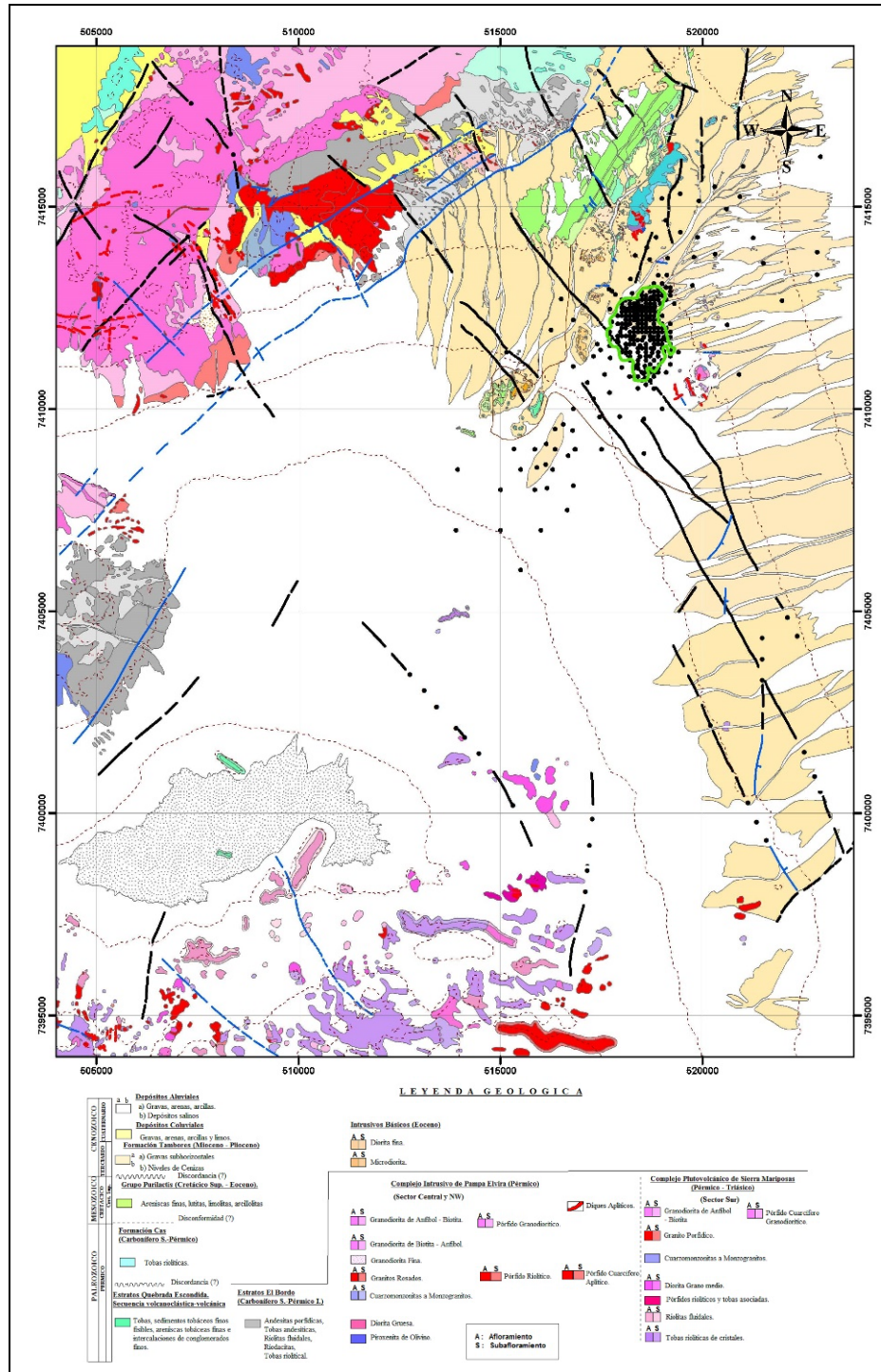


Figura 2.1: Mapa Geológico Distrital del Proyecto Gaby (actual División Gabriela Mistral). Se muestran las Unidades Litológicas, y estructuras medidas y foto-interpretadas. El polígono en verde exhibe la actual delimitación del rajo. Extraído de Fam y otros (1999).

3. GEOLOGÍA YACIMIENTO GABRIELA MISTRAL

3.1. Generalidades

La División Gabriela Mistral (DGM) corresponde a un yacimiento del tipo pórfido cuprífero de baja ley ubicado en la franja metalogénica Eoceno-Oligoceno del norte de Chile. Este yacimiento presenta un importante desarrollo de la zona de oxidación con mineralización de crisocola, atacamita, arcillas con Cu y OxN, junto a un desarrollo de sulfuros hipógenos de menor magnitud (Donoso, 2018). El yacimiento entró en producción en el año 2008 con una reserva de 620 millones de toneladas con una ley media de 0,41% Cu, una ley de corte de 0,2% Cu, y donde se produce 120.000 toneladas de Cu fino al año.

El entendimiento geológico es vital para la correcta caracterización y distribución de las unidades y su mineralización, que tiene influencia en los procesos productivos de una mina. A continuación, se describen las unidades litológicas presentes en el yacimiento, sus alteraciones, mineralización y principales sistemas estructurales que las controlan.

3.2. Unidades Litológicas

Las unidades litológicas definidas en el yacimiento por Rojas y otros (2004), presentan ciertas similitudes entre sí, por lo cual fueron agrupadas de acuerdo con sus características afines (geología, asociación espacial y/o temporalidad) y se describen a continuación, en orden decreciente de edad.

3.2.1. Secuencia Volcánico – Sedimentaria (SV)

Esta unidad está constituida principalmente por rocas volcánicas de composición andesítica, rocas sedimentarias de grano muy fino y rocas piroclásticas de grano fino. Presentan desarrollo de estratificación a nivel regional, un grado de metamorfismo de contacto y silicificación masiva en amplios sectores, que sería resultado del metasomatismo en la zona de contacto con la granodiorita del Complejo Intrusivo Pampa Elvira. Se hace referencia a esta unidad como metasedimentos, metandesitas o metatobas, por la identificación a través de sondajes de granates cálcicos en rocas de la secuencia, y cantidades de moderadas a abundantes de magnetita.

Esta secuencia se encuentra ampliamente reconocida en el sector oeste del yacimiento, su extensión en planta es de más de 3.000 m en la norte-sur y sobre 1.000 m en la este-oeste. Su rumbo es NS y tiene un manteo entre 50 y 55° W. La secuencia es intruída por la granodiorita del Complejo

Intrusivo Pampa Elvira, los pórfidos Terciarios Gaby y Crowded, cuerpos de brechas asociadas (ígneas e hidrotermales) y se infiere que por los Filones Microdioríticos.

Se le estima una edad pre-Pérmico, debido a la intrusión del Complejo Intrusivo Pampa Elvira. Por su edad y composición es correlacionable con los Estratos de Quebrada Escondida, de edad Carbonífera.

Una falla NS/45°W afecta el contacto entre esta unidad y la granodiorita, sin embargo, algunos sondajes que atraviesan el contacto no evidencian dicha falla.

3.2.2. Complejo Intrusivo Pampa Elvira (GD)

Esta unidad comprende gabros, dioritas, tonalitas y granodioritas. Consiste en una roca ígnea holocristalina de grano medio, constituida principalmente por cristales de plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico, en proporción afín a composición granodiorítica; en menor proporción ocurren cristales de anfíbol y biotita. Corresponde a la principal roca de caja de la mineralización.

Sus dimensiones en planta son de más de 3.000 m en la norte-sur y sobre 1.200 m en la este-oeste, siendo la unidad litológica de mayor extensión areal en el yacimiento. En términos prácticos, se hace referencia a esta unidad como Granodiorita.

Esta unidad intruye a la Secuencia Volcánica y a su vez es intruída por los Filones Microdioríticos, Pórfidos (Gaby, Crowded y Diorítico), la Diorita Fina y cortada por los cuerpos de Brecha (Ígneas e Hidrotermales). Dataciones por el método U-Pb en zircones (Martin, 1999) indican una edad de $278 \pm 1,8$ Ma y $280 \pm 1,2$ Ma, equivalente al Pérmico inferior.

3.2.3. Diorita Fina (DF)

Corresponde a una roca ígnea holocristalina de textura fanerítica de grano fino, constituida por cristales equigranulares de plagioclasa, anfíbol y biotita, con cuarzo escaso o ausente. Esta unidad se extiende en el sector centro-sur del área, en forma de cuerpos tabulares. Se le ha reconocido una extensión inferior a 500 m en planta según su eje mayor, reconocido por sondajes.

En general, presenta vetillas finas de cuarzo y, localmente, de sulfuros del tipo “D” (nomenclatura de Gustafson y Hunt, 1975), sustancialmente mayor que el Pórfido Crowded y la Granodiorita. Su emplazamiento está restringido a las zonas de contacto de la Granodiorita y al Pórfido Crowded, y

se ubica principalmente en el sector centro-sur del yacimiento. Está presente en forma de cuerpos tabulares de escasa dimensión, inferiores a 500 m.

Las rocas pertenecientes a esta unidad intruyen a la Granodiorita y son intruídas por el Pórfido Crowded y por los Filones Microdioríticos, siendo común el desarrollo de brechas ígneas.

3.2.4. Filones Microdioríticos (FM)

Son cuerpos tabulares con texturas porfídicas, afaníticas y equigranulares de granulometría muy fina y de color gris oscuro constituidos por anfíbol y plagioclasa, cuya composición generalmente es diorítica. Se observan principalmente cortando a la Granodiorita y Diorita Fina.

Sus espesores varían desde centímetros hasta 3 m y se ha interpretado una continuidad horizontal para estos cuerpos de más de 800 m. Los rumbos principales corresponden a NW y EW, se reconocen con menor frecuencia NS y NE, mientras que sus manteos varían entre 40° y 80° hacia el SW, S y NE.

Los filones intruyen principalmente a la Granodiorita y se infiere que cortan a la Secuencia Volcánica.

3.2.5. Complejo Intrusivo Gaby

Incluye a las siguientes unidades: Pórfido Tonalítico Crowded, Pórfido Gaby y Brechas, descritos a continuación.

3.2.5.1. Pórfido Tonalítico Crowded (PT)

Corresponde a una roca ígnea holocristalina de textura porfídica, constituida por fenocristales de plagioclasa, cuarzo, posible anfíbol y biotita tipo “books”. Los fenocristales presentan granulometría media a gruesa, y generalmente están en contacto entre sí, pues están rodeados por una escasa masa fundamental de grano fino de tonalidad grisácea conformada por cuarzo-feldespatos. En los contactos con Granodiorita, la textura del pórfido se hace más fina y oscura, muchas veces con masa fundamental microcristalina a afanítica. También se encuentra al Pórfido Crowded como matriz de brechas ígneas de contacto, con abundante masa fundamental de color grisáceo.

Se distribuye en el área central del yacimiento, con dirección NE a NS, y en gran parte su emplazamiento fue controlado estructuralmente. Sus dimensiones reconocidas por sondajes a nivel

2.587,5 m alcanzan 1.200 m de longitud y 700 m de ancho, sin embargo, estas dimensiones van aumentando en profundidad. Se encuentra limitado principalmente por fallas NE, NW y minoritariamente por fallas NS.

Martin (1999), mediante dataciones radiométricas, por el método U-Pb en zircones, les asigna a estas rocas una edad aproximada de $41,8 \pm 0,4$ Ma, equivalente al Eoceno medio, posteriores a la Granodiorita y a los Filones Microdioríticos.

Este pórfido corresponde al evento mineralizador del yacimiento.

3.2.5.2. Pórfido Gaby (PG)

Se reconoce como una roca ígnea holocristalina de textura porfídica, constituida por fenocristales de granulometría media de plagioclasa, cuarzo, escasa biotita tipo “books” y anfíbol subordinada. La masa fundamental de grano muy fino está constituida por feldespatos, cuarzo y biotita.

Se distribuye como cuerpos filonianos de poca extensión, inferiores a los 200 m de longitud y 2 m de potencia. Está emplazada con rumbos NS y NE, asociados probablemente a estructuras extensionales.

En general, intruyen a todas las unidades descritas anteriormente. Localmente se presenta como un borde de enfriamiento del Pórfido Crowded en contacto con la Granodiorita.

3.2.5.3. Brecha Ígnea (BI)

Corresponden a cuerpos de roca fragmental, constituida por clastos o fragmentos polimícticos tanto de Crowded, Pórfido Gaby, Diorita Fina, Granodiorita, Filones Microdioríticos y Sedimentos Volcánicos, inmersos en una matriz ígnea tonalítica asociada con el emplazamiento de los Pórfidos Gaby y Crowded.

Estas rocas no superan los 400 m de largo y 50 m de ancho.

3.2.5.4. Brecha Hidrotermal (BH)

Estas brechas están asociadas a fluidos hidrotermales. En general, son clasto soportadas, constituidas por fragmentos polilitológicos (granodiorita, pórfidos, metasedimentos). La matriz presenta biotita, cuarzo y feldespatos. También se han observado sulfuros como calcopirita y bornita. Además, se incluyen dentro de estas brechas, algunas con moderada a fuerte presencia de

vetillas o *stockwork* de cuarzo de textura en drusas y presencia de oquedades. Sus dimensiones no superan los 200 m de largo por 200 m de ancho.

En el yacimiento Gaby, las Brechas Ígneas e Hidrotermales se ubican, principalmente, hacia los bordes del Pórfido Crowded, encontrándose los cuerpos de mayores dimensiones hacia el borde oeste del Pórfido mineralizador, intruyendo a la Secuencia Volcánica. Hacia el borde este y sur del Pórfido Crowded, los cuerpos de brecha son elongados, de menores dimensiones y se encuentran cortando a la Granodiorita. Los cuerpos de brecha ubicados en el límite sur del yacimiento se han interpretado como asociados a la Falla Capricornio.

Los cuerpos de Brecha Ígnea e Hidrotermal presentan, generalmente, un control estructural en su emplazamiento, es decir se emplazan en fallas extensionales de direcciones NS, NE y minoritariamente NW, y se relacionan estrechamente con el emplazamiento o desarrollo de los Pórfidos Crowded y Gaby.

3.2.6. Pórfido Diorítico (PD)

Corresponde a una roca ígnea holocristalina de textura porfídica, granulometría media a muy fina, constituida por entrecrecimiento de cristales subeuhedrales a euhedrales de plagioclasa (80%); cristales subeuhedrales a euhedrales de hornblenda (18%); y subordinadamente cuarzo anhedral intersticial de grano muy fino (2%).

Se dispone como un cuerpo de poca extensión, de 200 m de largo por 60 m de ancho, y se observa hacia el norte del yacimiento.

Intruye a la Granodiorita y puede tener relación genética con los Filones Microdioríticos.

3.2.7. Gravas (GR)

Corresponden a depósitos sedimentarios pardos claros, con clastos polimícticos, subangulosos, inmersos en una matriz areno arcillosa de color pardo grisáceo. En la base, ocasionalmente se reconocen niveles cuyos fragmentos corresponden principalmente a detritos del Grupo Purilactis, en matriz rojiza, cementada con sulfatos y carbonatos.

Su espesor varía entre 10 y 60 m aproximados, con un promedio de 40 m dentro del área. Hacia el sur del yacimiento, se reconocen puntualmente algunos sectores con potencias extraordinarias mayores de 330 m (Rojas y otros, 2006).

Esta unidad sobreyace a todas las demás rocas del yacimiento.

A continuación, en la Figura 3.1, se exhibe un modelo litológico con la distribución de las unidades litológicas.

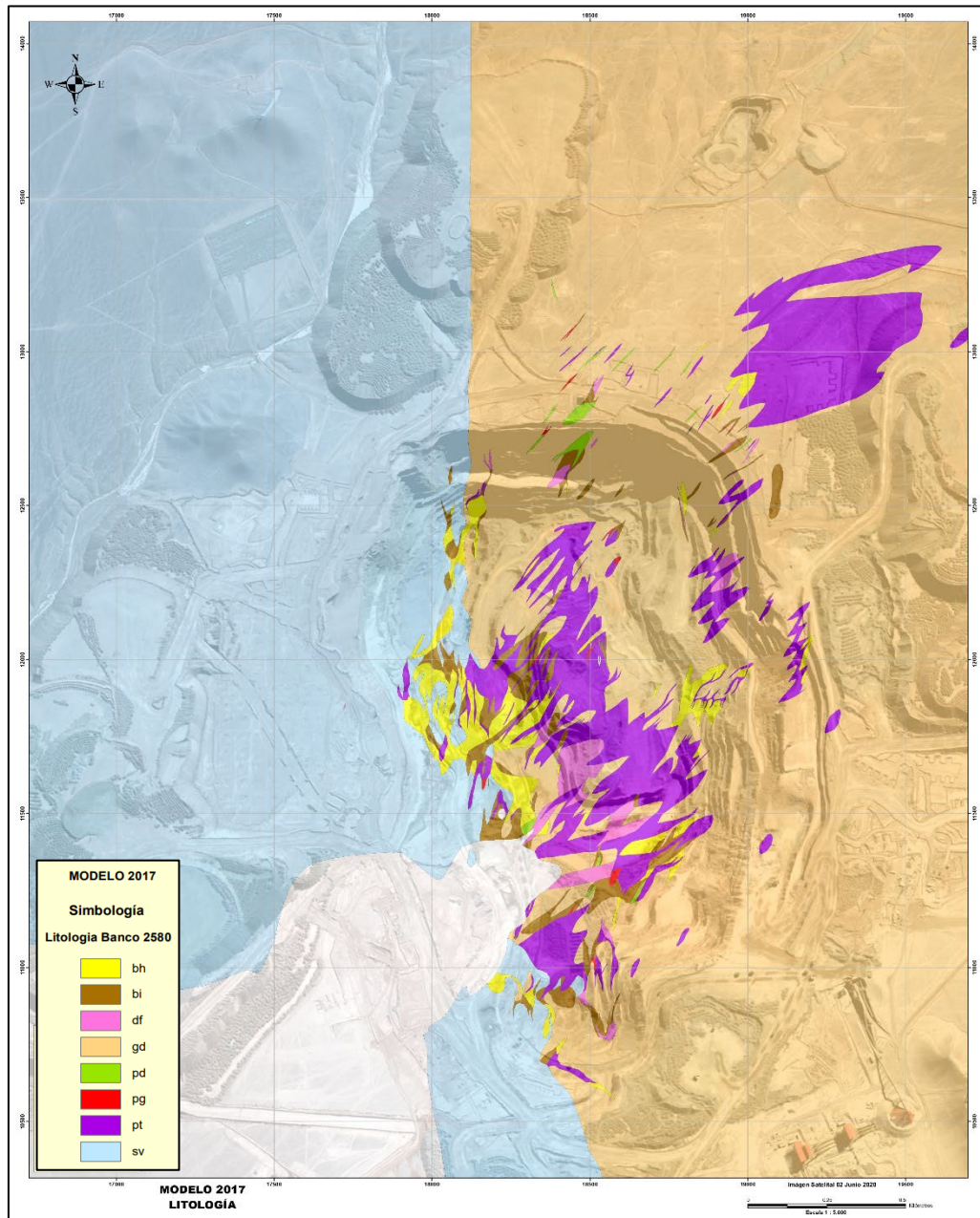


Figura 3.1: Modelo litológico año 2017 del yacimiento Gabriela Mistral nivel 2580. BH: Brecha Hidrotermal; **BI:** Brecha Ígnea; **DF:** Diorita Fina; **GD:** Granodiorita; **PD:** Pórfido Diorítico; **PG:** Pórfido Granítico; **PT:** Pórfido Tonalítico; **Sv:** Secuencia Volcánica.

3.3. Alteraciones

La totalidad de las unidades litológicas ubicadas en el área del yacimiento están afectadas por algún tipo de alteración con grados de intensidad diversos. Rojas y otros (2004), describen las siguientes.

3.3.1. Alteraciones Hidrotermales y Supérgenas

3.3.1.1. Alteración Potásica (K)

Se caracteriza por la presencia de biotita secundaria por reemplazo parcial o total de minerales máficos y/o feldespato potásico en vetillas, matriz o masa fundamental. En forma subordinada, se observa la presencia de feldespatos potásicos, los que se ubican preferentemente al noroeste del cuerpo principal de Pórfido Crowded. Es la alteración que se reconoce mayoritariamente en el yacimiento, presente en la mayoría de las unidades litológicas, por lo que se considera como la alteración de fondo.

3.3.1.2. Alteración Sericítica (Ser)

Se caracteriza por un reemplazo parcial o total de feldespatos por sericita, la que también se encuentra presente en forma intersticial, localmente asociada con cantidades menores de clorita. También se define por la presencia importante de vetillas de sulfuros del tipo “D” (nomenclatura de Gustafson y Hunt, 1975). Esta alteración oblitera en gran parte o totalmente la textura original de la roca.

Se reconoce principalmente en el sector sureste del yacimiento y hacia el sur de la Falla Capricornio, asociada estrechamente con vetillas “D”, subparalelas a la Falla Capricornio, con tendencias NE y NS, y afecta principalmente a la granodiorita.

3.3.1.3. Alteración Argílica (Arg)

De origen supérgeno, se caracteriza por un reemplazo parcial a total de feldespatos y relleno de cavidades por minerales de arcilla, tales como montmorillonita, halloysita, caolín o esmectita.

Está escasamente reconocida en el yacimiento, y afecta a las partes altas de las zonas de brecha, sedimentos volcánicos, a Filones Microdioríticos, y puntualmente en el sector sureste del yacimiento, asociada a fallas.

3.3.1.4. Alteración Clorítica (Clo)

Presenta asociación clorita-epídota como reemplazo parcial a total de minerales máficos, y se observa, de forma subordinada, en vetillas. Ha sido reconocida exclusivamente en rocas de la Secuencia Volcánico-Sedimentaria y se encuentra restringida a la periferia del yacimiento.

3.3.2. Alteraciones Operacionales

Adicionalmente, según Fredes (2019), son definidas las alteraciones operacionales con el objetivo de mejorar la estimación local de los comportamientos de leyes, comportamientos geotécnicos, potencial de lixiviación y consumo de ácido.

3.3.2.1. Alteración Potásica – Sericítica (K-Ser)

Es de características intermedias entre la alteración potásica y sericítica. Se define por la presencia de sericita débil a moderada y presencia de vetillas de sulfuros del tipo “D” con similares intensidades.

Generalmente, se distribuye hacia el sureste y norte del yacimiento, en torno al Pórfido Crowded. El mapeo de esta alteración aporta a la calidad geotécnica del macizo rocoso.

3.3.2.2. Alteración Argílico – Sericítica (Arg-Ser)

Definida por una asociación de minerales de arcilla (caolinita) más sericita, en proporción aproximada de 60%-70% (arcillas) a 40%-30% (sericita).

Está restringida, principalmente, a la Secuencia Volcánico-Sedimentaria, presenta una distribución de acuerdo con la posible estratificación de esta unidad. Al igual que la alteración K-Ser, es una alteración funcional, y su mapeo aporta al control de las leyes.

3.3.2.3. Alteración Clorítico – Sericítica (Clo-Ser)

Corresponde a la presencia de la asociación mineral clorita-sericita-cuarzo (sílice), en forma dominante o mayoritaria. Comúnmente en algunos cuerpos de brecha y en la Secuencia Volcánico-Sedimentaria, ubicada en el sector oeste del yacimiento.

En la Figura 3.2, se muestra la distribución de las alteraciones en el yacimiento.

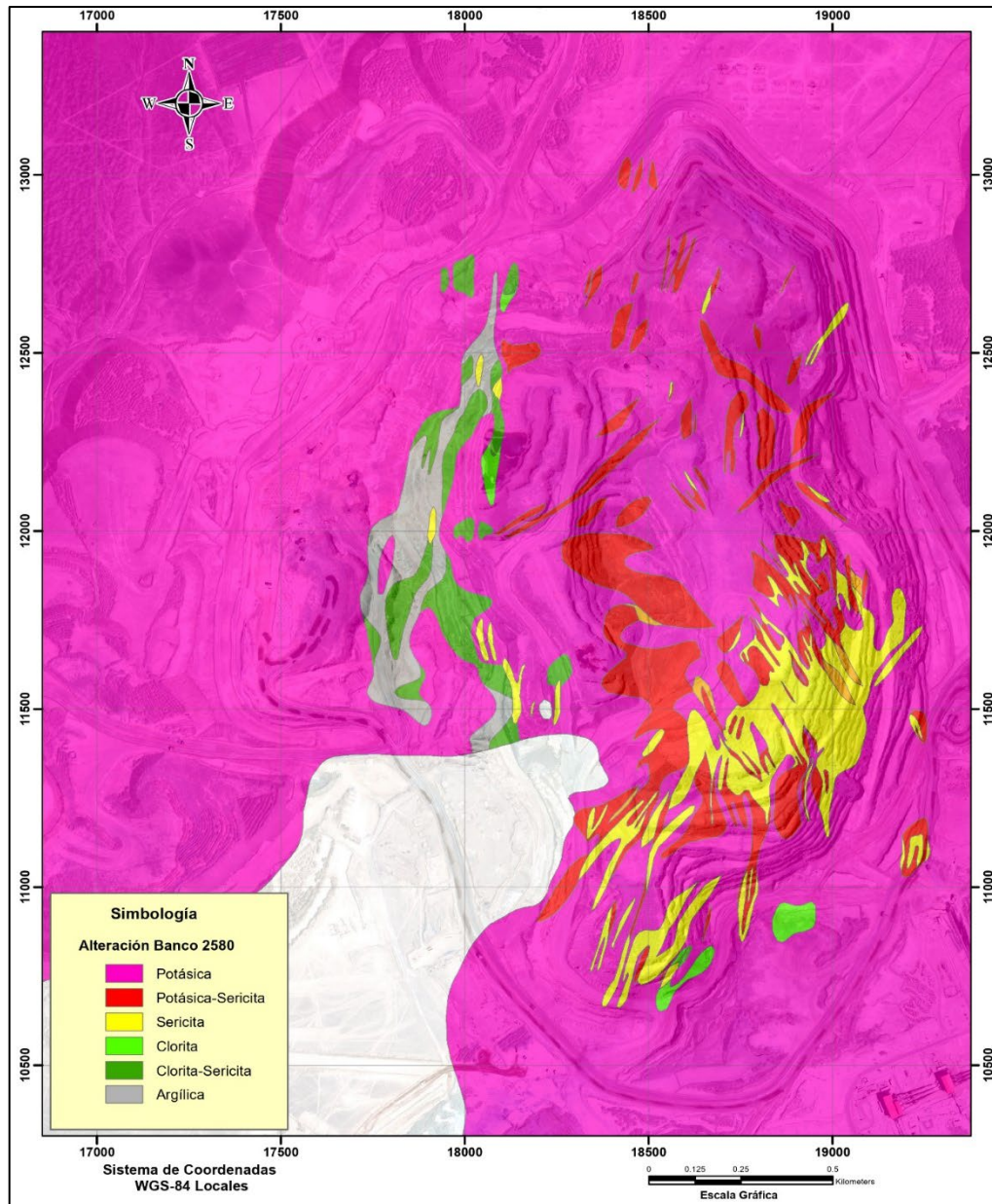


Figura 3.2: Modelo de alteración año 2017 del yacimiento Gabriela Mistral nivel 2580.

3.4. Mineralización

La mineralización corresponde principalmente a cobre y en menor grado molibdeno, íntimamente relacionada a la ocurrencia del Complejo Intrusivo Gaby. En el área del yacimiento, se reconoce mineralización sulfurada de cobre que ha sido oxidada, formando un perfil supérgeno de aproximadamente 200 m de profundidad, donde se describe una mineralogía similar a la presente en los sistemas de Pórfidos Cupríferos del Norte de Chile (Plaza, 2001).

3.4.1. Etapas de Mineralización

Rojas y otros (2004) describen las siguientes etapas:

3.4.1.1. Mineralización Hipógena

La mineralización hipógena reconocida en Minera Gaby corresponde principalmente a cantidades variables de calcopirita – pirita, y menor proporción de bornita, la que presenta dos eventos reconocidos en el yacimiento, que corresponden a los siguientes:

- i. Mineralización Tardimagmática: Presenta una distribución en anillos concéntricos, los que varían desde:
 - Calcopirita >> Bornita >> Pirita: Se presenta diseminada y escasamente en vetillas, corresponde al núcleo de mineralización y se desarrolla principalmente en el Pórfido Crowded. Esta asociación se presenta también en las otras unidades litológicas, a menor escala y con ocurrencia en vetillas. Se encuentra asociada a alteración potásica.
 - Calcopirita > Pirita: Se presenta en vetillas y escasamente diseminada, se desarrolla principalmente en Granodiorita, asociada a alteración potásica.
 - Pirita >> Calcopirita: Se presenta en vetillas, corresponde al anillo exterior, el que se desarrolla principalmente en la Secuencia Volcánico – Sedimentaria, asociada a alteración propilítica.

La zona con mayor proporción de calcopirita, independiente de su cantidad, se encuentra en el Pórfido Crowded y va paulatinamente disminuyendo hacia el exterior.

Al interior del Pórfido Crowded es posible encontrar, en forma restringida, vetillas asimilables a los tipos “A”, “B” y “EB” definidos para El Salvador.

El tipo de ocurrencia de la mineralización tardimagmática puede ser explicado por el escaso hidrofracturamiento existente en el Pórfido Crowded (indicando su escaso contenido de agua), el que alcanza su mayor desarrollo restringido al contacto con su roca caja (principalmente Granodioritas).

En brechas ígneas ubicadas bajo las rocas de la Secuencia Volcánico-Sedimentaria (aproximadamente a 200 m de profundidad) se ha encontrado mineralización primaria (calcopirita) de interés, lo que posiblemente indicaría la existencia de más de un núcleo mineralizador.

- ii. Mineralización Hidrotermal: Se produce al disminuir la temperatura del sistema porfídico, lo que hace disminuir la actividad del K^+ y aumentar la actividad del H^+ , lo que genera el cambio desde alteración potásica a sericítica.

Consiste principalmente en pirita - calcopirita, las que se emplazan en vetas “D”, asociadas a alteración sericítica, ubicadas principalmente en el sector sur del yacimiento (al Sureste de la Falla Capricornio).

Las vetas “D” se emplazan principalmente en Granodiorita y presentan una tendencia general NE con manteos en alto ángulo al Sureste, subparalelas a la Falla Capricornio.

La asociación pirita-calcopirita relacionada a alteración sericítica se presenta también en forma de cuerpos tabulares, ubicados en los bordes de la cuenca tectónica, aprovechando zonas dilatacionales locales producto de intersección de fallas. Se ubican en brechas (hidrotermales > ígneas), las que en los bordes oriental y occidental (mayor desarrollo) presentan elongación en dirección NS y en el borde norte en dirección NE.

3.4.1.2. Mineralización Supérgena

La mineralización hipógena fue afectada por procesos supérgenos de oxidación-lixiviación hasta profundidades mayores a 150 m. La mineralización supérgena se ubica inmediatamente bajo el techo de roca, presentando la siguiente distribución vertical general:

- i. Zona Lixiviada: Se ubica, directamente bajo el contacto grava – roca, se caracteriza por la presencia de minerales del grupo de las limonitas. En general tiene escasa representación, especialmente al norte de la Falla Capricornio, exceptuando a algunos Filones Microdioríticos, los que por su alta permeabilidad han sido “lavados”.

Al Sur de la Falla Capricornio son más abundantes, presentando un fuerte control estructural, estando asociados a la existencia de vetas “D”, parcialmente cizalladas, de tendencia general NE.

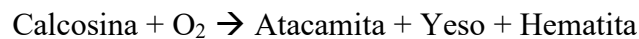
Existen otros lixiviados de origen freático asociados al techo de sulfuros, pero tienen una escasa representación en el yacimiento.

- ii. Zona Oxidada: Se ubica bajo la zona lixiviada y, en general, directamente bajo el techo de roca. Los minerales oxidados de cobre reconocidos en DGM, corresponden principalmente a

crisocola, atacamita y óxidos negros (*copper wad*, neotocita, etc.), localmente se encuentra pitch limonítico.

El proceso de oxidación en el yacimiento Gaby presenta características distintivas según su ubicación con respecto a la Falla Capricornio, la que actúa como un límite natural de ambientes geológicos, evidenciado también en la distribución de la mineralización primaria y secundaria.

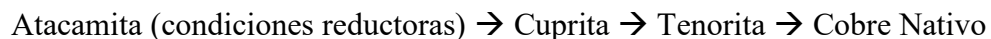
- Oxidados al Sur de la Falla Capricornio: La mena oxidada predominante corresponde a atacamita, cuya disposición presenta un fuerte control estructural. Su origen corresponde a oxidación in – situ de la calcosina presente en las vetas “D”, de acuerdo con la siguiente relación:



La formación de atacamita involucra un pH ácido (dado por la presencia de sericita-pirita), en un ambiente de alta salinidad y escasa humedad, características similares a las presentes actualmente en el Norte de Chile.

Los niveles superiores presentan crisocola en lugar de atacamita, evidenciando la actuación de un paleonivel freático (Atacamita + Agua \rightarrow Crisocola). La actuación de las aguas meteóricas produce además una migración lateral de los óxidos, la que se produce hacia el noroeste, de acuerdo con un gradiente hidráulico coincidente con la morfología del techo de roca.

En esta zona se observa la presencia de cantidades menores e irregulares de cuprita y cobre nativo, ubicadas sobre el techo de sulfuros, los que evidencian cambios en el nivel freático (alzamientos), variando las condiciones de oxidantes a reductoras:



- Oxidados al Norte de la Falla Capricornio: La mena oxidada predominante corresponde a crisocola, con cantidades menores de óxidos negros y escasa atacamita. La zona se destaca por su fuerte control litológico, además de la influencia de las soluciones migradas desde el Sur.

La migración de soluciones desde el Sur se ve favorecida por zonas de debilidad estructural, siendo canalizada principalmente por fallas de tendencia NW y EW. De acuerdo con esto, se

observa una zonación en los oxidados de cobre, la que de oriente a occidente presenta crisocola – mezcla de óxidos – óxidos negros, evidenciando un aumento en la humedad y cambios en la alteración de la roca (pH más básico).

Una zonación similar, aunque con menor desarrollo, se observa desde el borde Norte del yacimiento (zona de brechas con evidencias de calcosina y relictos de atacamita), la que se superpone, y presenta una tendencia similar a la del gradiente hidráulico actual (Suroeste a Sursuroeste).

La disposición de los óxidos, como se dijo anteriormente, presenta un fuerte control litológico, siendo favorecida por rocas con mayor porosidad secundaria como granodiorita-brecha hidrotermal (descenso del piso de oxidación) con relación a las rocas menos permeables (Pórfidos Crowded-Gaby y Brechas ígneas).

Otros factores que favorecen la precipitación de los óxidos son las zonas fracturadas y/o de *stockwork* asociadas a contactos litológicos, además de la presencia de filones, los que por su buena permeabilidad son rocas de tránsito, que inicialmente ofrecen un medio favorable para el desarrollo de esmectitas y biotitas, minerales que posteriormente permiten la captación de iones de cobre en sus espacios interlaminares (adsorción).

Una situación diferente se observa en la Secuencia Volcánico – Sedimentaria, la que presenta casi exclusivamente óxidos negros (contraste de alteración) con una disposición favorecida por planos de debilidad de tendencia general N-S/50°W, los que por su correlación con la tendencia del contacto entre los intrusivos (GDIO – PT) con las volcanitas y por su repetición en las fallas medidas en la SV, podrían corresponder a la tendencia general de la estratificación en el sector.

La distribución de óxidos en el yacimiento, especialmente al Norte de la Falla Capricornio, se ve afectada por un “Enriquecimiento en Óxidos”, evidenciando la existencia de al menos otro paleonivel freático (distinto al evidenciado por el piso de oxidación).

Este paleonivel se evidencia por la existencia de un quiebre en las leyes de cobre soluble, estrechamente relacionado con la desaparición de montmorillonita en profundidad. Al sur de la falla, se evidencia por el límite crisocola – atacamita, sumado a la preservación de hematita y yeso.

La posición de este paleonivel freático se encuentra fuertemente controlada por la porosidad secundaria de las rocas, presentando, al igual que el piso de óxidos, un descenso en zonas estructurales importantes, en zonas de contacto litológico y en zonas de brechas y filones. Por el contrario, se encuentra alzado en los Pórfidos Crowded y Gaby.

- iii. Zona de Enriquecimiento Secundario: El proceso de enriquecimiento secundario o supérgeno se inicia con el enfriamiento del sistema porfídico y el inicio de la actuación de aguas meteóricas, en un flujo convectivo de circulación, desarrollándose principalmente en zonas de mayor acidez (mayor concentración de pirita) y con alto contenido de sulfuros de cobre.

La acción de las aguas meteóricas se evidencia por la destrucción de la textura original de la roca, con desarrollo de fuerte alteración sericítica, destrucción de los sulfuros primarios de cobre (calcopirita) y precipitación de calcosina en condiciones reductoras, además de la generación de mayores cantidades de pirita.

En el yacimiento Gaby, la zona de enriquecimiento secundario tiene su mayor desarrollo al Sur de la Falla Capricornio, donde las mayores concentraciones de pirita (presentes en las vetas “D”) favorecen el desarrollo de condiciones ácidas que permiten la formación de calcosina, la que se encuentra principalmente en vetillas.

La alteración predominante en la zona de enriquecimiento corresponde a sericita.

Zonas menores de calcosina se han reconocido en los bordes de la cuenca tectónica, asociados a cuerpos de brechas (hidrotermales > ígneas) con alteración sericítica.

3.4.2. Perfil de Mineralización

El perfil vertical del yacimiento Gabriela Mistral presenta zonación mineralógica. Plaza (2001), lo describe de la siguiente forma, desde la parte superior a la inferior:

3.4.2.1. Zona de Gravas

Corresponden a gravas polimícticas generalmente sin mineralización, con clastos de tamaño variable en una matriz fina (arena – limo), que cubren el yacimiento en toda su extensión, con un

espesor promedio de 40 m. Se han detectado puntualmente niveles centimétricos de grava con minerales oxidados de cobre: crisocola y atacamita, en la zona inmediatamente superior al techo del sustrato de roca.

3.4.2.2. Zona Lixiviada

Caracterizada por la presencia de minerales oxidados de hierro, tales como jarosita, goethita y hematita. Esta zona se dispone en los bordes y hacia la periferia del cuerpo mineralizado oxidado. Puede tener un origen estructural o estar relacionado a paleoniveles freáticos.

3.4.2.3. Zona de Oxidación

Zona de mayor interés económico, caracterizada por la ocurrencia de minerales oxidados de cobre, principalmente crisocola, arcillas con cobre, atacamita y óxidos negros. Puede tener otras especies mineralógicas como paratacamita, cobre nativo y/o cuprita, en menor proporción. La zona de oxidación se distribuye bajo las zonas de gravas, en niveles subhorizontales en las partes superiores del macizo rocoso (en el sector norte del yacimiento), y en cuerpos subverticales en los niveles inferiores de este macizo (en el sector sureste del yacimiento) (Donoso, 2018).

3.4.2.4. Zona Mixta

Material constituido por especies mineralógicas oxidadas y sulfuradas de cobre, en proporciones similares o con leve predominancia de uno de ellos. Se localiza normalmente en niveles subparalelos a la interfase Óxidos-Sulfuros, asociado a la presencia de estructuras y, en litologías de escasa permeabilidad, como el Pórfido Crowded y el Pórfido Gaby.

3.4.2.5. Zona de Enriquecimiento Supérgeno

Caracterizada por minerales sulfurados de origen supérgeno como el grupo de la calcosina y covelina. Se encuentra reemplazando parcial o totalmente a calcopirita y/o bornita hipógenas. La zona de enriquecimiento supérgeno está conformada por cuerpos subhorizontales de poco desarrollo (hasta 15 m de potencia), ubicados bajo las zonas de óxidos y mixtos; y por cuerpos subverticales con fuerte control lito-estructural.

3.4.2.6. Zona de Mineralización Hipógena

Definida por la presencia de sulfuros primarios o hipógenos de cobre, fierro y molibdeno, como calcopirita, pirita y cantidades menores de bornita, digenita y molibdenita. Se dispone bajo los

pisos de oxidación, mixtos y sulfuros supérgenos. Presenta una zonación horizontal, cuyo centro de mayor mineralización se asocia al Complejo Intrusivo Gaby.

3.4.2.7. Filones

Corresponden a los Filones Microdioríticos y se incluyen en la zona mineral por el efecto que causan en las leyes de cobre y en la razón de solubilidad. Por lo general, aumenta la ley de cobre total en el filón respecto de la ley de cobre total en la roca adyacente y disminuye la razón de solubilidad en los filones respecto a las razones de la roca adyacente (Donoso, 2018).

3.4.3. Unidades de mineralización

Existen unidades de mineralización definidas y mapeadas en el yacimiento por Rojas y otros (2004), en donde cada una tiene asociado un número con el cual se identifican las menas en la base de datos, que se exhiben en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Código de unidades de mineralización.

Unidades de Mineralización					
100	Estéril				
200	Gravas				
300	Lixiviado				
Unidades de Óxidos	430	Óxidos Negros 1-5	Crisocola 0	Atacamita 0	Arcillas con Cobre 0
	440	Arcillas con Cobre 1-5	Óxidos Negros 0-5	Crisocola 0	Atacamita 0
	445	Crisocola 1-2	Arcillas con Cobre 0-2	Óxidos Negros 0-5	Atacamita 0
	450	Crisocola 1-2	Arcillas con Cobre 3	Óxidos Negros 0-5	Atacamita 0
	455	Crisocola 3	Arcillas con Cobre 0-2	Óxidos Negros 0-5	Atacamita 0
	460	Crisocola 4-5	Arcillas con Cobre 0-5	Óxidos Negros 0-5	Atacamita 0
		Crisocola 1-2	Arcillas con Cobre 4-5	Óxidos Negros 0-5	Atacamita 0
		Crisocola 3	Arcillas con Cobre 3	Óxidos Negros 0-5	Atacamita 0
	470	Atacamita 1-2	Crisocola 0-2	Arcillas con Cobre 0-5	Óxidos Negros 0-5
	480	Atacamita 3-5	Crisocola 0-5	Arcillas con Cobre 0-5	Óxidos Negros 0-5
Atacamita 1-2		Crisocola 3-5	Arcillas con Cobre 0-5	Óxidos Negros 0-5	
500	Mixto				
600	Enriquecimiento Secundario				
700	Sulfuro Primario				
800	Filones				
900	Vetas				

En particular, las unidades de mineralización “430, 440, 445, 450, 455, 460, 470 y 480” corresponden a las unidades de óxidos de cobre. La clasificación e interpretación de estas unidades se realiza de acuerdo con la coexistencia y predominancia relativa (intensidad) de las menas de cobre principales, las que corresponden a crisocola, atacamita, arcillas con cobre y óxidos negros.

Las intensidades mapeadas pueden variar desde 0 a 5, donde 0 significa ausencia de un mineral y 5 corresponde a una intensidad elevada de un mineral.

La Figura 3.3 muestra un modelo con la distribución de cada una de las unidades de mineralización.

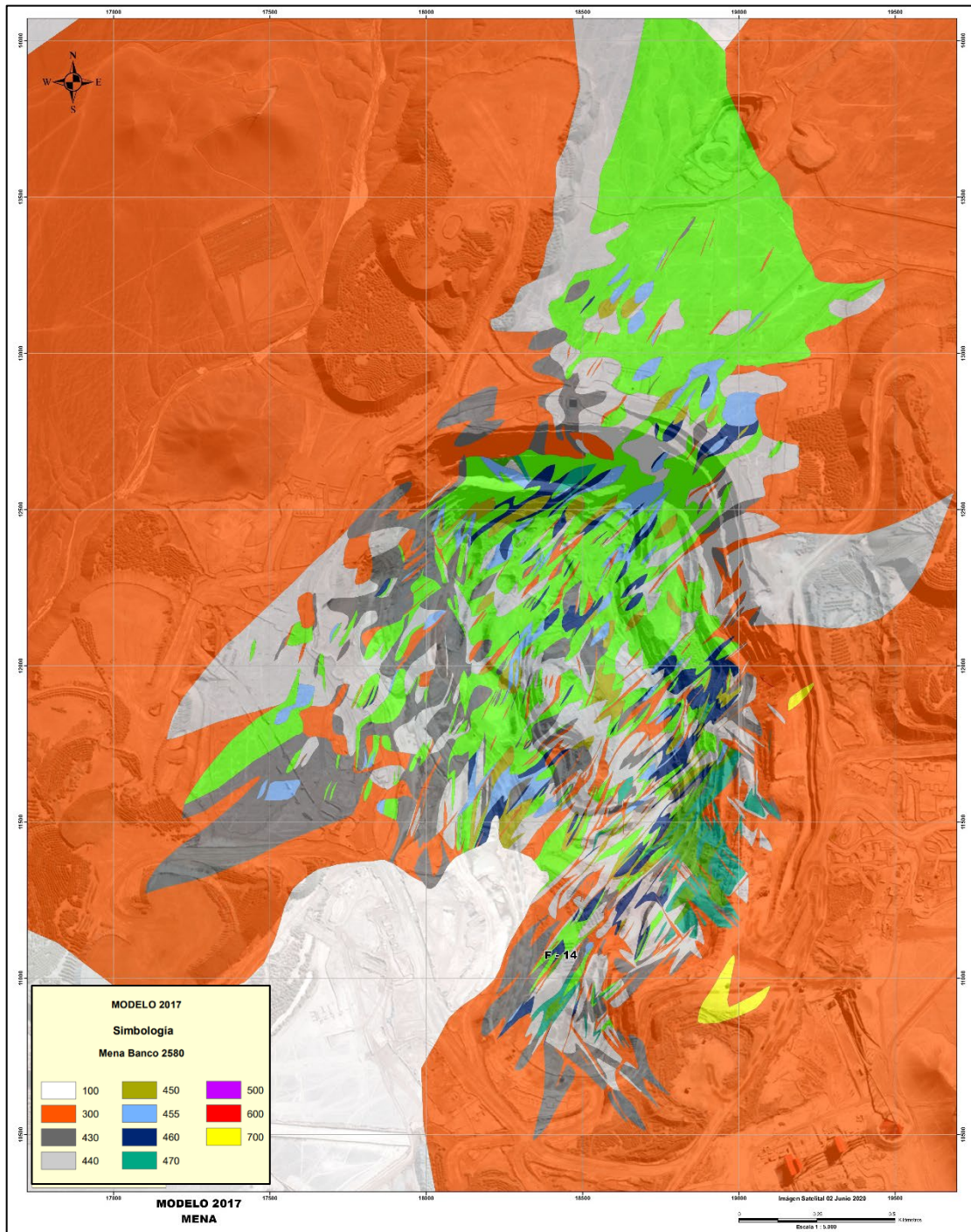


Figura 3.3: Modelo de mena año 2017 del yacimiento Gabriela Mistral nivel 2580. La codificación de la mena se describe en la Tabla 3.1.

3.4.3.1. Distribución de Unidades de Óxidos

- **Crisocola:** Mena predominante en el yacimiento, comúnmente presente como Unidades 445 y 450 (crisocola con intensidades bajas a medias, con o sin presencia de arcillas con Cu y OxN). Las unidades con mayor intensidad de crisocola (455 y 460) se encuentran restringidas a los niveles superiores (zona de enriquecimiento en óxidos asociada a la existencia de un paleo-nivel freático, a contactos litológicos y zonas estructurales).
- **Atacamita:** Mena común en el sector sur del yacimiento, definiendo las Unidades 470 y 480 (mayor presencia de atacamita). Se asocia a zonas estructurales de tendencia general NE y a contactos litológicos.
- **Arcillas con cobre:** Comúnmente asociada con crisocola, su presencia exclusiva (o acompañada por OxN) define a la Unidad 440, cuya mayor presencia se encuentra en los bancos superiores o como halos en estructuras mayores.
- **Óxidos negros (OxN):** Su presencia exclusiva define a la Unidad 430, corresponde a una mena secundaria de Cu, asociada principalmente con la Secuencia Volcánica-Sedimentaria.

3.5. Estructural

Las estructuras a nivel mina mantienen las tendencias y densidades relativas observadas de la Geología Distrital, salvo la existencia de fallas NS no reconocidas, pero mencionadas por Behn & Skarmeta (1998), las que a escala mina existen abundantemente, aunque en trazas segmentadas y dislocadas, especialmente en el sector oeste del yacimiento (zona de la Secuencia Volcánico-Sedimentaria) (Rojas y otros, 2004).

La distribución estereográfica de los 480 registros existentes para fallas en la zona mineralizada principal del yacimiento Gabriela Mistral se muestran en la Figura 3.4.

Según Rojas y otros (2004), es posible identificar 4 sistemas, que se describen a continuación.

3.5.1. Sistema NE

Se consideran como fallas NE a las que presentan rumbos dentro del rango comprendido entre N10° E y N70° E.

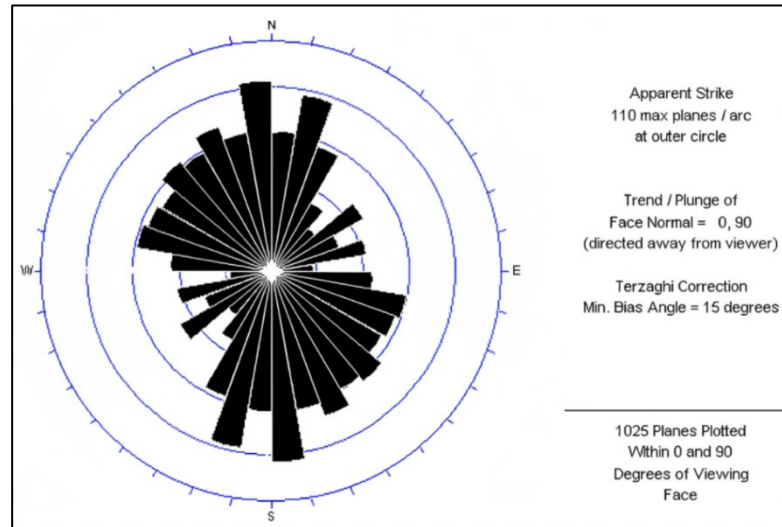


Figura 3.4: Diagrama de rosa de 480 fallas del yacimiento. Extraído de Rojas y otros (2004).

Es el sistema de mayor presencia espacial y continuidad en el yacimiento, relacionado con la disposición del Pórfido Crowded (PT) y Gaby (PG) en la zona central, y con la distribución de las brechas ígneas e hidrotermales en los límites Norte y Sureste del Pórfido Crowded.

Controla la disposición de los cuerpos de alteración sericítica y de mineralización de atacamita, sulfuros secundarios y lixiviados en la zona sur del yacimiento. Se asocia a los *trends* principales de distribución de leyes de óxidos. Además, existen lineamientos de esta tendencia en la superficie del techo de roca y de sulfuros, definiéndose cuencas tectónicas según ejes de esta tendencia.

Estas fallas corresponderían a un sistema antiguo, anterior o sincrónico al emplazamiento de los pórfidos, el que se mantendría activo, al menos, hasta el término del proceso de oxidación-lixiviación y deposición de los primeros niveles de gravas.

Dentro de este sistema se encuentra la Falla Capricornio, zona de falla de actitud general N40°E/65°E ubicada en la parte sureste del yacimiento, y que corresponde a un ente geológico mayor que actúa como un divisor de ambientes. Los controles de la mineralización, el arreglo estructural, la asociación y disposición de minerales de alteración y de mena, son distintos al norte y sur de esta zona de falla. Al sur de la zona de Falla Capricornio, la mineralización oxidada y sulfurada tiene un fuerte control estructural, encontrándose en cuerpos elongados de tendencia NE. Se observa también la existencia de lixiviados estructurales asociados a fallas de este sistema.

3.5.2. Sistema NW

Orientación general entre N20° a 70°W con valores *peak* en N20°-30°W y N40°-50°W.

Se encuentra asociado a la distribución de los Filones Microdioríticos y de cuerpos menores de Brechas, y con la distribución de alteración sericítica y potásico-sericítica en la zona sureste del yacimiento. Se observan tendencias de similar orientación en la distribución de leyes de óxidos y sulfuros.

Este sistema sería coetáneo y ligado genéticamente al Sistema NE, por lo que presentaría movimientos sincrónicos a él, pero de carácter más discreto, siendo generalmente cortado por él, no descartándose relaciones de corte mutuo.

3.5.3. Sistema NS

Se consideraron como fallas NS a aquellas que presentan rumbos dentro del rango entre N20° W y N10° E.

Fallas pertenecientes a este sistema son las que afectan al contacto entre la Secuencia Volcánica (SV) por el oeste y los cuerpos intrusivos por el este. Se observa una fuerte correspondencia con la disposición de los cuerpos de pórfidos y brechas en los bordes del cuerpo mineralizado principal. Las unidades de mena del borde oeste del yacimiento presentan orientaciones generales coincidentes con la de este sistema.

Es posible relacionar aspectos de la geología del yacimiento con fallas NS, como el contacto entre la Secuencia Volcánica y los cuerpos porfídicos que presentan esta tendencia. Además, la disposición de los cuerpos menores de Pórfido Gaby y Pórfido Crowded es coincidente con esta orientación, mientras que los cuerpos de brecha en los bordes este y oeste del yacimiento se ven favorecidos en zonas de intersección de fallas NS con fallas NE o NW. De forma similar, la zona de alteración clorítica y cuerpos de óxidos en la Secuencia Volcánica presentan una disposición predominante NS.

3.5.4. Sistema EW

Esta orientación se presenta como un *gap* en la información, pero el sistema se evidencia por la existencia de fallas conjugadas de orientación predominante N80°- 90°W, y subordinada N70°- 80°E. Para efectos prácticos, se consideran como fallas EW aquellas que tienen rumbos dentro del rango N70°E y N70°W.

Al interior del yacimiento, este sistema se asocia a la disposición de Filones Microdioríticos en la Granodiorita, además está relacionado con un salto en el contacto grava roca de 15 m al norte de la zona mineralizada principal.

A continuación, se muestran las familias estructurales principales en la Figura 3.5.

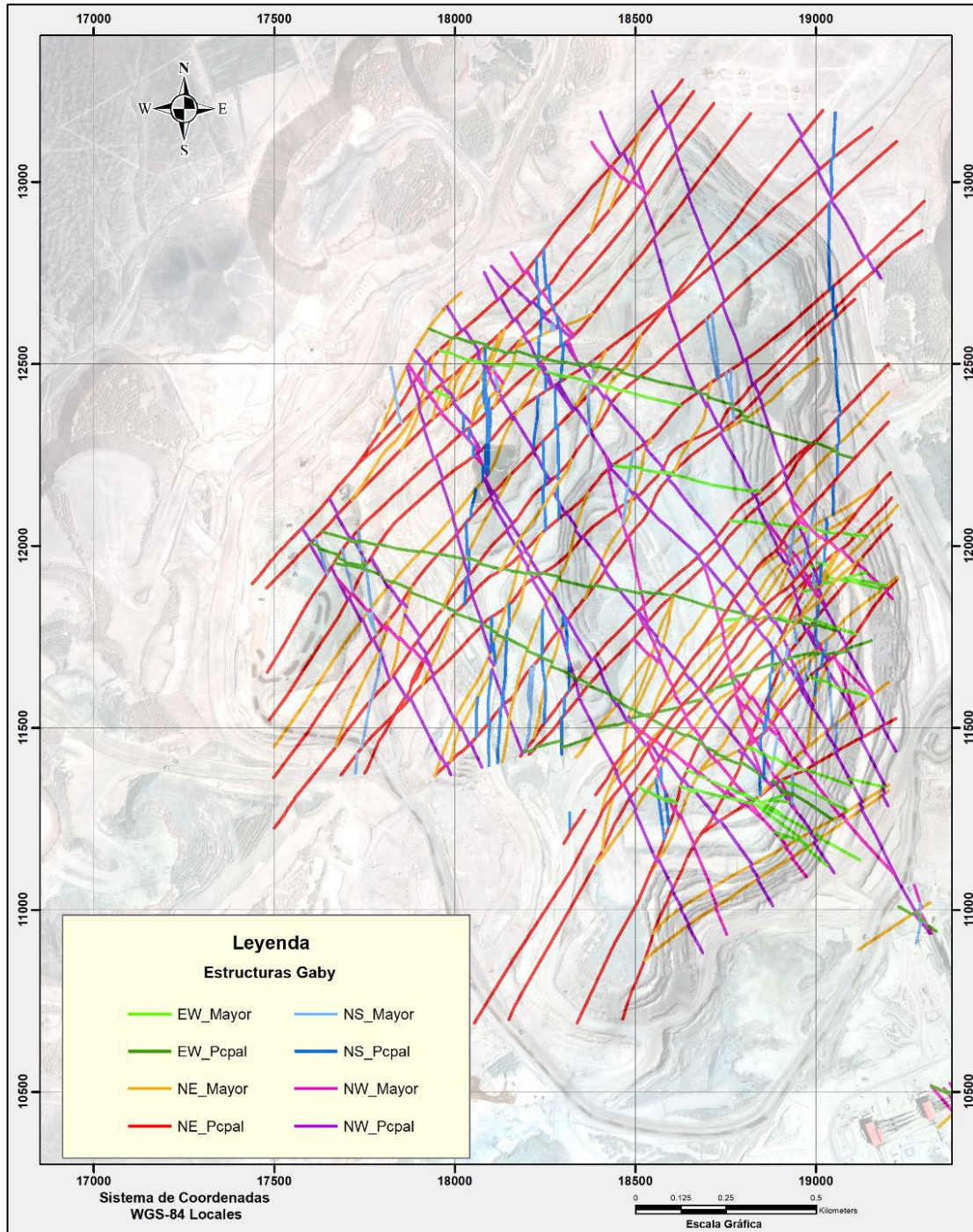


Figura 3.5: Sistemas de fallas principales que afectan el yacimiento.

3.6. Controles Geológicos de la Mineralización

La distribución de las especies oxidadas, y de sus asociaciones, presenta diferentes controles predominantes a lo largo del yacimiento, y describen 4 sectores que se observan en la Figura 3.6.

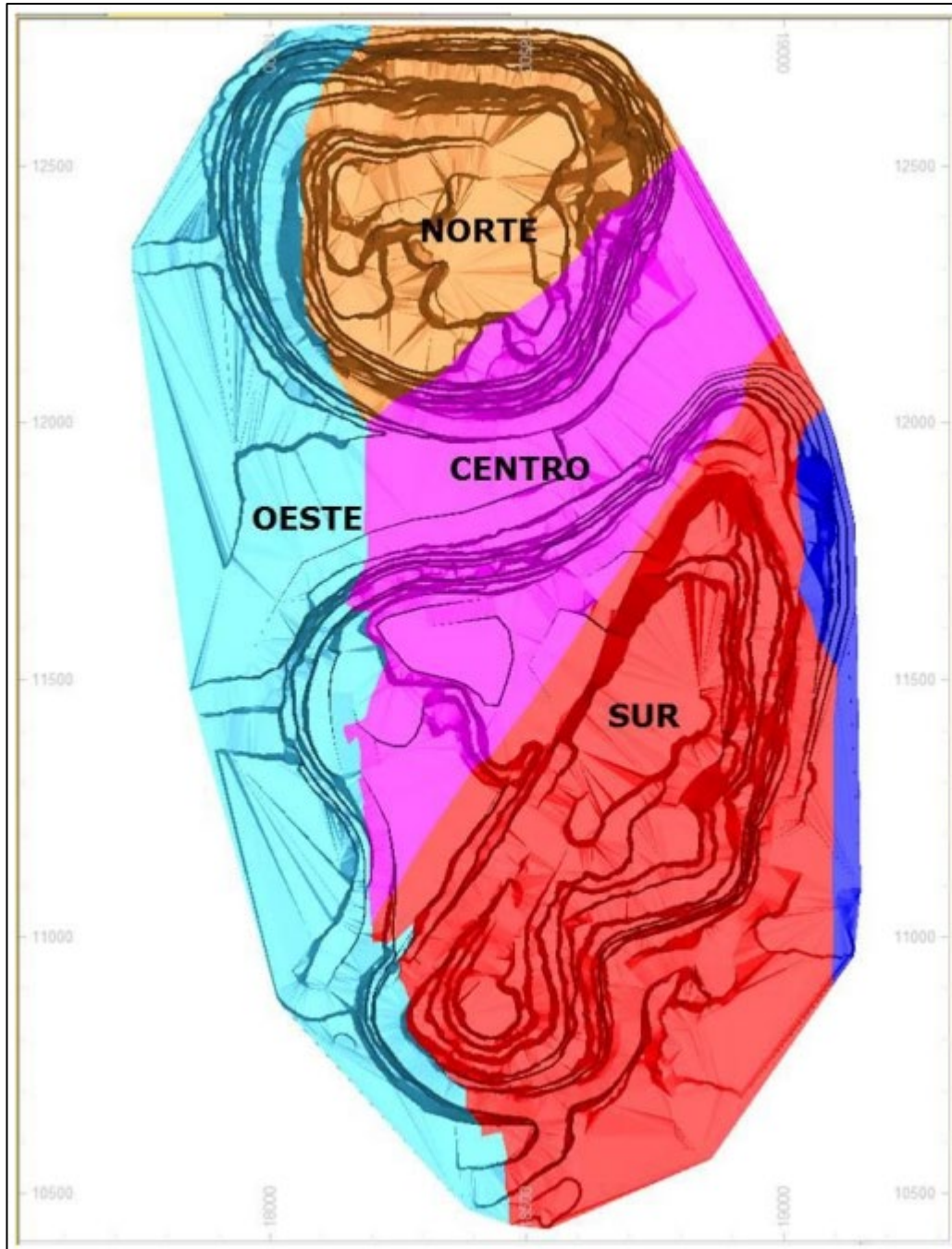


Figura 3.6: Distribución de sectores en función de los controles de mineralización.

La descripción de estos se detalla a continuación.

3.6.1. Sectores Norte y Centro

La mena predominante de estos sectores corresponde a crisocola > arcillas con cobre. La distribución de los cuerpos presenta 2 controles principales, los que varían en la vertical de acuerdo con el control freático y un control litológico. El primero, predomina en la parte alta de la columna mineralizada y se caracteriza por la disposición subhorizontal de los cuerpos mineralizados. El segundo, predomina en cotas inferiores y se caracteriza por mayores concentraciones de minerales oxidados, o profundizaciones de sus cuerpos, asociados a zonas de contactos litológicos, particularmente entre PT – Brechas y sus rocas de caja.

La transición entre el predominio de ambos controles se produce alrededor de la cota 2.550 m s.n.m. y se asocia a la existencia de un paleonivel freático. El sector Norte se caracteriza por la predominancia de GD con crisocola como mena principal y el sector centro por la predominancia de PT con arcillas con Cu.

3.6.2. Sector Sur

Se ubica al Sur de la Falla Capricornio. El control de la mineralización es principalmente lito-estructural. Presenta atacamita como mena predominante, la que se desarrolla en cuerpos de tendencia NE > N-S, principalmente en GD y asociado a estructuras (de características similares a vetas tipo “D”) o relacionados a zonas de contacto del PT y Brechas asociadas.

En este sector el efecto freático es poco notorio.

3.6.3. Sector Oeste

Se emplaza en rocas de la Secuencia Volcánica y el control de la mineralización es principalmente lito-freático, siendo la mena predominante los cobres negros. Los cuerpos mineralizados se distribuyen siguiendo una tendencia subparalela a la estratificación general de la unidad (N-S/45°-55°W).

4. HIDROMETALURGIA EN DIVISIÓN GABRIELA MISTRAL

4.1. Hidrometalurgia

La hidrometalurgia es la rama de la metalurgia que cubre la extracción y recuperación de metales usando soluciones acuosas para su propósito. Incluye métodos de extracción que utilizan soluciones no acuosas en los que se concentran u obtienen metales, sales de metales u otros compuestos metálicos mediante reacciones químicas.

El proceso hidrometalúrgico se divide en 3 etapas principales: lixiviación, concentración o purificación de soluciones, y recuperación del metal, que tiene por objetivo generar un producto con las características que el mercado demanda, ya sea en una fase específica o con un límite ajustado de contaminantes (Davenport, 2002).

4.2. Proceso de lixiviación actual en División Gabriela Mistral

La lixiviación es una técnica hidrometalúrgica que corresponde a la disolución selectiva de las sustancias de interés de la mena o concentrado, para obtener una solución acuosa que contenga el metal valioso y un residuo insoluble que corresponde a la ganga.

La lixiviación puede llevarse a cabo mediante diversas técnicas y condiciones de temperatura y presión, según las características químicas y físicas del recurso a tratar. La selección de los métodos para la lixiviación de materias primas depende principalmente del valor del metal en la materia prima, la ley del mineral, el costo de extracción, el costo de procesamiento y la capacidad de lixiviación del material. La Tabla 4.1 corresponde a una tabla comparativa con las características principales de los diferentes métodos.

En particular, en DGM se realiza la lixiviación en pilas, técnica que consiste en la acumulación del mineral, previamente triturado, sobre una base impermeable formando pilas sobre las que se rocía la solución lixivante.

El proceso productivo general de la división consiste en una extracción de mineral en un rajo abierto, el cual es trasladado a un proceso de chancado en tres etapas (primario, secundario y terciario) para disminuir su tamaño, con el fin de maximizar la exposición de la mena, generar el mínimo de material fino y una distribución granulométrica homogénea. Este material es llevado hacia el sector de apilamiento mientras es curado con ácido, donde se integra una dosis de ácido justa en función de la mineralogía y ganga presente, que genera una rápida y uniforme disolución

de la mena y formación de sulfatos, evitando la reacción de la ganga (Fredes, 2019). Luego, se produce la aglomeración del mineral en un tambor rotatorio con inclinación cercana a 7°, utilizando una mezcla de agua (4 a 9%) y ácido sulfúrico concentrado (5 a 50 kg/ton), para homogenizar la granulometría, a través de fuerzas cohesivas de tensión superficial que unen las partículas más finas a las más gruesas (glómeros), para mantener los rangos de permeabilidad aceptables en el lecho mineral al construir la pila, y lograr un ataque ácido más fuerte, con un mejor rendimiento cinético y mayor selectividad ante especies indeseables.

Tabla 4.1: Características principales de los diferentes tipos de lixiviación. Extraída de Jerez, 2020.

Características del proceso	Lixiviación en botadero	Lixiviación en pilas	Lixiviación en bateas	Lixiviación por agitación	Lixiviación a presión
Ley de mena	Muy bajas <0.2% Cu	Medias 0.2 - 2% Cu	Altas 1 - 2% Cu	Altas >5% Cu	Muy altas Concentrados
Tonelaje	Solo grandes tonelajes	Variable	Limitado por diseño	Limitado por diseño	Limitado por diseño
Inversión capital	Baja	Medianas	Media a alta	Alta	Muy alta
Granulometría	Como sale de la mina (ROM)	P ₈₀ = ¾"	Menor a ¾"	P ₈₀ = 40 µm	P ₈₀ = 40 µm
Recuperación	40 - 60%	70 - 85%	70 - 85%	85 - 95%	90 - 100%
Tiempo de lixiviación	1 a 3 años	2 a 15 meses	1 a 2 semanas	6 a 24 horas	1 a 4 horas
Tipo de mena	Óxidos, sulfuros y antiguos ripios de lixiviación	Óxidos y sulfuros secundarios	Óxidos	Óxidos y sulfuros secundarios	Sulfuros secundarios y primarios

Posteriormente, el mineral curado se deposita y distribuye ordenadamente en pilas de 6 a 8 metros de altura. La pila es regada con soluciones pobres en cobre y ricas en ácido sulfúrico, utilizando goteros y aspersores que cubren toda el área. Este mecanismo de aspersión rocía la mezcla de agua y ácido sulfúrico, solución que se encarga de disolver el cobre contenido en los minerales oxidados, y forma una solución de lixiviación cargada (PLS, siglas de *Pregnant Leach Solution*), que se acumula en una piscina desde donde se bombea para ser transportada. Terminado el ciclo de

lixiviación y de un periodo adecuado de drenaje, el mineral ya agotado o restante, denominado ripio, es retirado y se transporta a botaderos donde de inicia un proceso de lixiviación secundaria.

La recolección de las soluciones ricas en cobre (PLS) se realiza por gravedad mediante canaletas y piscinas, las cuales abastecen la planta de extracción por solventes (SX). Este proceso libera de impurezas al sulfato de cobre para que pase de una concentración de 9 a 45 g/L, mediante la distribución del soluto o ion metálico entre dos solventes inmiscibles, uno de los cuales es usualmente acuoso y el otro un solvente orgánico o extractante que se caracteriza por ser inmiscible al agua, y el cual se caracteriza por tener un alto grado de afinidad selectiva con determinados iones metálicos, con los cuales forma compuestos organometálicos (Manual General de Minería y Metalurgia, 2006). Este extractante permite capturar el cobre presente en la solución, dejando las impurezas como hierro, cloro, aluminio, magnesio o manganeso en la solución original, luego la fase orgánica se pone en contacto con un electrolito de alta acidez, que provoca que el extractante libere el cobre y se transfiera a la solución electrolítica.

Finalmente, ocurre la electroobtención (EW), que consiste en la transformación electroquímica del cobre disuelto en cobre metálico que se deposita en un cátodo mediante energía eléctrica, obteniéndose cátodos de cobre de alta pureza (99,99% de cobre).

Además, cuenta con un proceso de lixiviación secundaria que consiste en regar con refino al botadero de rípios (pila permanente), el material es depositado sobre una superficie impermeabilizada (Donoso, 2018).

4.3. Lixiviación de minerales de cobre

4.3.1. Lixiviación de minerales oxidados de cobre

La mayoría de los óxidos de cobre se lixivian con facilidad en soluciones diluidas de ácido sulfúrico, sin formar productos sólidos de reacción, verificándose un control por reacción superficial o difusión a través de la capa límite (Merino, 2018). Como consecuencia, la mayoría de los minerales oxidados de cobre puros tienen una cinética de lixiviación bastante rápida, como por ejemplo los sulfatos (chalcantita, brochantita y antlerita), carbonatos (malaquita y azurita) y cloruros (atacamita). En el caso de los silicatos (crisocola y dioptasa) la formación de sílice como producto de reacción tiende a hacer la disolución más lenta. Actualmente, en DGM se lixivian minerales de crisocola, arcillas con cobre y óxidos negros.

4.3.2. Lixiviación de minerales sulfurados de cobre

Los minerales sulfurados comprenden a aquellas especies que además de su contenido de azufre en la forma de sulfuro tienen la particularidad de estar exentos de oxígeno.

La mayoría de los minerales sulfurados son insolubles en ácido sulfúrico diluido. Estos sulfuros requieren la presencia de un agente oxidante para oxidar el azufre del estado S^{2-} a estado elemental o a estados de oxidación superiores (como sulfato), entonces ocurre una disolución por un mecanismo electroquímico (Merino, 2018). Esta reacción es extremadamente lenta en condiciones ambientales y requiere tiempos de lixiviación muy largos, al igual que la disolución de la gran mayoría de los sulfuros.

En general, en los procesos hidrometalúrgicos para que la reacción química ocurra se requiere de una cierta fuerza o energía que la impulse y su velocidad de reacción está determinada por la magnitud de ésta. En los minerales sulfurados la fuerza activadora es proporcionada por la presencia y concentración en la solución de lixiviación ácida en medio sulfato, de aceptores de electrones como el oxígeno disuelto o de ion férrico. Así, en sistemas de baja presión, el ion férrico se considera en general, el principal oxidante, mientras que el papel del oxígeno es la re-oxidación de los iones ferrosos a férricos. En cambio, en un sistema de alta presión, el oxígeno pasa a ser el principal oxidante. Actualmente, en DGM se están realizando pruebas de lixiviación clorurada para tratar estos minerales de cobre.

4.4. Variables que condicionan el proceso de lixiviación

La definición de estas variables depende de la ley, mineralogía y las características físicas del mineral y son determinadas mediante pruebas experimentales en columnas o gaviones.

Según Merino (2018), las variables termodinámicas más importantes para que ocurra una reacción de lixiviación es el pH y el potencial redox. La forma más conveniente de representar la termodinámica de sistemas acuosos es en forma gráfica a través de los diagramas de estabilidad potencial Eh – pH o Diagramas de Pourbaix. Estos diagramas permiten visualizar posibilidades de ocurrencia de una cierta transformación química sin tener que recurrir al cálculo termodinámico para los fenómenos que ocurren en medio acuoso. Los resultados son determinantes en los casos que se indica una imposibilidad termodinámica de una determinada transformación, sin embargo, no ocurre lo mismo en caso de tener una respuesta termodinámicamente favorable, ya que la

cinética de dicho proceso puede ser tan lenta que para efectos prácticos resulte imposible lograr un equilibrio termodinámico en tiempos razonables. La cinética extremadamente lenta en algunas reacciones conduce a que algunas fases sólidas existan en condiciones fuera de su rango de estabilidad termodinámica o que fases sólidas no se formen en condiciones termodinámicas favorables y lo hagan otras en su lugar (fases metaestables).

La Figura 4.1 muestra un diagrama Eh-pH del sistema Cu-S-H₂O a 25°C, con la estabilidad de las especies sulfuradas de Cu en equilibrio, y cómo se comportan bajo distintas condiciones tanto ácido-base como oxidante-reductora.

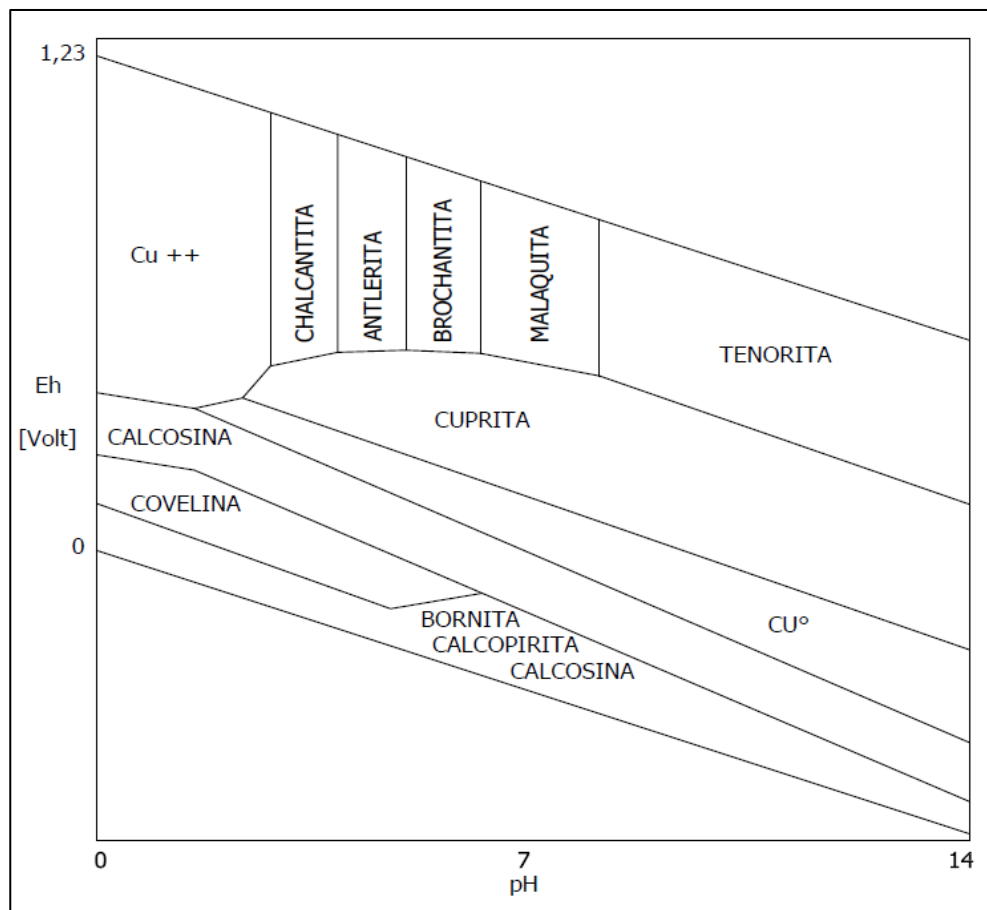


Figura 4.1: Diagrama Eh-pH del sistema Cu-S-H₂O a 25°C con estabilidad de minerales de Cu. Modificada de Domic, 2001.

En segundo lugar, está la temperatura y la concentración de reactivos. Normalmente un aumento en la temperatura producirá un gran aumento en la velocidad de lixiviación. Por otra parte, algunos

reactivos pueden tener efectos catalizadores sobre la reacción principal o retardantes. Por ejemplo, la formación en exceso de azufre elemental genera una barrera que, condiciona negativamente la recuperación de cobre. Además, la regeneración de ion ferroso (Fe^{2+}) al férrico (Fe^{3+}) es de una cinética muy lenta, obligando a utilizar un catalizador para acelerar la regeneración de férrico (Walls, 2017).

Además, la ganga asociada a los materiales de lixiviación tiene diferentes comportamientos que pueden afectar el proceso. Dreier (1998, en Scheffel y otros, 2016) menciona que la disolución de los silicatos de ganga sigue la continuidad de la serie de Bowen, donde los minerales de composición más básicas tienen mayor consumo que los minerales de composiciones más ácidas (Figura 4.2), lo que estaría relacionado con la disposición de la unidad tetraédrica SiO_4 .

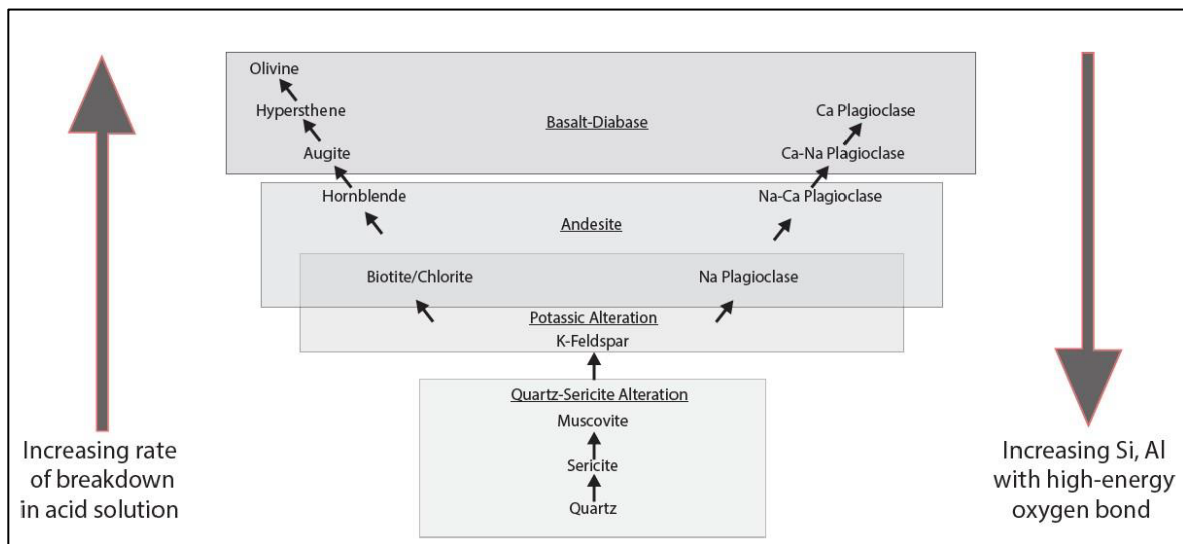


Figura 4.2: Serie de Bowen con cinética de lixiviación. Extraído de Scheffel y otros, 2016.

Si bien la muscovita y biotita tienen estructuras y fórmulas químicas similares, el consumo de ácido es muy diferente. Esto se debe a la energía de enlace entre el Al-O de la muscovita, el Fe-O y Mg-O de la biotita, basado en observaciones experimentales realizadas por Snäll y Liljefors (2000, en Chetty, 2018), donde la biotita fue disuelta completamente en ácido, mientras que la muscovita solo se disolvió en un 5,6%-8,7%, lo que puede explicar la diferencia entre los consumos de ácido entre muestras con mayor concentración de muscovita/sericita o biotita y clorita.

Otro aspecto relevante es la liberación de ion ferroso desde la biotita u otros minerales que contienen hierro que puede ser útil en la extracción de Cu, donde el Fe^{+2} actúa como un agente reductor lo que aumenta el potencial de oxidación ayudando a disolver minerales sulfurados (Chetty, 2018).

5. RESULTADOS

5.1. Caracterización y distribución geológica

5.1.1. Tratamiento de base de datos

Se trabajó con la base de datos histórica del yacimiento con toda la información existente de los sondajes desde 1996 a 2022. Con el fin de que las muestras sean representativas, se filtró información de la base de datos (BDGEO) para que el análisis posterior sea correcto.

Se eliminan los tramos que tengan las siguientes características:

- Sondajes de aire reverso (ARGS y ARDGS), geometalúrgicos (PGS) y geotécnicos (DGT), puesto que estos fueron realizados con una función específica del área y no consideran el mapeo geológico necesario para la caracterización que este trabajo precisa. Solo se dejan los sondajes tipo diamantino (DGS y DLA) distribuidos en toda el área mina. Se puede observar en la Figura 5.1 la distribución de los sondajes a analizar, que corresponden a los de tipo diamantino, y que abarcan el área de interés de este estudio. Con este filtro se reduce de 1.421 a 1.173 sondajes.
- Menas clasificadas como No Diferenciadas (ND) y Sin Recuperación (SR). Las menas de Enriquecimiento (EN) que poseen diferentes intensidades de óxidos como atacamita, crisocola, óxidos negros y/o arcillas de cobre también son eliminadas, puesto que no debería haber coexistencia de óxidos u sulfuros en esta clasificación de mena.
- Leyes de cobre total (CuT) y cobre soluble (CuS) con celdas vacías, valores “0” y sin información (-).
- Alteraciones sin información (-).

Finalmente quedaron un total de 220.891 tramos de sondajes con toda la información de mapeo geológico desde el año 1996 al 2022.

Se crearon hojas de trabajo con las zonas de mena filtradas a zona de mixtos y de enriquecimiento secundario, para analizar su comportamiento en particular. La zona de mixtos presentó un total de 5.107 tramos de Mixto (MX) y 203 tramos de Mixto Estructural (MXE), mientras que la zona de enriquecimiento presentó 6.462 tramos de información.

Para el análisis comparativo del cobre soluble a 1 hora (CuS1) y el cobre soluble a 5 horas (CuS5) se eliminaron todas las celdas vacías de este último, o con valores 99 (sin información) para que la

comparación sea representativa. Además, se añade columna de la razón de solubilidad, que corresponde al cociente entre el cobre soluble y el cobre total.

La distribución final de los sondajes analizados se muestra en la Figura 5.1.

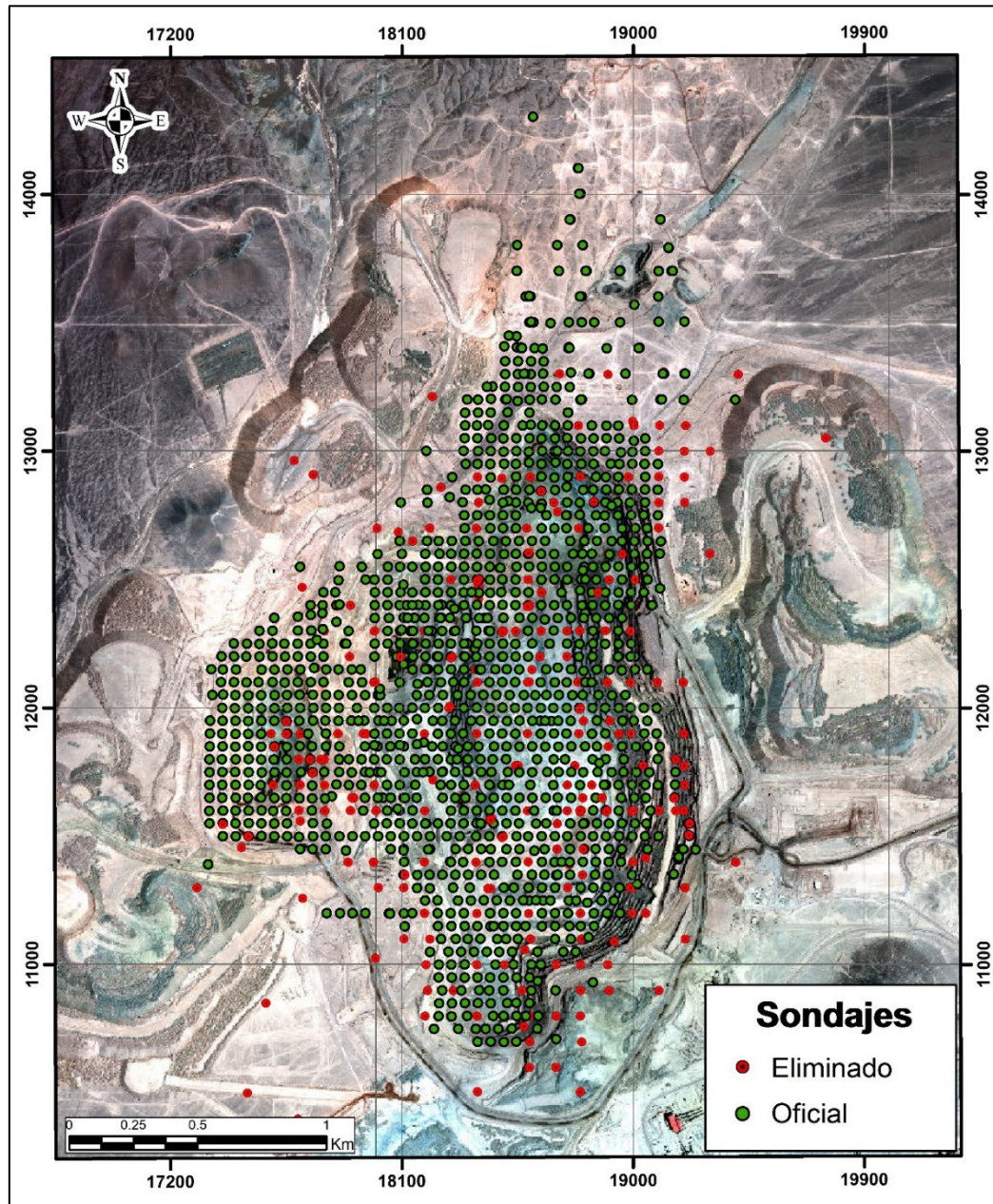


Figura 5.1: Distribución de la totalidad de sondajes del yacimiento. En rojo se muestran los sondajes eliminados, que corresponden a ARDGS, ARGs, PGS y DGT. En verde, los sondajes de tipo diamantino DGS y DLA que serán usados para el análisis de información.

5.1.2. Distribución de las menas de mixtos y enriquecimiento secundario

5.1.2.1. Litología y alteración

A. Mixtos

La zona de mixtos corresponde al 2,39% del total de tramos mapeados en la base de datos de sondajes histórica. En la Figura 5.2 se grafica su distribución en función de la litología y las alteraciones. Se aloja principalmente en la Granodiorita (66%), y en menor medida en la Secuencia Volcánica (16%) y en el Pórfido Tonalítico (9%). Su alteración predominante es la potásica (66%), seguida por la sericítica (18%). La mineralización está compuesta por oxidados de cobre como arcillas de cobre, óxidos negros, atacamita y crisocola, donde los 3 primeros ocurren principalmente en fracturas y vetillas, mientras que la crisocola en fracturas, vetillas y por impregnación. Por su parte, los sulfuros primarios que componen esta zona son bornita, calcopirita, digenita, molibdenita y pirita. Los 3 primeros ocurren en vetillas, de forma diseminada y en fracturas, mientras que los últimos 2, en vetillas y fracturas. Los sulfuros secundarios presentes son la calcosina y covelina. La calcosina tiene diversos modos de ocurrencia, que son en vetillas, fracturas, como patina, en reemplazo y de forma diseminada. El modo de ocurrencia de la covelina es en patina, vetillas y fracturas en igual proporción.

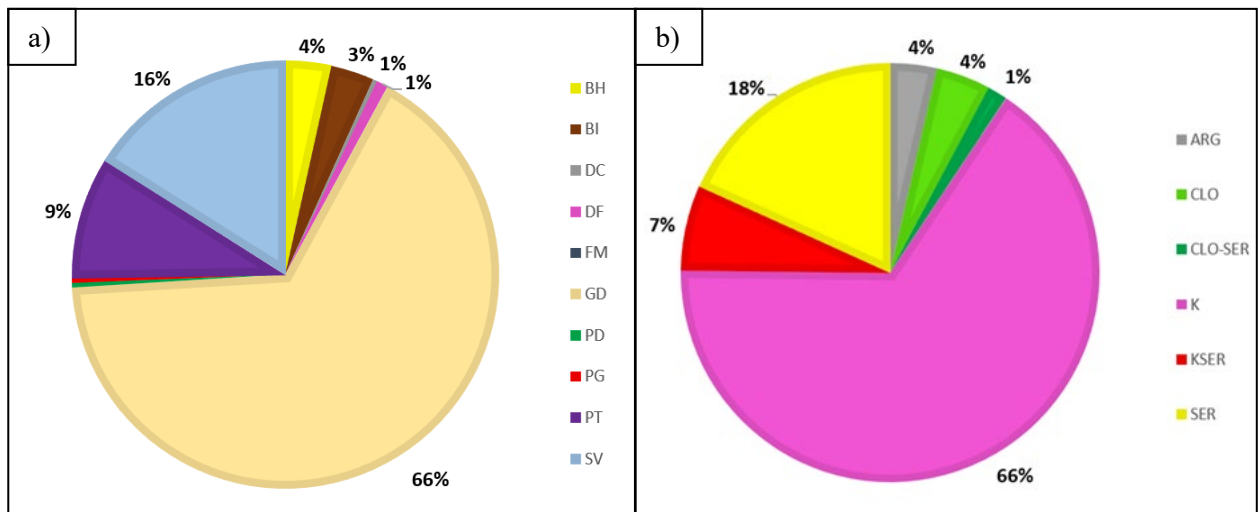


Figura 5.2: Distribución de la zona de mixto por litología y alteración. a) Gráfico circular con la distribución por litología. BH: brecha hidrotermal; BI: brecha ígnea; DC: Diorita Campamento; DF: Diorita Fina; FA: Filones; GD: Granodiorita; PD: Pórfido Diorítico; PG: Pórfido Gaby; PT: Pórfido Tonalítico; SV: Secuencia Volcánica. b) Gráfico circular con la distribución por alteración. ARG: Argílica; CLO: Clorítica; CLO-SER: Clorítica-Sericítica; K: Potásica; KSER: Potásica-Sericítica; SER: Sericítica.

La distribución de leyes de cobre total (CuT), cobre soluble (CuS) y la razón de solubilidad (RSol) se ven en la Figura 5.3.a), donde se observa que los valores más altos de RSol están asociados a las litologías del Complejo Intrusivo Gaby, al Pórfido Diorítico (PD) y a la Granodiorita (GD). El valor más alto de CuT ocurre en la Diorita Fina (DF), sin embargo, su bajo valor de CuS disminuye su razón de solubilidad. La Figura 5.3.b. muestra su distribución de leyes en función de las alteraciones presentes en el yacimiento, donde los valores más altos de RSol ocurren en las alteraciones Potásica-Sericítica (KSER) y Potásica con 43 y 40% respectivamente. Las leyes más altas de CuT y CuS ocurren en la alteración Sericítica (SER).

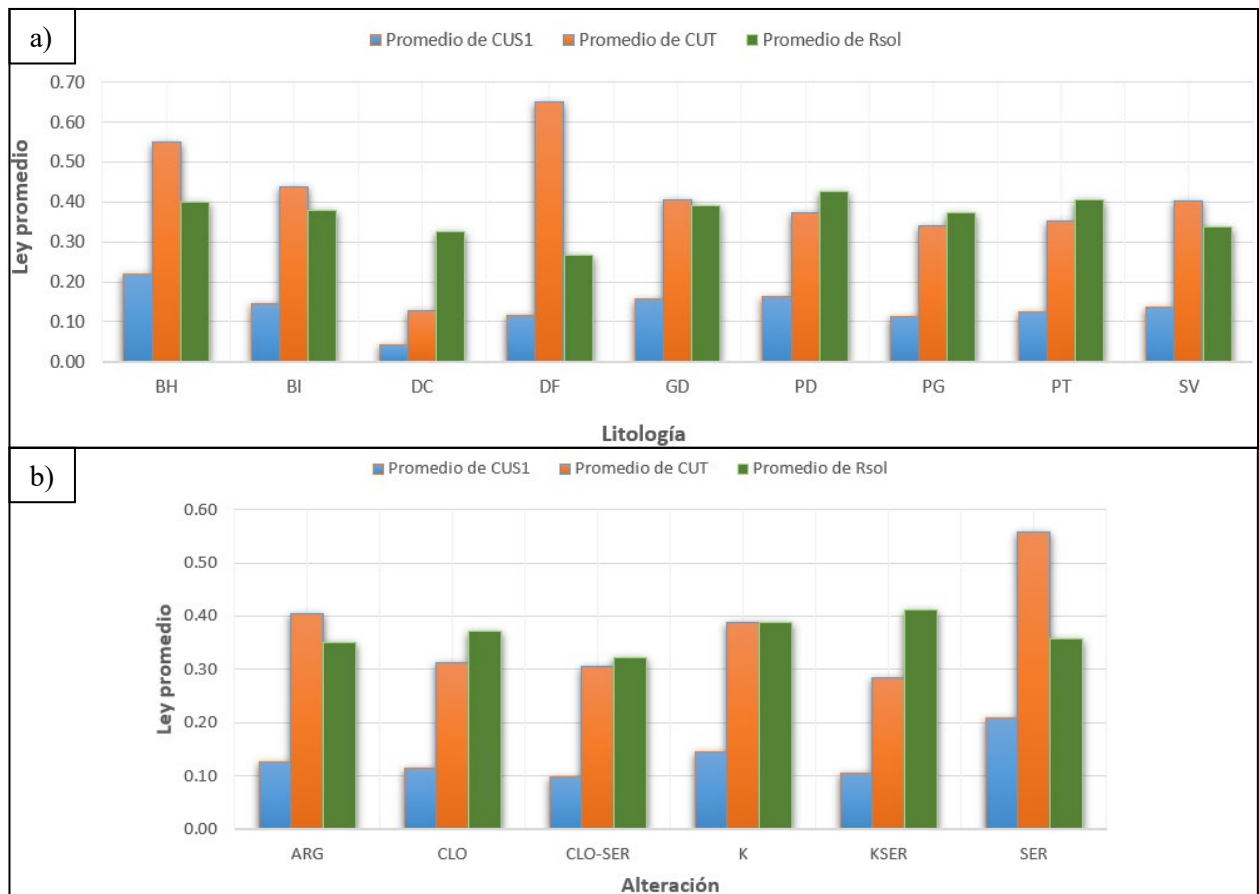


Figura 5.3: Distribución de leyes en función de la litología y alteración para la zona de mixtos. a) Distribución de leyes promedio de CuT, CuS y RSol por litología. BH: Brecha Hidrotermal; BI: Brecha Ígnea; DC: Diorita Campamento; DF: Diorita Fina; GD: Granodiorita; PD: Pórfido Diorítico; PG: Pórfido Gaby; PT: Pórfido Tonalítico; SV: Secuencia Volcánica. b) Distribución de leyes promedio de CuT, CuS y RSol por alteración. ARG: Argílica; CLO: Clorítica; CLO-SER: Clorítica-Sericítica; K: Potásica; KSER: Potásica-Sericítica; SER: Sericítica.

B. Enriquecimiento secundario

La zona de enriquecimiento secundario corresponde al 2,91% del total de tramos mapeados con la información de sondajes. En la Figura 5.4 se grafica su distribución en función de la litología y las alteraciones. Ocurre principalmente en rocas de la unidad Granodiorita (67%), y en menor medida en la Secuencia Volcánica (11%) y en el Pórfido Tonalítico (10%). Su alteración predominante es la potásica (58%), seguida por la sericítica (25%). La mineralización corresponde a calcosina y covelina, donde el primero ocurre predominantemente en vetillas, en fracturas, como patina, de forma diseminada y en reemplazo. La covelina tiene una ocurrencia principal en fracturas, como patina y en vetillas, y en menor medida ocurre como reemplazo y en forma diseminada. Además, hay mineralización subordinada de calcopirita, bornita, digenita, pirita, y molibdenita, cuyos modos de ocurrencia son en vetillas, en fracturas y de manera diseminada.

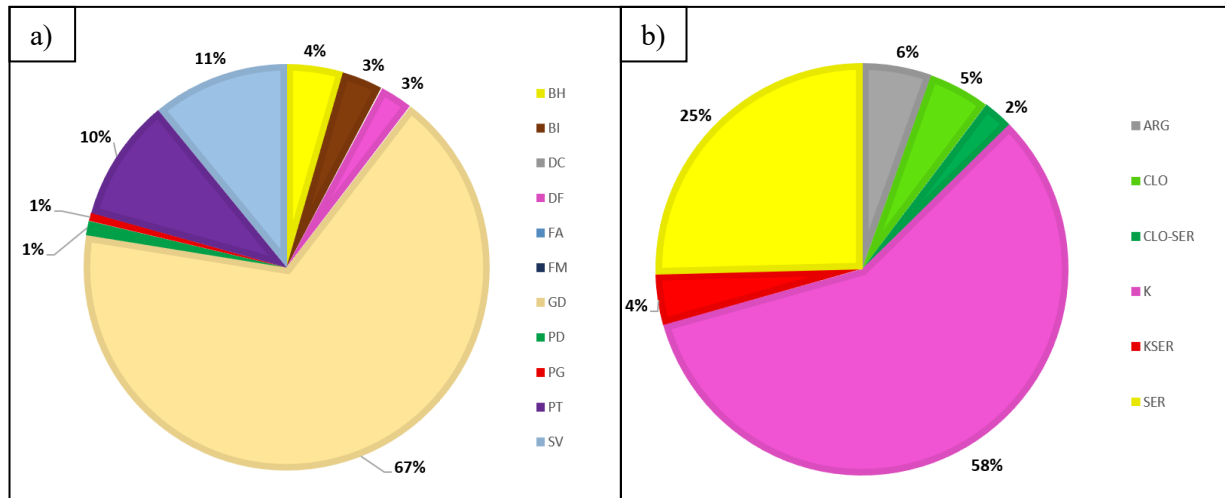


Figura 5.4: Distribución de la zona de enriquecimiento secundario por litología y alteración. a) Gráfico circular con la distribución por litología. BH: brecha hidrotermal; BI: brecha ígnea; DC: Diorita Campamento; DF: Diorita Fina; FA: Filones; GD: Granodiorita; PD: Pórfido Diorítico; PG: Pórfido Gaby; PT: Pórfido Tonalítico; SV: Secuencia Volcánica. b) Gráfico circular con la distribución por alteración. ARG: Argílica; CLO: Clorítica; CLO-SER: Clorítica-Sericítica; K: Potásica; KSER: Potásica-Sericítica; QZOSER: Cuarzo-Sericítica; SER: Sericítica.

La distribución de leyes de cobre total (CuT), cobre soluble (CuS) y la razón de solubilidad (RSol) se ven en la Figura 5.5.a. donde se observa que los valores más altos de RSol están asociados a la Diorita Campamento y Pórfido Gaby. Los valores más altos de CuT ocurren en la Brecha Hidrotermal, Pórfido Diorítico y Pórfido Tonalítico, con 0,63%, 0,58% y 0,59% de Cu respectivamente. La Figura 5.5.b. muestra la misma distribución, pero en función de las alteraciones, donde el mayor valor de RSol se da en la alteración Potásica-Sericítica.

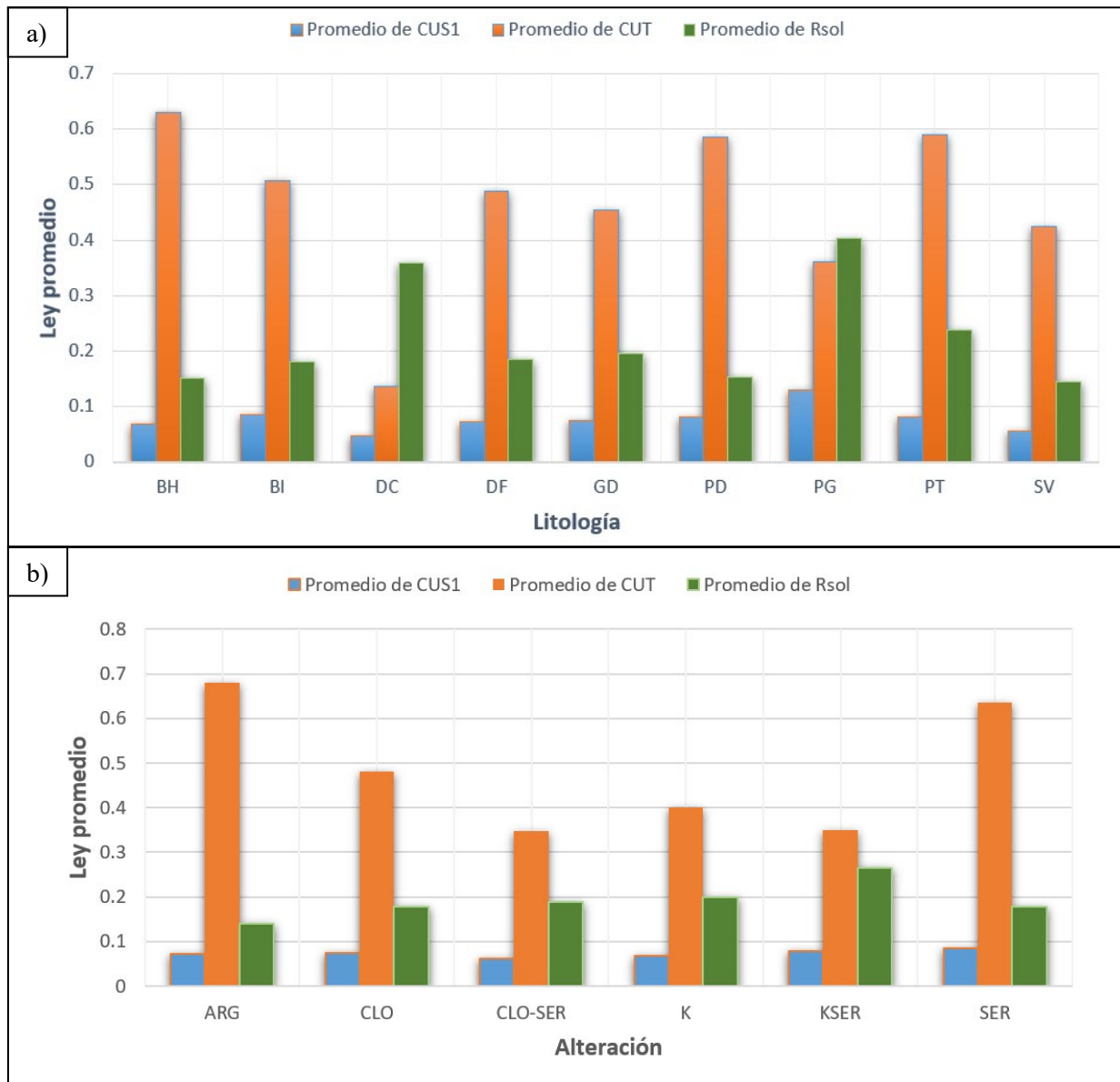


Figura 5.5: Distribución de leyes en función de la litología y alteración para la zona de enriquecimiento. a) Distribución de leyes promedio de CuT, CuS y RSol por litología. BH: Brecha Hidrotermal; BI: Brecha Ígnea; DC: Diorita Campamento; DF: Diorita Fina; GD: Granodiorita; PD: Pórfido Diorítico; PG: Pórfido Gaby; PT: Pórfido Tonalítico; SV: Secuencia Volcánica. b) Distribución de leyes promedio de CuT, CuS y RSol por alteración. ARG: Argílica; CLO: Clorítica; CLO-SER: Clorítica-Sericítica; K: Potásica; KSER: Potásica-Sericítica; SER: Sericítica.

5.1.2.2. Profundidad

Para analizar la profundidad, la variable “z”, que hace referencia a la cota en la que se encuentra el tramo medido, se clasificó en bancos de 15 m, que son los que se trabajan en la División Gabriela Mistral. La Figura 5.6 muestra la distribución de las menas y su variación en profundidad.

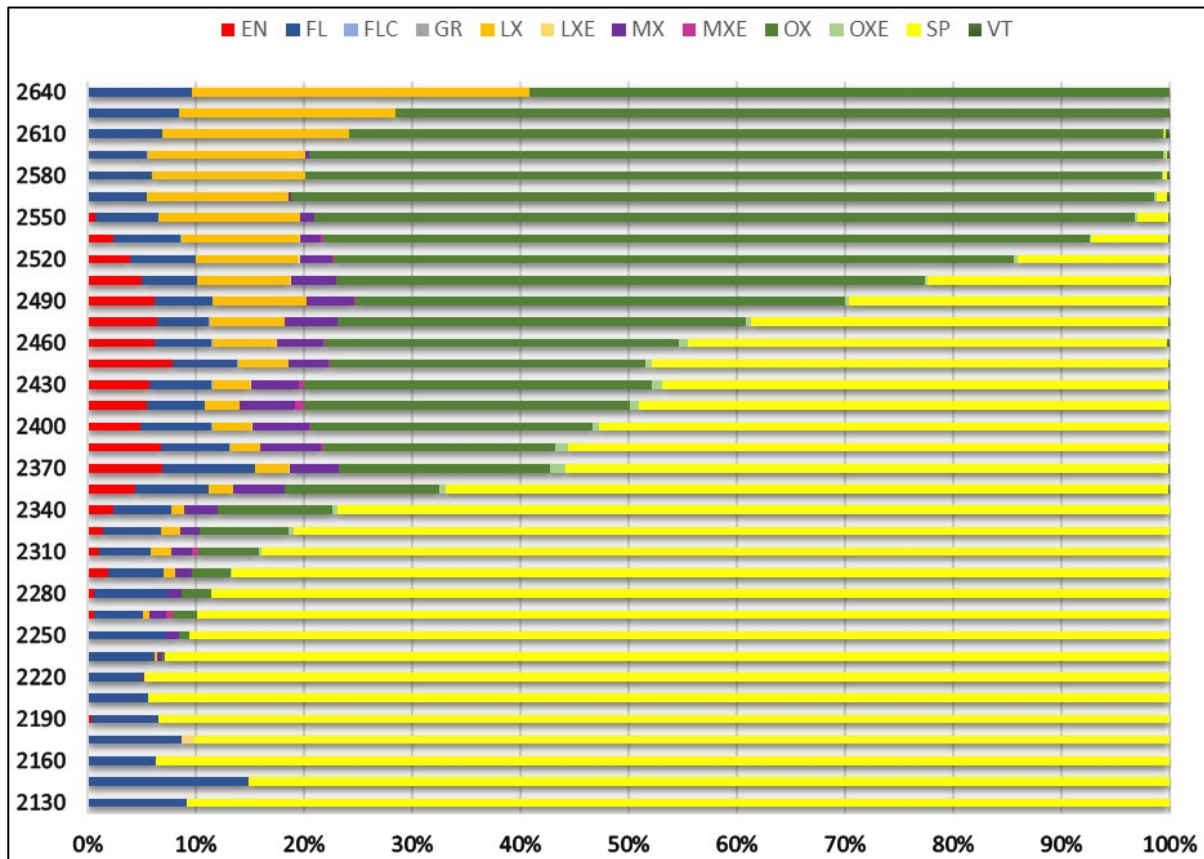


Figura 5.6: Gráfico de barras apiladas con la distribución de las menas en relación con la profundidad.
 EN: Enriquecimiento; FL: Filon; FLC: Filon Clasto; GR: Grava; LX: Lixiviado; LXE: Lixiviado Estructural; MX: Mixto; MXE: Mixto Estructural; OX: Óxido; SP: Sulfuro Primario; VT: Veta.

Del gráfico, es simple notar cómo varía cada mena en relación con la profundidad. El Sulfuro Primario (SP) tiene mayor predominancia en profundidad y va disminuyendo su proporción relativa a las demás menas hacia la superficie. De forma contraria, los óxidos (OX), están levemente desarrollados en profundidad, y tienen mayor abundancia hacia superficie.

Para observar de mejor manera las zonas de interés, se filtran las menas de Enriquecimiento (EN) y Mixtos (MX y MXE). La Figura 5.7 exhibe su relación proporcional respecto a la profundidad.

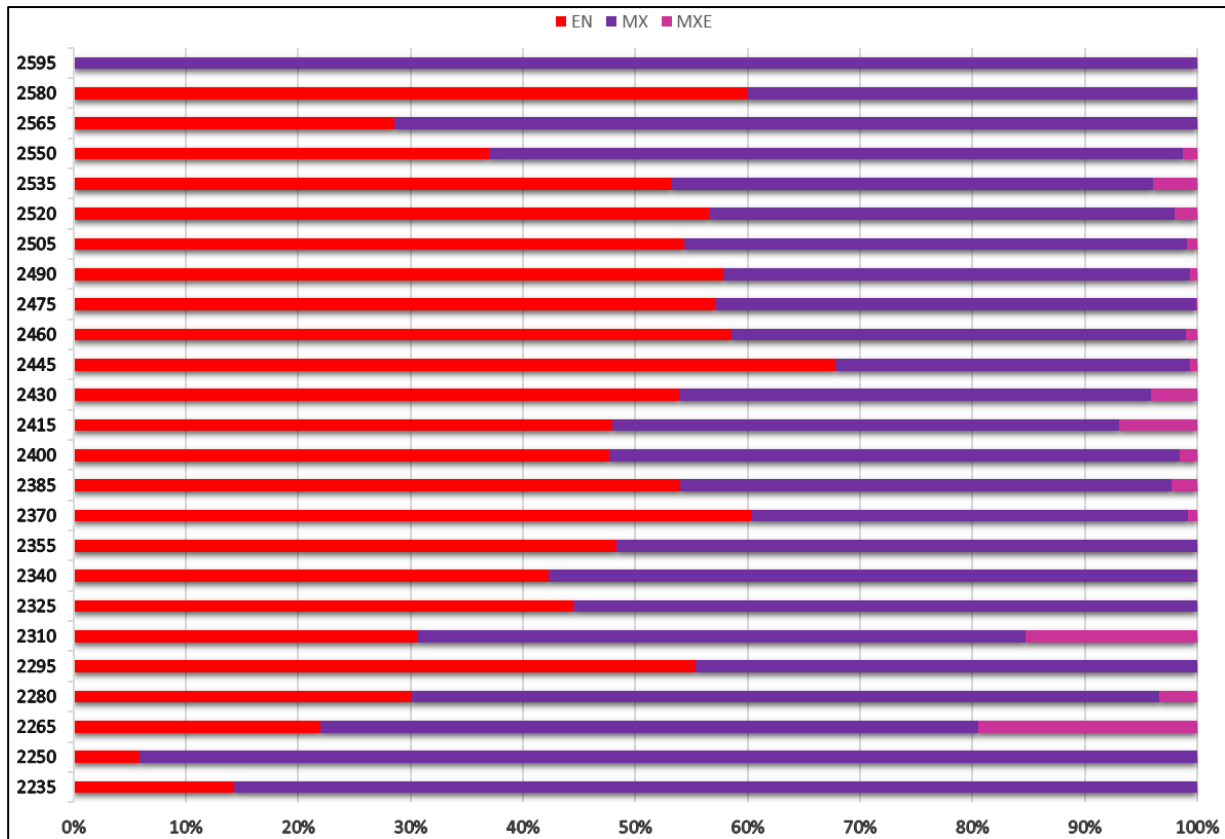


Figura 5.7: Gráfico de barras apiladas con la distribución de Enriquecimiento y Mixtos en relación con la profundidad. EN: Enriquecimiento; MX: Mixto; MXE: Mixto Estructural.

En este gráfico filtrado se puede notar que la zona de mixtos tiene mayor proporción en las cotas más bajas, y es de esperar que sea un mixto del tipo óxido más sulfuro primario, dado que en profundidad hay mayor presencia del sulfuro primario y el enriquecimiento aún no es tan desarrollado. Hacia la superficie, la proporción del mixto varía con tendencia a disminuir, mientras que el desarrollo del enriquecimiento se ve favorecido. Se infiere que el aumento de proporción de mixtos hacia los bancos más superficiales se debe a la mayor presencia de Óxidos y al mayor desarrollo del enriquecimiento secundario, por lo que habría mayor cantidad de mixto tipo óxido más sulfuro secundario. Además, es necesario destacar las diferencias rítmicas que se notan a medida que se va profundizando, lo que sería evidencia de una variación en el paleonivel freático.

Finalmente, es imperativo mencionar que esta visualización en profundidad es bastante general, puesto que no se comporta de la misma forma en todo el yacimiento, y depende de factores geológicos como litología, estructura, alteración y la distribución de la mineralización. Aun así, permite ver a grandes rasgos cómo se distribuyen los mixtos y la zona de enriquecimiento.

5.1.2.3. Mineralización

A. Mixtos

- Oxidados de cobre

Los minerales oxidados de cobre presentes en la mena de mixtos corresponden a arcillas con cobre, óxidos negros, atacamita y crisocola. El modo de ocurrencia para los 4 minerales es principalmente en fracturas y en vetillas. La distribución de las intensidades de mineralización de las arcillas con cobre y de los óxidos negros se observa en la Figura 5.8, donde predominan en las litologías de Granodiorita, Secuencia Volcánica y Pórfido Tonalítico.

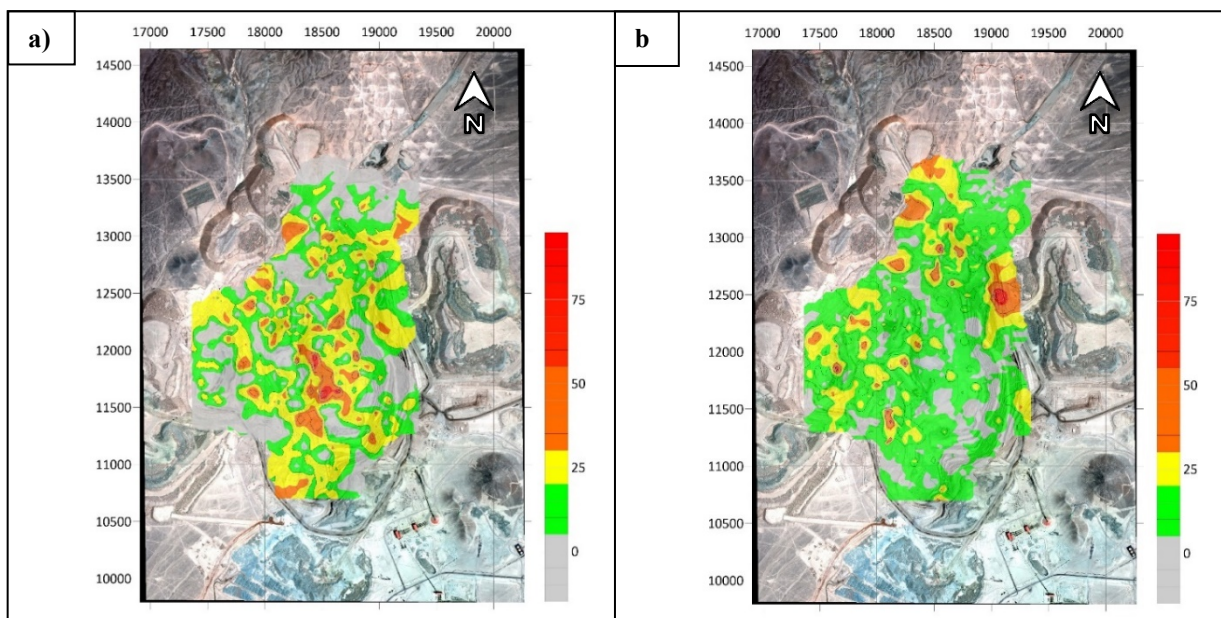


Figura 5.8: Mapas de contorno según intensidades de mineralización de los óxidos arcillas con cobre y óxidos negros de la zona de mixtos. a) Mapa de contorno de arcillas de cobre. b) Mapa de contorno de óxidos negros. Escala muestra en porcentaje la presencia relativa del mineral en la zona.

En la Figura 5.9, se observa la distribución de atacamita y crisocola. En particular la atacamita tiene una mineralización débil en el yacimiento, y sus mayores intensidades ocurren al sur de la falla Capricornio, asociadas a alteración sericítica. Para los demás minerales oxidados no existe predominancia en una litología o alteración en particular, si no que se distribuyen de manera homogénea en el resto del yacimiento.

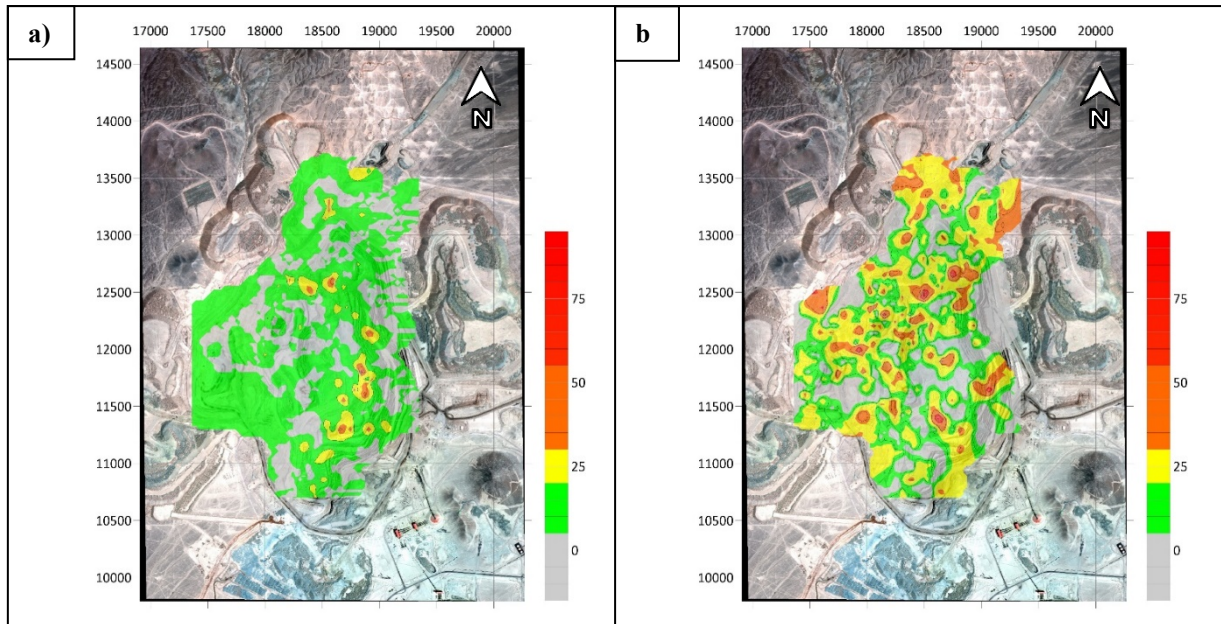


Figura 5.9: Mapas de contorno según intensidades de mineralización de los óxidos atacamita y crisocola de la zona de mixtos. a) Mapa de contorno de atacamita. b) Mapa de contorno de crisocola. Escala muestra en porcentaje la presencia relativa del mineral.

- Sulfuros secundarios

Los minerales de enriquecimiento secundario presentes corresponden a calcosina y covelina, cuya distribución de intensidades de mineralización se aprecia en la Figura 5.10. En la figura se observa que la mineralización de calcosina está mayormente desarrollada que la covelina, y tiene intensidades que van desde muy débil a muy fuerte, mientras que la covelina varía de muy débil a moderada. La calcosina, bajo la falla Capricornio tiene una orientación NE en su mineralización, y en el resto del yacimiento se comporta de manera homogénea, encontrándose en Granodiorita, Secuencia Volcánica, Pórfidos Gaby y Brechas Hidrotermales. Su modo de ocurrencia es en vetillas, fracturas, de forma diseminada y en reemplazo. Por su parte, la covelina ocurre en Granodiorita, Secuencia Volcánica, Pórfidos Gaby y en Brechas Ígneas, de forma diseminada, en reemplazo, impregnación, como patina y en fracturas y vetillas.

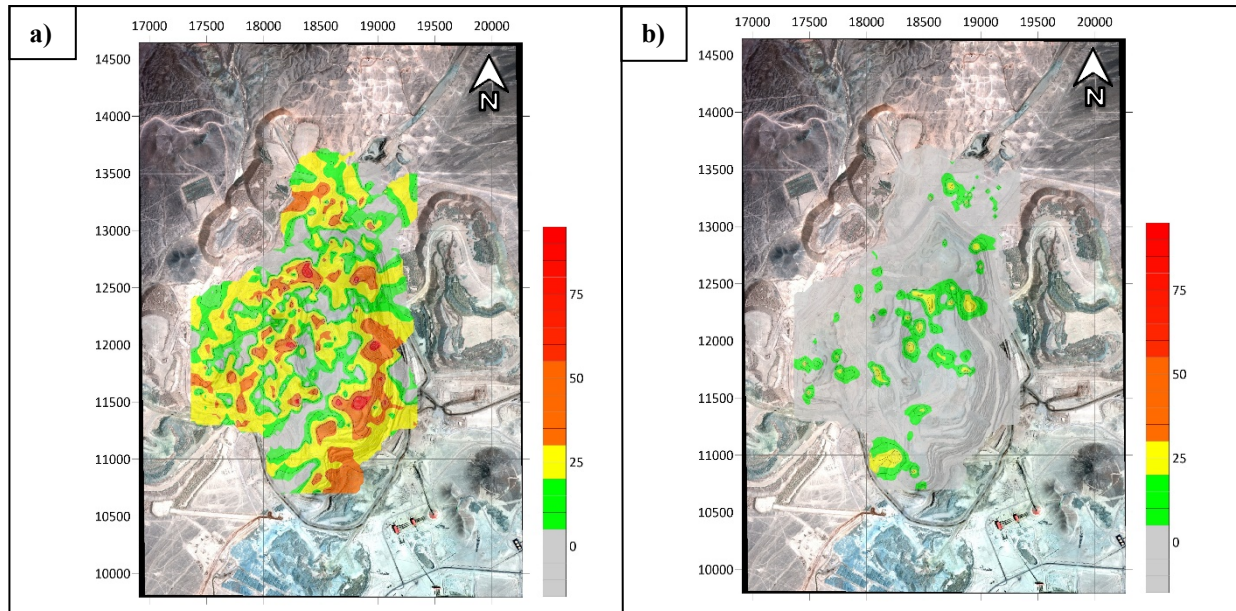


Figura 5.10: Mapas de contorno según intensidades de mineralización de minerales de enriquecimiento para la zona mixtos. a) Mapa de contorno de calcocosa. b) Mapa de contorno de covelina. Escala muestra en porcentaje la presencia relativa del mineral.

- Sulfuros primarios

Los minerales hipógenos presentes corresponden a calcopirita, bornita, digenita, molibdenita y pirita, cuya distribución e intensidades se observa en la Figura 5.11, a excepción de digenita, debido a la escasa mineralización que presenta. El modo de ocurrencia de estos minerales es en vetillas, de forma diseminada y en menor medida en fracturas. La calcopirita tiene intensidades que varían desde muy débil a fuerte, presente mayoritariamente en la Secuencia Volcánica y el Pórfido Tonalítico, y en menor medida en Granodiorita y Brechas Ígneas. La bornita se distribuye de manera similar a la calcopirita, pero con intensidades más bajas y mayor presencia en la Granodiorita. La molibdenita tiene intensidades de mineralización muy débil y débil, distribuido homogéneamente en el yacimiento. Finalmente, la pirita tiene intensidades desde muy débil a muy fuerte, distribuidas principalmente en la Granodiorita y la Secuencia Volcánica. Es posible notar que la mineralización de la pirita ocurre como halo o rodeando a los Pórfidos Gaby, principalmente al sur de la falla Capricornio y en la falla Arturo, ambas con orientación NE, y es suplementario a la distribución de la calcopirita.

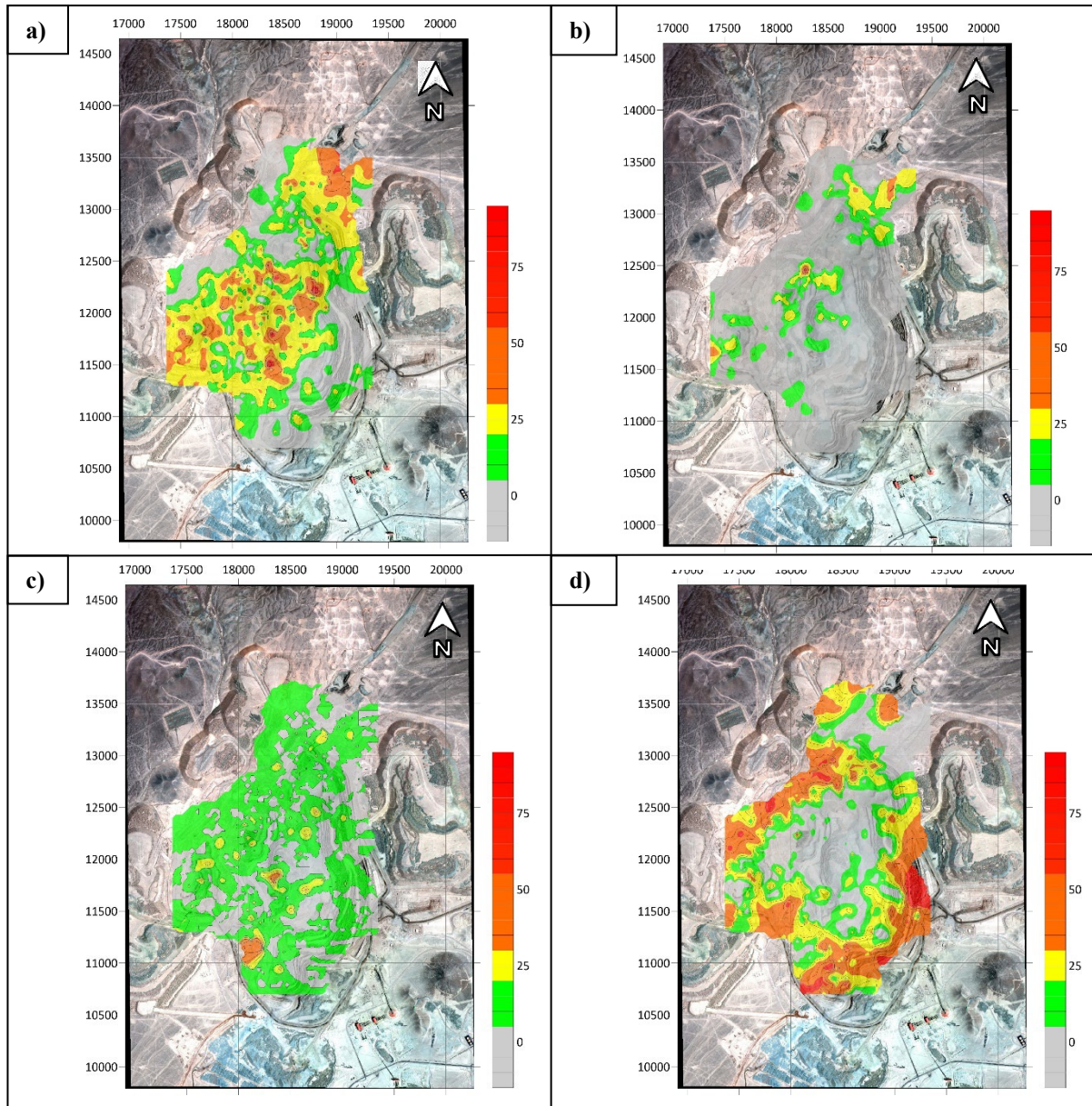


Figura 5.11: Mapas de contorno según intensidades de mineralización de sulfuros primarios para la zona mixtos. a) Mapa de contorno de calcopirita. b) Mapa de contorno de bornita. c) Mapa de contorno de molibdenita. d) Mapa de contorno de pirita. Escala muestra en porcentaje la presencia relativa del mineral en la zona.

- **Minerales de ganga**

Los minerales de ganga que puede ser relevantes para dilucidar las alteraciones hidrotermales del pórfido corresponden a la biotita y la sericita. La biotita (Figura 5.12.a.) muestra mayores intensidades hacia la porción Norte del yacimiento y en la zona central, disminuyendo hacia el Sureste, lo que representaría la alteración potásica de fondo. Por su parte, la sericita (Figura 5.12.b.)

muestra una distribución asociada al borde Sur del Pórfido Crowded y sus mayores intensidades están bajo la falla Capricornio, que indica un ambiente de mayor acidez.

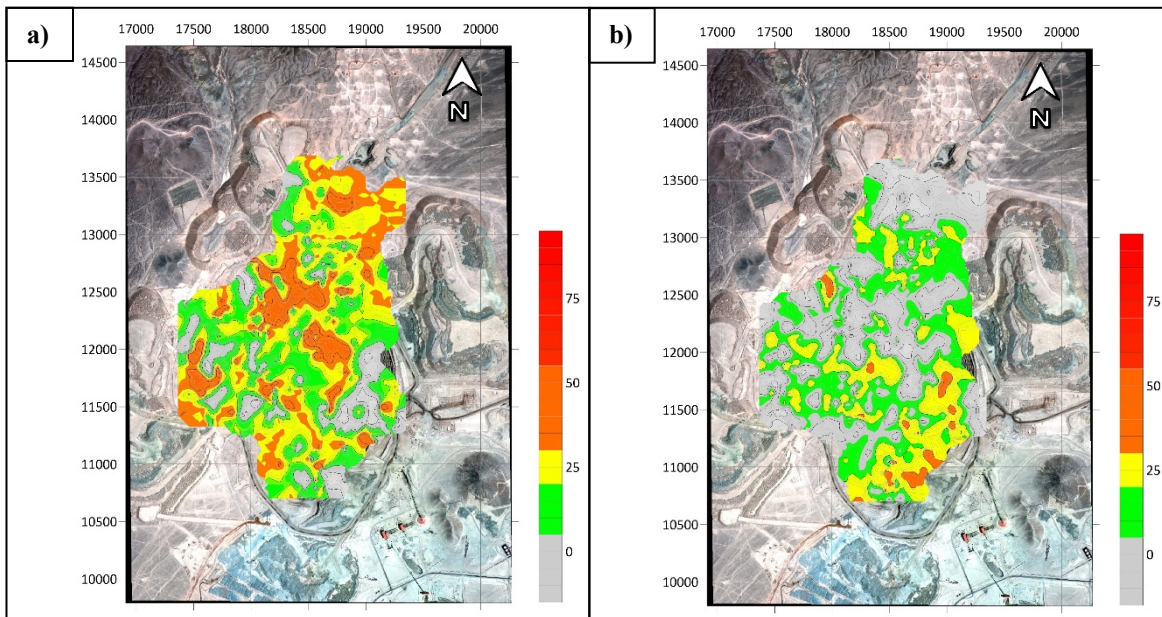


Figura 5.12: Mapas de contorno según intensidades de mineralización de minerales de ganga para la zona de mixtos. a) Mapa de contorno de biotita. b) Mapa de contorno de sericita. Escala muestra en porcentaje la presencia relativa del mineral.

B. Enriquecimiento secundario

- Sulfuros secundarios

Los minerales de enriquecimiento secundario presentes corresponden a calcosina y covelina, cuya distribución de mineralización se observa en la Figura 5.13. La calcosina está distribuida de forma homogénea en todo el yacimiento con intensidades que varían desde débil a muy fuerte, y presenta un desarrollo ampliamente mayor al de la covelina, que presenta intensidades muy débiles a moderadas. El modo de ocurrencia de estos minerales es diseminado, en vetillas y como reemplazo. La covelina se distribuye principalmente en el Pórfido Tonalítico, la Secuencia Volcánica y en menor medida en la Granodiorita, con nula presencia al sur de la falla Capricornio y en la falla Arturo.

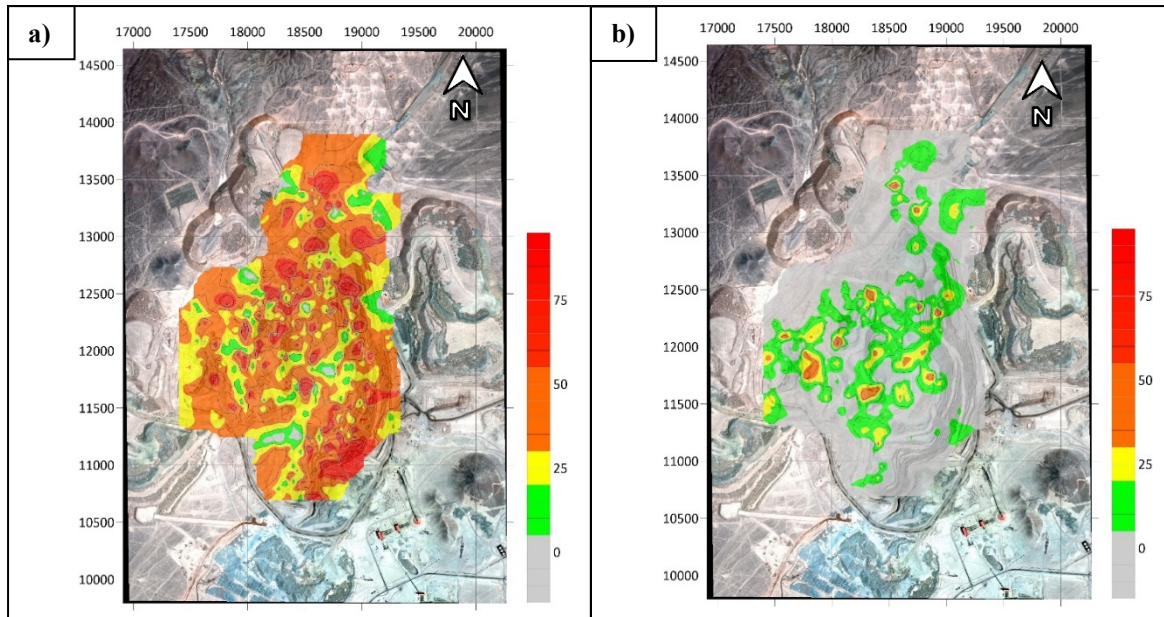


Figura 5.13: Mapas de contorno según intensidades de mineralización de sulfuros secundarios para la zona de enriquecimiento. a) Mapa de contorno de calcosina. b) Mapa de contorno de covellina. Escala muestra en porcentaje la presencia relativa del mineral.

- Sulfuros primarios

Los minerales hipógenos presentes en la mena de enriquecimiento corresponden a calcopirita, bornita, digenita, molibdenita y pirita, cuya distribución e intensidades se observa en la Figura 5.14, a excepción de digenita, que debido a su escasa mineralización y baja intensidad no se observa al ser representada en mapa. El modo de ocurrencia de estos minerales es en vetillas, de forma diseminada y en menor medida en fracturas. La Figura 5.14.a. muestra que la calcopirita tiene intensidades que varían desde muy débil a fuerte, presente mayoritariamente en la Granodiorita, Secuencia Volcánica y el Pórfido Tonalítico, con escasa mineralización al sur de la falla Capricornio. La bornita (Figura 5.14.b.) posee una mineralización menor y con bajas intensidades, y se distribuye en la Brecha Hidrotermal, Granodiorita, Secuencia Volcánica y el Pórfido.

La Figura 5.14.c. exhibe que la molibdenita tiene intensidades de mineralización débil a moderado, distribuido en Granodiorita, Secuencia Volcánica Brechas Hidrotermal e Ígnea y en el Pórfido. Finalmente, se ve que la pirita (Figura 5.14.d.) tiene intensidades desde muy débil a muy fuerte, distribuidas en el contorno del yacimiento, rodeando el Pórfido. Tanto al sur como al norte del

yacimiento, la mineralización tiene una tendencia NE, y en los sectores donde alcanza sus mayores intensidades, es donde hay escasa mineralización de calcopirita.

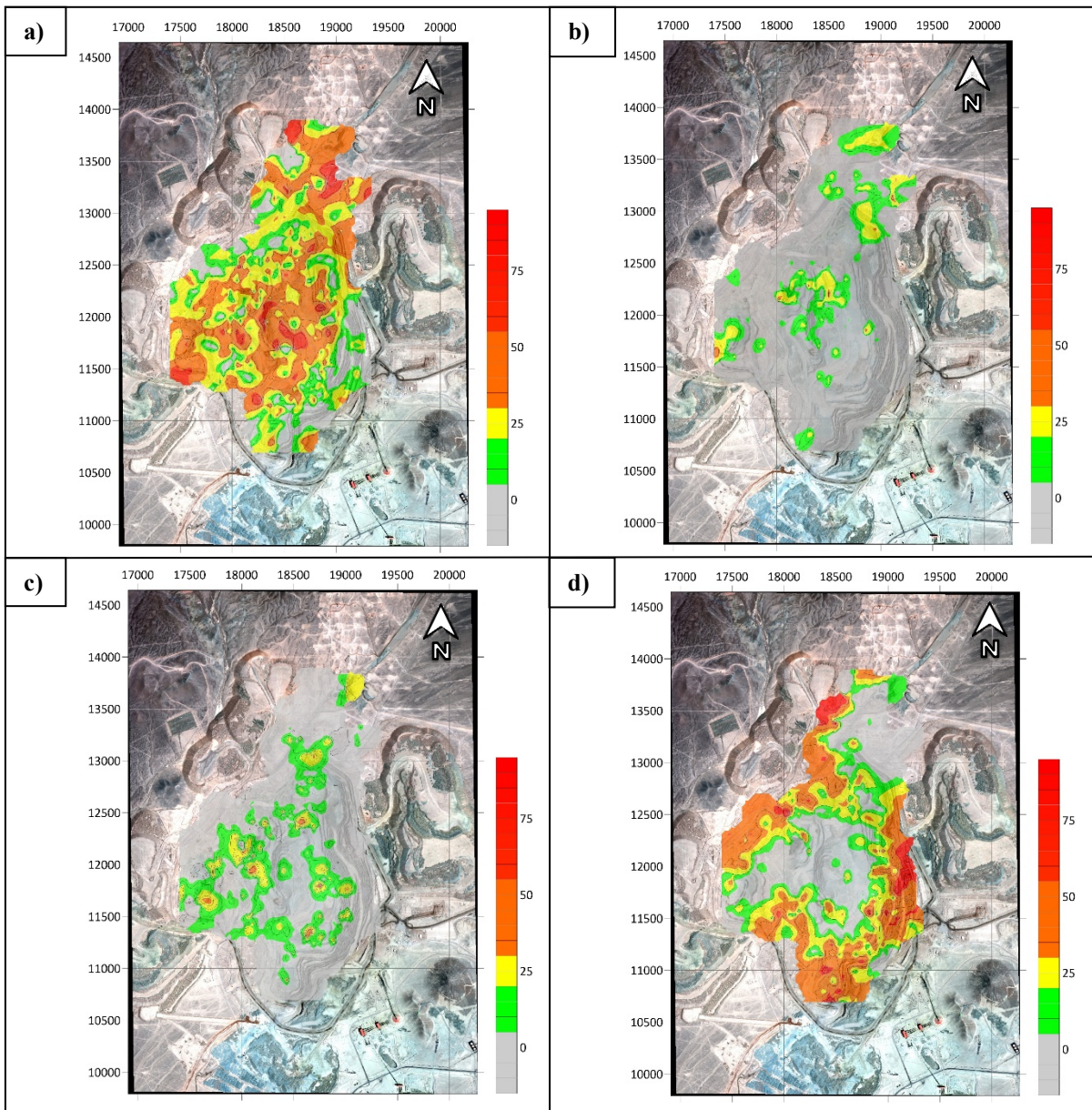


Figura 5.14: Mapas de contorno según intensidades de mineralización de sulfuros primarios para la zona de enriquecimiento. a) Mapa de contorno de calcopirita. b) Mapa de contorno de bornita. c) Mapa de contorno de molibdenita. d) Mapa de contorno de pirita. Escala muestra en porcentaje la presencia relativa del mineral en la zona.

5.1.3. Análisis y caracterización geológica

En primer lugar, es necesario realizar un análisis estadístico de los datos mediante el *software* Minitab, programa diseñado con el fin ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas, para conocer su comportamiento y definir su distribución. Para identificar la distribución estadística de cada mena se utiliza la función “Identificación de la distribución individual” del programa. Esta práctica herramienta permite comparar fácilmente la manera en que sus datos se ajustan a 16 distribuciones diferentes. Hay tres medidas para discernir entre las distribuciones. La primera es a través de la gráfica de probabilidad, que corresponde a una excelente manera de identificar visualmente la distribución que siguen los datos. Si los puntos de los datos siguen la curva, la distribución se ajusta. La segunda medida, es mediante el estadístico de Anderson-Darling (AD), cuyos valores más bajos de AD indican un mejor ajuste. La tercera medida corresponde al Valor p, donde es válido comparar los valores p entre las distribuciones y seleccionar el más alto, ya que un valor p bajo (por ejemplo, $< 0,05$) indica que los datos no siguen esa distribución.

5.1.3.1. Mixtos

La distribución identificada corresponde a la log-logística de 3 parámetros (Figura 5.15) a excepción de la razón de solubilidad, donde se puede interpretar diversas poblaciones dentro de esta familia de datos. Estas poblaciones se deben a que la zona de mixtos al ser una coexistencia de minerales, su RSol dependerá de la cantidad de óxidos presente y del tipo y cantidad de sulfuros que lo compongan. A mayor cantidad de sulfuros primarios, menor será su RSol. La distribución loglogística de 3 parámetros es una distribución de probabilidad de una variable aleatoria cuyo logaritmo tiene distribución logística. Tiene una forma similar a la distribución logarítmica normal, pero con colas más pesadas, y sus parámetros son ubicación, escala y valor umbral.

Para definir las diferentes poblaciones se crea un código Python con la función *clustering* para realizar el agrupamiento de características similares con las variables Razón de Solubilidad (RSol) y Cobre Soluble (CuS), dado que son directamente proporcionales. Para realizar *clustering* en Python, se utiliza la librería KMeans de SciPy. La elección del número de *clusters* (k) es un aspecto crítico en el análisis de clustering y puede tener un gran impacto en los resultados. Por lo tanto, es importante explorar diferentes valores de k y evaluar la calidad del agrupamiento.

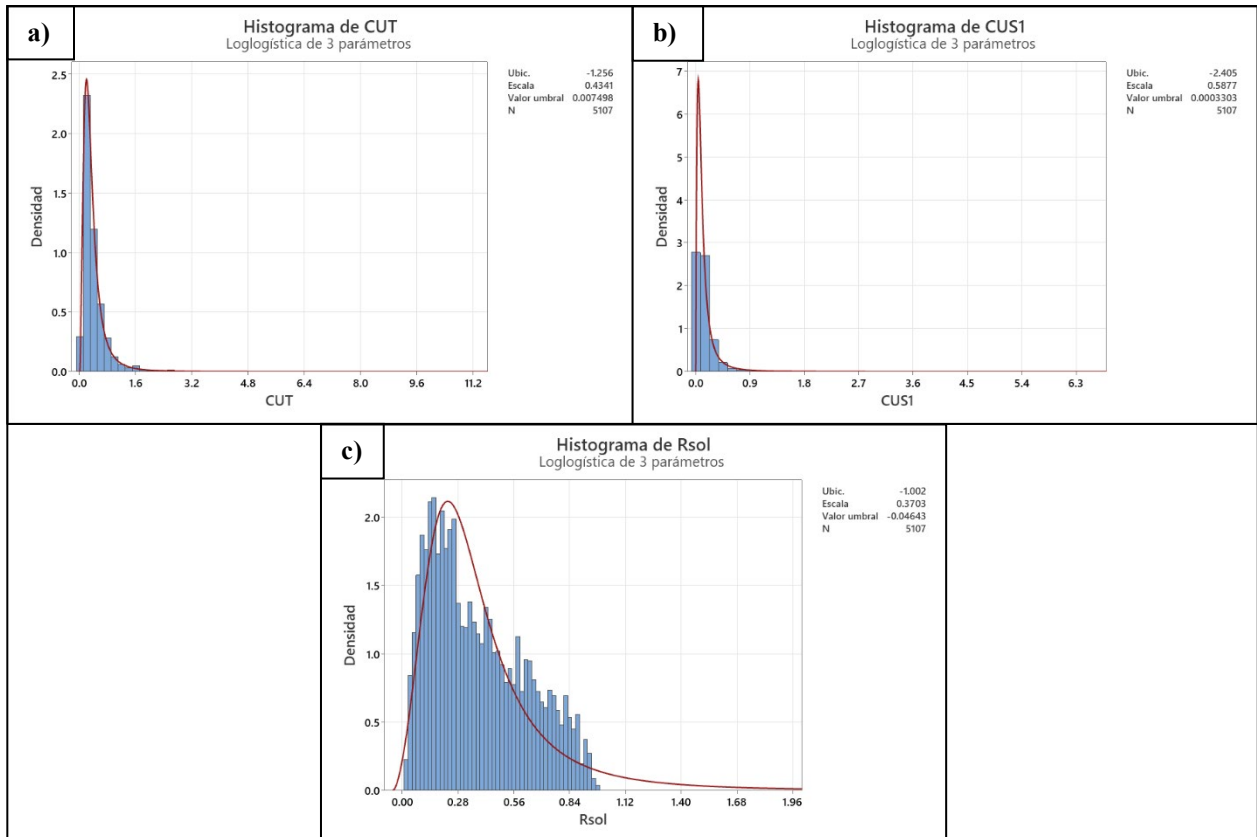


Figura 5.15: Gráficos de distribución loglogística de 3 parámetros para mena de Mixto. Histogramas realizados en Minitab. a) Gráfico de distribución de CuS. b) Gráfico de distribución de CuT. c) Gráfico de distribución de la razón de solubilidad (RSol).

Algunas técnicas que podemos utilizar para determinar el número óptimo de *clusters* se describen a continuación.

- Método del codo (*Elbow method*)

Este método se basa en la idea de que la suma de los cuadrados de las distancias entre cada punto y su centroide dentro de un *cluster* disminuye a medida que aumentamos el número de *clusters*. El método del codo consiste en trazar la suma de los cuadrados de las distancias en función del número de *clusters*, y seleccionar el número donde la reducción en la suma de los cuadrados de las distancias disminuye significativamente, formando una curva en forma de codo. Como resultado, se grafica la suma de los cuadrados de las distancias en función de k , y se selecciona el número óptimo de *clusters* donde la reducción en la suma de los cuadrados de las distancias disminuye significativamente, formando una curva en forma de codo. La gráfica resultante se observa en la Figura 5.16.a.

- Coeficiente de Silueta (*Silhouette score*)

El coeficiente de Silueta es una métrica que mide la similitud entre los puntos de un *cluster* y los puntos de los *clusters* vecinos. Un valor alto de Silueta indica que los puntos son muy similares entre sí y muy diferentes de los puntos de los vecinos, lo que indica una buena separación entre los *clusters*. Como el método del codo no muestra claramente el número óptimo, se utiliza este método, obteniendo el resultado que se muestra en la Figura 5.16.b. donde se observa que el valor más alto corresponde a 3.

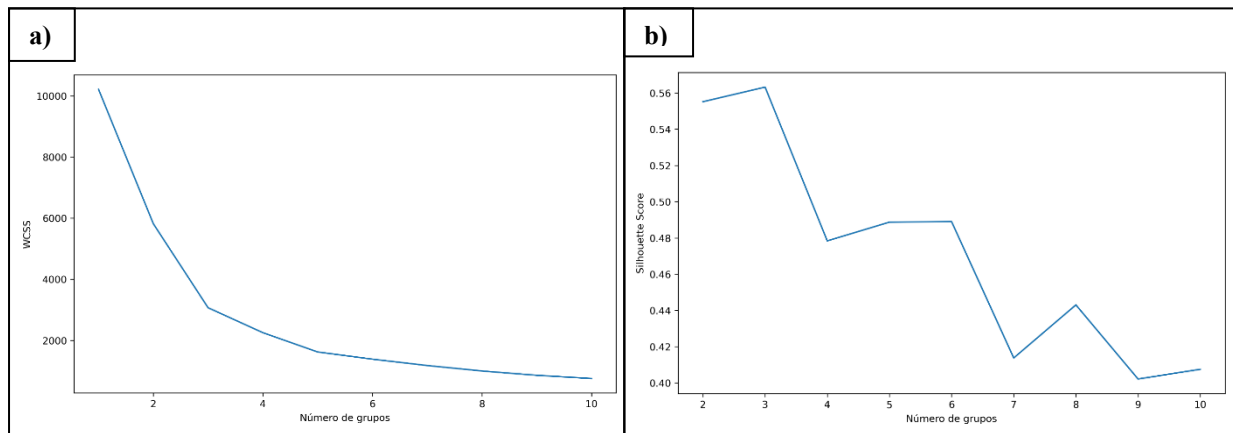


Figura 5.16: Gráficos de método del Codo y Silueta para la zona de mixtos. a) Método del Codo. El quiebre en la recta que marque el mayor cambio en la pendiente de esta, indica el número de *clusters* óptimo. b) Método de Silueta. El valor más cercano a 1 indica el número de *clusters* óptimo.

Es importante tener en cuenta que el *clustering* es una técnica exploratoria no supervisada, por lo que es necesario interpretar cuidadosamente los resultados obtenidos y verificar si realmente tienen sentido en el contexto del problema que se está tratando de resolver.

Con el número de poblaciones calculado, se realiza la función de agrupamiento de datos con comportamiento similar, cuyo resultado se observa el siguiente gráfico, representado en la Figura 5.17.

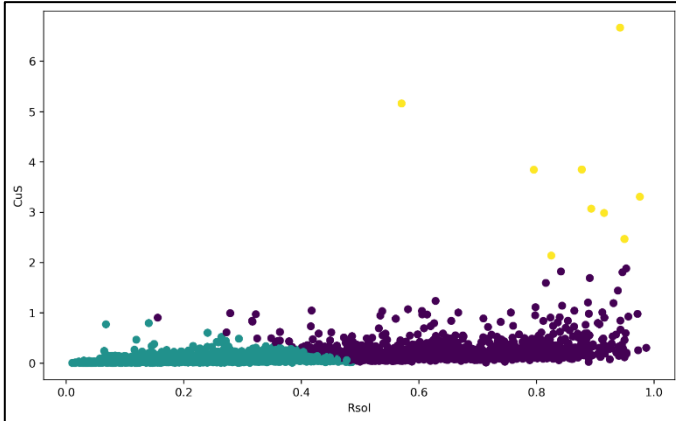


Figura 5.17: Gráfico de dispersión de la razón de solubilidad y cobre soluble con *clustering* para la zona de mixtos. Realizado en Python

De esta forma, los rangos de cada *cluster* para las variables son:

- *Cluster 0*: Rsol: [0,156; 0,987] - CuS: [0,010; 1,880]
- *Cluster 1*: Rsol: [0,011; 0,486] – CuS: [0,002; 0,794]
- *Cluster 2*: Rsol: [0,571; 0,977] – CuS: [2,136; 6,666]

De este resultado, la familia de *cluster 0* se compone de 1.613 datos, el *cluster 1* de 3.478 y el *cluster 2* de menor densidad, con 16 datos que exhibe valores atípicos, de un total de 5.017 tramos de información.

Una vez obtenidas estas poblaciones, es necesario hacer la revisión de la información geológica que describen.

Al hacer la comparación de la distribución de la mineralización con la distribución de los *clusters* encontrados, que se muestran en la Figura 5.18, es posible notar que no hay una distribución espacial única de sulfuro primario o sulfuro secundario en algún *cluster* en específico, pero si se observa que las mayores intensidades de mineralización de los minerales característicos de enriquecimiento secundario se asocian al *cluster 1*, en cambio, las mayores intensidades de sulfuros primarios coinciden con la ubicación espacial en planta del *cluster 0*. Por otra parte, los minerales oxidados se presentan en mayor proporción en el *cluster 0*, lo que explicaría los altos valores de RSol que alcanzan. Finalmente, el *cluster 2*, de valores atípicamente altos, se compone principalmente de minerales oxidados en intensidades altas y calcosina.

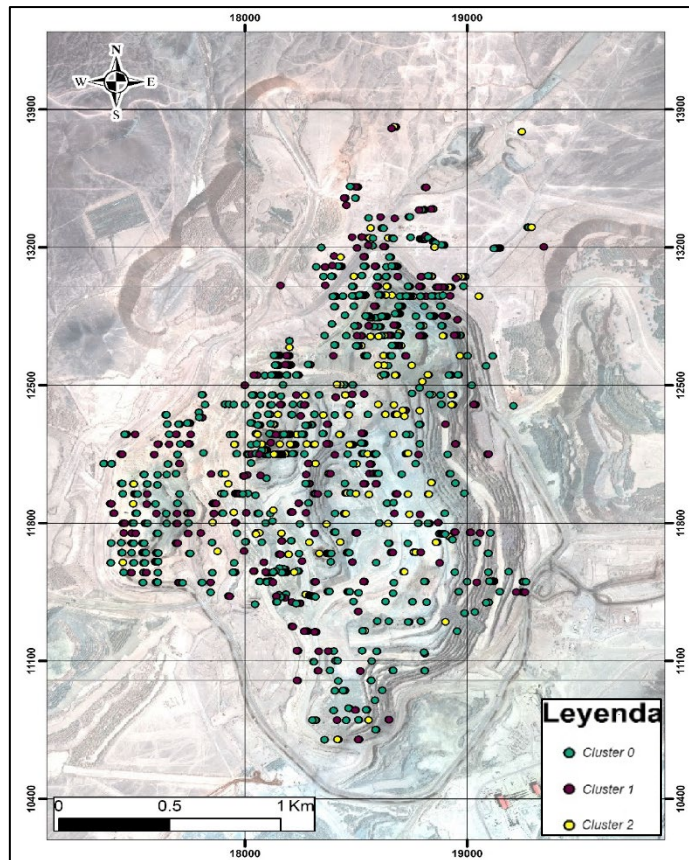


Figura 5.18: Mapa con distribución de clusters de la zona de mixto.

De esta forma, se pueden asociar ciertos parámetros geológicos descritos para el yacimiento, que pueden tener influencia en la distribución y formación de diferentes poblaciones dentro de la mena de mixtos. En el sector Sureste del yacimiento, se observa una tendencia NE, que es coincidente con la mayor mineralización de pirita (Figura 5.11.d.), calcosina (Figura 5.10.a.) y atacamita (Figura 5.9.a.), y con la presencia de sericita (Figura 5.12.b.), indicativos de un ambiente de mayor acidez, donde existe desarrollo de enriquecimiento secundario.

Con esta información, para la zona de mixtos se infieren al menos 2 poblaciones, un mixto del tipo óxidos más sulfuro primario, y otro del tipo óxidos más sulfuro secundario. De esta forma, en la BDGEO se crea una nueva variable que separa los mixtos en óxidos con la presencia única de sulfuros primarios, óxidos con presencia exclusiva de sulfuros secundarios y óxidos con la coexistencia de ambos tipos de sulfuros. Esta nueva distribución se ve en la Figura 5.19, que muestra parámetros geológicos adicionales que pueden estar condicionando el desarrollo de enriquecimiento secundario y con ello la formación de sulfuros secundario.

En ella se observa que además de presentarse un mayor desarrollo al Sur de la falla Capricornio, hay tendencias bien marcadas de otras características distintivas en el yacimiento. Hacia el Este del área de estudio, hay una agrupación de óxidos más sulfuros secundarios con orientación NW que siguen la dirección del lineamiento Elvirita. Por otra parte, se observa la misma asociación con tendencia NE, que sigue una estructura no definida pero reconocida en terreno como falla Arturo. Finalmente, de manera más difusa, se ve esta población en el contacto entre la Secuencia Volcánica y la Granodiorita. Todas estas características, son indicativas de removilización de soluciones a través de planos de debilidad que permiten el desarrollo de un ambiente de condiciones más ácidas, con desarrollo de enriquecimiento secundario. En la zona central del área se observa la población compuesta por óxidos más sulfuros primarios.

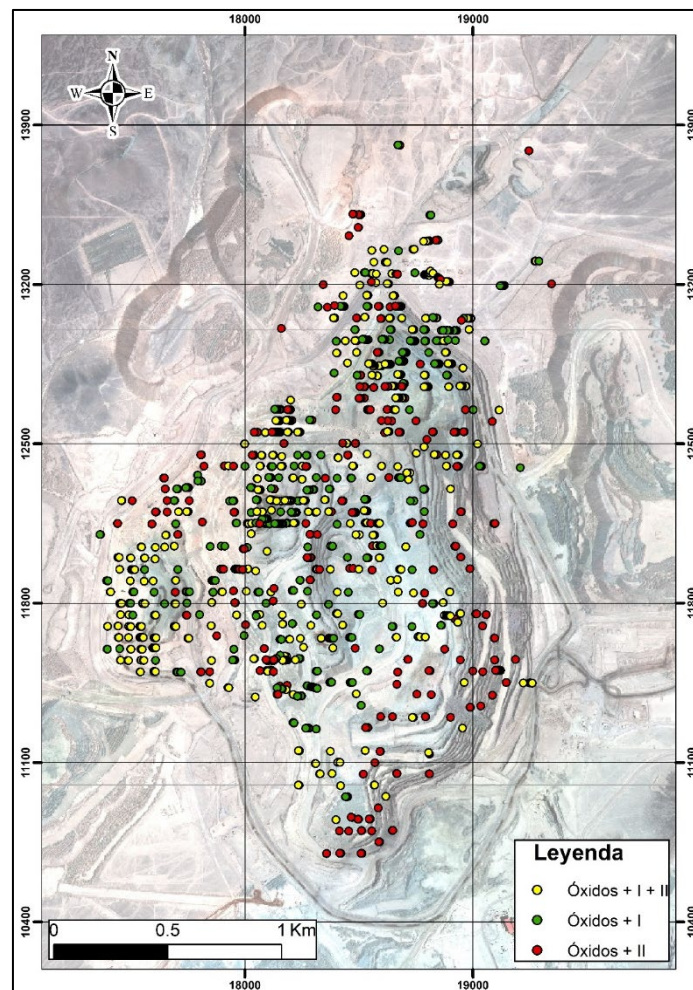


Figura 5.19: Mapa con la distribución de las poblaciones definidas para la zona de mixtos.

5.1.3.2. Enriquecimiento

La distribución identificada corresponde a una de tipo log-logística de 3 parámetros, dado que sus gráficas se ajustan a la curva (Figura 5.20) y sus valores de Anderson-Darling son menores en comparación a las demás distribuciones.

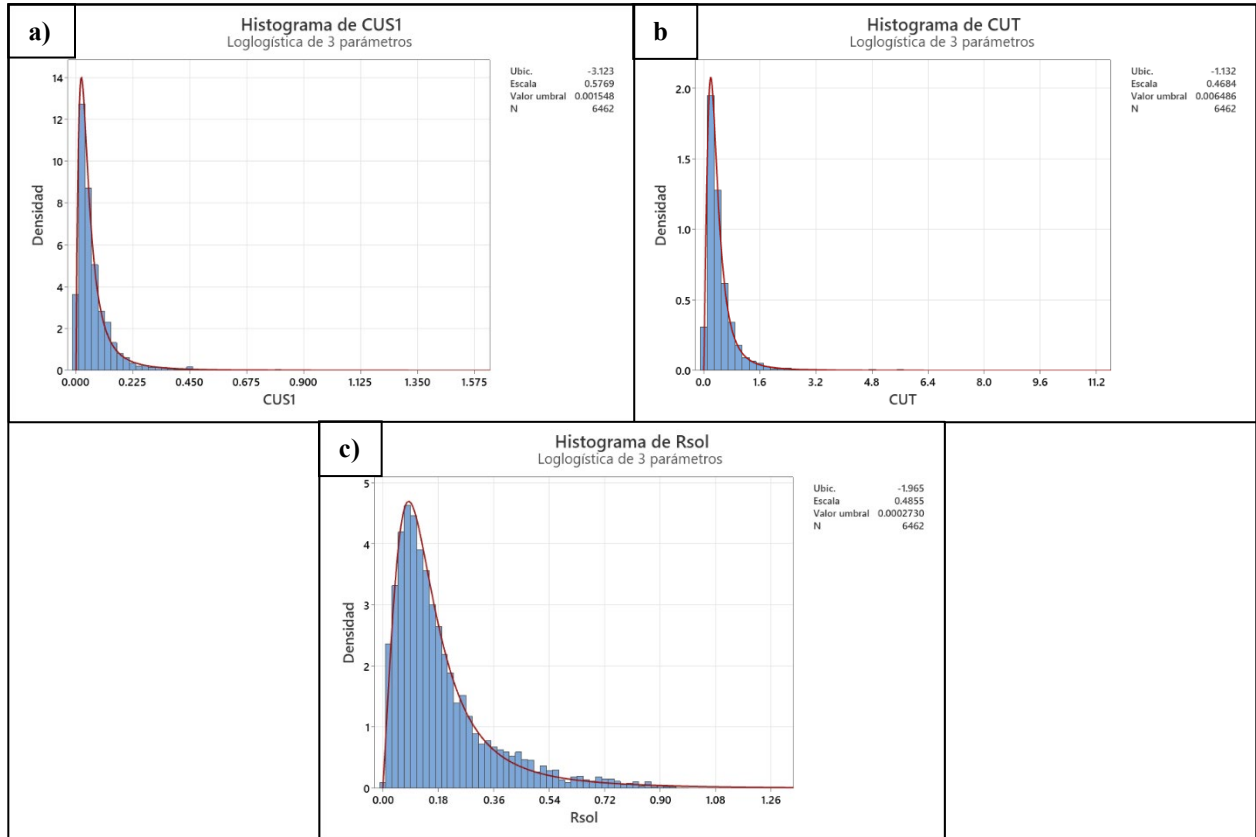


Figura 5.20: Gráficos de distribución loglogística de 3 parámetros para mena de Enriquecimiento. Histogramas realizados en Minitab. a) Gráfico de distribución de CuS. b) Gráfico de distribución de CuT. c) Gráfico de distribución de la razón de solubilidad (RSol).

De la Figura 5.20 es posible notar que, para la razón de solubilidad, el histograma se ajusta relativamente a la curva, sin embargo, hay una población menor que no sigue a distribución. De la misma forma que para la mena de mixtos. Para analizar las diferentes poblaciones se utiliza el código Python creado y se realiza el agrupamiento de familias con características similares con las variables RSol y CuS.

Para encontrar el número óptimo de *cluster* se utilizan los métodos del codo y el coeficiente de silueta explicados anteriormente, donde se reconocen 2 poblaciones, cuyas gráficas se muestran en la Figura 5.21.a. y Figura 5.21.b.

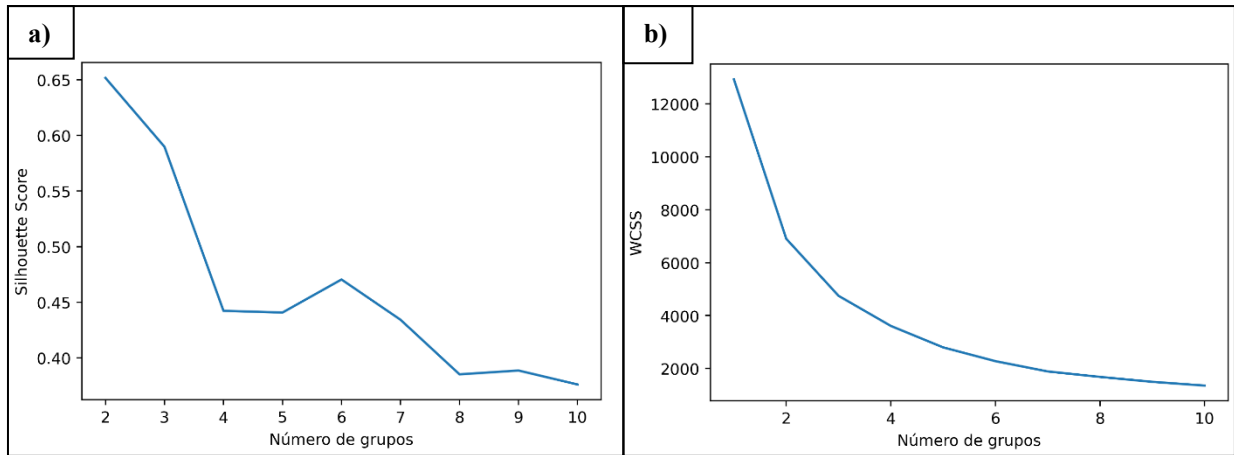


Figura 5.21: Gráficos de método del Codo y Silueta para la zona de enriquecimiento. a) Método del Codo. El quiebre en la recta que marque el mayor cambio en la pendiente de esta, indica el número de *clusters* óptimo. b) Método de Silueta. El valor más cercano a 1 indica el número de *clusters* óptimo. Realizado en Python

Con el número de poblaciones ya calculado, se realiza la función de agrupamiento de datos con comportamiento similar, cuyo resultado se observa el siguiente gráfico, representado en la Figura 5.22.

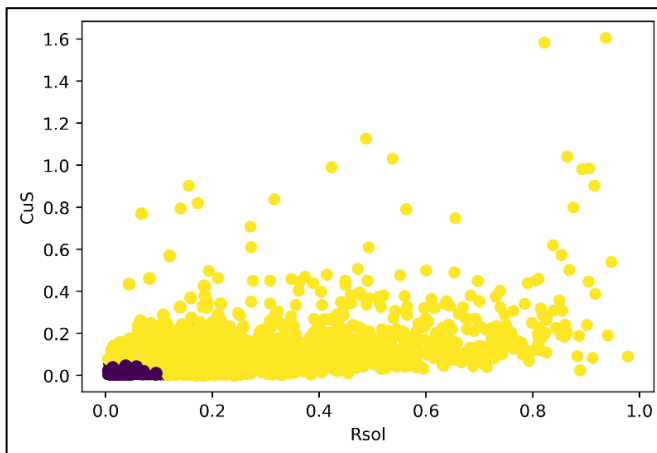


Figura 5.22: Gráfico de dispersión de la razón de solubilidad y cobre soluble con *clustering* para la zona de enriquecimiento. Realizado en Python.

De esta forma, los rangos de cada *cluster* para las variables son:

- *Cluster 0*: Rsol: [0,004; 0,333] - CuS: [0,002; 0,770]
- *Cluster 1*: Rsol: [0,140; 0,978] – CuS: [0,005; 1,605]

De este resultado, la familia de *cluster 0* se compone de 51 datos de un total de 6.462 tramos, y el resto de ellos, corresponden al *cluster 1*, siendo una población homogénea de gran densidad de datos.

Si se realiza la comparación de la distribución de la mineralización con la distribución de los *clusters* encontrados graficados espacialmente en la Figura 5.23, es posible observar que la población más pequeña se distribuye de forma similar a las mayores intensidades de covelina, mientras que para el *cluster* 0, es similar a la distribución de la calcosina, con presencia en todo el yacimiento.

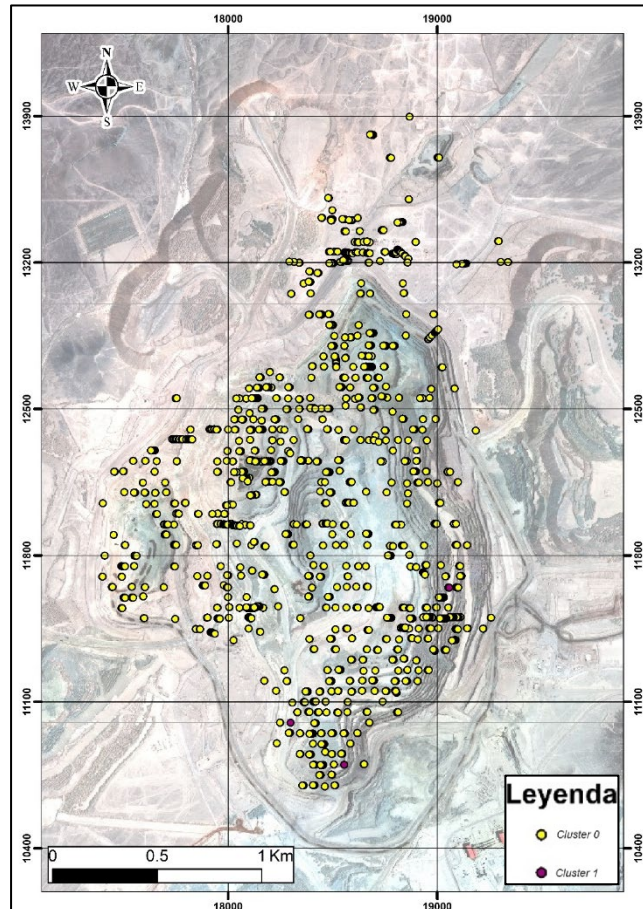


Figura 5.23: Mapa con distribución de *clusters* de la zona de enriquecimiento.

Sin embargo, al hacer la revisión de mapeo de sondajes, la distribución de cada mineral no es representativo para algún *clusters* en particular, sino que es de manera homogénea para ambas poblaciones, y por lo tanto se distribuyen de manera uniforme en el yacimiento. La Figura 5.13 muestra la mineralización de sulfuros secundarios para esta mena, y nos indica que hay un enriquecimiento de calcosina (Figura 5.13.a.) mucho más desarrollado en relación con la covelina (Figura 5.13.b.) y que se distribuye en la totalidad del yacimiento, lo que explicaría esta homogeneidad. No obstante, hay presencia de sulfuros primarios con altas intensidades, por lo que se realiza una clasificación según su presencia e intensidad de mineralización. El enriquecimiento

fuerte hace referencia a los tramos de sondaje que solo poseen mineralización de sulfuros secundarios, donde todo el sulfuro primario ha sido enriquecido. Mientras que, el enriquecimiento débil se refiere a tramos donde hay coexistencia de sulfuros primarios y secundarios, es decir, hay ocurrencia de un enriquecimiento parcial. La Figura 5.24 muestra la distribución de esta categorización.

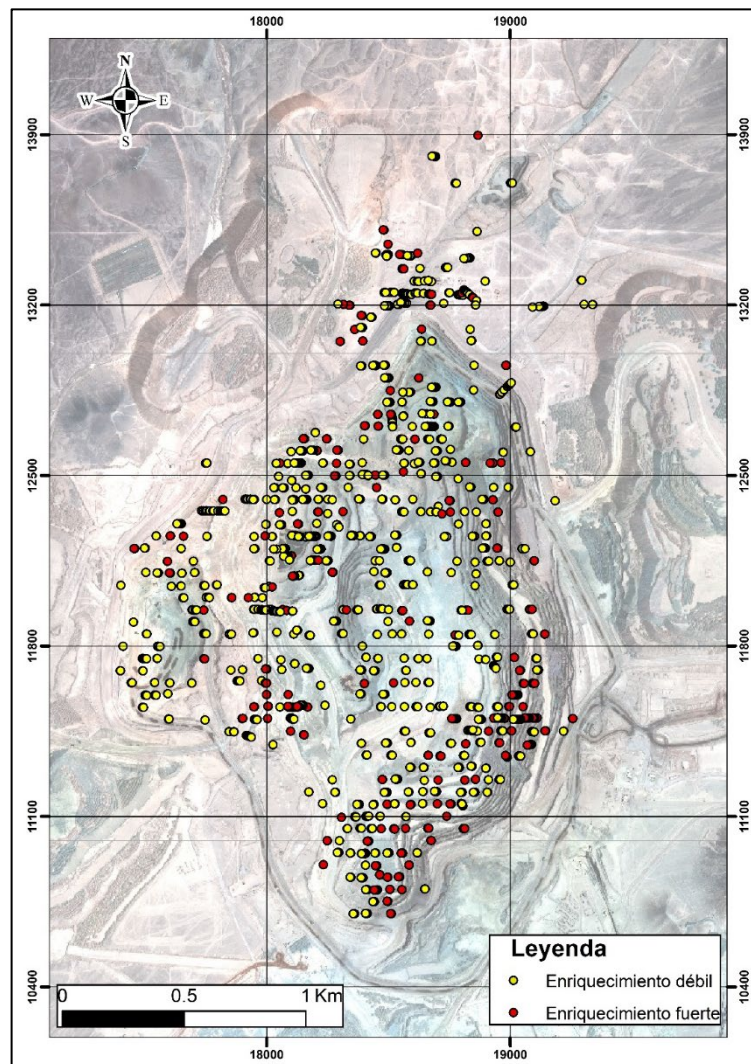


Figura 5.24: Mapa con la distribución de las poblaciones definidas para la zona de enriquecimiento.

Finalmente, se superponen ambas menas en la Figura 5.25, donde se observan los parámetros geológicos descritos como responsables de la distribución de las subunidades reconocidas, con un fuerte control estructural. Estas estructuras corresponden a un subgrupo de las estructuras presentes en la Figura 3.5. Además, se observa que las unidades descritas para las menas de mixtos y de

enriquecimiento secundario se encuentran genéticamente relacionadas, puesto que se encuentran en un mismo ambiente de formación.

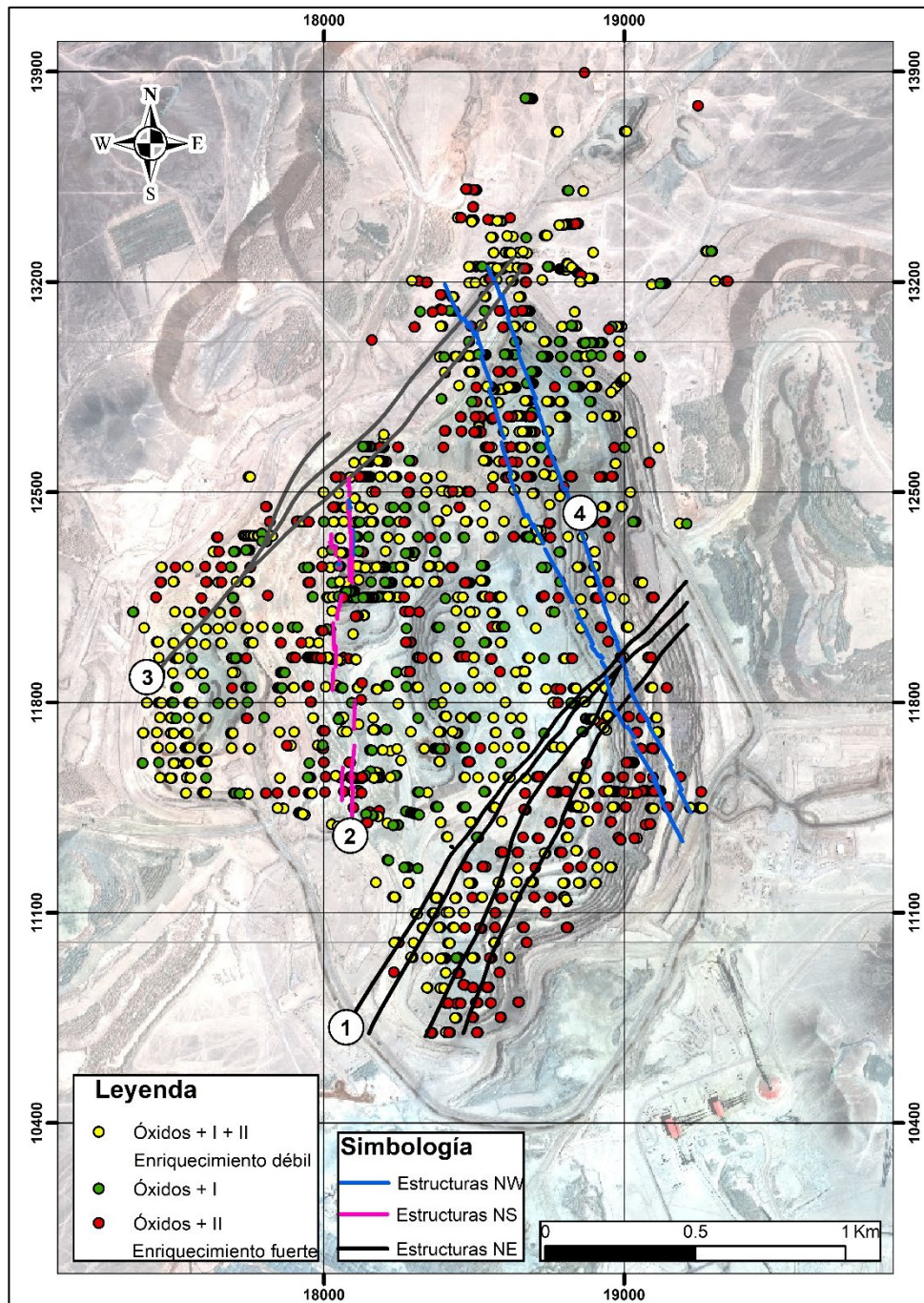


Figura 5.25: Mapa con la distribución de las poblaciones definidas para las zonas de mixtos y de enriquecimiento secundario. 1) Falla Capricornio. 2) Contacto SV – GD. 3) Falla Arturo. 4) Lineamiento Elvirita.

5.1.4. Metalogénesis de la zona de mixtos y enriquecimiento

La zona de mixtos y de enriquecimiento son fundamentales para entender los procesos supérgenos. Ambas zonas reflejan el equilibrio dinámico entre los procesos de oxidación y reducción, que proporciona información sobre las condiciones geoquímicas y freáticas del pasado.

La génesis y la distribución de las zonas de mixtos y de enriquecimiento secundario están fuertemente influenciadas por varios factores, siendo de primer orden el control estructural y las fluctuaciones del nivel freático. Para tener una visión compresiva de este proceso, se propone el perfil de enriquecimiento supérgeno idealizado para un depósito de tipo pórfido cuprífero en la Figura 5.26 con énfasis en las zonas de interés de este trabajo, que permite visualizar cómo ocurren e interactúan en este yacimiento.

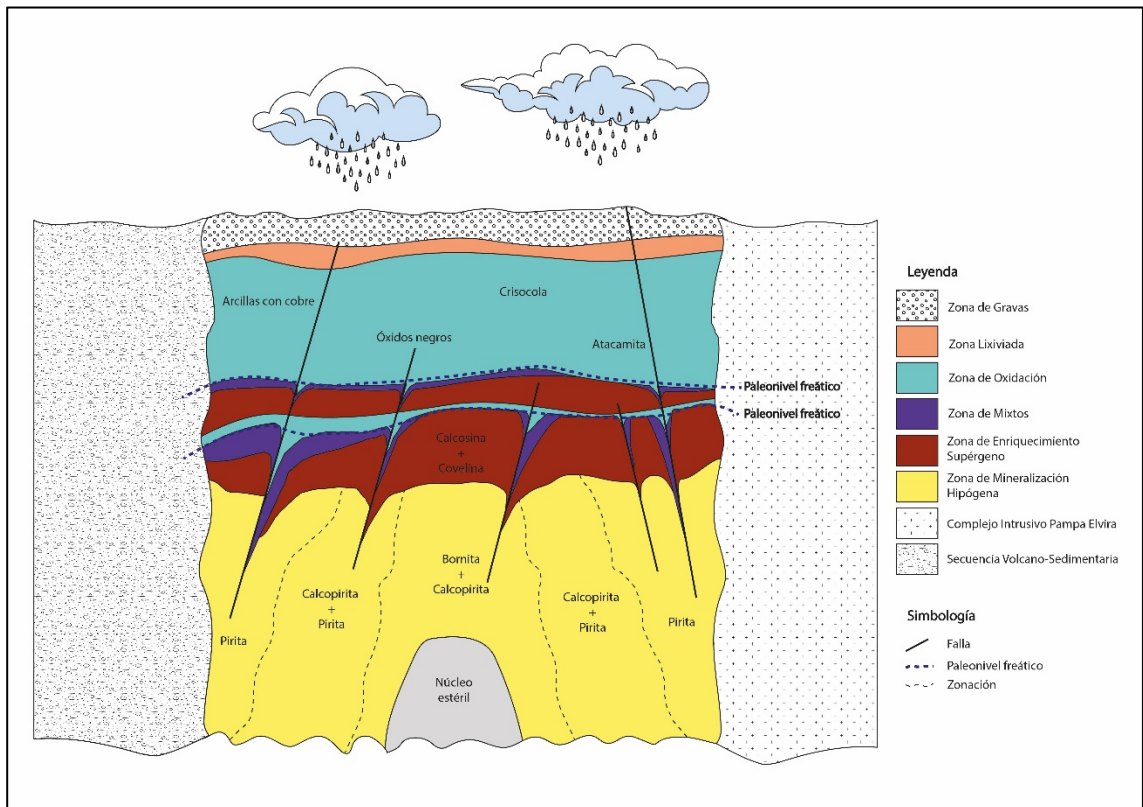


Figura 5.26: Perfil de enriquecimiento supérgeno del yacimiento Gabriela Mistral. Modelo elaborado en base a los resultados de este estudio.

En el perfil supérgeno, inicialmente las condiciones altamente oxidantes destruyen los sulfuros hipógenos, combinándose con el azufre liberado y originando ácido sulfúrico (H_2SO_4), principal responsable de la fuerte lixiviación. Además, existe una constante circulación de fluidos meteóricos, con aportes de cobre desde la zona lixiviada. El cobre en solución migra hacia las

profundidades del sistema en forma de sulfatos solubles, estables en condiciones oxidantes y ácidas. A medida que las soluciones ácidas circulan, las condiciones químicas van cambiando, y la neutralización de estas ocurre por reacción con los minerales de la roca huésped, que provoca precipitación de nuevos minerales, en una secuencia de estabilidad dependiente del pH y del potencial oxidación (Eh) del fluido.

En la zona de mixtos, las condiciones de oxidación y reducción coexisten. Los minerales oxidados transportados pueden entrar en contacto con minerales sulfurados primarios, evidenciado por los mixtos con combinación de óxidos más sulfuros primarios, o mixtos con sulfuros primarios y secundarios. En esta zona, los iones metálicos disueltos pueden precipitar y formar nuevos minerales secundarios que contienen tanto características oxidadas como sulfuradas, evidenciado por los mixtos de tipo óxido más sulfuro secundario. En ambientes más profundos, y en presencia de sulfuros primarios, las condiciones cambian a netamente reductoras. Bajo estas condiciones, los sulfatos son reducidos a sulfuros enriquecidos de cobre, que en este caso corresponde principalmente a calcosina, con covelina en menor proporción. Esta zona más profunda se denomina nivel de enriquecimiento secundario.

En particular, para este yacimiento, el control estructural juega un papel fundamental. Las fallas, fracturas y cualquier plano de debilidad actúan como conductos que facilitan el movimiento de soluciones hidrotermales y aguas subterráneas. Esto aumenta la permeabilidad secundaria de la roca y permite que las soluciones ácidas penetren más profundamente. La geometría 2D que presentan las zonas de mineralización en la Figura 5.26 son coincidentes con la geometría 3D (volumen) modelados para Gabriela Mistral. Además, en estos planos, las soluciones pueden mezclarse y cambiar las condiciones geoquímicas, favoreciendo la precipitación de minerales secundarios.

Por otra parte, el nivel freático también corresponde a un factor importante. Por encima del nivel freático, las rocas están más expuestas al oxígeno y a aguas meteóricas, suscitando la oxidación de los sulfuros, mientras que, por debajo del nivel freático, las condiciones son reductoras debido a la falta de oxígeno. En este lugar, los minerales oxidados se reducen y precipitan como sulfuros secundarios. De esta manera, las variaciones del nivel de agua subterránea pueden causar la migración de soluciones con alto contenido de metales hacia arriba o hacia abajo, influenciando la posición y la extensión de la zona de mixtos y de enriquecimiento secundario.

Así, la zona de mixtos representa una compleja transición entre la zona de oxidación y la zona de enriquecimiento secundario, que es influenciada por la química de las soluciones, las estructuras geológicas como las fallas que permiten el desplazamiento de las soluciones y la dinámica del nivel freático. Estos factores combinados crean un ambiente donde coexisten minerales oxidados y sulfurados, ya sean primarios o secundarios.

5.2. Caracterización mineralógica

5.2.1. Selección de muestras

En primer lugar, se realizó una filtración en la base de datos a tramos que tengan longitud igual a 1,5 metros, dado que es el soporte muestral para análisis químicos que se usa en la División. Se seleccionan en total 10 muestras de rechazo de sondaje (sobres AQ), provenientes de las zonas de mixtos y de enriquecimiento secundario, cuyo detalle se observa en la Tabla 5.1. La elección de éstas es en función de los parámetros geológicos que delimitan la distribución de las zonas de mineralización, descritas en el Capítulo 5.

Desde la muestra M1 a la M6 corresponden a muestras de la zona de mixtos. De estas, las muestras M1 y M2 pertenecen a muestras de óxidos más sulfuros primarios, las muestras M3 y M4 a óxidos más sulfuros secundarios, y las muestras M5 y M6 a óxidos con sulfuros primarios y secundarios en coexistencia. Desde la muestra M7 a la M10 son muestras pertenecientes a la zona de enriquecimiento secundario. La M7 presenta un enriquecimiento débil, y las muestras M8, M9 y M10 tienen un fuerte enriquecimiento.

Tabla 5.1: Muestras seleccionadas para análisis QEMSCAN®.

	Muestra	Sondaje	Desde	Hasta	Código Muestrera
Mixtos	M1	DGS-678	244.5	246	154867
	M2	DGS-1357	186	187.5	367343
	M3	DGS-700	174	175.5	156686
	M4	DGS-1598	4.5	6	401426
	M5	DGS-1255	232.5	234	352265
	M6	DGS-1301	142.5	144	359269
Enriquecimiento	M7	DGS-1522	166.5	168	391275
	M8	DGS-844	121.5	123	178065
	M9	DGS-777	124.5	126	168931
	M10	DGS-947	190.5	192	199215

La distribución de las muestras en el yacimiento se observa en la Figura 5.27.

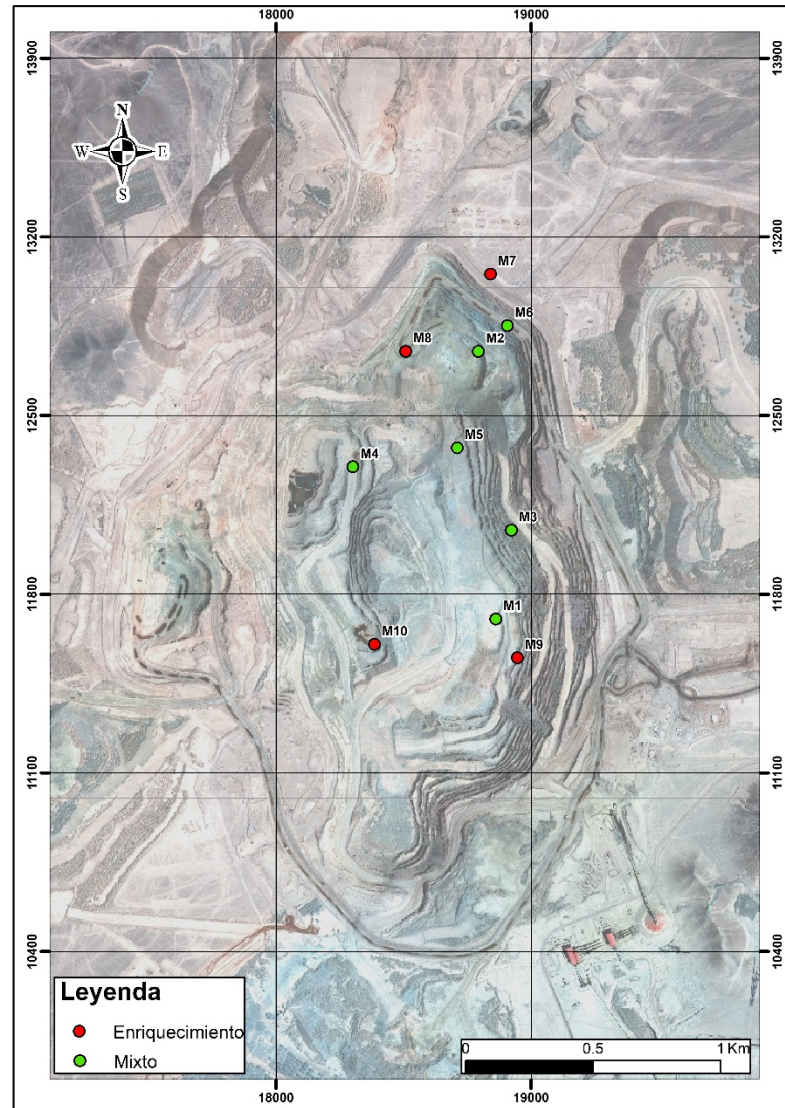


Figura 5.27: Mapa con la distribución de las muestras seleccionadas.

5.2.2. Microscopía óptica

Las briquetas pulidas realizadas en el laboratorio del Instituto GEA son analizadas mediante microscopía óptica con el fin de identificar fases minerales características de cada zona de interés.

A continuación, se realiza una descripción mineral identificada en cada muestra, cuyo detalle se puede observar en el Anexo 2.

Muestra M1: La muestra corresponde a una roca intrusiva con textura granular, y se compone principalmente de granos finos de cuarzo, plagioclasa, sericita, minerales de arcilla y clorita. Las alteraciones predominantes son filíca y argílica. La mineralogía de mena observada corresponde a hematita, calcopirita y calcosina, evidenciados en la Figura 5.28.

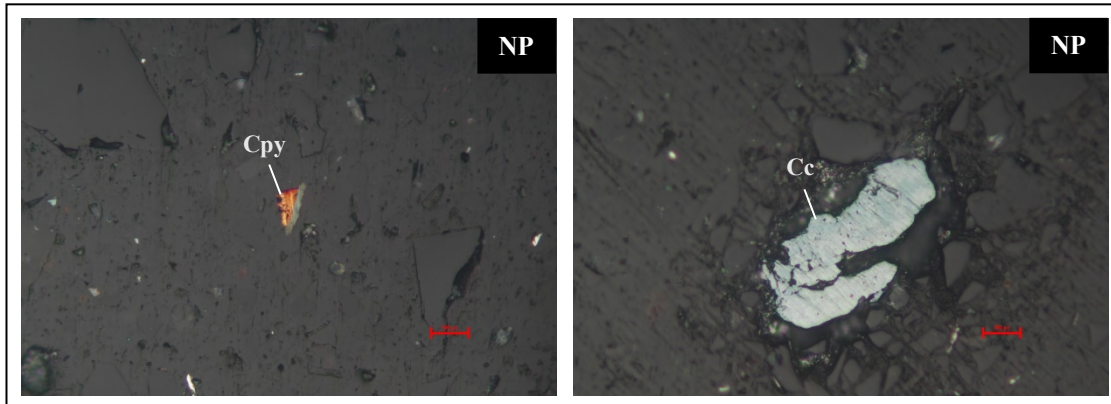


Figura 5.28: Granos de calcopirita (Cpy) y calcosina (Cc) en nícoles paralelos (NP). Aumento 40x.

Muestra M2: Roca intrusiva de textura granular, compuesta de granos finos de cuarzo, plagioclasa y biotita, sericita, minerales de arcilla y clorita. Las alteraciones existentes corresponden a potásica, filíca y argílica, donde predomina esta última. La mineralogía de mena observada corresponde a hematita, magnetita, pirita, calcopirita y calcosina. En particular, se evidencia claramente en la Figura 5.29, un proceso de enriquecimiento donde el mineral de calcosina reemplaza a la calcopirita.

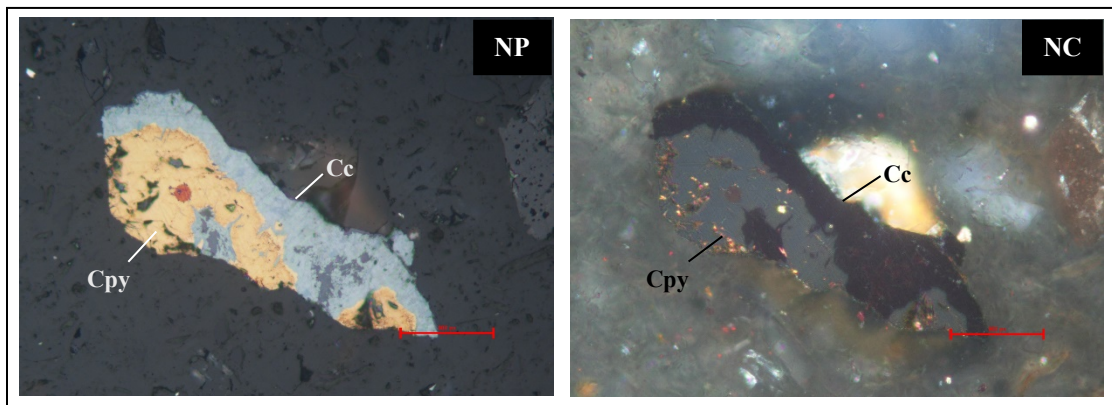


Figura 5.29: Calcopirita (Cpy) y calcosina (Cc) en proceso de enriquecimiento. NP: Nícoles paralelos. NC. Nícoles cruzados. Aumento 40x.

Muestra M3: Roca intrusiva de textura granular, compuesta de granos finos de cuarzo, plagioclasa y biotita como minerales formadores de roca. Además, se observan minerales de alteración como sericita por alteración de plagioclasas y feldespato potásico, minerales de arcilla por alteración de plagioclasa, y clorita como producto de alteración de minerales ferromagnesianos. Las alteraciones existentes corresponden a potásica, fílica y argílica, donde predomina la alteración fílica. La mineralogía de mena observada corresponde a hematita, magnetita y pirita. No se identifican minerales portadores de cobre.

Muestra M4: La muestra corresponde a una roca intrusiva con textura granular. Se compone principalmente de granos finos de cuarzo, plagioclasa y biotita como mineralogía primaria. La mineralogía de alteración corresponde a sericita, minerales de arcilla, clorita y biotita secundaria. Las alteraciones predominantes son la potásica, fílica y argílica. Los minerales de mena observados son pirita, hematita y magnetita, donde se evidencia un proceso de martitización (Figura 5.30).

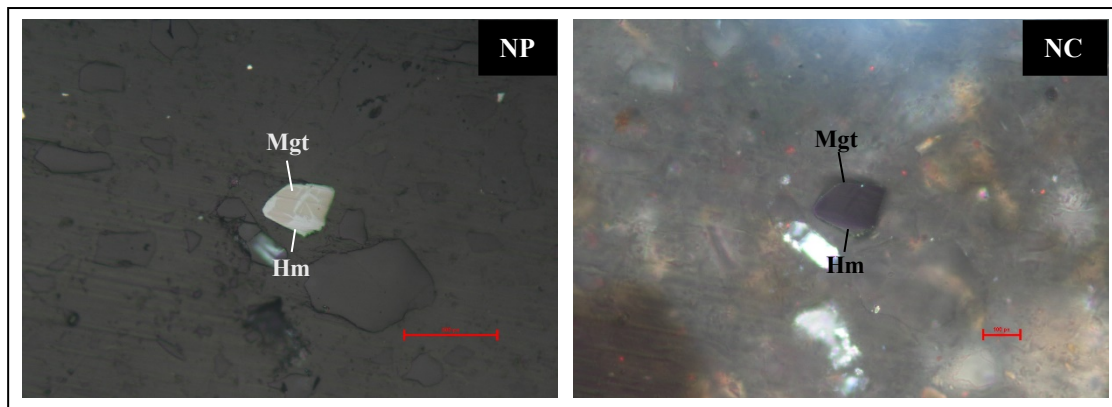


Figura 5.30: Magnetita (Mgt) siendo reemplazada por hematita (Hm). NP: Nícoles paralelos. NC: Nícoles cruzados. Aumento 40x.

Muestra M5: Roca intrusiva de textura granular, compuesta de granos finos de cuarzo, plagioclasa y biotita como minerales formadores de roca. Además, se observan minerales de alteración como sericita por alteración de plagioclasas y feldespato potásico, minerales de arcilla por alteración de plagioclasa, clorita como producto de alteración de minerales ferromagnesianos, y biotita secundaria. Las alteraciones existentes corresponden a potásica, fílica y argílica. La mineralogía de mena observada corresponde a hematita, pirita, calcopirita y calcosina. En la Figura 5.31 se observa el reemplazo de calcopirita por calcosina.

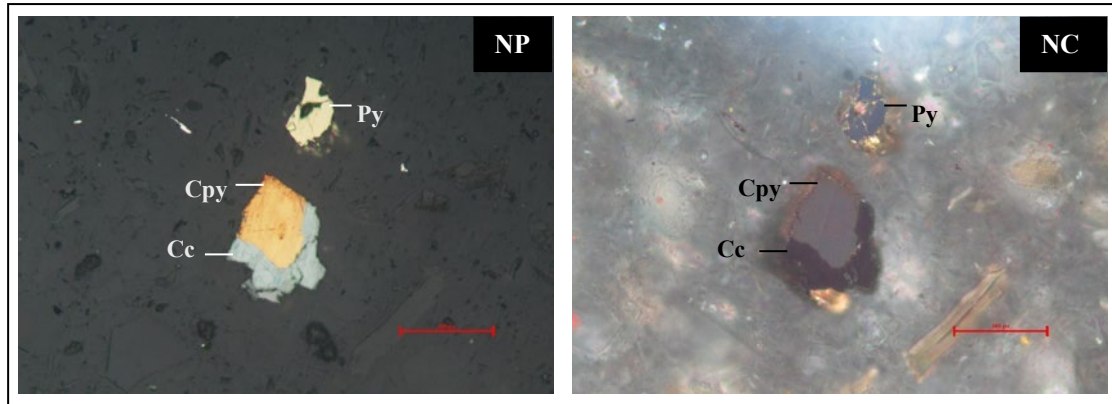


Figura 5.31: Calcosina (Cc) reemplazando calcopirita (Cpy), y grano de pirita. NP: Nícoles paralelos. NC: Nícoles cruzados. Aumento 40x.

Muestra M6: Roca intrusiva de textura granular, compuesta de granos finos de cuarzo y plagioclasa como mineralogía primaria. Además, se observan minerales de alteración como sericita por alteración de plagioclasas, clorita por alteración de minerales ferromagnesianos, y arcillas por alteración de plagioclasa. Las alteraciones existentes corresponden a filica y argílica, con predominancia de la alteración sericítica. La mineralogía de mena observada corresponde a hematita reemplazando cristales de magnetita, pirita, calcopirita y calcosina. En la Figura 5.32 se observan los minerales portadores de cobre presentes en esta muestra.

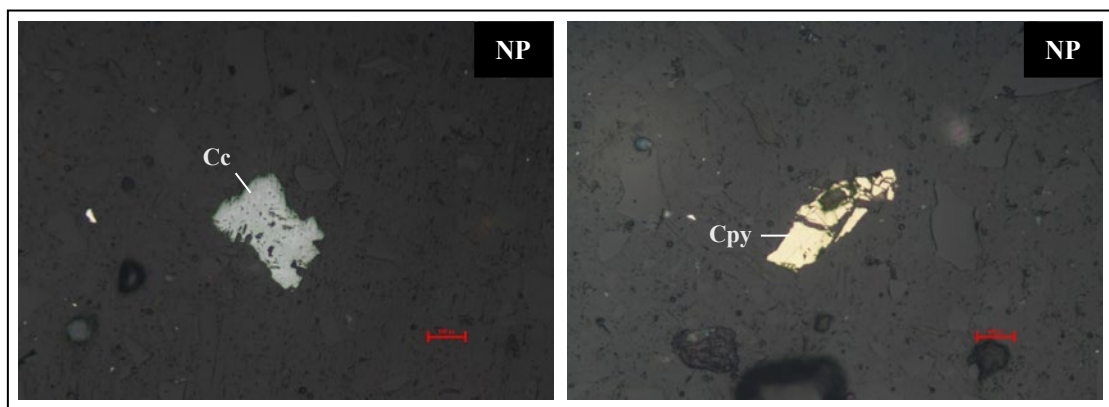


Figura 5.32: Granos de calcosina (Cc) y calcopirita (Cpy) en nícoles cruzados (NC). Aumento 40x.

Muestra M7: Roca intrusiva de textura granular, compuesta de granos finos de cuarzo, plagioclasa y biotita como minerales formadores de roca. Los minerales de alteración presentes son sericita y arcillas reemplazando plagioclasa, y clorita y biotita secundaria producto del reemplazo de biotitas

primarias. Las alteraciones existentes corresponden a potásica, filica y argílica. La mineralogía de mena observada corresponde a hematita, magnetita, pirita, calcopirita, bornita, covelina y calcosina. Las figuras 5.33 y 5.34 muestran el proceso de enriquecimiento de cobre de minerales de covelina y calcosina reemplazando bornita y calcopirita respectivamente.

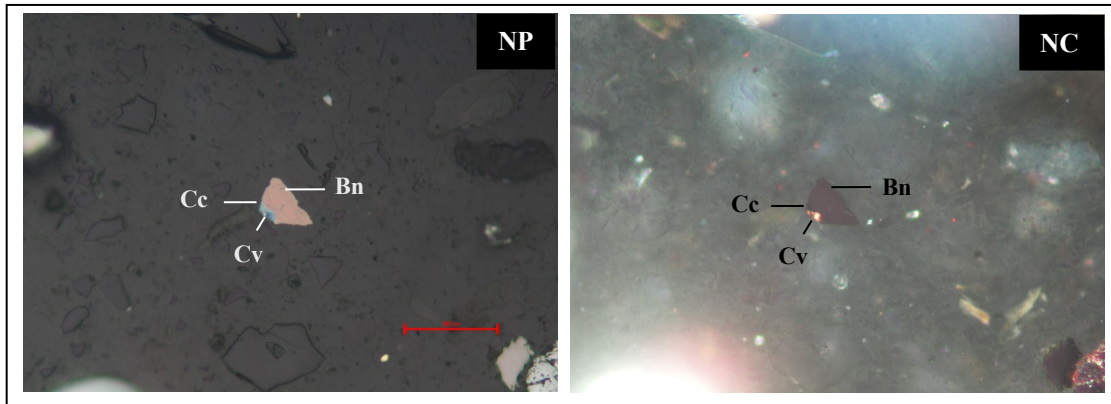


Figura 5.33: Calcosina (Cc) y covelina (Cv) reemplazando bornita (Bn). NP: Nícoles paralelos. NC: Nícoles cruzados. Aumento 40x.

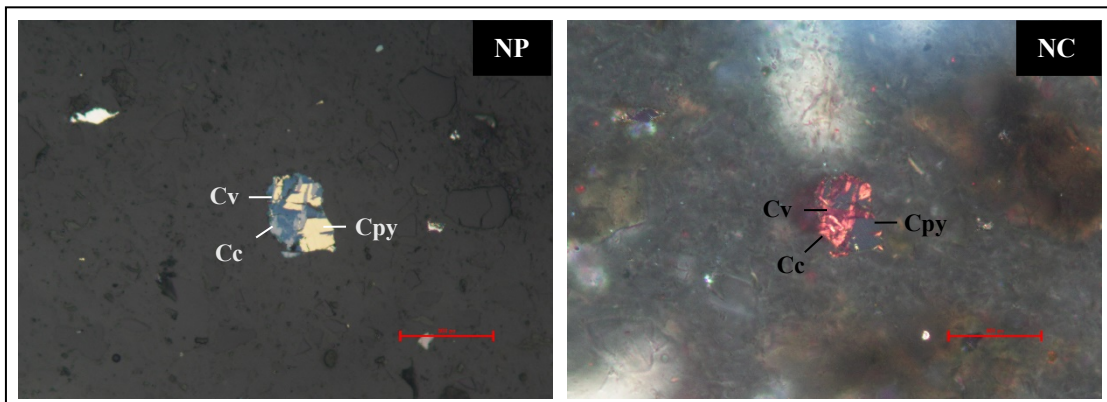


Figura 5.34: Calcosina (Cc) y covelina (Cv) reemplazando calcopirita (Cpy). NP: Nícoles paralelos. NC: Nícoles cruzados. Aumento 40x.

Muestra M8: Roca intrusiva de textura granular, compuesta de granos finos de cuarzo y plagioclasa como minerales formadores de roca. Se observan minerales de alteración como sericita y arcillas de grano muy fino por alteración de plagioclasas, y clorita por alteración de minerales ferromagnesianos. Las alteraciones existentes corresponden a filica y argílica, con predominancia de la alteración sericítica. La mineralogía de mena observada corresponde a hematita, pirita y calcosina. En la Figura 5.35 se observa la calcosina, el único mineral portador de cobre en esta muestra.

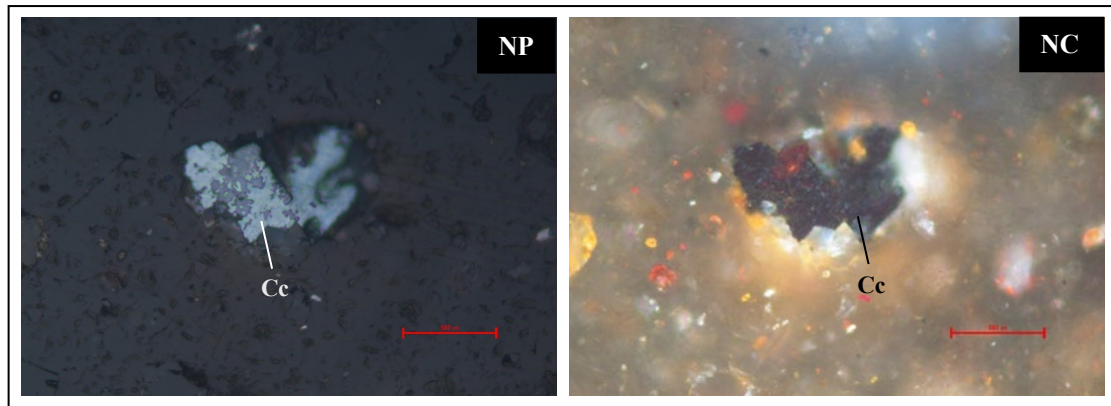


Figura 5.35: Grano mineral de calcosina (Cc). NP: Nícoles paralelos. NC: Nícoles cruzados. Aumento 40x.

Muestra M9: Roca intrusiva de textura granular, compuesta de granos finos de cuarzo y plagioclasa como minerales formadores de roca. Además, se observan minerales de alteración como sericita y minerales de arcillas por alteración de plagioclasas, y clorita como producto de alteración de minerales ferromagnesianos. Las alteraciones existentes corresponden a argílica, con predominancia de la alteración filica. La mineralogía de mena observada corresponde a pirita, calcosina y covelina. En la Figura 5.36 se observa un proceso de enriquecimiento de calcosina y covelina.

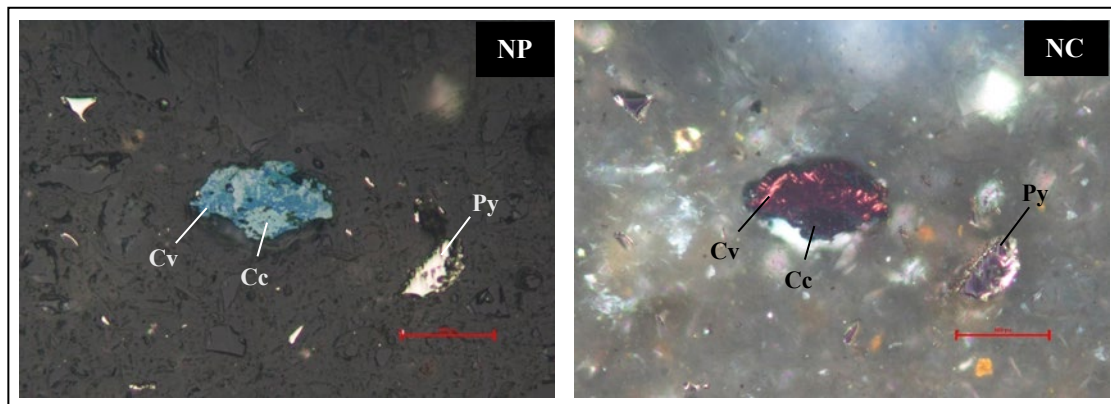


Figura 5.36: Calcosina (Cc) y covelina (Cv) en proceso de enriquecimiento. NP: Nícoles paralelos. NC: Nícoles cruzados. Aumento 40x.

Muestra M10: Roca intrusiva de textura granular, compuesta de granos finos de cuarzo, plagioclasa y biotita como mineralogía primaria. Los minerales de alteración presentes son sericita y arcillas reemplazando plagioclasa, y clorita y biotita secundaria producto del reemplazo de biotitas primarias. Las alteraciones existentes corresponden a potásica, filica y argílica. La mineralogía de

mena observada corresponde a calcopirita, bornita, covelina y calcosina. La Figura 5.37 muestra el proceso de enriquecimiento de cobre de minerales de covelina y calcosina reemplazando bornita y calcopirita en un mismo grano mineral.

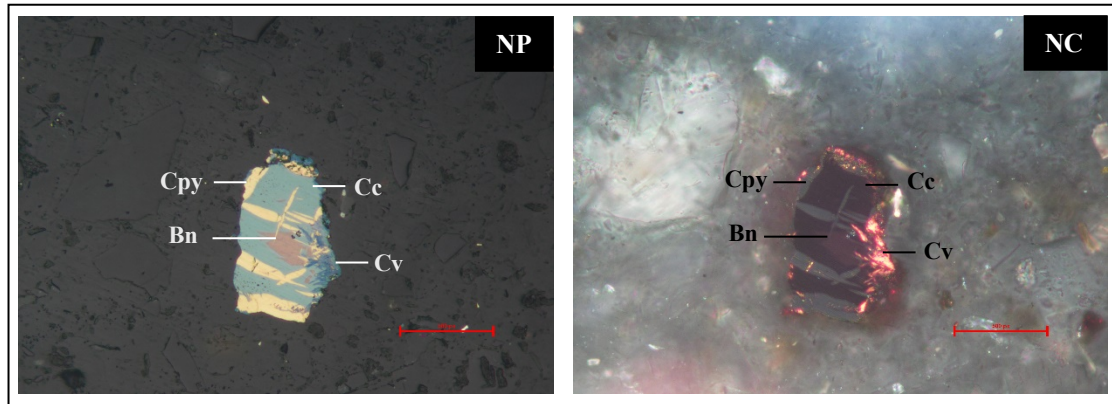


Figura 5.37: Calcosina (Cc) y covelina (Cv) en reemplazo de bornita (Bn) y calcopirita (Cpy). NP: Nícoles paralelos. NC: Nícoles cruzados. Aumento 40x.

5.2.3. Mineralogía automatizada QEMSCAN®

Los resultados del análisis QEMSCAN® entregan una amplia gama de minerales y sus respectivos porcentajes en cada una de las muestras.

Para la zona de mixtos, la Tabla 5.2 muestra el resumen de la mineralogía modal obtenida por esta técnica, que permite la cuantificación modal en cada una de las muestras analizadas.

De manera general, es posible observar que existe gran porcentaje de cuarzo, feldespato, y micas (muscovita y biotita), minerales que corresponden a mineralogía primaria formadoras de roca. En las muestras M1, M2, M3, M4 y M5 hay presencia de minerales con contenido variable de Cu como calcopirita, sulfatos de cobre, y calcosina/digenita. Es necesario mencionar que el análisis QEMSCAN® no permite diferenciar entre calcosina y digenita, dado que reconoce a nivel elemental el mineral, pero no su estequiometría, es decir, reconoce un mineral que contiene elementos de Cu y S, pero no en qué proporción. En la muestra M6 no se detecta ningún mineral con cobre bajo esta técnica de análisis. Es importante notar que el conteo modal de las arcillas y clorita representan un porcentaje significativo, debido a las alteraciones hidrotermales que afectan al yacimiento.

Tabla 5.2: Resultados de la mineralogía modal en porcentajes para la zona de mixtos con la técnica QEMSCAN®.

Mineralogía modal (en %)	Mixtos					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Cu-sulphate	0.04	0.03	0.04	0.01	0.04	0.00
Chalcopyrite	0.00	0.17	0.01	0.00	0.07	0.00
Chalcocite/Digenite	0.05	0.09	0.00	0.03	0.14	0.00
Pyrite	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.00
Other Sulphide	0.01	0.03	0.00	0.00	0.05	0.00
Quartz	30.79	28.35	34.72	28.21	32.46	29.44
Feldspars (Plagioclase/K Feldspars)	51.27	51.41	43.64	54.65	51.87	47.82
Amphibole-Pyroxene	0.17	0.36	0.64	0.31	0.21	0.66
Chlorite	1.58	1.21	2.07	0.88	1.42	1.34
Micas (Muscovite/Biotite)	10.76	11.45	10.99	10.68	7.49	11.25
Clays	2.52	3.49	4.47	2.59	3.33	4.50
Sulphates (Anhydrite/Gyps/Alunite)	0.06	0.02	0.10	0.00	0.04	0.00
Epidote-Apatite-Sphene	0.13	0.56	0.41	0.21	0.24	0.89
Carbonates (Ca-Fe-Mn)	0.01	0.00	0.01	0.03	0.01	0.05
Magnetite-Hematite-Limonite	1.12	1.72	1.36	1.69	0.62	1.57
Rutile/Anatase	0.26	0.17	0.28	0.11	0.38	0.12
Other	1.23	0.95	1.23	0.6	1.59	2.34

A continuación, se describe la asociación mineral de cada muestra analizada para la zona de mixtos.

Muestra M1: La mineralogía modal indica la presencia de sulfatos de cobre y calcosina como minerales portadores de cobre. En particular, la Figura 5.38, muestra que los sulfatos de cobre se encuentran fuertemente asociados minerales de cuarzo, feldspatos, y calcosina, y en menor medida a arcillas, micas, y a la categoría “Otros”, que corresponde a un silicato de aluminio, fase no reconocida en descripción microscópica ni descrita a nivel macroscópico. La calcosina se asocia principalmente a menas de sulfatos de cobre y a otros sulfuros, y a la ganga arcillas y feldspatos.

Muestra M2: La mineralogía modal indica la presencia de sulfatos de cobre, calcopirita y calcosina como minerales portadores de cobre. La Figura 5.39 muestra las asociaciones entre los minerales de la muestra. En específico, los sulfatos de cobre se encuentran asociados a minerales de cuarzo, feldspatos, micas y arcillas, y a minerales de mena como calcosina y otros sulfuros. La calcopirita se asocia a la fase no reconocida (“Otros”), cuarzo y feldspatos como minerales de ganga, y a otros sulfuros y calcosina como minerales de mena. La calcosina se asocia a la fase no reconocida, cuarzo, feldspatos, otros sulfuros, sulfatos de cobre y a calcopirita. La descripción microscópica

evidencia el proceso de enriquecimiento de cobre del reemplazo de calcopirita por calcosina en la Figura 5.29, textura que ejemplifica la asociación mineral de este registro analítico.

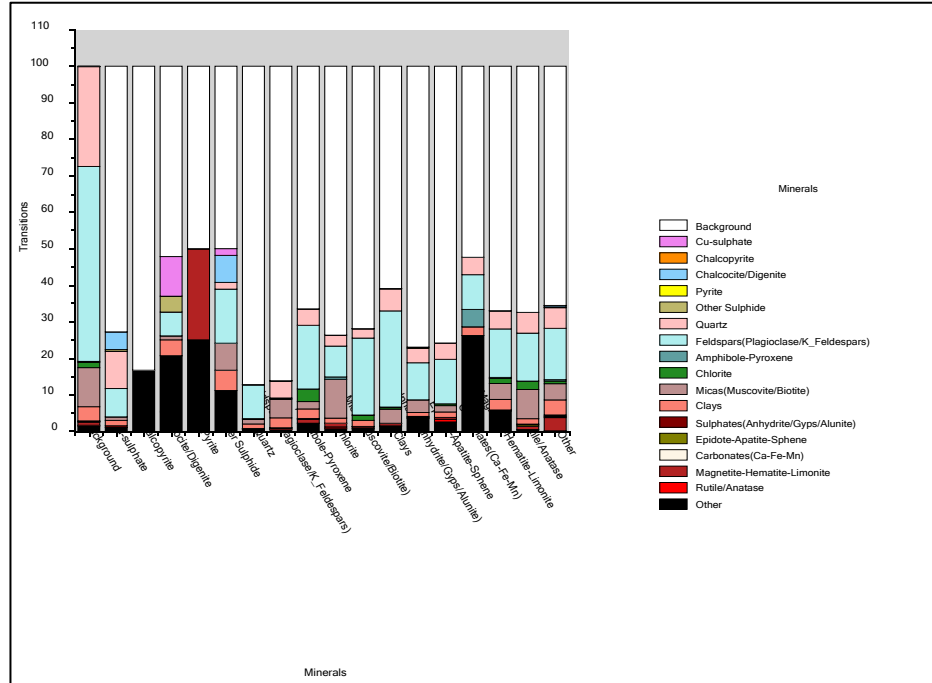


Figura 5.38: Asociación mineral de M1.

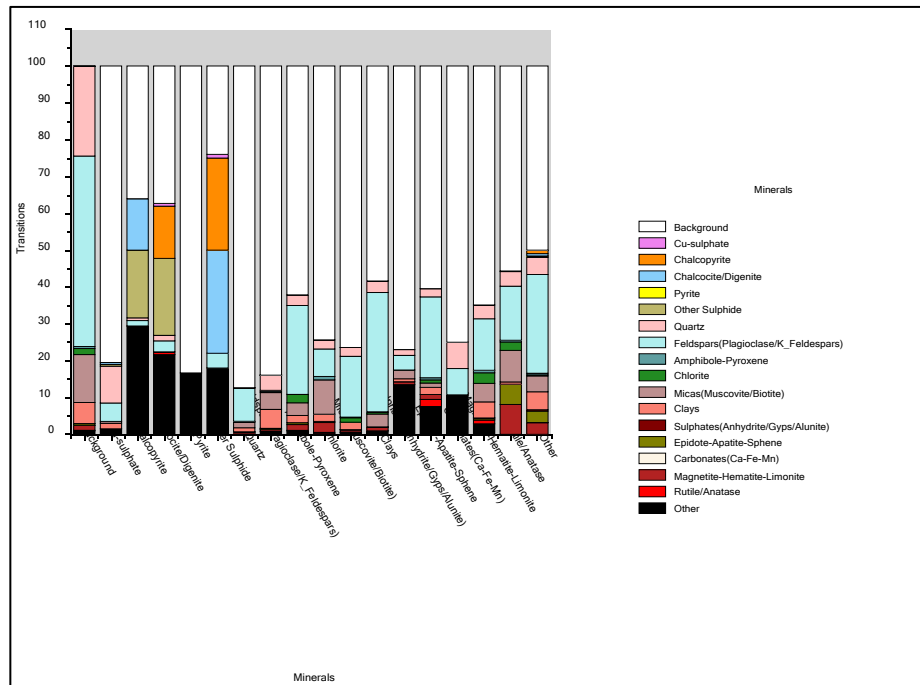


Figura 5.39: Asociación mineral de M2.

Muestra M3: La mineralogía modal indica la presencia de sulfatos de cobre y calcopirita como minerales portadores de cobre. La Figura 5.40 muestra que los sulfatos de cobre se encuentran asociados a minerales de cuarzo, feldespatos, micas, clorita y arcillas. La calcopirita se asocia exclusivamente a la fase no reconocida (“Otros”). Cabe destacar que, en la descripción calcográfica y petrográfica de esta muestra no se reconoció ninguna fase mineral portadora de cobre, siendo reconocida como minerales metálicos pirita, hematita y magnetita.

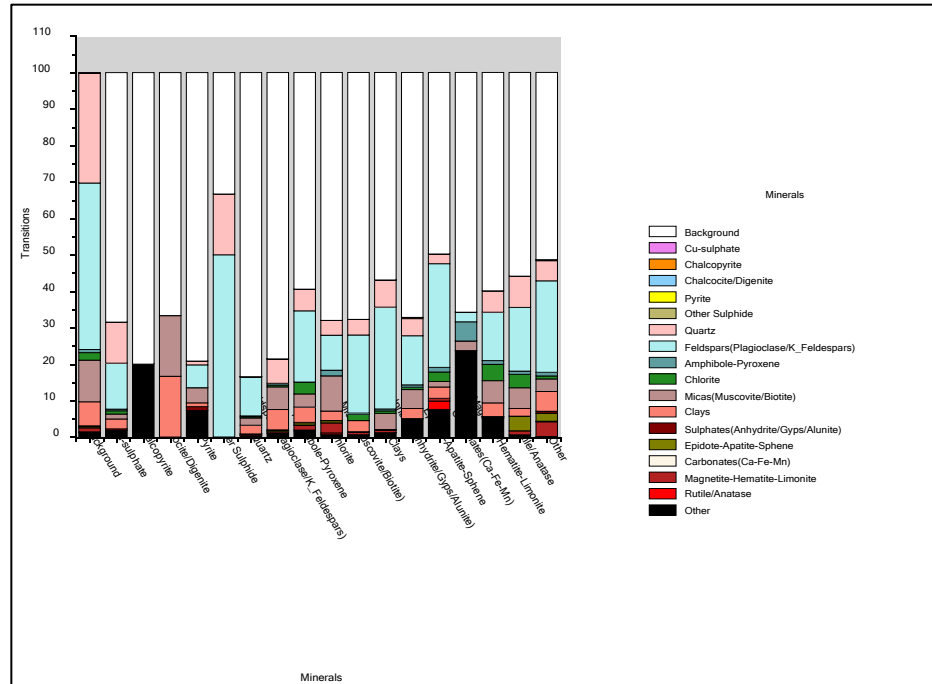


Figura 5.40: Asociación mineral de M3.

Muestra M4: La mineralogía modal indica la presencia de sulfatos de cobre y calcosina como minerales portadores de cobre. En particular, la Figura 5.41 grafica las asociaciones minerales, donde los sulfatos de cobre se encuentran asociados a feldespatos, arcillas y a calcosina, mientras que la calcosina se asocia a la fase no reconocida (“Otros”), feldespatos, micas, otros sulfuros, y a los sulfatos de cobre.

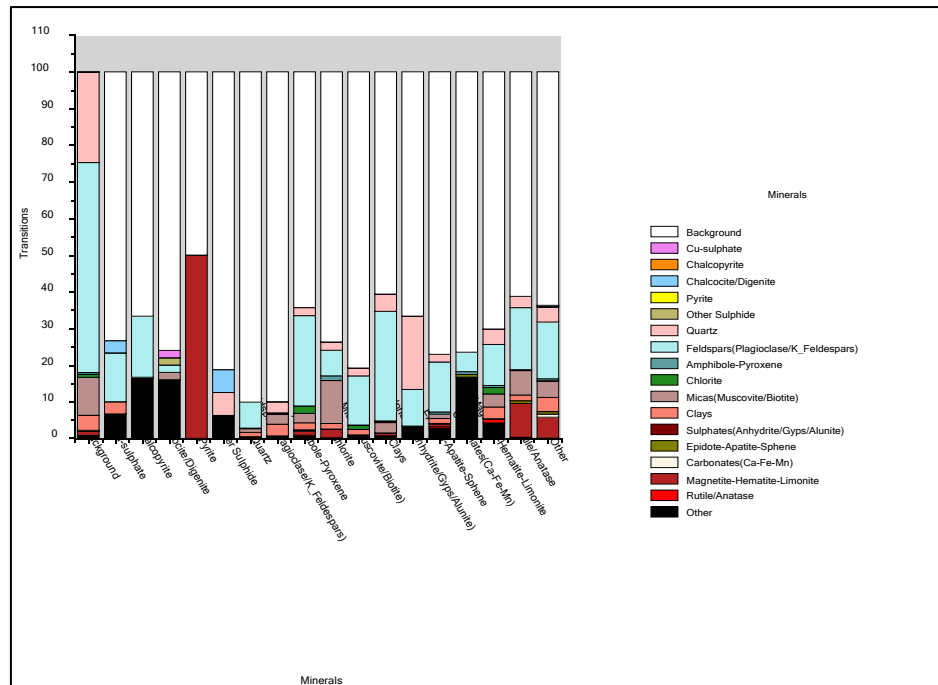


Figura 5.41: Asociación mineral de M4.

Muestra M5: La mineralogía modal revela la presencia de sulfatos de cobre, calcopirita y calcosina como minerales portadores de cobre. La Figura 5.42 muestra las asociaciones entre los minerales de la muestra. En particular, los sulfatos de cobre se encuentran asociados a feldespatos, cuarzo, micas, arcillas y calcosina. La asociación mineral de la calcosina corresponde a la fase no reconocida (“Otros”), arcillas, feldespatos, otros sulfuros, a los sulfatos de cobre y a la calcopirita. La calcopirita se asocia a la categoría “Otros”, feldespatos, micas, sulfatos de cobre, otros sulfuros y a calcosina. La asociación mineral existente entre calcopirita y calcosina se evidencia en la Figura 6.5, que muestra una textura de reemplazo, donde se observa un proceso de enriquecimiento supérgeno.

Muestra M6: La mineralogía modal solo indica la presencia de sulfato de cobre como mineral portador de cobre. La Figura 5.43 muestra las asociaciones entre los minerales, donde los sulfatos de cobre se encuentran asociados a feldespatos, cuarzo, micas y clorita.

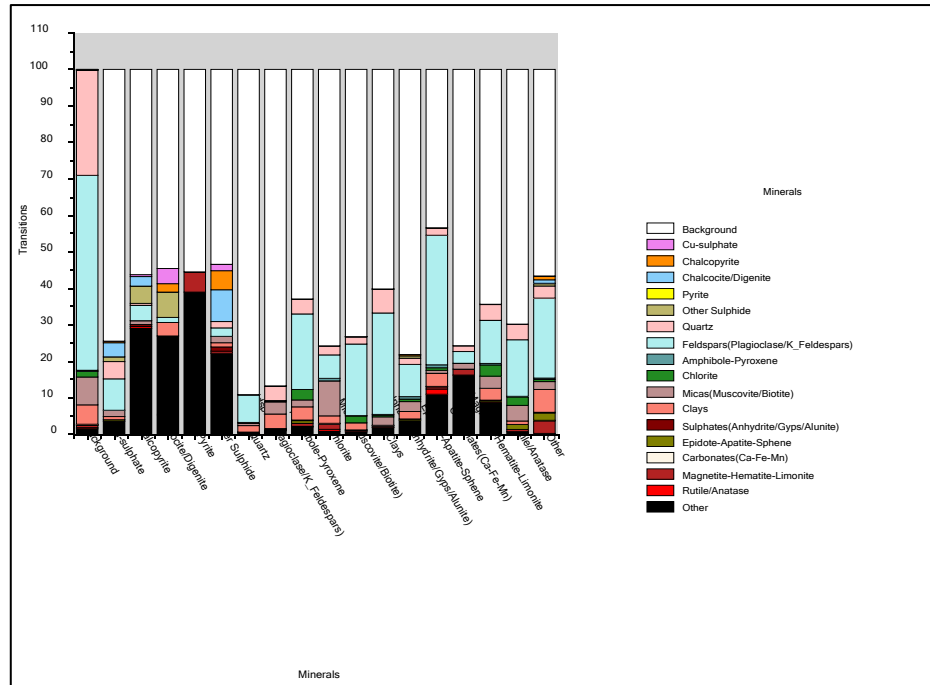


Figura 5.42: Asociación mineral de M5.

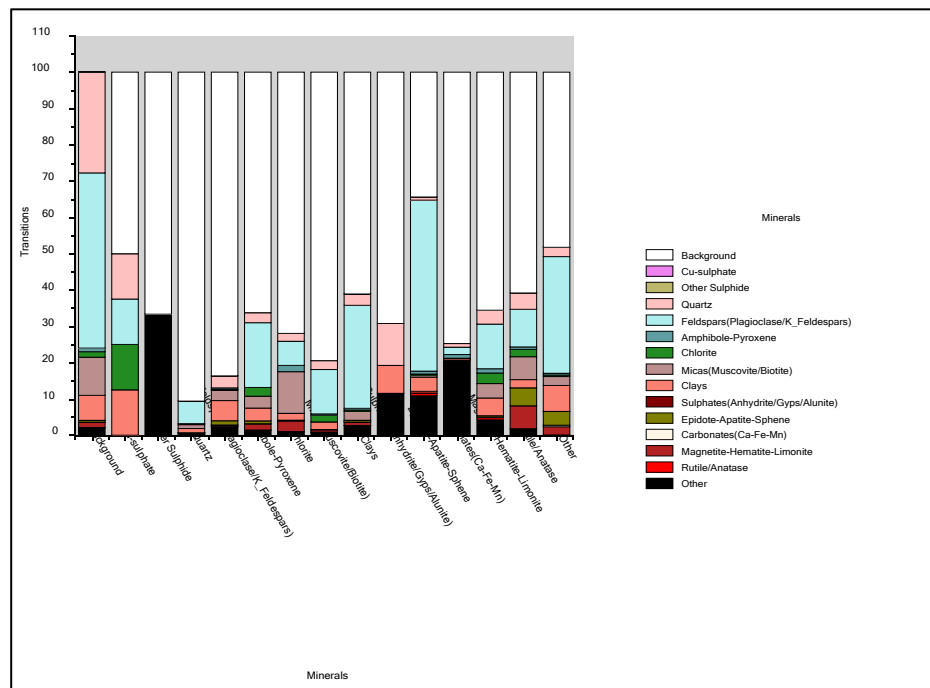


Figura 5.43: Asociación mineral de M6.

Es importante notar que tanto en la descripción microscópica como las asociaciones minerales entregadas por QEMSCAN®, los minerales de ganga como la clorita, micas (muscovita/biotita) y arcillas están fuertemente relacionadas a los minerales de mena. Esta posee diferentes

comportamientos que podrían afectar el proceso de lixiviación en la permeabilidad de la pila, el consumo de ácido, o la adición de elementos en deseados a la solución.

Para la zona de enriquecimiento, la Tabla 5.3 muestra el resumen de la mineralogía modal, y permite visualizar los datos de conteo modal en porcentajes de cada una de las muestras analizadas.

Tabla 5.3: Resultados de la mineralogía modal en porcentajes para la zona de enriquecimiento con la técnica QEMSCAN®.

Mineralogía modal (en %)	Enriquecimiento			
	M7	M8	M9	M10
Cu-sulphate	0.02	0.04	0.59	0.08
Chalcopyrite	0.02	0.06	0.01	0.30
Chalcocite/Digenite	0.01	0.11	0.20	0.02
Pyrite	0.00	1.47	9.16	0.03
Other Sulphide	0.03	0.06	0.09	0.09
Quartz	29.18	12.56	46.87	26.4
Feldspars(Plagioclase/K Feldspars)	51.08	44.72	14.7	48.73
Amphibole-Pyroxene	0.53	5.79	0.00	0.56
Chlorite	0.93	4.97	0.00	0.98
Micas(Muscovite/Biotite)	10.21	9.09	21.32	13.08
Clays	3.52	8.91	1.68	5.41
Sulphates(Anhydrite/Gyps/Alunite)	0.01	0.07	1.24	0.04
Epidote-Apatite-Sphene	0.76	0.68	0.02	0.74
Carbonates(Ca-Fe-Mn)	0.07	0.04	0.00	0.56
Magnetite-Hematite-Limonite	1.79	8.50	0.66	0.19
Rutile/Anatase	0.16	0.29	0.46	0.11
Other	1.68	2.64	3.00	2.68

De forma general, se observa que existe gran porcentaje de cuarzo, feldespato, y micas (muscovita y biotita), minerales que corresponden a mineralogía primaria. En las muestras M6, M7, M8, M9 y M10 hay presencia de minerales de Cu como calcopirita, sulfatos de cobre, y calcosina/digenita. En particular, la muestra M9, presenta un porcentaje significativo de pirita, valor anormal en comparación a las demás muestras. Mientras que, la muestra M8 presenta un incremento en el porcentaje de arcillas y clorita, ganga que se debe considerar en el proceso de lixiviación.

A continuación, se describe la asociación mineral de cada muestra de la zona de enriquecimiento.

Muestra M7: La mineralogía modal indica la presencia de sulfatos de cobre, calcopirita y calcosina como minerales portadores de cobre. La Figura 5.44 muestra las asociaciones entre los minerales. Los sulfatos de cobre se asocian a los feldespatos, cuarzo, arcillas, otros sulfuros y a la calcosina. La calcopirita se asocia a la categoría otros, cuarzo, feldespato, arcillas y a otros sulfuros. Por su parte, la calcosina se asocia a la fase no reconocida por microscopía, a los feldespatos, cuarzo, arcillas, otros sulfuros y a los sulfatos de cobre. Esta técnica no detecta la asociación entre calcosina y calcopirita que se evidencia en la Figura 5.34 de la descripción microscópica con la textura de reemplazo, típica de un proceso de enriquecimiento de cobre.

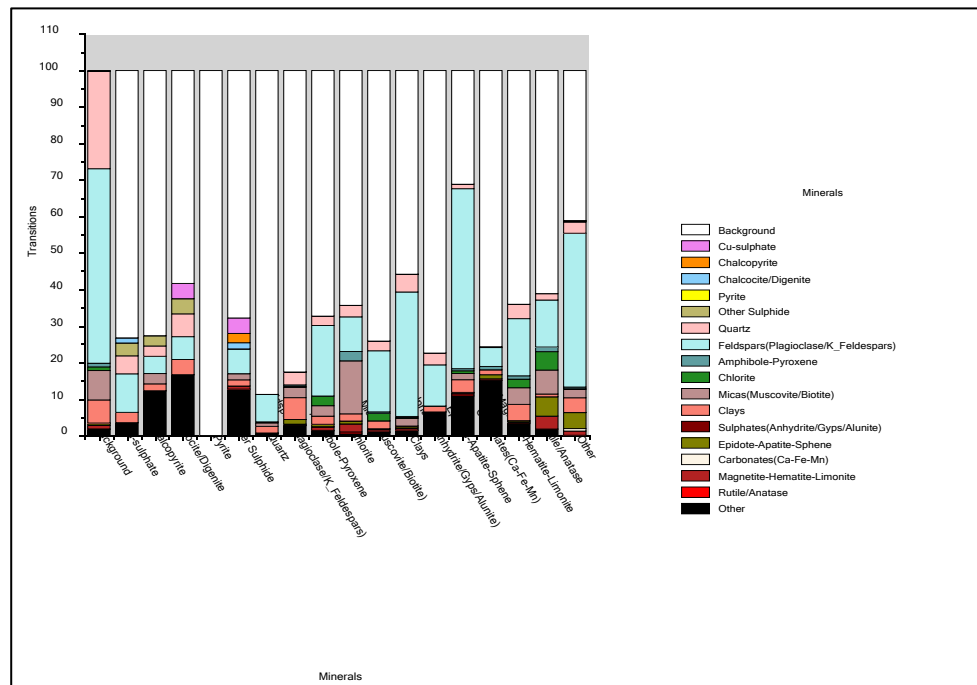


Figura 5.44: Asociación mineral de M7.

Muestra M8: La mineralogía modal indica la presencia de sulfatos de cobre, calcopirita y calcosina como minerales portadores de cobre. La Figura 5.45 muestra las asociaciones entre los minerales. Los sulfatos de cobre se asocian a minerales de feldespatos, cuarzo, clorita, micas y arcillas de minerales de ganga, y a calcosina, hematita/magnetita y pirita de minerales metálicos. La calcopirita se asocia a la categoría “Otros”, feldespatos, arcillas y clorita de minerales de ganga, y a hematita/magnetita, otros sulfuros, pirita y a calcosina de minerales metálicos. La calcosina se encuentra en asociación mineral con “Otros”, feldespatos, micas, arcillas de minerales de ganga, y a pirita, otros sulfuros, hematita/magnetita, sulfatos de cobre y a calcopirita de minerales metálicos.

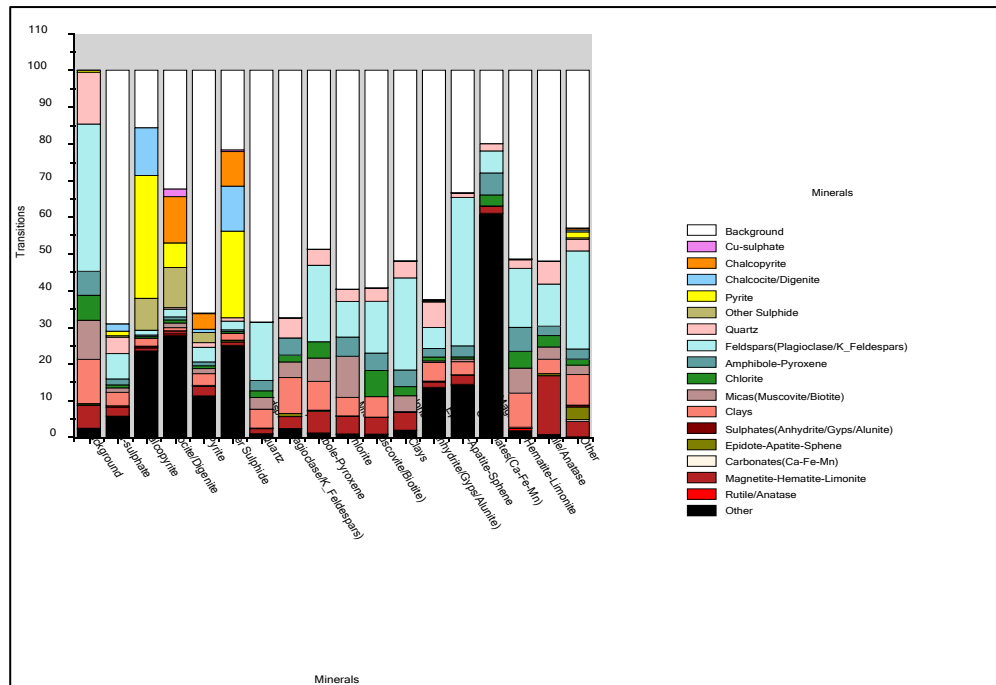


Figura 5.45: Asociación mineral de M8.

Muestra M9: La mineralogía modal indica la presencia de sulfatos de cobre, calcopirita y calcosina como minerales portadores de cobre. La Figura 5.46 muestra las asociaciones entre los minerales. En particular, los sulfatos de cobre están asociados a la ganga de cuarzo, feldespatos, micas y arcillas, y a metálicos de hematita/magnetita, pirita y calcosina. La calcopirita se encuentra en asociación con micas y arcillas como ganga, y fuertemente asociada a pirita y sulfatos de cobre como minerales metálicos. La calcosina se asocia a feldespatos, cuarzo, micas y arcillas, y a minerales de mena de sulfatos de cobre y otros sulfuros.

Muestra M10: La mineralogía modal indica la presencia de sulfatos de cobre, calcopirita y calcosina como minerales portadores de cobre. La Figura 5.47 muestra las asociaciones entre los minerales. En específico, los sulfatos se encuentran asociados a cuarzo, feldespato, micas, arcillas, otros sulfuros, calcosina y calcopirita. La calcopirita se asocia en gran proporción a la categoría “Otros”, feldespato, cuarzo, micas, arcillas y sulfatos de cobre. Por su parte, la calcosina se relaciona a las arcillas, otros sulfuros y a los sulfatos de cobre. Esta técnica, no asocia a los minerales de calcopirita y calcosina, que si se muestran en un proceso de enriquecimiento de cobre en la Figura 5.37.

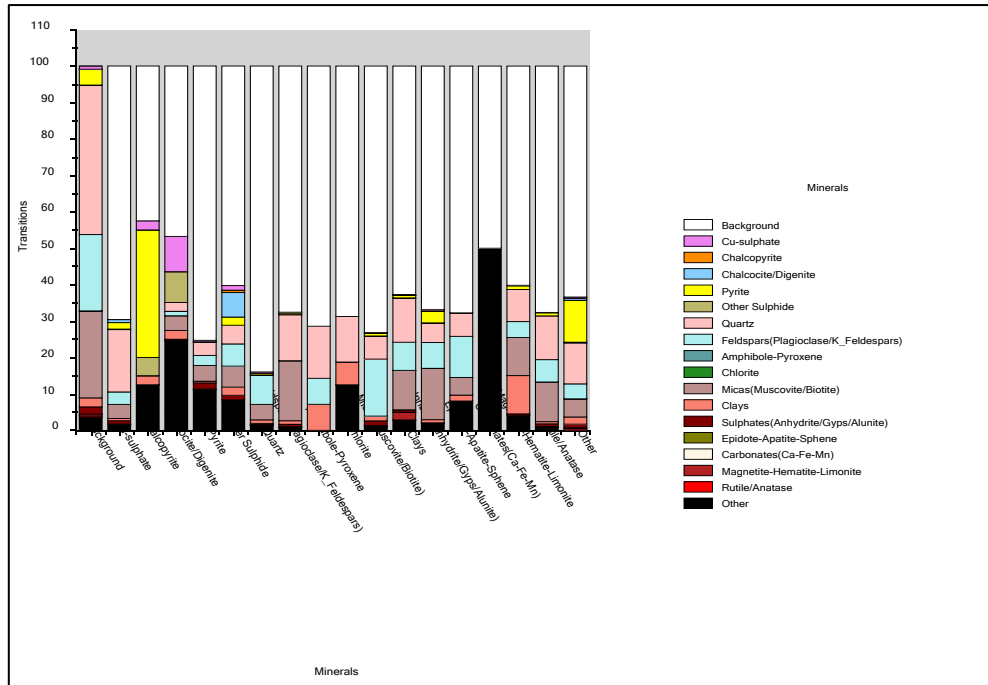


Figura 5.46: Asociación mineral de M9.

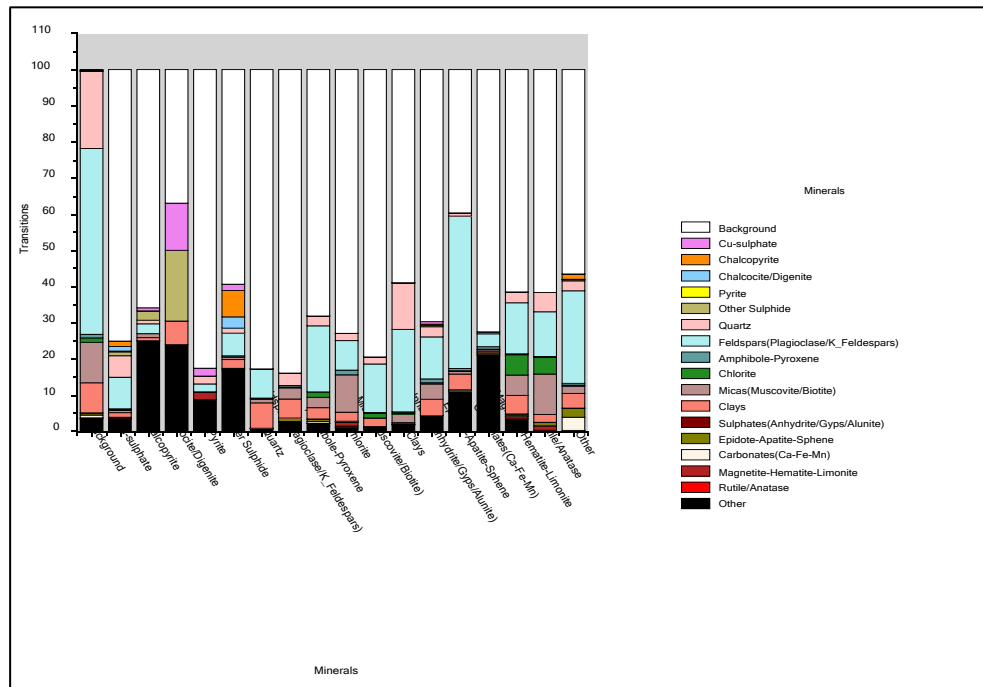


Figura 5.47: Asociación mineral de M10.

Al igual que en la zona de mixtos, los minerales de mena de la zona de enriquecimiento están asociados a minerales de ganga como micas, clorita y arcillas que podrían afectar el proceso de lixiviación, ya sea en la permeabilidad de la pila y/o en el consumo de ácido

5.3. Potencial de recuperación con lixiviación ácida

5.3.1. Cobre soluble a 1 y 5 horas

Se analizaron los datos de cobre soluble a 1 y a 5 horas. Para ello, se filtró la base de datos de ambas menas en tramos que contengan esta información.

Los procedimientos de análisis químicos para muestras de la División Gabriela Mistral son detallados por CMS Asociados, quienes describen los parámetros y técnicas que se consideran en el protocolo de determinación de cobre soluble en solución ácido sulfúrico 5% (v/v) con tiempos de lixiviación a 1 y 5 horas.

En primer lugar, se calcula la razón de solubilidad a los diferentes tiempos. La fórmula es: RSOL: CuS_{tx}/CuT , con tx igual al tiempo de lixiviación. Luego se realiza un gráfico de dispersión con una línea de tendencia de regresión lineal.

La Figura 5.48 muestra el gráfico de dispersión con las razones de solubilidad a 1 y 5 horas.

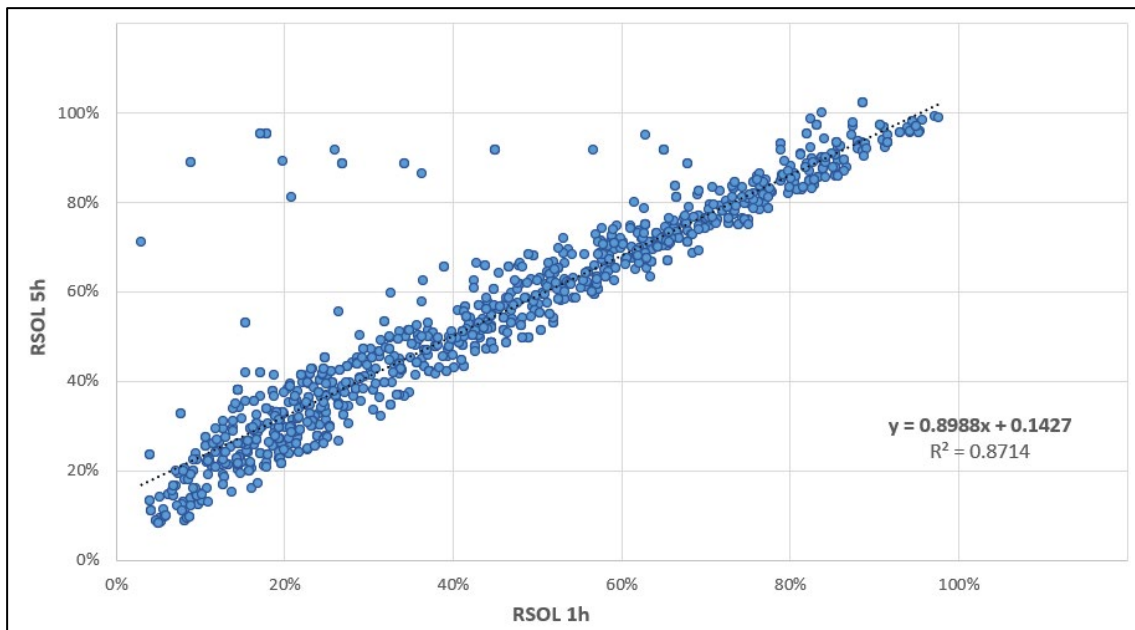


Figura 5.48: Gráfico de dispersión de razón de solubilidad a 1 y 5 horas para mena de mixtos. En el gráfico se proyecta línea de tendencia en color negro, la ecuación de la recta y R^2 .

Del gráfico se observa una fuerte correlación positiva, donde las variables se ajustan a la recta de la regresión. Los parámetros asociados a la ecuación de la recta como la pendiente nos indica cómo cambia la variable dependiente (RSOL 5h) por cada incremento unitario de la variable independiente (RSOL 1h), en este caso es un valor cercano a 1. Por su parte, el “r” se denomina coeficiente de correlación e indica la fuerza de la relación lineal entre “x” e “y”, donde los valores

de “r” cercanos a -1 o a +1 indican una relación lineal más fuerte entre las variables (Illowsky y Dean, 2022), siendo en este caso +0,93, esto quiere decir que a medida que aumente “x”, más aumentará y. Mientras que el “R²”, que se denomina coeficiente de determinación, que cuando se expresa en porcentaje, representa el porcentaje de variación de la variable dependiente “y” que puede explicarse por la variación de la variable independiente “x” utilizando la línea de regresión. En este caso el valor de R² es de 87%, lo que se traduce en que el 87% de la variable RSOL 5h, puede explicarse por la variación de los valores de RSOL 1h.

Para la zona de enriquecimiento, la correlación entre ambas razones de solubilidad se muestra en la Figura 5.49.

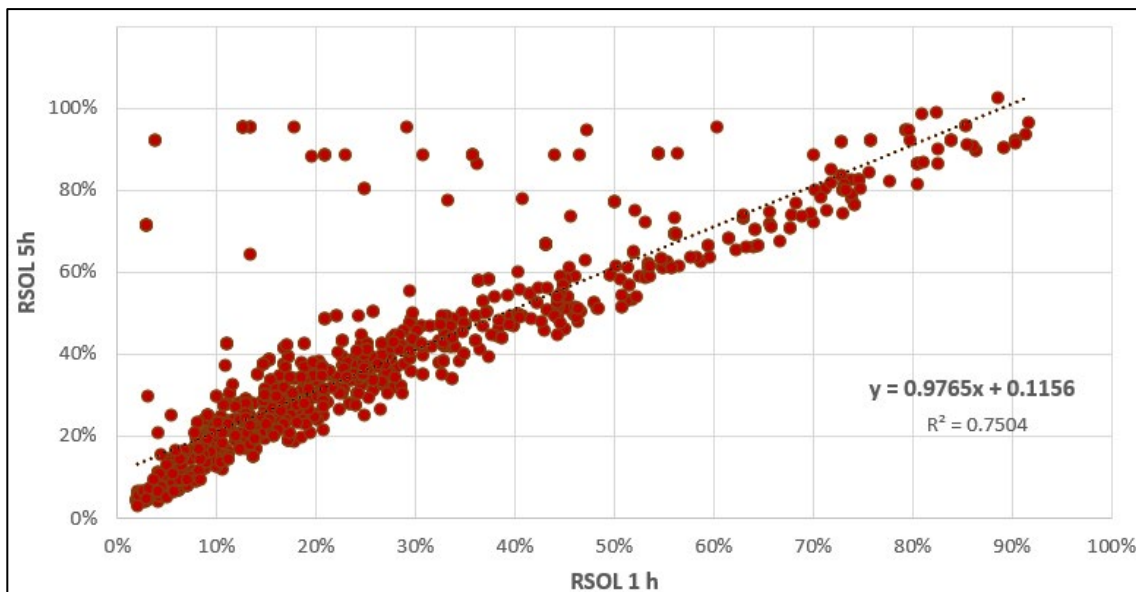


Figura 5.49: Gráfico de dispersión de razón de solubilidad a 1 y 5 horas para mena de enriquecimiento. En el gráfico se proyecta línea de tendencia en negro, la ecuación de la recta y R².

Del gráfico se observa una fuerte correlación positiva, donde las variables se ajustan a la recta de la regresión, indicado por el valor de la pendiente. Por su parte, el coeficiente de correlación es +0.86, valor cercano a 1, que indica que los valores se ajustan a la línea de regresión. Mientras que el coeficiente de determinación es de 75%, que quiere decir que el 25% de la razón de solubilidad a 5 horas no se explica por la variación de la razón de solubilidad a 1 hora.

5.3.2. ΔCuS en Mixtos

El porcentaje que no se ajusta a la correlación se analiza mediante gráficos de dispersión con las variables que componen la razón de solubilidad, es decir, a través del comportamiento del cobre soluble (CuS) y del cobre total (CuT). En particular, como se está comparando la solubilidad a 1 hora y a 5 horas, primero se calcula el ΔCuS de la forma CuS (5 horas - 1 hora), y de la forma CuS (5 horas / 1 hora). Luego, se realizan gráficos de dispersión con el ΔCuS calculado versus el CuT y el CuS a 1 hora, para cada una de las menas

La Figura 5.50 muestra los gráficos para la mena de mixtos, con el ΔCuS calculado como la resta del cobre soluble de 5 horas menos el de 1 hora, en comparación al cobre total y al cobre soluble a 1 hora, y calculado como la división entre el cobre soluble a 5 y a 1 hora, en comparación al cobre total y al cobre soluble a 1 hora.

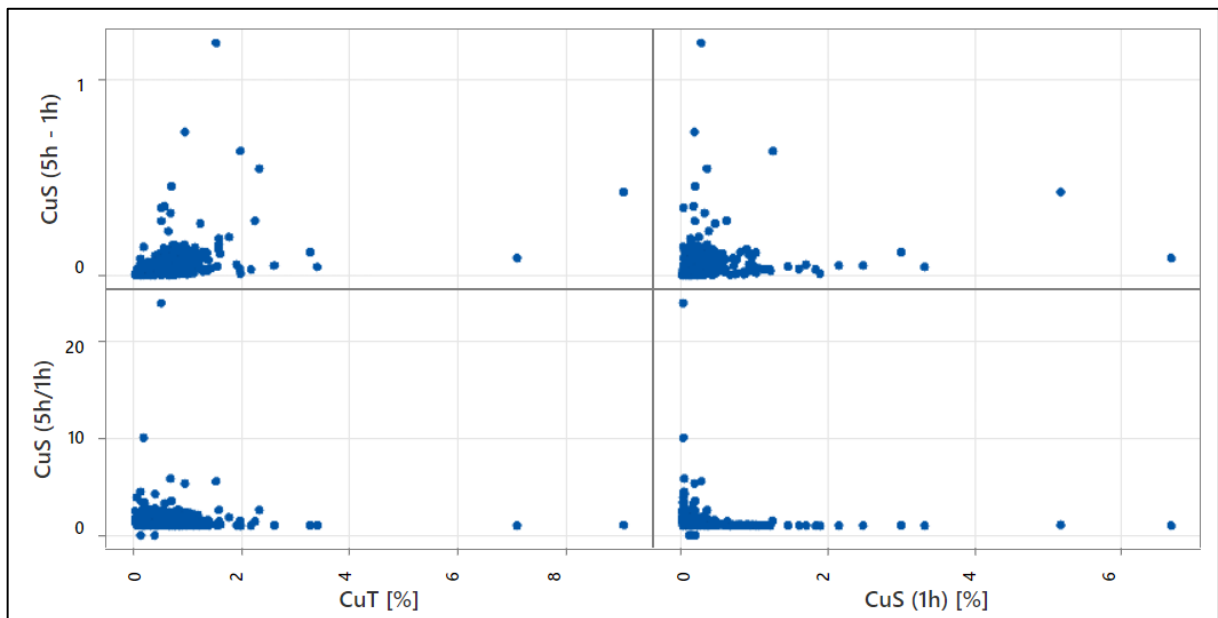


Figura 5.50: Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para mena de mixtos. Matriz de diagramas de dispersión con leyes de cobre total (CuT) y sobre soluble a 1 hora (CuS (1h)) evaluados en función de ΔCuS como diferencia y cociente.

De los gráficos, es posible observar 2 claras tendencias, una horizontal con bajo ΔCuS , y otra vertical con alto ΔCuS .

Para analizar estos grupos de datos y encontrar sus características en común, se realizan los mismos diagramas de dispersión categorizados según la intensidad de mineralización de óxidos, sulfuros secundarios, y sulfuros primarios.

Las figuras 5.51 y 5.52 muestran la dispersión de los minerales oxidados de la zona de mixtos.

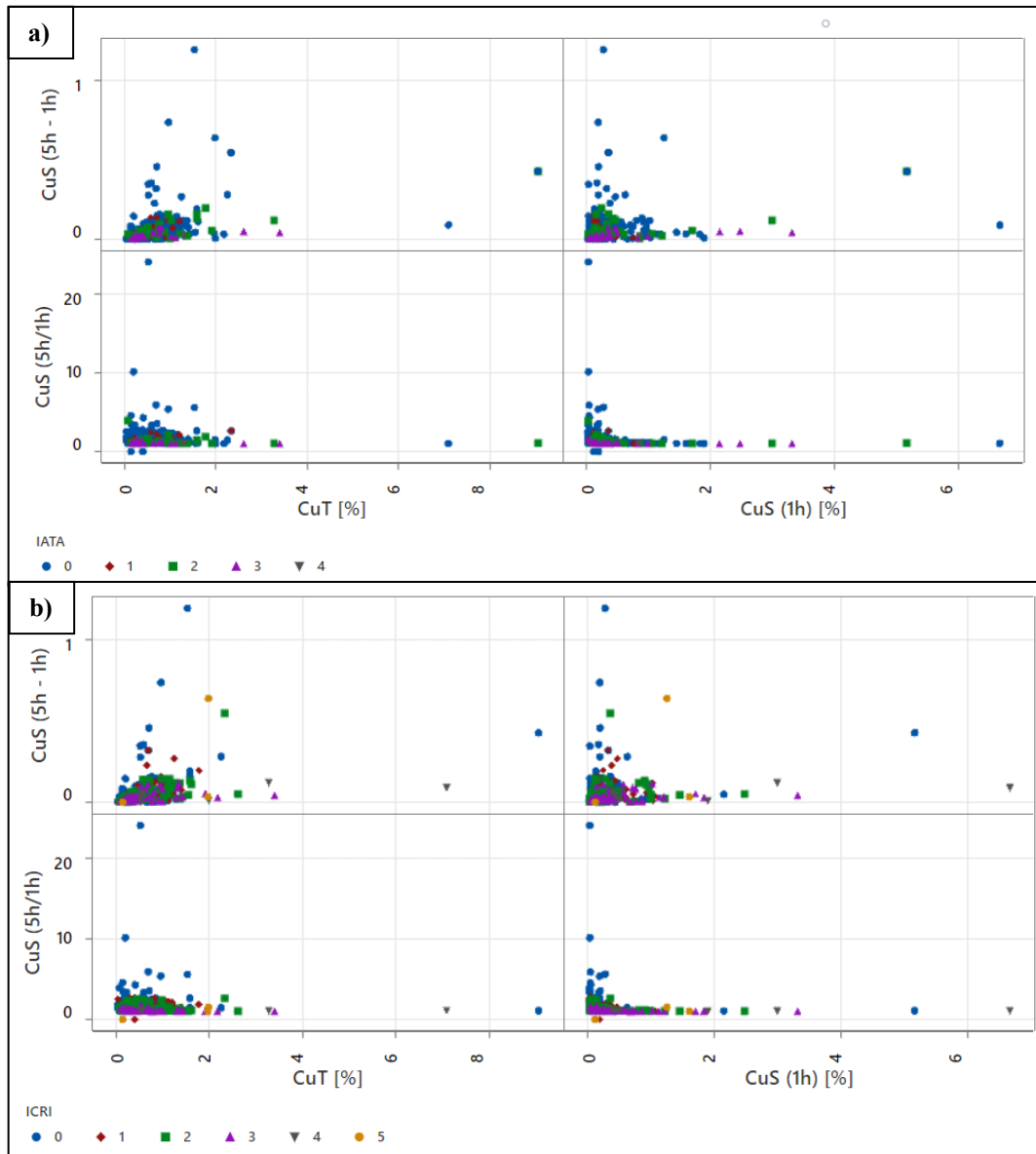


Figura 5.51: Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para óxidos atacamita y crisocola de la mena de mixtos. a) Diagrama de intensidades de atacamita. b) Diagrama de intensidades de crisocola. IATA e ICRI corresponden a intensidades de mineralización donde 0 es ausente, 1 muy débil, 2 débil, 3 moderado, 4 fuerte y 5 muy fuerte.

A través de la visualización de estas gráficas es posible observar que los óxidos no presentan cambios en la solubilidad del cobre en el tiempo. En general, sus diferentes intensidades se ajustan a la tendencia horizontal de bajo ΔCuS , que es coincidente con su lixiviación bajo el proceso actual de la División. Notar que hay valores de crisocola (Figura 5.51.b.) que presentan un valor medio de ΔCuS , sin embargo, son tramos que presentan medianas intensidades de calcosina, lo que hace que se muestren en el *trend* vertical.

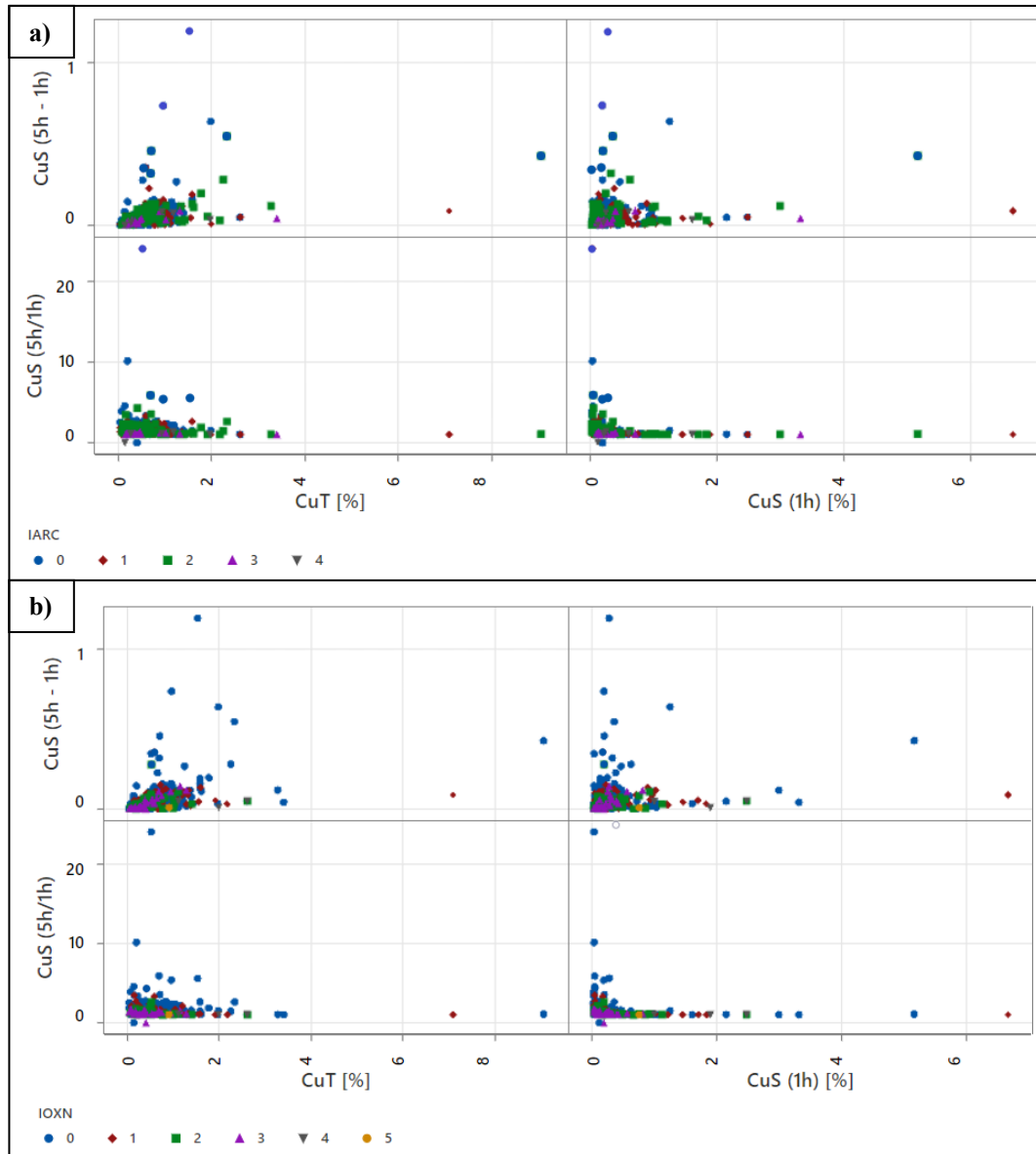


Figura 5.52: Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para óxidos arcillas con cobre y óxidos negros de la mena de mixtos. a) Diagrama de intensidades de arcillas con cobre. b) Diagrama de intensidades de óxidos negros. IARC e IOXN corresponden a intensidades de mineralización donde 0 es ausente, 1 muy débil, 2 débil, 3 moderado, 4 fuerte y 5 muy fuerte.

La Figura 5.53 muestra la dispersión de los sulfuros secundarios de la zona de mixtos.

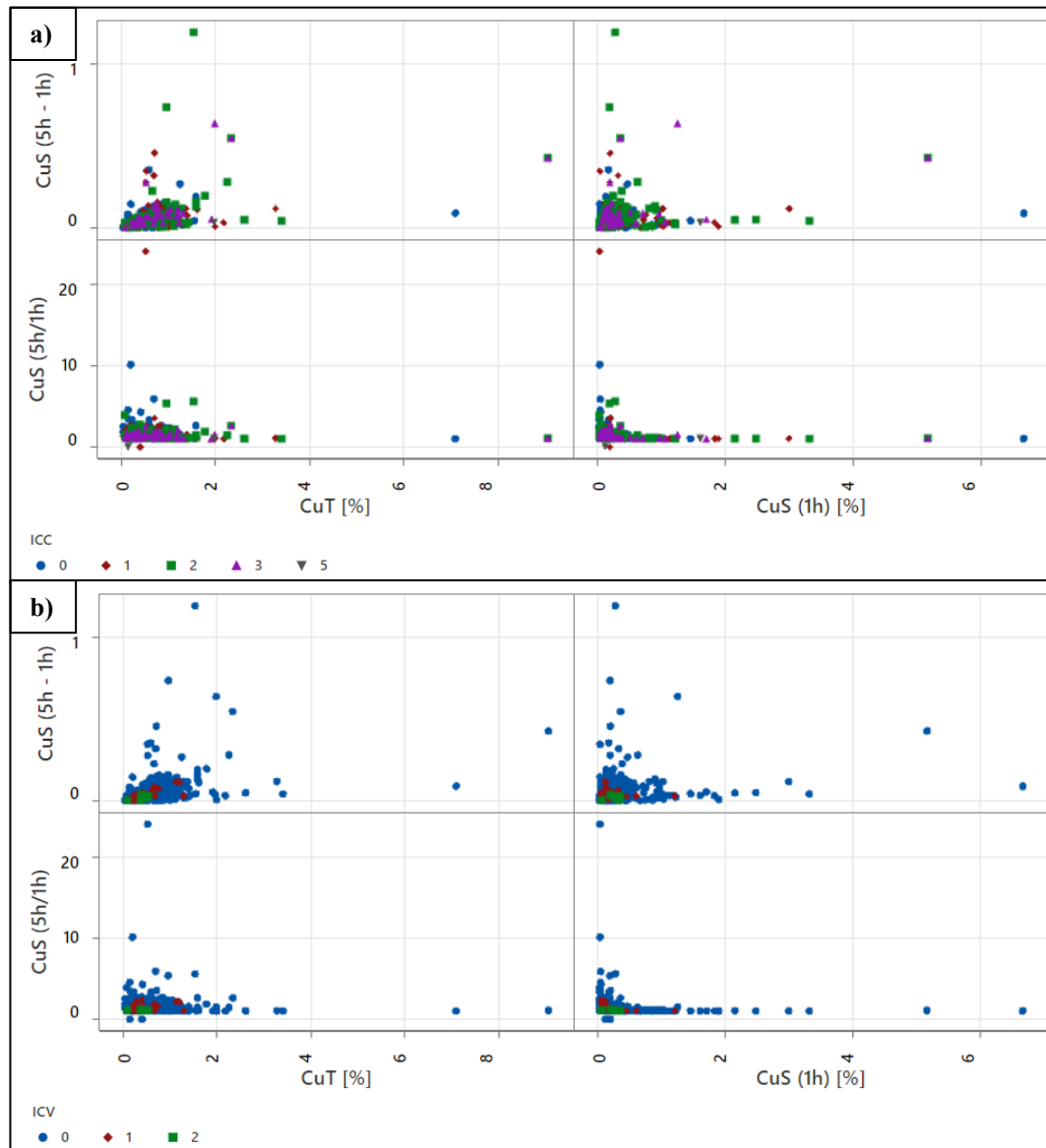


Figura 5.53: Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para sulfuros secundarios de la mena de mixtos. a) Diagrama de intensidades de calcosina. b) Diagrama de intensidades de covelina. ICC e ICV corresponden a intensidades de mineralización donde 0 es ausente, 1 muy débil, 2 débil, 3 moderado, 4 fuerte y 5 muy fuerte.

De estas gráficas, se observa la poca presencia de covelina, con un comportamiento ajustado al *trend* horizontal, de bajo ΔCuS , donde se infiere que no muestra un incremento en la solubilidad en el tiempo, por lo que se desconoce su comportamiento en la recuperación de cobre bajo el

proceso actual de lixiviación. Por su parte, la calcosina, exhibe ambos comportamientos, uno de bajo ΔCuS , con tramos donde ocurre la lixiviación casi total de cobre a 1 hora, y otra población menor de alto ΔCuS , donde se muestra un incremento en la solubilidad de cobre en función del tiempo.

La Figura 5.54 muestra la dispersión de los sulfuros primarios de la zona de mixtos.

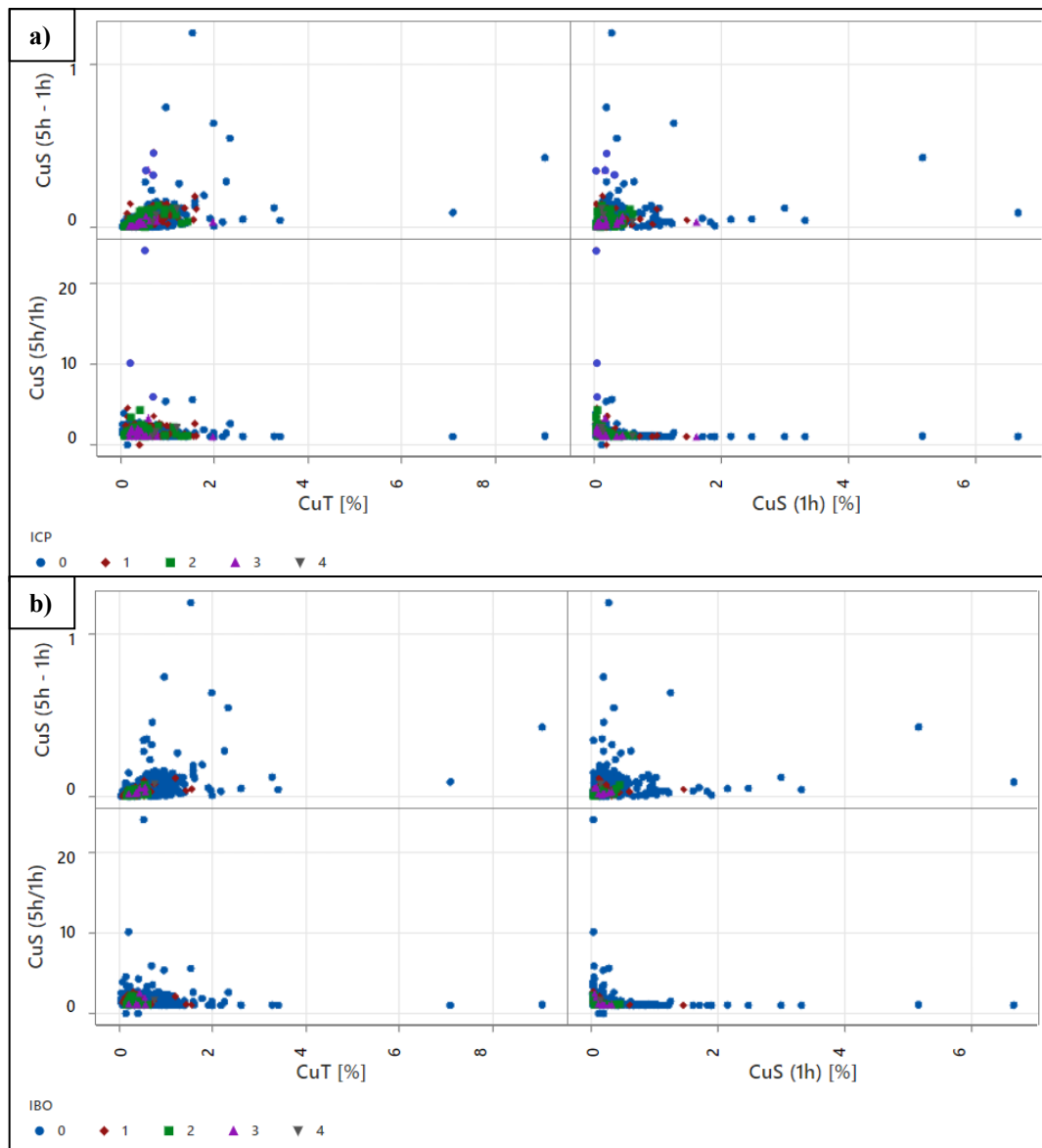


Figura 5.54: Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para sulfuros primarios de la mena de mixtos. a) Diagrama de intensidades de calcopirita. b) Diagrama de intensidades de bornita. ICP e IBN corresponden a intensidades de mineralización donde 0 es ausente, 1 muy débil, 2 débil, 3 moderado, 4 fuerte y 5 muy fuerte.

De estos diagramas, se observa que los sulfuros primarios tienen un comportamiento acotado a valores de bajo ΔCuS , lo que es esperable, dado que la recuperación de cobre para los minerales de calcopirita y bornita bajo un proceso de lixiviación ácida es muy baja, lo que queda, en parte, representado en los valores de cobre soluble a 1 y 5 horas, donde no presentan cambios significativos.

En general, de la mineralización graficada, el primer *trend*, está dominado por la presencia de óxidos como crisocola en altas intensidades, y en menor proporción por arcillas de cobre y óxidos negros con intensidades muy débiles. Además, hay intensidades débiles a muy débiles de sulfuros secundarios como calcosina, covelina, y sulfuro primario de calcopirita. En base a la información de óxidos conocida en el yacimiento, las especies no presentan cambios en la solubilidad del cobre a 1 y 5 horas, puesto que, a la hora 1 ya lixivía todo el cobre, y, por lo tanto, no exhibe una variación en el CuS , y el ΔCuS es cercano a 0. Por su parte, el *trend* con mayor ángulo en la vertical, presenta un predominio en intensidades débiles a moderadas de arcillas con cobre y óxidos negros, y con intensidades moderadas de calcosina y calcopirita.

En este caso, los óxidos presentes son de cinética más lenta, es decir, el tiempo es una variable que condiciona su lixiviación, por lo que, a 5 horas, presentarán una variación respecto del CuS a 1 hora. De este análisis de presencia e intensidad mineral, es posible inferir que, para la mena de mixtos, el potencial de recuperación estará condicionado por el tipo de sulfuro, puesto que la existencia del sulfuro secundario calcosina presenta un comportamiento de lixiviación de cobre similar a las arcillas con cobre, y, además, presenta un ΔCuS , por lo que hay una influencia en el porcentaje de cobre recuperado en función del tiempo. Por su parte, la covelina no aporta cobre en la lixiviación bajo el proceso actual, por lo que queda en duda a qué tiempo presentará un aporte de Cu en la lixiviación. En relación con los sulfuros primarios, no muestran un comportamiento diferente en la solubilidad de cobre a 1 y 5 horas, por lo que se desconoce a qué tiempo se recuperará cobre, o si existirá un delta considerable bajo este proceso.

5.3.3. ΔCuS en Enriquecimiento secundario

Para la mena de enriquecimiento, la Figura 5.55 muestra las gráficas de dispersión de ΔCuS como resta y cociente, en comparación con el cobre total y el cobre soluble a 1 hora para analizar el comportamiento de la mena.

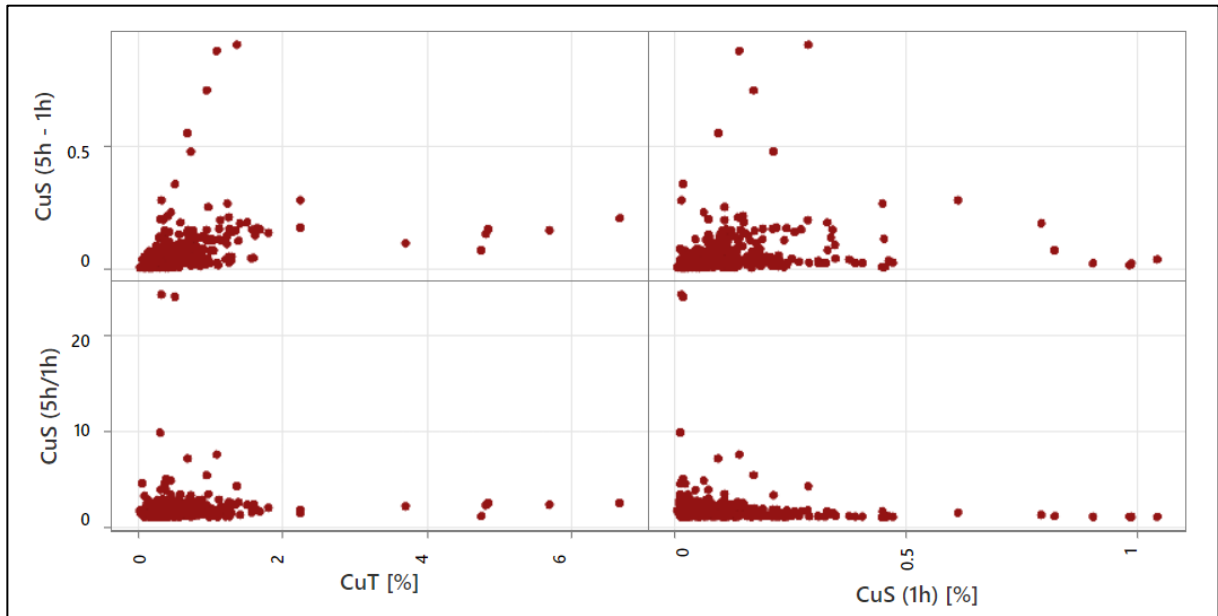


Figura 5.55: Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para mena de enriquecimiento. Matriz de diagramas de dispersión con leyes de cobre total (CuT) y sobre soluble a 1 hora (CuS (1h)) evaluados en función de ΔCuS como diferencia y cociente.

Al igual que para la zona de mixtos, se observan 2 grupos de datos, con tendencias horizontal con bajo ΔCuS , y otra vertical con alto ΔCuS .

Para analizar estos grupos de datos, encontrar sus características en común y explicar su comportamiento, se realizan los mismos diagramas de dispersión categorizados según la intensidad de mineralización de sulfuros secundarios y sulfuros primarios.

La Figura 5.56 muestra el comportamiento que tienen las diferentes intensidades mapeadas para los sulfuros secundarios de esta mena en función del ΔCuS vs el cobre total y el cobre soluble a 1 hora. En la Figura 5.56.a. se exhibe el comportamiento de la calcosina, mientras que la Figura 5.56.b. de la covelina.

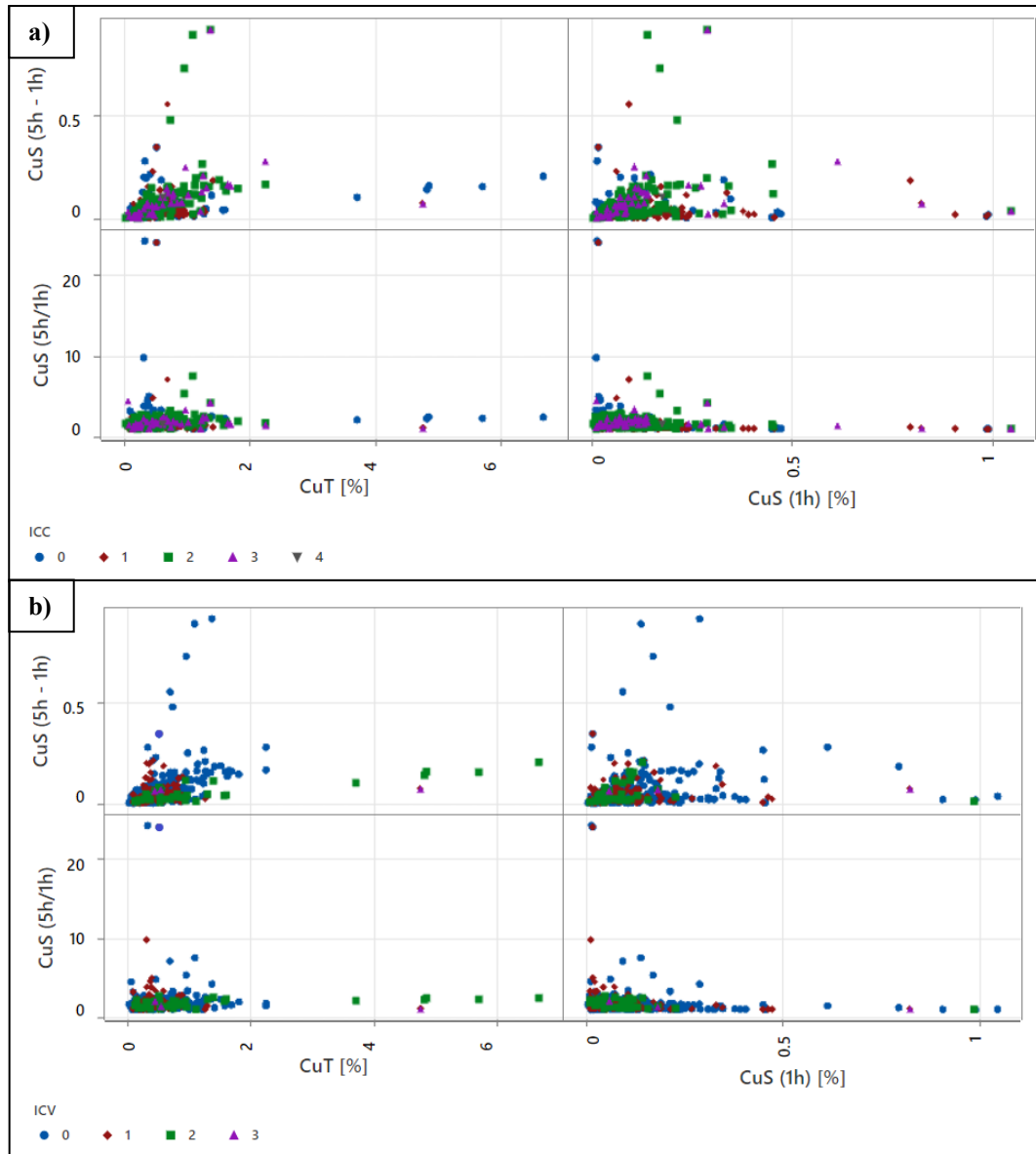


Figura 5.56: Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para sulfuros secundarios de la mena de enriquecimiento. a) Diagrama de intensidades de calcosina. b) Diagrama de intensidades de covelina. ICC e ICV corresponden a intensidades de mineralización donde 0 es ausente, 1 muy débil, 2 débil, 3 moderado, 4 fuerte y 5 muy fuerte.

De los diagramas, se observa que la covelina está limitada al *trend* de bajo ΔCuS , lo que indica que no existen cambios en la solubilidad del cobre en función del tiempo, es decir, bajo el proceso actual de lixiviación no se conoce su potencial de recuperación. La calcosina está presente en ambas tendencias, la de bajo ΔCuS indica que se lixivía parte del cobre a 1 hora, sin presentar cambios a 5 horas, mientras que el *trend* de alto ΔCuS revela que existe otro grupo de datos si presenta una

variación en la solubilidad de cobre en función del tiempo, por lo que existe un potencial de recuperación.

La Figura 5.57 muestra la dispersión de los sulfuros primarios de la zona de mixto.

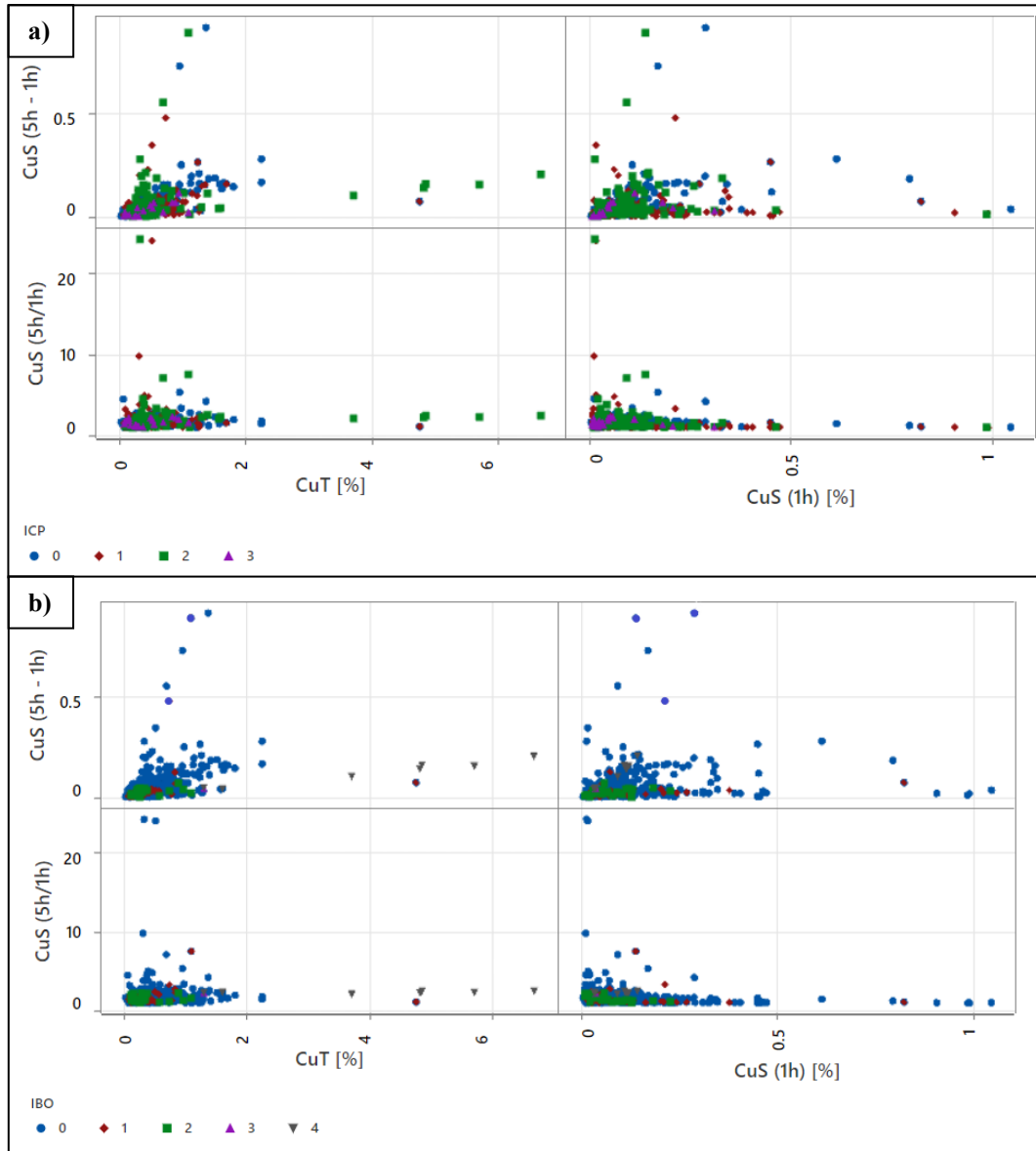


Figura 5.57: Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para sulfuros primarios de la mena de enriquecimiento. a) Diagrama de intensidades de calcopirita. b) Diagrama de intensidades de bornita. ICP e IBN corresponden a intensidades de mineralización donde 0 es ausente, 1 muy débil, 2 débil, 3 moderado, 4 fuerte y 5 muy fuerte.

De estas gráficas, se observa que ambos minerales se ajustan principalmente al *trend* de bajo ΔCuS , lo que indica que corresponden a minerales refractarios, y bajo el proceso actual no se conoce su

variación en la solubilidad con el incremento en el tiempo de lixiviación. En particular, para la calcopirita hay datos que se encuentran en la tendencia de alto ΔCuS , sin embargo, corresponden a tramos con contenido de calcosina en diferentes intensidades, por lo que ese comportamiento, se debe a la presencia del sulfuros secundarios.

En general, la tendencia de bajo ΔCuS , corresponde principalmente a tramos de enriquecimiento fuerte, donde los sulfuros primarios se han enriquecido en sulfuros secundarios, y existe la presencia predominante de covelina en intensidades débiles a moderadas. En menor proporción hay calcosinas en intensidades débiles a moderadas, y calcopiritas con bornitas en intensidades muy débil a débil. En el yacimiento, la covelina tiene características refractarias, dado que bajo el proceso actual no se ve un incremento en función del tiempo, al igual que para la calcopirita y la bornita, mientras que la calcosina es el mineral que exhibe una solubilidad del cobre a 1 hora que no aumenta en el tiempo. El segundo *trend*, de alto ΔCuS , corresponde a enriquecimiento fuerte con presencia única de calcosina en intensidades débil a moderada. Además, se observa un enriquecimiento parcial con presencia de calcopirita en intensidades muy débil a débil. Para esta mena es posible inferir que la solubilidad del cobre en función del tiempo se ve afectada por la presencia de calcosina, puesto su lixiviación entre 5 y 1 hora varía, representado por la diferencia en el ΔCuS .

De ambas representaciones, es posible notar que las menas de mixto y enriquecimiento tienen un comportamiento similar en sus relaciones de ΔCuS vs CuT y ΔCuS vs CuS (1h), lo que permite interpretar que se encuentran genéticamente relacionadas, compartiendo un mismo ambiente de formación. En la Figura 5.58 se muestran los gráficos de las menas de mixtos y de enriquecimiento superpuestos con el fin de visualizar de mejor manera este comportamiento. En particular, el mineral que tiene el mismo comportamiento en ambas menas corresponde a la calcosina, que está presente en ambas tendencias. En la mena de mixto, hay mayor presencia en el *trend* de bajo ΔCuS debido a la presencia de minerales oxidados, que lixivian el cobre a 1 hora, sin presentar mayor aumento a 5 horas.

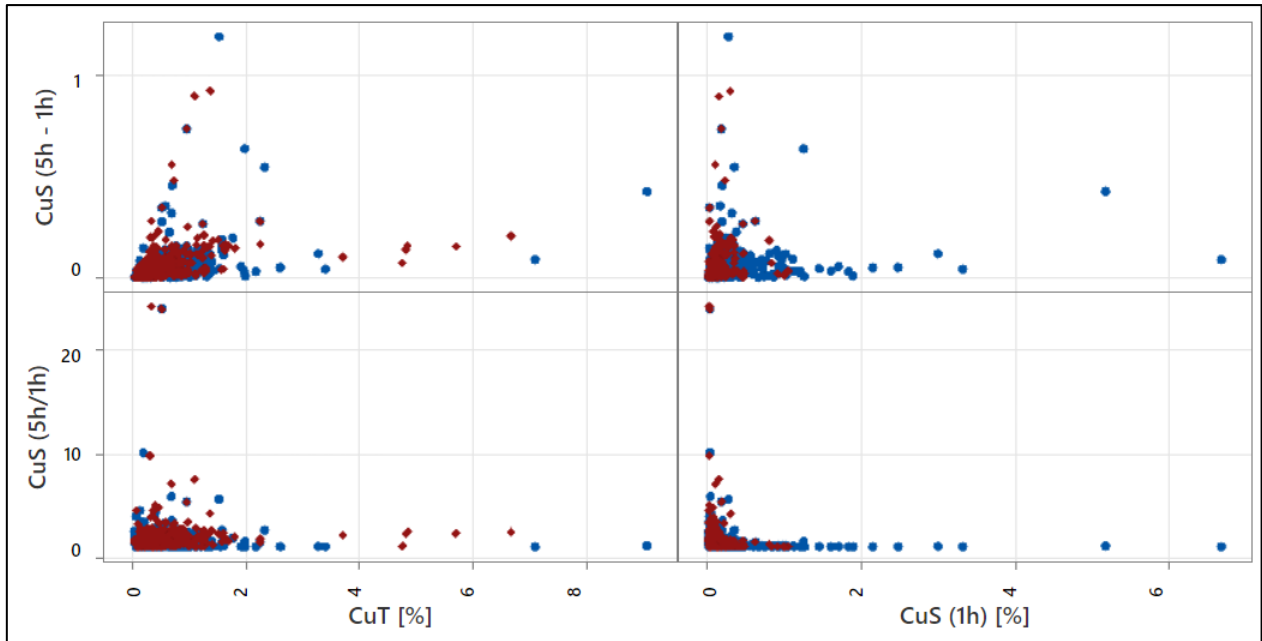


Figura 5.58: Gráfico de dispersión ΔCuS vs CuT y CuS (1h) para mena de enriquecimiento. Matriz de diagramas de dispersión. En azul se muestra la mena de mixtos y en rojo la de enriquecimiento.

5.4. Definición de subunidades

Clasificar y definir subunidades de mineralización es importante en una caracterización geológica y en la estimación de recuperación de cobre, debido a que ayuda en una comprensión geológica más profunda del yacimiento. Además, permite optimizar los procesos metalúrgicos, ya que los diversos minerales tienen comportamientos diferentes ante un tipo de procesamiento y conocer cuál es, permite reducir costos y maximizar la recuperación del metal. Por otra parte, tiene un impacto en la planificación minera, ya que, al tener una subdivisión, es posible planificar la secuencia de explotación de manera más eficiente, mejorando la predictibilidad del rendimiento de la operación.

La subdivisión de la zona de mixtos se basa principalmente en las poblaciones identificadas según las características geológicas del yacimiento, y el aporte en la recuperación de cobre que supone la calcosina dado su potencial en el tiempo. Así, se propone:

- Mixto Primario (510): Óxidos con sulfuros primarios, donde la predominancia de la mineralogía hipógena no está soportada por la hidrometalurgia. El aporte de cobre viene dado por la fracción oxidada.

- Mixto Secundario (520): Óxidos con sulfuros secundarios, donde la alta influencia de calcosina estima un potencial de recuperación de cobre en el tiempo en un proceso de lixiviación en pilas. El aporte de cobre está dado por la fracción oxidada y por la presencia de calcosina. La población de mixtos que contiene óxidos, sulfuros secundarios y primarios se considera en esta clasificación, debido a la presencia significativa de la calcosina.

En relación con la zona de enriquecimiento secundario, no se propone una subdivisión debido a que en ambas poblaciones geológicas definidas existe la presencia de calcosina en diferentes intensidades, y el aporte de cobre solo viene dado del potencial de recuperación de este mineral. Los minerales de covelina, calcopirita y bornita no aportarán cobre bajo el proceso de lixiviación actual, por lo que la mena tendrá un comportamiento similar en ambas poblaciones.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

En una caracterización geológica, es fundamental utilizar la estadística de los datos, puesto que permite analizar grandes conjuntos de datos de manera sistemática, lo que ayuda a reducir el sesgo de las interpretaciones. Además, facilita la identificación de patrones y tendencias en los datos, lo que resulta importante para comprender la distribución espacial de los recursos en el yacimiento. Aun así, lo más importante es el criterio del profesional para que la interpretación de estos datos esté aplicada al contexto del área de estudio, al identificar variables relevantes que permitan validar los resultados estadísticos, asegurando que los datos no solo sean estadísticamente significativos, sino también geológicamente coherentes.

La distribución de las menas y las unidades descritas no tienen un control principal por las litologías del yacimiento, ni por alguna alteración particular, sino más bien, están fuertemente controladas por parámetros estructurales que delimitan ambientes de mayor o menor acidez, donde la presencia de óxidos como atacamita y el desarrollo de sulfuros secundarios indican un ambiente de mayor acidez y removilización de fluidos por permeabilidad secundaria, que además, tienen un comportamiento metalúrgico diferente.

Las menas de mixtos y de enriquecimiento secundarios están espacial y genéticamente relacionadas, debido a que las unidades se encuentran en los mismos ambientes de formación controladas por estructuras. El mixto del tipo óxido más sulfuros secundarios y el enriquecimiento fuerte se encuentran asociados a fallas y estructuras de debilidad por permeabilidad secundaria, lo que permite que los fluidos circulen hacia profundidad, mientras que el mixto del tipo óxido más sulfuro primario y el enriquecimiento débil ocurren principalmente en el pórfido, que es más competente, está menormente afectado por estructuras y es donde se concentra la mineralización hipógena.

El potencial de recuperación de cobre de las menas de mixtos y enriquecimiento está condicionado solo por la presencia de la calcosina, puesto que la covelina, la calcopirita y la bornita son minerales refractarios, y no se conoce su respuesta bajo este proceso de lixiviación, por lo que es necesario realizar pruebas para establecer a qué tiempo determinado comienza a presentar un delta en la solubilidad, o bien, si no lo hará en este proceso de lixiviación ácida.

La microscopía óptica y la mineralogía automatizada QEMSCAN® son técnicas complementarias, cuyo uso conjunto proporciona una caracterización más completa y precisa de las muestras mineralógicas. Su combinación favorece la integración de datos cualitativos y cuantitativos, mejorando la interpretación geológica mediante un análisis multiescala, que reduce la subjetividad inherente de la interpretación visual, lo que permite validar la información y proporcionar una base más sólida de la caracterización y, así, optimizar el procesamiento de los recursos.

Subdividir las zonas de estudio en unidades geológicas mejora la gestión de los recursos al optimizar los procesos de extracción y, además, proporciona una comprensión más detallada del yacimiento, lo que contribuye a una explotación más eficiente y sostenible de los recursos minerales.

6.2. Recomendaciones

Con el fin de contribuir mejoras y continuidad al estudio, y robustecer la información, se plantean las siguientes recomendaciones:

- La población de mixtos que contiene óxidos, sulfuros secundarios y primarios se considera como Mixto Secundario, debido a la presencia significativa de la calcosina, sin embargo, debe analizarse a mayor detalle y con pruebas complementarias, ya que su coexistencia puede complicar el procesamiento y requiera de algún tratamiento extra para maximizar la recuperación.
- Realizar prueba de iso - pH a muestras que contengan mineralización de calcosina, covelina, calcopirita y bornita, para estimar el tiempo en el que ocurre la máxima recuperación de cobre, para luego escalar los datos y estimar si es viable realizarlo en el yacimiento.
- Hacer pruebas de lixiviación con ion férrico para muestra con sulfuros secundarios, y en particular con calcosina, dado que bajo el proceso actual muestra una diferencia en la solubilidad de cobre en el tiempo, por lo que añadirle algún agente oxidante puede mostrar un aumento significativo en la recuperación de cobre.
- Realizar pruebas metalúrgicas a las subunidades definidas con énfasis en los minerales de ganga para conocer valores de consumo de ácido sulfúrico e información sobre la permeabilidad de las pilas de lixiviación, dado que son variables importantes para la operación y rentabilidad, con el fin de encontrar el proceso hidrometalúrgico más eficiente.

7. REFERENCIAS

- ANDAUR, P. 2023. QEMSCAN® versus TIMA-X®: comparación de tecnologías de Mineralogía Automatizada por medio del estudio de muestras de yacimientos tipo pórfido cuprífero. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 11 pp. Concepción, Chile.
- BASSO, M. & MPODOZIS, C. 2012. Carta Cerro Químal, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N°143: 48 pp. Santiago.
- BEHN, G. & SKARMETA, J. 1998. Caracterización Geológica, Geofísica y Geoquímica del Yacimiento y Distrito Gaby. Informe de Avance 1: Geología Estructural y Geofísica.
- CHARRIER, R. & REUTTER, K. 1994. The Purilactis Group of Northern Chile: Boundary between arc and backarc from Late Cretaceous to Eocene. En Reutter, K.-J., Scheuber, E. y Wigger, P. (eds.) Tectonics of the Southern Central Andes. Springer-Verlag, Berlín, 189-202.
- CHETTY, D. (2018). Acid-gangue interactions in heap leach operations: A review of the role of mineralogy for predicting ore behaviour. *Minerals*, 8(2), 47 pp.
- DAVENPORT, W. G., KING, M., SCHLESINGER, M., BISWAS, A.K. 2002. Extractive Metallurgy of Copper. Pergamon Press, Fourth edition. Kidlington, Elsevier Science Limited: 452 pp. Oxford, England.
- DAVIDSON, J., RAMIREZ, C., GARDEWEG, M., HERVÉ, M., BROOK, M., & PANKHURST, R. 1985. Calderas del Paleozoico superior- Triásico superior y mineralización asociada en la Cordillera de Domeyko, norte de Chile. *Comunicaciones, Universidad de Chile, Santiago (Chile)*. Vol. 35, 53-57 pp.
- DINGMAN, R.J., 1963. Cuadrángulo Tulo. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 11:1-35. 1 mapa escala 1:50.000. Santiago, Chile.
- DOMIC, E. 2001. Hidrometalurgia. Fundamentos, procesos y aplicaciones. Ed. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile: 947 pp. Santiago, Chile.

- DONOSO, F. 2018. Caracterización mineralógica del Yacimiento Gaby, con énfasis en la distribución de arcillas. Tesis para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Departamento de Geociencias (Inédito): 163 pp. Antofagasta, Chile.
- FAM R., EAST P. & KREFT C. 1999. Estudio Geológico Distrital e Interpretación de Zonas Cubiertas (Inédito). Proyecto Gaby-Geometal, Codelco Chile. 108 pp. Mapa Geológico Distrital 1:200.000.
- FREDES, A. 2019. Caracterización geoquímica, distribución y geometalurgia de óxidos negros en el yacimiento Yaby, región de Antofagasta, Chile. Tesis para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Departamento de Geociencias (Inédito): 168 pp. Antofagasta, Chile.
- FORTT, A. 1981 Geología General de los Cuadrángulos: Cerro Químal, Laguna Tevinquiche, Llano de la Paciencia y Salar de Atacama, II Región. IIG, 48 pp. Inédito.
- LLOWSKY, D. & DEAN S. 2022. Introducción a la Estadística, OpenStax. Rice University, Houston, Texas.
- JENSEN, A., & QUINZIO L. A. 1979. Geología del Área de Pampa Elvira y contribución al conocimiento del Jurásico marino entre los 23°00' y 23°30' Latitud Sur y los 68°45' y 69°03' Longitud Oeste. II Región de Antofagasta, Chile. Memoria para obtener el Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Departamento de Geociencias (Inédito): 141 pp. Antofagasta.
- MARTIN, M. 1999. Report to Codelco-Chile on U-Pb Zircon geochronology from Gaby Sur. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts. Informe interno, Gerencia de Exploraciones, Codelco.
- MERINO, S. 2018. Evaluación de la implementación operacional para el sistema de aireación forzada en pilas de lixiviación, División Radomiro Tomic. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Metalúrgico. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica (Inédito): 72 pp. Concepción, Chile.
- MPODOZIS, C.; MARINOVIC, N.; SMOJE, I. & CUITIÑO, L., 1993. Estudio Geológico-Estructural de la Cordillera de Domeyko entre Sierra Limón Verde y Sierra Mariposas,

- Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Corporación Nacional del Cobre. 282 pp. Santiago.
- PLAZA, L. 2001. Geología del pique y galerías del proyecto Gaby, Región de Antofagasta. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Departamento de Geociencias (Inédito): 58 pp. Antofagasta, Chile.
- PORTAL MINERO S.A. 2006. Manual general de minería y metalurgia. Mostazal, Chile: Portal Minero.
- RAMIREZ, C. & GARDEWEG, M. 1982. Hoja Toconao, Región de Antofagasta, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta geológica de Chile, No. 54, 37p. Mapa escala 1:250.000.
- REPPETO, C. 2018. Evaluación de tecnología para lixiviación futura de sulfuros División Radomiro Tomic Codelco. Memoria para optar al Título Ingeniero civil Metalúrgico. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica (Inédito): 72 pp. Concepción, Chile.
- ROJAS, G., HENRÍQUEZ, J., HURTADO A., MÉNDEZ, M., NICOLÁS, C. & PLAZA, L. 2005. Informe Modelo Geológico 2004 del Yacimiento Gaby (Inédito). Minera Gaby, Unidad de Negocios. 227 pp. Codelco, Chile.
- ROJAS G., HENRÍQUEZ J., HURTADO A., MÉNDEZ M., NICOLÁS C. & PLAZA L. 2006. Informe Modelo Geológico 2005 del Yacimiento Gaby (Inédito). Minera Gaby, Unidad de Negocios. 58 pp. Codelco, Chile.
- SCHEFFEL, R. E., GUZMAN, A. Y DREIER, J. E. 2016. Development metallurgy guidelines for copper heap leach. *Minerals & Metallurgical Processing*, 33 (4), 187-199 pp.
- TAPIA, C. 2023. Descripción y clasificación petrológica, de choque y meteorización de los condritos CAT M7 y CAT M10 del Desierto de Atacama. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 113 pp. Concepción, Chile.

WALLS, J. 2017. Lixiviación en medio ácido con ion férrico para mineral mixto de cobre. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Metalurgia. Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería (Inédito): 44 pp. Viña del Mar, Chile.

ANEXOS

Anexo 1

Código Python

```

@author: Cristian Avila
"""

import pandas as pd
from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.metrics import silhouette_score

# Cargar los datos
data = pd.read_excel(r'archivo.xlsx')

# Seleccionar las variables relevantes
X = data[['Rsol', 'CUSI']]

# Normalizar los datos
scaler = StandardScaler()
X_scaled = scaler.fit_transform(X)

# Determinar el número óptimo de grupos utilizando el método del codo (Elbow Method)
wcss = []
for i in range(1, 11):
    kmeans = KMeans(n_clusters=i, init='k-means++', max_iter=300, n_init=10, random_state=0)
    kmeans.fit(X_scaled)
    wcss.append(kmeans.inertia_)
plt.plot(range(1, 11), wcss)
plt.title('Método del Codo')
plt.xlabel('Número de grupos')
plt.ylabel('WCSS')
plt.show()

# Determinar el número óptimo de grupos utilizando el método de silueta
silhouette_scores = []
for k in range(2, 11):
    kmeans = KMeans(n_clusters=k, init='k-means++', max_iter=300, n_init=10, random_state=0)
    kmeans.fit(X_scaled)
    silhouette_scores.append(silhouette_score(X_scaled, kmeans.labels_))

# Visualizar el resultado del método de silueta
plt.plot(range(2, 11), silhouette_scores)
plt.xlabel('Número de grupos')
plt.ylabel('Silhouette Score')
plt.title('Método de Silueta')
plt.show()

print("El número óptimo de clusters es:", optimal_k)

```

```
# Carga los datos desde el archivo Excel
df = pd.read_excel(r'archivo.xlsx')

# Selecciona las dos variables de interés para el gráfico de dispersión
X = df[['Rsol', 'CUS1']].values

# Aplica KMeans para agrupar los datos en clusters
kmeans = KMeans(n_clusters=(optimal_k), random_state=0).fit(X)

# Agrega las etiquetas de cluster a los datos
df['cluster'] = kmeans.labels_

# Grafica los puntos de dispersión de acuerdo a su cluster
plt.scatter(X[:, 0], X[:, 1], c=df['cluster'], cmap="viridis")
plt.xlabel('Rsol')
plt.ylabel('CuS')

# Imprime los rangos de cada cluster
for i in range(optimal_k):
    cluster_data = df[df['cluster'] == i][['Rsol', 'CUS1']]
    print(f"Rango de cluster {i}: Rsol - [{cluster_data['Rsol'].min()}, {cluster_data['Rsol'].max()}]")

# Muestra el gráfico
plt.show()
```

Anexo 2

Muestra 1. Descripción Petrográfica – Calcográfica

Muestra No.:	M1
Clasificación petrográfica	Roca intrusiva
Clasificación de alteración	Argílica y filica
Alteración predominante	Argílica

Textura:

	Foto	Aumento
La muestra presenta textura granular, y consiste principalmente de granos finos de cuarzo, plagioclasa, sericita, minerales de arcillas y clorita. Observación petrográfica indica que la muestra fue afectada por alteraciones filica y argílica. Minerales accesorios son: sericita, clorita y arcillas. Distintos silicatos (cuarzo, plagioclasa, clorita, sericita), sulfuros (pirita y calcosina), óxidos (hematita) se encuentran en toda la muestra.	A	5x

Mineralogía Primaria (100% vol.):

	100% Vol.	Foto	Aumento
Cuarzo en cristales anhedrales a subhedrales	60	A	5x
Plagioclasa (relictos) con alteraciones fuerte de arcillas	40	A	5x

Mineralogía de Alteración (100% vol.):

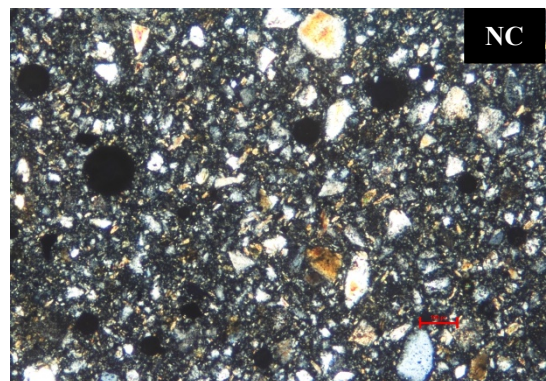
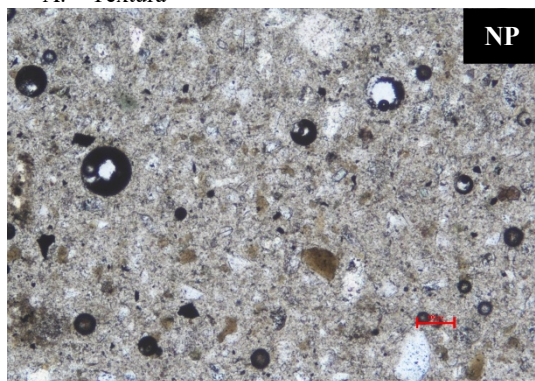
	100% Vol.	Foto	Aumento
Cuarzo en pequeños cristales intersticiales	35	A	5x
Sericita con formas anhedrales a subhedrales, producto de la alteración de plagioclasas.	35	A	5x
Arcillas asociadas a plagioclasa	20	A	5x
Clorita como productos minerales ferromagnesianos	10	A	5x

Mineralización metálica (100% Vol.)

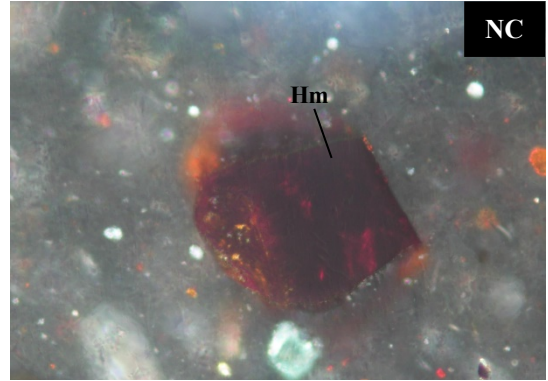
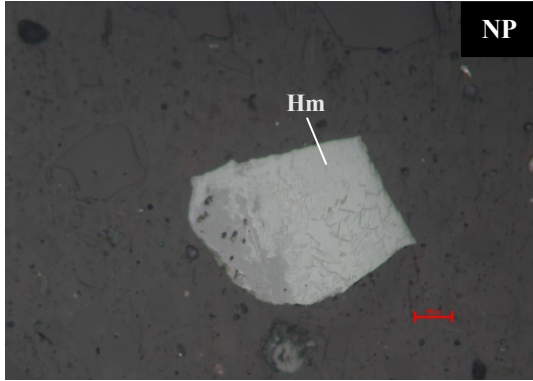
Mineral	% Diseminado	Modo de ocurrencia	Foto	Aumento
Hematita (Hm)	50%	Diseminado en granos finos.	B	40x
Calcopirita (Cpy)	30 %	Diseminado en granos finos.	C	40x
Calcosina (Cc)	20%	Reemplazo de calcopirita	D	40x

Fotos

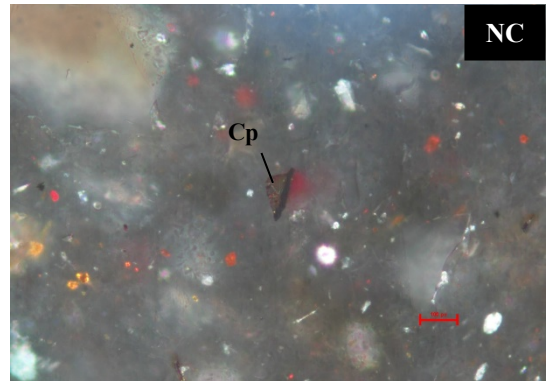
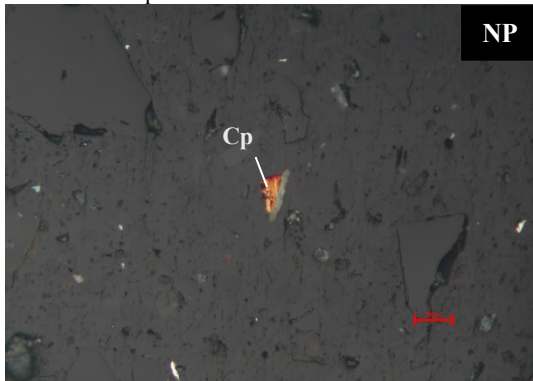
A. Textura



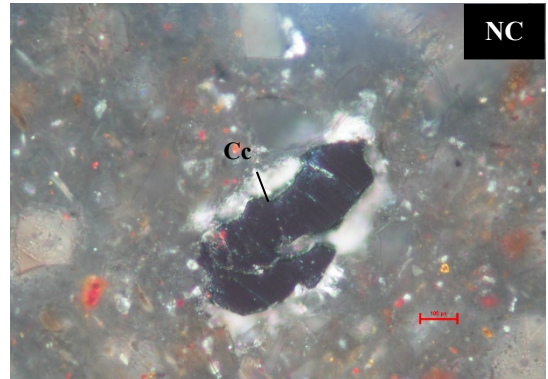
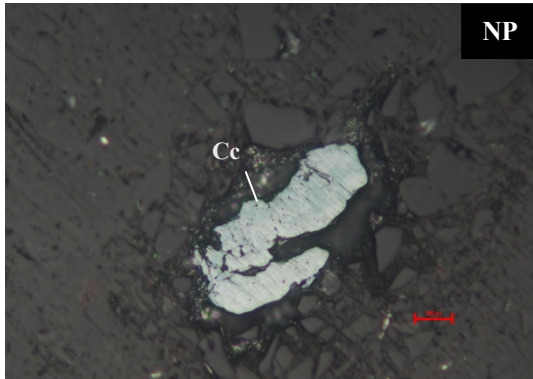
B. Hematita



C. Calcopirita



D. Calcosina



Muestra 2. Descripción Petrográfica – Calcográfica

Muestra No.:	M2
Clasificación petrográfica	Roca intrusiva
Clasificación de alteración	Argílica, filica y potásica
Alteración predominante	Argílica

Textura:

La muestra presenta textura granular. Consiste principalmente de granos finos de cuarzo, plagioclasa, biotita, sericita, minerales de arcillas y clorita. Observación petrográfica indica que la muestra es afectada por diferentes alteraciones hidrotermales como la alteración potásica, filica y argílica de manera pervasiva. Minerales accesorios son: sericita, clorita y arcillas. Distintos silicatos (cuarzo, plagioclasa, biotita clorita, sericita), sulfuros (calcopirita, piritita y calcosina), óxidos (hematita y magnetita) están en toda la muestra.

Foto Aumento

A 5x

Mineralogía Primaria (100% vol.):**100% Vol. Foto Aumento**

Cuarzo en cristales anhedrales a subhedrales	60	A	5x
Plagioclasa (relictos) con alteraciones fuerte de sericítica, carbonato y arcillas	35	A	5x
Biotita (relictos) con alteración de clorita	5	A	5x

Mineralogía de Alteración (100% vol.):**100% Vol. Foto Aumento**

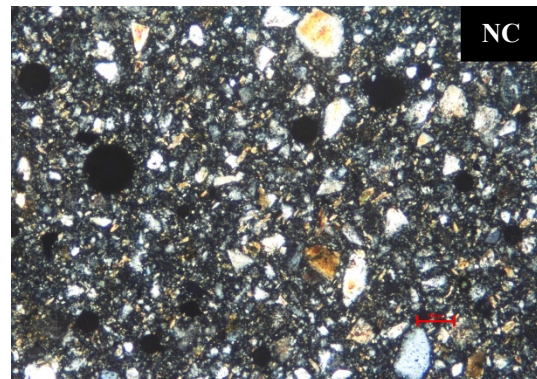
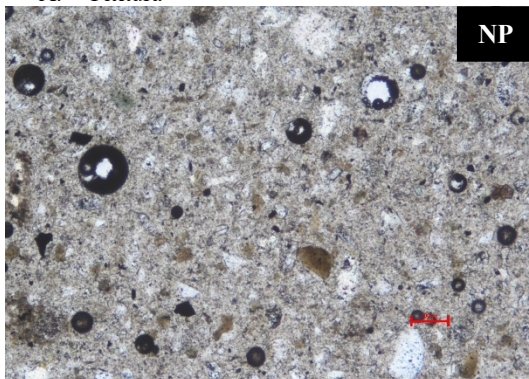
Cuarzo en pequeños cristales intersticiales	40	A	5x
Sericita, producto de la alteración de plagioclasas.	30	A	5x
Clorita como productos de plagioclasas y minerales ferromagnesianos	15	A	5x
Arcillas por alteración de plagioclasas a plagioclasa	10	A	5x
Biotita secundaria por alteración de plagioclasas	5	A	5x

Mineralización metálica (100% Vol.)

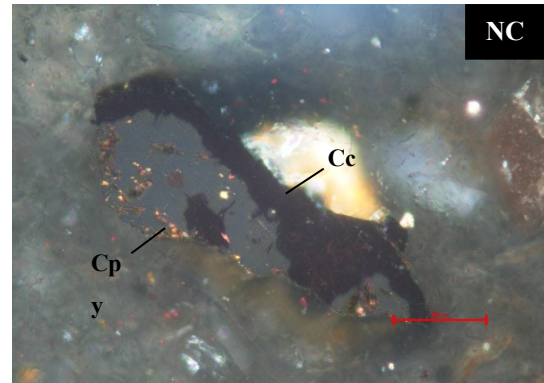
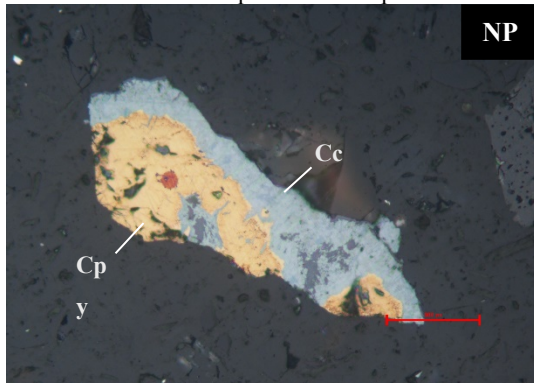
Mineral	% Diseminado	Modo de ocurrencia	Foto	Aumento
Hematita (Hm)	45 %	Diseminado en granos finos	C	40x
Calcopirita (Cpy)	30 %	Diseminado en granos finos	B	40x
Calcosina (Cc)	15 %	Reemplazo de calcopirita	B	40x
Magnetita (Mgt)	7 %	Diseminado en granos finos	C	40x
Pirita (Py)	3 %	Diseminado en granos finos.	D	40x

Fotos

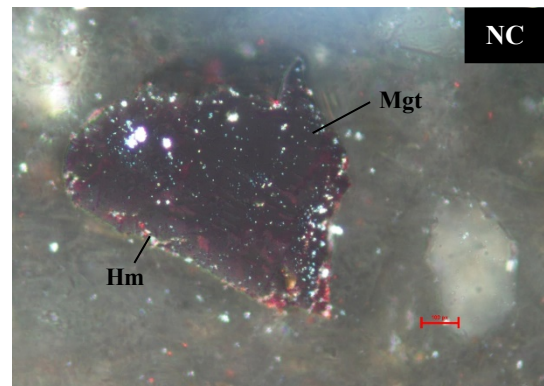
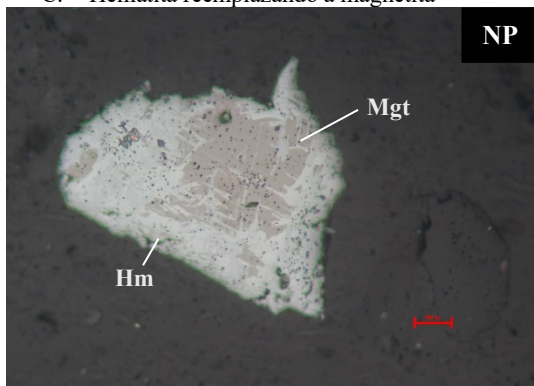
A. Textura



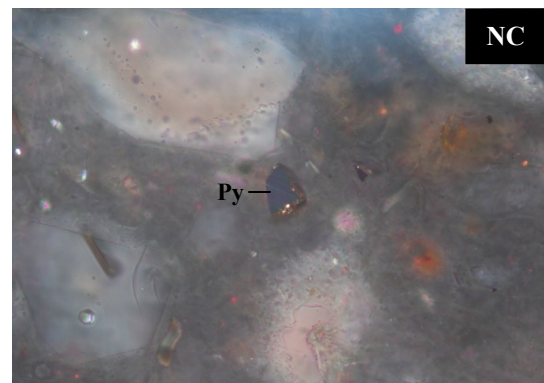
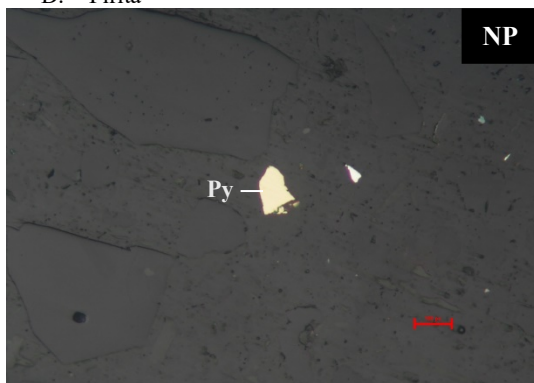
B. Calcosina reemplazando calcopirita



C. Hematita reemplazando a magnetita



D. Pirita



Muestra 3. Descripción Petrográfica – Calcográfica

Muestra No.:	M3
Clasificación petrográfica	Roca intrusiva
Clasificación de alteración	Argílica, fílica y potásica
Alteración predominante	Argílica

Textura:

Foto Aumento

La muestra presenta textura granular, y consiste principalmente de granos finos de cuarzo, plagioclasa, biotita, sericita, minerales de arcillas y clorita. Observación petrográfica indica que la muestra es afectada con alteraciones potásica, fílica y argílica. Minerales accesorios son: sericita, clorita y arcillas. Distintos silicatos (cuarzo, plagioclasa, biotita, clorita, sericita), sulfuro (pirita), óxidos (hematita y magnetita) se encuentran en toda la muestra.	A	5x
---	---	----

Mineralogía Primaria (100% vol.):

100% Vol. Foto Aumento

Cuarzo en cristales anhedrales a subhedrales	60	A	5x
Plagioclasa (relictos) con alteraciones de sericita y arcillas	35	A	5x
Biotita (relictos) con alteración de clorita	5	A	5x

Mineralogía de Alteración (100% vol.):

100% Vol. Foto Aumento

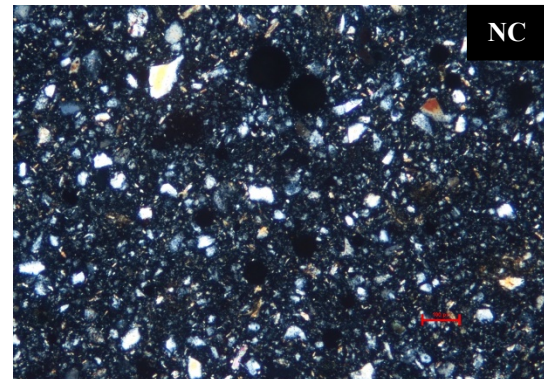
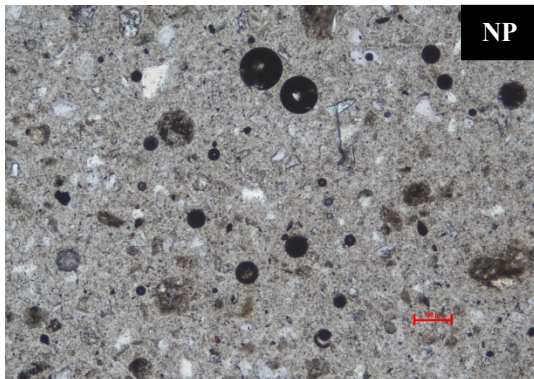
Cuarzo en pequeños cristales intersticiales	40	A	5x
Sericita subhedrales producto de la alteración de plagioclasas y feldespato de potasio.	35	A	5x
Clorita como productos de minerales ferromagnesianos	15	A	5x
Arcillas por alteración de plagioclasa	10	A	5x

Mineralización metálica (100% Vol.)

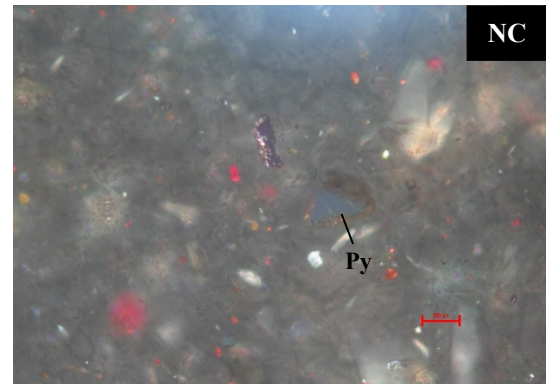
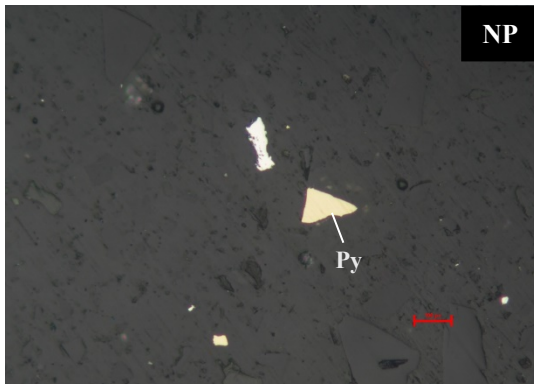
Mineral	% Diseminado	Modo de ocurrencia	Foto	Aumento
Pirita (Py)	60 %	Diseminado en granos finos.	B	5x
Hematita (Hm)	20 %	Como reemplazo de magnetita	C	5x
Magnetita (Mgt)	15 %	Diseminado en granos finos.	D	5x

Fotos

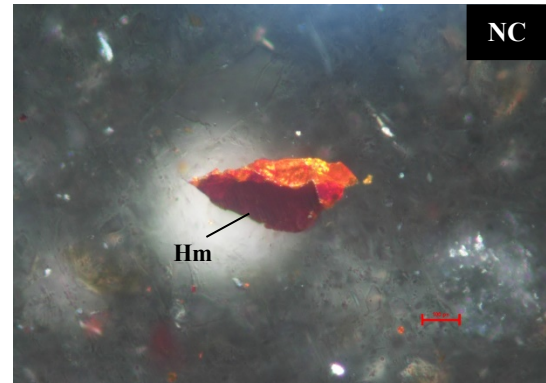
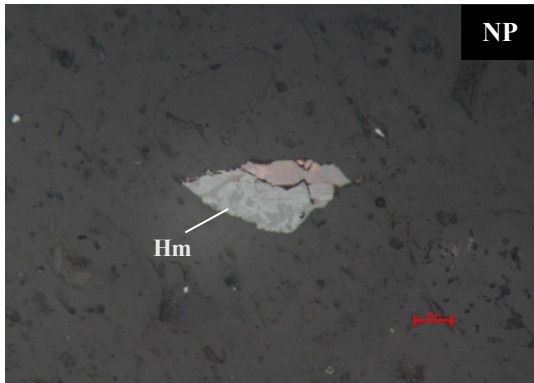
A. Textura



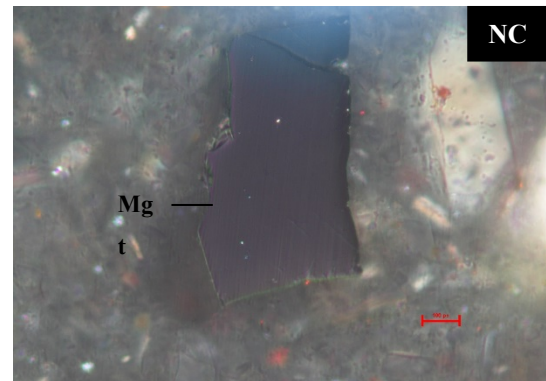
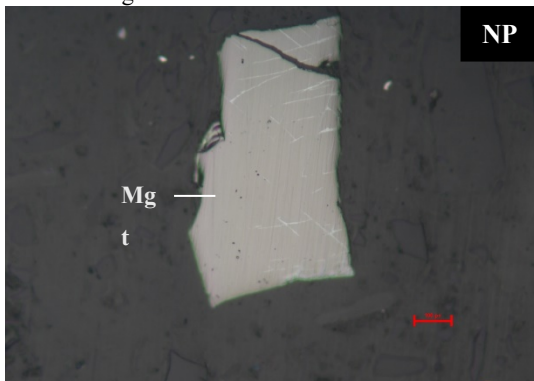
B. Pirita



C. Hematita



D. Magnetita



Muestra 4. Descripción Petrográfica – Calcográfica

Muestra No.:	M4
Clasificación petrográfica	Roca intrusiva
Clasificación de alteración	Argílica, filica y potásica
Alteración predominante	Argílica

Textura:

Foto Aumento

La muestra presenta textura granular, y consiste principalmente de granos finos de cuarzo, plagioclasa, biotita, sericita, minerales de arcillas y clorita en amplia variación modal. Observación petrográfica indica que la muestra fue afectada por alteraciones potásica, filica y argílica. Minerales accesorios son: sericita, clorita y arcillas. Distintos silicatos (cuarzo, plagioclasa, biotita, clorita, sericita), sulfuro (pirita), óxidos (hematita y magnetita) se encuentran en toda la muestra.	A	5x
--	---	----

Mineralogía Primaria (100% vol.):

100% Vol. Foto Aumento

Cuarzo en cristales anhedrales a subhedrales	45	A	5x
Plagioclasa (relictos) con alteraciones de sericítica, y arcillas	50	A	5x
Biotita (relictos) con alteración de clorita	5	A	5x

Mineralogía de Alteración (100% vol.):

100% Vol. Foto Aumento

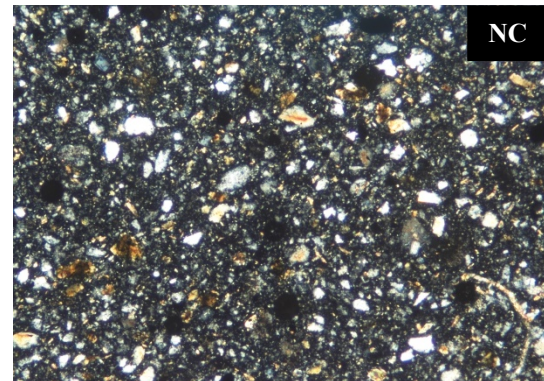
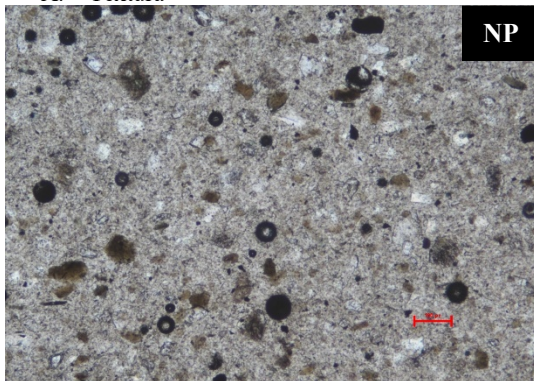
Sericita, producto de la alteración de plagioclasas	30	A	5x
Cuarzo en pequeños cristales intersticiales	25	A	5x
Clorita como productos de minerales ferromagnesianos	25	A	5x
Arcillas de tamaño de grano fino (submicroscópicas) asociadas a plagioclasa	15	A	5x
Biotita secundaria por alteración de plagioclasas.	5	A	5x

Mineralización metálica (100% Vol.)

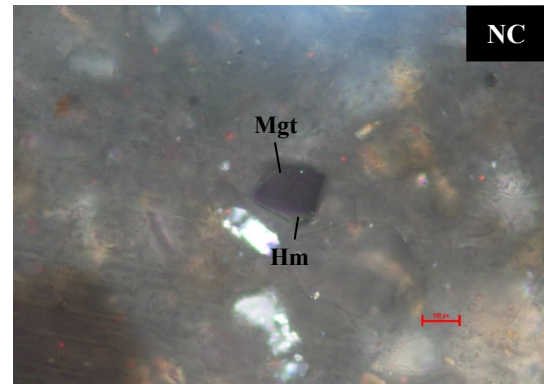
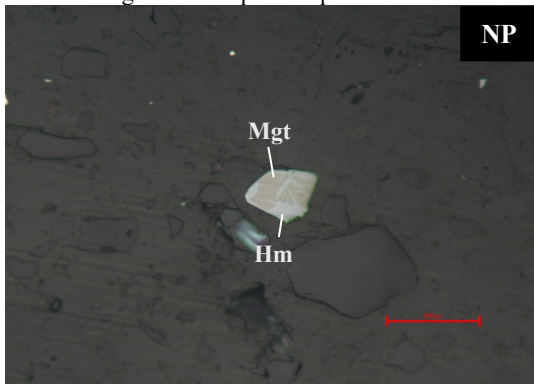
Mineral	% Diseminado	Modo de ocurrencia	Foto	Aumento
Hematita (Hm)	55 %	Diseminado en granos finos.	B – C	40x
Pirita (Py)	30 %	Diseminado en granos finos.	D	40x
Magnetita (Mgt)	15 %	Diseminado en granos finos.	B	40x

Fotos

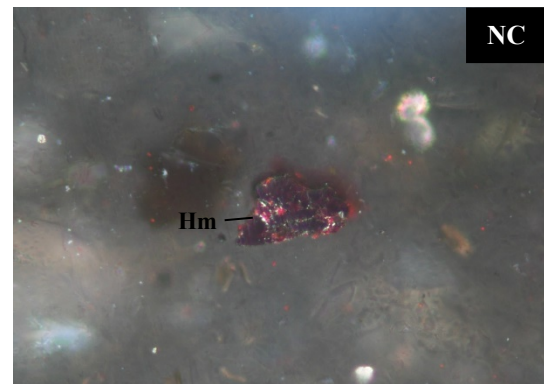
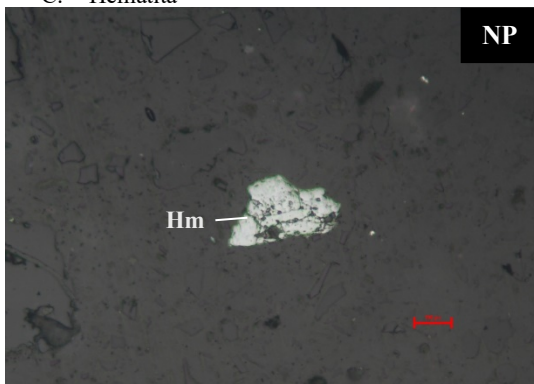
A. Textura



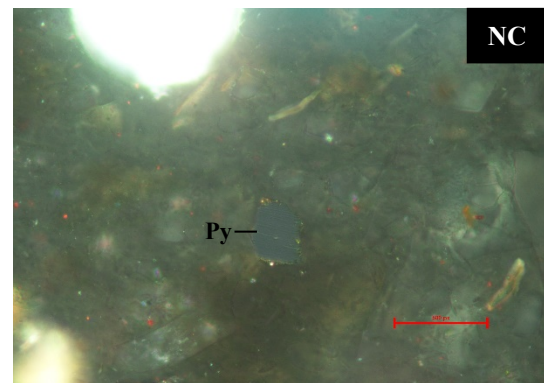
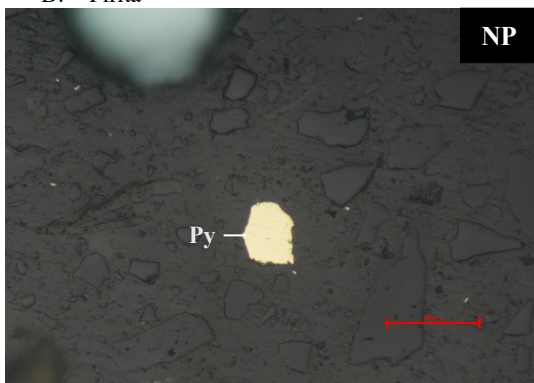
B. Magnetita reemplazada por hematita



C. Hematita



D. Pirita



Muestra 5. Descripción Petrográfica – Calcográfica

Muestra No.:	M5
Clasificación petrográfica	Roca intrusiva
Clasificación de alteración	Fílica y potásica
Alteración predominante	Potásica

Textura:

Foto Aumento

La muestra presenta textura granular, y consiste principalmente de granos finos de cuarzo, plagioclasa, biotita, sericita, arcillas y clorita en amplia variación modal. Observación petrográfica indica que la muestra fue afectada por alteraciones potásica y fílica. Minerales accesorios son: sericita, clorita y arcillas. Distintos silicatos (cuarzo, plagioclasa, biotita, clorita), sulfuros (calcopirita y calcosina), óxidos (hematita) se encuentran en toda la muestra.	A	10x
---	---	-----

Mineralogía Primaria (100% vol.):

100% Vol. Foto Aumento

Cuarzo en cristales anhedrales a subhedrales	55	A	10x
Plagioclasa (relictos) con alteraciones de sericítica, y arcillas	35	A	10x
Biotita (relictos) con reemplazos de clorita	10	A	10x

Mineralogía de Alteración (100% vol.):

100% Vol. Foto Aumento

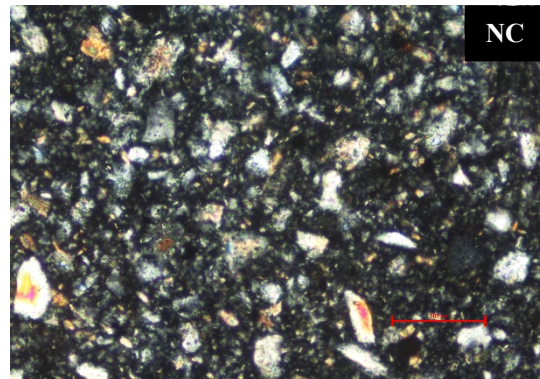
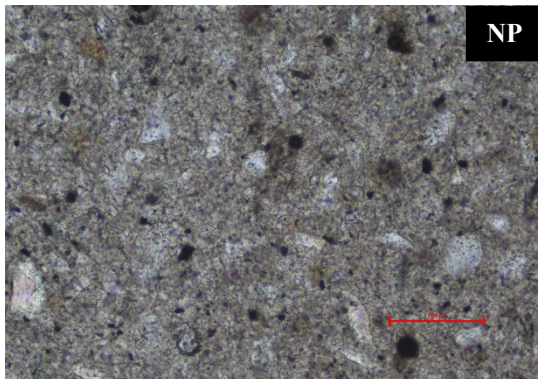
Cuarzo en pequeños cristales intersticiales	35	A	10x
Clorita como productos de plagioclasas y minerales ferromagnesianos	35	A	10x
Sericita por la alteración de plagioclasas y feldespato de potásico.	20	A	10x
Arcillas por alteración a plagioclasa	5	A	10x
Biotita secundaria por alteración de plagioclasa	5	A	10x

Mineralización metálica (100% Vol.)

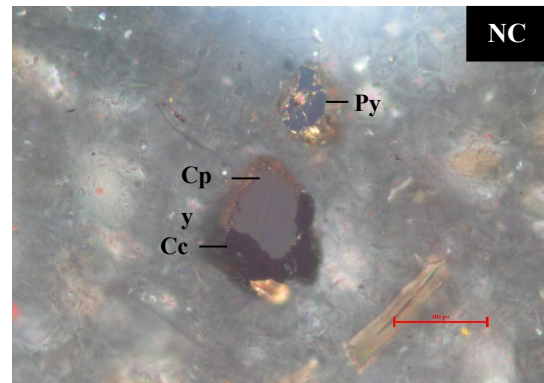
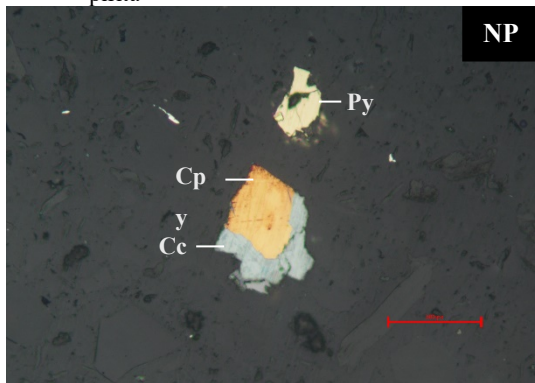
Mineral	% Diseminado	Modo de ocurrencia	Foto	Aumento
Calcosina (Cc)	55 %	Reemplazo de calcopirita	B – C – D	40x
Calcopirita (Cpy)	30 %	Diseminado en granos finos.	B – D	40x
Hematita (Hm)	10 %	Diseminado en granos finos y reemplazo de pirita	D	40x
Pirita (Py)	5 %	Diseminado en granos finos	B	40x

Fotos

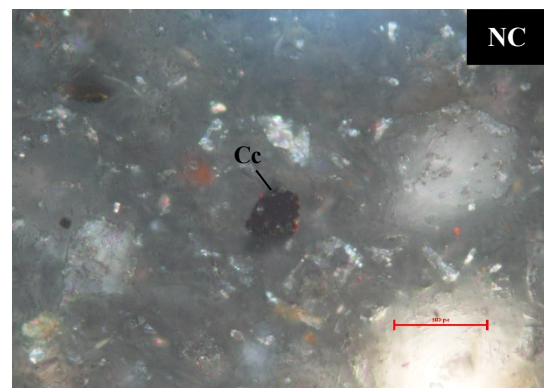
A. Textura



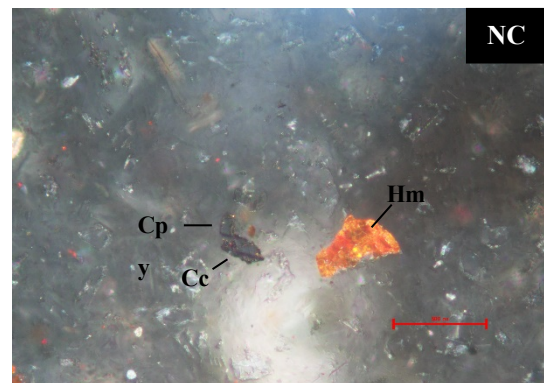
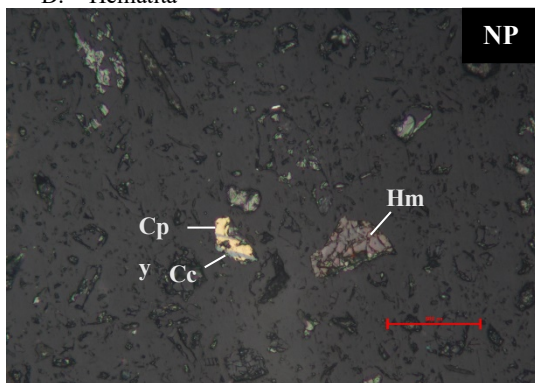
B. Calcosina reemplazando calcopirita. Grano de pirita



C. Calcosina



D. Hematita



Muestra 6. Descripción Petrográfica – Calcográfica

Muestra No.:	M6
Clasificación petrográfica	Roca intrusiva
Clasificación de alteración	Argílica y filica
Alteración predominante	Argílica

Textura:

Foto Aumento

La muestra presenta textura granular, y consiste principalmente de granos finos de cuarzo, plagioclasa, sericita, minerales de arcillas y abundante clorita. Observación petrográfica indica que la muestra fue afectada por las alteraciones filica y argílica. Minerales accesorios son: sericita, clorita y arcillas. Distintos silicatos (cuarzo, plagioclasa, clorita, sericita), sulfuros (pirita y calcosina), óxidos (hematita y magnetita) se encuentran en toda la muestra.	A	5x
---	---	----

Mineralogía Primaria (100% vol.):

100% Vol. Foto Aumento

Cuarzo en cristales anhedrales a subhedrales	55	A	5x
Plagioclasa (relictos) con alteraciones fuerte de sericítica, carbonato y arcillas	45	A	5x

Mineralogía de Alteración (100% vol.):

100% Vol. Foto Aumento

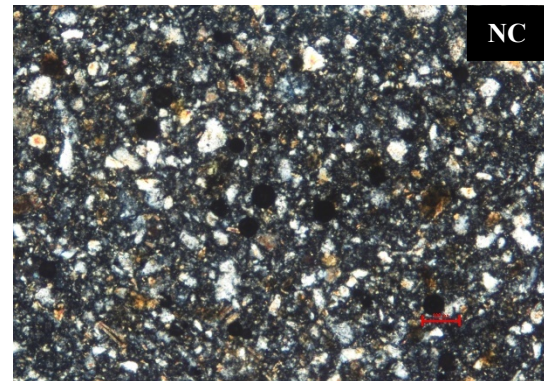
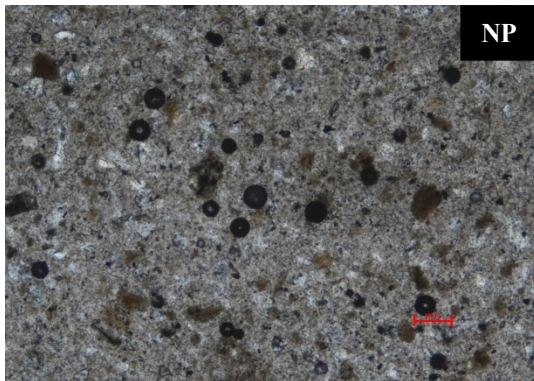
Cuarzo en pequeños cristales intersticiales	45	A	5x
Sericita anhedrales a subhedrales, por alteración de plagioclasas.	25	A	5x
Clorita como productos de alteración de minerales ferromagnesianos	20	A	5x
Arcillas por alteración de plagioclasa	10	A	5x

Mineralización metálica (100% Vol.)

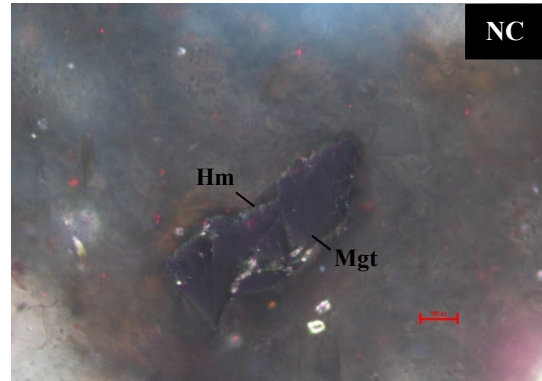
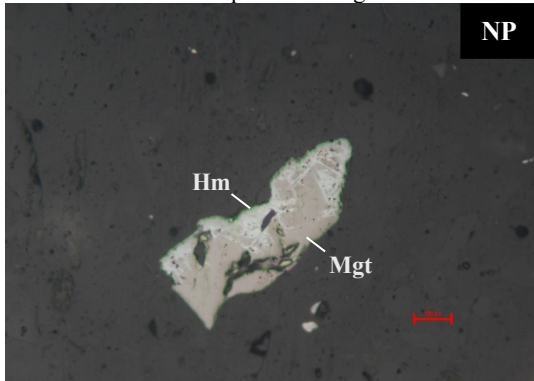
Mineral	% Diseminado	Modo de ocurrencia	Foto	Aumento
Hematita (Hm)	40 %	Reemplazo de magnetita.	B	40x
Magnetita (Mgt)	30 %	Diseminado en granos finos.	B	40x
Pirita (Py)	15 %	Diseminado en granos finos.	C	40x
Calcosina (Cc)	10 %	Reemplazo de calcopirita	D	40x
Calcopirita (Cpy)	5 %	Diseminado en granos finos.	E	40x

Fotos

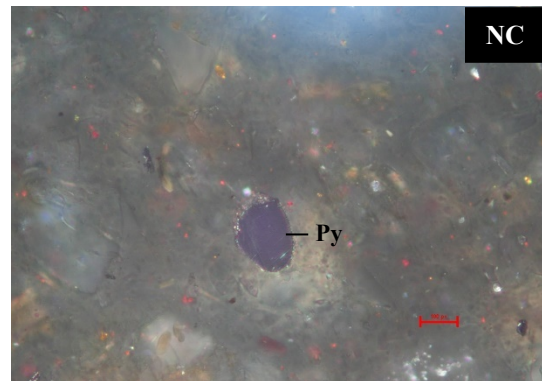
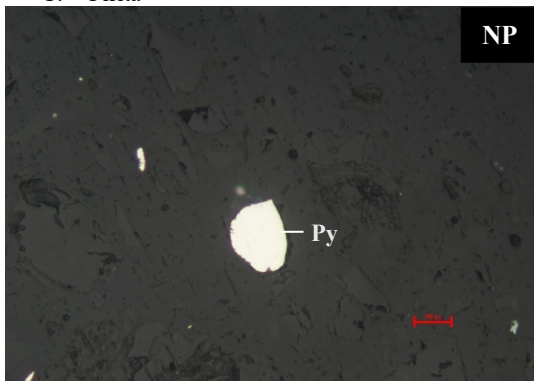
A. Textura



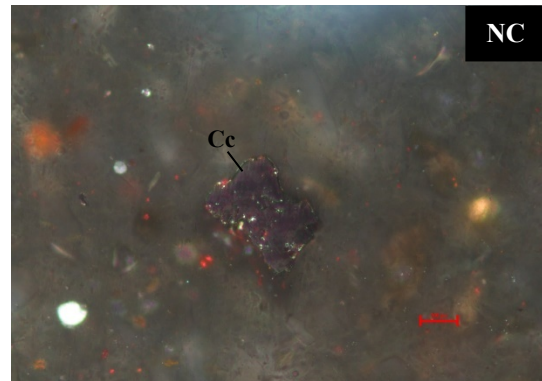
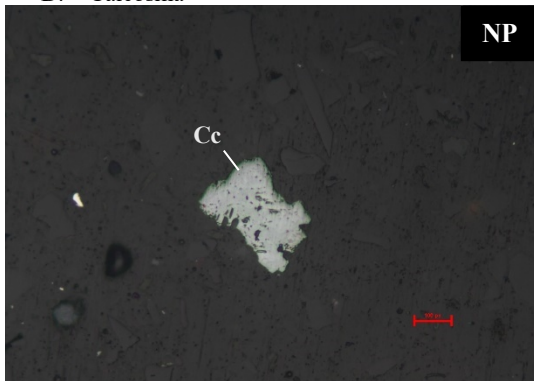
B. Hematita reemplazando magnetita



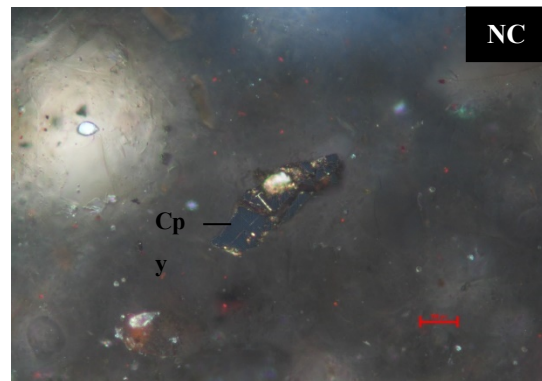
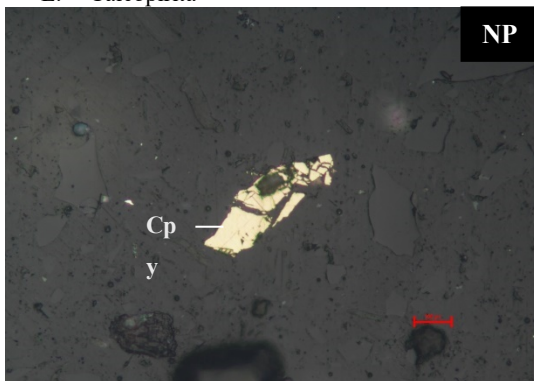
C. Pirita



D. Calcosina



E. Calcopirita



Muestra 7. Descripción Petrográfica – Calcográfica

Muestra No.:	M7
Clasificación petrográfica	Roca intrusiva
Clasificación de alteración	Argílica, filica y potásica
Alteración predominante	Potásica

Textura:**Foto Aumento**

La muestra presenta textura granular, y consiste principalmente de granos finos de cuarzo, plagioclasa, biotita, minerales de arcillas (caolinita) y clorita en amplia variación modal. Observación petrográfica indica que la muestra afectada con alteraciones hidrotermales potásica, filica y argílica. Minerales accesorios son: sericita, clorita, y arcillas. Distintos silicatos (cuarzo, plagioclasa, biotita, clorita, sericita), sulfuros (pirita y calcosina), óxidos (hematita y magnetita) se encuentran en toda la muestra. Abundante presencia de biotita en la muestra, sericita altera parcialmente a plagioclasa.	A	5x
--	---	----

Mineralogía Primaria (100% vol.):**100% Vol. Foto Aumento**

Plagioclasa (relictos) con alteraciones de sericita y arcillas	50	A	5x
Cuarzo en cristales anhedrales a subhedrales	35	A	5x
Biotita (relictos) con alteraciones de clorita	15	A	5x

Mineralogía de Alteración (100% vol.):**100% Vol. Foto Aumento**

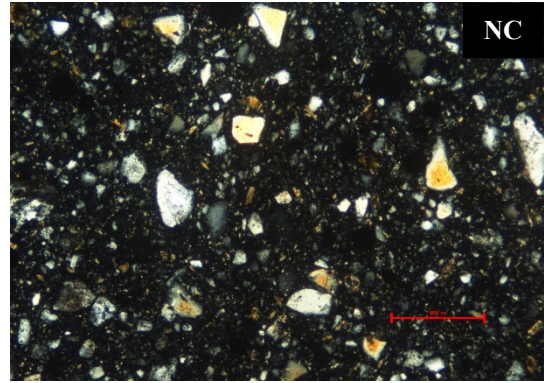
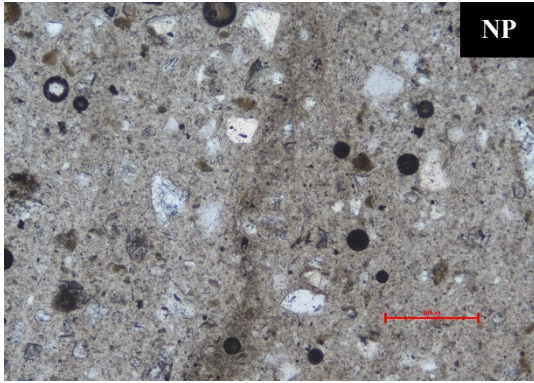
Cuarzo en pequeños cristales intersticiales	35	A	5x
Sericita como cristales finos anhedrales a subhedrales, producto de la alteración de plagioclasas.	30	A	5x
Biotita secundaria por alteración de plagioclasas	15	A	5x
Clorita por alteración de biotitas	15	A	5x
Arcillas reemplazando as plagioclasa	5	A	5x

Mineralización metálica (100% Vol.)

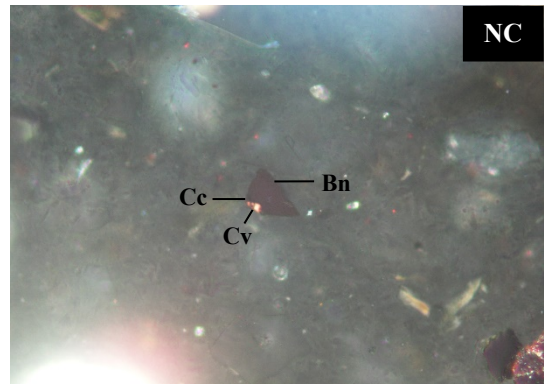
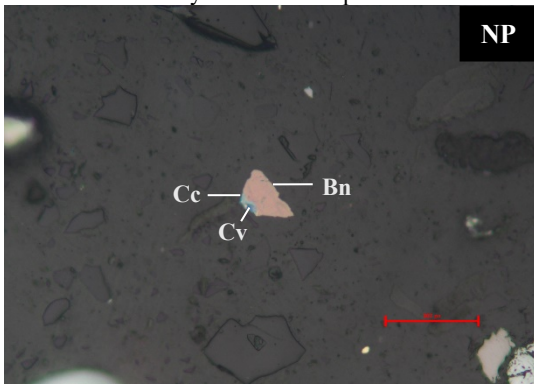
Mineral	% Diseminado	Modo de ocurrencia	Foto	Aumento
Calcopirita (Cpy)	25%	Diseminado en granos finos.	B	40x
Bornita (Bn)	25 %	Diseminado en granos finos	B	40x
Hematita (Hm)	20 %	Como relleno de poros y reemplazo de magnetita	D	40x
Magnetita (Mgt)	20 %	Como relleno de espacios	D	40x
Calcosina (Cc)	10 %	Reemplazo de calcopirita y bornita	B – C	40x
Covelina (Cv)	10 %	Reemplazo de calcopirita y bornita	B – C	40x

Fotos

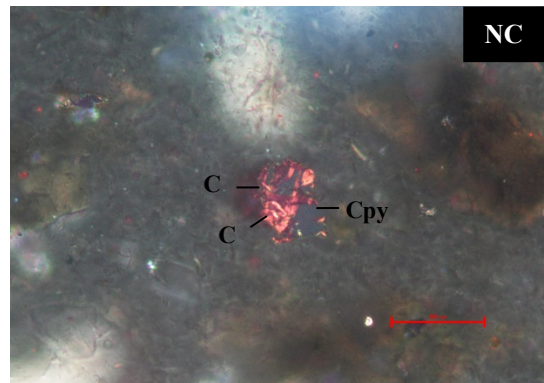
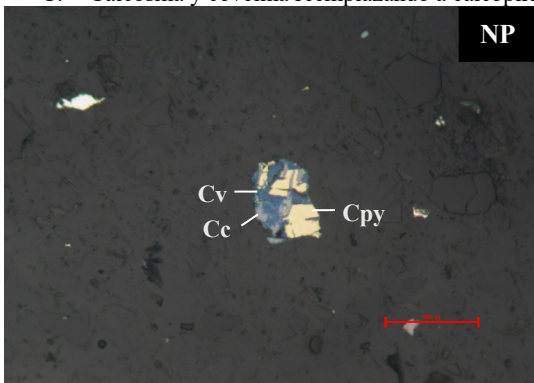
A. Textura



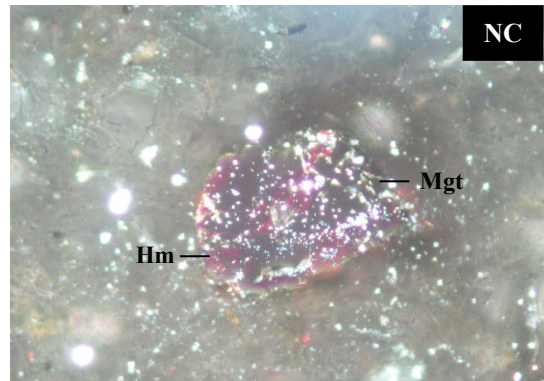
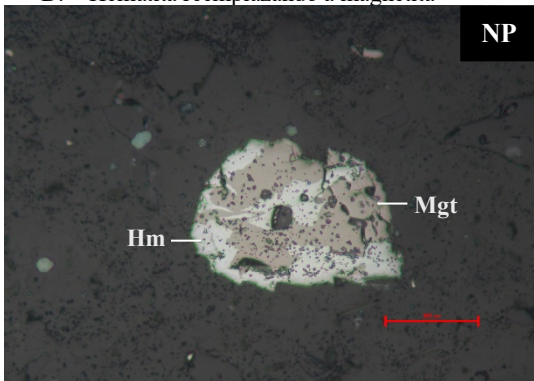
B. Calcosina y covelina reemplazando a bornita



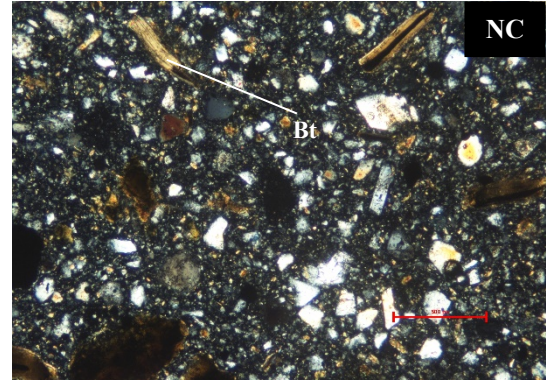
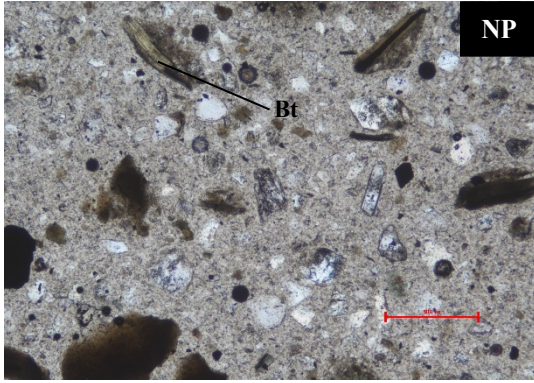
C. Calcosina y covelina reemplazando a calcopirita



D. Hematita reemplazando a magnetita



E. Biotita cloritizada



Muestra 8. Descripción Petrográfica – Calcográfica

Muestra No.:	M8
Clasificación petrográfica	Roca intrusiva
Clasificación de alteración	Argílica y filica
Alteración predominante	Argílica

Textura:**Foto Aumento**

La muestra presenta textura granular, y consiste principalmente de granos finos de cuarzo, plagioclasa, moscovita (sericita), minerales de arcillas (caolinita) y clorita. Observación petrográfica indica que la muestra afectada con alteraciones muy fuertes como filica y argílica. Minerales accesorios son: sericita, clorita y calcita, y escasos arcillas. Distintos silicatos (cuarzo, plagioclasa, clorita, sericita), sulfuros (pirita y calcosina), óxidos (hematita) se encuentran en toda la muestra. Cuarzo con sericita y calcita secundaria alteran parcialmente a plagioclasa y algunas minerales primarias y forman agregados finos entre cristales de mayor tamaño.	A	5x
---	---	----

Mineralogía Primaria (100% vol.):**100% Vol. Foto Aumento**

Cuarzo en cristales anhedrales a subhedrales	45	A	5x
Plagioclasa (relictos) con alteraciones fuerte de sericítica, carbonato y arcillas	55	A	5x

Mineralogía de Alteración (100% vol.):**100% Vol. Foto Aumento**

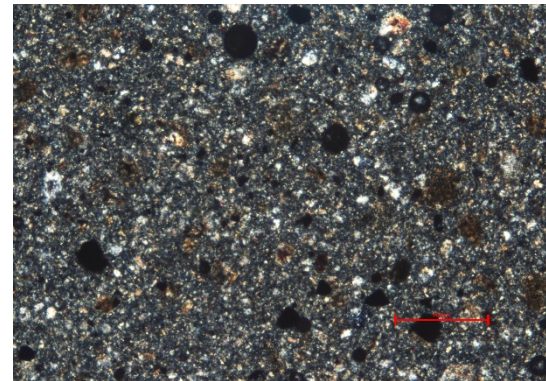
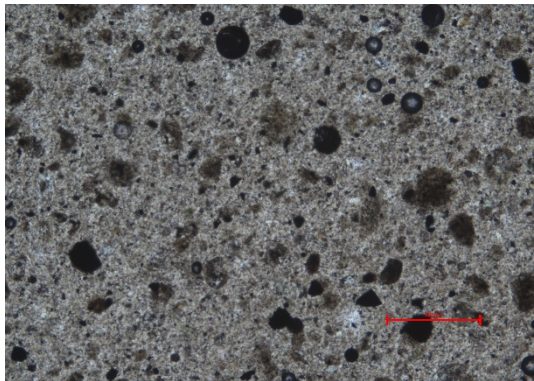
Cuarzo en pequeños cristales intersticiales	40	A	5x
Sericita en cristales finos anhedrales a subhedrales, producto de la alteración de plagioclasas.	30	A	5x
Clorita como productos de plagioclasas y minerales ferromagnesianos	20	A	5x
Arcillas de tamaño de grano fino (submicroscópicas) asociadas a plagioclasa	10	A	5x

Mineralización metálica (100% Vol.)

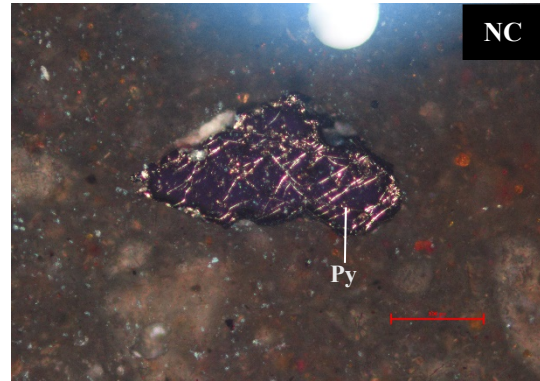
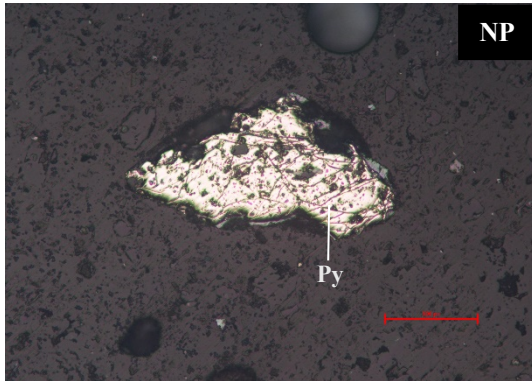
Mineral	% Diseminado	Modo de ocurrencia	Foto	Aumento
Pirita (Py)	40%	Diseminado en granos finos.	B	40x
Hematita (Hm)	30%	Como relleno de poros y como reemplazo de pirita	C	40x
Calcosina (Cc)	30%	Reemplazo de calcopirita	D	40x

Fotos

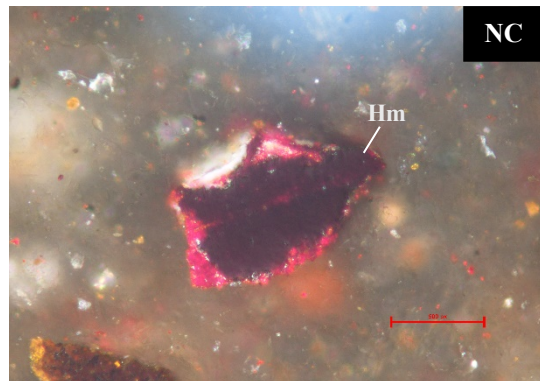
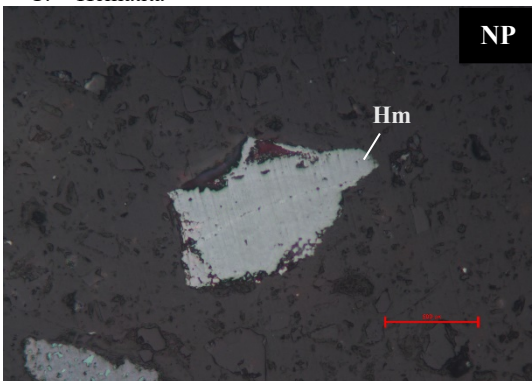
A. Textura



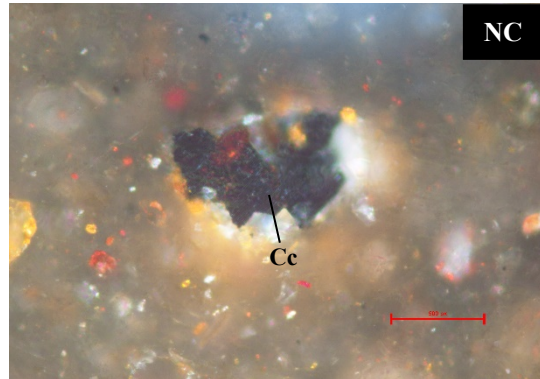
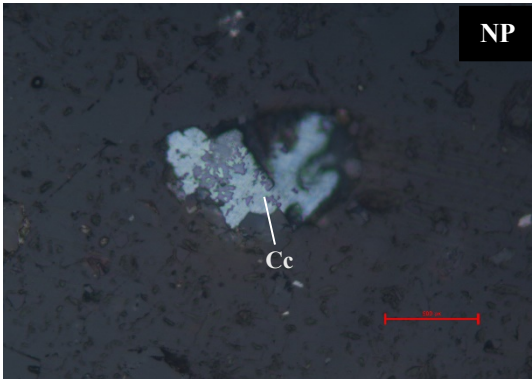
B. Pirita



C. Hematita



D. Calcosina



Muestra 9. Descripción Petrográfica – Calcográfica

Muestra No.:	M9
Clasificación petrográfica	Roca intrusiva
Clasificación de alteración	Argílica y filica
Alteración predominante	Filica

Textura:**Foto Aumento**

La muestra presenta textura granular, y consiste principalmente de granos finos de cuarzo, plagioclasa, sericita, clorita y minerales de arcillas (caolinita). Observación petrográfica indica que la muestra fue afectada por alteraciones filica y argílica. Minerales accesorios son: sericita, clorita y minerales de arcillas. Distintos silicatos (cuarzo, plagioclasa, sericita), sulfuros (pirita y calcosina), se encuentran en toda la muestra.	A	5x
---	---	----

Mineralogía Primaria (100% vol.):**100% Vol. Foto Aumento**

Cuarzo en cristales anhedrales a subhedrales	60	A	5x
Plagioclasa (relictos) alterado a sericita y arcillas	40	A	5x

Mineralogía de Alteración (100% vol.):**100% Vol. Foto Aumento**

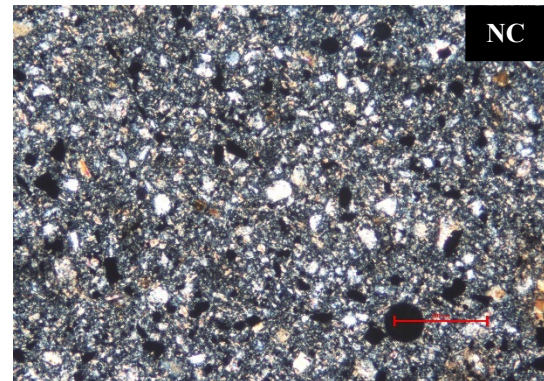
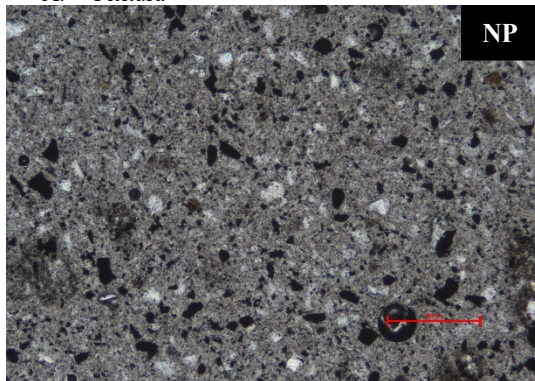
Cuarzo en pequeños cristales intersticiales	40	A	5x
Sericita con formas anhedrales a subhedrales, por alteración de plagioclasas.	30	A	5x
Clorita por alteración de plagioclasas y minerales ferromagnesianos	20	A	5x
Arcillas en reemplazo de plagioclasa	10	A	5x

Mineralización metálica (100% Vol.)

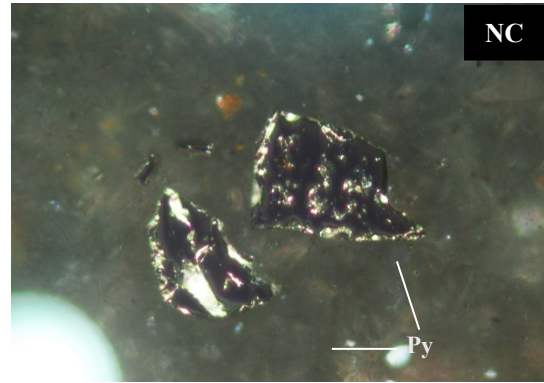
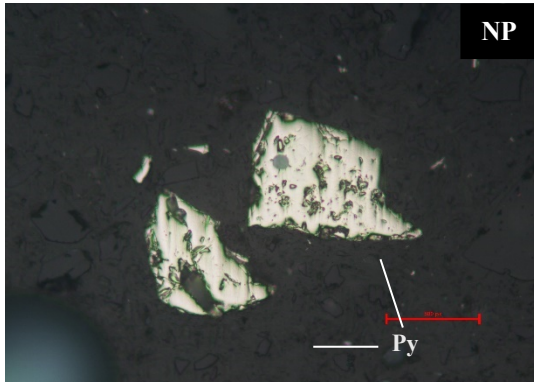
Mineral	% Diseminado	Modo de ocurrencia	Foto	Aumento
Pirita (Py)	60%	Diseminado en granos finos.	B	40x
Calcosina (Cc)	20%	Reemplazo de calcopirita	C	40x
Covelina (Cv)	20%	Reemplazo de calcopirita	C	40x

Fotos

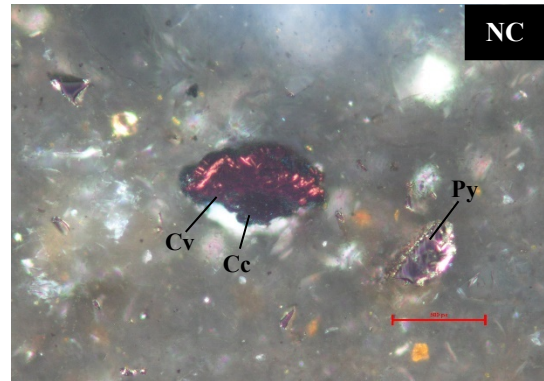
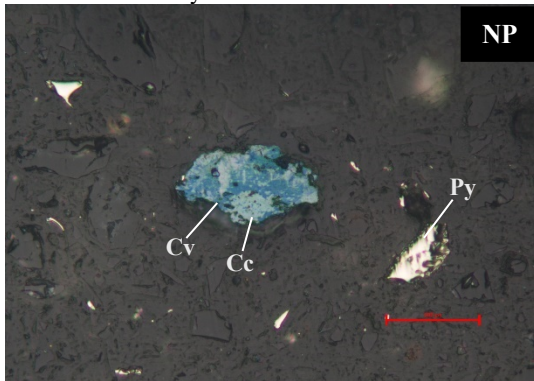
A. Textura



B. Pirita



C. Calcosina y covelina



Muestra 10. Descripción Petrográfica – Calcográfica

Muestra No.:	M10
Clasificación petrográfica	Roca intrusiva
Clasificación de alteración	Argílica, fílica y potásica
Alteración predominante	Argílica

Textura:**Foto Aumento**

La muestra presenta textura granular, y consiste principalmente de granos finos de cuarzo, plagioclasa, biotitas, minerales de arcillas (caolinita) y clorita. Observación petrográfica indica que la muestra afectada con alteraciones fílica y argílica. Minerales accesorios son: sericita, clorita, y arcillas. Distintos silicatos (cuarzo, plagioclasa, biotita, clorita, sericita), sulfuros (calcopirita, bornita y calcosina y covelina), se encuentran en toda la muestra. En los minerales metálicos es posible observar el proceso de enriquecimiento secundario con zonación de minerales de cobre.	A	5x
--	---	----

Mineralogía Primaria (100% vol.):**100% Vol. Foto Aumento**

Cuarzo en cristales anhedrales a subhedrales	40	A	5x
Plagioclasa (relictos) con alteraciones fuerte de sericítica, carbonato y arcillas	55	A	5x
Biotita con alteración de clorita	15	A	5x

Mineralogía de Alteración (100% vol.):**100% Vol. Foto Aumento**

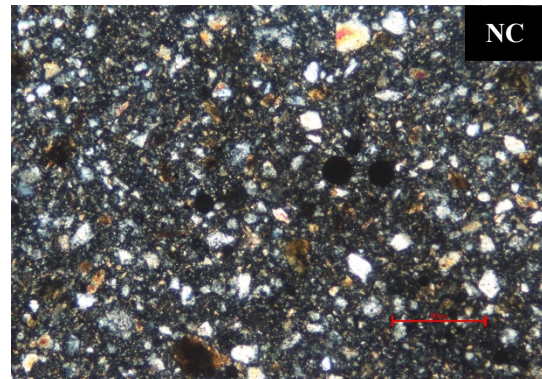
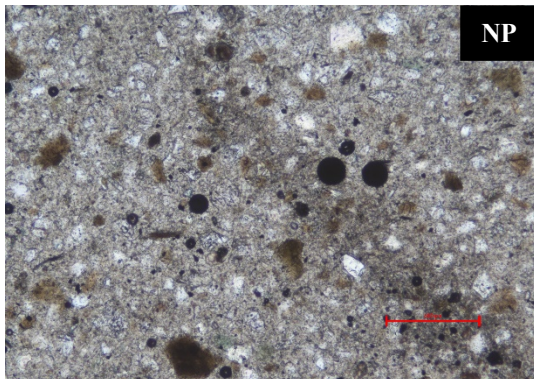
Cuarzo como cristales intersticiales	35	A	5x
Sericita como cristales anhedrales a por alteración de plagioclasas	30	A	5x
Biotita secundaria por alteración de plagioclasas	15	A	5x
Clorita como productos de plagioclasas y biotita	10	A	5x
Arcillas por alteración de plagioclasas	10	A	5x

Mineralización metálica (100% Vol.)

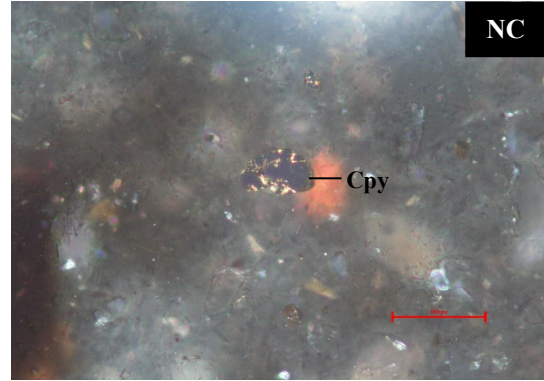
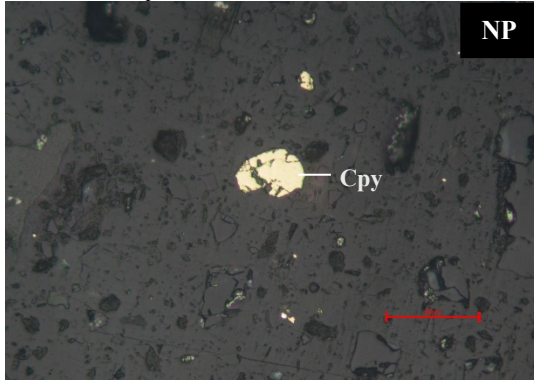
Mineral	% Diseminado	Modo de ocurrencia	Foto	Aumento
Calcopirita (Cpy)	50 %	Diseminado en granos finos.	B – D	40x
Calcosina (Cc)	30 %	Reemplazo de calcopirita y bornita	C – D	40x
Covelina (Cv)	10 %	Reemplazo de calcopirita y bornita	C – D	40x
Bornita (Bn)	10 %	Diseminado de grano fino	D	40x

Fotos

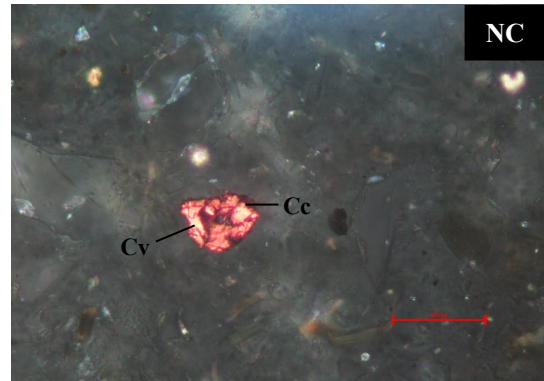
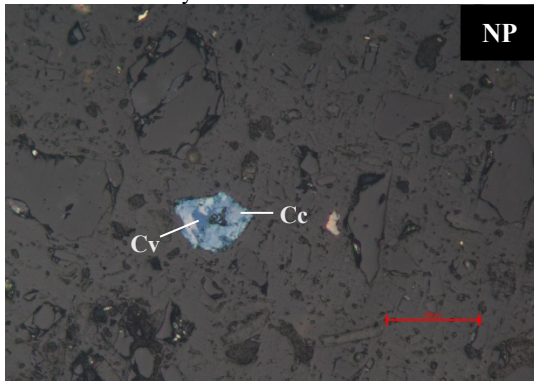
A. Textura



B. Calcopirita



C. Covelina y calcosina



D. Calcosina y covelina reemplazando a calcopirita y bornita

