



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

**ORIGEN Y NATURALEZA DE LA MINERALIZACIÓN SUPÉRGENA DE
COBRE EN EL DEPÓSITO BARREAL SECO, II REGIÓN DE ANTOFAGASTA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA
CATALINA CONSTANZA MILOJEVIC ARATA**

PROFESOR GUÍA:
MARTIN REICH MORALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FERNANDO BARRA PANTOJA
LINDA DANIELE

Este trabajo ha sido financiado por el Núcleo Milenio “Trazadores de Metales en Zonas de Subducción” NC130065

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: Geóloga

POR: Catalina Constanza Milojevic Arata

FECHA: Marzo de 2017

PROFESOR GUÍA: Martin Reich Morales

ORIGEN Y NATURALEZA DE LA MINERALIZACIÓN SUPÉRGENA DE COBRE EN EL DEPÓSITO BARREAL SECO, II REGIÓN DE ANTOFAGASTA

El depósito IOCG de Barreal Seco se ubica en la zona sur del Desierto de Atacama en el distrito minero de Altamira. Este yacimiento se encuentra en operación por la Compañía Minera Las Cenizas, la cual explota oxidados de cobre dispuestos en los primeros 90 metros de profundidad del yacimiento. Los minerales de cobre presentes en esta zona oxidada, corresponden principalmente a atacamita, paratacamita y clinoatacamita, siendo estas últimas dos, un polimorfo de la atacamita ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$).

El objetivo principal de este estudio es caracterizar los eventos que dan origen a las asociaciones paragenéticas observadas en la zona oxidada del depósito de Barreal Seco, identificando la naturaleza y condiciones físico-químicas de los fluidos supérgenos asociados a cada etapa, con la finalidad de establecer un modelo de la evolución supérgena del yacimiento.

A través del estudio petrográfico de un sondaje subvertical de 100 metros dispuesto en la zona de oxidados de cobre del depósito de Barreal Seco se propone la ocurrencia de dos eventos de enriquecimiento supérgeno: el primer evento, desarrollado entre los ~33 a los ~9 Ma bajo un régimen semiárido, está asociado a fluidos meteóricos lixiviantes de pH ácido a neutro que poseen un flujo descendente; el segundo evento, registrado en un periodo más reciente bajo un clima hiperárido, está asociado a fluidos mineralizadores de pH neutro con altas concentraciones de cloruro (con respecto a aguas meteóricas), que poseen un flujo ascendente con participación de aguas profundas relacionadas al basamento marino del Jurásico Superior.

Adicionalmente, se analizan las firmas de isótopos estables de cloro ($\delta^{37}\text{Cl}$) obtenidos en atacamita (y polimorfos de ésta) de un tramo superficial (<50 m) y de un tramo profundo (>50 m) del sondaje estudiado. El primer tramo presenta una tendencia de disminución progresiva en los valores de $\delta^{37}\text{Cl}$ hacia valores más negativos en función de la profundidad, tendencia interpretada como el resultado del fraccionamiento isotópico por difusión iónica, que sería responsable del enriquecimiento de ^{35}Cl a mayores profundidades. El segundo tramo, asociado espacialmente a fluidos más profundos, posee valores de $\delta^{37}\text{Cl}$ similares a la firma de sedimentos marinos del Jurásico Superior que afloran en la Región de Antofagasta, permitiendo caracterizar una naturaleza de origen sedimentario marino para los fluidos del segundo evento de enriquecimiento supérgeno, causantes de la abundante ocurrencia de atacamita (y polimorfos de ésta).

Este estudio aporta nuevos antecedentes consistentes con un modelo de evolución supérgena caracterizado por una etapa meteórica prolongada desarrollada en un clima semiárido, seguida por una etapa tardía caracterizada por el ascenso de fluidos profundos y salinos bajo un régimen climático hiperárido. Este modelo concuerda con otros estudios sobre la ocurrencia de atacamita en depósitos ubicados en el núcleo central del Desierto de Atacama.

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a mi profesor guía Dr. Martin Reich por su paciencia y dedicación en sus observaciones y correcciones en el transcurso de estos meses, también a los profesores de mi comisión Dra. Linda Daniele y Dr. Fernando Barra por su disposición y ayuda en la realización de este trabajo.

Se agradece particularmente el apoyo brindado por el Núcleo Milenio “Trazadores de Metales en Zonas de Subducción” NC130065, quien hizo posible el desarrollo de esta memoria. Además, se agradece al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) por permitir el uso de los laboratorios y equipamiento analítico, fundamental para una investigación de esta naturaleza.

Se agradece a la Profesora Jaime Barnes por hacer posible el análisis de isótopos estables de cloro en la Universidad de Texas-Austin, a Andrés Ibañez por realizar los análisis de difracción de rayos X en el Departamento de Física de la FCFM, y a la Compañía Minera Las Cenizas por proveer el sondaje utilizado en esta investigación.

Agradezco a mi familia: a mi madre Rossina por su apoyo constante e incondicional y por creer tanto en mí; a mi padre Octavio por ser una guía en mi vida y hacerme ver las cosas de forma más sencilla; a mi Nona y a mi Yeya que son mis viejas queridas y anhelo sigan acompañándome en las próximas etapas; a mis lindos hermanos Javi, Panchi, Basti y July que están armando sus propios caminos; a mis primos y tíos, al Balto y a mis perros por ser parte de esta gran familia (y bueno, al gato también).

Quiero agradecer a mis amigos: a Colette por su fiel compañía, a la Lili y Lica por todo el apoyo y por los buenos momentos; a la Pacha, Coté, Tortuga, Pelao, Guru y Uli por ser mis amigos desde el primer año de la universidad; a la Vale Tort, Marce, Rubi, Jaime, Chili y a todos “los Gabros” de geología, voy a extrañar tantos buenos terrenos, finalmente a mis amigos del Grupo Milenio por hacer tan ameno estos meses en la oficina (y fuera de ésta).

Por último agradecer a todos los funcionarios del Departamento de Geología de la FCFM, en especial a Blanquita por su ayuda en estos años de la carrera.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Formulación del estudio propuesto	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Hipótesis de trabajo.....	2
1.4. Metodología	3
1.4.1. Muestras del sondaje del depósito de Barreal Seco	3
1.4.2. Microscopía óptica	4
1.4.3. Microscopía electrónica de barrido.....	4
1.4.4. Difracción de rayos X	5
1.4.5. Isótopos estables de cloro.....	5
1.5. Trabajos anteriores	6
1.5.1. Generalidades de los procesos de enriquecimiento supérgeno	6
1.5.2. Mineralización supérgena de cobre en Atacama: estudios anteriores.....	8
1.6. Ubicación y vías de acceso.....	10
2. MARCO GEOLÓGICO	11
2.1. Introducción	11
2.2. Rocas estratificadas	14
2.2.1. Formación Las Tórtolas	14
2.2.2. Formación Pan de Azúcar	15
2.2.3. Formación La Negra	16
2.2.4. Formación Santa Ana.....	18

2.2.5.	Formación Aeropuerto	19
2.2.6.	Formación Chile-Alemania.....	21
2.2.7.	Gravas de Atacama	22
2.3.	Rocas intrusivas.....	24
2.3.1.	Grupo Plutónico Cifuncho	24
2.3.2.	Grupo Plutónico Cerro Del Pingo.....	25
2.4.	Rocas no consolidadas	26
2.4.1.	Depósitos Aluviales y Coluviales Modernos	26
2.5.	Geología estructural	27
2.5.1.	Pliegues	27
2.5.2.	Fallas	28
3.	Antecedentes generales de depósitos IOCG en el norte de Chile.....	29
3.1.	Depósitos IOCG con mineralización de hematita-calcopirita.....	32
4.	Geología del yacimiento de Barreal Seco.....	33
4.1.	Introducción	33
4.2.	Litología	33
4.3.	Elementos estructurales.....	37
4.4.	Mineralogía	37
4.4.1.	Mineralogía primaria.....	38
4.4.2.	Mineralogía secundaria	38
4.5.	Alteración hidrotermal	39
4.6.	Consideraciones genéticas.....	40
5.	RESULTADOS	41
5.1.	Descripción mineralógica.....	41
5.1.1.	Introducción	41
5.1.2.	Eventos de mineralización	41

5.1.3.	Tabla resumen de la descripción mineralógica	59
5.1.4.	Secuencia paragenética	60
5.2.	Isótopos estables de cloro.....	61
5.2.1.	Introducción	61
5.2.1.	Resultados	62
6.	Discusiones.....	64
6.1.	Caracterización de fluidos supérgenos.....	64
6.2.	Isótopos estables de cloro.....	67
6.3.	Modelo Geológico propuesto.....	71
6.3.1.	Evento I de alteración supérgena	71
6.3.2.	Evento II de alteración supérgena.....	73
7.	Conclusiones y recomendaciones.....	75
8.	Bibliografía.....	77
ANEXOS	81
ANEXO A.	DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA.....	81
ANEXO B.	RESULTADOS XDR.....	141

Índice de tablas

Tabla 1. Numeración y ubicación de las muestras obtenidas del sondaje estudiado. X: señala muestras utilizadas en análisis petrográfico, microscopía SEM, difracción de rayos X (XRD) y/o isótopos estables de cloro ($\delta^{37}\text{Cl}$) en separados minerales de atacamita y polimorfos de ésta..... 3

Tabla 2. Resumen de minerales encontrados en muestras del sondaje a distintas profundidades. X: Análisis por XRD. O: Análisis microscopio óptico y/o SEM. OX: Ambos análisis..... 59

Tabla 3. Tabla paragenética del depósito IOCG de Barreal Seco. La mineralogía corresponde a la reportada en este estudio en adición a la descrita por Correa (2000). 60

Tabla 4. Resultados $\delta^{37}\text{Cl}$ de las muestras analizadas del sondaje subvertical de Barreal Seco. . 62

Índice de ilustraciones

- Figura 1. Representación esquemática de la oxidación y enriquecimiento supérgeno de cobre. (Izquierda) separación de zonas enriquecidas del pozo de la mina de cobre el Chino (Santa Rita), Nuevo México. (Derecha) Diagrama de oxidación de cobre y principales reacciones de enriquecimiento para cada zona de la foto adyacente. (Izquierda abajo) Diagrama con aumento de ley de cobre que resulta de los múltiples ciclos de enriquecimiento supérgeno. Figura modificada de Reich y Vasconcelos (2015)..... 7
- Figura 2. Cronología de la alteración supérgena de los depósitos de cobre en el Desierto de Atacama y su relación con cambios climáticos en la región. Datos isotópicos Ar-Ar de Arancibia et al. (2006) definen un periodo de enriquecimiento supérgeno entre 45 a 9-5 Ma, seguido de una etapa sin información radiométrica (~5-2 Ma). Datos de ³⁶Cl en atacamita reportados por Reich et al. (2008) definen un periodo final dominado por la formación y preservación de atacamita desde el comienzo de las condiciones hiperáridas actuales en la región. Figura modificada de Reich et al. (2009)..... 8
- Figura 3. Mapa de ubicación del depósito Barreal Seco. (Izquierda) mapa con regiones del norte y centro de Chile y en gris la Región de Antofagasta. (Derecha) mapa con rutas de acceso al depósito Barreal Seco en verde, en negro las localidades principales y los nombres de las rutas, y en rojo la ubicación del depósito..... 10
- Figura 4. Mapa geológico de la zona de estudio, modificado de las Hojas Taltal y Chañaral (Naranjo y Puig, 1984)..... 12
- Figura 5. Esquema estratigráfico generalizado, en rojo se muestra el depósito Barreal Seco dispuesto en la Formación Aeropuerto. Modificado de las Hojas Taltal y Chañaral. 13
- Figura 6. Distribución espacial y temporal generalizada de las rocas del arco magmático (Hammerschmidt, 1992) y de los depósitos IOCG en el norte de Chile. Modificado de Sillitoe (2003)..... 30
- Figura 7. Subdivisión de cinturones de depósitos IOCG, al oeste del mapa se extiende la provincia del Jurásico Tardío-Medio y al este la provincia del Cretácico Temprano. En la figura se indican los ejes del área de los cinturones de depósitos de pórfidos de cobre del Paleoceno-Eoceno Temprano, Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano, y Mioceno Tardío-Plioceno, incluyendo la localización de los principales depósitos. Modificado de Sillitoe (2003). 31
- Figura 8. Mapa geológico del prospecto Barreal Seco. Modificado de Correa (2000) 34
- Figura 9. Perfil geológico del depósito de Barreal Seco, donde se observa el cuerpo de brecha principal. El segmento A-A' es indicado en la Figura 8. Modificado de Correa (2000)..... 35

- Figura 10. Vista isométrica 3D de cuerpos de brechas del depósito Barreal Seco. Líneas sub-verticales corresponden a sondajes realizados a la fecha del año 2007. Figura modificada de Simón (2007)..... 36
- Figura 11. Espectro de difracción de rayos X de la muestra N°3 (13.8 m). Se identifican picos característicos de algunas de las fases minerales presentes en la roca. Gp: yeso, Atac: atacamita, Paratac: paratacamita, Clinocl: clinocloro, Hem: hematita. 42
- Figura 12. A. Fotomicrografía a luz reflejada en el microscopio óptico, donde se aprecian fenocristales de plagioclasas y cúmulos cristalinos euhedrales de titanomagnetita. Ambas fases son cortadas por una vetilla de mineralización supérgena. B. Fotomicrografía a luz transmitida y a nícoles cruzados. Se aprecia epidota como alteración de los fenocristales y de la matriz de la roca andesítica. Minerales de color negro corresponden a opacos. 43
- Figura 13. A. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron), donde se observan cúmulos de titanomagnetita asociados a la roca andesítica. B. Detalle del cúmulo cristalino en A, Spectrum 1 corresponde a datos de composición mineral química de los cristales de titanomagnetita (semicuantitativos). 43
- Figura 14. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 están asociados a vetilla de cuarzo que presenta en bordes crisocola (Spectrum 3) y yeso (Spectrum 4). Spectrum 5 muestra valores relacionados a magnetita asociada a los clastos andesíticos. Spectrum 1 al 5 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos)..... 44
- Figura 15. A. Fotomicrografía a luz transmitida y a nícoles cruzados en donde se observan láminas de specularita (opacos) dispuestos sobre cristales subhedrales de anhidrita. B. Fotomicrografía a nícoles cruzados y a luz transmitida, donde se observan cristales de atacamita (\pm polimorfo) reemplazando bordes de amígdala de anhidrita. 45
- Figura 16. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 corresponden a una vetilla de cuarzo que posee grietas con mineralización de hematita specular relacionada a la brecha hidrotermal. Se disponen cristales de atacamita entre los espacios de las láminas de specularita (Spectrum 4). Spectrum 1, 2 y 4 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos)..... 46
- Figura 17. Imagen de electrones retrodispersados (BSE). Análisis EDS entrega composiciones asociadas a fases de hidróxidos de hierro con estequiometría variable (Spectrum 1 y 6) como reemplazo de crisocola en bordes de amígdalas. Crisocola es conservada en los centros de las amígdalas (Spectrum 2 y 5). Spectrum 1, 2, 5 y 6 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos)..... 48
- Figura 18. A. Fotomicrografía a luz reflejada donde se dispone specularita (a) y goethita (b) con crecimiento de lepidocrocita en bordes y en planos de debilidad (c). B. Fotomicrografía a luz reflejada donde goethita (b) rodea a specularita (a), mientras que lepidocrocita (c) se dispone como alteración de ambas fases. 49

Figura 19. A. Fotomicrografía a luz transmitida y a nicoles cruzados. Se observa goethita de color rojo dispuesta en bordes de cristales de especularita B. Fotomicrografía a luz reflejada de especularita reemplazada en bordes por goethita y con un reemplazo parcial posterior de atacamita.	49
Figura 20. Espectro de difracción de rayos X de muestra N°9 (34.9 m). Se identifican picos característicos de algunas de las fases minerales presentes en la roca. Paratac: paratacamita, Hem: hematita, Qtz: cuarzo, Goeth: Goethita.....	50
Figura 21. A. Fotomicrografía a luz transmitida y a nicoles cruzados, donde se observa pseudomalaquita en pátinas. B. Mismo sector que en A, pero a luz reflejada, donde se observan cristales de especularita reemplazados en bordes a pseudomalaquita.	51
Figura 22. Imagen de electrones retrodispersados (BSE), con análisis EDS. Pseudomalaquita (Spectrum 1 y 2) ocurre entre cristales de especularita (Spectrum 6 y 7); esta configuración mineral es cortada por vetillas de yeso (Spectrum 3, 4 y 5). Spectrum 1 al 7 corresponden a datos de composición mineral química semicuantitativos.	52
Figura 23. A. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Se observa una vetilla de crisocola con formación de copper pitch en fracturas de la vetilla. B. Detalle de la mineralización en A. La vetilla de crisocola junto a la mineralización de copper pitch presenta alteración de yeso. Spectrum 1, 2 y 3 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos).....	53
Figura 24. Imagen de electrones retrodispersados (BSE). Spectrum 3 y 4 se asocian a yeso en vetilla cortando crisocola, la cual es formada en espacios entre cristales de especularita (Spectrum 1 y 2). Spectrum 1 al 4 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos).	54
Figura 25. Imagen de electrones retrodispersados (BSE), Spectrum 2 y 5 corresponden a vetillas de atacamita (\pm polimorfos), que cortan granos de crisocola con contenido de hierro en su composición química (Spectrum 3). Spectrum 1 y 4 están relacionados a cristales de hematita especular. Spectrum 1 al 5 corresponden a datos de composición mineral química semicuantitativos.....	55
Figura 26. Imagen de electrones retrodispersados (BSE). Spectrum 3 y 4 asociados a cristales de atacamita (\pm polimorfos), los cuales están reemplazados en bordes por crisocola. La crisocola no presenta registro de hierro en su composición química (Spectrum 1 y 2). Spectrum 1 al 4 corresponden a datos de composición mineral química semicuantitativos	56
Figura 27. A. Fotomicrografía a luz transmitida, en la cual se dispone atacamita a nicoles cruzados. B. Fotomicrografía a nicoles cruzados y a luz transmitida, donde una vetilla de yeso con crecimiento de atacamita en bordes corta a vetilla de atacamita. Se observa el crecimiento de atacamita con textura de crustificación y estructura de peineta en bordes de la vetilla.....	57

Figura 28. Imagen de electrones retrodispersados (BSE). Se dispone yeso (Spectrum 3 y 4) y atacamita (Spectrum 1 y 2) intercrecidos en una misma vetilla, la cual corta a la roca andesítica. Spectrum 5 indica la presencia de cúmulos cristalinos de titanomagnetita asociados a la andesita. Spectrum 1 al 5 corresponden a datos de composición mineral química semicuantitativos.	58
Figura 29. Perfil en profundidad de los valores de $\delta^{37}\text{Cl}$ de las muestras del sondaje subvertical de Barreal Seco.	63
Figura 30. Diagrama pH vs. $\log a(\text{H}_4\text{iO}_4)$ en donde se muestra la estabilidad de la crisocola y pseudomalaquita relativa a distintos fosfatos de cobre. T=25°C (Crane et al., 2001).	65
Figura 31. Diagrama pH-Eh para minerales de cobre a T=25° C y a 1 bar. Modificado de Reich et al. (2009).	66
Figura 32. Resaltados en color los datos de $\delta^{37}\text{Cl}$ pertenecientes al tramo profundo del sondaje estudiado.	67
Figura 33. Resaltados en color los datos de $\delta^{37}\text{Cl}$ pertenecientes al tramo superficial del sondaje estudiado.	69
Figura 34. Modelo geológico del depósito de Barreal Seco, donde se indica la circulación del fluido mineralizador de oxidados de cobre pertenecientes a un primer evento de alteración supérgena (33 a 9 Ma).	72
Figura 35. Modelo geológico del depósito de Barreal Seco, donde se indica la circulación del fluido mineralizador de oxidados de cobre pertenecientes a un segundo evento de alteración supérgena.	73

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Formulación del estudio propuesto

Los grandes yacimientos de cobre del Desierto de Atacama en el norte de Chile se caracterizan por un desarrollo significativo de zonas de oxidación y enriquecimiento supérgeno de cobre, haciendo de ésta la mayor provincia de producción de cobre en el mundo. Considerando que el enriquecimiento supérgeno en Atacama tuvo un desarrollo fuertemente dependiente de la evolución geológica, climática e hidrológica de la región, el estudio detallado de las condiciones para su formación ha sido un tema recurrente de investigación en los últimos años.

En particular, investigaciones anteriores se han centrado en el mineral atacamita ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$), un oxiclورو de cobre que ocurre con abundancia en los depósitos supérgenos de cobre en Atacama, pero que tiene presencia restringida en el registro geológico en el mundo. Esto se debe principalmente a su formación bajo condiciones altamente salinas y de pH neutro, y a su naturaleza soluble en presencia de aguas meteóricas, proponiéndose su ocurrencia como un marcador climático. Esto ha llevado a diversos autores a plantear que la generación en abundancia de atacamita en los yacimientos del Desierto de Atacama en el norte de Chile está íntimamente relacionada con la evolución climática de dicha región, y en particular a la transición desde condiciones semiáridas a hiperáridas en los últimos 15 millones de años, que han permitido su preservación. Además, dichos estudios han planteado la participación de aguas salinas profundas de origen marino como fuente de cloruro para la formación en abundancia de atacamita (Cameron et al., 2007; Reich et al., 2008, 2009; Cameron et al., 2010).

Dentro de este contexto, y considerando que gran parte de las investigaciones se han desarrollado en depósitos de cobre en el núcleo hiperárido actual del Desierto de Atacama, ubicado entre las latitudes de Antofagasta e Iquique aproximadamente, se hace necesario expandir el estudio hacia depósitos de cobre con abundante formación de atacamita en zonas del Desierto de Atacama que no pertenezcan a dicho núcleo.

El depósito de Barreal Seco se ubica a 75 kilómetros al sureste de Taltal en el distrito minero de Altamira, dispuesto en la zona sur del Desierto de Atacama en la Región de Antofagasta, y corresponde a un yacimiento tipo iron oxide-copper-gold o IOCG, de importancia para los fines de este estudio por su alta concentración de minerales secundarios de cobre, en particular de atacamita, la cual se dispone en la zona supérgena oxidada que se extiende hasta los 90 metros de profundidad del yacimiento (Correa, 2000).

El presente trabajo tiene por motivación expandir el estudio de la atacamita hacia el sur del núcleo hiperárido del Desierto de Atacama, donde se dispone el depósito de Barreal Seco, y evaluar la participación de aguas salinas profundas en el desarrollo de la mineralogía supérgena en este depósito.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de este estudio es determinar la naturaleza y origen de los fluidos formadores de minerales oxidados de cobre en la zona de enriquecimiento supérgeno del depósito IOCG de Barreal Seco, con particular énfasis en el mineral atacamita. Con el propósito de plantear un modelo de la evolución supérgena del yacimiento, se combinan observaciones geológicas y mineralógicas con datos geoquímicos e isotópicos.

1.2.2. Objetivos específicos

Para la realización del objetivo general se requiere desarrollar los siguientes objetivos específicos:

1. Describir y caracterizar las asociaciones paragenéticas a lo largo de un sondaje de aproximadamente 100 metros que cruza el segmento oxidado de la zona de enriquecimiento supérgeno del depósito de Barreal Seco.
2. Caracterizar los eventos que dan origen a la mineralización de atacamita, determinando su ocurrencia relativa en el tiempo.
3. Estimar las condiciones físico-químicas de los fluidos supérgenos para cada etapa paragenética, con especial énfasis en la formación de atacamita.
4. Evaluar, mediante el uso de isótopos estables de cloro ($\delta^{37}\text{Cl}$), el origen y naturaleza de los fluidos supérgenos que dieron origen a la mineralización de atacamita, evaluando también el uso de este proxy geoquímico como marcador de procesos supérgenos en yacimientos de cobre.
5. Discutir los resultados en un contexto regional, comparando con estudios realizados en el núcleo hiperárido del Desierto de Atacama, y planteando un modelo evolutivo para la mineralización supérgena en Barreal Seco.

1.3. Hipótesis de trabajo

La abundante ocurrencia de atacamita en la zona supérgena del yacimiento de Barreal Seco es indicativa de la participación de fluidos meteóricos con una fuerte influencia de agua salina profunda. La naturaleza físico-química e isotópica de dichos fluidos sería consistente con un origen no-meteórico del cloro, que probablemente estaría relacionado a fluidos sedimentarios de cuenca o niveles evaporíticos profundos. La preservación de estas señales químicas e isotópicas, y su distribución vertical a lo largo de la zona supérgena, estaría modulada por la evolución climática e hidrológica reciente de la región.

1.4. Metodología

1.4.1. Muestras del sondaje del depósito de Barreal Seco

Las muestras utilizadas en este estudio fueron obtenidas de un sondaje de 100 metros que cruza de manera subvertical la zona oxidada del depósito de Barreal Seco. Éstas fueron seleccionadas considerando una distribución representativa y la presencia de abundante mineralización supérgena de cobre, en particular de atacamita. Las muestras seleccionadas fueron analizadas mediante microscopía óptica de polarización, microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (XRD). Adicionalmente, se prepararon separados minerales de atacamita, y polimorfos de ésta, para determinar la composición isotópica de cloro estable para cada muestra. La Tabla 1 muestra cada análisis realizado a las muestras seleccionadas a lo largo del sondaje:

Tabla 1. Numeración y ubicación de las muestras obtenidas del sondaje estudiado. X: señala muestras utilizadas en análisis petrográfico, microscopía SEM, difracción de rayos X (XRD) y/o isótopos estables de cloro ($\delta^{37}\text{Cl}$) en separados minerales de atacamita y polimorfos de ésta.

N° de muestra	Ubicación (metros)	Análisis petrográfico y microscopía electrónica SEM	Difracción de Rayos X (XRD)	Isótopos estables de cloro en atacamita
1	4.49	X		X
2	13.62			X
3	13.83	X	X	X
4	17.13			X
5	18.85	X	X	X
6	27.1	X	X	X
7	29.1			X
8	32.2			X
9	34.9	X	X	X
10	41.9			X
11	50	X		X
12	54.3	X		X
13	55.2			X
14	58.35		X	X
15	61			X
16	61.4			X
17	65.2	X		
18	70.1	X		X
19	73.3	X	X	X
20	78.35	X	X	X
21	86.2	X		X
22	86.8			X
23	89.1			X

1.4.2. Microscopía óptica

De las muestras seleccionadas (Tabla 1) se confeccionaron 12 cortes transparentes-pulidos. Es importante mencionar que no fue posible confeccionar cortes transparentes-pulidos para aquellas muestras del sondaje que tenían un mayor grado de alteración y oxidación.

Se realizó una caracterización microscópica a través del estudio de texturas y paragénesis mineral en los cortes transparentes-pulidos de las muestras seleccionadas mediante microscopía óptica de polarización con luz transmitida y reflejada. Esta caracterización se llevó a cabo en el Laboratorio de Microscopía del Centro de Excelencia de Geotermia de los Andes (CEGA), en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

1.4.3. Microscopía electrónica de barrido

Con el propósito de estudiar las texturas minerales con mayor resolución, y obtener datos de composición mineral química semicuantitativa, se realizaron observaciones mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Previo al análisis SEM, se metalizaron los cortes transparente-pulidos con una película delgada de oro. La observación se realizó mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) modelo FEI Quanta 200 MK2, perteneciente al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), ubicado en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Microanálisis del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. El microscopio SEM está equipado con distintos detectores, entre los que se incluyen detectores de tipo SE (Secondary Electron), BSE (Back Scattering Electron), CL (Cathodoluminescence) y EDS (Energy Dispersive Spectrometer). En este estudio se utilizaron los detectores BSE y EDS. El primero fue utilizado para obtener imágenes con contraste de peso atómico, mientras que el detector EDS se utilizó con la finalidad de estimar las proporciones químicas semicuantitativas de las fases minerales estudiadas, mediante el software INCA Inca X-act, Oxford Instruments. El punto de obtención de datos es indicado en cada imagen a través de “*Spectrum*” en cada análisis. Este punto corresponde al sector en donde se obtienen los datos semicuantitativos de composición química mineral.

Las condiciones analíticas utilizadas en este estudio corresponden a un voltaje de 1.5 kV, a una intensidad de corriente de 80 μ A y al haz incidente de 5 (en escala nominal de 1 a 10).

1.4.4. Difracción de rayos X

La determinación de las fases minerales presentes en las muestras se realizó por medio de difracción de rayos X (XRD). Las muestras pulverizadas fueron analizadas en el Laboratorio de Cristalografía y Difracción de Rayos X del Departamento de Física de la FCFM, Universidad de Chile.

Se seleccionaron 8 muestras (Tabla 1) del sondaje con mayor volumen de oxidados de cobre, las cuales fueron pulverizadas para el análisis de XRD. Las muestras fueron analizadas en un difractómetro de polvo marca Bruker D8 Advance con geometría Bragg-Brentano. La potencia utilizada fue de 40KV / 30mA, mientras que el tiempo de medida fue de 0.1 segundo por paso y cada paso tiene 0.02° de avance en 2θ . La longitud de onda utilizada es radiación $\text{CuK}\alpha_1=1.3604$ Angstroms.

1.4.5. Isótopos estables de cloro

Para la caracterización de los fluidos mineralizadores de las fases de atacamita y polimorfos de ésta se obtuvieron datos de isótopos estables de cloro, los cuales fueron realizados por la Dra. Jaime Barnes mediante espectrometría de masas en la Universidad de Texas- Austin, USA. Las muestras analizadas se indican en la Tabla 1.

La metodología desarrollada consistió en la preparación de muestras de atacamita entre 10 a 20 gramos que fueron lavadas en agua desionizada ultra pura, a las cuales se les adicionó 5 mg de ácido nítrico al 1%, que es adecuado para el contenido de Cl en la atacamita (~16%). Una vez que el cloruro se encuentra en forma acuosa es convertido en AgCl por la adición de AgNO_3 a la solución. Posteriormente se hace reaccionar con CH_3I quedando finalmente de la forma CH_3Cl , lo cual es purificado a través de una columna cromatográfica de gases e introducido en un instrumento ThermoElectron MAT 253 para determinar las razones isotópicas de cloro. El error de los valores $\delta^{37}\text{Cl}$ es de $\pm 0.2\%$ en base a la medida del promedio del estándar interno de agua marina y al estándar interno de roca serpentínica, de acuerdo a los protocolos descritos por Barnes et al. (2014).

1.5. Trabajos anteriores

1.5.1. Generalidades de los procesos de enriquecimiento supérgeno

El enriquecimiento supérgeno de cobre genera depósitos minerales en ambientes asociados a alta meteorización química en profundidades de hasta varios cientos de metros. Este mecanismo se desarrolla a escala geológica, y es viable siempre y cuando exista alzamiento por procesos tectónicos o isostáticos. Este proceso puede darse en un amplio espectro de condiciones climáticas y en general se desarrolla bajo la influencia de agua subterránea de carácter meteórico, donde juega un rol importante el nivel freático, el cual debe ser relativamente profundo para un mejor y más rápido desarrollo de la mineralización secundaria. La tasa de alzamiento facilita el asentamiento del nivel freático a mayor profundidad, siendo éste un mecanismo clave en la formación de un mayor grado de mineralización en la zona de enriquecimiento secundario (Sillitoe, 2005).

Bajo el efecto del alzamiento tectónico, disminución del nivel freático y erosión, los depósitos minerales que fueron formados en profundidad, a alta presión y temperatura, son expuestos en superficie, donde el equilibrio se ve afectado por las nuevas condiciones de baja temperatura, baja presión y alta fugacidad de oxígeno. De esta forma, la mineralogía hipógena es alterada por oxidación y lixiviación generando depósitos con mayor concentración mineral, aumentando la ley del yacimiento hasta 4-5 veces la ley primaria (Reich y Vasconcelos, 2015).

El proceso de alteración supérgena resulta en una mayor concentración de metales a partir de la mineralización sulfurada primaria, y puede ser desarrollado in-situ o ex-situ (mineralización exótica). Los procesos principales para su formación son tres: (1) oxidación electroquímica de sulfuros primarios, de metales nativos o de oxidados de Cu (2) transporte de metales en solución y (3) re-precipitación de metales por reducción, saturación o intercambio catiónico.

Los principales modelos de enriquecimiento supérgeno involucran a los sulfuros de Fe (ej. pirita) y Fe-Cu (ej. calcopirita, bornita) hipógenos como los principales responsables de la generación de ácido y componentes de metales disueltos (Figura 1). Esto se realiza a través de procesos graduales de hidrólisis y oxidación que llevan a la generación de sulfato, en conjunto con la obtención de iones de cobre Cu^{+2} a través de la ruptura de la calcopirita o bornita. La migración vertical en profundidad de las soluciones ácidas resulta en la estratificación del perfil supérgeno, con una zona de lixiviación hacia el techo que sobreyace a la zona de mineralización oxidada de cobre (zona de oxidados verdes). Bajo esta zona, el cobre en solución y el sulfato son reducidos para formar sulfuros secundarios, usualmente bajo el nivel freático (Taylor, 2011).

La zona oxidada está compuesta de minerales de cobre incluyendo óxidos, sulfatos, hidrox-cloruros, carbonatos, silicatos, cobre nativo. Los principales minerales de cobre que se pueden encontrar en esta zona corresponden a cuprita, tenorita, brocantita, chalcantita, antlerita, malaquita, azurita, atacamita, turquesa, cobre nativo, crisocola, entre muchos otros. Por otra parte, la zona sulfurada está compuesta principalmente por calcosina y covelina.

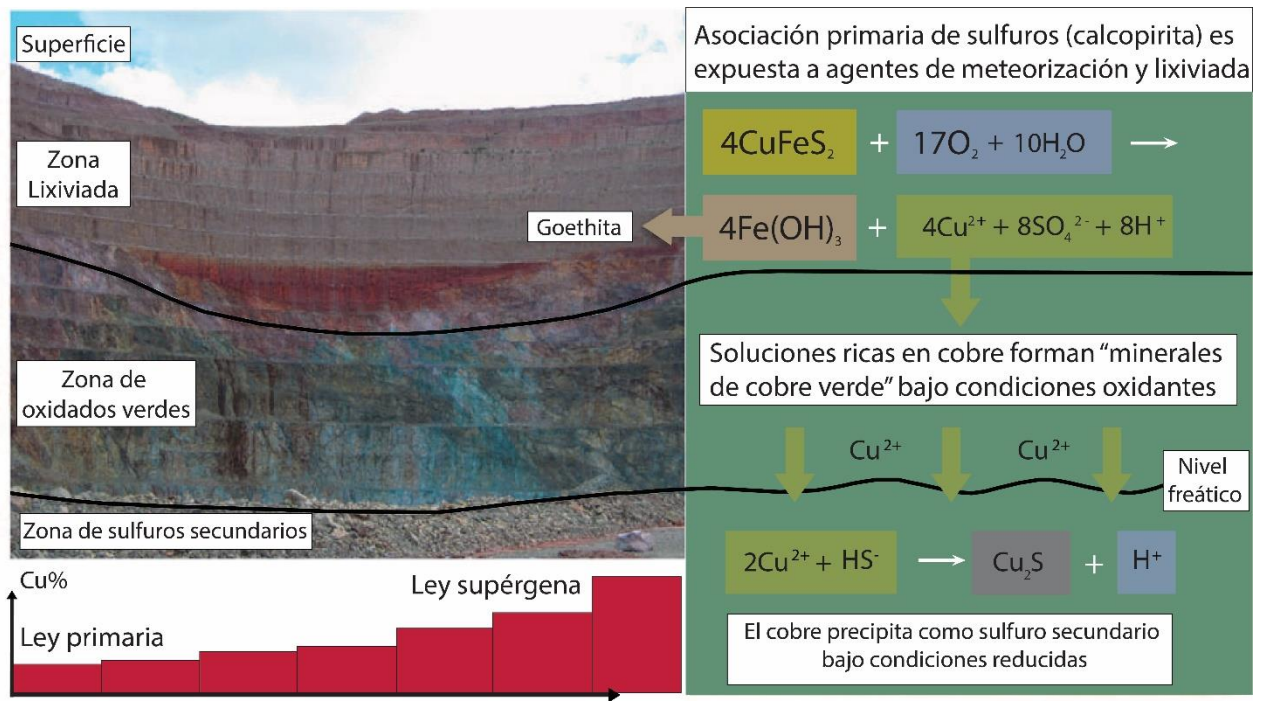


Figura 1. Representación esquemática de la oxidación y enriquecimiento supérgeno de cobre. (Izquierda) separación de zonas enriquecidas del pozo de la mina de cobre el Chino (Santa Rita), Nuevo México. (Derecha) Diagrama de oxidación de cobre y principales reacciones de enriquecimiento para cada zona de la foto adyacente. (Izquierda abajo) Diagrama con aumento de ley de cobre que resulta de los múltiples ciclos de enriquecimiento supérgeno. Figura modificada de Reich y Vasconcelos (2015).

1.5.2. Mineralización supérgena de cobre en Atacama: estudios anteriores

El proceso de enriquecimiento supérgeno en el Desierto de Atacama es promovido en gran parte por las condiciones climáticas y por la evolución tectónica de los cinturones orogénicos en el norte de Chile. Esta evolución contempla importantes periodos de deformación compresiva, acortamiento cortical, levantamiento superficial y exhumación erosional, que son responsables del desplazamiento a mayores profundidades del nivel freático (Sillitoe, 2005).

Arancibia et al. (2006) reportan datos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y K-Ar en los grupos de la alunita, jarosita y hollandita de mineralogía supérgena de la depresión Central del norte de Chile, que dan cuenta que la oxidación supérgena se desarrolló desde los 33 hasta los 9 Ma. El término del enriquecimiento supérgeno, a los 9 Ma, coincide con el comienzo del clima hiperárido encontrado hoy en día en el Desierto de Atacama (Figura 2). Sin embargo, investigaciones recientes centradas en la geoquímica de la atacamita y en las fases secundarias de cobre asociadas proporcionan antecedentes adicionales acerca del periodo de enriquecimiento supérgeno y de la naturaleza de las aguas involucradas que dieron origen a la mineralización supérgena en Atacama (Cameron et al., 2007; Reich et al., 2008, 2009; Cameron et al., 2010). Dichos estudios proponen que el periodo de enriquecimiento supérgeno en el norte de Chile continuó después del comienzo de la hiperaridez y que los fluidos relacionados a la mineralización supérgena, en particular de atacamita, tienen un carácter químico e isotópico consistente con aguas salinas profundas y antiguas, provenientes del basamento marino del Jurásico.

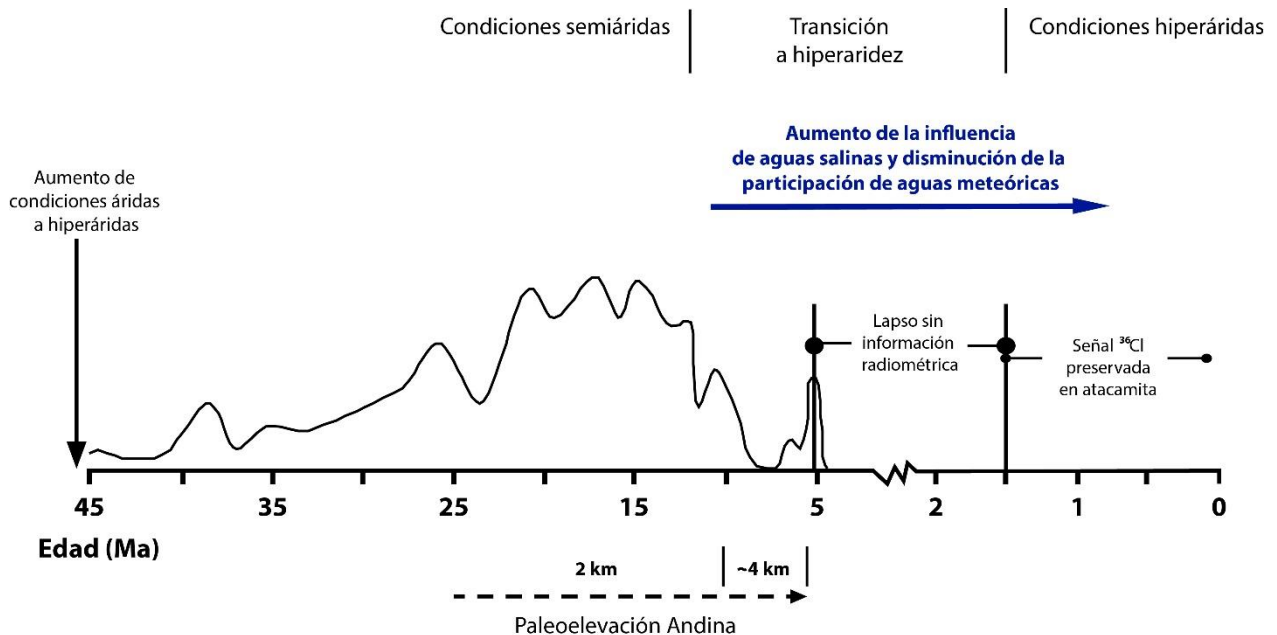


Figura 2. Cronología de la alteración supérgena de los depósitos de cobre en el Desierto de Atacama y su relación con cambios climáticos en la región. Datos isotópicos Ar-Ar de Arancibia et al. (2006) definen un periodo de enriquecimiento supérgeno entre 45 a 9-5 Ma, seguido de una etapa sin información radiométrica (~5-2 Ma). Datos de ^{36}Cl en atacamita reportados por Reich et al. (2008) definen un periodo final dominado por la formación y preservación de atacamita desde el comienzo de las condiciones hiperáridas actuales en la región. Figura modificada de Reich et al. (2009).

Reich et al. (2009) proponen un modelo evolutivo para el enriquecimiento supérgeno en Atacama, el cual consiste en una primera etapa con participación dominante de aguas de origen meteórico, bajo condiciones climáticas áridas a semiáridas (>10 mm por año de precipitación). Este periodo prolongado de enriquecimiento, asociado a la infiltración de aguas de lluvia percoladas durante el levantamiento de los Andes centrales (~45- 9 Ma), es seguido por una segunda etapa de enriquecimiento supérgeno asociada al cambio de condiciones áridas/semiáridas a hiperáridas (<1-4 mm por año). Bajo estas condiciones se produjo la disminución de la infiltración meteórica y el establecimiento progresivo de un régimen de circulación subterránea exclusivamente endorreico, proporcionando condiciones factibles para la formación de atacamita por efecto de aguas salinas y profundas, y su preservación en los últimos 2-1.5 Ma bajo un clima hiperárido (Figura 2).

El modelo anterior es planteado en base a datos de edades radiométricas de desequilibrio de la serie del uranio ($^{230}\text{Th} - ^{234}\text{U}$) en yeso intercrecido con atacamita, los cuales restringen un último evento de formación de atacamita durante el Pleistoceno en condiciones climáticas hiperáridas (Reich et al., 2009). Adicionalmente, el análisis isotópico de ^{36}Cl en atacamita e isótopos cosmogénicos de yodo (^{129}I) en marshita (CuI), dan cuenta de razones isotópicas consistentes con fluidos profundos de naturaleza sedimentaria y componentes orgánicos de origen marino. Por una parte, las razones de yodo cosmogénico en marshita ($^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$) del yacimiento Ministro Hales tienen valores entre 190 y 560×10^{-15} , los cuales son característicos de aguas sedimentarias de poro y significativamente menores que los valores típicos asociados a aguas superficiales donde las razones isotópicas de yodo son $\sim 1500 \times 10^{-15}$ (Reich et al., 2013). Por otra parte, las razones de $^{36}\text{Cl}/^{37}\text{Cl}$ en muestras de atacamita de los depósitos de Mantos Blancos y Spence en el norte de Chile se caracterizan por valores muy bajos (11×10^{-15}), comparables con datos previamente reportados para aguas subterráneas antiguas y de origen sedimentario profundo (Reich et al., 2008), avalando de esta forma la hipótesis anterior de procedencia de los componentes halogenados (Cl, I) desde un reservorio de origen marino en vez de uno estrictamente meteórico y/o atmosférico. Los datos mencionados anteriormente son consistentes con un origen sedimentario para el cloro propuesto por Arcuri y Brimhall (2003) en el depósito Radomiro Tomic, quienes reportan los únicos datos de isótopos estables de cloro ($\delta^{37}\text{Cl}$) en atacamita existentes en la literatura. Por otra parte, datos de isótopos estables de Cu en Spence, reportados por Palacios et al. (2011), sugieren una etapa de enriquecimiento supérgeno con señales isotópicas más pesadas en sulfuros secundarios, relacionados a fluidos meteóricos ácidos y lixiviantes (periodo “meteórico”), seguida de una etapa con señales isotópicas de cobre más livianas en atacamita (periodo “salino”), indicando múltiples ciclos redox en los últimos 45 Ma.

Finalmente, los datos de δD vs $\delta^{18}\text{O}$ en aguas subterráneas actuales obtenidas en pozos profundos en el yacimiento Spence, en la Depresión Central, indican una componente profunda y salina del agua subterránea, probablemente relacionada al basamento marino del Jurásico, donde los flujos ascendentes se transmitirían a niveles superiores y cercanos a la superficie a través de fallas y estructuras mediante el mecanismo de bombeo tectónico (Cameron et al., 2002; 2007).

1.6. Ubicación y vías de acceso

El depósito Barreal Seco se ubica en la Depresión Central próxima a la Cordillera de la Costa, en la segunda Región de Antofagasta, en cercanía al límite con la tercera Región de Atacama. Las coordenadas del depósito son $25^{\circ}55'39''\text{S}$ y $70^{\circ}03'12''\text{O}$.

Desde Copiapó se recorren 210 kilómetros para llegar al yacimiento (Figura 3), donde el recorrido comienza desde la Ruta C-17 con dirección norte durante una hora y 30 minutos llegando a la localidad de Diego de Almagro. Luego se prosigue por la Ruta C-115-B hacia el norte durante 1 hora y 40 minutos aproximadamente, hasta topar con la Quebrada Juncal, luego se toma un camino de tierra hacia el poniente con cambio de dirección al norte hasta llegar al yacimiento de Barreal Seco.

Para acceder a Barreal Seco desde la ciudad de Taltal es necesario recorrer 90 kilómetros (Figura 3) tomando la Ruta 1 con dirección sur durante 30 minutos aproximadamente, luego se accede a la Ruta 5 con dirección sur durante 20 minutos y se toma la ruta B-955 por 5 minutos hasta acceder a ruta B-965 con dirección hacia el oriente y luego de 1 hora y 30 minutos se llega al depósito Barreal Seco.

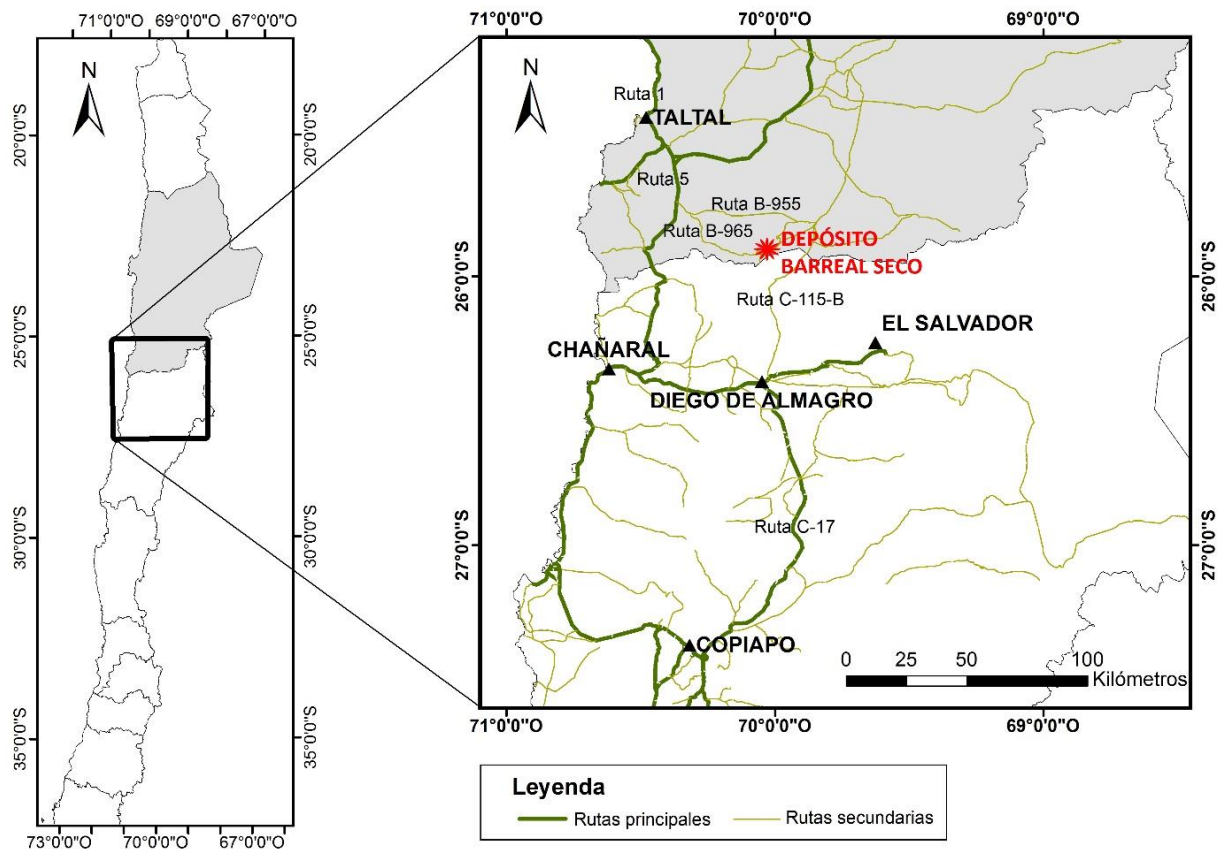


Figura 3. Mapa de ubicación del depósito Barreal Seco. (Izquierda) mapa con regiones del norte y centro de Chile y en gris la Región de Antofagasta. (Derecha) mapa con rutas de acceso al depósito Barreal Seco en verde, en negro las localidades principales y los nombres de las rutas, y en rojo la ubicación del depósito.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. Introducción

En la segunda y tercera región del norte de Chile se extiende de oeste a este: la Cordillera de la Costa, el Valle Central, la Cordillera Domeyko y la Cordillera de los Andes. El depósito Barreal Seco se encuentra en el segmento oriental de la Cordillera de la Costa.

La Figura 5 corresponde a un resumen esquemático de las principales relaciones estratigráficas que se encuentran en este segmento, en el cual se disponen (de base a techo): el Basamento Metamórfico Paleozoico; la secuencia de rocas volcánicas pertenecientes al Cretácico Inferior, las cuales están intruídas por el Batolito Costero compuesto por stocks granodioríticos a dioríticos y diques andesíticos; las rocas volcánicas y piroclásticas félsicas pertenecientes al Cretácico Superior-Terciario, las cuales se encuentran sobreyaciendo en discordancia a las rocas volcánicas del Cretácico Inferior; las gravas de Atacama (no consolidadas) del Oligoceno-Mioceno y los depósitos aluviales y coluviales del Holoceno que son abundantes en la zona, sobre todo en grandes quebradas y depresiones menores.

La Formación Cerro del Pingo corresponde al intrusivo más cercano al distrito (a ~16 km al NNW del depósito de Barreal Seco). Las edades radiométricas reportadas para la Formación Cerro del Pingo por Naranjo y Puig (1984) corresponden a 124 ± 4 Ma a través de K-Ar en biotita y a 112 ± 4 Ma por medio de $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ en biotita.

La mineralización metálica predominante de la región corresponde a Fe, Cu y Mn y tiene ocurrencia en cuerpos vetiformes, brechas y mantos, destacando el depósito de Barreal Seco por su importante volumen. La mayoría de los depósitos emplazados en la zona de estudio tienen un importante control estructural dominado por fallas con desplazamientos verticales y de rumbo que forman parte del Sistema de Falla Atacama, que corresponde al rasgo estructural más relevante en este segmento de la Cordillera de la Costa.

La Figura 4 corresponde a un fragmento ubicado en la zona central del mapa levantado por Naranjo y Puig (1984) que contiene al depósito Barreal Seco y como referencia muestra al depósito estratoligado Altamira y al depósito tipo manto de Cu Frankenstein en donde se ha reconocido la Formación Aeropuerto como la roca hospedante. Otras formaciones aledañas, estructuras y zonas de alteración también son descritas a continuación. La información entregada en este capítulo se basa en las Hojas Taltal y Chañaral, de la región de Antofagasta y Atacama (Naranjo y Puig, 1984).

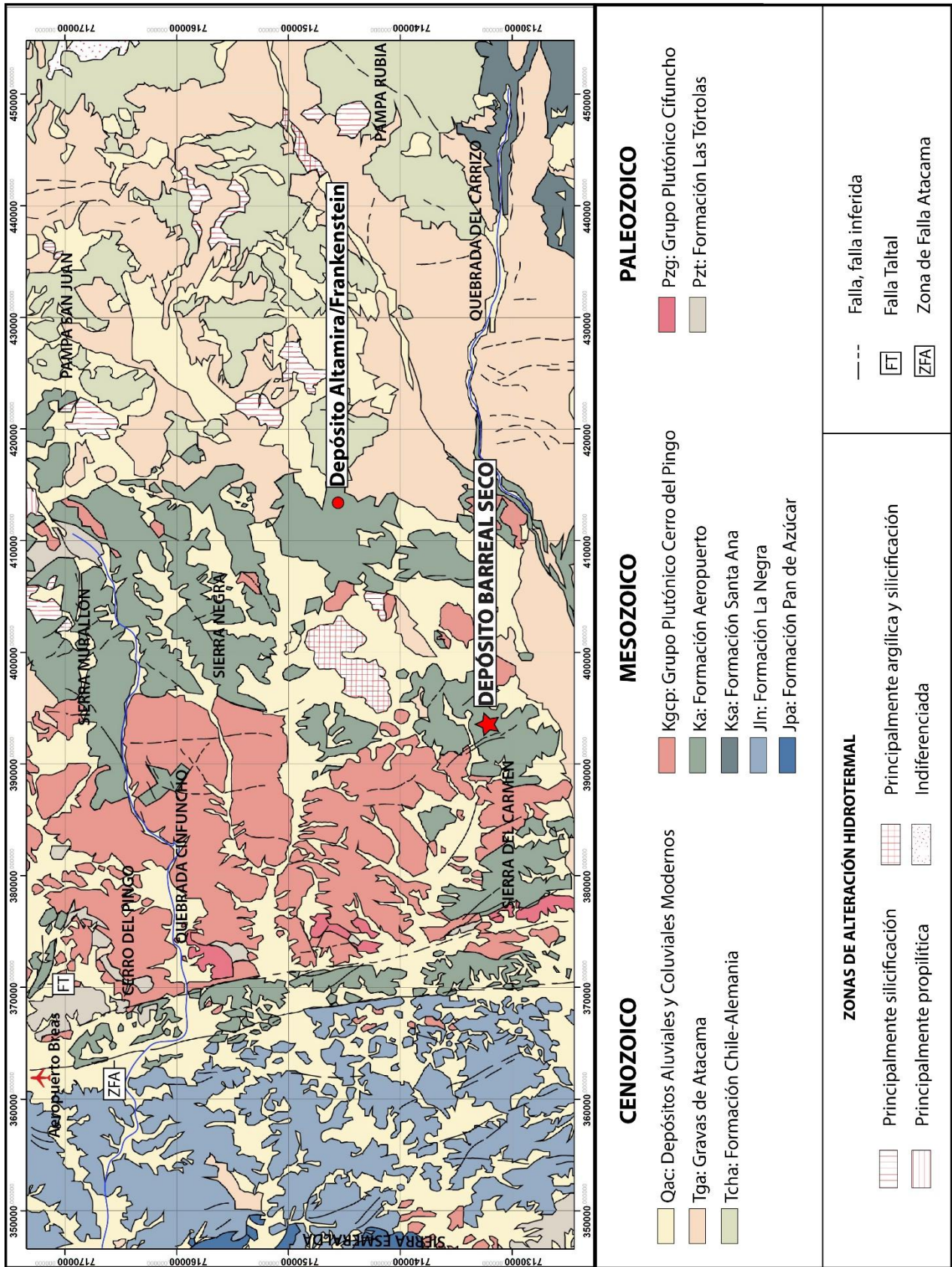


Figura 4. Mapa geológico de la zona de estudio, modificado de las Hojas Taltal y Chañaral (Naranjo y Puig, 1984).

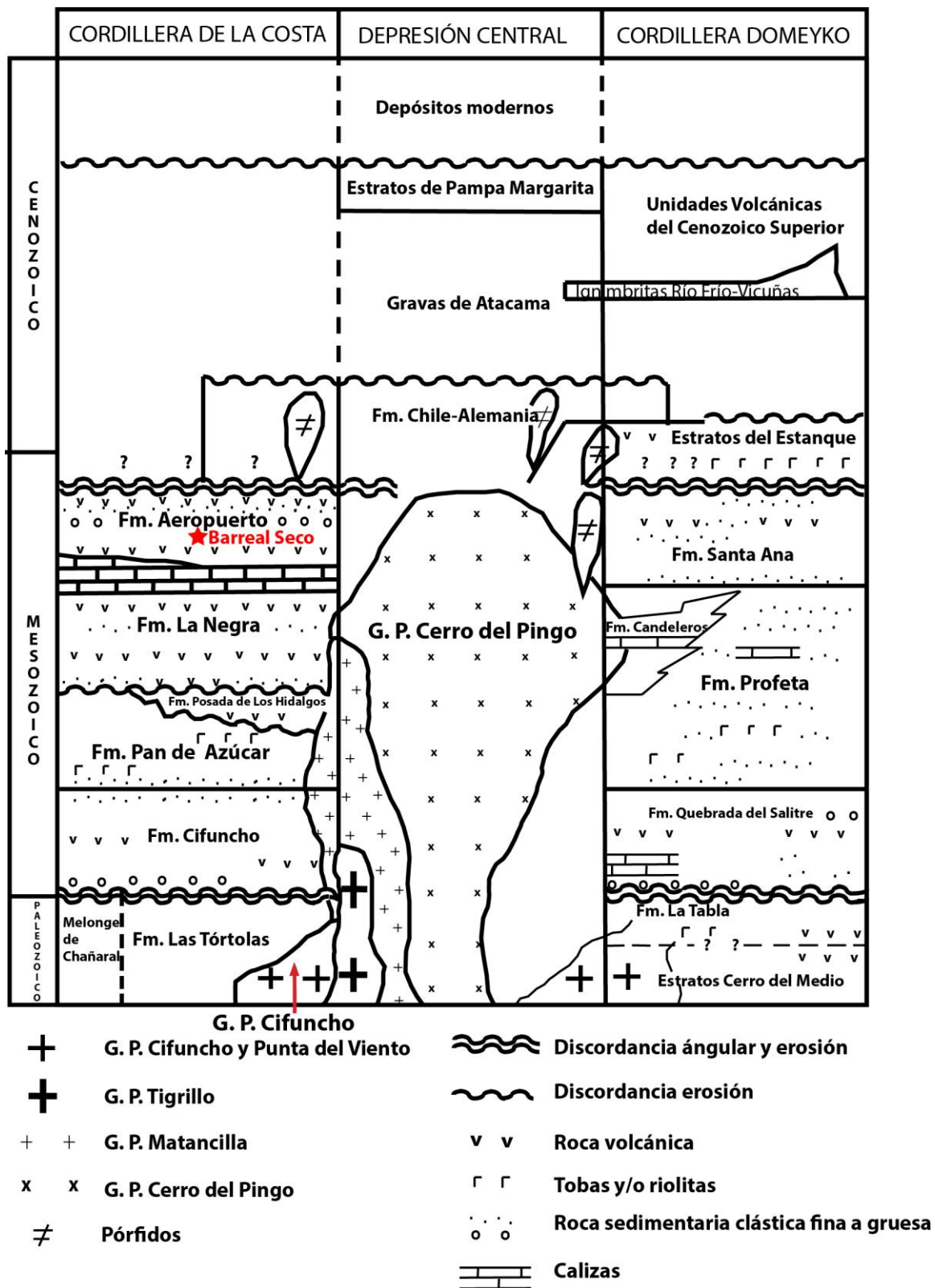


Figura 5. Esquema estratigráfico generalizado, en rojo se muestra el depósito Barreal Seco dispuesto en la Formación Aeropuerto. Modificado de las Hojas Taltal y Chañaral.

2.2. Rocas estratificadas

2.2.1. Formación Las Tórtolas

Definición

Definida por primera vez por Ulriksen (1979) como una secuencia de 1.000 metros de rocas metasedimentarias compuestas por cuarcitas, pizarras, filitas y esquistos micáceos, que afloran en la parte costera del área de Cifuncho. Hacia el sur de esta zona la Formación las Tórtolas fue denominada como Basamento Metasedimentario por Mercado (1977) y por Naranjo (1978).

La Formación Las Tórtolas es definida por Naranjo y Puig (1984) como una secuencia de areniscas, lutitas intercaladas en menor grado con calizas, cherts y volcanitas básicas, serie que ha sido afectada por metamorfismo de bajo grado y deformación intensa.

Distribución, relaciones de contacto y espesor

La Formación Las Tortoras se encuentra expuesta hacia el sur y hacia el norte de la parte occidental de la zona de estudio. Debido a la alta deformación y mezclas en los estratos no ha sido posible determinar su espesor real. La base de la Formación Las Tórtolas es desconocida y está cubierta en discordancia angular por las formaciones Cifuncho, Pan de Azúcar, Aeropuerto y Chile-Alemania.

Litología

Los afloramientos del sur poniente de la zona de estudio muestran una alternancia de estratos de metareniscas y filitas con bajo grado de metamorfismo.

Las areniscas presentes generalmente son inmaduras, tienen mala selección, estratificación gradada y poseen trazas fósiles y marcas de fondo. Estas rocas han sido clasificadas como areniscas líticas y feldespáticas con fragmentos de andesitas, vidrio volcánico recristalizado y clastos de filitas. La matriz es abundante (<40%) y mayoritariamente secundaria debido a la alteración en la roca volcánica y en los feldespatos.

Es común encontrar en los afloramientos intercalaciones de calizas con niveles de chert macizos y en ocasiones con niveles de volcanitas básicas (brechas hialoclásticas y lavas que presentan estructuras de almohadilla amigdaloidales). Estos afloramientos marcan un bajo grado metamórfico.

Edades, correlaciones e interpretación ambiental

En las trazas fósiles presentes en la Formación Las Tórtolas se distingue “trece ichnogéneros” (Bell, 2010), sugiriendo una edad del Paleozoico Inferior, entre el Ordovícico y Devónico (Covacevich, 1982).

Se infiere que el ambiente de acumulación de secuencias rítmicas de turbiditas distales, sedimentitas pelágicas y rocas volcánicas se generó en un ambiente de cuenca oceánica de mar profundo. Mientras que los materiales clásticos, ígneos, intermedios y metasedimentarios son de procedencia terrígena. En adición a estas condiciones, se presenta un “melange” regional evidenciando que las rocas de la Formación Las Tórtolas estarían relacionadas a un relicto de un prisma de acreción, en un complejo de subducción paleozoico.

2.2.2. Formación Pan de Azúcar

Definición

Definida por Naranjo (1978) como un conjunto homogéneo de rocas sedimentarias, clásticas, marinas y fosilíferas bien estratificadas. Ulriksen (1979) adiciona las rocas sedimentarias marinas que afloran en Sierra Esmeralda a la Formación Pan de Azúcar.

Distribución, relaciones de contacto y espesor

Se distribuyen casi continuamente desde Sierra Esmeralda hacia el norte de la zona de estudio. Afloramientos hacia el sur sobreyacen a la Formación Cinfuncho a través de un contacto depositacional concordante y en ciertas localidades por contacto de falla. Fuera del área de estudio sobreyace a la Formación Las Tórtolas y subyace en discordancia de erosión a las brechas volcánicas y a las lavas de la Formación La Negra.

El espesor real de esta formación no se ha logrado determinar con exactitud, pero se estima que el espesor mínimo que alcanzan los afloramientos ubicados en Sierra Esmeralda son de 700 metros (Ulriksen, 1979).

Litología

En general la Formación Pan de Azúcar muestra secuencias bien estratificadas de areniscas, tobas, areniscas calcáreas y lutitas fosilíferas, de color característico pardo-amarillento.

La estratificación basal corresponde a areniscas conglomerádicas grises con gradación normal, e intercalaciones de tobas y de escasas areniscas calcáreas. Hacia los estratos superiores la

secuencia presenta capas más finas de areniscas y lutitas verdes a amarillas claras, con numerosas intercalaciones de tobas. Las areniscas finas presentan buena selección, mientras que las areniscas de grano grueso presentan mala selección. Los clastos presentes en ambas granulometrías son subredondeados y consisten en cuarzo, plagioclasa, cuarcita y escasos fragmentos de muscovita. La estratificación de la lutita alcanza hasta 1 centímetro de espesor. La secuencia posee intercalaciones abundantes de tobas vítreas constituidas por cuarzo, “shards”, fragmento de plagioclasas y andesitas pilotáxicas y pómez recristalizadas, mientras que la matriz es vítrea, generalmente se encuentra cloritizada y contiene estructuras esféricas con relleno de calcita y ceolita. En las capas superiores, los estratos presentan concreciones calcáreas lenticulares y material fosilífero abundante.

Edades, correlaciones e interpretación ambiental

A través de material fosilífero se determina una edad perteneciente a los pisos Hettangiano y Sinemuriano Inferior (Covacevich, 1979, 1982, 1985), mientras que en la Quebrada Pan de Azúcar se estima un lapso más amplio para su formación desde el Hettangiano al Sinemuriano Superior (Naranjo, 1978).

Por lito y bioestratigrafía es posible correlacionar a la Formación Pan de Azúcar con unidades de la Precordillera de Antofagasta y Atacama (Perez, 1982; Segerstrom, 1968) que se encuentran alejadas de la zona de estudio.

Por la alta cantidad de fósiles de amonites en las secuencias estratigráficas, se presume un ambiente de depositación marino, probablemente circalitoral alto, con intensa actividad volcánica ácida, posiblemente freatomagmática, debido a depósitos tobáceos y piroclásticos intercalados.

2.2.3. Formación La Negra

Definición

En la Hoja de Taltal y Chañaral (Naranjo y Puig, 1984) se define a la Formación La Negra como una secuencia de lavas y brechas con intercalaciones de sedimentitas fosilíferas marinas.

Distribución, relaciones de contacto y espesor

Se distribuye en una franja de hasta 18 kilómetros de ancho de forma continua de norte a sur en la zona poniente del área de estudio (Figura 3). Al oeste de la Falla de Atacama posee estratificación maciza que supera los tres metros.

Hacia el sur de la Quebrada Cifuncho, la Formación La Negra, se dispone sobre la Formación Pan de Azúcar en discordancia de erosión, mientras que hacia el norte la sobreyace en concordancia aparente. No es observable su límite superior debido a que muestra contacto por falla con la Formación Aeropuerto del Cretácico Inferior.

La Formación La Negra posee un espesor de más de 5.000 metros cerca de la Quebrada Cifuncho.

Litología

La Formación la Negra está constituida fundamentalmente por rocas volcánicas de colores oscuros, gris-verdoso y morado, que corresponden a lavas andesíticas, brechas volcánicas y tobas. Se observan dentro de la estratificación intercalaciones menores de areniscas pardo-rojizas y lentes conglomerádicos de clastos de rocas andesíticas.

Las capas de mayores espesores corresponden a brechas con clastos andesíticos porfíricos, de hasta 40 centímetros de diámetro, la matriz posee alteración de clorita y epidota.

Hacia el sur de la zona de estudio, se encuentra en la base de la Formación La Negra un nivel sedimentario marino, el cual está formado por areniscas calcáreas con varios tipos de fósiles y por conglomerados de colores pardo y gris-rojizo. Sobreyaciendo a este nivel se disponen lavas y brechas andesíticas, mientras que más al norte, y siguiendo la secuencia estratigráfica, se observan brechas intercaladas con rocas sedimentarias de ambiente marino. La parte superior de la estratificación contiene una nueva intercalación de lutitas grises oscuras, con fósiles marinos mal conservados. Finalizando la secuencia, se disponen lavas “ocoíticas” que presentan estructuras tipo almohadillas (Suarez, 1982).

Edades, correlaciones e interpretación ambiental

A través de interpretación fósil, que han sido hallados en intercalaciones sedimentarias, se estima que la edad de la Formación La Negra es del Pliensbachiano, sin embargo, una secuencia de 200 metros de rocas volcánicas en la base de esta unidad sugiere una edad más antigua que Pliensbachiana. Por otra parte, hacia el nororiente de la zona de estudio se identifica el piso Bajociano en los niveles marinos lenticulares y basales (Covacevich, 1982). No está documentada en esta zona una edad mínima para la formación, sin embargo diferentes autores han estimado una edad mínima Jurásica Superior en su localidad tipo (Harrington, 1961; Ferraris y Di Biase, 1978).

La Formación La Negra representa un arco volcánico de margen continental, formado por sucesivas erupciones andesíticas, algunas desarrolladas en un ambiente subacuático dejando estructuras de almohadillas en las lavas. La generación de lavas habría sido intermitente, interrumpida por la formación de sedimentos marinos y continentales.

2.2.4. Formación Santa Ana

Definición

Secuencia clástica, de ambiente marino-continental, con intercalaciones volcánicas andesíticas (Naranjo y Puig, 1984).

Distribución, relaciones de contacto y espesor

No se observa en la zona de estudio su relación de contacto inferior con otras unidades. Por otra parte, la Formación Santa Ana subyace en discordancia angular a las volcanitas de la Formación Chile-Alemania del Terciario Inferior y a la Formación Chile-Alemania del Paleógeno.

Esta unidad aflora en la parte suroriente de la zona de estudio y tiene un espesor estimado sobre los 1000 metros.

Litología

En la base de la Formación Santa Ana se encuentra una alternancia de lutitas y areniscas líticas arcósicas de color gris-verdoso, con fósiles (invertebrados y vertebrados) de cemento calcáreo, también se reportan intercalaciones de andesitas porfíricas amigdaloidales de hasta 10 metros de espesor en esta secuencia estratigráfica.

Hacia el techo de esta unidad existen areniscas líticas de variada granulometría, las cuales poseen un color pardo-rojizo y estratificación gradada y cruzada. En intercalación con las areniscas se disponen capas de conglomerados y brechas de igual coloración con clastos de andesitas y de sedimentitas, la matriz asociada a las capas de conglomerados corresponde arena gruesa de color pardo-violáceo. También se intercalan laminaciones finas de ondulitas rectas con diferentes direcciones, las cuales presentan estructuras de trazas de vermes, grietas de barro y marcas de gotas de lluvia.

En la Quebrada del Carrizo afloran más de 1.500 metros de litarenitas y arenitas arcósicas, con intercalaciones de conglomerados con estratificación regular.

Edades, correlaciones e interpretación ambiental

Fósiles de la base de la Formación Santa Ana contienen restos de un reptil volador, del género *Pterodaustro* (Chong, 1976) y otros fósiles vegetales e invertebrados que reportan una edad Cretácico Inferior (Covacevich, 1985). Debido a que la ocurrencia del material fosilífero perteneciente al Cretácico Inferior ocurre en la parte más baja de la secuencia es posible que su edad mínima de formación pertenezca al Cretácico Superior.

La Formación Santa Ana ubicada en la Cordillera Domeyko es el equivalente litoestratigráfico de la Formación Aeropuerto de la Cordillera de la Costa. Las facies mayoritariamente sedimentarias indican que podría representar las facies marginales orientales del arco volcánico del Cretácico Inferior.

La parte inferior de la Formación Santa Ana da cuenta de un ambiente de depositación marino infralitoral y hacia los niveles superiores se tiene una variación a un ambiente transicional, marino-continental, con interferencia de volcanismo.

2.2.5. Formación Aeropuerto

Definición

Unidad descrita informalmente por Ulriksen (1979), quien la subdivide en dos miembros principales, luego es redefinida, sin subdivisiones, como una secuencia volcanoclástica con intercalaciones de rocas sedimentarias, continentales y marinas, diferenciada de la Formación La Negra por poseer un carácter más sedimentario y por la presencia de intercalaciones de calizas.

Distribución, relaciones de contacto y espesor

Basado en la Hoja de Taltal y Chañaral (Naranjo y Puig, 1984) el depósito en estudio de Barreal Seco se ubica en La Formación Aeropuerto.

Esta formación se distribuye ampliamente hacia la zona oriental de la Cordillera de la Costa, aflorando en la zona de estudio desde el norte en la cercanía del Aeropuerto Breas hasta la quebrada Pan de Azúcar por el sur. Su espesor mínimo observado es de 3.000 metros.

Se dispone sobre la Formación Las Tórtolas con discordancia angular y posiblemente subyace en discordancia a la Formación Chile-Alemania del Terciario Inferior.

Litología

La Formación Aeropuerto se caracteriza por la predominancia de andesitas con intercalaciones de rocas piroclásticas en la cercanía del depósito de Barreal Seco, mientras que al norte del depósito de Altamira, en Sierra Negra, se exponen andesitas de color gris-verdoso con intercalaciones de areniscas y lutitas. Hacia el norte de la zona de estudio, entre Sierra Murallón y Pampa San Juan, se observan andesitas, areniscas y lutitas de colores pardos.

Hacia la parte oriente de la zona de estudio se observan principalmente rocas sedimentarias y clásticas, que poseen continuas intercalaciones de lavas andesíticas y calizas marinas, en estas intercalaciones se pueden distinguir pequeñas cantidades de fragmentos fósiles. Localmente, en acotados afloramientos, se reportan lutitas, limonitas, areniscas y conglomerados de color pardo-rojizo, estos últimos con clastos de andesitas porfíricas de color pardo-violáceas (Arabasz, 1971).

Hacia el noreste del depósito de Barreal Seco afloran areniscas arcósicas con intercalaciones de brechas, las cuales poseen matriz arcillosa a arenosa y clastos de cuarzo blanco, cuarcitas y granitoides (Arabasz, 1971).

En la parte sur de Sierra del Carmen se observa una secuencia de flujos andesíticos macizos, con intercalaciones de calizas marinas fosilíferas. En las cercanías del Carrizo se exponen lavas andesíticas porfíricas (algunas lavas ocoíticas) de un color pardo-verdoso, las cuales presentan amígdalas y se encuentran estratificadas regularmente. Intercalados a la secuencia de lavas se disponen conglomerados brechosos compuesto por clastos de hasta un metro de andesitas y granitoides. En los niveles superiores de esta secuencia se adicionan intercalaciones de brechas finas y areniscas de color verde claro.

Edades, correlaciones e interpretación ambiental

A través de fósiles bivalvos fragmentados del género *Exogyra*, ubicados hacia el sur del Aeropuerto Breas, se estima una edad perteneciente al Cretácico. Por otra parte, las intercalaciones de calizas que afloran hacia el sur de la zona de estudio contienen amonites del género *Olcostephanus* sp. del Valanginiano, proponiendo que la edad de formación se extiende sólo hasta el lapso Cretácico Inferior, a pesar de que subyace discordantemente a las volcanitas de la Formación Chile-Alemania del Terciario Inferior.

Hacia la Cordillera Domeyko (al oriente zona de estudio), afloran en la Formación Aeropuerto secuencias sedimentarias con intercalaciones de rocas volcánicas de la Formación Santa Ana del Cretácico Inferior.

El origen de la Formación Aeropuerto se produjo principalmente en un ambiente continental, con aportes mayoritariamente terrígenos y con menor ingreso marino en cuencas intravolcánicas.

Esta formación es producto del arco magmático relacionado a la Formación La Negra durante el Jurásico, que continuó sin interrupciones hasta el Cretácico Inferior.

2.2.6. Formación Chile-Alemania

Definición

Definida por primera vez por Chong (1973) como una secuencia de rocas volcánicas, con dos miembros principales: el superior de andesitas y basaltos y el inferior compuesto de riolitas y dacitas. Luego, la Formación Chile-Alemania es redefinida como un conjunto de rocas volcánicas compuesto por lavas y piroclastos de composiciones andesíticas a dacítica, con menor cantidad de basaltos y riolitas (Naranjo y Puig, 1984). Dentro de la Formación Chile-Alemania se incluyen pórfidos subvolcánicos, que corresponden a los centros de emisión de la misma unidad.

Distribución, relaciones de contacto y espesor

Las rocas de esta unidad afloran al noroeste del depósito de Barreal Seco. La Formación Chile-Alemania se encuentra en discordancia angular sobre sedimentitas de la Formación Santa Ana del Cretácico. También sobreyace en discordancia de erosión a rocas volcánicas de la Formación Aeropuerto cercanas al depósito de Barreal Seco. Sobre la Formación Chile-Alemania se disponen las Gravas de Atacama.

A través de afloramientos dispuestos al norte de la zona de estudio se estima un espesor que varía entre 700 y 1000 metros.

Litología

Las rocas de la Formación Chile-Alemania poseen composiciones variadas que van desde riolitas a basaltos con mayor abundancia de andesitas y dacitas.

Afloramientos observados en el extremo norte de la zona de estudio poseen mayor cantidad de andesitas y basaltos vesiculares de olivino y piroxeno, con intercalaciones de tobas vítreas, lavas riódacíticas y brechas andesíticas negras, las cuales presentan clastos vesiculares que alcanzan hasta 20 centímetros.

Hacia el este del depósito de Barreal Seco, en la cercanía de la Pampa Rubia, se observa una sucesión de volcanitas bien estratificadas de composición andesítica que ocasionalmente presentan vesículas, brechas, brechas piroclásticas con bloques de hasta 15 centímetros, tobas de lapilli de color gris claro a blanco y conglomerados compuestos por matriz verdosa y por clastos andesíticos de hasta 20 centímetros. En este sector se ha reconocido la fuente de emisión de la Formación Chile-Alemania, caracterizada por un conjunto de diques dispuestos en forma radial, los cuales poseen dimensiones que van desde 1 a 25 metros y cortan a las lavas de la Formación Chile-Alemania. Los diques radiales corresponden a dacitas de hornblenda y poseen color pardo

claro a verdoso. En la zona central de la estructura radial, la cual abarca entre 6 a 8 kilómetros de diámetro, afloran pórfidos con textura de grano fino, de composición diorítica y monzodiorítica.

Edades, correlaciones e interpretación ambiental

Según relaciones de contactos con la Formación Santa Ana de edad Cretácica Inferior y con las Gravas de Atacama de edad Oligocena-Miocena, se estima que la Formación Chile-Alemania se formó durante el Cretácico Superior al Terciario Inferior. Por otra parte, dataciones radiométricas de K-Ar en rocas de esta unidad caen en el rango de edades de 66 ± 5 y 47 ± 2 Ma, indicando que el origen de la Formación Chile-Alemania se restringe a una edad perteneciente al Paleoceno-Eoceno Medio.

La Formación Chile-Alemania es parte de una cadena volcánica antigua del margen continental activo, siendo la más occidental de las unidades volcánicas Cenozoicas de la zona de estudio.

2.2.7. Gravas de Atacama

Definición

Denominación informal para los depósitos de gravas no consolidadas, polimícticas y de mala selección, las cuales, ocasionalmente, pueden encontrarse cementadas y pueden presentar intercalaciones con flujos de ignimbritas. Definidas por Mortimer (1973).

Distribución, relaciones de contacto y espesor

Afloran en la depresión central, en una gran extensión del norte de Chile y en la zona de estudio se disponen en la parte oriental.

Las Gravas de Atacama sobreyacen en discordancia angular y de erosión a la Formación Chile-Alemania y a la Formación Aeropuerto y están parcialmente cubiertas por depósitos coluviales y salinos más modernos.

Los espesores expuestos en la zona de estudio varían entre 5 y 150 metros en distintos afloramientos.

Litología

Se componen por depósitos no consolidados de gravas y menor cantidad de arenas, con clastos angulosos a subredondeados, los clastos son mal seleccionados, con diámetros que van desde los 5 a los 20 centímetros, la litología que presentan es amplia y depende de las rocas del basamento local. Por otra parte, la matriz es arenosa y eventualmente presenta intercalaciones con cenizas volcánicas.

Las Gravas de Atacama poseen intercalaciones de flujos ignimbríticos, los cuales tienen espesores expuestos que van desde 3 a 30 metros.

Edades, correlaciones e interpretación ambiental

Su formación se debe a la acumulación de flujos de detritos, los cuales son generados por denudación a través del alzamiento de los terrenos andinos en un clima árido (Mortimer, 1973). La edad de las Gravas de Atacama es Oligocena-Miocena, la cual es obtenida por edades radiométricas K-Ar en las ignimbritas intercaladas con las gravas, se infiere que la denudación se produce contemporáneamente con la generación de aparatos volcánicos compuestos durante este periodo.

2.3. Rocas intrusivas

2.3.1. Grupo Plutónico Cifuncho

Definición

Conjunto de rocas plutónicas leucocráticas de grano grueso, de composiciones tipo sieno y monzogranito, que se disponen en la Cordillera de la Costa, al sur del paralelo 25°30' S.

Distribución, relaciones de contacto

Se distribuyen discontinuamente de norte a sur en la zona occidental del distrito Altamira, al lado oriente de la zona de Falla Atacama.

El Grupo Plutónico Cifuncho intruye a la Formación Las Tórtolas, posterior a la deformación de esta, y subyace discordantemente a rocas del Triásico Superior hacia el occidente del área de estudio, en cercanía a la línea de la costa.

Petrografía

El Grupo Plutónico Cifuncho posee homogeneidad en la composición y texturas de las rocas, con composiciones típicas de monzogranito y sienogranito, mientras que las texturas reportadas son de grano grueso.

Los intrusivos están compuestos por cuarzo anhedral; plagioclasa de tipo andesina-oligoclasa; feldespato potásico micropertítico intersticial y, en ocasiones, por biotita en cristales tabulares. En ciertos afloramientos se observa muscovita y accesorios como circón y apatitos. La petrografía sobre muestras de esta unidad, señala que los granitoides son rocas de tipo S (derivados de la fusión de rocas sedimentarias o metasedimentarias).

Edades y correlaciones

A través de K-Ar en biotita (Ulriksen, 1979) es posible obtener una edad restringida al Pérmico Inferior para el Grupo Plutónico Cifuncho, mientras que, a través de edades en biotitas secundarias se evidencia una posible edad de recristalización en el Pérmico Superior.

2.3.2. Grupo Plutónico Cerro Del Pingo

Definición

Definido por primera vez por Ulriksen (1979) como un gran batolito Cretácico, el cual aflora en el sector de Cerro del Pingo. Dentro de las composiciones reportadas por Ulriksen (1979) se incluyen dioritas, granodioritas y adamelitas. Posteriormente se ha documentado una gran variedad petrográfica que va desde dioritas hasta tonalitas, incluyendo también granodioritas y granitos, los cuales no poseen grandes variaciones texturales.

Distribución, relaciones de contacto

Los afloramientos del Grupo Plutónico Cerro del Pingo están ubicados al occidente de la zona de estudio, prolongados continuamente de norte a sur.

Las rocas intrusivas del Grupo Plutónico Cerro del Pingo se encuentran intruyendo a la Formación Las Tórtolas, a granitoides asignados al Grupo Plutónico Cifuncho y a volcanitas y sedimentitas de la Formación Aeropuerto. Por otra parte, estos intrusivos subyacen en discordancia de erosión a volcanitas de la Formación Chile-Alemania.

Petrografía

Las rocas dioríticas presentes en esta unidad tienen texturas de tipo hipidiomorfa-granular a porfírico-intergranular. Los cristales presentes en las dioritas corresponden a plagioclasas, las cuales poseen mayor ocurrencia (40-78%), seguido por minerales de anfíbolos (5-40%) de colores verdosos, ocasionalmente se presentan clinopiroxenos (2-7%), los cuales son subhedrales y presentan maclas de exsolución, finalmente se reporta cuarzo entre 0.5 a 10%, el cual ocurre particularmente en dioritas cuarcíferas. Los accesorios presentes en las rocas dioríticas corresponden principalmente a apatito y esfeno (asociado a piroxenos).

Las rocas monzodioríticas generalmente son cuarcíferas de textura hipidiomorfa-granular. Estas rocas presentan plagioclasas entre un 45 a un 60%; ortoclasa, con ocurrencia entre un 10 a 22%; cuarzo con abundancia entre un 5 a un 15%; anfíbolos, desde un 1 a un 11% y cristales de biotitas entre un 1 y 7%.

Las tonalitas tienen textura hipidiomorfa-granular, en ocasiones porfírica, poseen minerales de plagioclasa (40-60%); cuarzo anhedral (18-30%); ortoclasa (4-7%); anfíbola verde (11-20%); y ocasionalmente clinopiroxeno (4%).

Las rocas graníticas corresponden mayoritariamente a monzogranitos y en menor ocurrencia a sienogranitos. Las texturas que se presentan en estas rocas son hipidiomorfa-granular, simplectítica y porfírica. El mineral más abundante en las rocas graníticas corresponde a

plagioclasa con un 27 a 35% de ocurrencia, seguido por feldespato potásico con abundancia entre un 22 y un 50%, también se presentan cristales de cuarzo en un 4 a un 8%, seguido por hornblenda verde entre 4 a 9% y finalmente se registra la presencia de opacos con menos de un 4% en abundancia. El accesorio principal en las rocas graníticas corresponde a esfeno.

Ocasionalmente afloran cuerpos gabroides anortosíticos, los cuales presentan textura hipidiomorfa-granular gruesa y están formados por plagioclasa (70-80%); cuarzo anhedral (<5%) y otros cristales ferromagnesianos con anfíbola (10-15%).

Edades y correlaciones

Por relaciones de contacto con otras unidades se estima que la edad para la intrusión del Grupo Plutónico Cerro del Pingo se extiende desde el Cretácico Inferior al Paleoceno, sin embargo, las edades radiométricas restringen su edad al Cretácico Inferior.

Debido a la relación temporal y espacial entre la franja de afloramientos de los intrusivos pertenecientes al Grupo Plutónico Cerro del Pingo y la Formación Aeropuerto se sugiere que estos plutones se relacionan al volcanismo que dio origen a la Formación Aeropuerto.

2.4. Rocas no consolidadas

2.4.1. Depósitos Aluviales y Coluviales Modernos

Estos depósitos se distribuyen en toda el área de estudio y se definen como un conjunto heterogéneo de gravas, arenas y limos, los cuales son originados a través de corrientes de barro, “avenidas” y procesos gravitacionales, productos de la denudación e incisión de rocas preexistentes.

Los coluvios se restringen a los faldeos abruptos de las quebradas y cerros. Estos depósitos son monomícticos, poseen bloques angulosos y gradan lateralmente a depósitos aluviales. Los coluvios son acarreados por corrientes torrenciales en las quebradas y generalmente se forman como abanicos coalescentes, ocupando extensas planicies y llanuras.

2.5. Geología estructural

2.5.1. Pliegues

Las formaciones de edades Paleozoicas asociadas a la Cordillera de la Costa presentan fábricas estructurales regionalmente penetrativas. Particularmente en la zona de estudio, la Formación Las Tórtolas muestra esta configuración (Naranjo, 1978).

En la Formación Las Tórtolas existen dos etapas sobreimpuestas de deformación. La primera etapa originó pliegues “chevrón” apretados y asimétricos, los cuales poseen ángulos apicales de 3-35°, en esta etapa también se generaron ángulos longitudinales con tamaños de onda cercanos a los 100 metros, los planos axiales de los ángulos apicales mantean entre 25 y 75°. La segunda fase se caracteriza por intensidad variable, debido a que no se observan en todas las localidades los elementos estructurales que la representan, estos elementos corresponden a pliegues sobreimpuestos a los de la primera deformación, estos pliegues son de tipo zig-zag o en cofre, poseen longitudes que van entre pocos milímetros a 20 metros, y tienen un ángulo apical entre 35 y 120° (Bell, 1984).

Las unidades estratigráficas mesozoicas ubicadas en la Cordillera de la Costa no están afectadas por deformación penetrativa. La deformación presente en estas rocas corresponde a un monoclinal simple, inclinado al este con un manteo variable entre 45° a subhorizontal. Particularmente en la Formación Aeropuerto se presentan pliegues volcados hacia el este, con longitudes de hasta 50 metros y con 30 metros de amplitud, también se presentan planos axiales de rumbo N-S con inclinación de 30° hacia el este.

2.5.2. Fallas

Zona de Falla Atacama (ZFA)

Definida por Amand y Allen (1960) como un rasgo estructural mayor, de orientación general norte-sur y que se extiende en la Cordillera de la Costa del norte de Chile desde Iquique hasta los 29° sur.

El segmento El Salado corresponde a la parte de la Zona de Falla de Atacama que se dispone en el área de estudio, este segmento se asocia a numerosas trazas de fallas secundarias. La traza oriental del segmento El Salado es múltiple y su rumbo es aproximadamente N15°W, esta traza está desarrollada en forma continua a través de 55 kilómetros y se le asocian angostas franjas de rocas fracturadas. La traza oriental del segmento El Salado pone en contacto a rocas volcánicas andesíticas de la Formación Aeropuerto con la Formación Las tórtolas, también con el Grupo Plutónico Cifuncho y con granitoides del Grupo Plutónico Cerro del Pingo. La traza occidental del segmento El Salado pone en contacto a rocas que afloran al este pertenecientes a la Formación Aeropuerto con lavas que afloran al oeste de la Formación La Negra.

En la zona sur, fuera del área de estudio, el comienzo de la actividad de la ZFA se ha desarrollado al menos en el Cretácico Inferior. Mientras que en la zona de estudio no es posible definir una edad para el comienzo de la actividad de la ZFA (Naranjo y Puig, 1984).

Falla Taltal

Se dispone de forma oblicua cortando y desplazando a la ZFA. La Falla Taltal posee rumbo N50°W y manteo subvertical con movimientos sinestrales y pone en contacto a la Formación Aeropuerto con la Formación Las Tórtolas y con el Grupo Plutónico Cerro del Pingo. A lo largo de la Falla Taltal existen fallas menores escalonadas de forma paralela a ella, que también poseen desplazamientos sinestrales en “échelon”, los cuales son variables entre 300 y 1000 metros.

Sistema de Fallas menores

Sistema ubicado en el centro-sur de la zona de estudio y hacia el occidente de la ZFA. En este sistema se disponen fallas normales subverticales de pocos kilómetros de largo, las cuales poseen desplazamientos entre 50 y 100 metros. El Sistema de Fallas menores afecta principalmente a las volcanitas de la Formación La Negra.

3. Antecedentes generales de depósitos IOCG en el norte de Chile

En este capítulo se entrega una síntesis del Reporte Técnico de Minera Cielo Azul Ltd. (Simón et al., 2007) y de los estudios de Sillitoe (2003) y Barton (2014) correspondientes a una visión general de los depósitos IOCG del norte de Chile.

El depósito de Barreal Seco presenta características semejantes a los depósitos de tipo iron oxide copper-gold (IOCG), los cuales poseen propiedades diversas y contienen >10% de óxidos de Fe, con bajas concentraciones de Ti en combinación con elevados contenidos de Cu, Au, REE, P, U, Ag y Co, entre otros. Los depósitos IOCG tienden a presentar un importante control estructural o estratigráfico, estando temporal y espacialmente asociados a un metasomatismo de Ca-Na-K intenso de gran extensión (Barton, 2014), que es evidenciado en las alteraciones de tipo potásica y calco-sódica encontradas en esta clase de depósito (Simón et al., 2007).

Barreal Seco forma parte de la llamada Franja o Cinturón Cretácico de IOCG de la Cordillera de la Costa del norte de Chile, el cual se desarrolla asociado al arco plutónico-volcánico del Jurásico al Cretácico Temprano. Este Cinturón IOCG se forma a través de la migración del centro del plutonismo, el cual se trasladó durante el Mesozoico, aproximadamente 50 kilómetros desde el poniente (Cordillera de la Costa) hacia el oriente en el norte de Chile; en la Figura 6 se observa la migración hacia el este del arco magmático y de los depósitos IOCG asociados, los cuales disminuyen marcadamente en ocurrencia a partir del Cretácico Tardío en adelante (Simón et al., 2007).

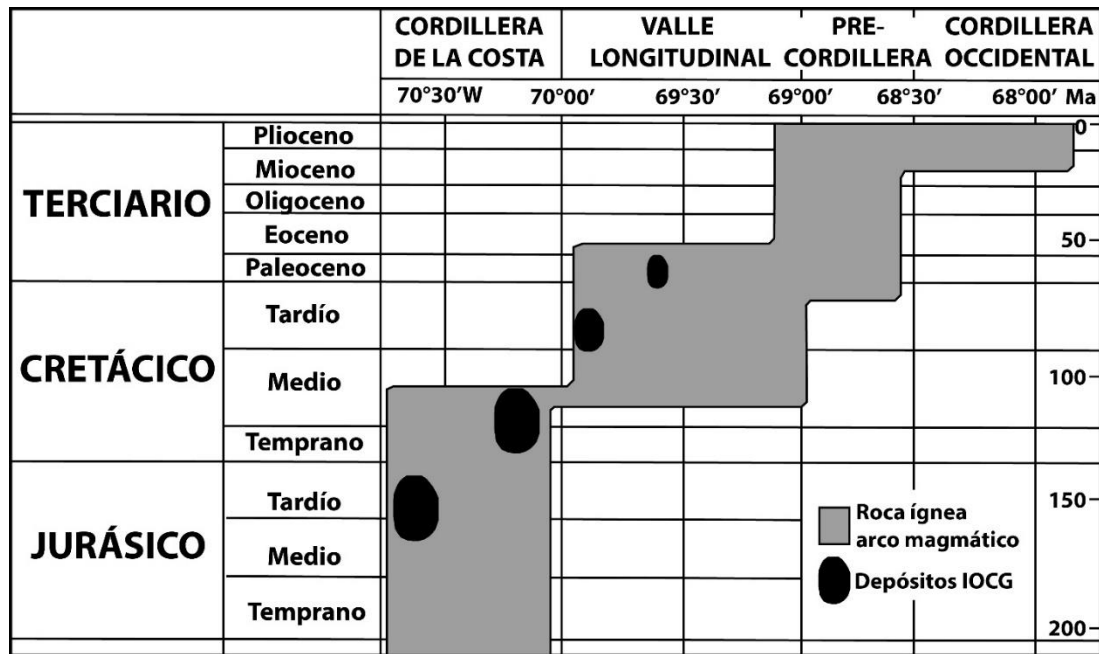


Figura 6. Distribución espacial y temporal generalizada de las rocas del arco magmático (Hammerschmidt, 1992) y de los depósitos IOCG en el norte de Chile. Modificado de Sillitoe (2003).

La mayoría de los grandes depósitos IOCG (ej. Mantoverde y Candelaria) y varios ejemplos de depósitos pequeños se localizan en la parte más oriental de la Cordillera de la Costa (Figura 7) y se formaron durante el Cretácico Temprano (Sillitoe, 2003). Barreal Seco se localiza en este sector y su edad de formación, reportada por Barra et al. (2017), corresponde al Cretácico (Re-Os en calcopirita).

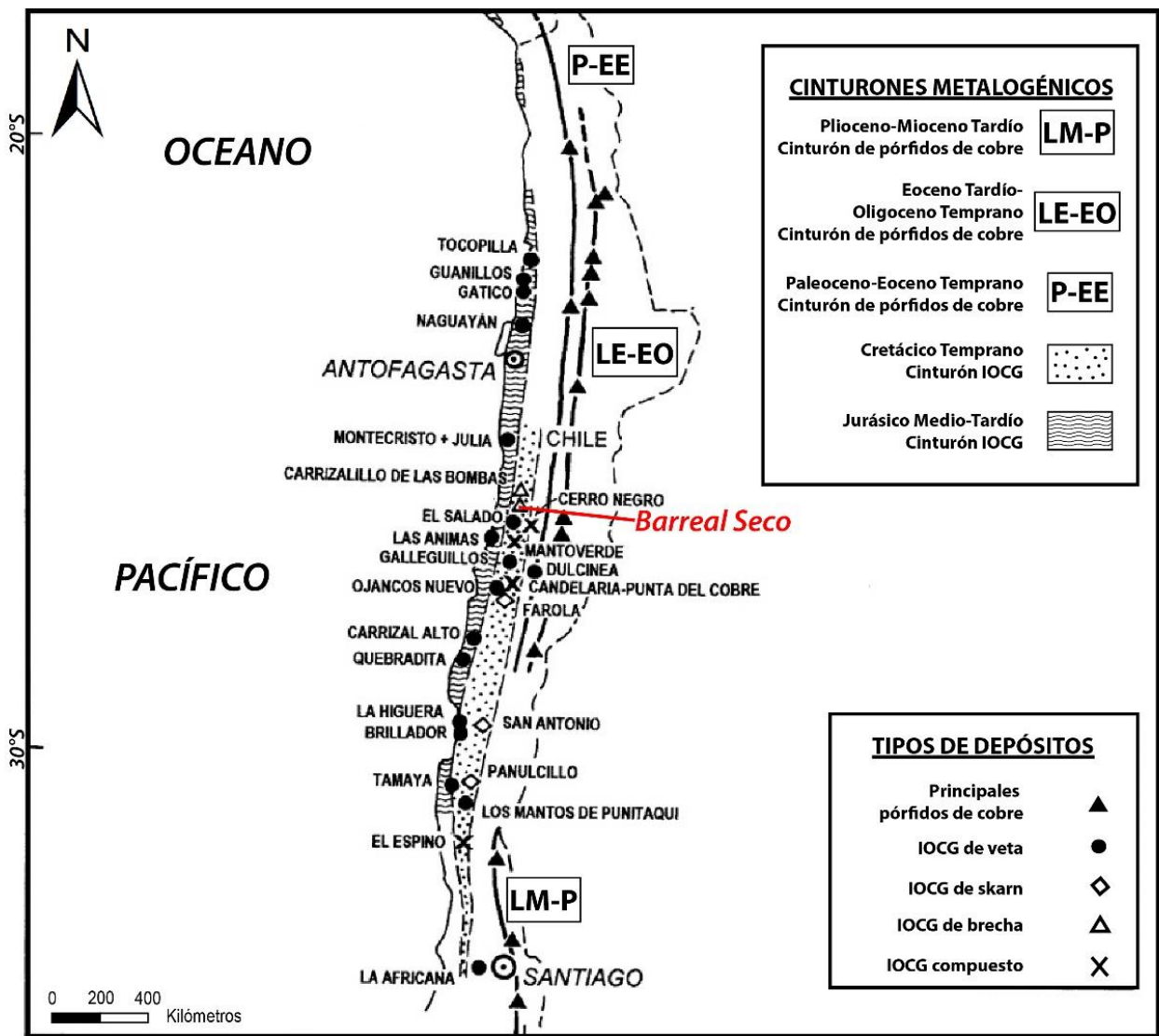


Figura 7. Subdivisión de cinturones de depósitos IOCG, al oeste del mapa se extiende la provincia del Jurásico Tardío-Medio y al este la provincia del Cretácico Temprano. En la figura se indican los ejes del área de los cinturones de depósitos de pórfidos de cobre del Paleoceno-Eoceno Temprano, Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano, y Mioceno Tardío-Plioceno, incluyendo la localización de los principales depósitos. Modificado de Sillitoe (2003).

Los depósitos IOCG del Cretácico, pertenecientes al Cinturón metalogénico en el norte de Chile, poseen cercana relación con complejos plutónicos y son relativamente contemporáneos a sistemas de fallas mayores. La composición de las intrusiones cercanas a los depósitos IOCG son significativamente variables (magmas félsicos a básicos) en distintos depósitos (Barton, 2014), y el sistema que condiciona principalmente el emplazamiento de los depósitos asociados a esta franja corresponde al Sistema de Falla Atacama en la Cordillera de la Costa (Sillitoe, 2003).

Los estilos de mineralización de estos depósitos son diversos, en los cuales se incluyen vetas, brechas hidrotermales, mantos, skarns cálcicos y depósitos compuestos que combinan las anteriores configuraciones. Los tipos de depósitos IOCG con mayor contenido de cobre son principalmente discordantes a la estratificación, controlados principalmente por brechas y vetas (Sillitoe, 2003).

Según diversos autores (Espinoza et al., 1996; Sillitoe, 2003) existe una zonificación mineralógica en los depósitos de tipo IOCG, donde la mineralización rica en hematita ubicada en niveles superiores suele gradar transicionalmente a magnetita hacia profundidades intermedias, y en ocasiones, puede estar espacialmente asociada en mayores profundidades a cuerpos de magnetita-apatito tipo “Kiruna” o iron oxide-apatite (IOA)

3.1. Depósitos IOCG con mineralización de hematita-calcopirita

La asociación mineral hematita-calcopiritita relacionada a depósitos IOCG acontece en la Cordillera de la Costa y es comunmente hospedada por rocas andesíticas porfíricas, por brechas andesíticas, conglomerados y areniscas. La morfología en que se dispone la mineralización presenta chimeneas de brechas, vetas y enjambres de vetillas. La mineralización primaria incluye specularita, calcopirita y pirita, mientras que la mineralización secundaria incorpora atacamita, crisocola, malaquita, almagre, cuprita, calcosina y covelina (Bonson, 1998).

El volumen que pueden alcanzar los cuerpos de hematita-calcopirita va de 1 Mt a 120 Mt y menos de 1% de Cu en la zona primaria y entre 1 y 3% de Cu en la parte de enriquecimiento supérgeno (Bonson, 1998). La mayoría de los sistemas IOCG con mineralización hematita-calcopirita se forman en la corteza superior, con mineralización a pocos kilómetros de la superficie, pero con alteración asociada a mayores profundidades. Las temperaturas de formación son moderadas, comúnmente menores a 200-300°C (Barton, 2014).

4. Geología del yacimiento de Barreal Seco

4.1. Introducción

El yacimiento de Barreal Seco se ubica en la Cordillera de la Costa, a 75 km al sureste de Taltal, y corresponde a un depósito de tipo iron oxide-copper-gold (IOCG), caracterizado por estar formado por cuerpos de brechas hidrotermales cuyo principal mineral de matriz es especularita.

Los minerales son explotados principalmente por labores subterráneas y corresponden a oxidados y sulfurados de cobre. La explotación del depósito comenzó en la década del 1950 de manera intermitente, alcanzando su máximo desarrollo extractivo en la década de 1970. En noviembre del 2014 hasta la fecha se encuentra en operación por la Compañía Minera Las Cenizas que explota únicamente oxidados de cobre.

En el reporte técnico de Simón et al. (2007) se estima que los recursos minerales medidos e indicados para oxidados de cobre, con ley de corte sobre 0.3% CuT, son del orden de 26.3 millones de toneladas, con leyes en torno al 0.56% CuT, mientras que en otros dominios minerales (lixiviados, mineralización primaria y mezcla) los recursos con ley de corte sobre el 0.3% CuT son 3.8 millones de toneladas aproximadamente. Por otra parte, en la mayor zona del depósito, el oro se encuentra bajo las 20 ppb, mientras que en las zonas de alto grado de mineralización va desde los 100 a los 250 ppb (Hopper y Correa, 2000).

Los principales estudios tratados a continuación corresponden a las investigaciones de Correa (2000), Hopper y Correa (2000), Barra et al. (2017) y Reporte Técnico de Minera Cielo Azul Ltd. (Simón et al., 2007), los cuales dan cuenta de las principales configuraciones geológicas reportadas en el yacimiento de Barreal Seco.

4.2. Litología

El depósito de Barreal Seco está emplazado en rocas volcánicas y sedimentarias pertenecientes a la Formación Aeropuerto del Cretácico Inferior, las cuales están conformadas, a escala distrital, por andesitas porfídicas, brechas volcánicas andesíticas, conglomerados y areniscas (Figura 8). A 200 metros de profundidad de la superficie del prospecto ha sido reportada a través de sondajes, una secuencia de rocas evaporíticas, que subyacen en concordancia a las rocas volcánicas mencionadas anteriormente. La unidad de evaporitas corresponde a una alternancia de carbonatos y sulfatos de calcio, de colores desde blanco a gris claro, con muy buena estratificación y laminaciones regulares. La relación de contacto no es observable, pero se infiere un contacto por falla entre esta unidad y el cuerpo mineralizado de brecha hidrotermal (Figura 9).

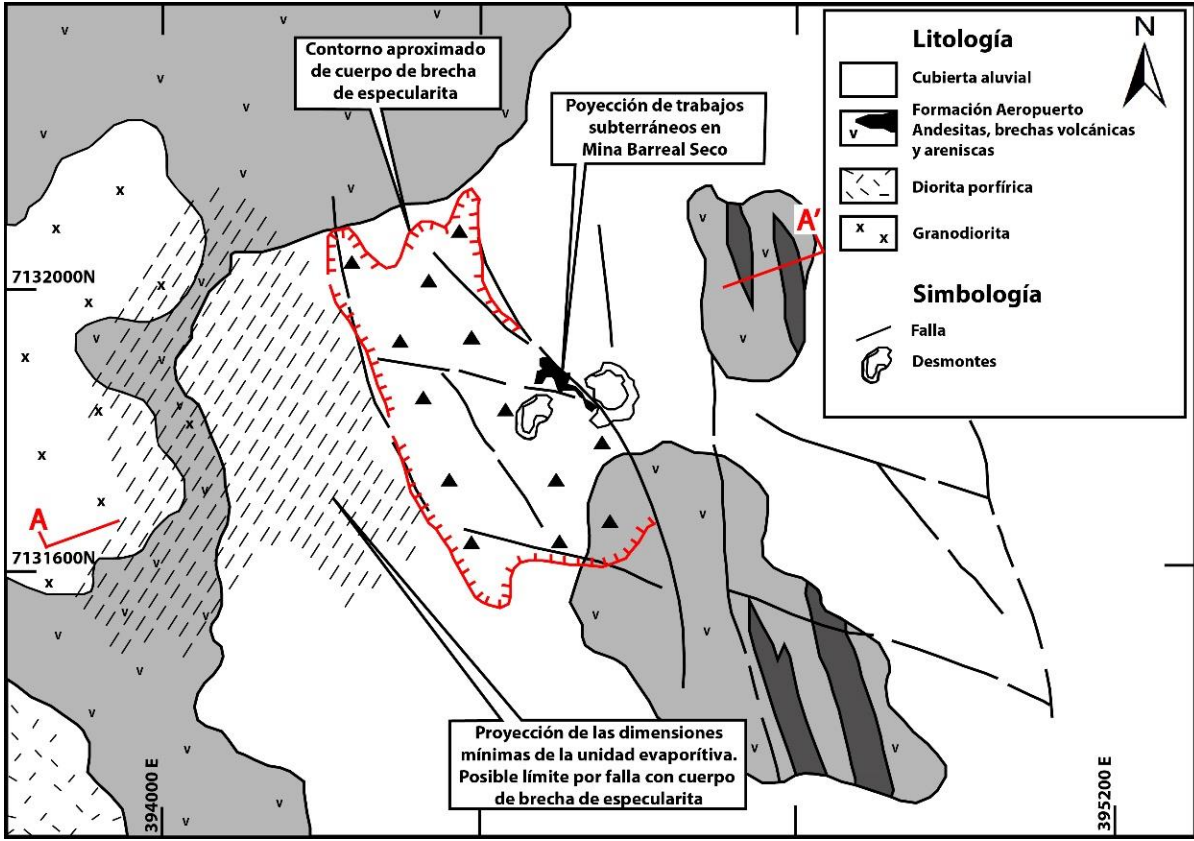


Figura 8. Mapa geológico del prospecto Barreal Seco. Modificado de Correa (2000)

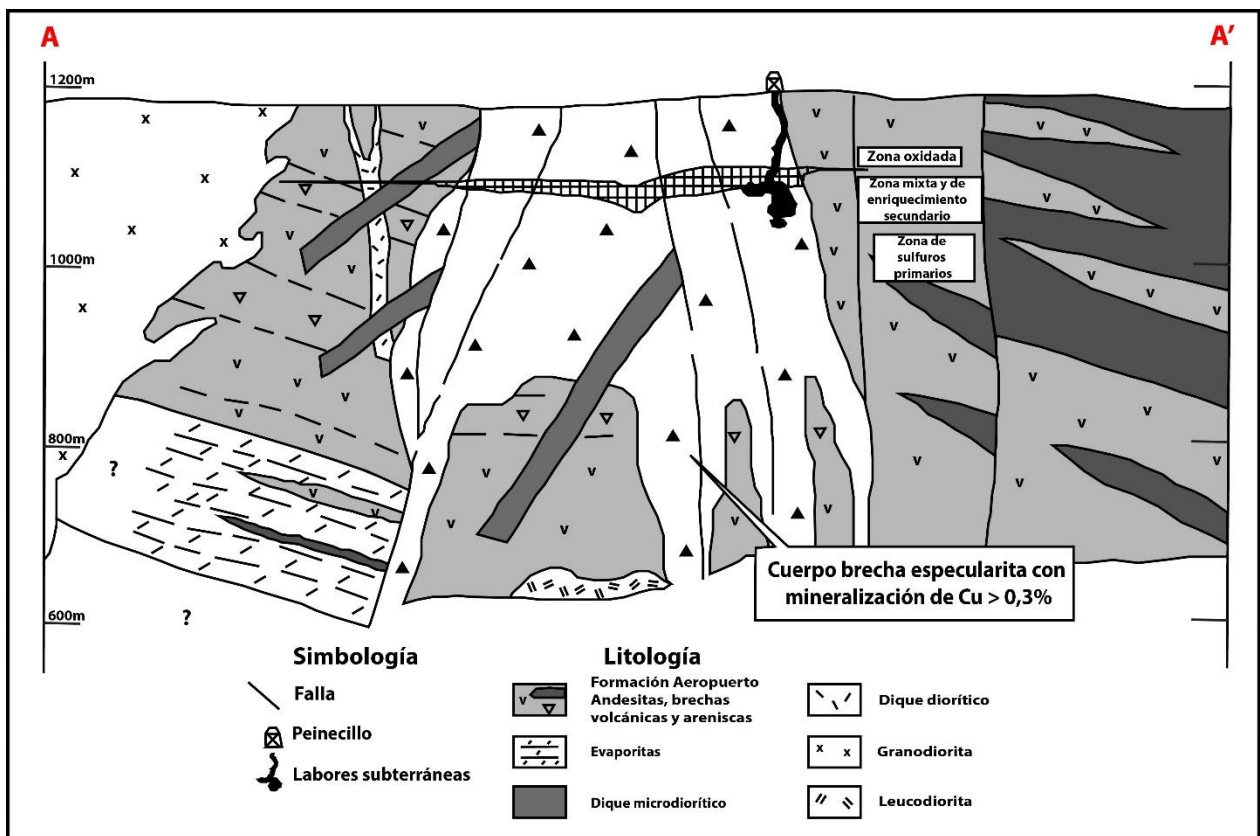


Figura 9. Perfil geológico del depósito de Barreal Seco, donde se observa el cuerpo de brecha principal. El segmento A-A' es indicado en la Figura 8. Modificado de Correa (2000).

Al oeste del depósito afloran cuerpos intrusivos correspondientes a granodioritas de grano fino a medio y a diorita porfírica, los cuales intruyen en profundidad a las andesitas y brechas volcánicas, y probablemente, a la secuencia evaporítica, pertenecientes a la Formación Aeropuerto (Figura 9). El cuerpo mineralizado de brecha hidrotermal de hematita especular se ubica a menos de 400 metros de distancia de este cuerpo intrusivo. Los contactos y la distribución de unidades litológicas que intruyen a la Formación Aeropuerto se pueden observar en las Figura 8 y Figura 9.

En la Figura 10 es posible distinguir al menos cuatro cuerpos de brechas más o menos paralelos, con una amplia orientación NE-SW y 70 a 80° de promedio de manteo, los cuales han sido definidos a través de perforaciones realizadas en el depósito (Simón, 2007):

- **Cuerpo principal:** Es un cuerpo de brecha extremadamente irregular, con numerosas protuberancias, poros y zonas de base. Se extiende sobre 450 metros en dirección NE-SW, 350 metros en dirección NW-SE, y su extensión vertical excede los 230 metros (entre los 1125 y 895 metros de elevación).
- **Cuerpo Noreste:** Posee forma de columna aplanada con 220 metros de longitud en dirección NE-SW, 60 metros de ancho NW-SE y una extensión vertical de casi 210 metros (entre los 1105 y 895 metros de elevación). El cuerpo ubicado al noreste del

depósito está formado en el muro inferior del cuerpo principal, separado a casi 100 metros por material no mineralizado.

- **Cuerpo Sudeste:** Posee forma de bota y posee una longitud de 110 metros aproximadamente con orientación NE-SW, de ancho alcanza los 70 metros con rumbo NW-SE, la extensión vertical es de casi 90 metros (entre los 985 y los 895 metros de altitud). También se formó en la pared inferior del cuerpo principal, separado a 100 metros por roca sin mineralización.
- **Cuerpo Este:** Formado por robustas columnas isométricas con 60 metros aproximados de largo hacia el NE-SW y 50 metros de ancho (NW-SE). Su extensión vertical es cercana a los 220 metros (entre 1115 y 895 metros de elevación). Este cuerpo está localizado al este del cuerpo Noroeste.

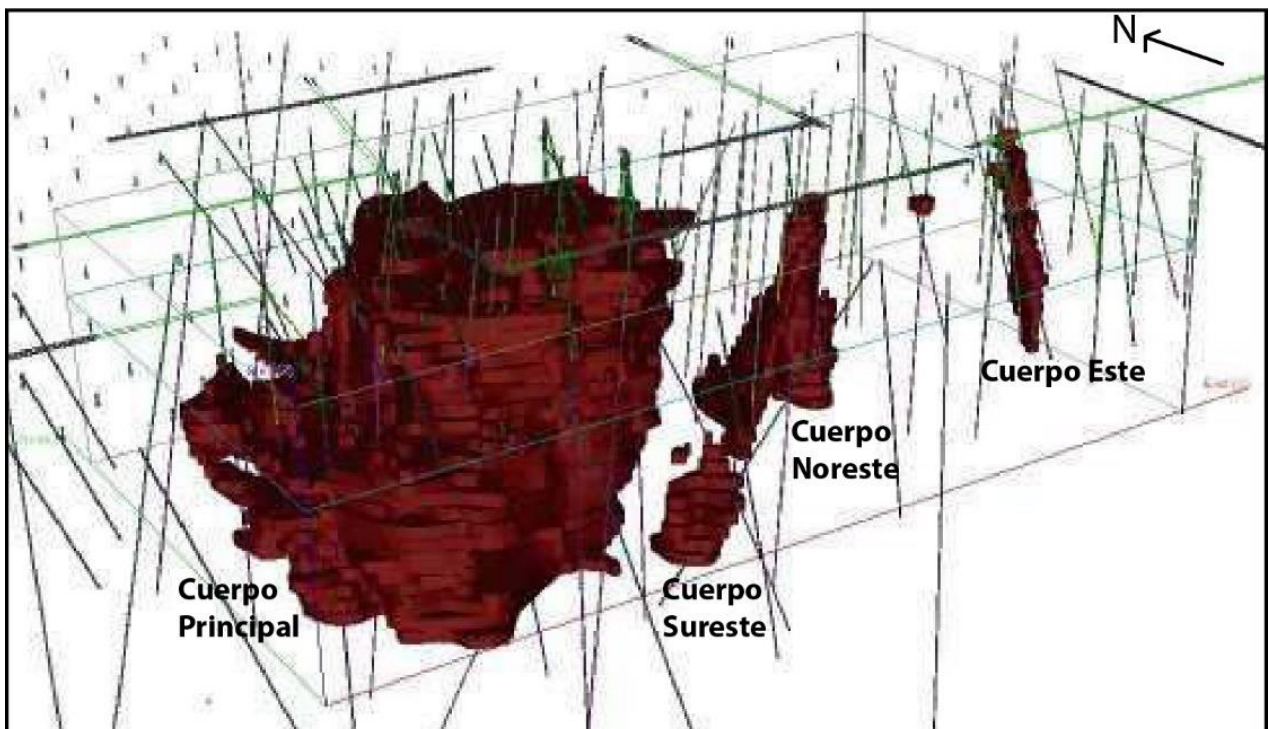


Figura 10. Vista isométrica 3D de cuerpos de brechas del depósito Barreal Seco. Líneas sub-verticales corresponden a sondajes realizados a la fecha del año 2007. Figura modificada de Simón (2007)

4.3. Elementos estructurales

La Formación Aeropuerto localmente posee rumbos NW a NNW y manteos de 30° a 60° NE a ENE, con un promedio de 45°.

Se reconoce en el depósito un control estructural bien definido que condiciona en particular la morfología del cuerpo de brecha. En superficie, el cuerpo de brecha se sitúa en la intersección entre un conjunto de fallas NNW y un set de fallas de tendencia WNW (Figura 8). En estos set de estructuras se aprecian evidencias de varios eventos de fallamiento de carácter sin- y post- mineral, cuya superposición en el cuerpo de brecha ha generado una complicada e irregular distribución de la mineralización.

Existen indicadores cinemáticos reconocidos en las fallas NNW que evidencian movimientos sinestrales, en los cuales se superponen posteriores indicadores de movimientos extensionales. Estos movimientos extensionales han generado la dislocación y colapso del depósito en bloques, durante y después de la mineralización de cobre; estas fallas tardías son subverticales y tienen una orientación general NS.

4.4. Mineralogía

La mineralización de cobre en el depósito de Barreal Seco se concentra principalmente en los cuatro cuerpos de la matriz de la brecha hidrotermal, y en menor grado en vetillas y de forma diseminada, en una relación de 4:1:1. En la intersección de los conjuntos de falla mencionados anteriormente se desarrolla la principal y más intensa brechización, que influye en el incremento del grado de mineralización, contribuyendo en el desarrollo de zonas de alta ley de cobre y por ende, en la génesis del yacimiento.

Es posible observar en la Figura 9 una zonación vertical en la mineralización de cobre, donde se dispone la zona oxidada desde superficie hasta los 90 metros de profundidad, por debajo de esto, de forma irregular y discontinua, entre los 90 a los 100 metros de profundidad, se extiende la zona de enriquecimiento secundaria. Finalmente bajo los 100 metros y hasta los 500 metros de profundidad se encuentran los sulfuros primarios o hipógenos. Existe una zona de mezcla donde los minerales sulfurados y oxidados coexisten a poca profundidad. El total de contenido de sulfuros es baja, excediendo rara vez el 2%, con mayor contenido de calcopirita que de pirita.

De acuerdo a Correa (2000), la formación de la mineralización hipógena se desarrolló en dos etapas y consiste en pirita, calcopirita y especularita.

4.4.1. Mineralogía primaria

Primera etapa

La primera etapa de mineralización consistió en la formación de pirita idiomórfica seguida de calcopirita subidiomórfica que rodea y/o reemplaza a la pirita. La intensidad del reemplazo aumenta en el centro del depósito con razones de calcopirita:pirita de 5:1, mientras que en la periferia la razón tiende a 1:1. La mineralización de calcopirita ocurre de tres formas: a) como cúmulos de cristales que alcanzan los dos centímetros, localizados dentro de las vetas de specularita y en las zonas de mayor brechización; b) en venas macizas de calcopirita de hasta varios centímetros de espesor; c) como cristales diseminados, pudiendo ocurrir en finas vetillas que cortan las andesitas o como relleno de los espacios de poros de areniscas y conglomerados (Correa, 2000).

Segunda etapa

La segunda etapa de mineralización se caracteriza, principalmente, por la generación de specularita que usualmente se dispone en las mismas fracturas y vetillas que la mineralización sulfurada. La specularita se dispone en fracturas y/o como matriz del cuerpo de brecha, los cristales son idiomórficos y con forma laminar. Es posible encontrar en menor grado specularita reemplazada por hematita (Correa, 2000). También se reporta un bajo aporte de calcopirita en comparación a la primera etapa (Correa, 2000).

Esta etapa se da en condiciones de deformación frágil. Es probable que la deformación haya sido generada por un evento de descompresión explosivo, que dio paso a la formación de brechas de colapso, a través del desplazamiento rápido de las fallas produciendo la rotura de la roca hospedante, migración rápida de fluidos a través de zonas de baja presión, descompresión repentina y ebullición, provocando una intensa mineralización de relleno en espacios abiertos (Correa, 2000). Simón et al. (2007) reportan en el informe de proyecto de Barreal Seco que los minerales máficos de los testigos de perforación son reemplazados a specularita dentro de los fragmentos de roca, evidenciando de esta forma, la actividad del fluido hidrotermal y la posterior precipitación de minerales.

4.4.2. Mineralogía secundaria

En la zona oxidada del depósito de Barreal Seco, los oxidados de cobre ocurren comúnmente a lo largo de fracturas, pero pueden ser encontrados como pseudomorfos de minerales euédricos sulfurados y como alteración de specularita. Se han reportado distintas fases oxidadas de Fe-Cu; Correa (2000) reporta atacamita en asociación a malaquita, ambas de color verde, las

cuales se encuentran típicamente en fracturas; Simón et al. (2007) asocia atacamita con la ocurrencia de antlerita, brocantita, y en menor grado con crisocola azul y con malaquita de color azul verdoso, también es reportado “almagre” (nombre informal para mineral de color rojizo oscuro y de aspecto terroso) asociado a los cristales oxidados de calcopirita (Correa, 2000).

Por otra parte, los procesos de enriquecimiento secundario de sulfuros parecen ser débiles e irregulares. Existe una zona de enriquecimiento secundaria errática y discontinua caracterizada por la presencia de calcosina y covelina que se dispone en la parte inferior de la zona de oxidación. Esta zona de enriquecimiento secundario se caracteriza por poseer un espesor sobre los 10 metros y por ser más gruesa en los sectores adyacentes a fallas. El volumen errático de enriquecimiento se forma por el moderado a fuerte reemplazo de pirita por calcopirita, lo que no permite las condiciones apropiadas para una mejor lixiviación y el transporte de cobre.

4.5. Alteración hidrotermal

En general la alteración hidrotermal no es significativa en el desarrollo del sistema, su ocurrencia afecta a las rocas dentro de los límites del cuerpo de brecha y puntualmente se extiende hasta unos 50 metros fuera del área mineralizada. Particularmente las rocas intrusivas no presentan alteración hidrotermal relevante, pero muestran un contenido anómalo de hematita especular, observable en vetillas y de forma diseminada, la cual está probablemente relacionada con el emplazamiento y formación del cuerpo mineralizado de brecha hidrotermal de hematita especular (Correa, 2000).

La alteración hidrotermal se dispone en dos etapas relacionadas a los eventos de mineralización antes mencionados, las cuales son descritas a continuación (Correa, 2000).

Primera etapa

El primer episodio consiste en alteración temprana asociada a albita y clorita, con menor participación de cuarzo y calcita. Las rocas volcánicas son afectadas de forma pervasiva, alterando tanto a los fenocristales como a la masa fundamental. También se han reconocido vetillas de calcopirita y pirita con la presencia de halos de albita.

Segunda etapa

El segundo episodio tardío se caracteriza por calcita y yeso/anhidrita, la alteración no es pervasiva y está confinada en las zonas de los cuerpos de brecha, principalmente en vetas de hasta un metro de ancho.

4.6. Consideraciones genéticas

El sistema de brecha hidrotermal asociado a la génesis del yacimiento de Barreal Seco se relaciona temporal y espacialmente con el emplazamiento de un stock leucodiorítico, reconocido en algunos sondajes bajo los 500 metros de profundidad (Figura 9). En este stock se dispone mineralización primaria diseminada, correspondiente a calcopirita, pirita y bornita en bajas cantidades, la cual está asociada a alteración albítica. El cuerpo leucodiorítico se habría emplazado en una etapa tardía de enfriamiento y ascenso de segregaciones ricas en volátiles de Cu y Fe derivados de los cuerpos batolíticos del Cretácico relacionados a la Cordillera de la Costa. Este cuerpo se habría emplazado en zonas de extensión generada por fallas sinestrales de rumbo con mayor actividad en el Cretácico Medio a Superior.

Aunque la unidad evaporítica asociada al depósito de Barreal Seco es una potencial fuente de azufre, valores de isótopos de azufre en pirita ($\delta^{34}\text{S}$ entre 0.15 y 5.15), calcopirita ($\delta^{34}\text{S}$ entre -3.36‰ y 5.51‰) y vetas de yeso/anhidrita ($\delta^{34}\text{S}$ 3.31‰ aprox), pertenecientes a la mineralización del depósito, no están asociados a rangos de valores obtenidos en los sulfatos de la unidad evaporítica ($\delta^{34}\text{S}$ entre 16.7‰ y 18.24‰), indicando que el azufre en la mineralización de Barreal Seco, más bien, posee un origen magmático. Barra et al. (2017) proponen que el depósito de Barreal Seco, perteneciente al grupo de depósitos IOCG (e IOA) del el norte de Chile, fue generado, al igual que este grupo, por procesos principalmente magmaticos-hidrotermales relacionados a la formación y emplazamiento de rocas plutónicas, considerando una menor contribución de fuentes de basamento lixiviado y/o rocas volcánicas encajantes, como también proponen un rol acotado de las salmueras derivadas de cuencas y de sedimentos para la formación de este tipo depósito.

5. RESULTADOS

5.1. Descripción mineralógica

5.1.1. Introducción

Por medio de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (XRD) se realiza la descripción de la paragénesis mineral y se logra determinar la temporalidad de los eventos de alteración y mineralización.

Para la realización de la descripción mineralógica se utilizaron cortes transparentes-pulidos confeccionados a partir del sondaje, los cuales se indicada en la Tabla 1. Mediante estos cortes se realiza la descripción de minerales de ganga por medio de microscopía óptica de luz transmitida, como también de minerales opacos a través de microscopía a luz reflejada. Existen fases minerales semiopacas en donde se utilizan ambos tipos de análisis según la propiedad del mineral que se requiera observar. Estos cortes también son empleados en el microscopio electrónico de barrido (SEM) con el fin de determinar de forma semicuantitativa los datos de composición química de las fases minerales presentes.

Por otra parte, el análisis XRD, realizado por medio de muestras de polvo, reporta fases existentes que permiten confirmar la presencia de minerales observados en ambos microscopios, como también permiten registrar otras fases minerales no documentadas por los métodos anteriormente mencionados.

Se reconocen cuatro eventos de mineralización, los cuales son descritos en el siguiente capítulo junto con las respectivas fases minerales asociadas a estos.

5.1.2. Eventos de mineralización

La roca encajante, donde se forman los distintos episodios de mineralización-alteración, corresponde a una lava andesítica. En esta roca se observan fenocristales de plagioclasa, como también cúmulos cristalinos euhedrales de titanomagnetita y de magnetita, ambos correspondientes a minerales primarios. Mediante el análisis de espectroscopia de energía dispersiva es posible obtener la composición semicuantitativa de los cúmulos cristalinos de titanomagnetita, resultados que se presentan en la Figura 14.

La titanomagnetita se disponen en las muestras N°1 (4.49 m), N°11 (54.3 m) y N°17 (73.3 m). Es posible apreciar su distribución en la Figura 12.A, mientras que los valores

semicuantitativos de su composición química se muestran en la Figura 13, en la Figura 28 y en la Figura Anexo 63.

Evento I de mineralización-alteración

Se define un primer evento de alteración hidrotermal asociado a epidota, clinocloro (perteneciente al grupo de la clorita), cuarzo en vetillas y anhidrita. Esta alteración afecta a los minerales primarios relacionados a la roca andesítica.

Cristales de epidota y clinocloro son formados principalmente como reemplazo de los fenocristales y en menor grado de la matriz de la andesita. Es posible observar en la Figura 12B cristales de epidota de la muestra N°1 (4.49 m), mientras que en la Figura 11 se registra en los resultados de XRD la presencia de clinocloro.

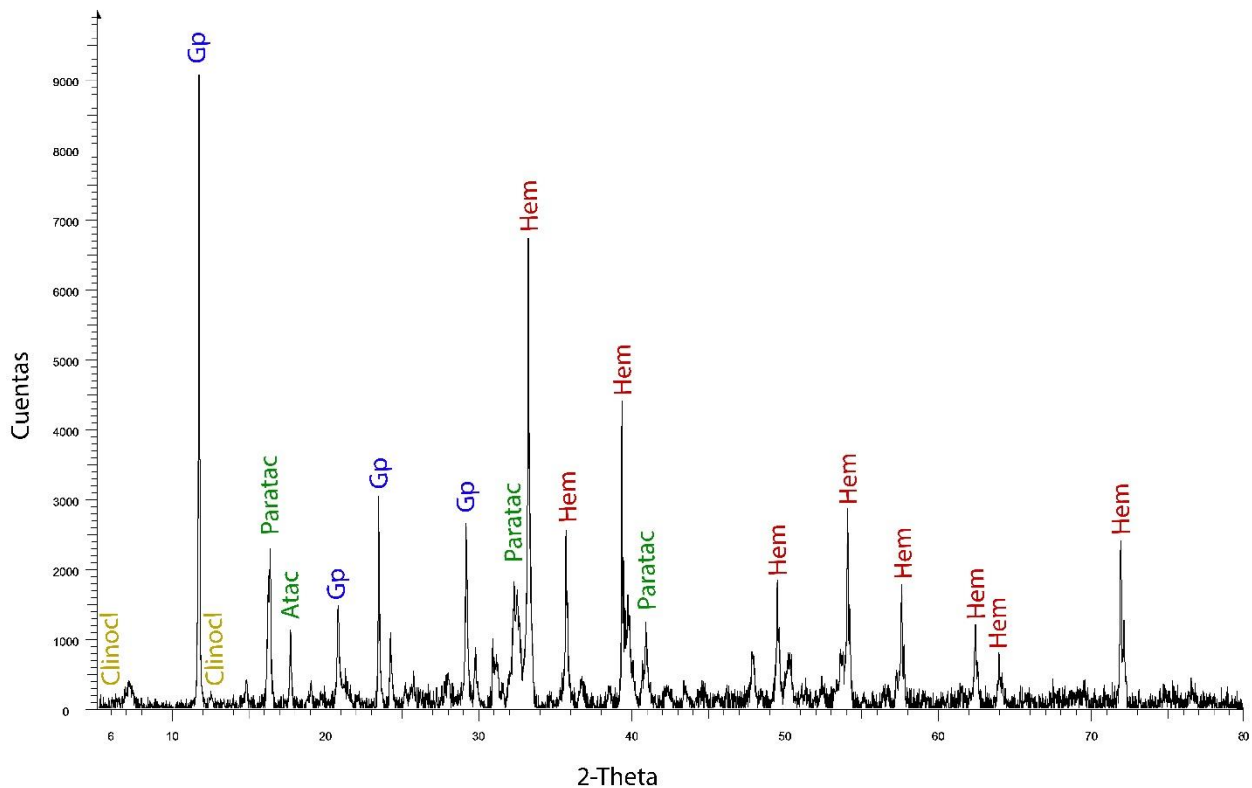


Figura 11. Espectro de difracción de rayos X de la muestra N°3 (13.8 m). Se identifican picos característicos de algunas de las fases minerales presentes en la roca. Gp: yeso, Atac: atacamita, Paratac: paratacamita, Clinocl: clinocloro, Hem: hematita.

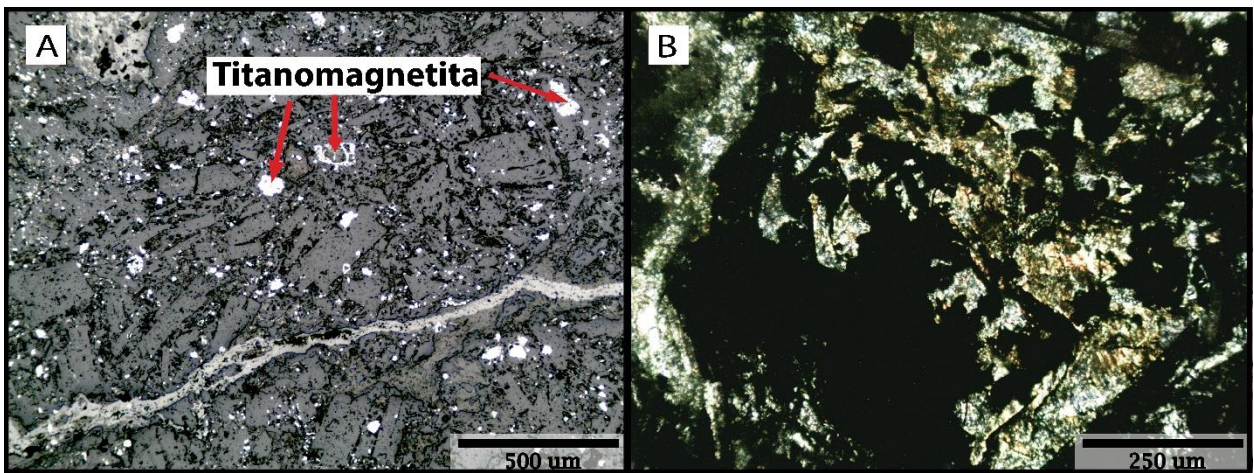


Figura 12. A. Fotomicrografía a luz reflejada en el microscopio óptico, donde se aprecian fenocristales de plagioclasas y cúmulos cristalinos euhedrales de titanomagnetita. Ambas fases son cortadas por una vetilla de mineralización supérgena. B. Fotomicrografía a luz transmitida y a nícoles cruzados. Se aprecia epidota como alteración de los fenocristales y de la matriz de la roca andesítica. Minerales de color negro corresponden a opacos.

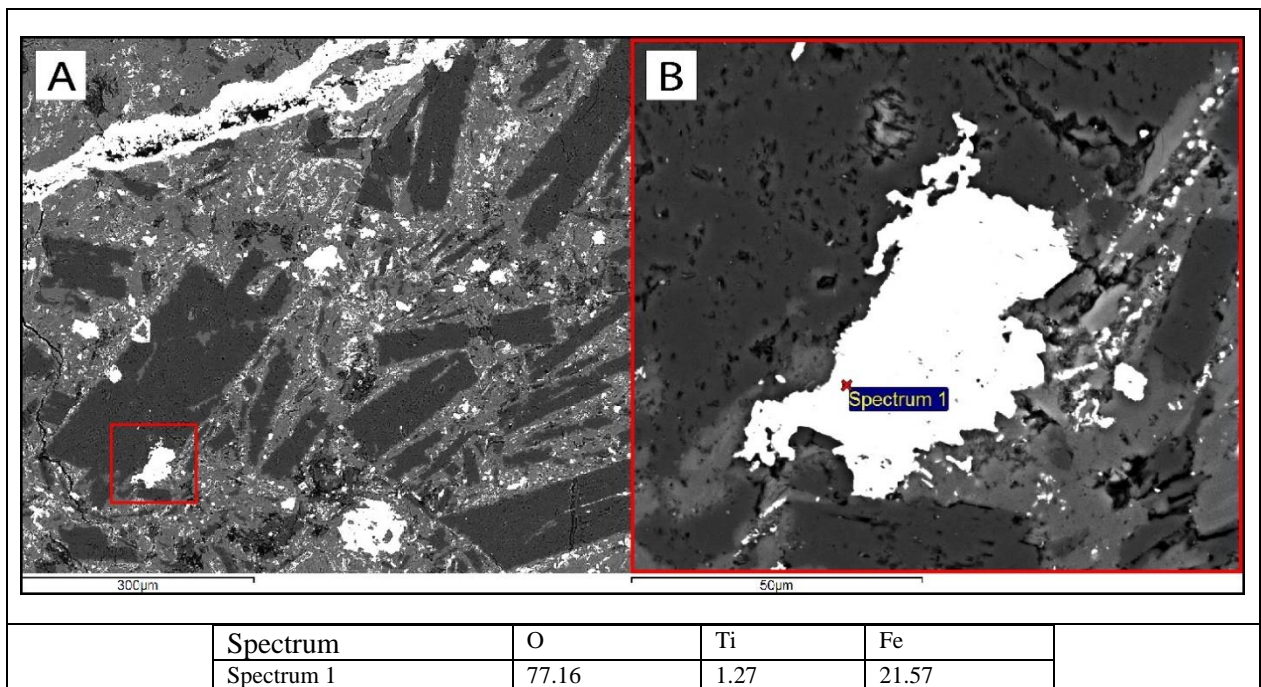


Figura 13. A. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron), donde se observan cúmulos de titanomagnetita asociados a la roca andesítica. B. Detalle del cúmulo cristalino en A, Spectrum 1 corresponde a datos de composición mineral química de los cristales de titanomagnetita (semicuantitativos).

Dentro del primer evento de alteración hidrotermal se registra la formación de cuarzo en vetillas, las cuales cortan la roca encajante. El cuarzo se observa a través de microscopía en las muestras N°6 (27.1 m), N°11 (50 m) y N°17 (65.2 m) y por medio de los resultados de XRD en las muestras N°9 (34.9 m), N°14 (58.35 m), N°19 (73.3 m) y N°20 (78.35 m). El pico característico del cuarzo en los espectros de difracción se indica a modo de ejemplo en la Figura 20.

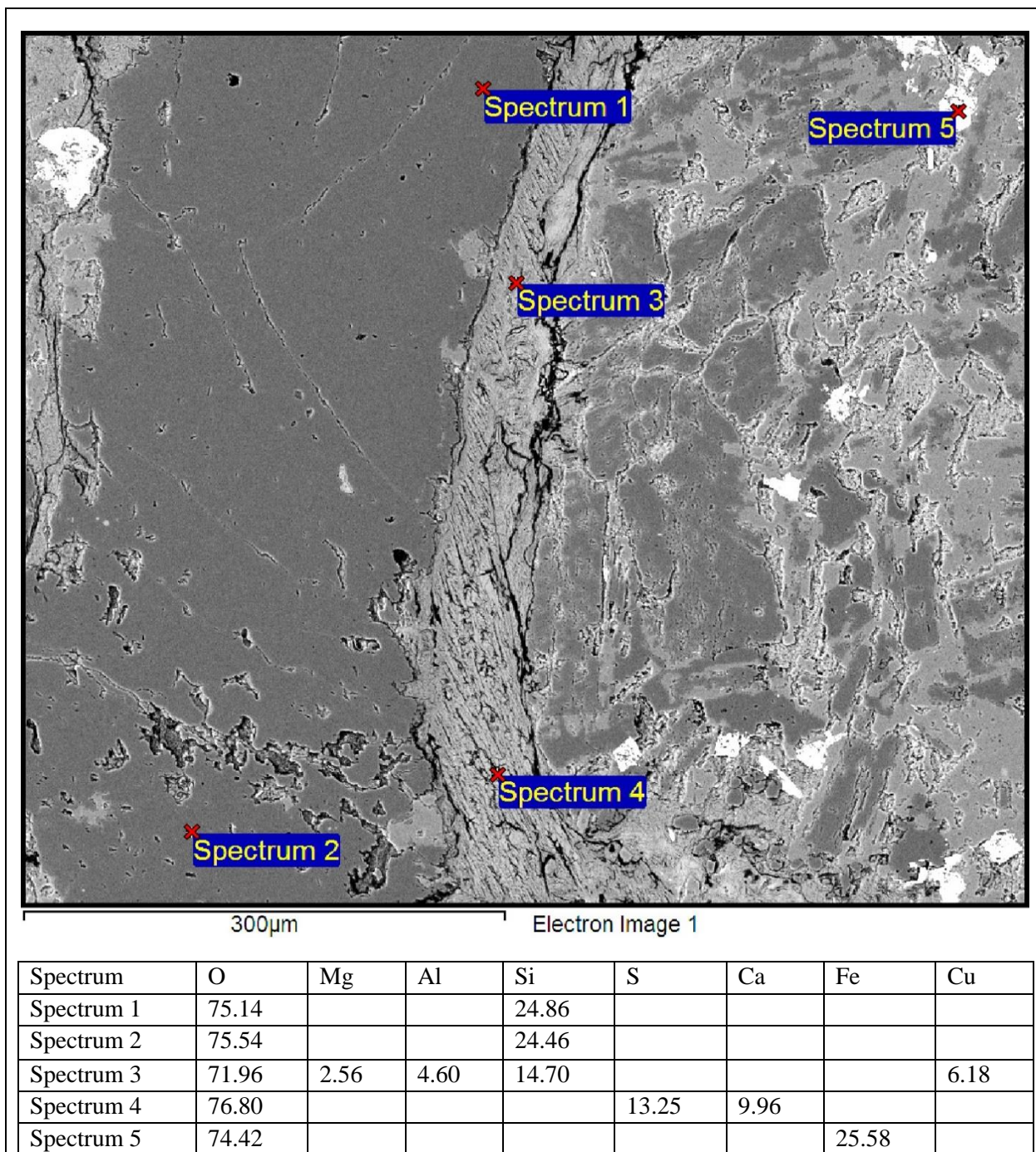


Figura 14. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 están asociados a vetilla de cuarzo que presenta en bordes crisocola (Spectrum 3) and yeso (Spectrum 4). Spectrum 5 muestra valores relacionados a magnetita asociada a los clastos andesíticos. Spectrum 1 al 5 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos).

La anhidrita se presenta en la porción central y profunda del sondaje, específicamente, en las muestras N°11 (50 m), y N°17 (65.2 m). Esta fase mineral se forma principalmente en cristales subhedrales, vetillas y amígdalas asociadas a la alteración hidrotermal en la roca andesítica.

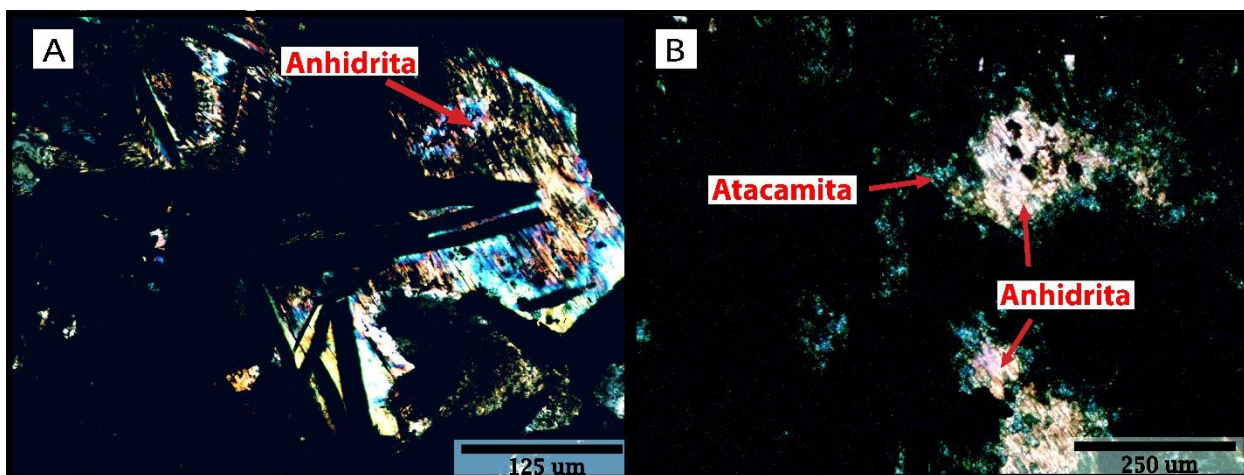


Figura 15. A. Fotomicrografía a luz transmitida y a nicoles cruzados en donde se observan láminas de especularita (opacos) dispuestos sobre cristales subhedrales de anhidrita. B. Fotomicrografía a nicoles cruzados y a luz transmitida, donde se observan cristales de atacamita (\pm polimorfo) reemplazando bordes de amígdala de anhidrita.

Evento II de mineralización-alteración

El segundo evento asociado a mineralización primaria corresponde a la formación de la brecha hidrotermal con matriz de especularita y clastos de andesita. En la Figura 11 y en la Figura 20 se señalan los picos representativos de la hematita especular en los espectros de XRD. La Figura 16 pone en evidencia la relación de corte entre la brecha y una vetilla de cuarzo, la cual es cortada por cristales de hematita especular.

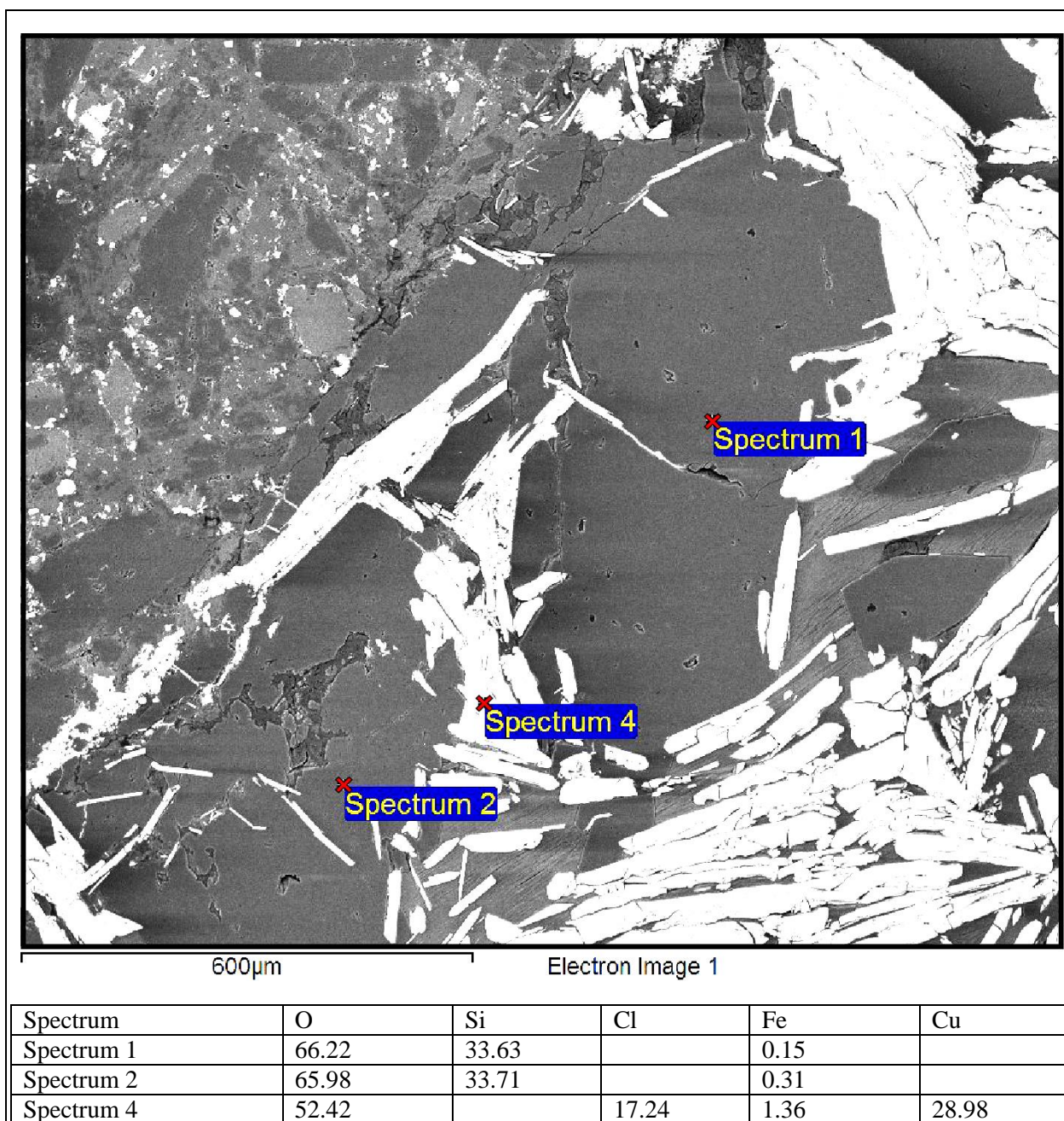


Figura 16. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 corresponden a una vetilla de cuarzo que posee grietas con mineralización de hematita especular relacionada a la brecha hidrotermal. Se disponen cristales de atacamita entre los espacios de las láminas de especularita (Spectrum 4). Spectrum 1, 2 y 4 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos).

Todas las muestras analizadas contienen, en distinta cantidad, minerales oxidados de alteración supérgena, formados en un evento posterior a la brecha hidrotermal, de estas fases minerales oxidadas es posible reconocer dos eventos paragenéticos principales.

Evento III de mineralización-alteración (alteración supérgena I)

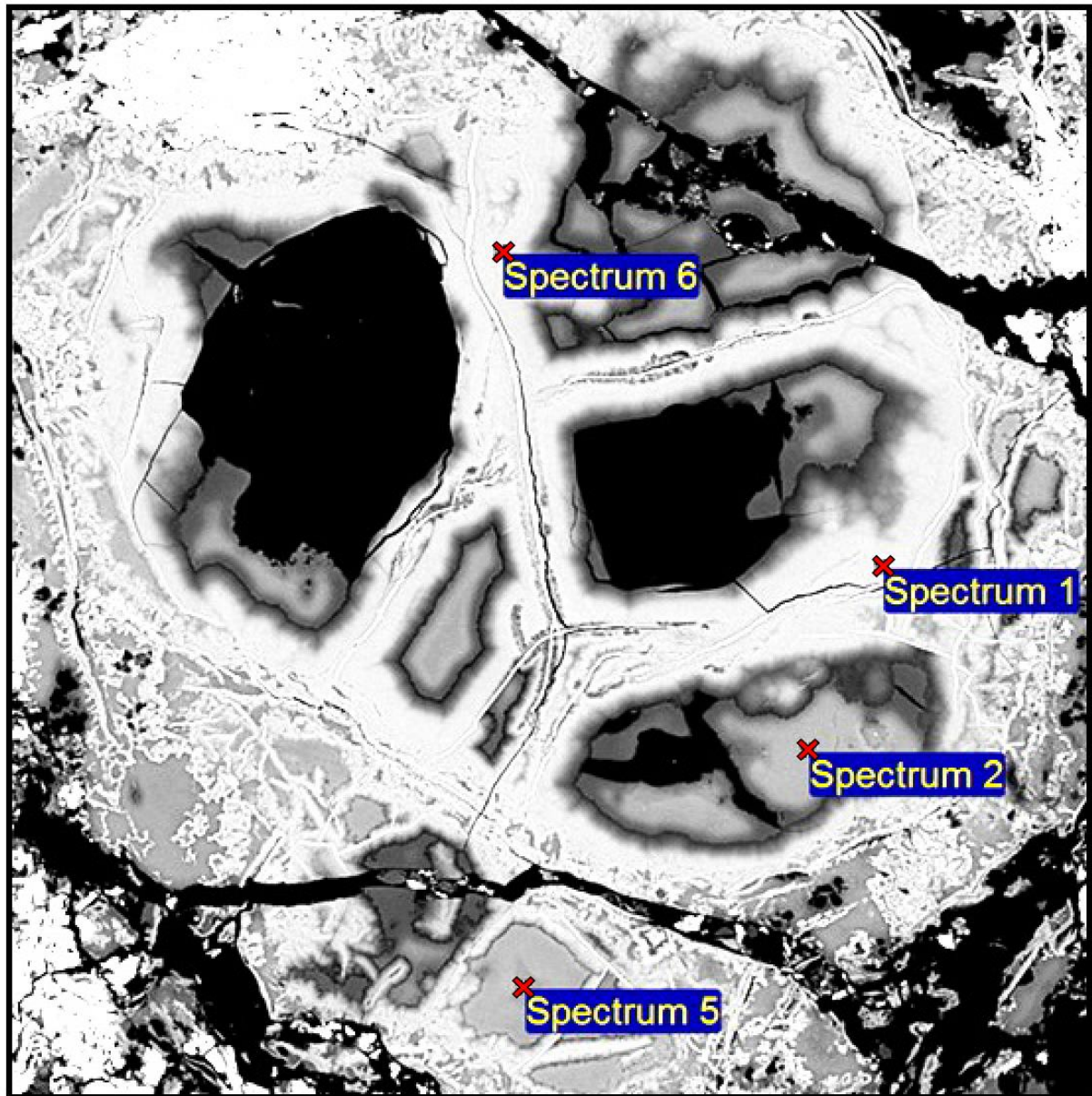
Este evento presenta crisocola como fase principal. Asociados a ésta se observan hidróxidos de hierro con estequiometría variable, goethita y lepidocrocita. Se reporta en este evento de mineralización la formación de pseudomalaquita y la ocurrencia de la fase amorfa “copper pitch”.

La fase principal, correspondiente a crisocola, es una fase amorfa con cantidades variables de hierro en su composición química y se encuentra frecuentemente relleno entre cristales de especularita (Figura 24), en amígdalas (Figura 17) y, en menor grado, en vetillas.

Los hidróxidos de hierro con estequiometría variable se disponen principalmente en pátinas, amígdalas y como reemplazo de otras fases pre-existentes (Figura 17).

Los cristales de goethita poseen crecimiento de lepidocrocita en planos de debilidad. A través de luz reflejada es posible ver ésta configuración en la Figura 18 A y B. También se ha detectado goethita a través de luz transmitida y por DRX. Este mineral se dispone generalmente en bordes de cristales de especularita (Figura 19 A y B). La Figura 20 presenta el pico más representativo de goethita en el espectro XRD.

Asociado a goethita se aprecia lepidocrocita, uno de sus polimorfos, el cual se dispone en planos de debilidad y en bordes de cristales de goethita y de hematita especular (Figura 18).



300µm

Electron Image 1

Spectrum	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Fe	Cu
Spectrum 1	79.06	0.82	0.56	2.78	0.24			14.32	2.23
Spectrum 2	72.98	0.96	1.22	13.90				3.60	7.34
Spectrum 5	71.49	0.76	1.44	16.82		0.19	0.12	0.45	8.73
Spectrum 6	79.19	0.72	0.63	2.74	0.29	0.15		14.02	2.26

Figura 17. Imagen de electrones retrodispersados (BSE). Análisis EDS entrega composiciones asociadas a fases de hidróxidos de hierro con estequiometría variable (Spectrum 1 y 6) como reemplazo de crisocola en bordes de amígdalas. Crisocola es conservada en los centros de las amígdalas (Spectrum 2 y 5). Spectrum 1, 2, 5 y 6 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos).

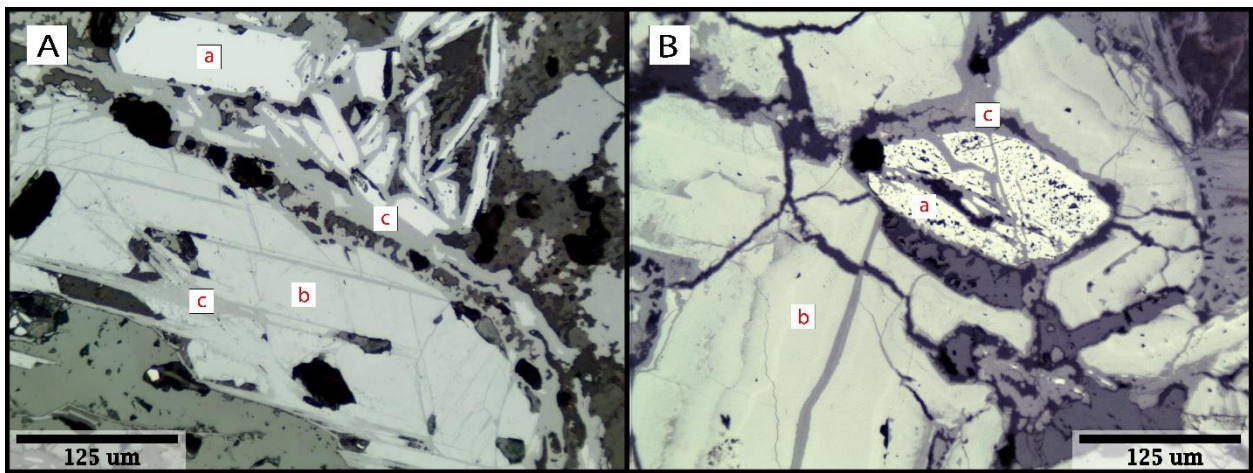


Figura 18. A. Fotomicrografía a luz reflejada donde se dispone specularita (a) y goethita (b) con crecimiento de lepidocrocita en bordes y en planos de debilidad (c). B. Fotomicrografía a luz reflejada donde goethita (b) rodea a specularita (a), mientras que lepidocrocita (c) se dispone como alteración de ambas fases.

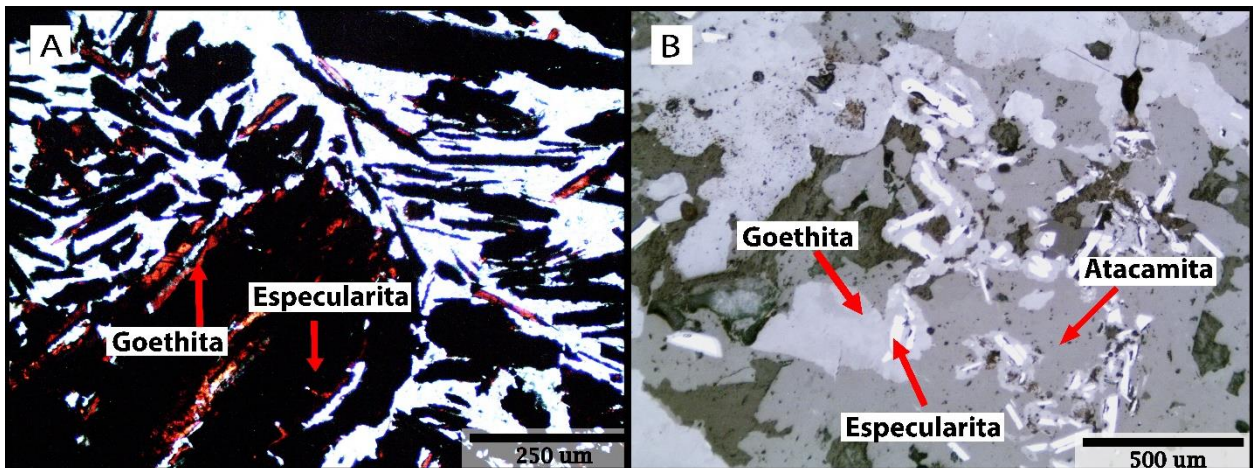


Figura 19. A. Fotomicrografía a luz transmitida y a nícoles cruzados. Se observa goethita de color rojo dispuesta en bordes de cristales de specularita B. Fotomicrografía a luz reflejada de specularita reemplazada en bordes por goethita y con un reemplazo parcial posterior de atacamita.

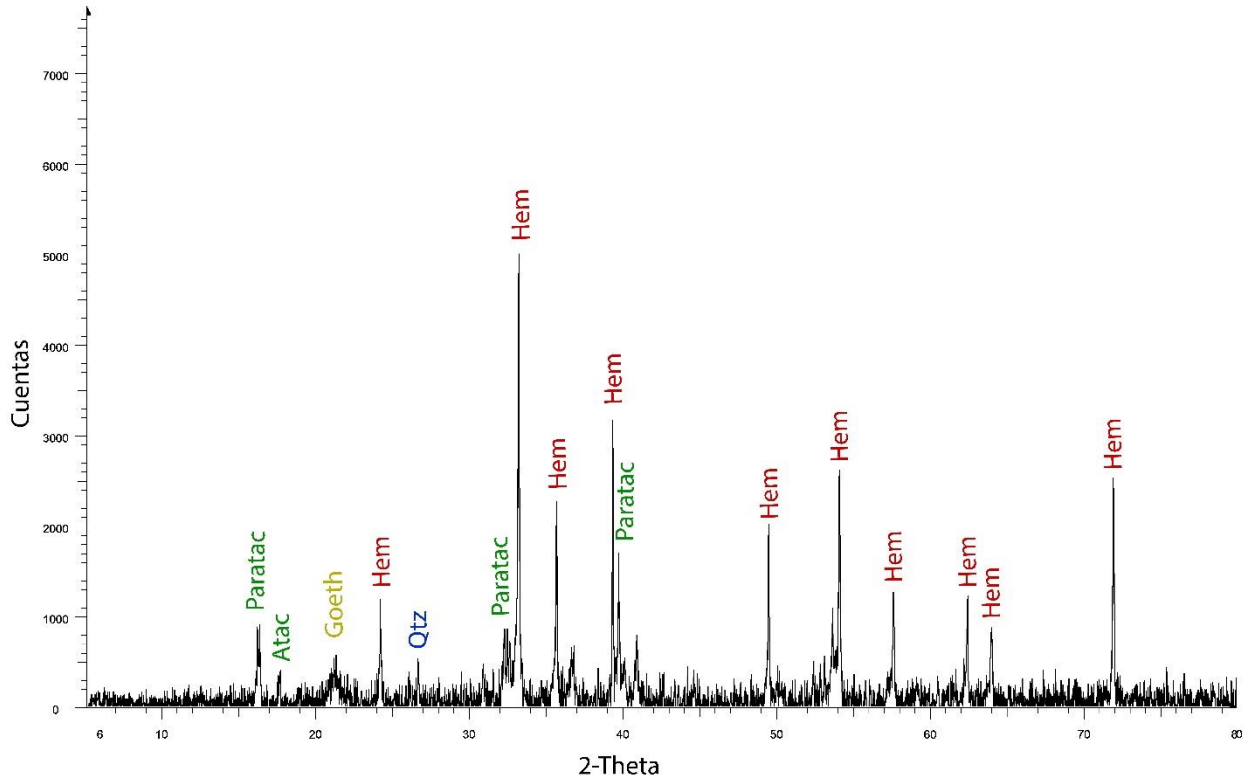


Figura 20. Espectro de difracción de rayos X de muestra N°9 (34.9 m). Se identifican picos característicos de algunas de las fases minerales presentes en la roca. Paratac: paratacamita, Hem: hematita, Qtz: cuarzo, Goeth: Goethita.

Pertenciente a este evento de mineralización se registra la ocurrencia de pseudomalaquita ($\text{Cu}_5(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4$), la cual ha sido inferida a través de los datos de análisis EDS (Figura 22, Figura Anexo 42). Estos datos señalan la presencia de cobre y de un contenido de fósforo mayor al 9% (valor semicuantitativo). Este mineral corresponde a una de las fases de la mineralización de oxidados de cobre y se ubica únicamente en la muestra N°9 (50 m).

Los cristales de pseudomalaquita se disponen principalmente en pátinas y, en menor grado, rellenando espacios entre láminas de specularita. La pseudomalaquita se restringe a un evento de mineralización supérgena anterior a la generación de yeso. En la Figura 22 es posible distinguir vetillas de yeso cortando a cristales de pseudomalaquita, los cuales son formados entre los espacios de las láminas de specularita.

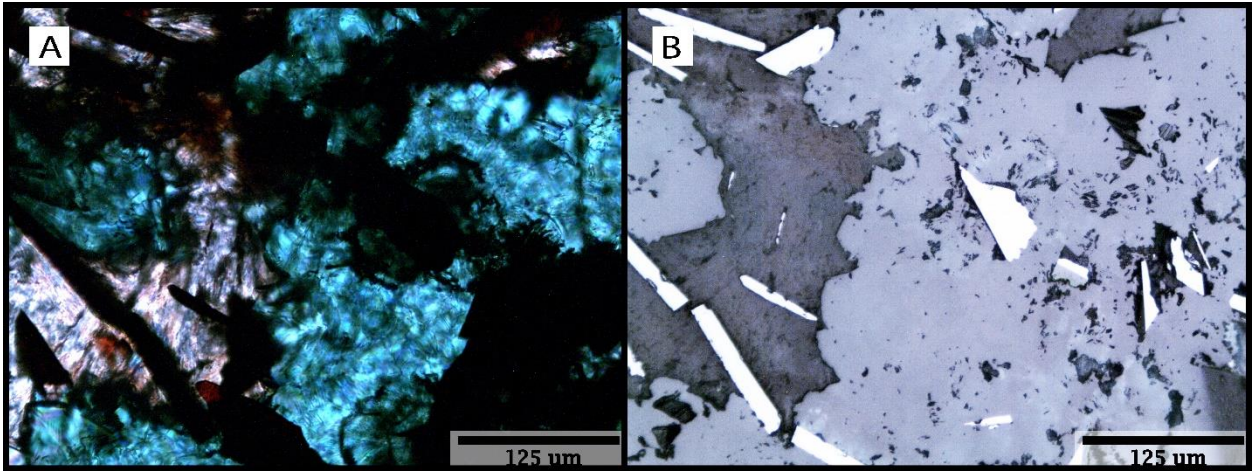


Figura 21. A. Fotomicrografía a luz transmitida y a nícoles cruzados, donde se observa pseudomalaquita en pátinas. B. Mismo sector que en A, pero a luz reflejada, donde se observan cristales de especularita reemplazados en bordes a pseudomalaquita.

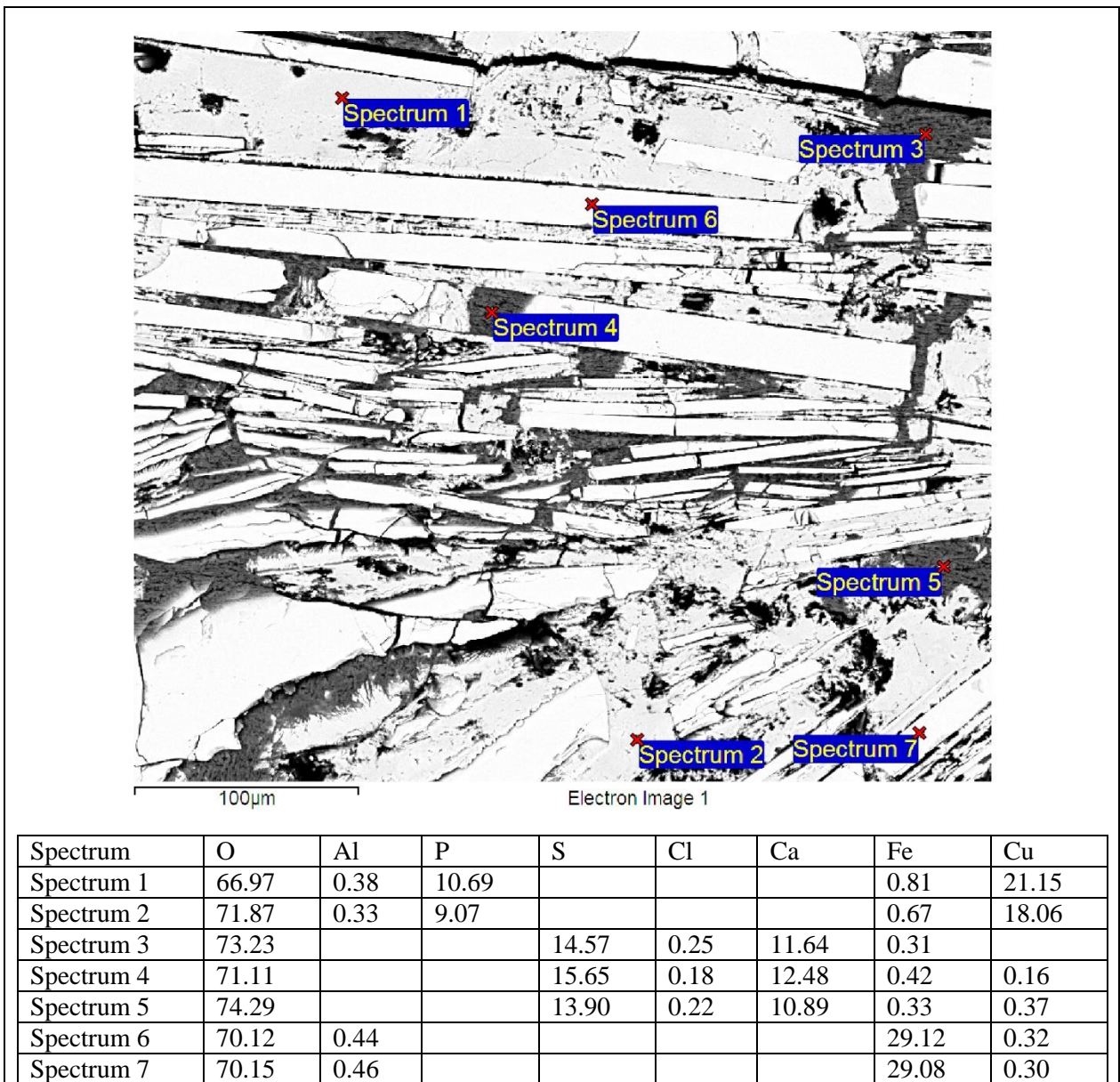


Figura 22. Imagen de electrones retrodispersados (BSE), con análisis EDS. Pseudomalaquita (Spectrum 1 y 2) ocurre entre cristales de especlarita (Spectrum 6 y 7); esta configuración mineral es cortada por vetillas de yeso (Spectrum 3, 4 y 5). Spectrum 1 al 7 corresponden a datos de composición mineral química semicuantitativos.

Finalmente, dentro de esta etapa de mineralización supérgena, se encuentra la fase amorfa *copper pitch*, la cual no posee una composición química fija, pero se caracteriza por presentar altas concentraciones de manganeso, cobre, silicio y aluminio, entre otros. En la Figura 23 se aprecia la mineralización de *copper pitch* dispuesta en bordes de fracturas, asociadas a vetillas de crisocola.

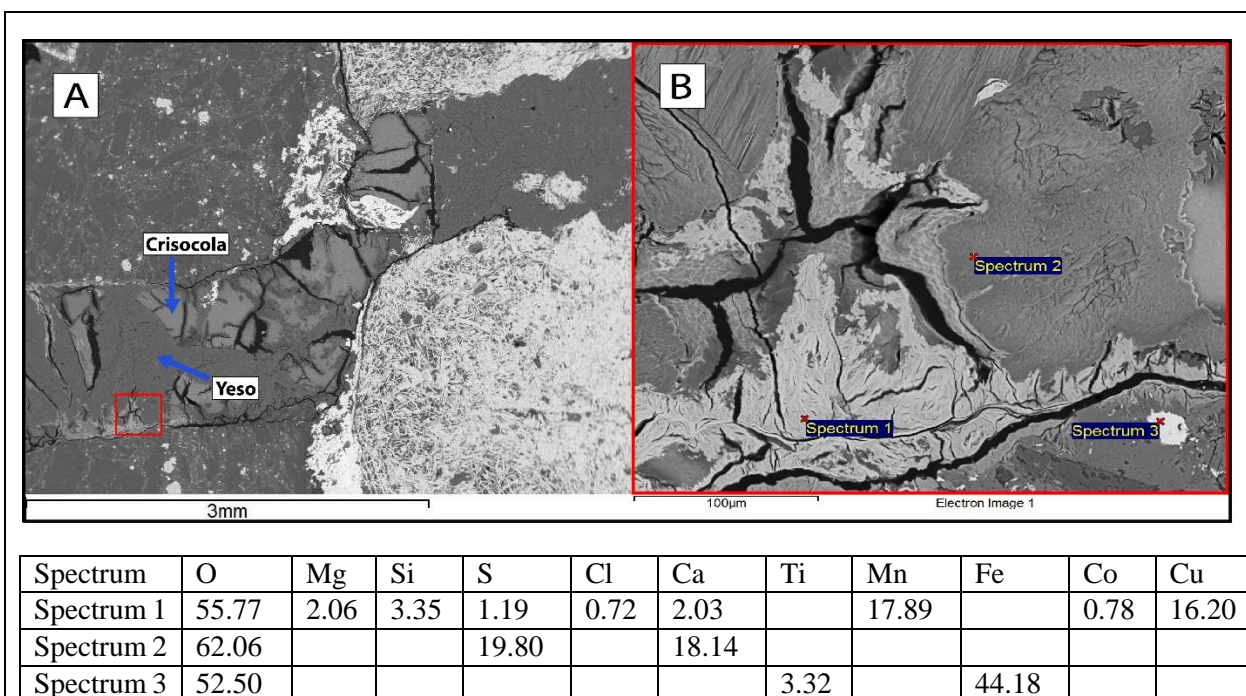


Figura 23. A. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Se observa una vetilla de crisocola con formación de copper pitch en fracturas de la vetilla. B. Detalle de la mineralización en A. La vetilla de crisocola junto a la mineralización de copper pitch presenta alteración de yeso. Spectrum 1, 2 y 3 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos).

Evento IV de mineralización-alteración (alteración supérgena II)

El segundo evento de alteración asociada a oxidados supérgenos corresponde a la paragénesis entre atacamita, clinoatacamita, paratacamita y yeso. Estas fases minerales se forman en vetillas, amígdalas y rellenando espacios entre cristales de especularita. En la Figura 11 y en la Figura 20 se distinguen los picos más característicos de estas cuatro fases minerales.

Clinoatacamita y paratacamita corresponden a polimorfos de atacamita, formados en asociación con ésta última. Estos tres minerales corresponden a un oxiclورو de cobre ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$), los cuales se han reportado en la mayoría de los análisis de XRD a lo largo del sondaje.

Es habitual encontrar yeso en un estadio posterior a la formación de crisocola y de las fases de hidróxidos de hierro. Tal configuración se observa en la Figura 24, donde una vetilla de yeso corta a los cristales de especularita, con crisocola formada entre estos cristales. La presencia de yeso es confirmada por los espectros de DRX de todas las muestras analizadas.

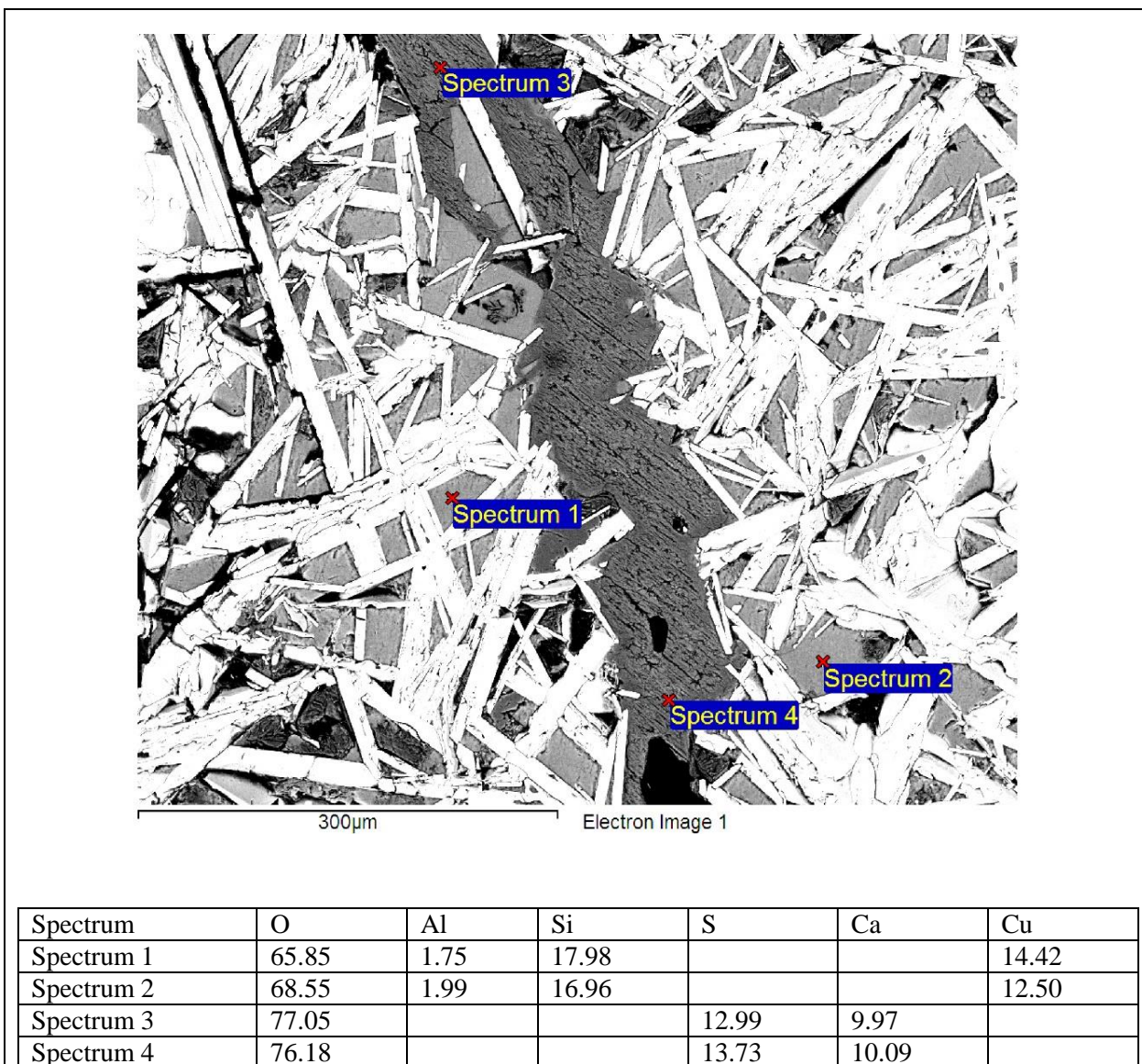


Figura 24. Imagen de electrones retrodispersados (BSE). Spectrum 3 y 4 se asocian a yeso en vetilla cortando crisocola, la cual es formada en espacios entre cristales de especularita (Spectrum 1 y 2). Spectrum 1 al 4 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos).

En la Figura 25 se tiene una configuración similar para la atacamita (y/o polimorfos de ésta), la cual se dispone en vetilla cortando a los cristales de crisocola. A pesar de que esta relación se dispone a lo largo de todo el sondaje, es posible encontrar inusualmente, crisocola como bordes de reacción de cristales de atacamita (Figura 26).

Los granos de crisocola, en un evento posterior a la formación de atacamita, poseen menor contenido de hierro en su composición química (Figura 26) en comparación con granos de crisocola asociados a episodios más tempranos (Figura 25). Esta distribución inusual corresponde a un registro de transición entre ambos eventos de mineralización supérgena. A modo de ejemplo en la

Figura Anexo 68 y en la Figura Anexo 69 se aprecian distintos episodios sobre impuestos de crisocola y atacamita, con predominancia de atacamita en un evento final.

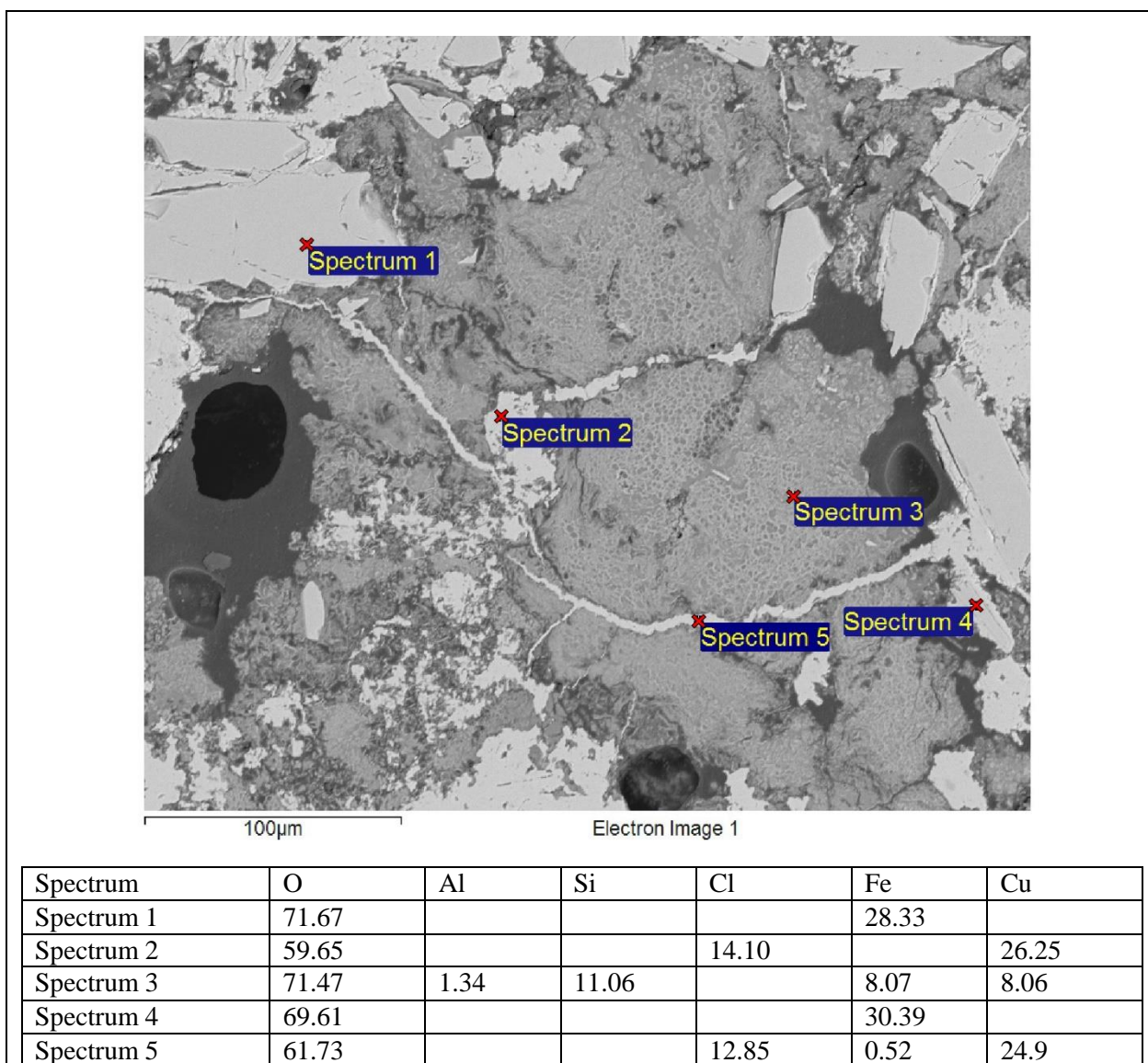


Figura 25. Imagen de electrones retrodispersados (BSE), Spectrum 2 y 5 corresponden a vetillas de atacamita (\pm polimorfos), que cortan granos de crisocola con contenido de hierro en su composición química (Spectrum 3). Spectrum 1 y 4 están relacionados a cristales de hematita especular. Spectrum 1 al 5 corresponden a datos de composición mineral química semicuantitativos.

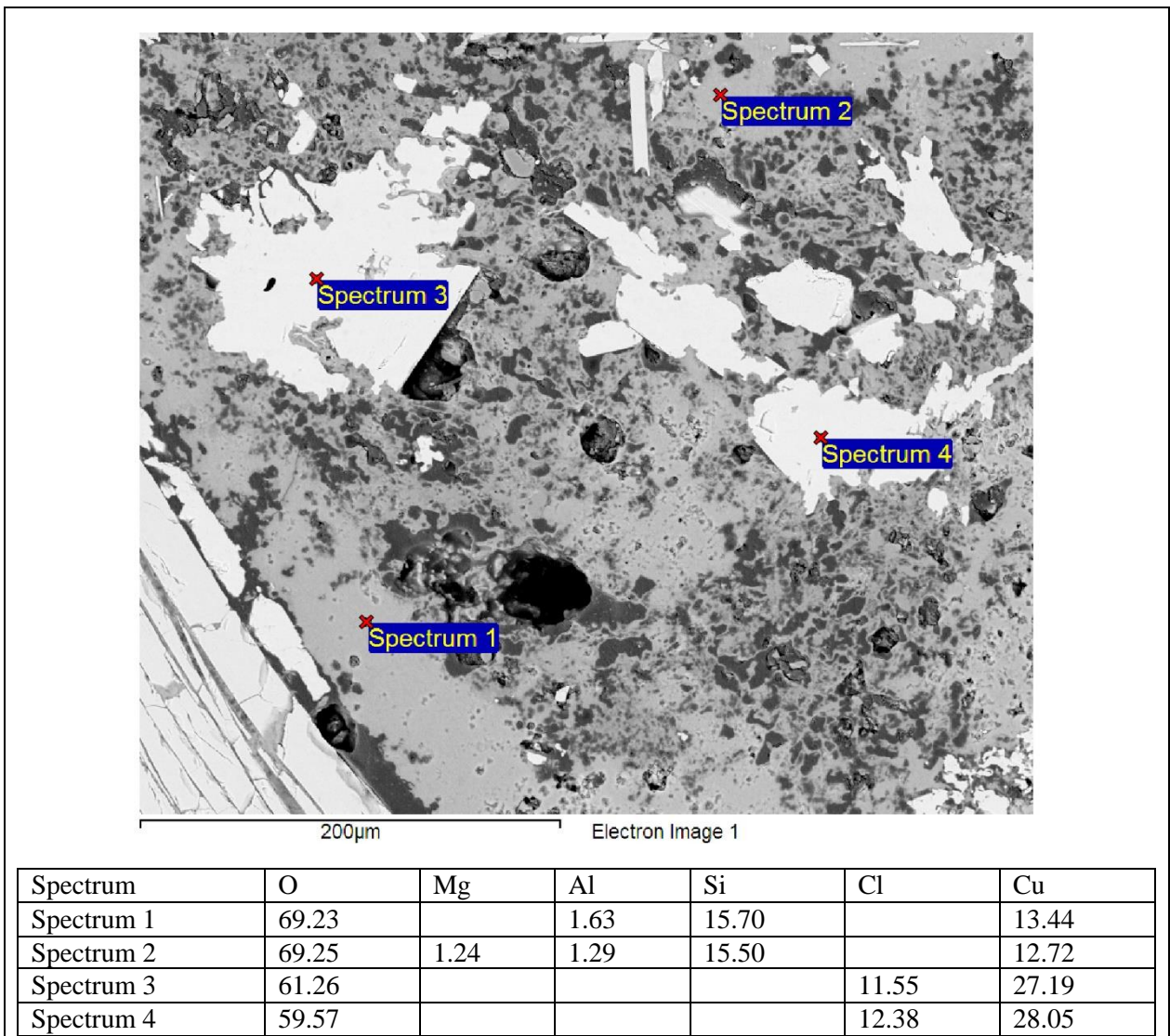


Figura 26. Imagen de electrones retrodispersados (BSE). Spectrum 3 y 4 asociados a cristales de atacamita (\pm polimorfos), los cuales están reemplazados en bordes por crisocola. La crisocola no presenta registro de hierro en su composición química (Spectrum 1 y 2). Spectrum 1 al 4 corresponden a datos de composición mineral química semicuantitativos

La atacamita se distingue en la Figura 27A en vetillas, amígdalas, en pátinas y como alteración de minerales preexistentes tales como goethita, crisocola y hematita especular, entre otros.

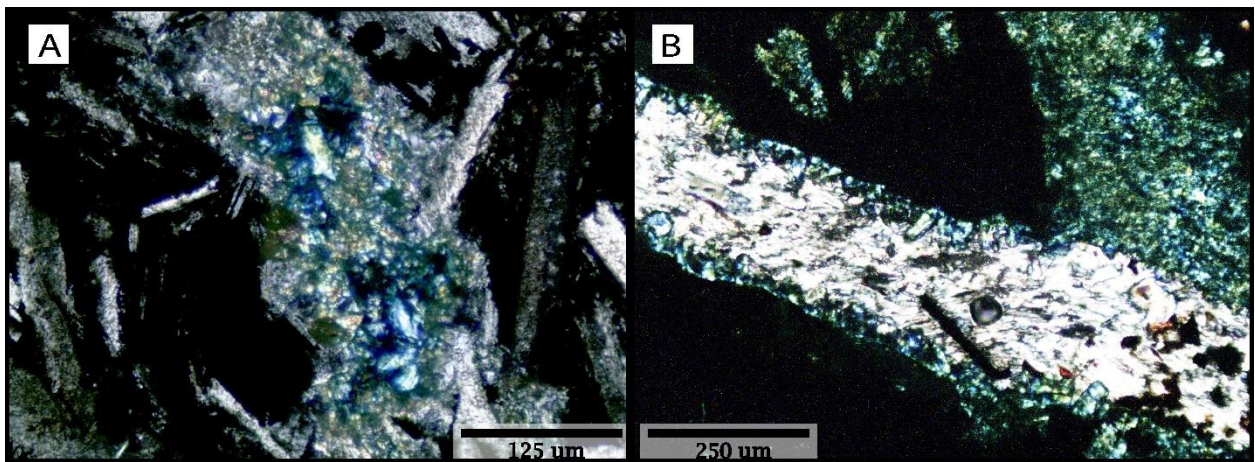


Figura 27. A. Fotomicrografía a luz transmitida, en la cual se dispone atacamita a nícoles cruzados. B. Fotomicrografía a nícoles cruzados y a luz transmitida, donde una vetilla de yeso con crecimiento de atacamita en bordes corta a vetilla de atacamita. Se observa el crecimiento de atacamita con textura de crustificación y estructura de peineta en bordes de la vetilla.

La atacamita, en conjunto con sus polimorfos, corresponden a la principal fase mineral de oxidados de cobre encontrada en la zona supérgena del depósito Barreal Seco, los cuales se presentan en una etapa tardía de alteración. Estas fases minerales están asociados a la formación de yeso en vetillas, lo cual se aprecia en la Figura 27, donde la atacamita está intercrecida con yeso, y en la figura 26B, donde se aprecia una vetilla crustiforme, lo cual indica un cambio composicional con un primer evento que genera atacamita (y/o polimorfos de ésta) con estructuras de peineta, y un evento final con formación el yeso en el centro de la vetilla.

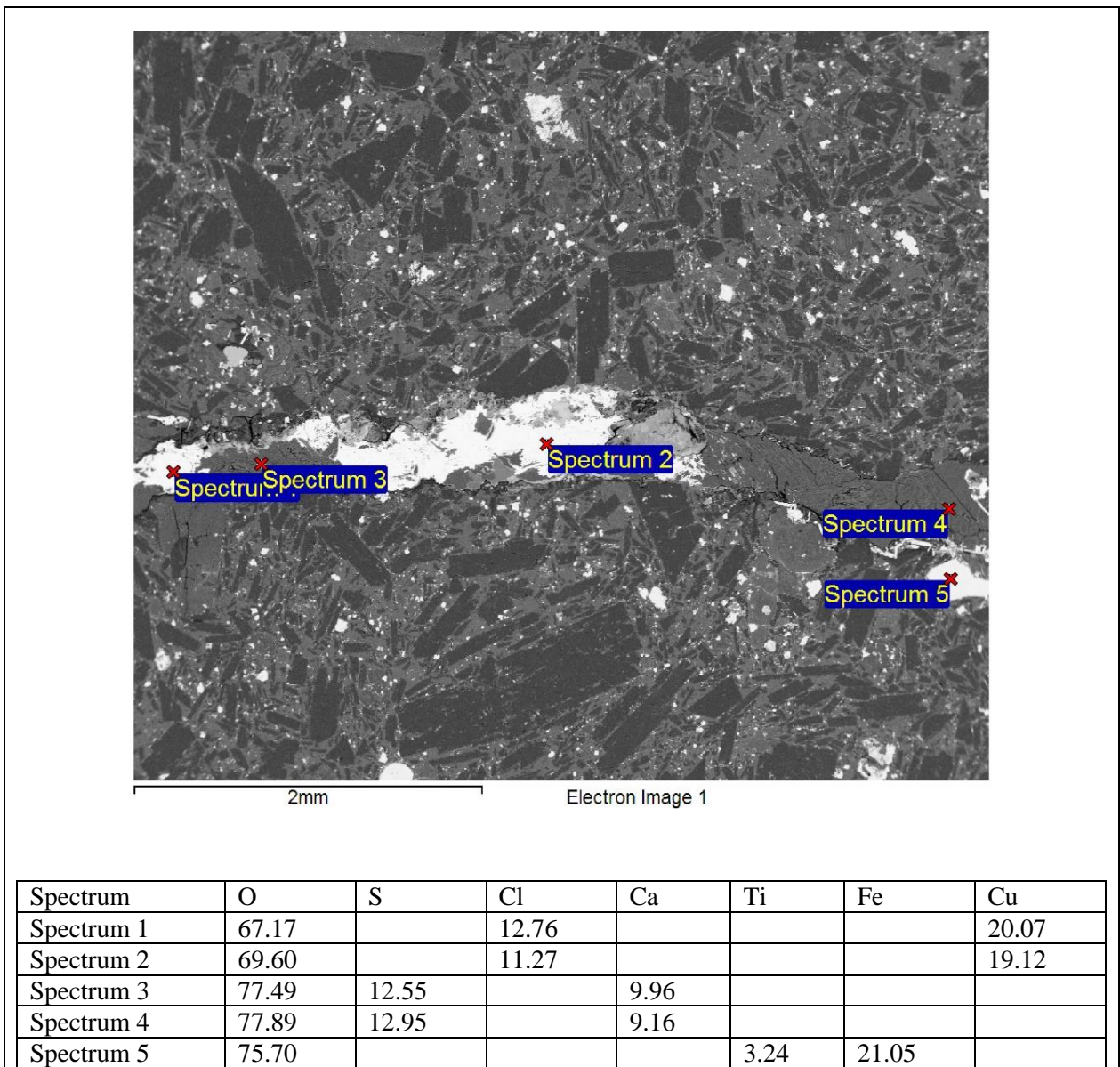


Figura 28. Imagen de electrones retrodispersados (BSE). Se dispone yeso (Spectrum 3 y 4) y atacamita (Spectrum 1 y 2) intercrecidos en una misma vetilla, la cual corta a la roca andesítica. Spectrum 5 indica la presencia de cúmulos cristalinos de titanomagnetita asociados a la andesita. Spectrum 1 al 5 corresponden a datos de composición mineral química semicuantitativos.

Existen otras fases minerales que no poseen clara asociación paragenética y se presentan discontinuamente a lo largo del sondaje. Dentro de estas fases minerales sin clara asociación se registra la presencia de digenita en los resultados de DRX de la muestra N°14, en la cual no se realizaron análisis microscópicos para su caracterización.

Finalmente, en los resultados de DRX de la muestra N°3 (13.83 m) se registra la presencia de pirocloro ((Ca, Na)₂Nb₂O₆(OH, F)), sin embargo por las característica de formación de este tipo

de mineral, el cual es asociado a carbonatitas, se infiere que corresponde a un error en la lectura de los espectros de XRD de esta muestra.

5.1.3. Tabla resumen de la descripción mineralógica

Las fases registradas en el depósito de Barreal Seco, a través de microscopía óptica y XRD, se resumen en la Tabla 1.

Tabla 2. Resumen de minerales encontrados en muestras del sondaje a distintas profundidades. X: Análisis por XRD. O: Análisis microscopio óptico y/o SEM. OX: Ambos análisis.

Profundidad (m)	Epidota	Clorita (Clinocloro)	Titanomagnetita	Magnetita	Hematita	Crisocola	Goethita	Lepidocrocita	Pseudomalaquita	Atacamita	Paratacamita	Clinoatacamita	Yeso	Anhidrita	Cuarzo	Copper Pitch	Pirocloro	Digenita
4,49	O		O							O								
13,83		X			OX	O	O			OX	X	X	OX				X	
18,85					OX	O	O			O	X	X	OX					
27,1		X		O	OX	O	O			OX	X	X	OX					
34,9					OX	O	OX	O		OX	X	X			X			
50					O	O	O		O				O	O	O			
54,3	O		O							O								
58,35		X			X					X			X		X			X
65,2					O					O			O	O	O			
70,1					O	O	O			O			O		O			
73,3			O		OX	O	O			OX		X	OX		X			
78,35					OX		O			OX	X		X		X			
86,2			O		O	O	O			O			O			O		

5.1.4. Secuencia paragenética

Los eventos paragenéticos de mineralización y alteración asociados al depósito de Barreal Seco se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Tabla paragenética del depósito IOCG de Barreal Seco. La mineralogía corresponde a la reportada en este estudio en adición a la descrita por Correa (2000).

	Evento I	Evento II	Evento III	Evento IV
Pirita	—————			
Calcopirita	—————	-----		
Bornita		-----		
Hematita		—————		
Covelina			-----	
Calcosina			-----	
Crisocola			—————	
Copper pitch			—————	
Pseudomalaquita			? -----	
Atacamita (y polimorfos)				—————
Albita	—————			
Epidota	—————			
Clorita	—————			
Cuarzo	—————			
Calcita	—————	—————		
Anhidrita	—————	—————		
Yeso		—————		—————
Goethita			—————	
Lepidocrocita			—————	

5.2. Isótopos estables de cloro

5.2.1. Introducción

Las variaciones en la composición isotópica entre el ^{37}Cl y ^{35}Cl de una muestra se expresan en unidades de por mil (‰) y se definen como la diferencia entre la razón isotópica de la muestra analizada y la razón isotópica de un estándar, en este caso el estándar corresponde a cloruro de agua marina (Standard Mean Ocean Chloride, SMOC). Diversos estudios han mostrado que la composición de isótopos estables de cloro es constante para aguas marinas, siendo éstas representativas para ser usadas como estándar (Godon et al., 2004).

La ecuación que describe las variaciones en la composición isotópica del cloro (^{37}Cl y ^{35}Cl) es la siguiente:

$$\delta^{37}\text{Cl}(\text{‰}) = \left[\frac{\left(\frac{^{37}\text{Cl}}{^{35}\text{Cl}}\right)_{\text{Muestra}}}{\left(\frac{^{37}\text{Cl}}{^{35}\text{Cl}}\right)_{\text{cloruro agua del mar}}} - 1 \right] \times 1000$$

Esta herramienta geoquímica corresponde a la más apropiada para evaluar las posibles fuentes de cloruro en la mineralización de cobre (Arcuri y Brimhall, 2003).

Particularmente en este estudio se utiliza el análisis de variaciones isotópicas del cloro estable para constreñir el origen y naturaleza de los fluidos supérgenos que dieron origen a la mineralización de atacamita y de los polimorfos de ésta, en el depósito IOCG de Barreal Seco.

5.2.1. Resultados

Los análisis de isótopos estables de cloro fueron realizados en atacamita, paratacamita y clinoatacamita del depósito de Barreal Seco. Los resultados obtenidos se señalan en la Tabla 4 y en la Figura 29. El error asociado de los resultados de $\delta^{37}\text{Cl}$ es de ± 0.2 .

Tabla 4. Resultados $\delta^{37}\text{Cl}$ de las muestras analizadas del sondaje subvertical de Barreal Seco.

N° de muestra	Ubicación (metros)	Valores $\delta^{37}\text{Cl}$
1	4.49	2.14
2	13.62	1.15
3	13.83	0.44
4	17.13	0.96
5	18.85	1.11
6	27.1	0.86
7	29.1	1.35
8	32.2	0.84
9	34.9	0.61
10	41.9	-0.59
11	50	0.68

N° de muestra	Ubicación (metros)	Valores $\delta^{37}\text{Cl}$
12	54.3	-0.35
13	55.2	-0.1
14	58.35	-0.16
15	61	-0.62
16	61.4	0.275
18	70.1	0.26
19	73.3	-0.57
20	78.35	0.1
21	86.2	-0.17
22	86.8	-0.48
23	89.1	-0.02

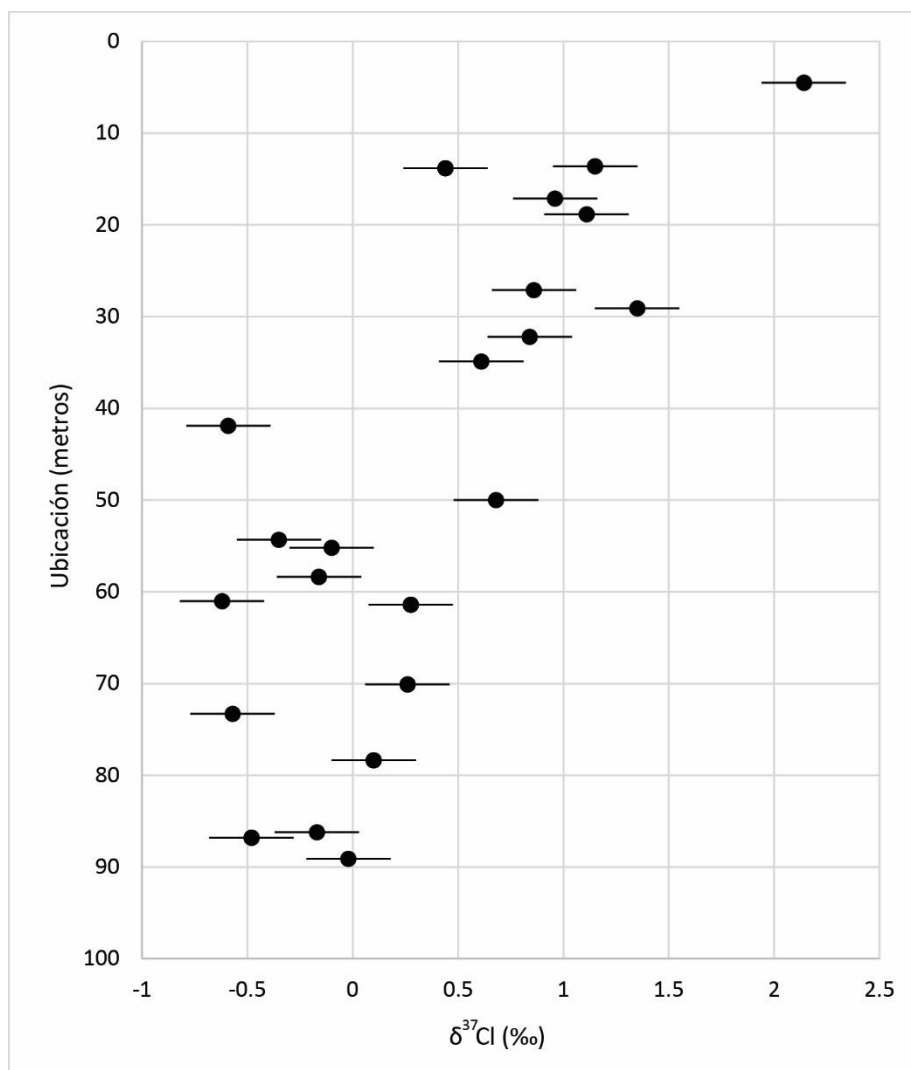


Figura 29. Perfil en profundidad de los valores de $\delta^{37}\text{Cl}$ de las muestras del sondaje subvertical de Barreal Seco.

La Figura 29 muestra los resultados de $\delta^{37}\text{Cl}$ en distintas profundidades. El valor máximo se dispone en la parte más superficial del sondaje (4.49 m) y corresponde a +2.14‰, mientras que el valor mínimo es -0.62‰ a los 61 m de profundidad.

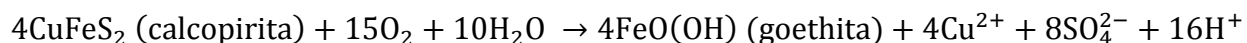
En la Figura 29 se aprecia en los resultados de $\delta^{37}\text{Cl}$ una tendencia regular con disminución progresiva en los primeros 50 metros, aproximadamente. Desde los 50 metros en adelante no se observa una tendencia y los valores de $\delta^{37}\text{Cl}$ quedan confinados entre -0.62‰ (61 m) y +0.28‰ (61.4 m).

6. Discusiones

6.1. Caracterización de fluidos supérgenos

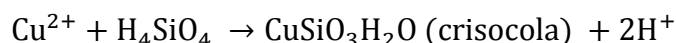
Evento I de alteración supérgena

En este evento, la mayor ocurrencia mineralógica corresponde a las fases de crisocola y goethita, con menor presencia de pseudomalaquita. La formación de goethita durante la oxidación supérgena genera la acidificación de las aguas y la formación de iones de cobre en solución según la siguiente reacción:



Esta reacción expresa la disolución de calcopirita en presencia de agua y oxígeno, que genera hidróxidos de hierro e iones en solución. La ocurrencia de calcopirita en el depósito de Barreal Seco (Correa, 2000) permite la formación de cantidades apreciables de goethita, la cual ha sido confirmada en este estudio.

Por otra parte, la generación de crisocola queda descrita por la siguiente ecuación:



La formación de ácido silícico es posible a través de la disolución de albita, la cual ha sido reportada por Correa (2000) como parte de la mineralogía primaria del depósito. La siguiente reacción describe dicho proceso:



En la Figura 30, se observan los campos de estabilidad de la pseudomalaquita y crisocola en función del pH y la actividad del ácido silícico. Para un rango de pH entre 3 y 7, es posible la formación de crisocola siempre y cuando exista una alta actividad de ácido silícico. Consecuentemente, dada la presencia de ambas fases en un mismo evento, se infiere que el fluido mineralizador asociado a esta etapa presenta un pH ácido a neutro.

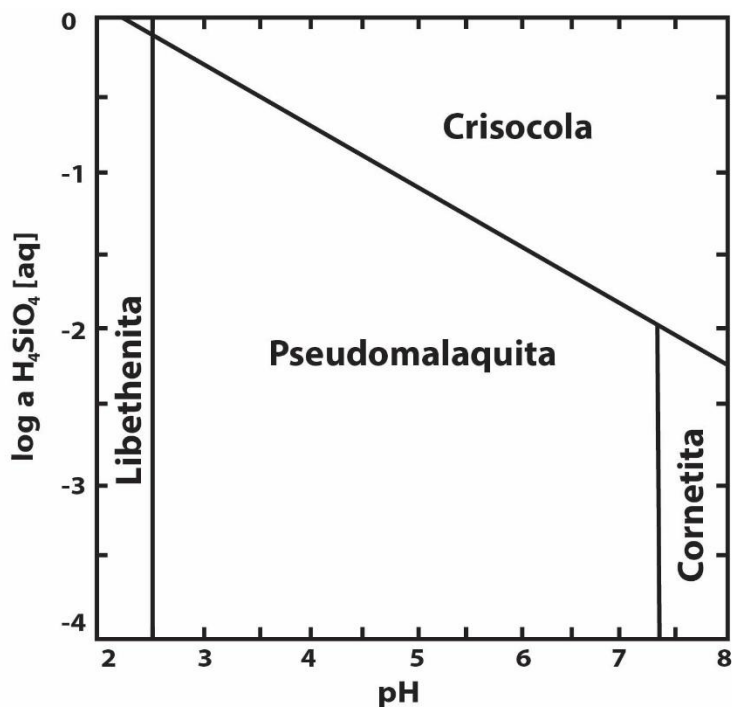


Figura 30. Diagrama pH vs. $\log a(\text{H}_4\text{SiO}_4)$, donde se muestra la estabilidad de la crisocola y pseudomalaquita relativa a distintos fosfatos de cobre. $T=25^\circ\text{C}$ (Crane et al., 2001).

Evento II de alteración supérgena

Las fases principales registradas en este evento corresponden a atacamita, paratacamita y clinoatacamita, las cuales están asociadas temporal y espacialmente a la formación de yeso.

La formación de la atacamita queda descrita por la siguiente ecuación:



Donde el cobre obtenido de la disolución de las fases minerales del primer evento de alteración supérgena, en conjunto con la alta concentración de cloruro en las aguas, permiten la generación de atacamita.

En la Figura 31 se observa el campo de estabilidad de la atacamita en el diagrama de Eh-pH. En la parte superior del diagrama, se disponen oxidados de cobre, donde la estabilidad de la atacamita está constreñida por un pH entre 6 y 8. Consecuentemente, dada la presencia de atacamita en esta etapa de mineralización supérgena tardía en el depósito, se infiere que el fluido asociado a este evento tiene un pH neutro (a ligeramente ácido o alcalino).

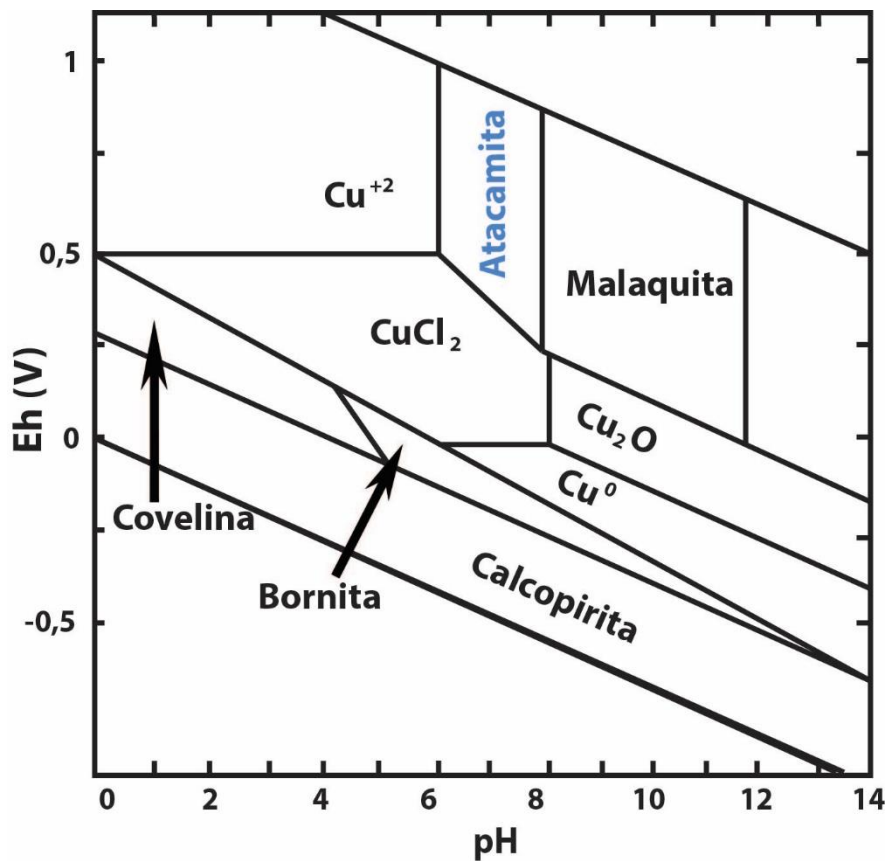


Figura 31. Diagrama pH-Eh para minerales de cobre a $T=25^\circ\text{C}$ y a 1 bar. Modificado de Reich et al. (2009).

6.2. Isótopos estables de cloro

Los datos del análisis de isótopos estables de cloro, obtenidos en atacamita y sus polimorfos, se han subdividido en dos grupos con diferentes interpretaciones geológicas para explicar su distribución, los cuales se detallan a continuación desde la sección más profunda del sondaje hasta la superficie.

El primer grupo de resultados isotópicos se dispone desde los 90 metros hasta los 50 metros de profundidad del sondaje. En este tramo no se observa una tendencia clara en los datos isotópicos. Los valores de $\delta^{37}\text{Cl}$ asociados a este tramo del sondaje están acotados entre -0.6‰ a $+0.3\text{‰}$, aproximadamente.

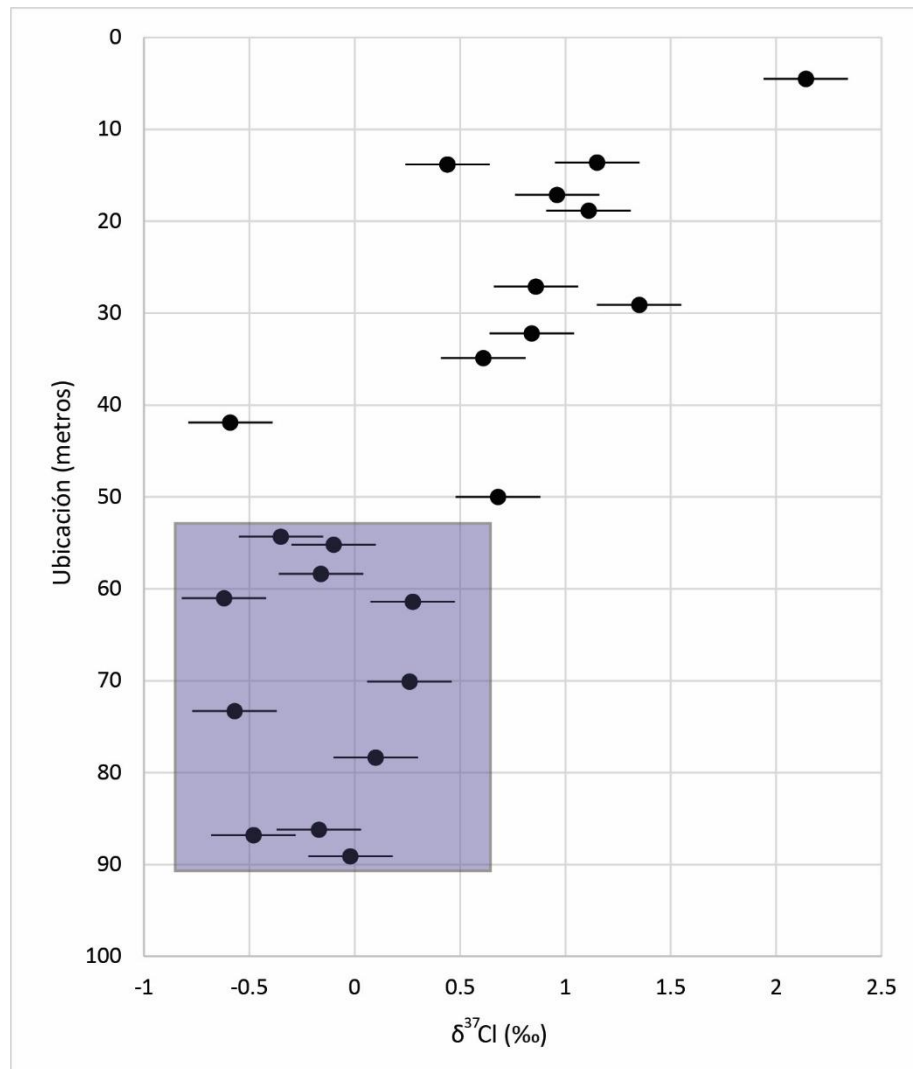


Figura 32. Resaltados en color los datos de $\delta^{37}\text{Cl}$ pertenecientes al tramo profundo del sondaje estudiado.

A pesar de la ausencia de una tendencia clara en los valores de $\delta^{37}\text{Cl}$, los datos reportados en este tramo del sondaje ($\sim -0.6\text{‰}$ a $+0.3\text{‰}$) son coincidentes con el rango de valores de $\delta^{37}\text{Cl}$ asociados a sedimentos del Jurásico Superior de la Región de Antofagasta. Los valores reportados para estos sedimentos marinos van desde los -0.8‰ a los $+0.5\text{‰}$ (Arcuri y Brimhall, 2003).

De esta forma, y a través de la signatura isotópica del cloro estable en las muestras estudiadas, se propone la participación de agua asociada a sedimentos marinos del Jurásico Superior para la formación de atacamita, paratacamita y clinoatacamita dispuestos a mayor profundidad en el depósito de Barreal Seco. Tal como han planteado estudios (Cameron et al., 2007; Reich et al., 2008, 2009; Cameron et al., 2010), el ascenso de aguas salinas profundas podría explicar la signatura isotópica de cloro de la porción inferior del sondaje.

Por otra parte, el segundo grupo de datos se restringe, aproximadamente, a los primeros 50 metros de profundidad del sondaje analizado y se caracteriza por tener valores de $\delta^{37}\text{Cl}$ con una tendencia de disminución progresiva hacia valores más negativos en función de la profundidad. Los datos de este tramo superficial se muestran en la Figura 33.

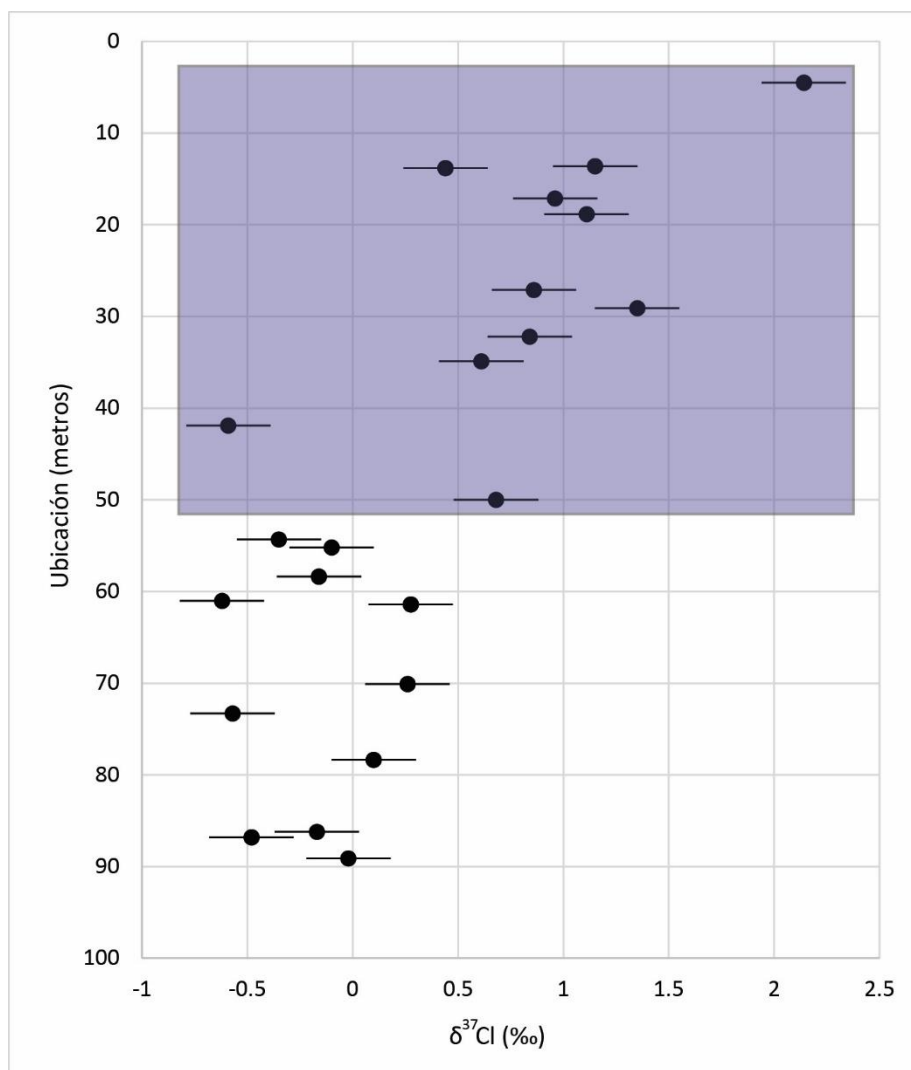


Figura 33. Resaltados en color los datos de $\delta^{37}\text{Cl}$ pertenecientes al tramo superficial del sondaje estudiado.

La variabilidad isotópica de este tramo puede relacionarse al efecto de distintos mecanismos de fraccionamiento. Un primer factor a considerar se relaciona con la alta tasa de evaporación superficial que es característico de un clima hiperárido, tal como el encontrado hoy en día en el Desierto de Atacama, el cual registra un comienzo entre los 9 a los 5 Ma (Arancibia, 2006).

La evaporación ha sido reportada como un factor de fraccionamiento isotópico de cloro en sales determinadas. Experimentos de fraccionamiento por evaporación y precipitación de NaCl desde agua de mar, muestran enriquecimiento de ^{37}Cl en la fase sólida y empobrecimiento en el líquido residual a medida que avanza el grado de evaporación. Los valores de $\delta^{37}\text{Cl}$ obtenidos en halita asociados al fraccionamiento por evaporación de agua de mar se encuentran entre -0.5‰ y $+0.5\text{‰}$ (Eggenkamp y Schuiling, 1995). Sin embargo, estos valores de fraccionamiento experimentales no coinciden con los resultados obtenidos para este tramo del sondaje. Además, considerando la pérdida de la eficacia por la amortiguación de las altas temperaturas con la profundidad, no se alcanzaría el grado de evaporación suficiente para generar fraccionamiento

isotópico en todo el perfil del depósito. Considerando estos antecedentes, se infiere que el efecto de evaporación afectaría en menor grado a la distribución en profundidad de los isótopos estables de cloro.

A pesar que el efecto de la evaporación no explica por sí solo la distribución de los valores de $\delta^{37}\text{Cl}$ en profundidad, este mecanismo, sumado al efecto de advección de un flujo salino ascendente, podría haber contribuido al aumento de la concentración de cloruro en la parte más superficial del depósito (con respecto a una zona profunda menos concentrada). En respuesta a la alta concentración de dicho anión en zonas más someras, se produciría difusión iónica a lo largo del perfil, generándose una transferencia del cloruro hacia zonas menos concentradas. Como consecuencia de la diferencia de velocidad de migración entre isótopos livianos y pesados, se habría producido el enriquecimiento del isótopo más liviano (^{35}Cl) en la zona de menor concentración inicial (Senftle y Bracken, 1955), la cual correspondería a la parte más profunda de la zona oxidada de Barreal Seco. Este mecanismo de difusión iónica es el más apropiado para explicar la tendencia obtenida en los valores de $\delta^{37}\text{Cl}$, a lo largo del perfil, tomando en cuenta los datos disponibles para esta investigación.

Otro mecanismo que no ha sido posible evaluar en este estudio, correspondería al fraccionamiento isotópico del cloro relacionado a las diferencia de estructura cristalina de la atacamita, paratacamita y clinoatacamita. Sin embargo, no existen datos experimentales reportados en la literatura que permitan explorar los potenciales efectos cristalográficos en el fraccionamiento del cloro.

6.3. Modelo Geológico propuesto

En base a las observaciones petrográficas, análisis mineralógico y resultados geoquímicos reportados anteriormente, se plantea un modelo que describe la evolución supérgena del yacimiento de Barreal Seco, el cual consta de dos etapas sucesivas que se describen y detallan a continuación.

6.3.1. Evento I de alteración supérgena

Este evento se caracteriza por la circulación descendente de aguas principalmente meteóricas (con baja concentración de cloruro), que interactúan con la mineralogía hipógena expuesta en superficie por efecto del levantamiento de los Andes Centrales durante la Fase Incaica (Eoceno Medio a Eoceno Tardío, Coira et al., 1982; Sillitoe, 2005). Esta interacción produce la lixiviación ácida de las fases sulfuradas primarias, permitiendo que el cobre pase a estar en solución y sea transportado por el fluido hacia mayores profundidades, donde precipita por sobre el nivel freático generando mineralogía secundaria de oxidados de cobre, la cual está caracterizada por la presencia goethita, lepidocrocita, hidróxidos de hierro, crisocola y *copper pitch*. Bajo el nivel de freático se genera, en menor volumen, la mineralogía sulfurada, donde se ha reportado covelina y calcosina (Correa, 2000). De esta forma, se dispone la mineralogía secundaria de cobre tanto oxidada como sulfurada en este primer evento de enriquecimiento supérgeno.

La Figura 34 esquematiza el flujo de aguas descendente que dio origen a la mineralogía de este evento. Este flujo se caracteriza por un pH ácido a neutro y por tener una alta actividad de ácido silícico. Debido a las condiciones de acidez en el medio, las aguas de proveniencia principalmente meteórica, tienen un efecto lixivante. De forma descriptiva se indica el nivel freático mediante una curva azul, la cual se dispone por sobre la zona de sulfuros primarios y secundarios.

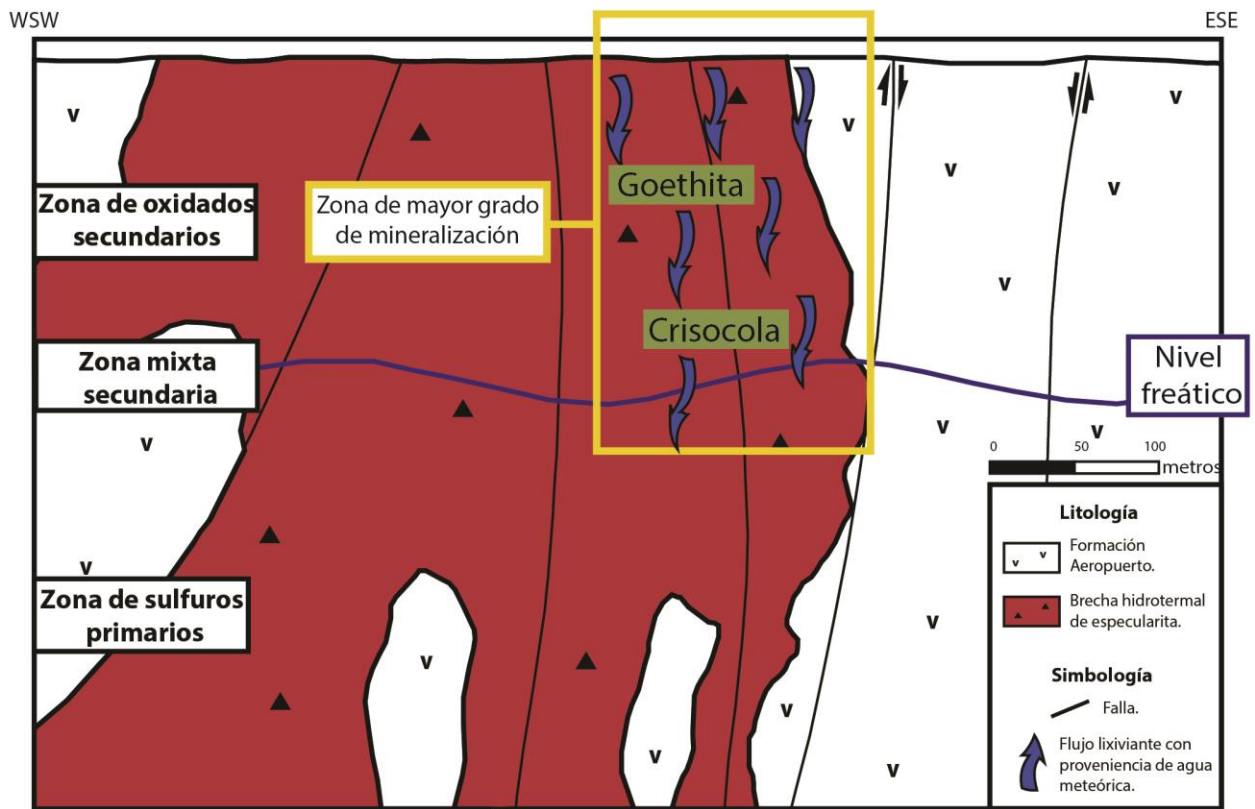


Figura 34. Modelo geológico del depósito de Barreal Seco, donde se indica la circulación del fluido mineralizador de oxidados de cobre pertenecientes a un primer evento de alteración supérgena (33 a 9 Ma).

Las condiciones de formación antes mencionadas coinciden con las descritas para el desarrollo de las zonas enriquecimiento supérgeno de depósitos de cobre en el norte de Chile (Sillitoe, 2005). La edad reportada para este tipo de mineralización se extiende desde los ~33 a los ~9 Ma, periodo en el cual el clima característico semiárido, con precipitaciones mayores a 10 mm/año (Sillitoe y McKee, 1996; Arancibia et al., 2006).

6.3.2. Evento II de alteración supérgena

Un segundo evento de mineralización supérgena se caracteriza por la interacción de aguas salinas profundas con la mineralización supérgena previamente formada durante el Evento I. Los datos de $\delta^{37}\text{Cl}$ en atacamita y polimorfos de ésta, afines a sedimentos marinos del basamento del Jurásico Superior, sugieren la participación de cloruro de origen marino profundo. La participación conjunta de dichos fluidos salinos profundos y aguas de origen meteórico haría posible la ocurrencia de atacamita en abundancia, la cual requiere de condiciones de alta clorinidad y pH neutro para su formación y preservación. El desarrollo de importantes volúmenes de atacamita en depósitos de cobre del norte de Chile, similares a los reportados en este estudio, está asociado a eventos supérgenos tardíos (<9-10 Ma), donde predomina un clima hiperárido con bajas precipitaciones (<1-4 mm/a), condiciones necesarias para la preservación de la atacamita, ya que ésta se disuelve rápidamente cuando es expuesta a agua meteórica (Reich et al., 2009; Cameron et al., 2007).

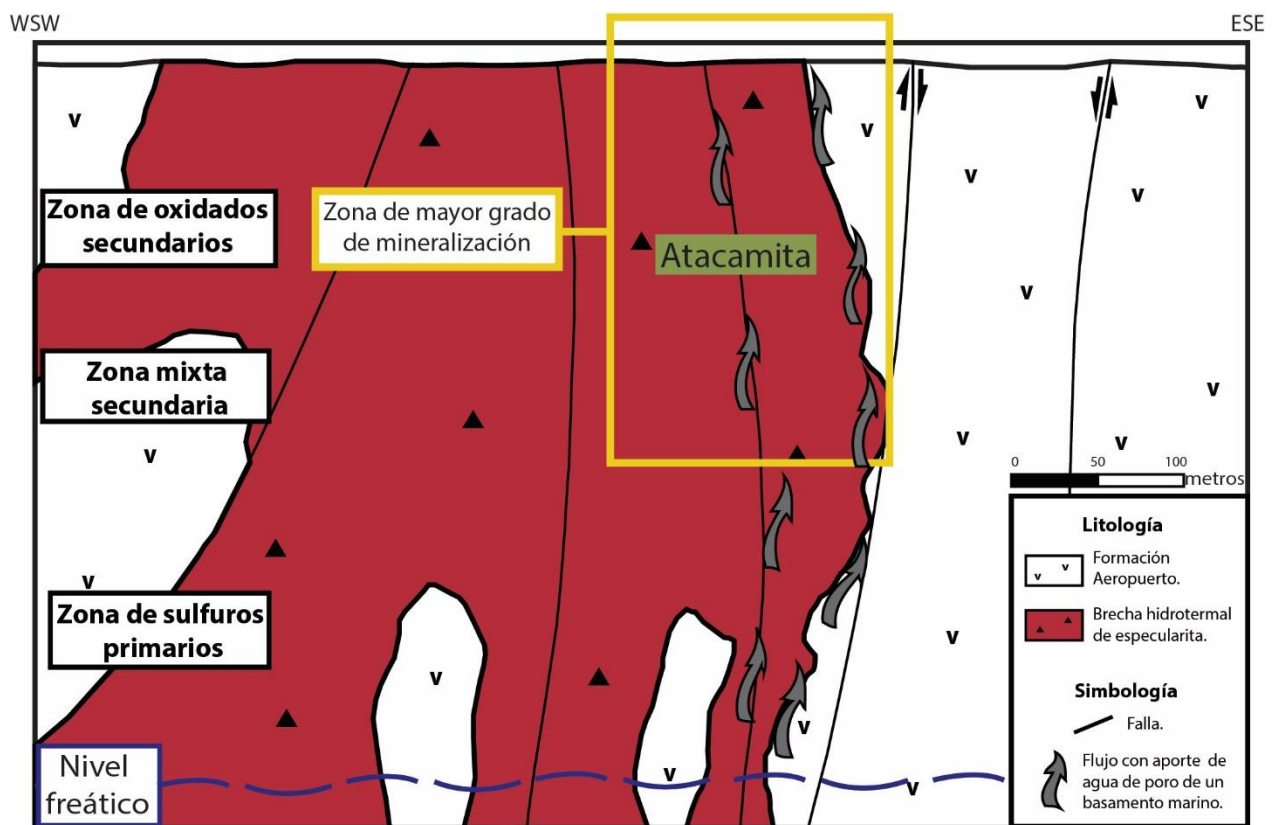


Figura 35. Modelo geológico del depósito de Barreal Seco, donde se indica la circulación del fluido mineralizador de oxidados de cobre pertenecientes a un segundo evento de alteración supérgena.

El mecanismo de circulación ascendente de los fluidos salinos desde el basamento marino se ha planteado como resultante de tipo “bombeo tectónico”, el cual involucra el ascenso de agua profunda a través de estructuras mayores presentes a nivel regional y local, gatillado por actividad sísmica y/o cambios en la permeabilidad (Cameron et al., 2002; 2007). En consecuencia, y para el caso particular de Barreal Seco, se propone que el ascenso de agua profunda se realizaría a nivel local a través de las estructuras reportadas por Correa (2000), las cuales están asociadas a la formación de la mineralogía hipógena del yacimiento (Figura 35).

En la Figura 35 se observa el nivel freático de forma discontinua con el fin de caracterizar un descenso de éste debido al cambio climático, desde una etapa semiárida (Evento I) a una etapa hiperárida (Evento II). La menor influencia de aguas meteóricas en el Evento II, relacionada al descenso del nivel freático, permitiría una mayor influencia de aguas basales marinas profundas en la mineralización asociada a esta etapa evolutiva.

Finalmente, es importante mencionar que la alta tasa de evaporación asociada a la desecación de Atacama, en adición a un flujo advectivo hacia superficie y disminución del nivel freático, serían condicionantes climáticas e hidrológicas claves para la preservación de las señales químicas e isotópicas registradas en el mineral atacamita.

7. Conclusiones y recomendaciones

El yacimiento de Barreal Seco se ubica en la zona sur del núcleo hiperárido del Desierto de Atacama y corresponde a un yacimiento tipo IOCG dominado por hematita especular y emplazado en la Formación Aeropuerto del Cretácico Inferior. Este depósito presenta un importante desarrollo de la mineralogía de oxidados secundarios de cobre, con mayor ocurrencia de atacamita ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$).

Los resultados de la paragénesis mineral, caracterización mineraloquímica e isótopos de cloro estables de atacamita fueron obtenidos de las muestras de un sondaje de aproximadamente 100 metros de profundidad. Estos sugieren dos principales eventos de mineralización de enriquecimiento supérgeno, los cuales se diferencian principalmente por la naturaleza y origen de los fluidos involucrados.

El primer evento de alteración supérgena está asociado a la formación de crisocola, *copper pitch*, pseudomalaquita, goethita y lepidocrocita en la zona oxidada. Los fluidos formadores de esta asociación presentan condiciones de pH ácido a neutro, alta actividad de ácido silícico y registran la participación de aguas principalmente meteóricas (baja concentración de cloruro). Este fluido se caracteriza por ser lixivante y por tener un flujo descendente. Esta primera etapa de enriquecimiento supérgeno se desarrolla durante los ~33 a los ~9 Ma, cuando las condiciones climáticas de la región habrían sido semiáridas.

El segundo evento de mineralización supérgena de oxidados de cobre corresponde a la formación de yeso, atacamita, clinoatacamita y paratacamita, siendo estos dos últimos polimorfos de atacamita. Este evento se desarrolla en un periodo más tardío y en condiciones climáticas hiperáridas. Los fluidos mineralizadores de esta etapa poseen un flujo ascendente y se caracterizan por un pH neutro y altas concentraciones de cloruro (en relación a aguas principalmente meteóricas). Estos fluidos presentan una menor proporción de agua meteórica y están estrechamente asociados a aguas relacionadas con sedimentos marinos del Jurásico Superior. El mecanismo por el cual se produciría el ascenso del flujo es probablemente controlado por estructuras, y gatillado por fenómenos sísmicos (bombeo tectónico).

La menor participación de aguas meteóricas, debido a la disminución del nivel freático durante el segundo evento de enriquecimiento supérgeno, permite la preservación de la atacamita y de las señales químicas e isotópicas de ésta, y en particular, la conservación de la distribución vertical de los isótopos estables de cloro en la zona oxidada supérgena del depósito.

Los valores de $\delta^{37}\text{Cl}$ obtenidos en atacamita, clinoatacamita y paratacamita muestran, en los primeros 50 metros del sondaje, una tendencia de disminución progresiva hacia valores más negativos con el aumento de la profundidad. Esta tendencia está relacionada al mecanismo de difusión iónica que afecta a los fluidos mineralizadores del segundo evento descrito. El mecanismo de difusión iónica genera el enriquecimiento en profundidad del isótopo liviano de cloro (^{35}Cl) como respuesta a la elevada concentración de cloruro en la parte más superficial del depósito, la

cual es generada por efectos de evaporación y por un flujo advectivo ascendente que caracteriza a la segunda etapa de alteración supérgena. Con respecto a este análisis sobre el mecanismo de formación de la tendencia de disminución en profundidad de los valores de $\delta^{37}\text{Cl}$ en atacamita (y polimorfos), se propone para próximas investigaciones, evaluar el posible fraccionamiento isotópico asociado a la formación de las distintas fases polimórficas de la atacamita.

Por otra parte, en el tramo profundo del sondaje (>50 m), las fases de atacamita, clinoatacamita y paratacamita no presentan una tendencia regular en los datos de $\delta^{37}\text{Cl}$. Sin embargo, estos valores registran una signatura isotópica ($\sim -0.6\text{‰}$ a $+0.3\text{‰}$) que coincide con datos reportados de $\delta^{37}\text{Cl}$ asociados a sedimentos marinos del Jurásico Superior de la Región de Antofagasta (-0.8 a los $+0.5\text{‰}$).

El análisis de isótopos estables de cloro ($\delta^{37}\text{Cl}$) es un método útil en la evaluación de la fuente de proveniencia del cloruro asociado a la formación de atacamita en ambientes de enriquecimiento supérgeno de cobre. A través de este método, es posible caracterizar la naturaleza y origen de los fluidos mineralizadores asociados a una fuente de agua salina, diferenciando de esta forma, distintos eventos de enriquecimiento supérgeno según los fluidos mineralizadores participantes. Sin embargo, los resultados de isótopos estables de cloro no permiten distinguir el aporte relativo de las aguas cloruradas superficiales, debido a que la distribución de éstos en superficie se ve afectada por procesos de difusión iónica y evaporación.

Las dos etapas descritas en el modelo evolutivo de Barreal Seco, también son identificadas de manera similar en estudios anteriores, en los cuales se postula que la formación de atacamita en el norte de Chile estaría relacionada a un segundo evento de enriquecimiento supérgeno (Cameron et al., 2007; Reich et al., 2008, 2009; Cameron et al., 2010). Considerando que gran parte de las investigaciones anteriores se asocian a yacimientos de cobre del núcleo hiperárido del Desierto de Atacama (Chuquicamata, Mantos Blancos, Mantos de la Luna, Spence, entre otros), el presente trabajo provee nuevos antecedentes acerca de la evolución supérgena de la región, expandiendo el estudio de la génesis de atacamita hacia la zona sur del Desierto de Atacama.

8. Bibliografía

- Amand, P., Allen, C. (1960). Strike-slip faulting in northern Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 71(12), 1965.
- Arabasz, W. (1971). Geological and geophysical studies of the Atacama fault zone in northern Chile. (Doctoral dissertation, California Institute of Technology).
- Arancibia, G., Matthews, S., de Arce, C. (2006). K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of supergene processes in the Atacama Desert, northern Chile: Tectonic and climatic relations. *Journal of the Geological Society*, 163(1), 107–118.
- Arcuri, T., Brimhall, G. (2003). The chloride source for atacamite mineralization at the Radomiro Tomic porphyry copper deposit, northern Chile. *Economic Geology*, 98(8), 1667–1681.
- Barnes, J., Prather, T., Cisneros, M., Befus, K., Gardner, J., Larson, T. (2014). Stable chlorine isotope behavior during volcanic degassing of H₂O and CO₂ at Mono Craters, CA. *Bulletin of Volcanology*, 76(3), 805.
- Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., Palma, G. (2017). Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach. *Ore Geology Reviews*, 81, 62–78.
- Barton, M. (2014). Iron oxide (-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) systems. *Treatise on Geochemistry*, 13, 515-541.
- Bell, C. (2010). The Lower Paleozoic metasedimentary basement of the Coastal Ranges of Chile between 25°30' and 27°S. *Andean Geology*, (17).
- Bell, C. (1984). Deformation produced by the subduction of a Palaeozoic turbidite sequence in northern Chile. *Journal of the Geological Society*, 141(2), 339-347.
- Bonson, C. (1998). Fracturing, fluid processes and mineralization in the Cretaceous continental magmatic arc of northern Chile (25°15'-27°15' S). (Doctoral dissertation, Kingston University).
- Cameron, E., Leybourne, M., Kelley, D. (2002). Exploring for deeply covered mineral deposits: Formation of geochemical anomalies in northern Chile by earthquake-induced surface flooding of mineralized groundwaters. *Geology* 30(11), 1007–1010.
- Cameron, E., Leybourne, M., Palacios, C. (2007). Atacamite in the oxide zone of copper deposits in northern Chile: involvement of deep formation waters?. *Mineralium Deposita*, 42(3), 205-218.
- Cameron, E., Leybourne, M., Reich, M., Palacios, C. (2010). Geochemical anomalies in northern Chile as a surface expression of the extended supergene metallogenesis of buried copper deposits. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10(2), 157-169.

- Chong, G. (1973). Reconocimiento geológico del área Catalina-Sierra de Varas y estratigrafía del Jurásico del Profeta, Provincia de Antofagasta. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 1-284.
- Chong, G. (1976). Las relaciones de los sistemas Jurásico y Cretácico en la zona preandina del norte de Chile. Congreso Geológico Chileno No. 1, Actas, Vol.1, A21-A42.
- Coira, B., Davidson, J., Mpodozis, C., Ramos, V. (1982). Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. *Earth-Science Reviews*, 18(3-4), 303–332.
- Correa, A. (2000). Geología del yacimiento de Fe-Cu Teresa de Colmo, Región de Antofagasta, Chile. Puerto Varas, Chile: Actas 9th Congreso Geológico Chileno, 2, 102-106.
- Covacevich, V. (1985). Observaciones paleontológicas de muestras provenientes de las hojas de Taltal y Chañaral, Región de Antofagasta (Parte 2). Servicio nacional de geología y minería.
- Covacevich, V. (1982). Observaciones paleontológicas de muestras provenientes de las Hojas de Taltal y Chañaral, Región de Antofagasta (Parte 1). Servicio nacional de geología y minería.
- Covacevich, V., Escobar, F. (1979). La presencia del género *Otapiria* Marwich, 1935 (Mollusca: Bivalvia) en Chile y su distribución en el ámbito circumpacífico. Congreso Geológico Chileno No. 2, Actas, H165-H187.
- Crane, M., Sharpe, J., Williams, P. (2001). Formation of chrysocolla and secondary copper phosphate in the highly weathered supergene zones of some Australian deposits. *Records-Australian Museum*, 53(1), 49–56.
- Eggenkamp, H., Schuiling, R. (1995). $\delta^{37}\text{Cl}$ variations in selected minerals: a possible tool for exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 55(1-3), 249-255.
- Espinoza, S., Véliz, H., Esquivel, J., Ariar, J., Moraga, A. (1996). The cupriferous province of the Coastal Range, northern Chile. *Society of Economic Geologists, Special Publication*, (5), 19-32.
- Ferraris, F., Di Biase, F. (1978). Hoja Antofagasta: Región de Antofagasta. Instituto de Investigaciones Geológicas., Carta Geológica Chile No 30, 48.
- Godon, A., Jendzejewski, N., Eggenkamp, H., Banks, D., Ader, M., Coleman, M., Pineau, F. (2004). A cross calibration of chlorine isotopic measurements and suitability of seawater as the international reference material. *Chemical Geology*, 207(1), 1-12.
- Hammerschmidt, K., Dobel, R., Friedrichsen, H. (1992). Implication of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Early Tertiary volcanic rocks from the north-Chilean Precordillera. *Tectonophysics*, 202(1), 55-81.
- Harrington. (1961). Geology of parts of Antofagasta and Atacama provinces, northern Chile. *AAPG Bulletin*, 45(2), 169-197.

- Hopper, D., Correa, A. (2000). The Panulcillo and Teresa de Colmo copper deposits: two contrasting examples of Fe-Ox Cu-Au mineralization from the Coastal Cordillera of Chile. Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: A global perspective. PGC Publishing, 177-189.
- Mercado, M. (1977). Geología de la Cordillera de la Costa entre Chañaral y Caldera. Memoria de Título, Universidad de Chile, Depto. Geología., 73.
- Mortimer, C. (1973). The Cenozoic history of the southern Atacama desert, Chile. Journal of the Geological Society, 129(5), 505-526.
- Naranjo, J. A. (1978). Geología de la zona interior de la Cordillera de la Costa entre los 26°00' y 26°20', Región de Atacama. Carta Geológica de Chile No. 34, 46.
- Naranjo, J., Puig, A. (1984). Hojas Taltal y Chañaral, Regiones de Antofagasta y Calama. Carta geológica de Chile, No. 62-63.
- Palacios, C., Rouxel, O., Reich, M., Cameron E. Leybourne, M. (2011). Pleistocene recycling of copper at a porphyry system, Atacama Desert, Chile: Cu isotope evidence. Mineralium Deposita, 46(1), 1-7.
- Perez, E. (1982). Bioestratigrafía del Jurásico de Quebrada Asientos, norte de Potrerillos, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería , No. 37, 149.
- Reich, M., Snyder, G. T., Álvarez, F., Pérez, A., Palacios, C., Vargas, G., Cameron, E., Muramatsu, Y., Fehn, U. (2013). Using iodine isotopes to constrain supergene fluid sources in arid regions: insights from the Chuquicamata oxide blanket. Economic Geology, 108(1), 163-171
- Reich, M., Vasconcelos, P. (2015). Elements an international magazine of mineralogy, geochemistry and petrology. Volume 11, number 5.
- Reich, M., Palacios, C., Alvear, M., Cameron, E., Leybourne, M., Deditius, A. (2009). Iodine-rich waters involved in supergene enrichment of the Mantos de la Luna argentiferous copper deposit, Atacama Desert, Chile. Mineralium Deposita 44(5), 497-504.
- Reich, M., Palacios, C., Parada, M., Fehn, U., Cameron, E., Leybourne, M., Zuñiga, A. (2008). Atacamite formation by deep saline waters in copper deposits from the Atacama Desert, Chile: evidence from fluid inclusions, groundwater geochemistry, TEM, and ^{36}Cl data. Mineralium Deposita, 43(6), 663.
- Reich, M., Palacios, C., Vargas, G., Luo, S., Cameron, E., Leybourne, M., Parada, M., Zuñiga, A., You, C. (2009). Supergene enrichment of copper deposits since the onset of modern hyperaridity in the Atacama Desert, Chile. Mineralium Deposita, 44(5), 497-504.
- Segerstrom, K. (1968). Geología de las Hojas Copiapó y Ojos del Salado, provincia de Atacama. Inst Invest Geol, No. 24, 58.

- Senftle, F., Bracken, T. (1955). Theoretical effect of diffusion on isotopic abundance ratios in rocks and associated fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 7(1-2), 61-76.
- Sillitoe, R. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita* 38(7), 787-812.
- Sillitoe, R. (2005). Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 29, 723-768.
- Sillitoe, R., McKee, E. (1996). Age of supergene oxidation and enrichment in the Chilean porphyry copper province. *Economic Geology*, 91(1), 164-179.
- Simón, A., Marinho, R., Maycock, J. (2007). Barreal Seco Project, II Region, Chile. Minera Cielo Azul Ltd.
- Suarez. (1982). Volcanismo liásico inferior en la región costera de Antofagasta meridional: piroclastitas en la Formación Pan de Azúcar e implicancias paleogeográficas. *Revista geológica de Chile*, No 17, 83-90.
- Taylor, R. (2011). Gossans and leached cappings: field assessment. Springer Science & Business Media, 146.
- Ulriksen, C. (1979). Geochronology and Metallogeny of the Coastal Cordillera of Chile Between 25°30' and 26°00' south. Tesis doctoral, 221.

ANEXOS

ANEXO A. DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° MUESTRA	1
Clasificación Petrográfica	Profundidad
Andesita alterada con mineralización supérgena	4.49 m

OBSERVACIONES MICROSCÓPICAS
Roca con textura porfírica que presenta plagioclasas, magnetita y titanomagnetita. La epidota se dispone como reemplazo de plagioclasas. La mineralogía supérgena corresponde a atacamita en vetillas y amígdalas. En el mapa de barrido de electrones se observa continuamente cobre y cloro en una vetilla y en los bordes de un mineral primario, lo que reafirma la presencia de atacamita.

MINERALES OXIDADOS DE COBRE (15% DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Atacamita	100	En vetillas y amígdalas.

MINERALES PRIMARIOS Y DE ALTERACIÓN (85% DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Plagioclasa	45	Fenocristales subhedrales, parcialmente reemplazados a epidota.
Epidota	20	Como alteración de los fenocristales de la roca andesítica.
Titanomagnetita	35	Cúmulos cristalinos.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ÓPTICO

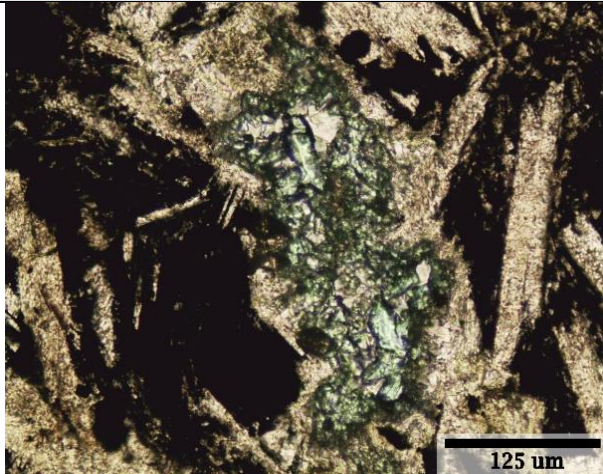


Figura Anexo 1. Fotomicrografía a nícoles paralelos y a luz transmitida, en donde atacamita está dispuesta en amígdala.

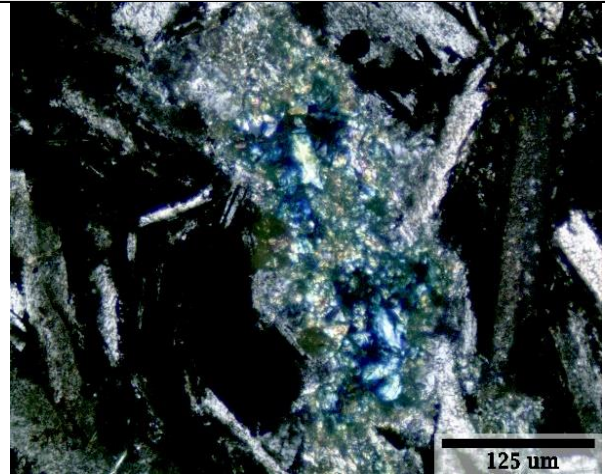


Figura Anexo 2. Misma fotomicrografía de la izquierda a nícoles cruzados, donde se aprecia color anómalo característico de la atacamita.

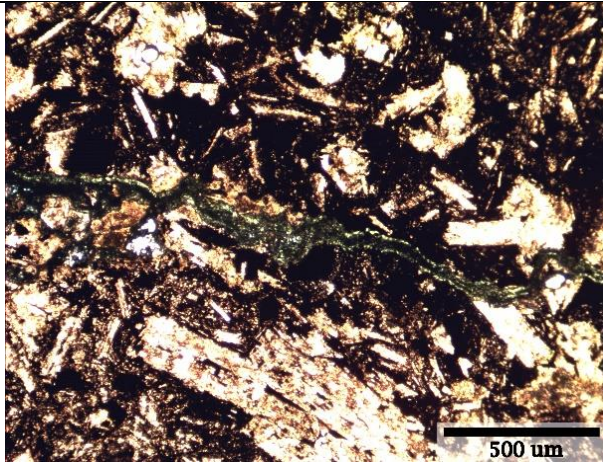


Figura Anexo 3. Fotomicrografía a nícoles paralelos y a luz transmitida. Se dispone vetilla de atacamita cortando a cristales de plagioclasas, los cuales están alterados a epidota.

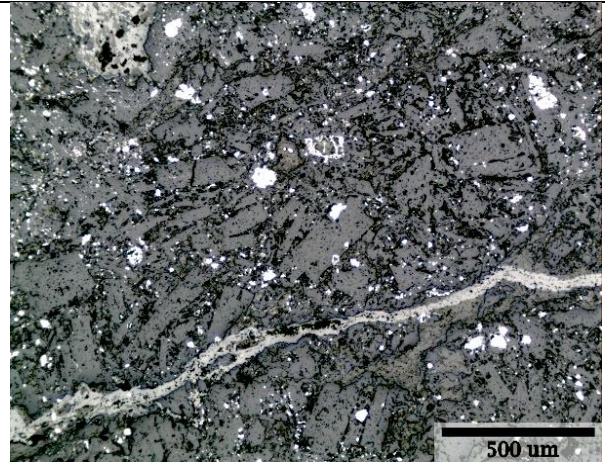


Figura Anexo 4. Fotomicrografía a luz reflejada. Cúmulos cristalinos de color blanco corresponden a titanomagnetita.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

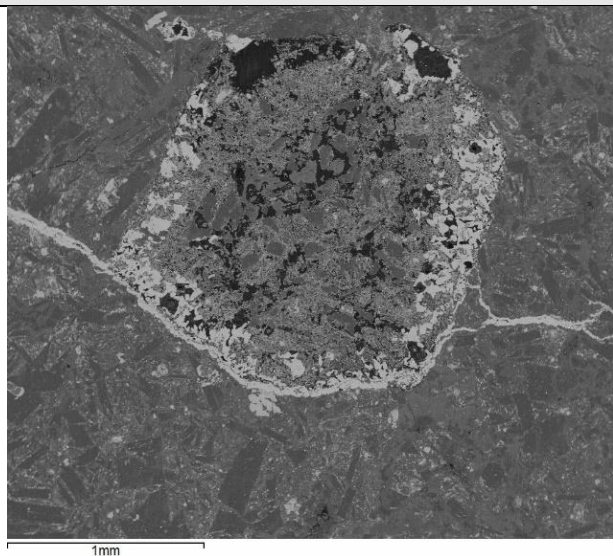


Figura Anexo 5. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). La atacamita se dispone en una vetilla y en bordes de un mineral primario. Esta imagen es de referencia para el mapa de elementos químicos en las Figuras Anexo 7, 8 y 9.

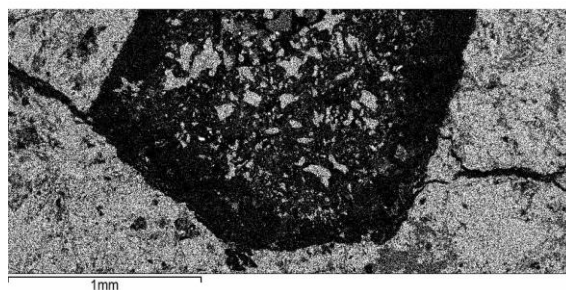


Figura Anexo 6. Mapa de distribución de silicio. Alto brillo indica mayor ocurrencia de este elemento (datos semicuantitativos).

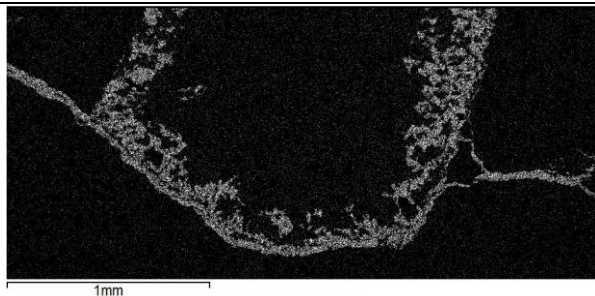


Figura Anexo 7. Mapa de distribución de cloro. Alto brillo indica mayor ocurrencia de este elemento (datos semicuantitativos).

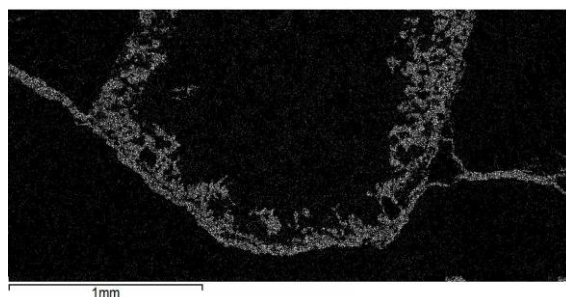


Figura Anexo 8. Mapa de distribución de cobre. Alto brillo indica mayor ocurrencia de este elemento (datos semicuantitativos).

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

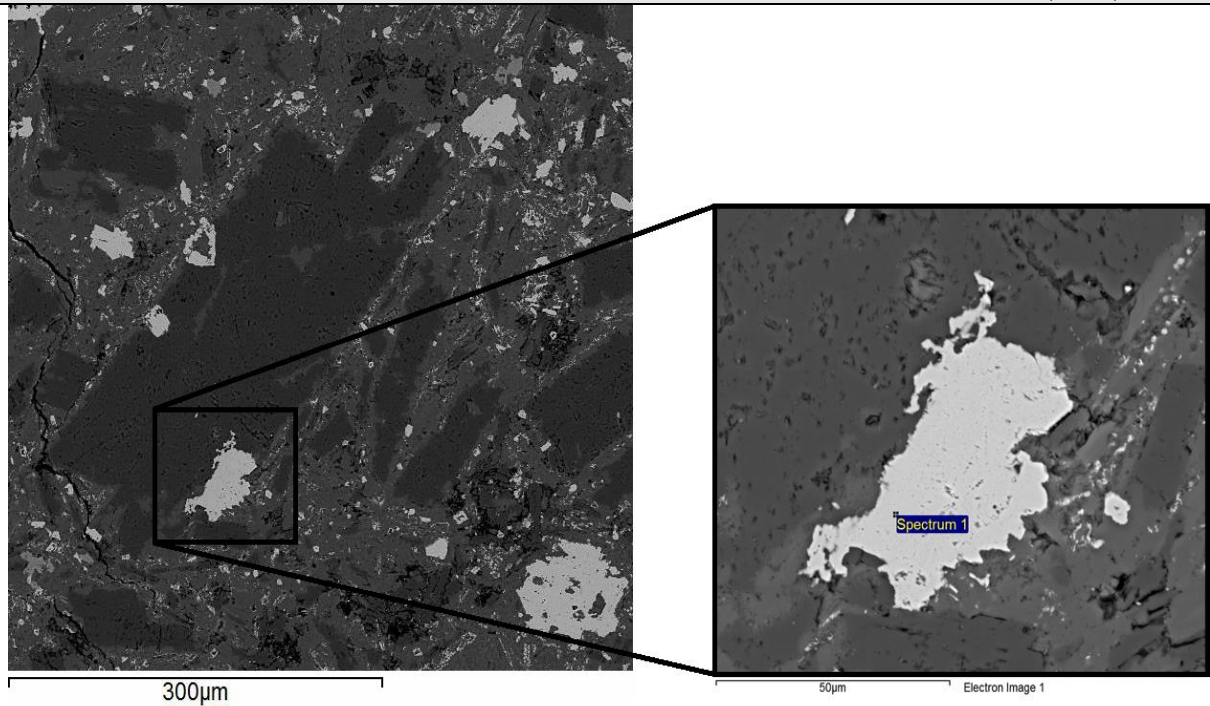


Figura Anexo 9. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Valores de Spectrum 1 evidencian la presencia de titanomagnetita en cúmulos cristalinos.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Ti	Fe
Spectrum 1	77.16	1.27	21.57

N° MUESTRA	3
Clasificación Petrográfica	Profundidad
Brecha hidrotermal de especlarita con alteración supérgena	13.83 m

OBSERVACIONES MICROSCÓPICAS
<p>Brecha hidrotermal con matriz de especlarita y clastos de andesita.</p> <p>Existe una primera mineralización supérgena caracterizada por la formación de crisocola sobre la roca brechizada, la cual es seguida por la formación de atacamita, ambas fases están dispuestas en patinas, amígdalas y vetillas. Se registra un segundo evento de formación de crisocola.</p> <p>El yeso se encuentra asociado a la formación de atacamita en vetillas. Se disponen hidróxidos de hierro con estequiometría variable en patinas sobre atacamita.</p>

MINERALES OPACOS (50% DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Especlarita	100	Matriz de la brecha hidrotermal.

MINERALES OXIDADOS DE COBRE (25% DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Atacamita	55	En vetillas, amígdalas y patinas.
Crisocola	45	En vetillas, amígdalas y patinas.

MINERALES PRIMARIOS Y DE ALTERACIÓN (25% DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Yeso	20	En vetillas, asociado a atacamita.
Goethita	30	Rellenando amígdalas, como cristales diseminados y como reemplazo de cristales de especlarita.
Hidróxidos de hierro con estequiometría variable	50	En pátinas.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ÓPTICO

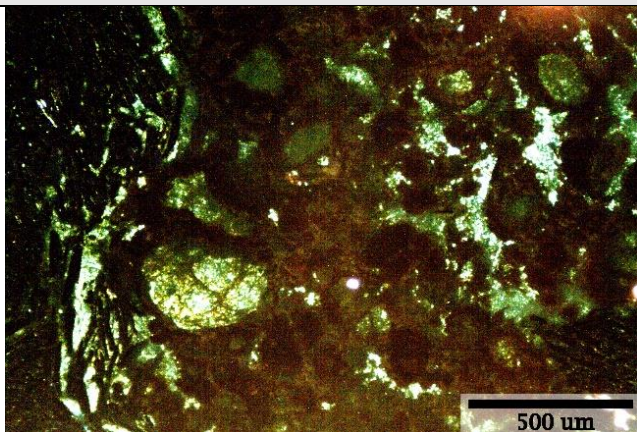


Figura Anexo 10. Fotomicrografía a nícoles paralelos y a luz transmitida en donde se aprecian patinas de hidróxidos de hierro sobre agregados de cristales anhedrales de atacamita.

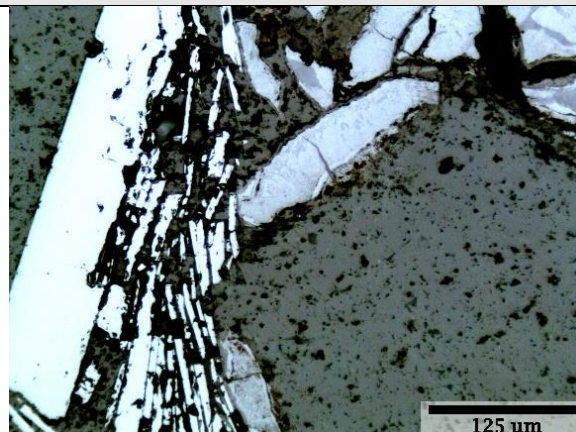


Figura Anexo 11. Fotomicrografía a luz reflejada. A la izquierda se observa cristales de especularita. A la derecha se observa atacamita de color gris oscuro reemplazando bordes de cristales de goethita.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

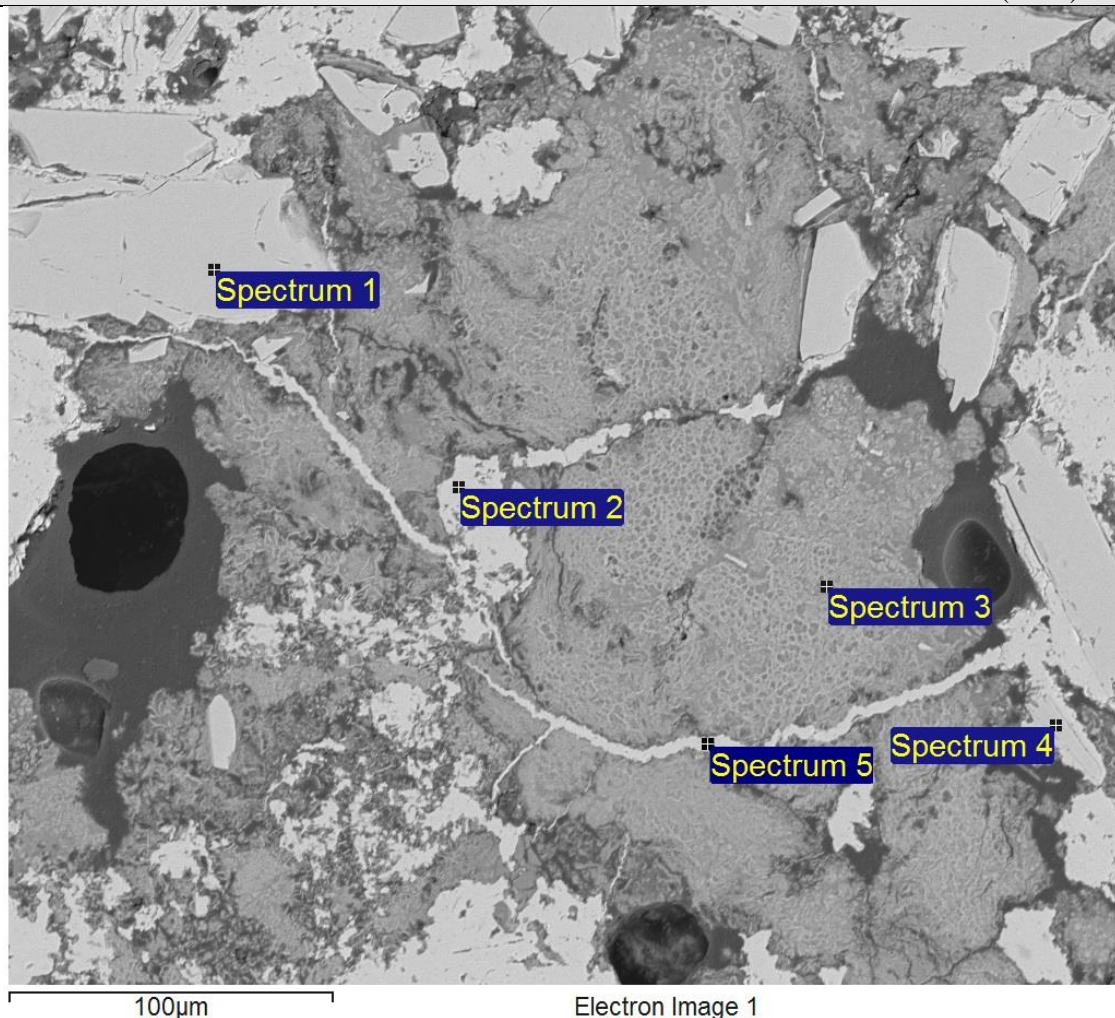


Figura Anexo 12. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 2 y 5 asociados a atacamita en vetilla cortando a crisocola. Los granos de crisocola presentan contenido de hierro en su composición química (Spectrum 3). Valores de Spectrum 1 y 4 se relacionan a especularita.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Al	Si	Cl	Fe	Cu
Spectrum 1	71.67				28.33	
Spectrum 2	59.65			14.10		26.25
Spectrum 3	71.47	1.34	11.06		8.07	8.06
Spectrum 4	69.61				30.39	
Spectrum 5	61.73			12.85	0.52	24.9

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

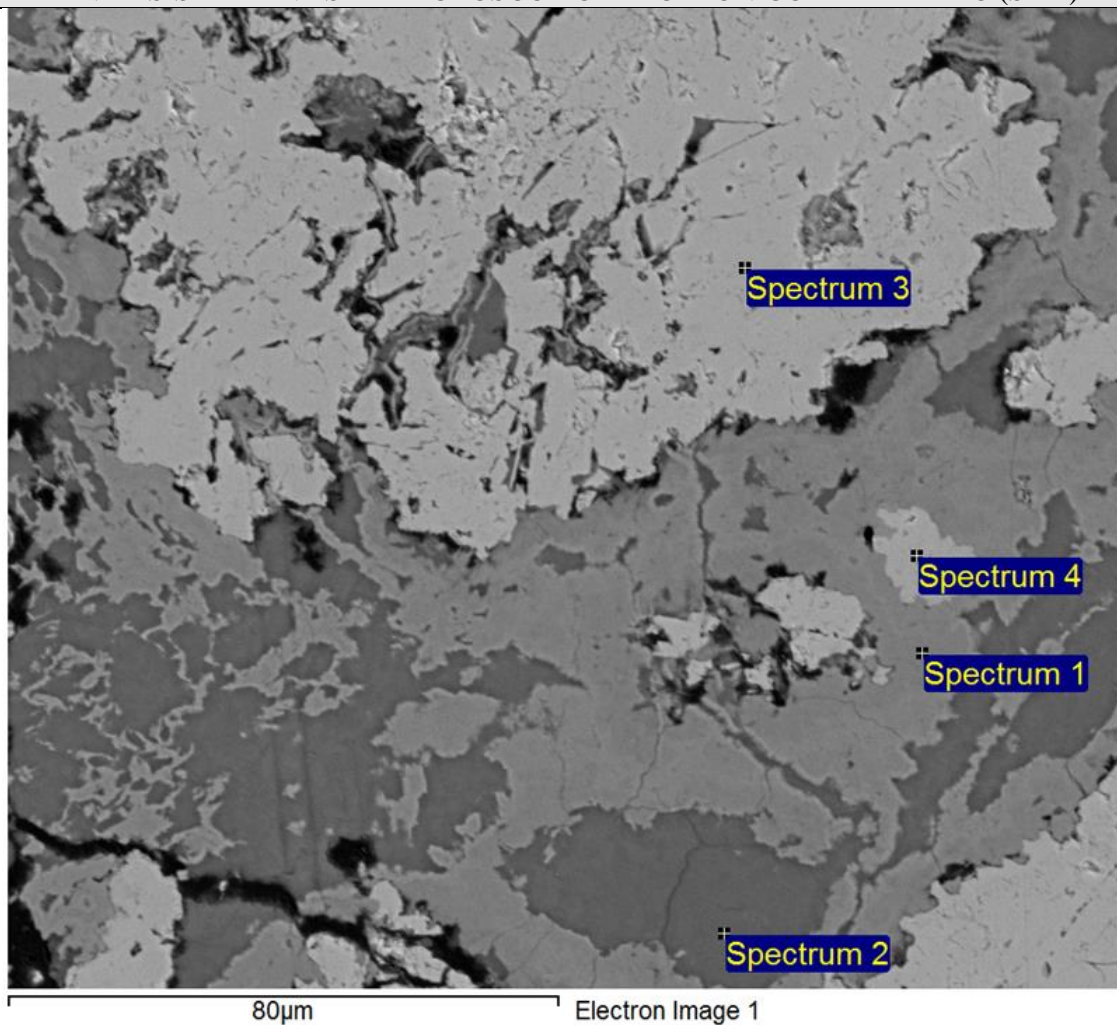


Figura Anexo 13. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 4 se asocia a atacamita ubicada en forma de islas, provenientes del cristal en Spectrum 3. Islas de atacamita se ubican dentro de la vetilla de crisocola (Spectrum 2). La crisocola presenta contenido de hierro en su composición química (Spectrum 1).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Al	Si	Cl	Fe	Cu
Spectrum 1	75.81	1.09	2.20		18.27	2.63
Spectrum 2	70.12	1.75	16.06			12.07
Spectrum 3	54.98			14.93		30.09
Spectrum 4	57.76			14.67		27.57

DATOS MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

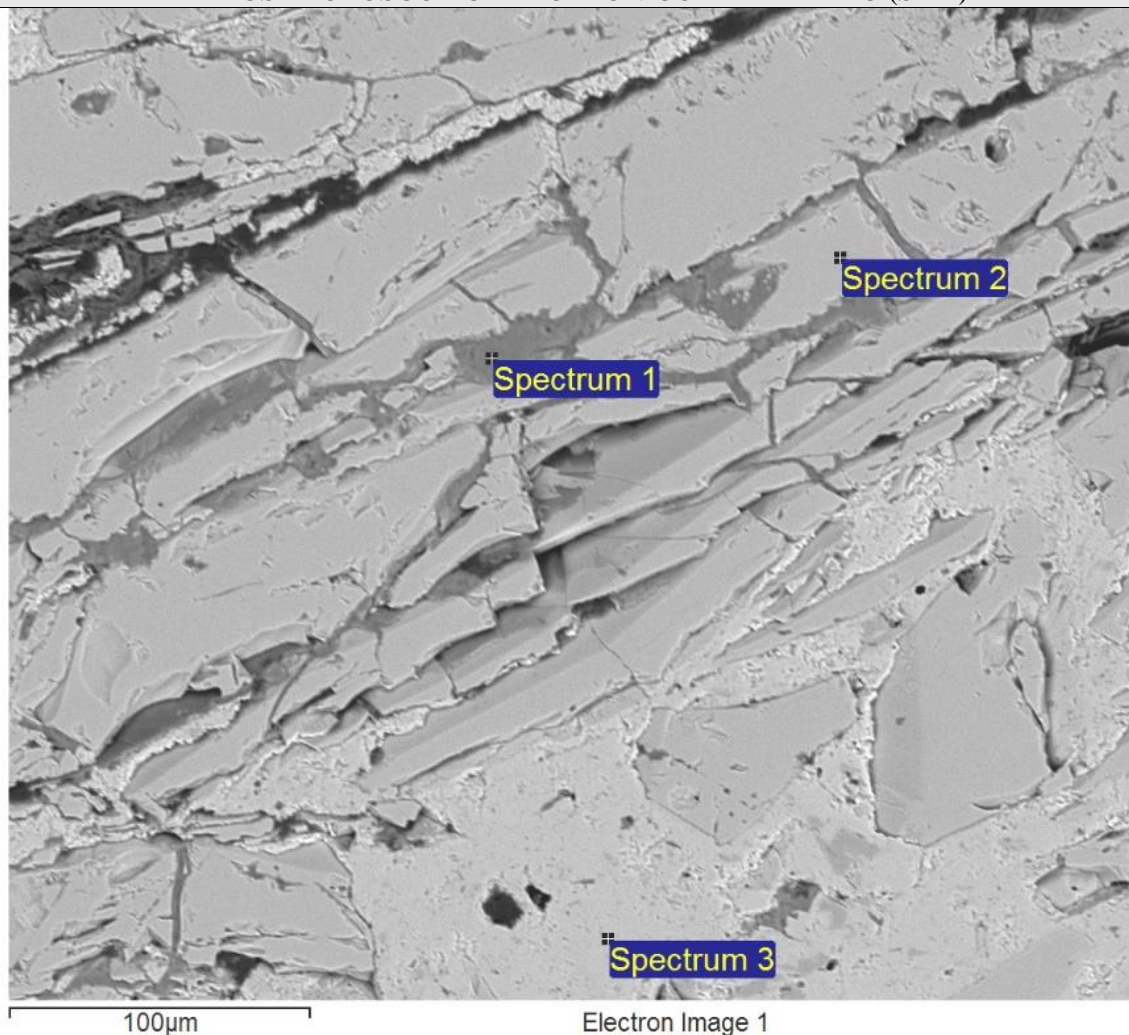


Figura Anexo 14. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Valores de Spectrum 1 se relacionan a crisocola y Spectrum 3 a atacamita, ambas fases rellenan espacios entre cristales de especularita (Spectrum 2).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Al	Si	Cl	Fe	Cu
Spectrum 1	69.25	1.47	16.43			12.85
Spectrum 2	70.24				29.76	
Spectrum 3	57.39			13.77		28.84

N° MUESTRA	5
Clasificación Petrográfica	Profundidad
Brecha hidrotermal de especlarita con alteración supérgena	18.85 m

OBSERVACIONES MICROSCÓPICAS

Roca correspondiente a una brecha hidrotermal con matriz de especlarita y clastos de andesita. Se dispone crisocola de forma diseminada y en amígdalas. Goethita se dispone en bordes de amígdalas de crisocola. Los hidróxidos de hierro de estequiometría variable reemplazan parcialmente a los granos de crisocola. Ocasionalmente se observa crisocola relleno de espacios entre cristales de especlarita, estos cristales no se presentan orientados.

Se registra atacamita cortando a la anterior mineralización de crisocola. La atacamita se dispone relleno de espacios entre cristales orientados de especlarita, en amígdalas y en vetillas.

La textura de crustificación indica una variación en la composición del fluido que genera atacamita en bordes de vetillas con estructuras de peñeta y posteriormente forma yeso en el centro.

MINERALES OPACOS (55% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Especlarita	100	Matriz hidrotermal.

MINERALES OXIDADOS DE COBRE (15% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Atacamita	85	Rellenando espacios, en amígdalas y en vetillas.
Crisocola	15	Diseminada y en amígdalas.

MINERALES PRIMARIOS Y DE ALTERACIÓN (30% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Yeso	20	En vetillas, asociado a la formación de atacamita.
Goethita	30	Posee textura coloidal y se dispone en bordes de amígdalas de crisocola.
Hidróxidos de hierro con estequiometría variable	50	En pátinas, reemplazando bordes de crisocola.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ÓPTICO

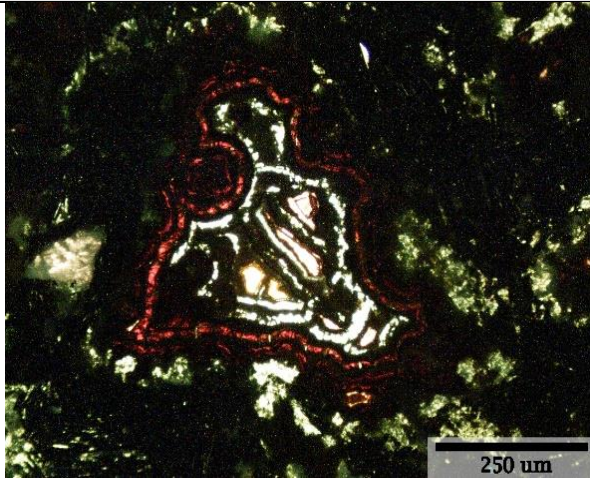


Figura Anexo 15. Fotomicrografía a luz transmitida y a nicoles paralelos. Se aprecia goethita con textura coloidal, la cual se dispone en borde de amígdala de crisocola.

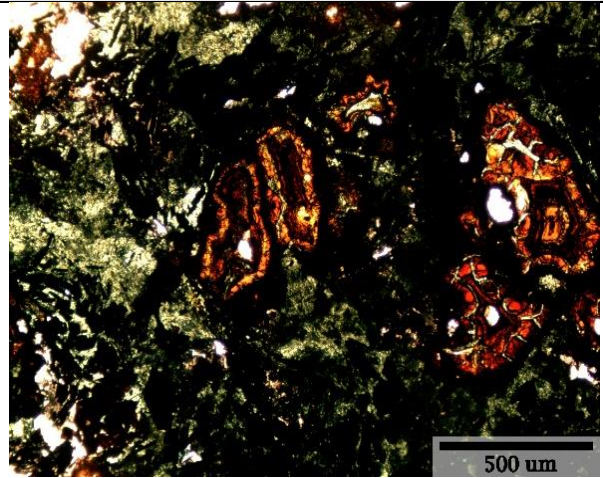


Figura Anexo 16. Fotomicrografía a luz transmitida y a nicoles paralelos en donde se observa vetillas de atacamita cortando a goethita, la cual se dispone en bordes de amígdalas y posee textura coloidal.

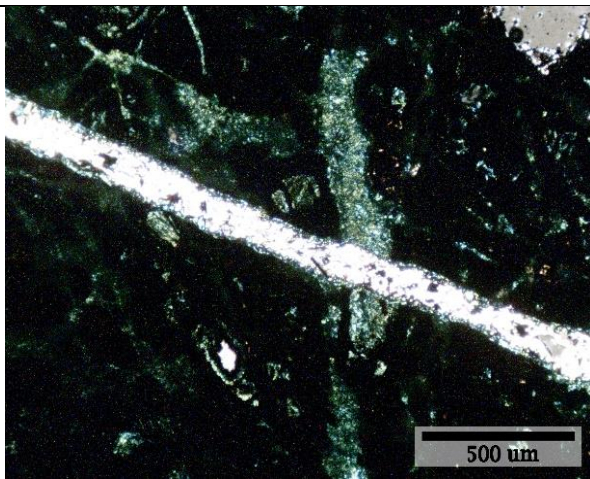


Figura Anexo 17. Fotomicrografía en donde vetilla de yeso con crecimiento de atacamita en bordes corta a vetilla de atacamita (nicoles cruzados y luz transmitida).

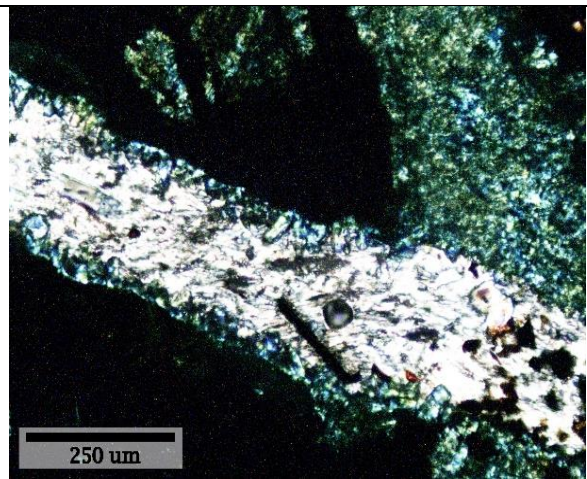


Figura Anexo 18. Fotomicrografía ampliada de Figura Anexo 17, donde se observa el crecimiento de atacamita con textura de crustificación y estructura de peineta, la cual está dispuesta en los bordes de la vetilla. Se aprecia la formación de yeso en el centro de esta.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

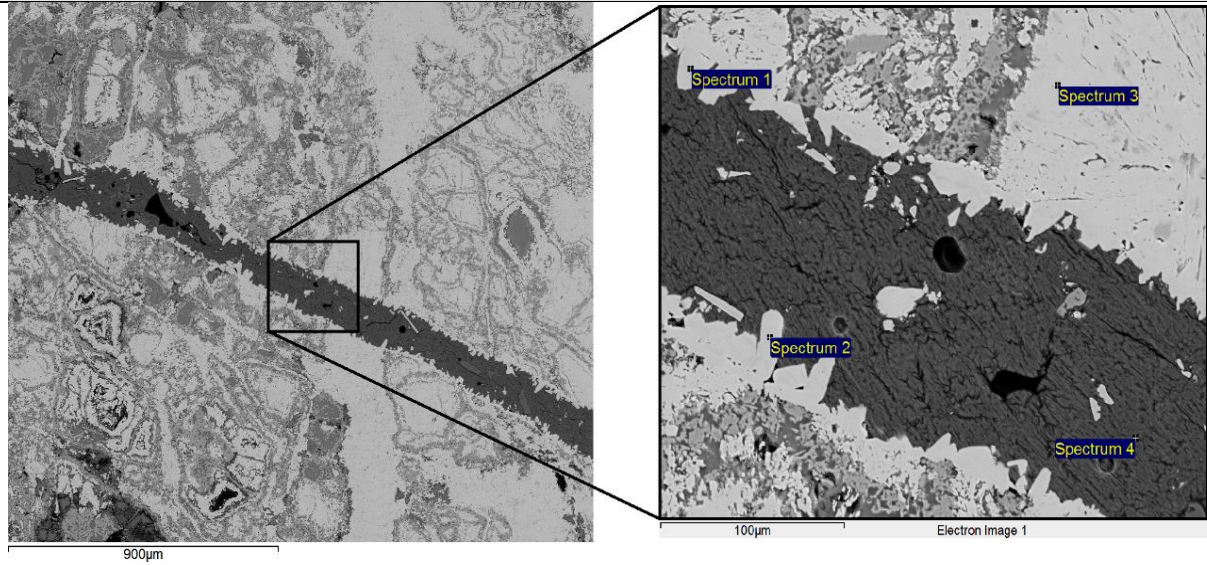


Figura Anexo 19. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Análisis en el mismo sector que Figura Anexo 18. Se dispone atacamita con estructura de peineta formada en los bordes de la vetilla (Spectrum 1 y 2) y con yeso en el centro (Spectrum 4). Spectrum 3 muestra valores asociados a atacamita en vetilla, la cual es cortada por la vetilla de atacamita-yeso.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Mg	Al	S	Cl	Ca	Fe	Cu
Spectrum 1	57.26	0.98	0.50		15.98		0.33	24.95
Spectrum 2	59.30	0.77			15.23		0.31	24.39
Spectrum 3	58.48				15.18		0.27	26.07
Spectrum 4	71.41			15.75		12.84		

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

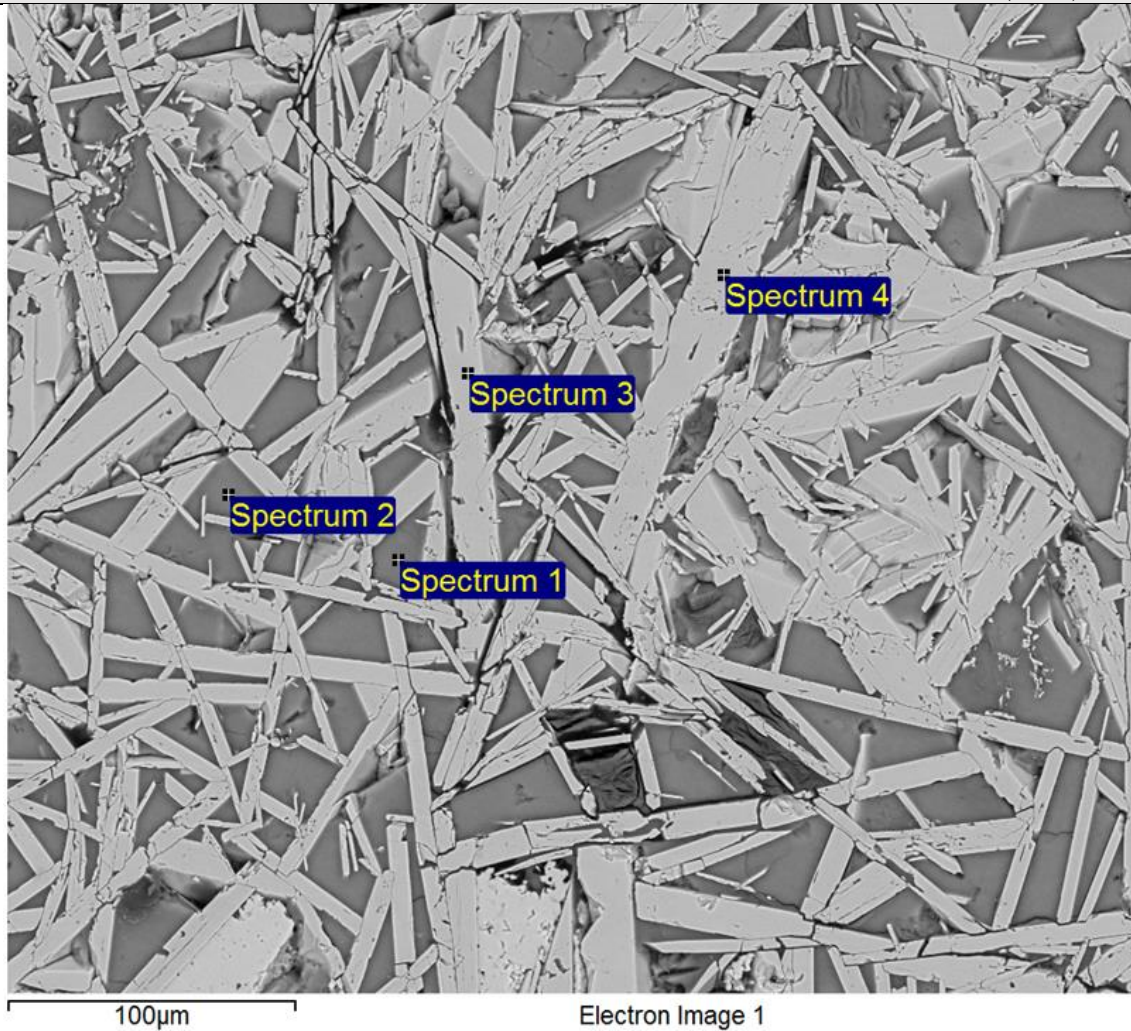


Figura Anexo 20. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 corresponden a crisocola, la cual presenta contenido de hierro en su composición química. Spectrum 3 y 4 muestran composición de hematita especular.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Cu
Spectrum 1	69.75	1.00	1.85	17.38		1.25	8.77
Spectrum 2	70.69	0.89	1.55	16.95	0.21	1.08	8.62
Spectrum 3	75.51		0.46			24.04	
Spectrum 4	75.35		0.47			24.18	

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

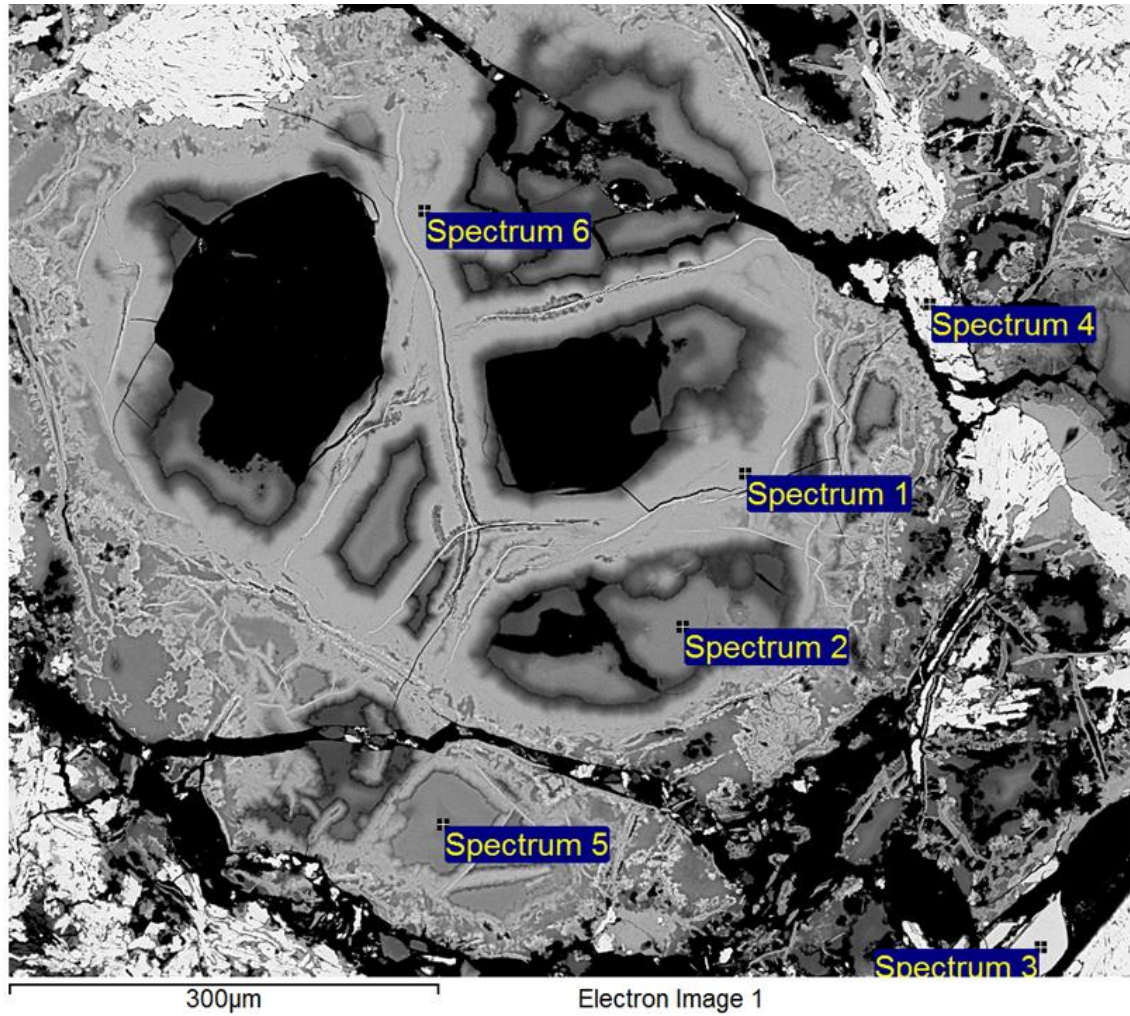


Figura Anexo 21. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 6 entrega valores químicos asociados hidróxidos de hierro dispuestos en bordes de amígdalas como reemplazo de crisocola. En el centro de las amígdalas es conservada la crisocola (Spectrum 2 y 5). Especularita se dispone en cristales subhedrales (Spectrum 3). Por otra parte se registra atacamita (Spectrum 4).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Fe	Cu
Spectrum 1	79.06	0.82	0.56	2.78	0.24			14.32	2.23
Spectrum 2	72.98	0.96	1.22	13.90				3.60	7.34
Spectrum 3	75.11		0.35					24.54	
Spectrum 4	65.74	0.49				13.41		0.42	19.95
Spectrum 5	71.49	0.76	1.44	16.82		0.19	0.12	0.45	8.73
Spectrum 6	79.19	0.72	0.63	2.74	0.29	0.15		14.02	2.26

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

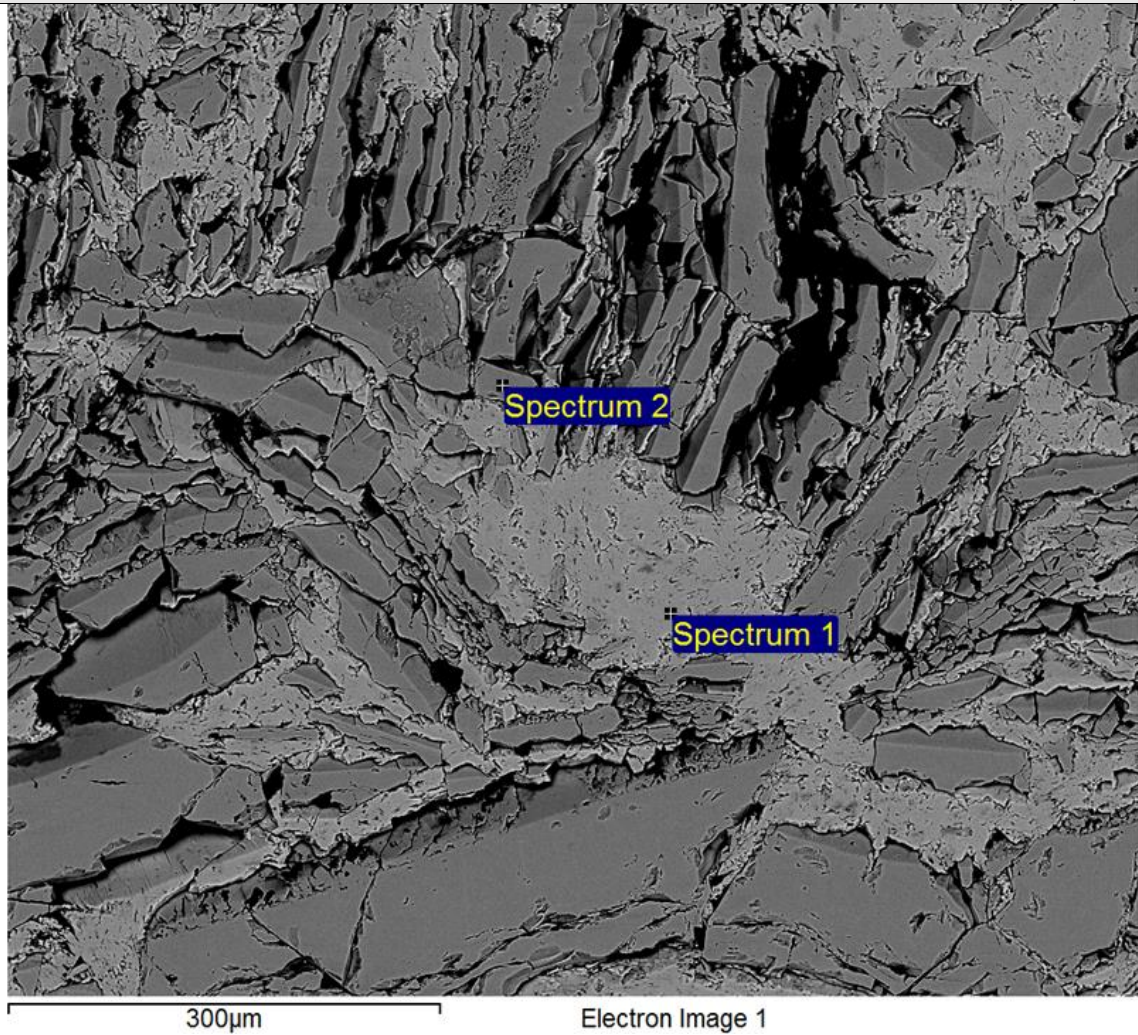


Figura Anexo 22. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Se observa atacamita (Spectrum 1) relleno de espacios entre cristales de specularita (Spectrum 2).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Cl	Fe	Cu
Spectrum 1	68.19	12.02	0.65	19.14
Spectrum 2	76.13		23.87	

N° MUESTRA	6
Clasificación Petrográfica	Profundidad
Brecha hidrotermal de especularita con alteración supérgena	27.1 m

OBSERVACIONES MICROSCÓPICAS

Brecha hidrotermal con matriz de especularita y clastos de andesita. Los clastos de andesitas presentan plagioclasas y magnetita. Vetillas de cuarzo cortan a los clastos andesíticos.

La mineralización supérgena dispuesta sobre la roca brechizada se caracteriza por un primer proceso de formación de atacamita, la cual es reemplazada por crisocola, por yeso y por goethita.

Se registra la ocurrencia, en menor grado, de mineralización secundaria sulfurada (mineral no identificado). Además se observa la ocurrencia de un mineral de cobre oxidado no identificado.

Existe un segundo evento de generación de atacamita que se dispone en bordes de vetillas y de amígdalas. Las vetillas de atacamita del segundo evento cortan a la mineralización anterior de crisocola y a la de atacamita del primer evento.

Se reporta la presencia de carbono orgánico en vetillas asociadas a atacamita.

Se observa goethita reemplazando bordes de cristales de especularita.

MINERALES OPACOS (60% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Especularita	98	Matriz de brecha hidrotermal.
Sulfuro de cobre no identificado	2	Como patina dispuesto sobre mineral oxidado de cobre no identificado.

MINERALES OXIDADOS DE COBRE (12% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Atacamita	60	En vetillas, amígdalas y patinas. Formada en bordes de vetillas y de amígdalas con estructura de peineta y textura de crustificación.
Crisocola	35	En patina, rellenando espacios entre cristales de especularita y en amígdalas.
Oxidado de cobre no identificado	5	En patina dispuesto sobre atacamita.

MINERALES PRIMARIOS Y DE ALTERACIÓN (28% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Yeso	20	En vetillas, en menor grado en amígdalas y rellenando espacio entre cristales de especularita.
Goethita	35	Como reemplazo de bordes de especularita.
Cuarzo	10	En vetillas, cortando a clastos andesíticos.
Carbono orgánico	3	En vetillas, asociado a atacamita.
Magnetita	15	Cúmulos cristalinos de la roca andesítica
Plagioclasas	17	Fenocristales de clastos andesíticos.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

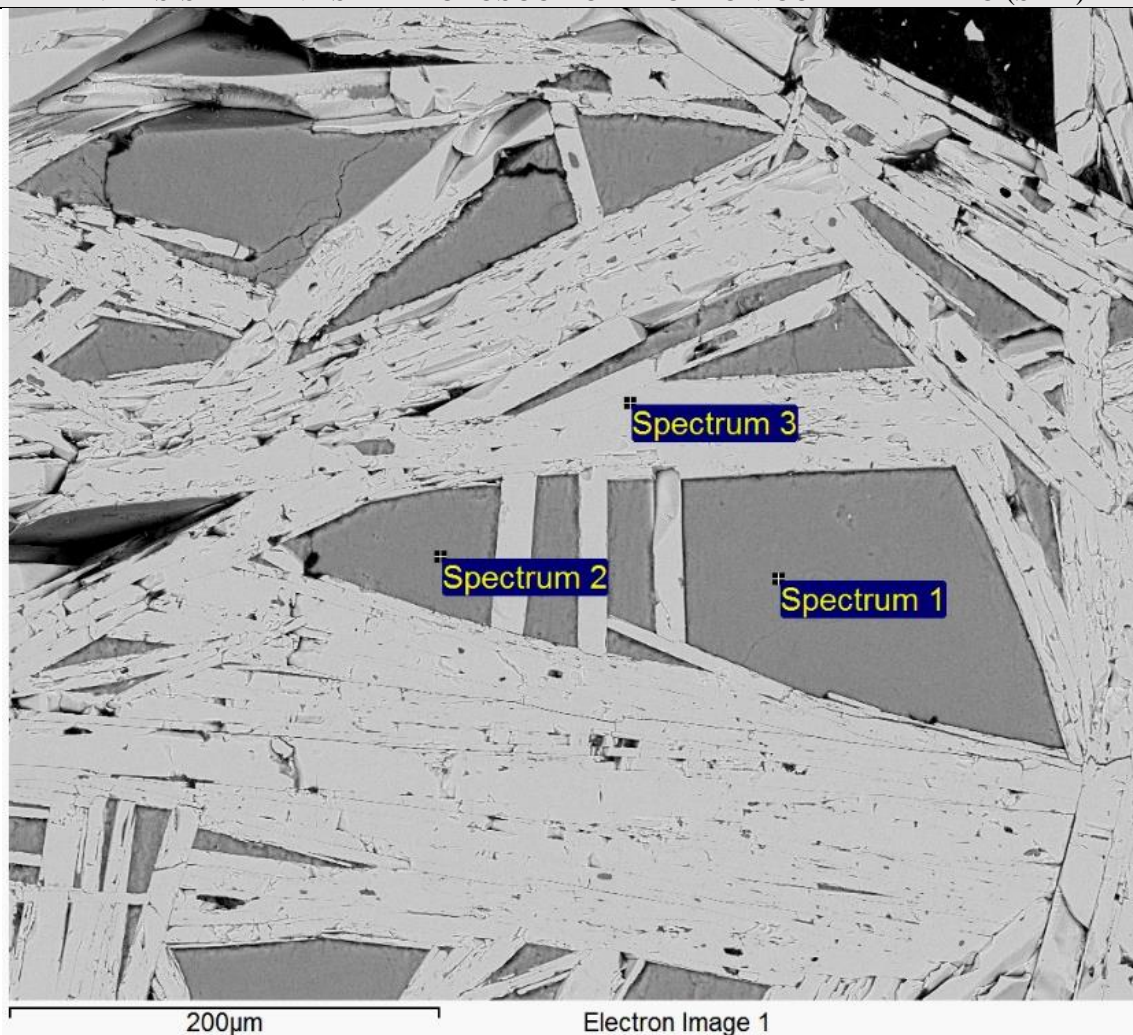


Figura Anexo 23. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 asociados a crisocola dispuesta en espacios entre cristales no orientados de specularita (Spectrum 3).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Al	Si	Fe	Cu
Spectrum 1	69.52		17.60		12.88
Spectrum 2	68.64	1.14	16.76		13.45
Spectrum 3	72.37			27.63	

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

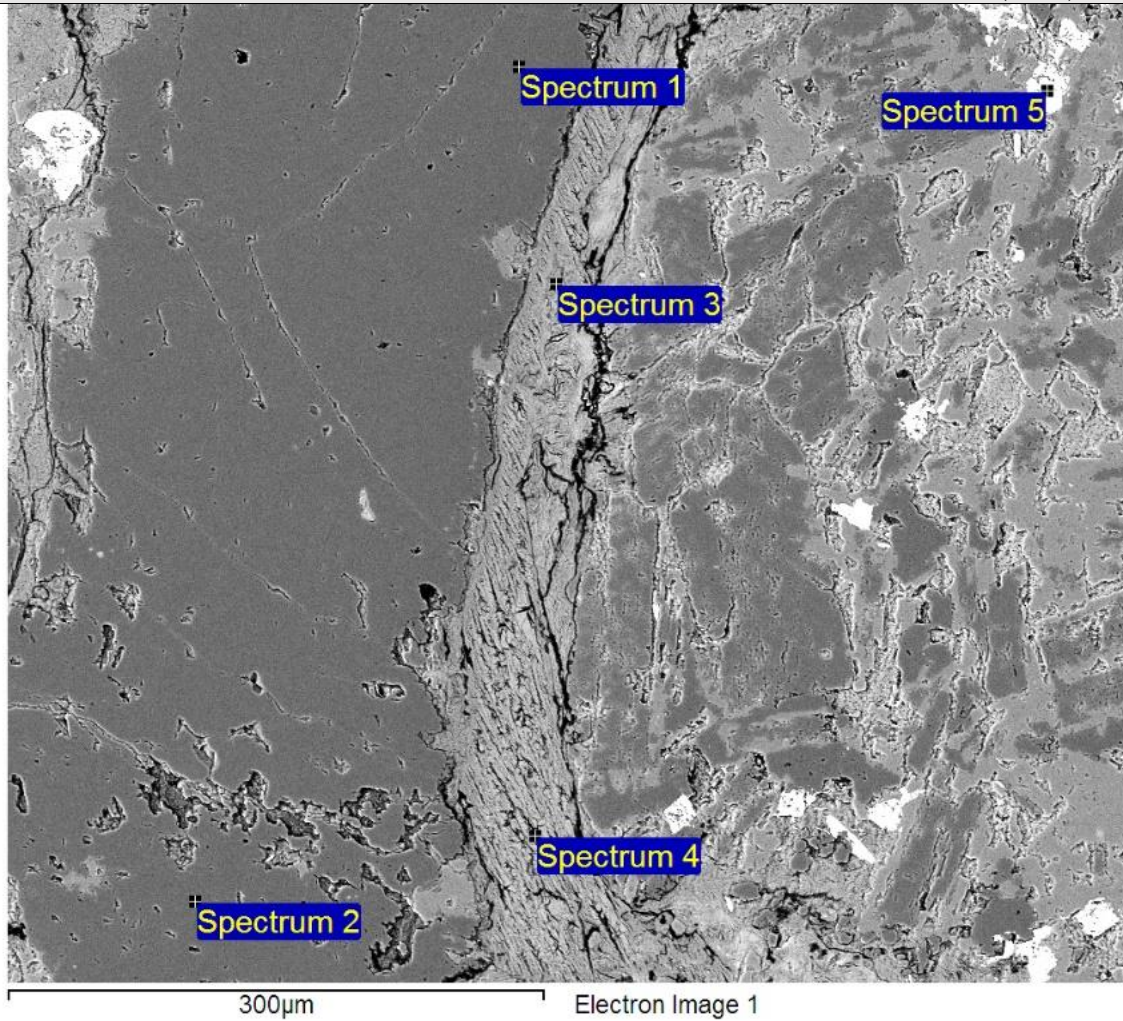


Figura Anexo 24. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 están asociados a vetilla de cuarzo. Dispuestos en bordes de esta vetilla se encuentra crisocola (Spectrum 3) y yeso (Spectrum 4). Spectrum 5 muestra valores relacionados a magnetita.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Cu
Spectrum 1	75.14			24.86				
Spectrum 2	75.54			24.46				
Spectrum 3	71.96	2.56	4.60	14.70				6.18
Spectrum 4	76.80				13.25	9.96		
Spectrum 5	74.42						25.58	

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

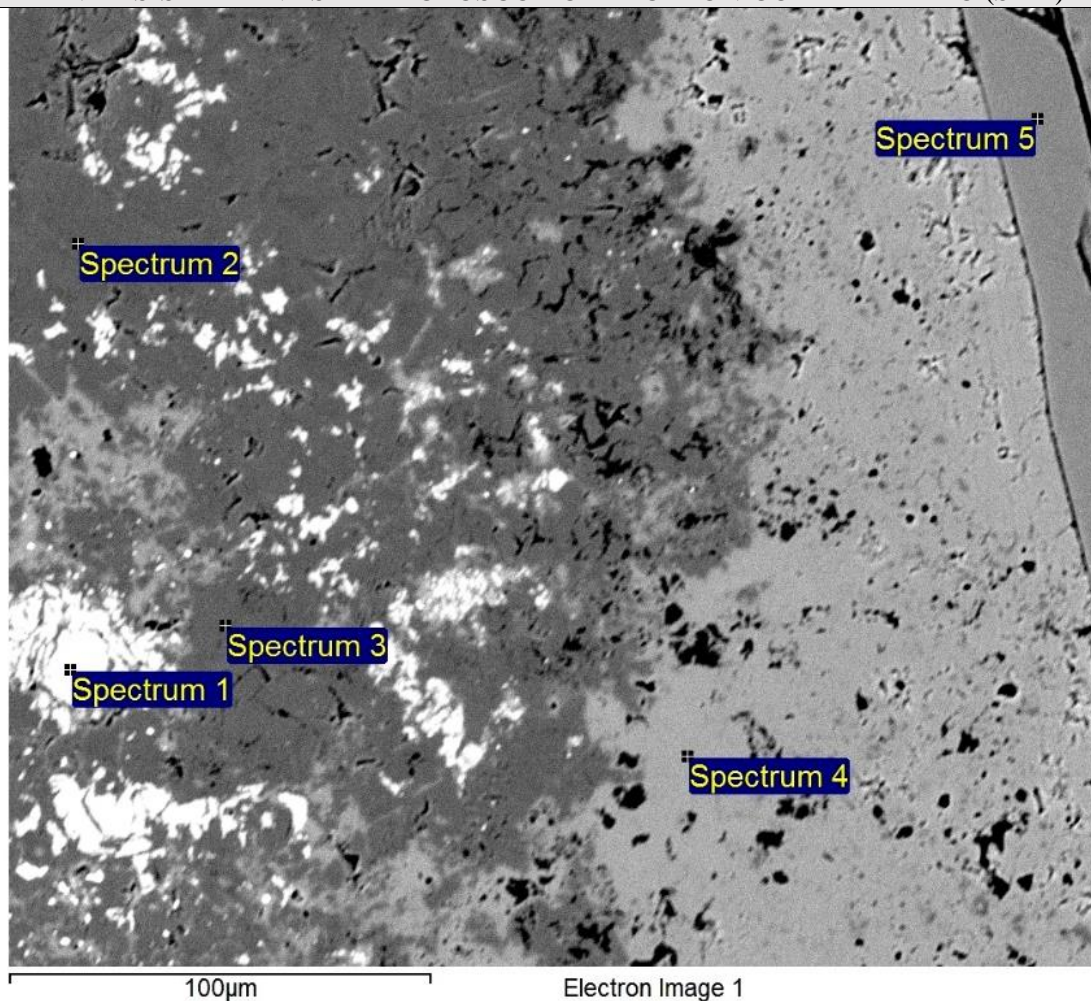


Figura Anexo 25. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 5 es asociado a especularita. Valores de Spectrum 1 se relacionan a mineral sulfurado de cobre, el cual no es identificado y que se dispone en patinas sobre mineral oxidado de cobre que tampoco es reconocido (Spectrum 2 y 3). Spectrum 4 está asociado a atacamita.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	S	Cl	Fe	Cu
Spectrum 1		31.48			68.52
Spectrum 2	77.19				22.81
Spectrum 3	76.40				23.60
Spectrum 4	61.45		12.52		26.03
Spectrum 5	73.13			26.87	

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

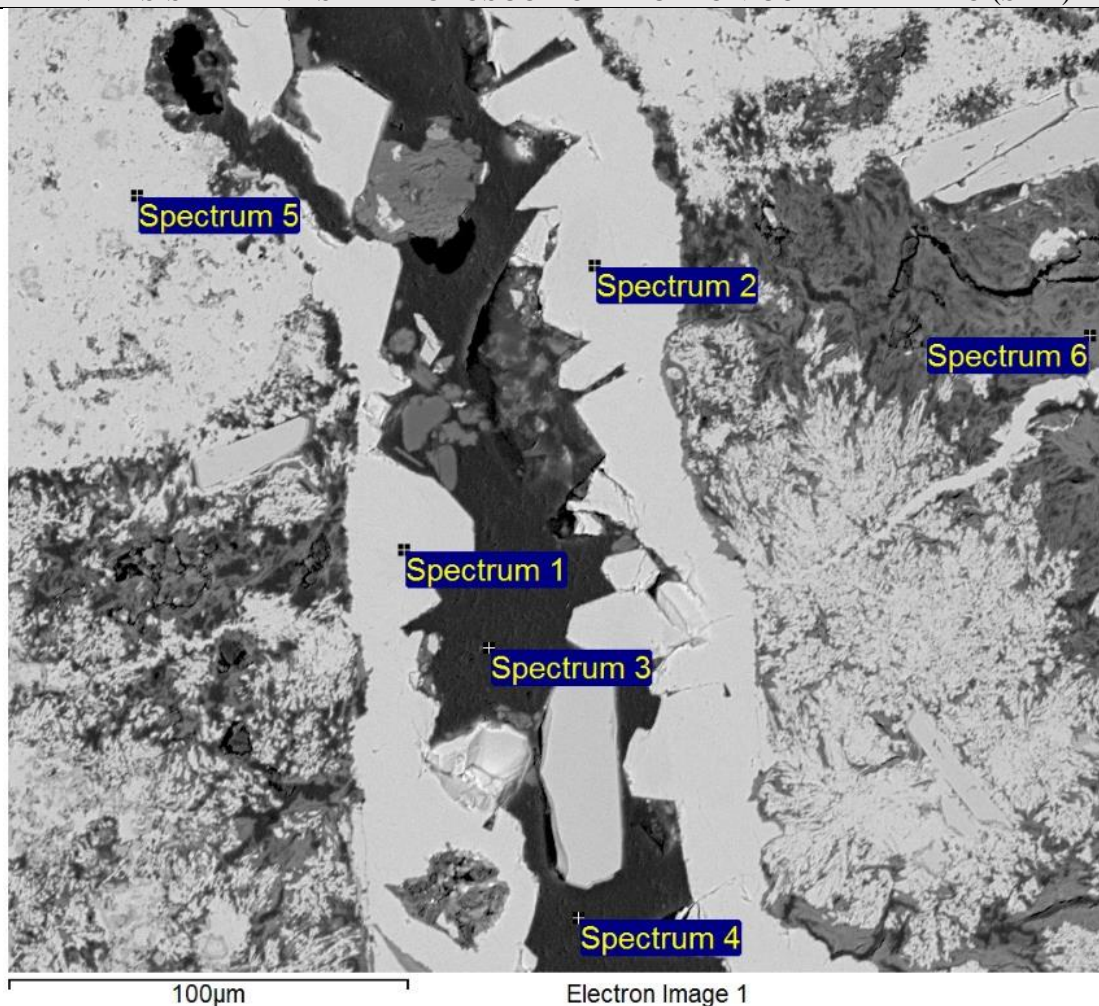


Figura Anexo 26. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 5 asociado a atacamita en pátinas dispuesta sobre crisocola (Spectrum 6), ambas cortadas por vetilla de atacamita con textura de crustificación y estructura de peineta (Spectrum 1 y 2). Spectrum 3 y 4 muestran carbono orgánico formado en el centro de esta vetilla.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	C	O	Mg	Al	Si	Cl	Cu
Spectrum 1		59.76				13.10	27.14
Spectrum 2		57.55				13.92	28.53
Spectrum 3	87.57	12.43					
Spectrum 4	84.21	15.24				0.55	
Spectrum 5		59.27				13.86	26.87
Spectrum 6		72.33	1.73	1.63	18.52		5.79

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

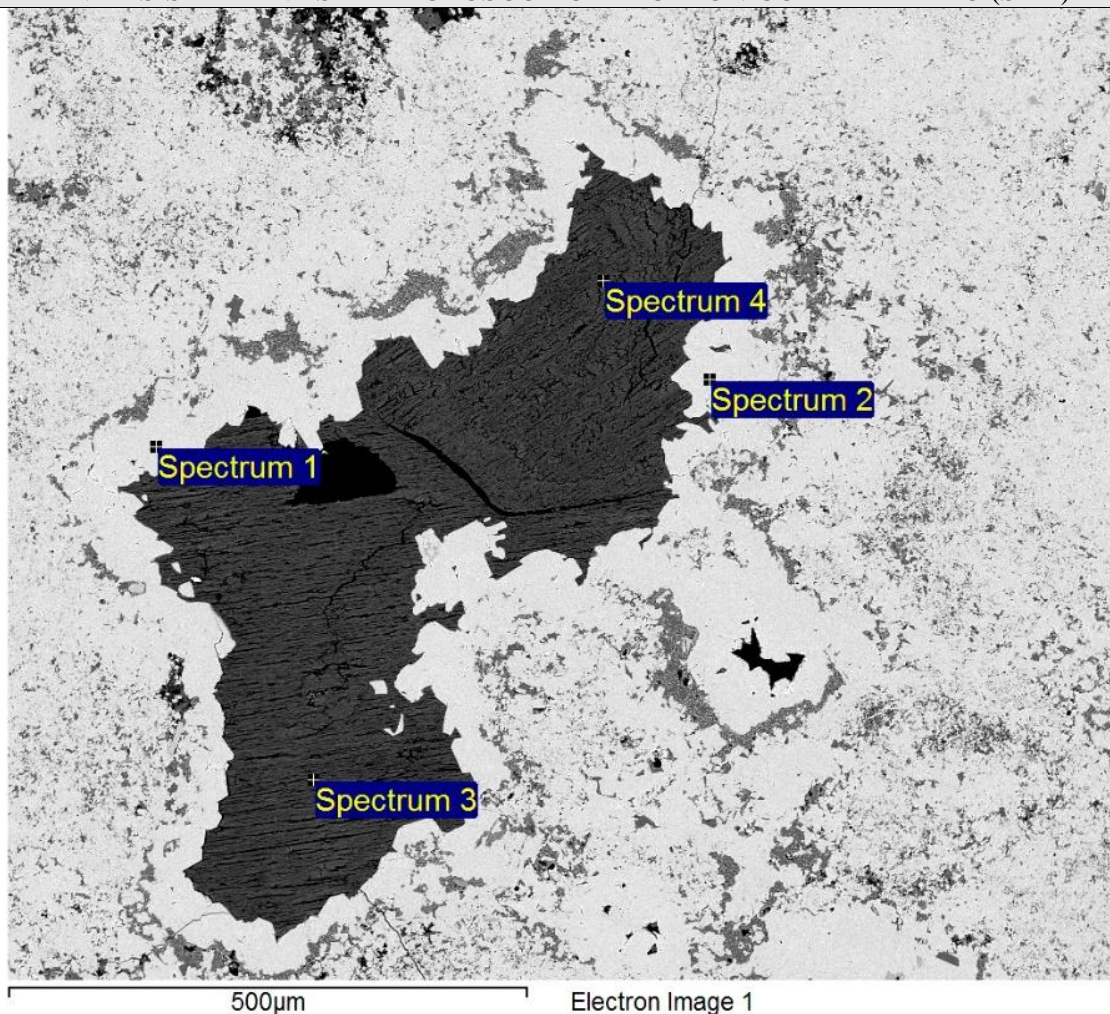


Figura Anexo 27. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 están asociados a atacamita con estructura de peineta, la cual está dispuesta en bordes de amígdala de yeso (Spectrum 3 y 4).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	S	Cl	Ca	Cu
Spectrum 1	58.34		13.42		28.24
Spectrum 2	59.80		13.18		27.02
Spectrum 3	77.60	13.22		9.19	
Spectrum 4	73.10	15.69		11.22	

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

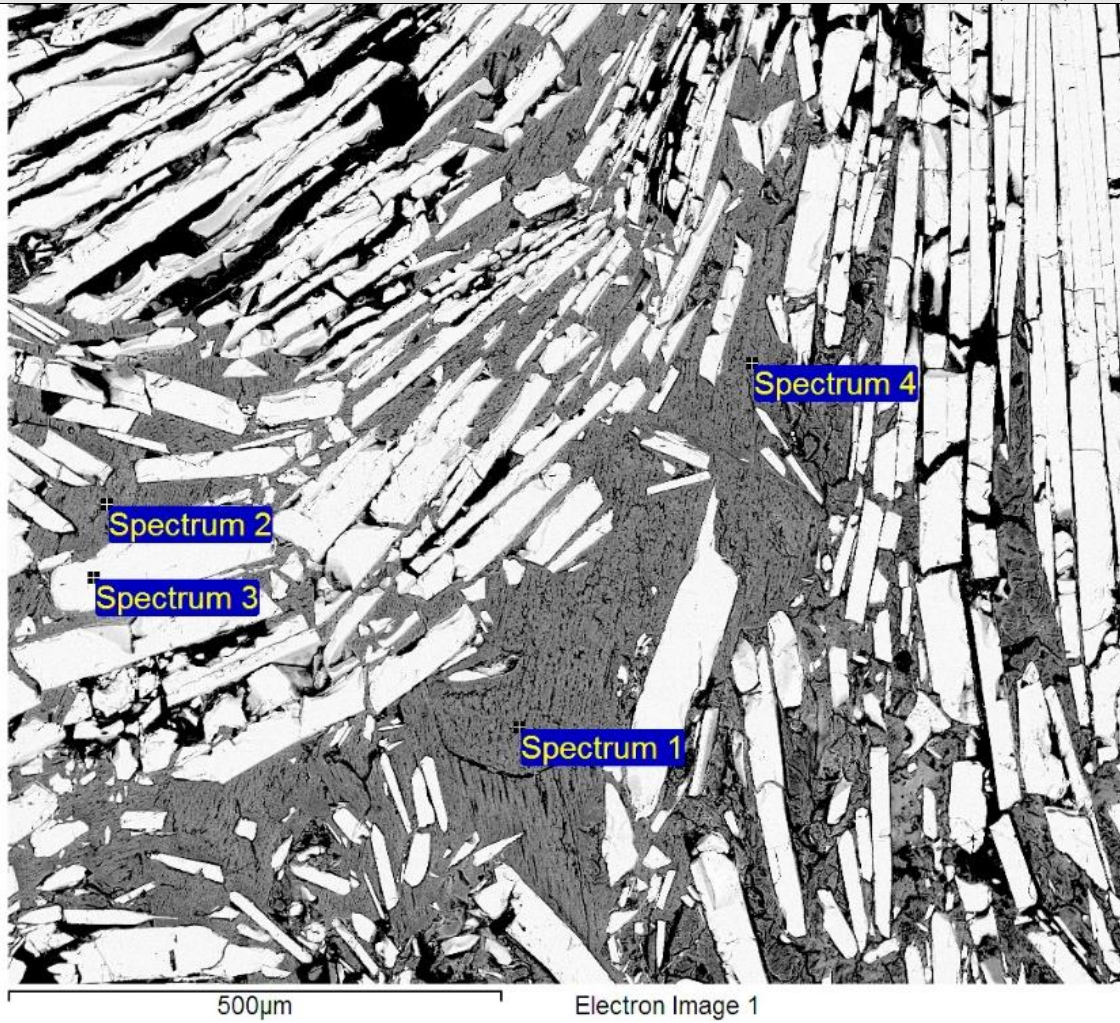


Figura Anexo 28. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1, 2 y 4 asociados a yeso dispuesto en espacios entre cristales orientados de especularita (Spectrum3).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	S	Ca	Fe
Spectrum 1	75.82	13.91	10.27	
Spectrum 2	65.07	18.83	16.09	
Spectrum 3	72.10			27.90
Spectrum 4	73.66	14.60	11.74	

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

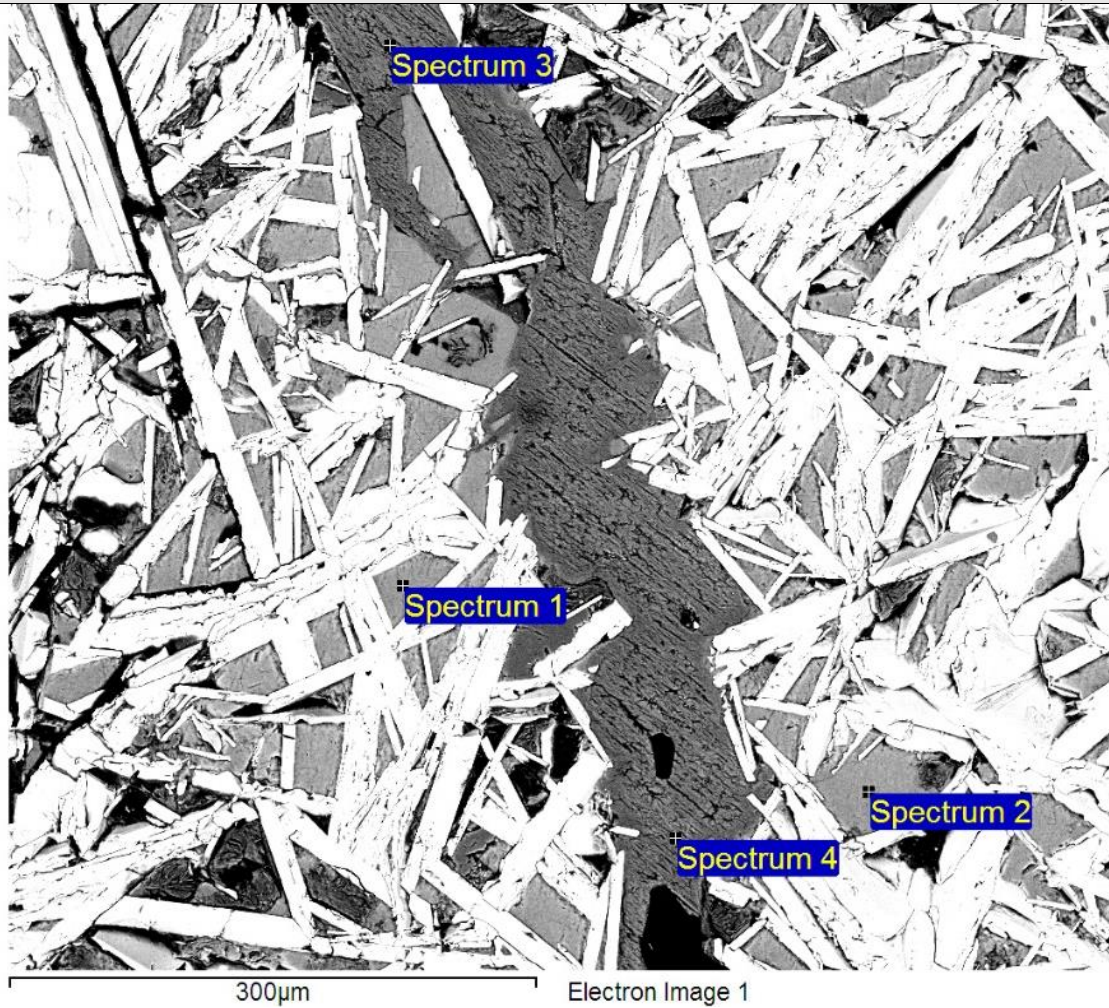


Figura Anexo 29. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 3 y 4 asociados a yeso en vetilla que corta a especularita. Se dispone crisocola relleno de espacios de cristales de especularita no orientados (Spectrum 1 y 2).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Al	Si	S	Ca	Cu
Spectrum 1	65.85	1.75	17.98			14.42
Spectrum 2	68.55	1.99	16.96			12.50
Spectrum 3	77.05			12.99	9.97	
Spectrum 4	76.18			13.73	10.09	

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

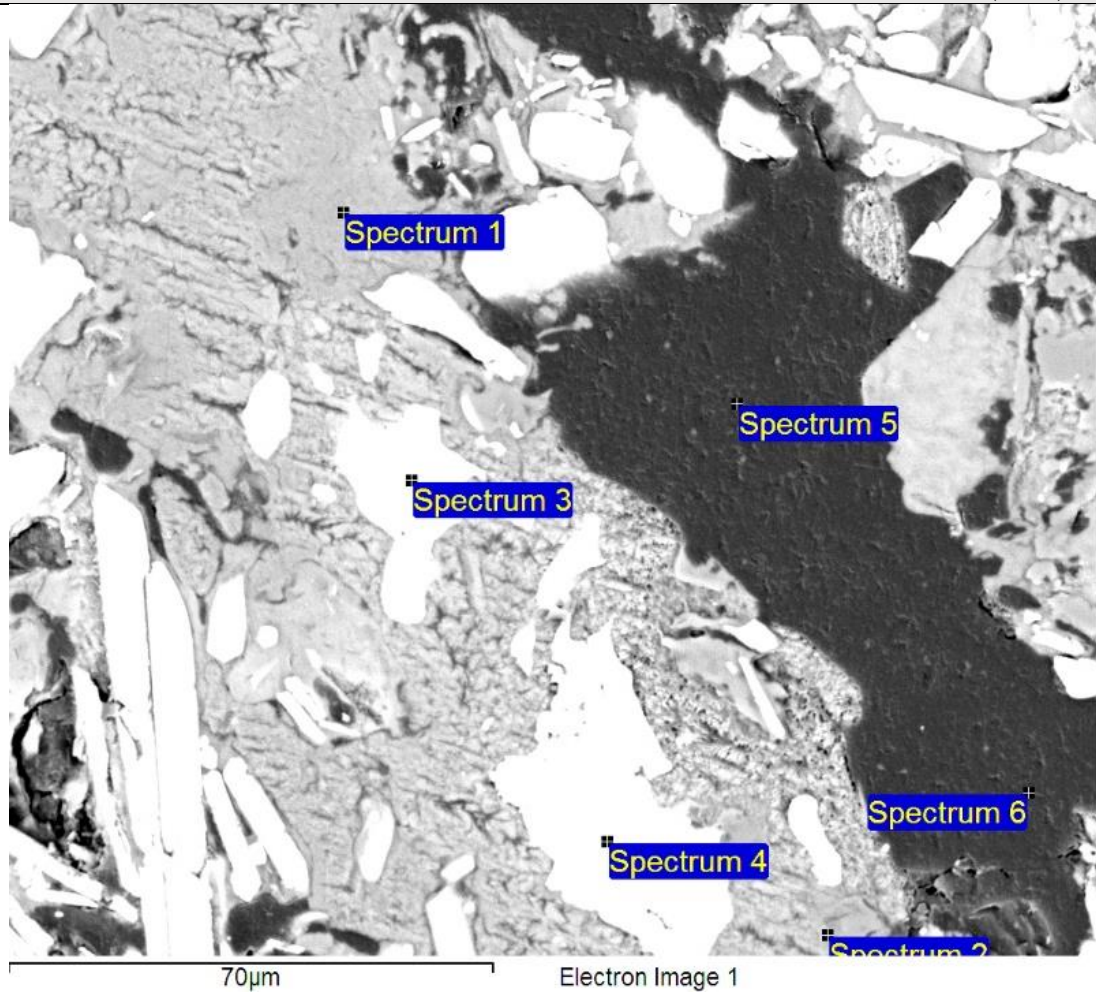


Figura Anexo 30. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 asociado a yeso. Atacamita presenta superficies cóncavas debido a su reemplazo por yeso (Spectrum 3 y 4). Spectrum 5 y 6 corresponde a carbono orgánico con bajas cantidades de cloro.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	C	O	Si	S	Cl	Ca	Cu
Spectrum 1		73.13		15.67		11.20	
Spectrum 2		76.84	1.40	11.98		9.78	
Spectrum 3		56.63			13.38		30.00
Spectrum 4		57.82			14.10		28.09
Spectrum 5	85.45	14.05			0.51		
Spectrum 6	87.23	12.10			0.67		

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

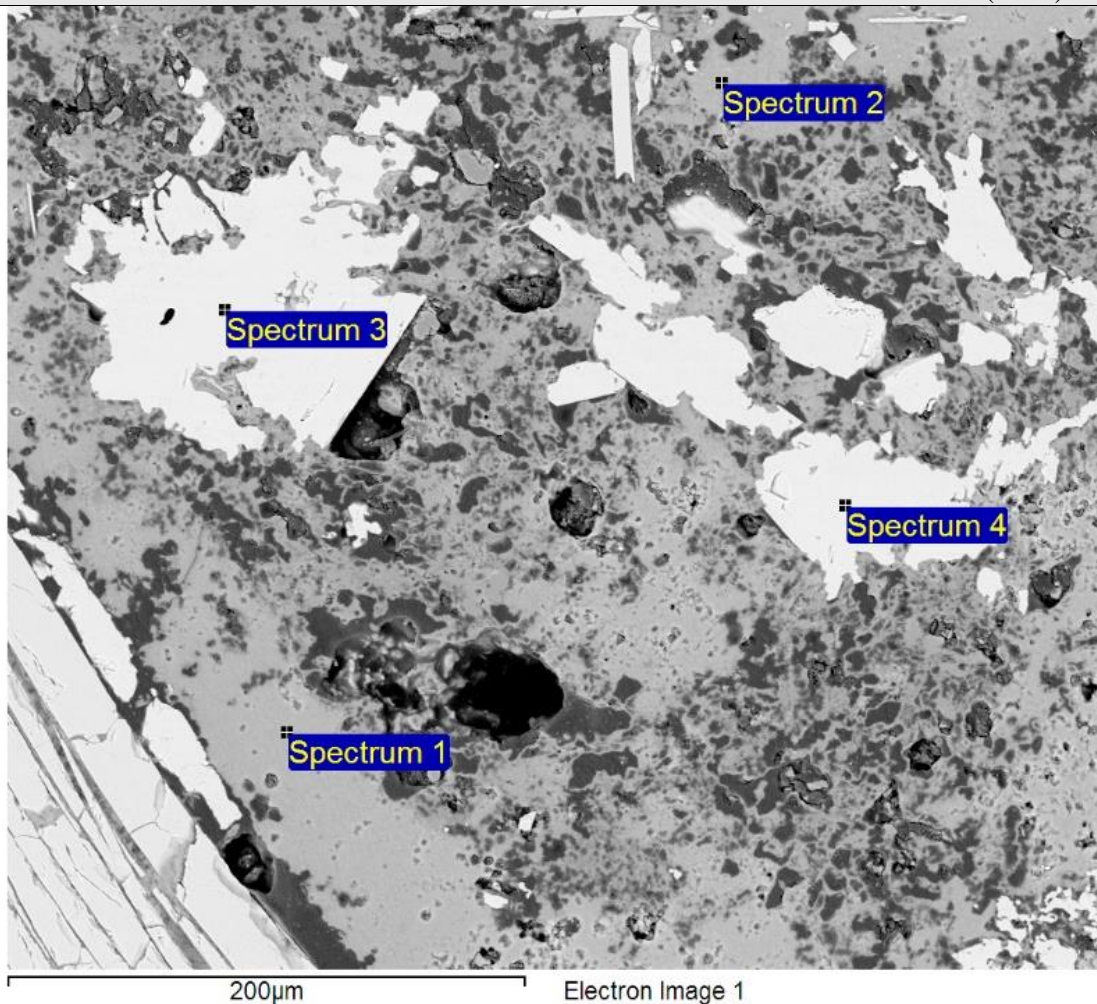


Figura Anexo 31. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 3 y 4 asociado a cristales de atacamita, los cuales son reemplazados en bordes por crisocola (Spectrum 1 y 2).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Mg	Al	Si	Cl	Cu
Spectrum 1	69.23		1.63	15.70		13.44
Spectrum 2	69.25	1.24	1.29	15.50		12.72
Spectrum 3	61.26				11.55	27.19
Spectrum 4	59.57				12.38	28.05

N° MUESTRA	9
Clasificación Petrográfica	Profundidad
Brecha hidrotermal de especularita con alteración supérgena	34.9 m

OBSERVACIONES MICROSCÓPICAS

Brecha hidrotermal con matriz de hematita especular y clastos andesíticos. Se reconoce la formación de cristales de goethita diseminados. Se aprecia lepidocrocita dispuesta en planos preferenciales de los cristales de goethita y reemplazando bordes de los cristales de especularita. Se reconocen granos diseminados de crisocola, los cuales contienen hierro en su composición química. Se registra la ocurrencia de atacamita sin ser posible determinar su eventualidad.

MINERALES OPACOS (55% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Especularita	100	Corresponde a la matriz hidrotermal y se dispone generalmente en cristales orientados.

MINERALES OXIDADOS DE COBRE (15% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Atacamita	70	En amígdalas principalmente.
Crisocola	30	Granos diseminados.

MINERALES PRIMARIOS Y DE ALTERACIÓN (30% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Goethita	45	En cristales diseminados y agregados coloidales.
Lepidocrocita	20	Como reemplazo de cristales de goethita y especularita.
Hidróxidos de hierro con estequiometría variable	35	En pátinas.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ÓPTICO

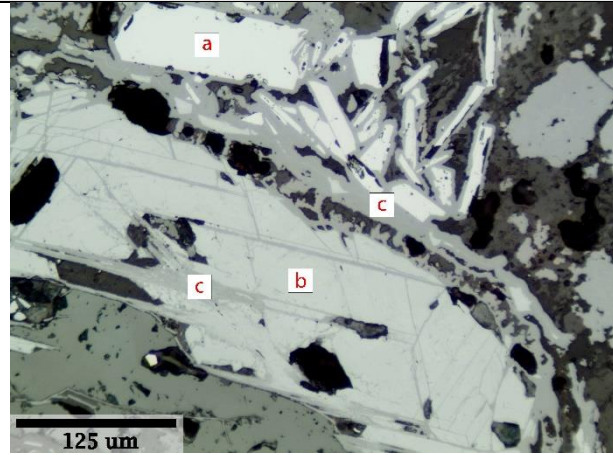


Figura Anexo 32. Fotomicrografía a luz reflejada. Mineral "a" corresponde a un cristal de goethita. Mineral "b" es lepidocrocita formado en planos preferenciales de cristal de goethita. Mineral "c" corresponde a cristales de especularita alterado en bordes a lepidocrocita.

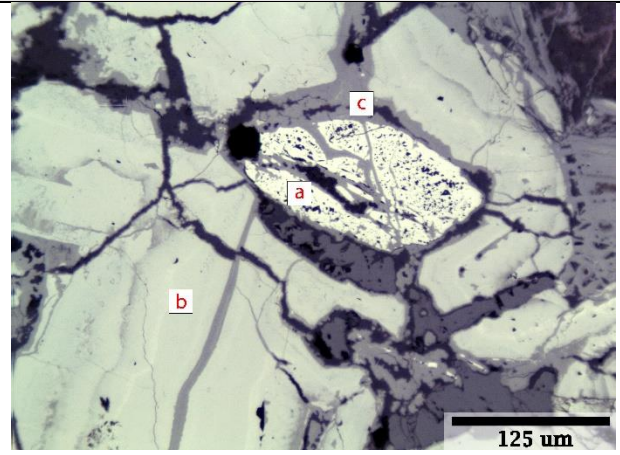


Figura Anexo 33. Fotomicrografía a luz reflejada en donde se observan cristales de goethita (b) rodeando a cristal de especularita (a). Lepidocrocita (c) se encuentra reemplazando parcialmente a ambas fases nombradas anteriormente.

DATOS MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

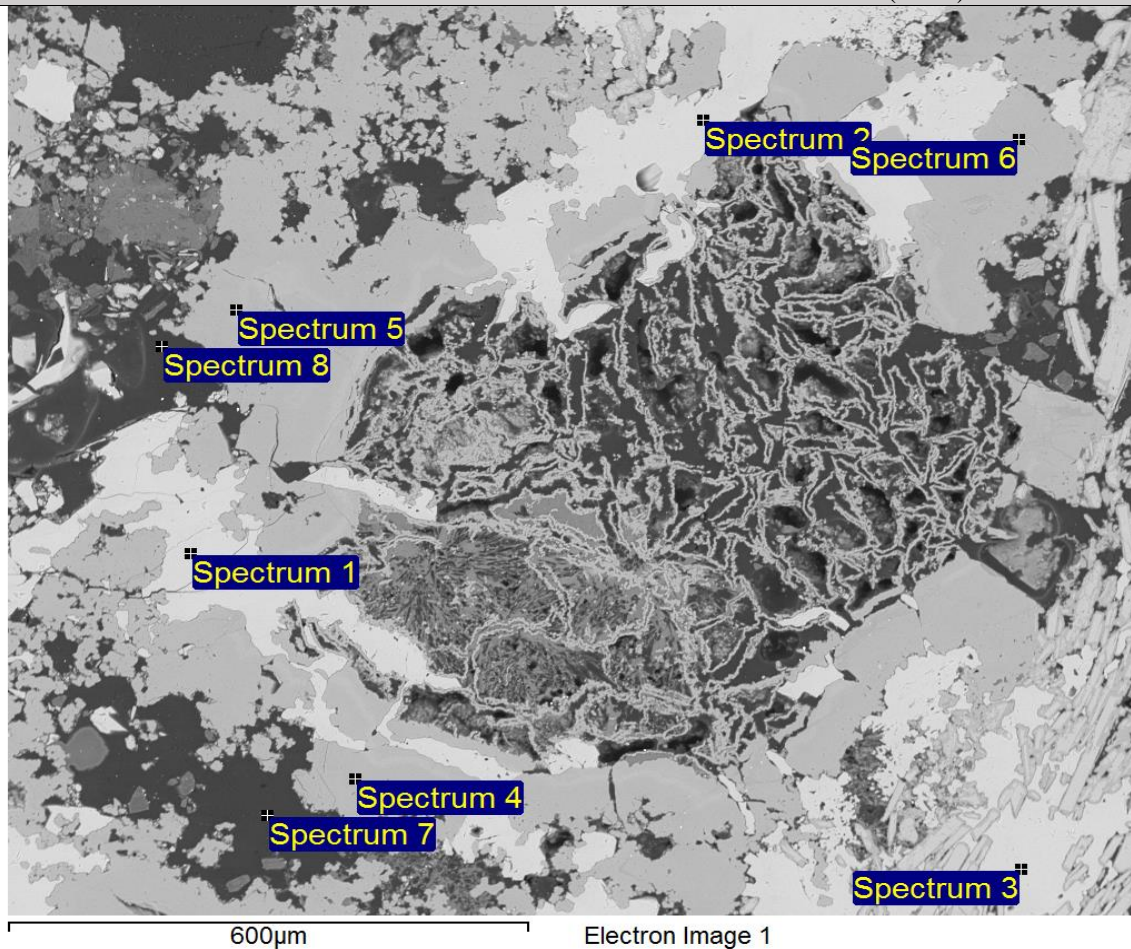


Figura Anexo 34. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Atacamita (Spectrum 1, 2 y 3) es formada en gritas de crisocola, la cual contiene hierro en su composición química (Spectrum 4, 5 y 6). Spectrum 7 y 8 registra la presencia de carbono orgánico.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	C	O	Mg	Al	Si	Cl	Fe	Cu
Spectrum 1		56.00				16.69	0.46	26.84
Spectrum 2		54.56	0.74			16.97	0.73	27.01
Spectrum 3		56.33				16.43	0.63	26.61
Spectrum 4		73.06	0.49	0.97	2.06	0.23	21.24	1.96
Spectrum 5		72.80		1.00	2.06	0.28	22.22	1.64
Spectrum 6		73.49		0.92	2.21	0.23	21.29	1.86
Spectrum 7	93.33	4.49				2.18		
Spectrum 8	91.39	4.89				2.86	0.47	0.39

N° MUESTRA	11
Clasificación Petrográfica	Profundidad
Brecha hidrotermal de especlarita con alteración supérgena	50 m

OBSERVACIONES MICROSCÓPICAS

Brecha hidrotermal con cemento de especlarita y clastos de andesita. Los clastos presentan alteración de epidota y clorita tanto en los fenocristales como en la matriz.
Se reporta pseudomalaquita dispuesta en pátinas y cortada por vetillas de yeso, el cual posee concentraciones menores de cloro y cobre. También se reconoce la presencia de cuarzo en vetillas.

MINERALES OPACOS (55% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Especlarita	100	Matriz hidrotermal.

MINERALES OXIDADOS DE COBRE (7% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Pseudomalaquita	100	Dispuesta en patinas y rellenando espacio entre cristales de especlarita.

MINERALES PRIMARIOS Y DE ALTERACIÓN (38% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Yeso	25	Principalmente en vetillas y rellenando espacios entre los cristales de especlarita.
Cuarzo	7	En vetillas.
Clorita	12	Alterando a los fenocristales y a la matriz de los clastos andesíticos.
Epidota	3	Alterando a los fenocristales y a la matriz de los clastos andesíticos.
Anhidrita	13	En pátinas.
Goethita	25	Reemplazando bordes de cristales de especlarita.
Hidróxidos de hierro con estequiometría variable	15	En pátinas.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ÓPTICO

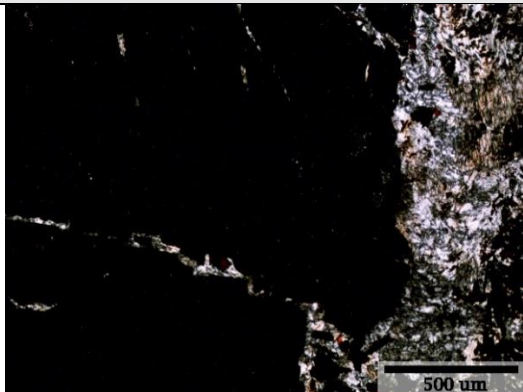


Figura Anexo 35 Fotomicrografía con luz transmitida y a nicoles cruzados, en donde se aprecia vetilla de yeso cortando a especularita.

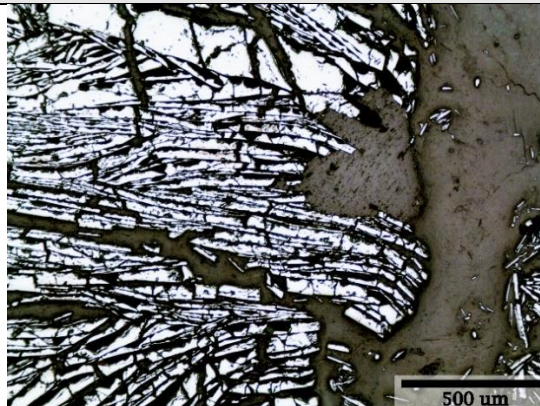


Figura Anexo 36. Misma imagen de la izquierda con luz reflejada. Se distinguen cristales de especularita de color claro.



Figura Anexo 37. Fotomicrografía a luz transmitida y a nicoles cruzados, en donde se observa goethita (color rojo) reemplazando bordes de especularita (cristales oscuros).

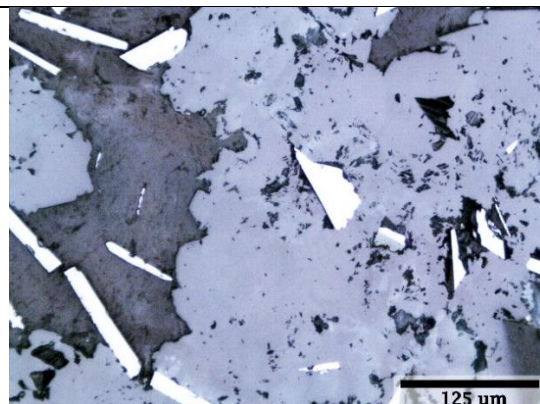


Figura Anexo 38. Fotomicrografía a luz reflejada donde pseudomalachita (mineral en pátinas de color gris claro) reemplaza bordes de especularita (cristales claros).

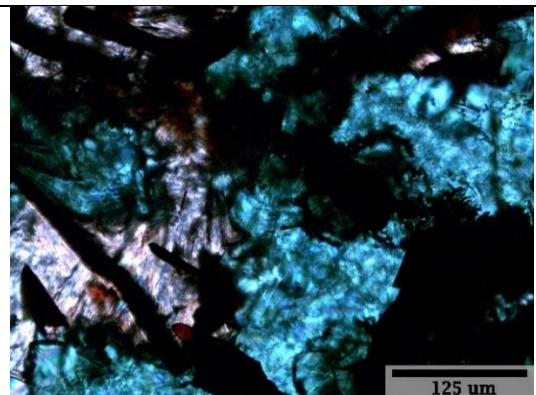


Figura Anexo 39. Fotomicrografía a nicoles cruzados y a luz transmitida, en donde se observa pseudomalachita en patinas sobre anhidrita.

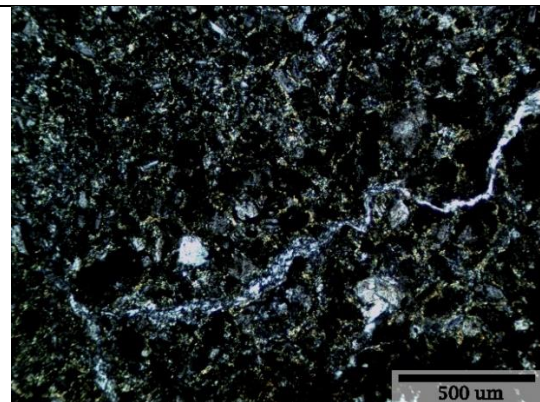


Figura Anexo 40. Fotomicrografía a nicoles cruzados y a luz transmitida de vetilla de yeso atravesando a clasto andesítico con alteración de clorita y epidota en fenocristales y en matriz.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

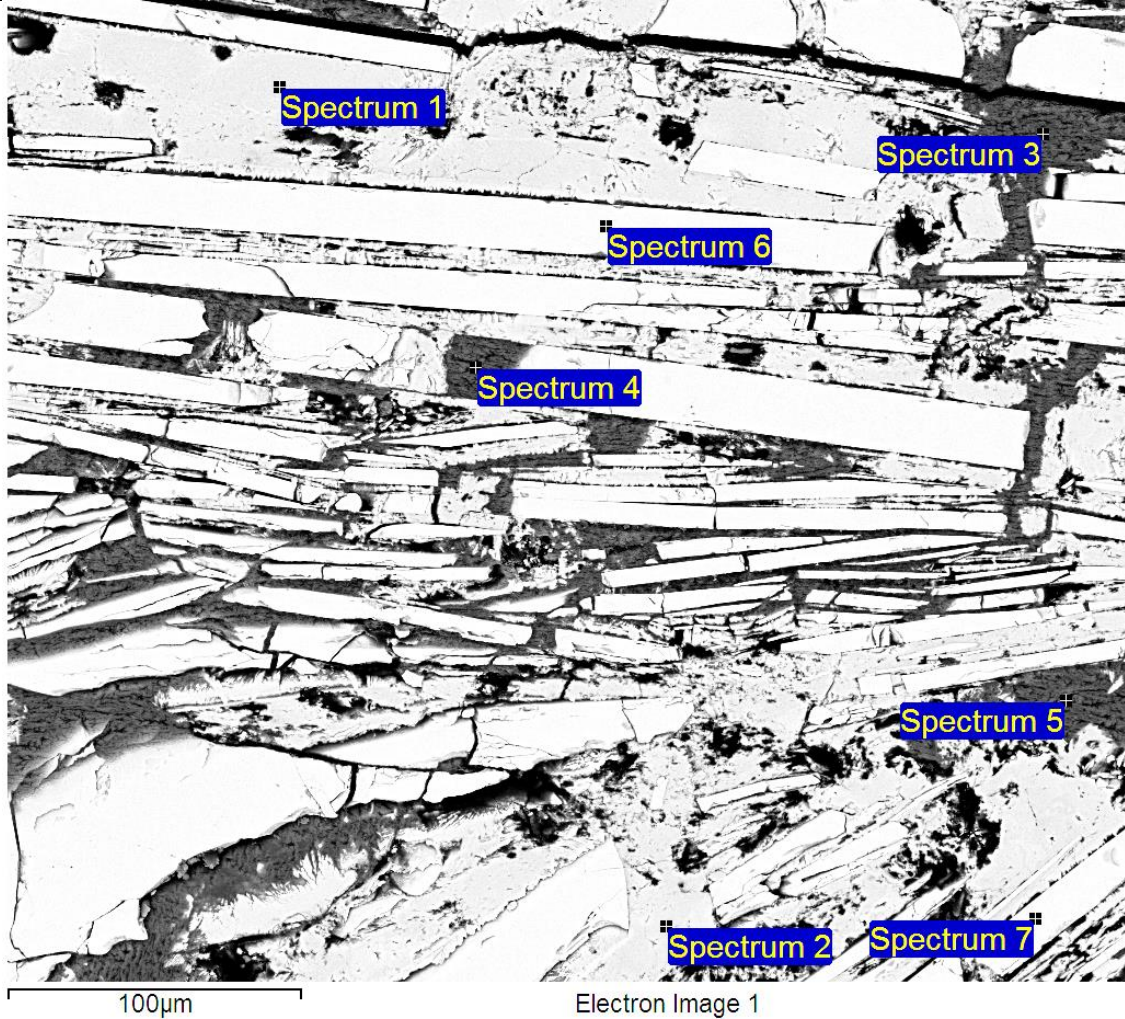


Figura Anexo 41. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 señalan la presencia de pseudomalaquita relleno de espacio entre cristales de especularita, ambas fases son cortadas por vetilla de yeso (Spectrum 3 y 4). Spectrum 6 y 7 están asociados a especularita.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Al	P	S	Cl	Ca	Fe	Cu
Spectrum 1	66.81	0.38	10.67			0.22	0.81	21.11
Spectrum 2	71.87	0.33	9.07				0.67	18.06
Spectrum 3	73.23			14.57	0.25	11.64	0.31	
Spectrum 4	71.11			15.65	0.18	12.48	0.42	0.16
Spectrum 5	74.29			13.90	0.22	10.89	0.33	0.37
Spectrum 6	70.12	0.44					29.12	0.32
Spectrum 7	70.15	0.46					29.08	0.30

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

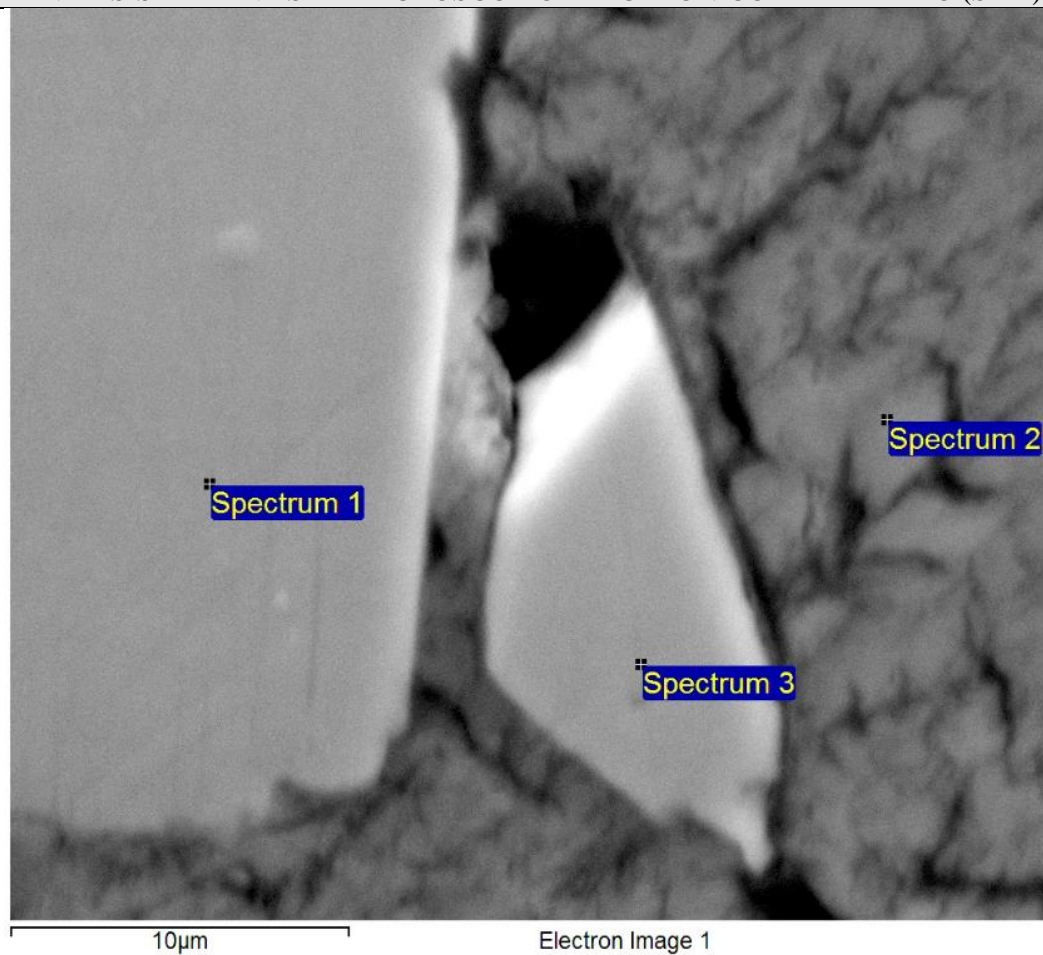


Figura Anexo 42. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 3 están asociados a pseudomalaquita, la cual es reemplazada por yeso (Spectrum 2).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Al	P	S	Ca	Cu
Spectrum 1	72.82	0.36	9.26		0.19	17.38
Spectrum 2	73.82			14.58	11.39	0.22
Spectrum 3	72.80		9.36		0.27	17.58

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

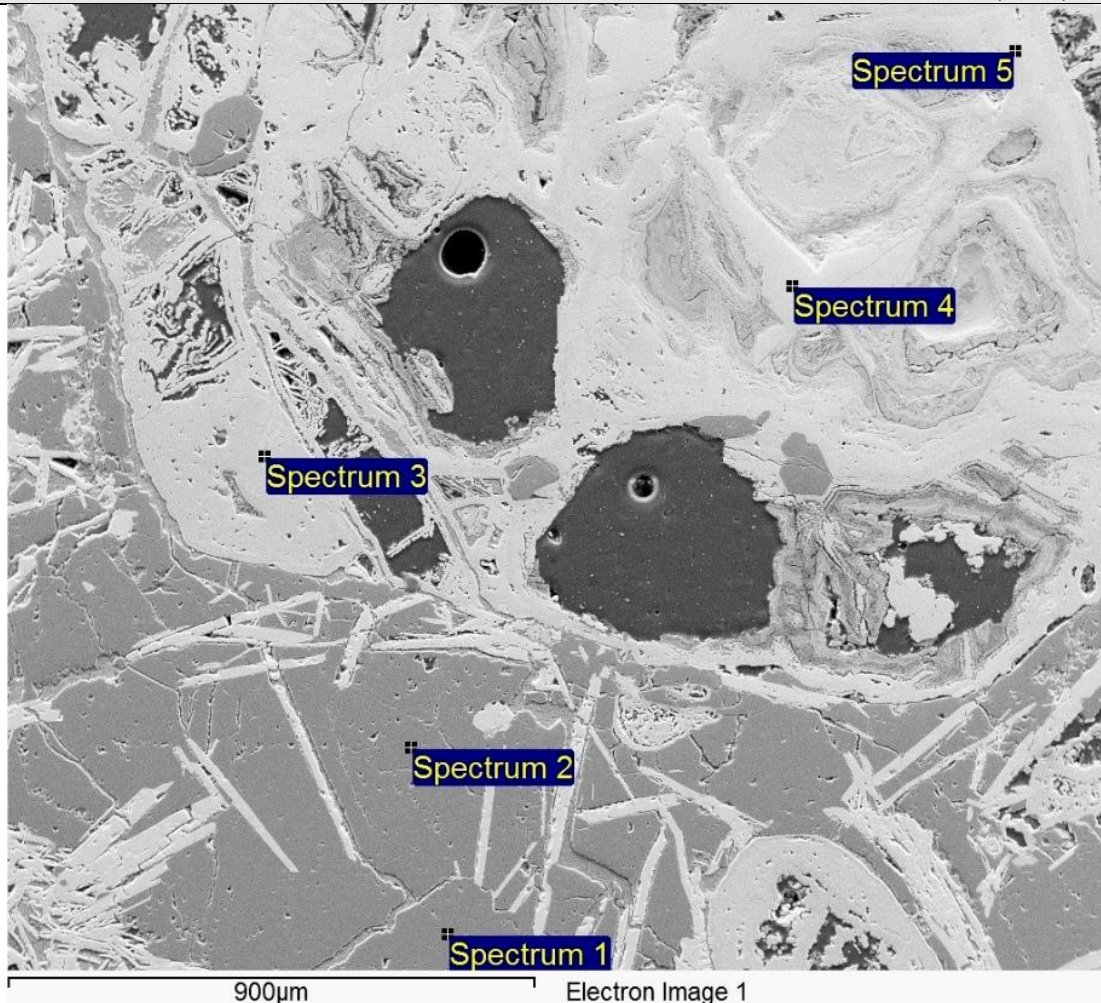


Figura Anexo 43. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 están asociados a cuarzo. Spectrum 3, 4 y 5 son tomados sobre fase amorfa y entregan valores de composición química de hidróxidos de hierro con baja presencia de cobre.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

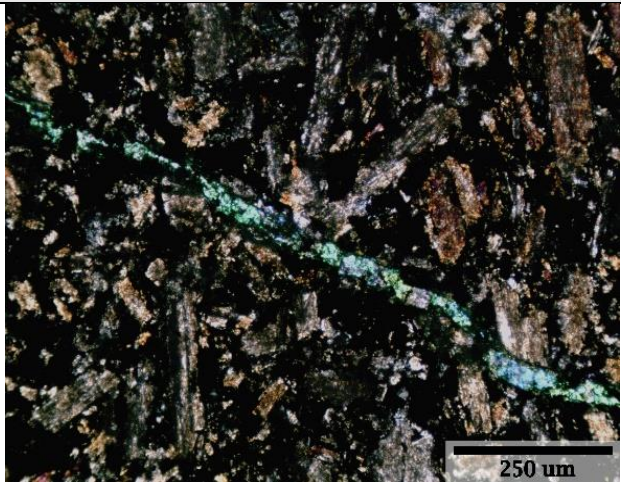
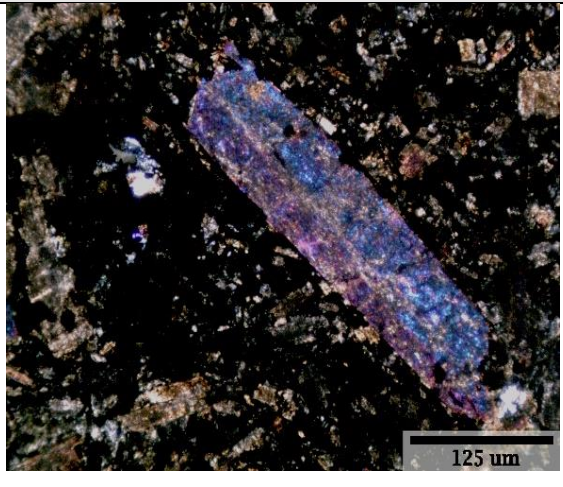
Spectrum	O	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Mn	Fe	Cu
Spectrum 1	73.68			26.32						
Spectrum 2	73.82			26.18						
Spectrum 3	76.59		0.54	1.29	0.48		0.22	0.17	19.72	1.00
Spectrum 4	76.95			0.79			0.24		21.00	1.02
Spectrum 5	78.39	0.42	0.86	1.26	0.57	0.46	0.34		16.37	1.32

N° MUESTRA	12
Clasificación Petrográfica	Profundidad
Andesita alterada con mineralización supérgena	54.3 m

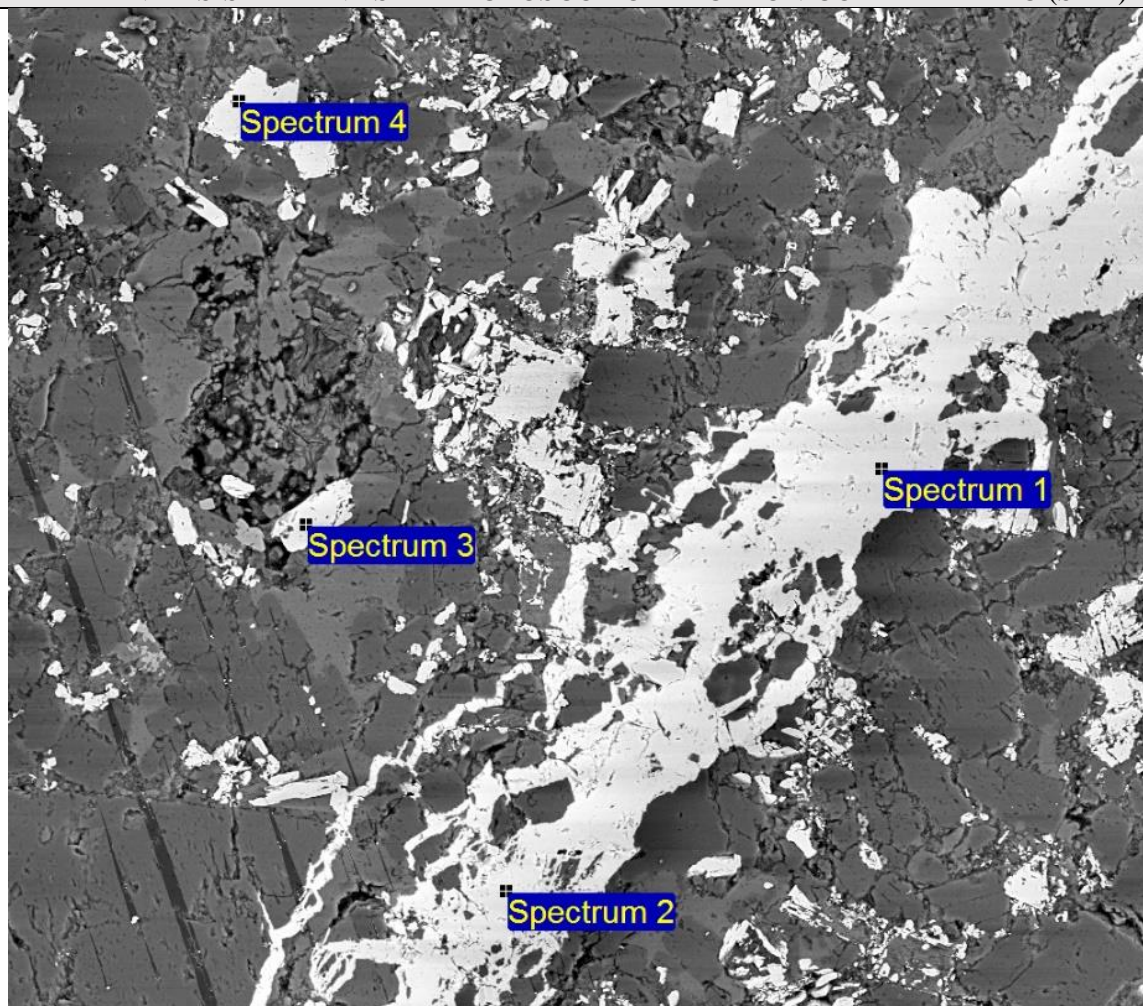
OBSERVACIONES MICROSCÓPICAS
Roca andesítica con fenocristales de plagioclasas saussuritizadas y titanomagnetita como cúmulos cristalinos. Existe una posterior mineralización supérgena de atacamita en vetillas.

MINERALES OXIDADOS DE COBRE (35 % DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Atacamita	100	En vetillas

MINERALES PRIMARIOS Y DE ALTERACIÓN (65 % DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Epidota	10	En pequeños cristales agregados alterando a plagioclasas de roca andesítica.
Titanomagnetita	50	Cúmulos cristalinos en la roca andesítica.
Plagioclasas	40	Fenocristales de andesitas, las cuales se encuentran saussuritizadas.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ÓPTICO	
 <p style="text-align: right;">250 μm</p>	 <p style="text-align: right;">125 μm</p>
<p><i>Figura Anexo 44. Fotomicrografía a nícoles cruzados y a luz transmitida de vetilla de atacamita cortando a andesita.</i></p>	<p><i>Figura Anexo 45. Fotomicrografía a nícoles cruzados y a luz transmitida de plagioclasa saussuritizada (plagioclasa reemplazada por agregados de cristales finos de epidota y de minerales de micas).</i></p>

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)



200µm

Electron Image 1

Figura Anexo 46. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Datos de Spectrum 1 y 2 están relacionados a atacamita en vetilla. Spectrum 3 y 4 se asocian a cúmulos cristalinos de titanomagnetita.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Mg	Al	Cl	Ti	Fe	Cu
Spectrum 1	63.34			14.35			22.31
Spectrum 2	63.43			14.44			22.13
Spectrum 3	74.29				0.78	24.93	
Spectrum 4	74.64	0.80	0.47		0.81	23.28	

N° MUESTRA	17
Clasificación Petrográfica	Profundidad
Brecha hidrotermal de especlarita con alteración supérgena	65.2 m

OBSERVACIONES MICROSCÓPICAS
<p>Brecha hidrotermal con matriz de especlarita y clastos de andesita. La roca andesítica presenta alteración de anhidrita, la cual se dispone en amígdalas y como cristales subhedrales.</p> <p>Se registra la formación de mineralogía supérgena correspondiente a atacamita dispuesta en pátinas, en vetillas y reemplazando bordes de amígdala de anhidrita. Ciertas vetillas de atacamita se encuentran intercrecidas con yeso. El yeso se dispone en vetillas y rellenando espacios entre cristales de especlarita. Se disponen vetillas de cuarzo, las cuales son cortadas por cristales de especlarita asociadas a la brecha hidrotermal.</p>

MINERALES OPACOS (80% DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Especlarita	100	Matriz de la brecha hidrotermal.

MINERALES OXIDADOS DE COBRE (5 % DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Atacamita	100	Reemplazando bordes de amígdala de anhidrita, en vetillas y en pátinas.

MINERALES PRIMARIOS Y DE ALTERACIÓN (15% DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Yeso	15	Principalmente en vetillas y en menor grado rellenando espacios entre cristales de especlarita.
Anhidrita	5	En amígdalas.
Cuarzo	7	En vetillas.
Titanomagnetita	15	Cúmulos cristalinos de la roca andesítica.
Plagioclasas	23	Fenocristales de clastos andesíticos.
Hidróxidos de hierro con estequiometría variable	35	En pátinas y reemplazando parcialmente a cristales de especlarita.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ÓPTICO

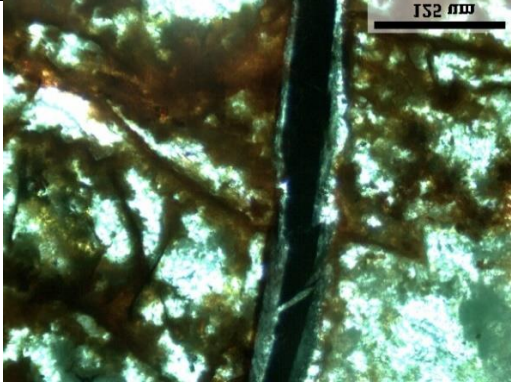


Figura Anexo 47. Fotomicrografía a nicols paralelos y a luz transmitida, en donde se aprecia cristal de especularita (opaca) reemplazada en bordes y cortada por atacamita.

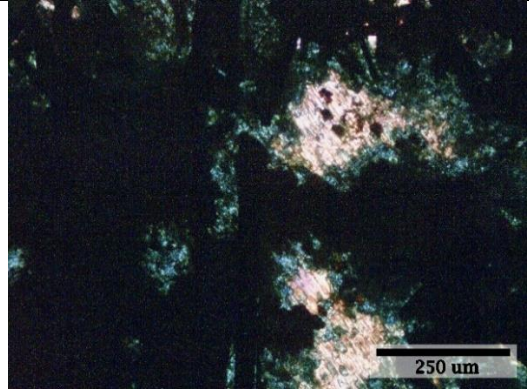


Figura Anexo 48. Fotomicrografía a nicols cruzados y a luz transmitida, en donde se dispone atacamita en bordes de amígdala de anhidrita.

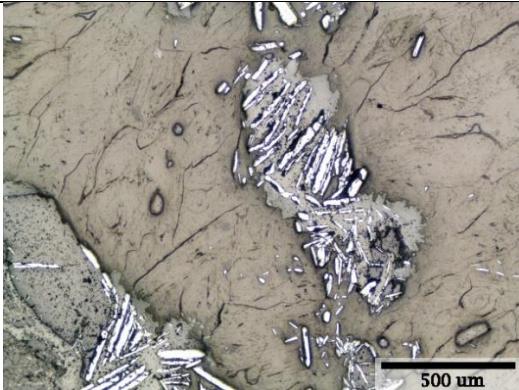


Figura Anexo 49. Fotomicrografía a luz reflejada, con especularita reemplazada parcialmente por hidróxidos de hierro, esta mineralogía se dispone en forma de isla dentro de una vetilla de yeso.

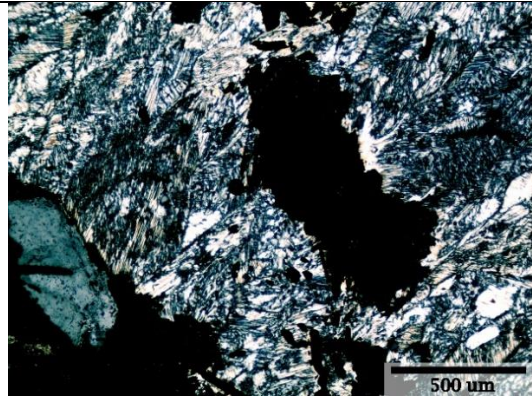


Figura Anexo 50. Fotomicrografía anterior en luz transmitida y a nicols cruzados, en donde se observa yeso en vetilla.

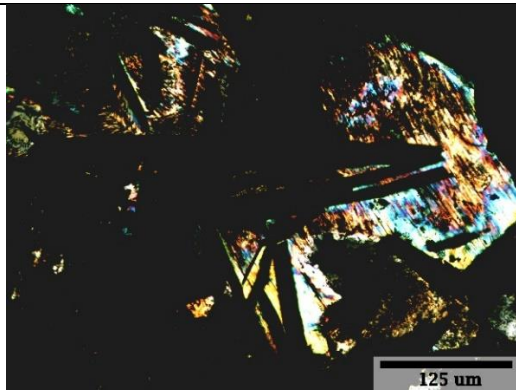


Figura Anexo 51. Fotomicrografía a luz transmitida y a nicols cruzados. Se disponen cristales subhedrales de anhidrita, sobre estos se forman cristales de especularita (opacos).

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

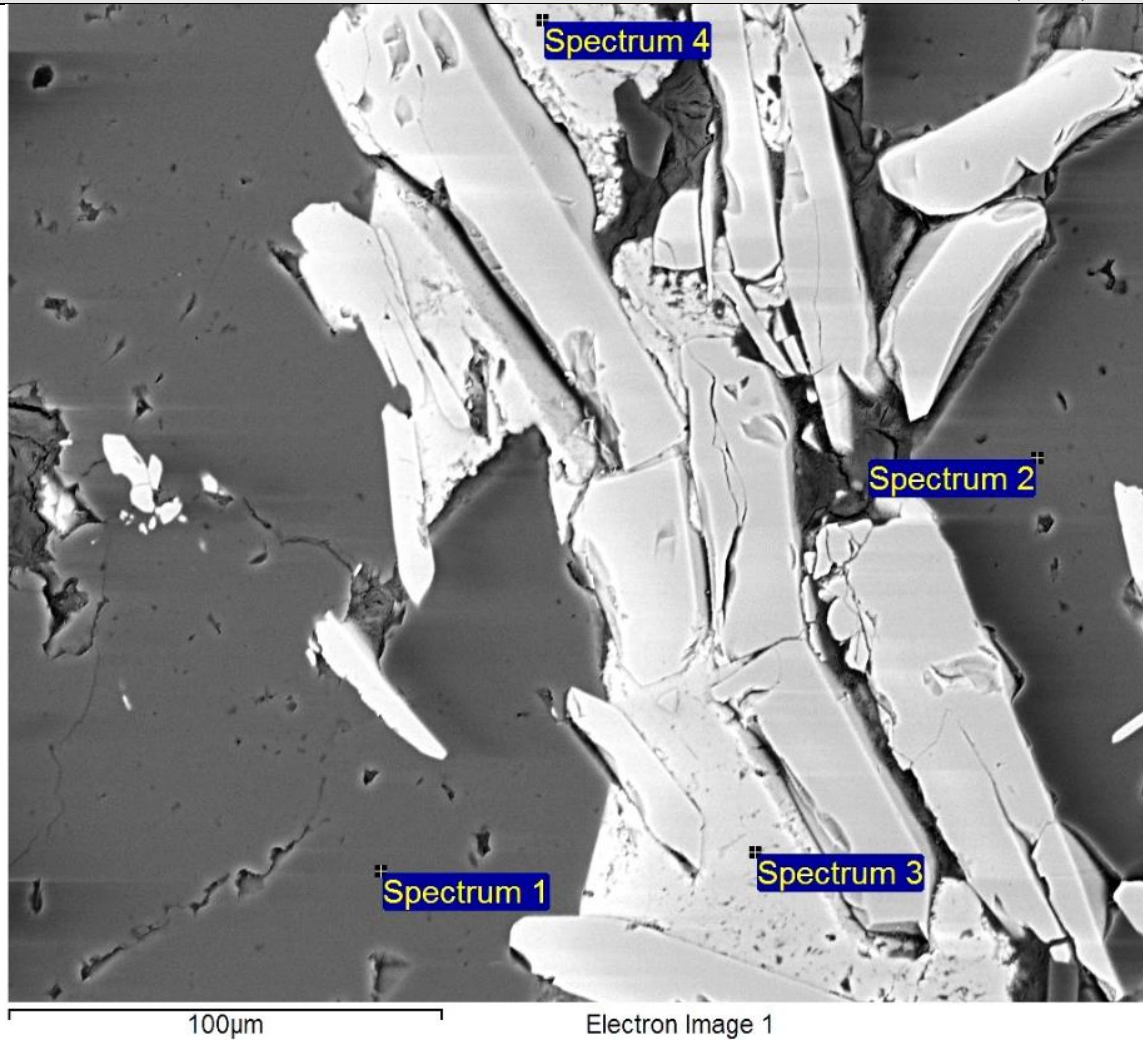


Figura Anexo 52. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 están asociados a cuarzo, mientras que Spectrum 3 y 4 se asocia a atacamita reemplazada parcialmente por hidróxidos de hierro.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Si	Cl	Fe	Cu
Spectrum 1	66.10	33.65		0.24	
Spectrum 2	65.95	33.71		0.34	
Spectrum 3	52.29		17.24	1.42	29.05
Spectrum 4	53.06		16.78	1.66	28.51

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

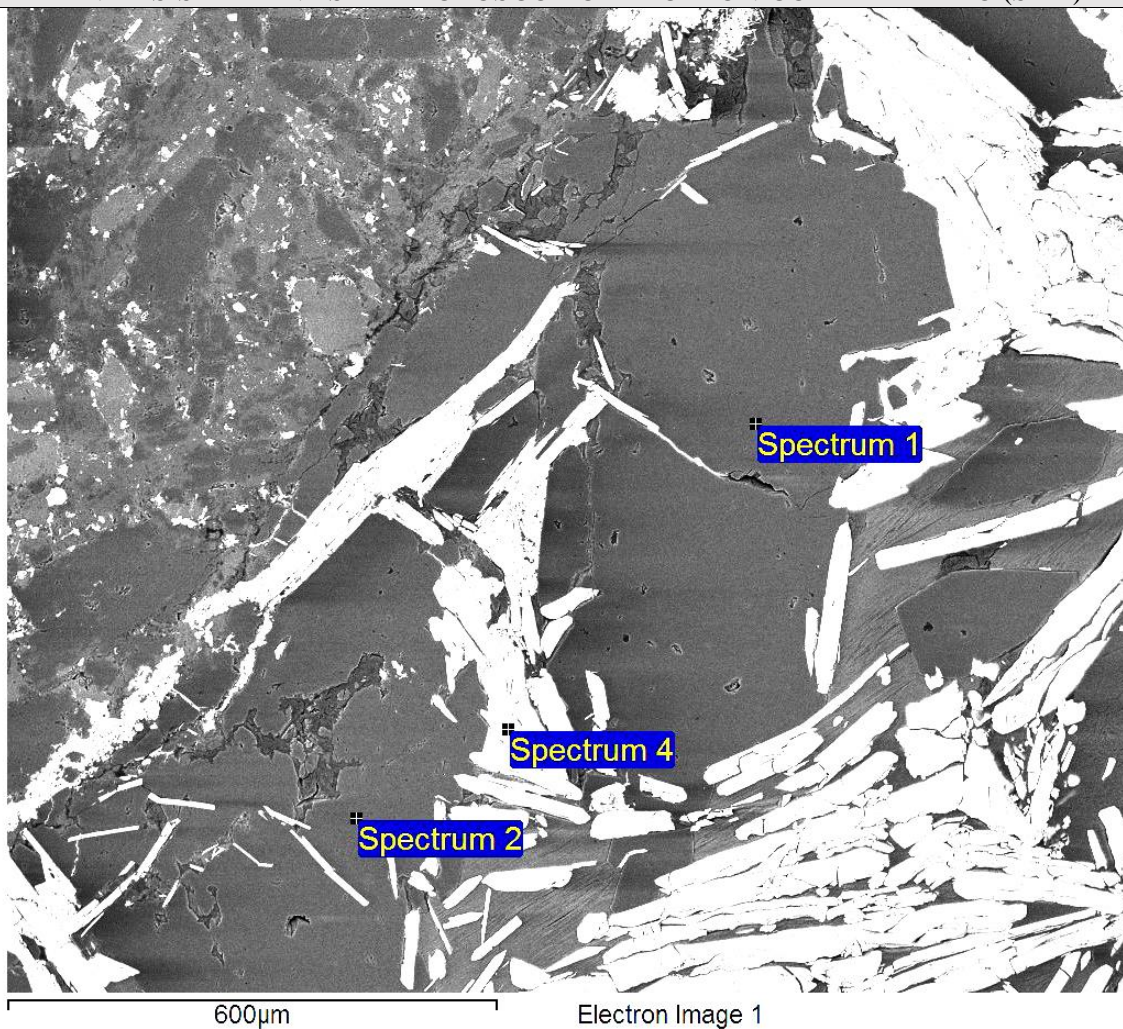


Figura Anexo 53. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 asociados a vetilla de cuarzo, la cual es cortada por cristales de specularita con mineralización de atacamita dispuesta entre los espacios de los cristales (Spectrum 4).

Spectrum	O	Si	Cl	Fe	Cu
Spectrum 1	66.22	33.63		0.15	
Spectrum 2	65.98	33.71		0.31	
Spectrum 4	52.42		17.24	1.36	28.98

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

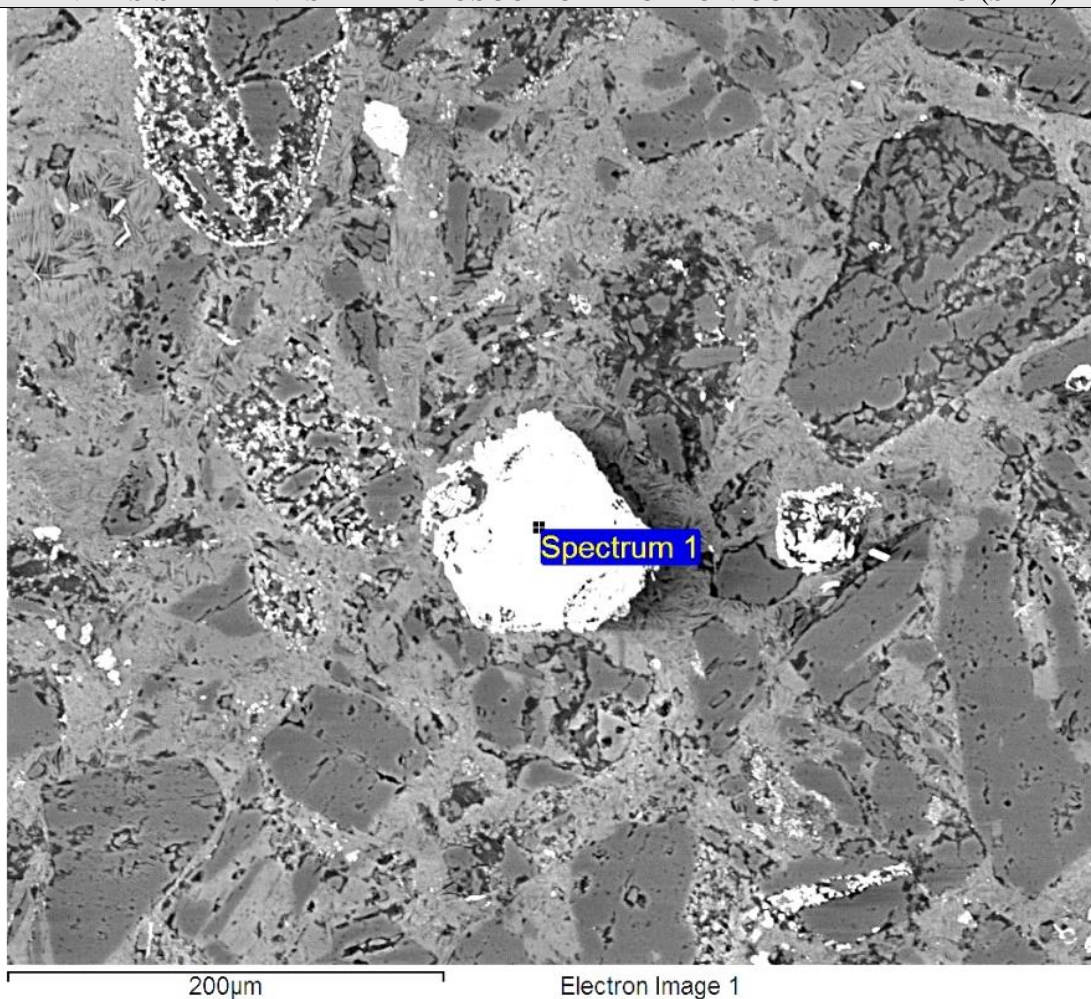


Figura Anexo 54. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 muestra composición semicuantitativa de titanomagnetita asociada a los clastos andesíticos.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Ti	Fe
Spectrum 1	69.51	0.94	29.55

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

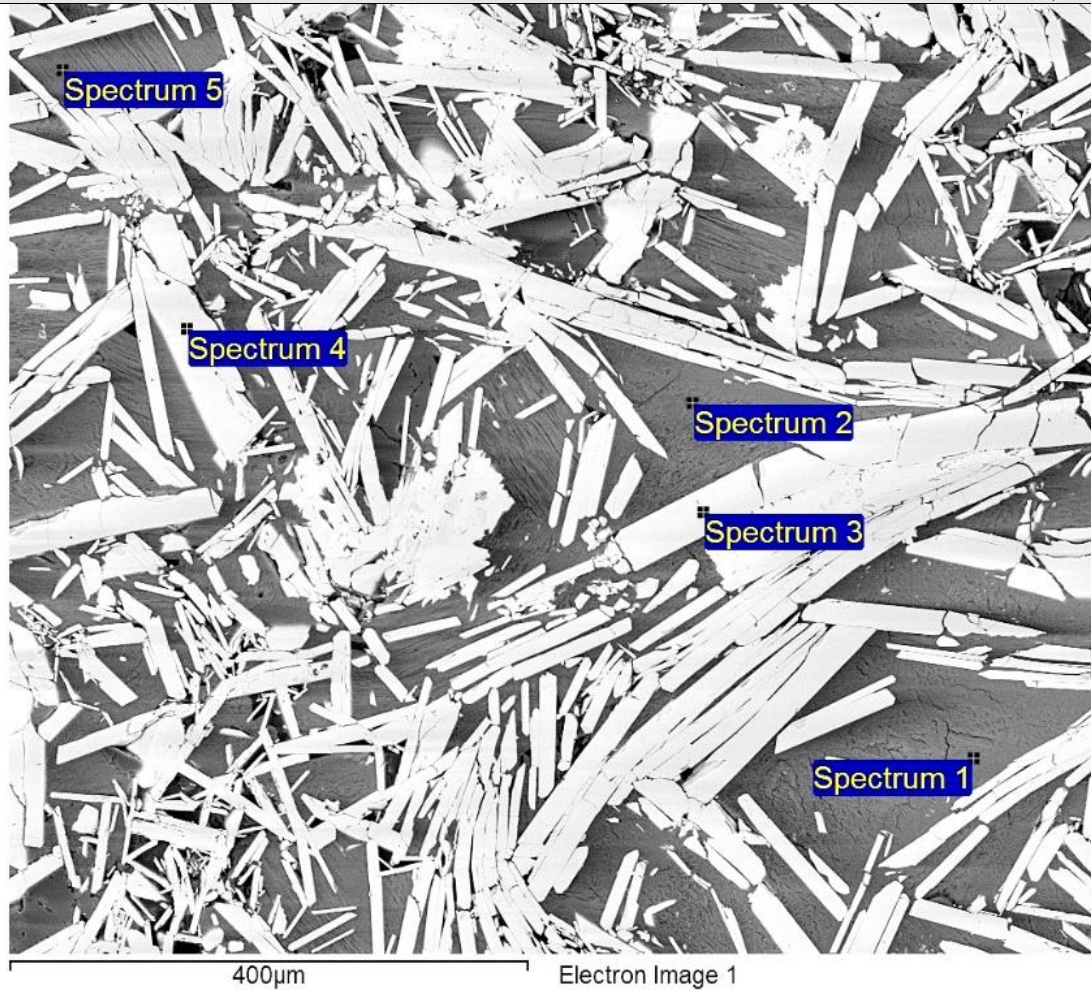


Figura Anexo 55. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1, 2 y 5 están asociados a yeso relleno de espacios entre cristales de especlarita (Spectrum 3 y 4).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	S	Ca	Fe
Spectrum 1	70.56	16.28	12.94	0.22
Spectrum 2	69.58	16.76	13.34	0.32
Spectrum 3	67.23			32.77
Spectrum 4	66.48			33.52
Spectrum 5	71.52	15.56	12.48	0.44

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

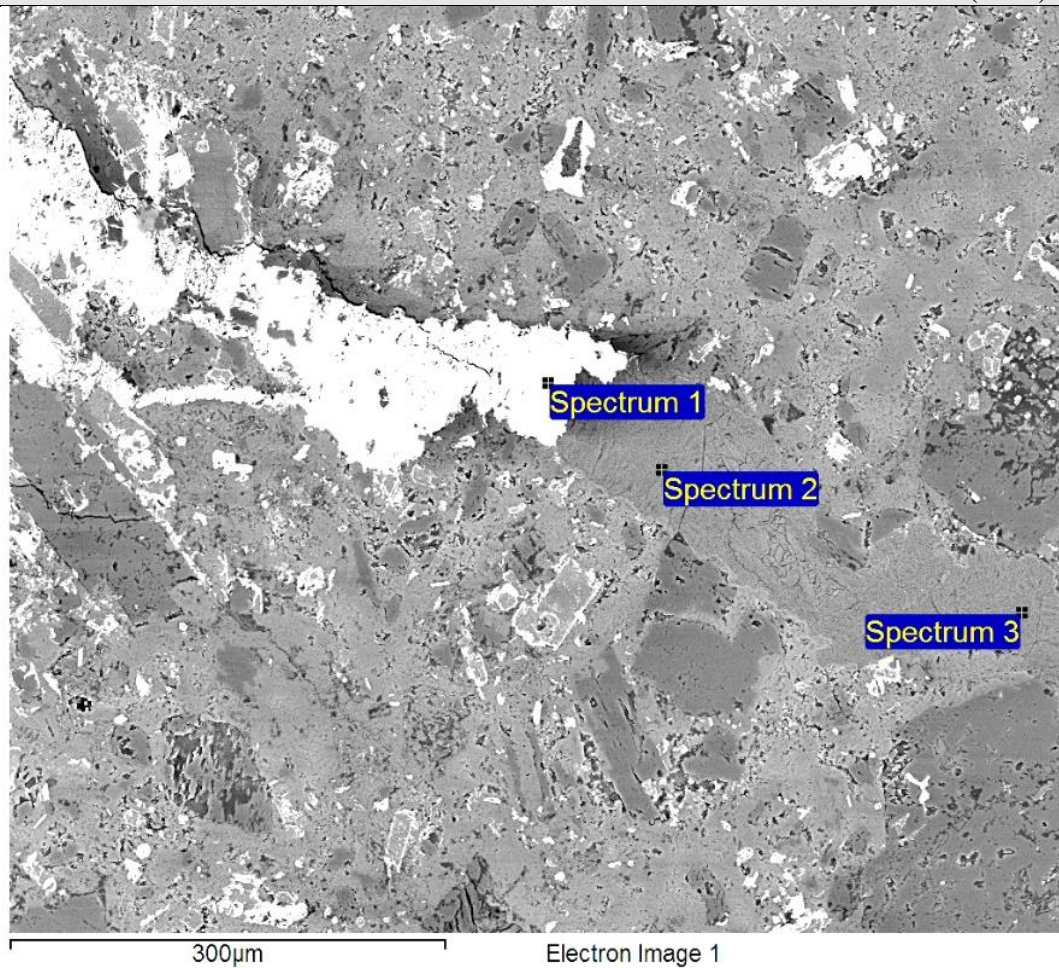


Figura Anexo 56. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron), donde se aprecia vetilla de atacamita (Spectrum 1) intercrecida con yeso (Spectrum 2 y 3).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	S	Cl	Ca	Cu
Spectrum 1	54.63		16.83		28.54
Spectrum 2	70.28	16.61		13.11	
Spectrum 3	70.10	16.62		13.28	

N° MUESTRA	18	
Clasificación Petrográfica		Profundidad
Brecha hidrotermal de especlarita con alteración supérgena		70.1 m

OBSERVACIONES MICROSCÓPICAS
Brecha hidrotermal con clastos de andesita y matriz de especlarita. Se dispone goethita como bordes de los cristales de especlarita. Se aprecia la posterior mineralización de atacamita y yeso, ambos asociados en vetillas. Los hidróxidos de hierro presentan estequiometrías variables con cantidades menores de silicio y cobre.

MINERALES OPACOS (70% DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Especlarita	100	Como matriz de la brecha hidrotermal

MINERALES OXIDADOS DE COBRE (10% DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Atacamita	100	En vetillas, asociada a yeso.

MINERALES PRIMARIOS Y DE ALTERACIÓN (20% DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Yeso	40	En vetillas, asociado a atacamita.
Cuarzo	15	En vetillas.
Goethita	25	Reemplazando bordes de cristales de especlarita.
Hidróxidos de hierro con estequiometría variable	20	En pátinas.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ÓPTICO

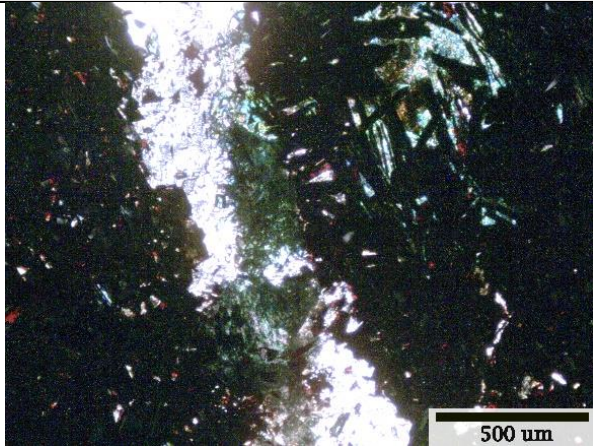


Figura Anexo 57. Fotomicrografía a nicoles cruzados y a luz transmitida de vetilla de yeso intercrecida con atacamita.

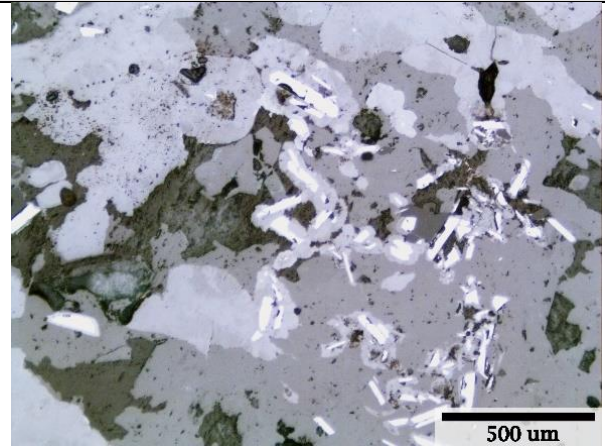


Figura Anexo 58. Fotomicrografía a luz reflejada de especularita (cristales subhedrales claros) reemplazada en bordes por goethita (gris claro) y posteriormente reemplazada parcialmente por atacamita (gris medio).

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

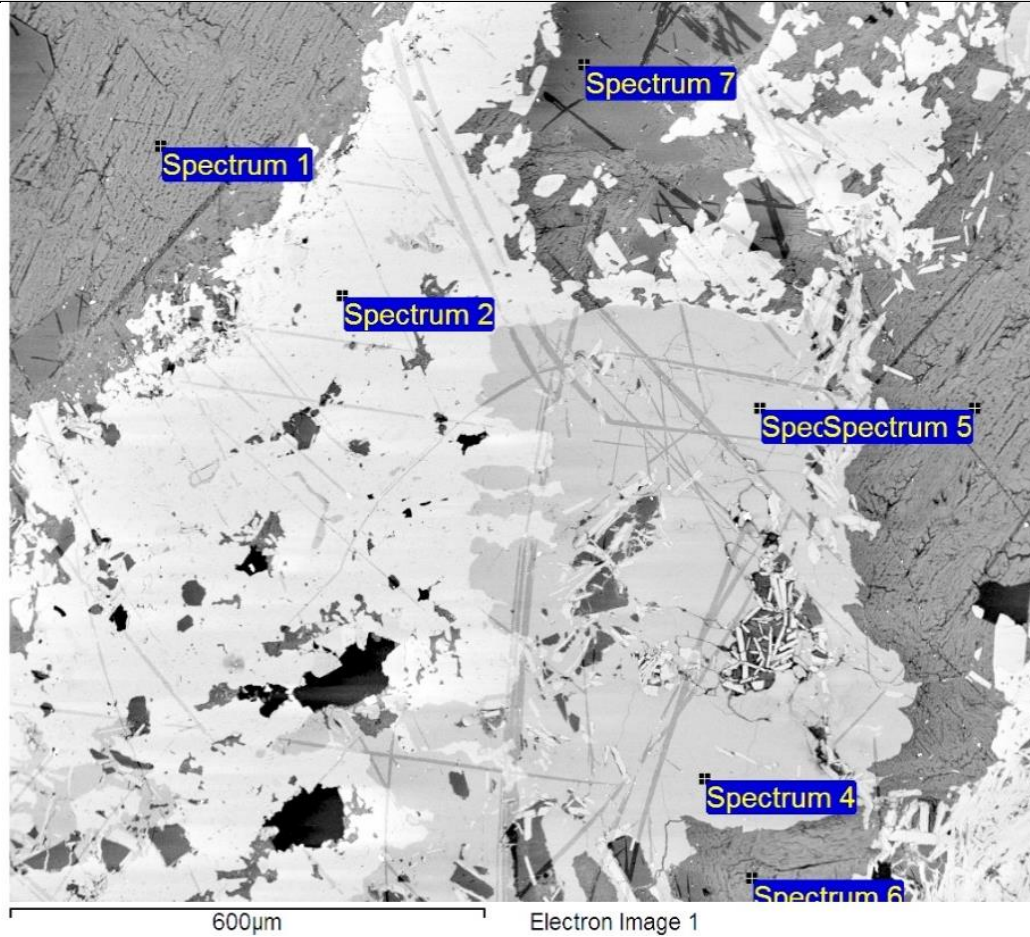


Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1, 5 y 6 se asocia a yeso. Se registra la presencia de atacamita (Spectrum 2), de cuarzo (Spectrum 7) y de hidróxidos de hierro con contenido de silicio y cobre (Spectrum 3 y 4).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Si	S	Cl	Ca	Fe	Cu
Spectrum 1	74.07		14.48		11.46		
Spectrum 2	62.04			14.92			23.04
Spectrum 3	77.66	2.24				19.05	1.05
Spectrum 4	77.50	2.16				19.51	0.83
Spectrum 5	73.85		14.60		11.55		
Spectrum 6	74.94		14.04		11.02		
Spectrum 7	72.59	27.41					

N° MUESTRA	19
Clasificación Petrográfica	Profundidad
Brecha hidrotermal de especlarita con alteración supérgena	73.3 m

OBSERVACIONES MICROSCÓPICAS

Brecha hidrotermal con clastos de andesita, los cuales contienen cristales de titanomagnetita y de plagioclasas. La matriz de la brecha hidrotermal es de especlarita, la cual se encuentra reemplazada parcialmente por hidróxidos de hierro.

Se reportan hidróxidos de hierro con estequiometría variable y contenido de silicio y cobre. La segunda mineralización supérgena corresponde a yeso y a atacamita intercrecidos en vetillas.

MINERALES OPACOS (40% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Especlarita	100	Correspondiente a la matriz hidrotermal.

MINERALES OXIDADOS DE COBRE (5% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Atacamita	100	En vetillas y amígdalas.

MINERALES PRIMARIOS Y DE ALTERACIÓN (55 % DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Yeso	25	En vetillas y amígdalas.
Goethita	15	Reemplazando bordes de cristales de especlarita.
Titanomagnetita	15	Cúmulos cristalinos de la roca andesítica.
Plagioclasas	15	Fenocristal de clastos andesíticos.
Hidróxidos de hierro con estequiometría variable	30	En pátinas, reemplazando especlarita.

ANÁLISIS MICROSCOPIO ÓPTICO

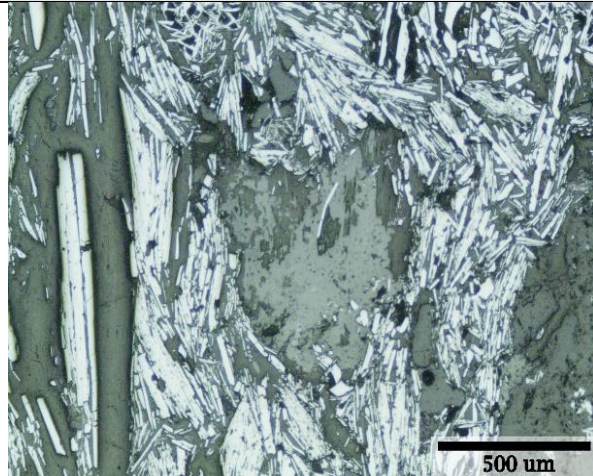


Figura Anexo 59. Fotomicrografía a nícoles paralelos y a luz reflejada en donde se observa especularita en cristales claros.

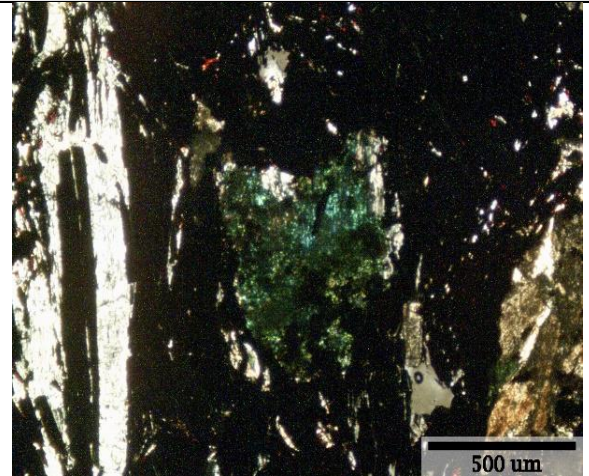


Figura Anexo 60. Fotomicrografía a nícoles paralelos y a luz transmitida que muestra atacamita en amígdala. Se dispone una vetilla de yeso en el lado izquierdo de la imagen.

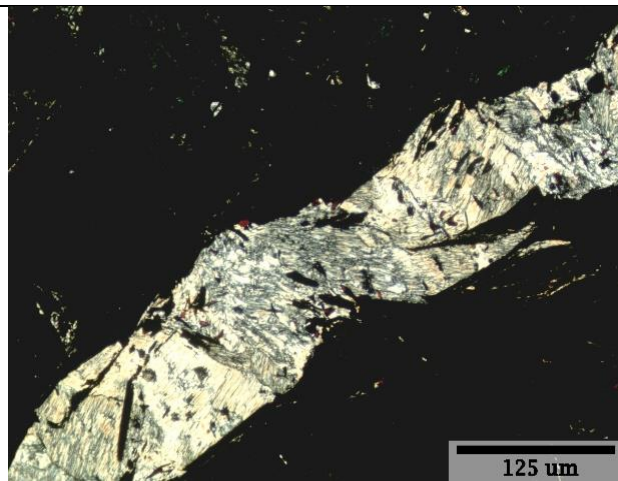
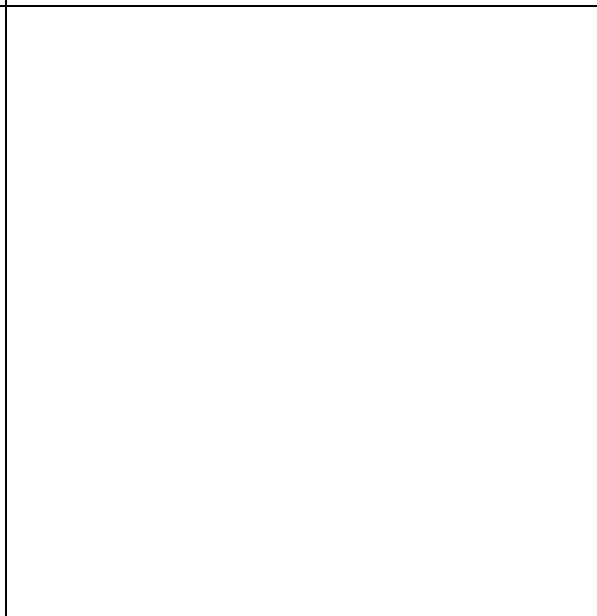


Figura Anexo 61. Fotomicrografía a nícoles cruzado y a luz transmitida en donde se observa el hábito fibroso característico del yeso.



ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

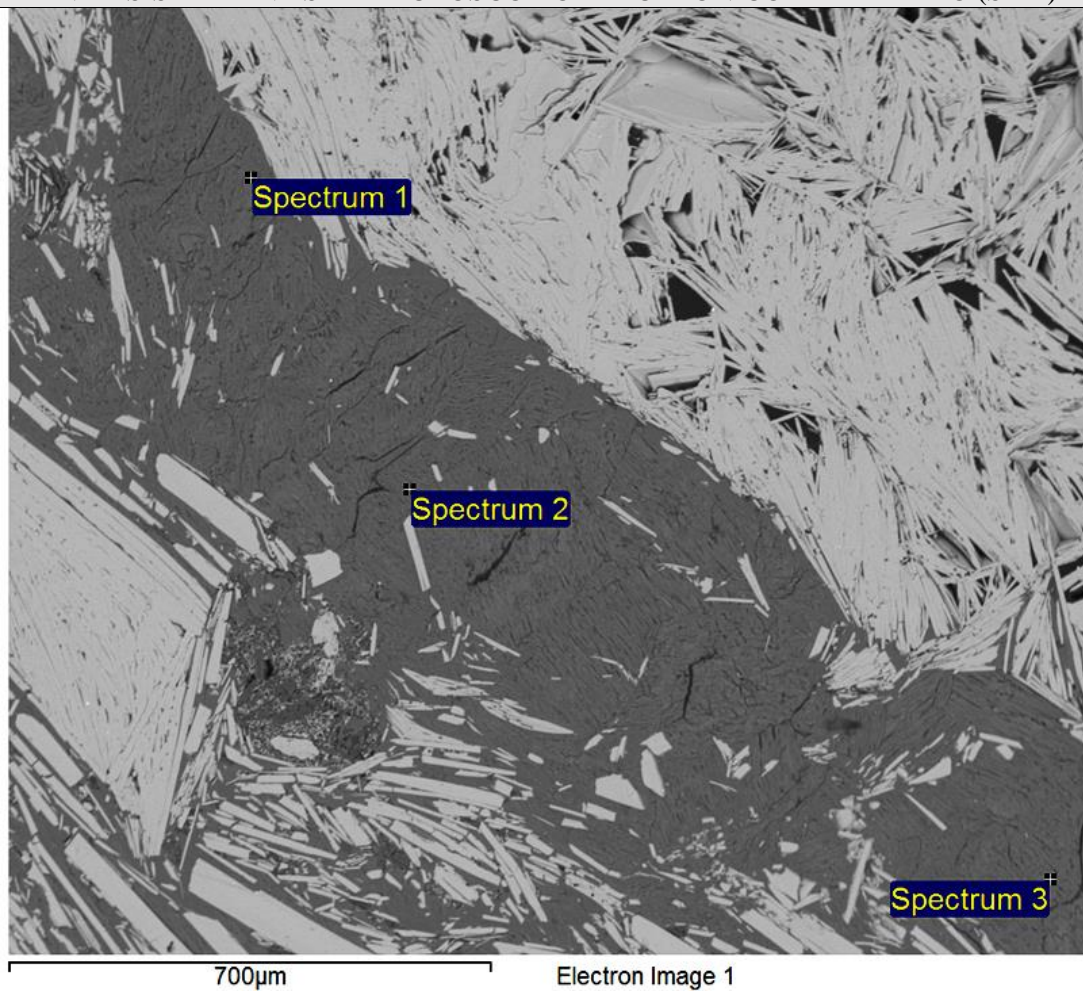
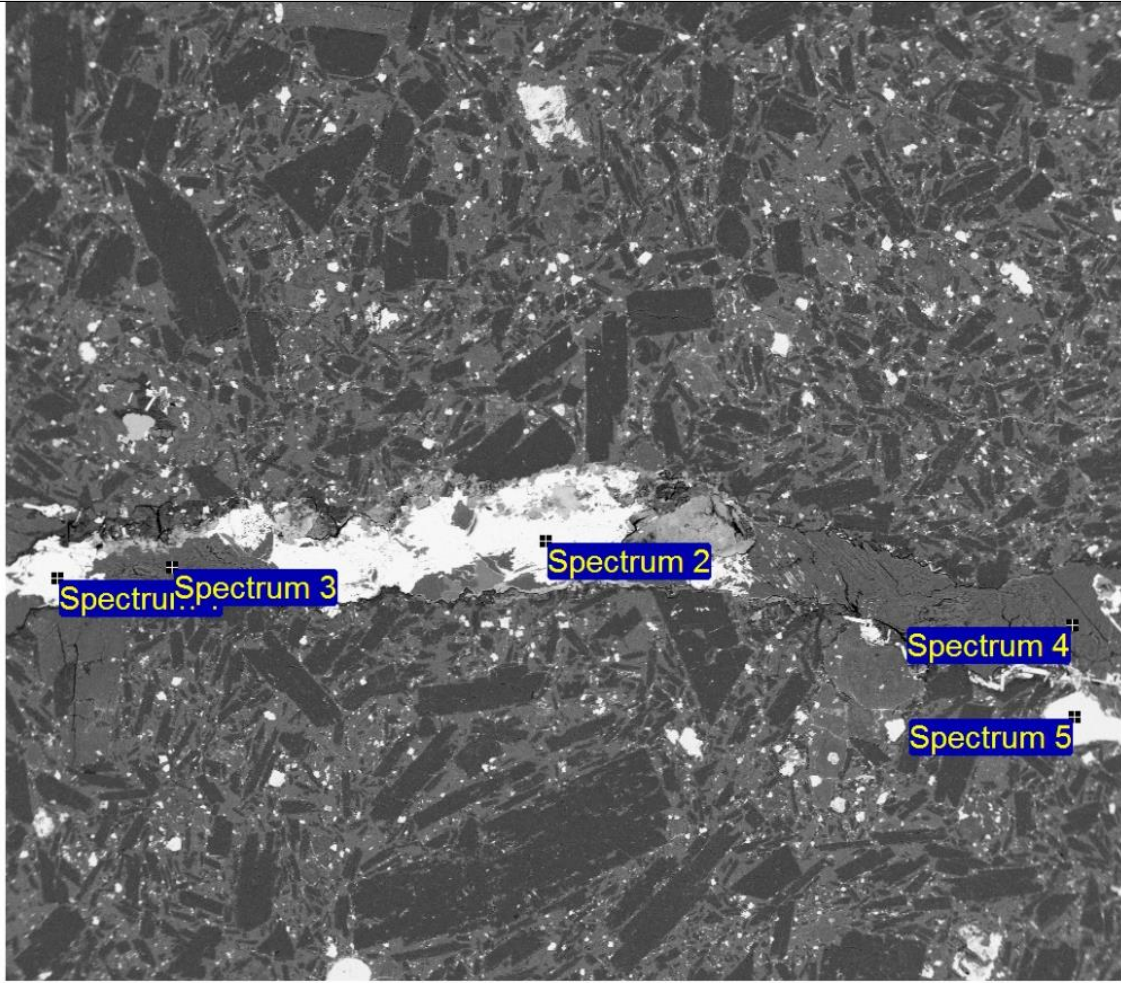


Figura Anexo 62. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Datos de Spectrum 1, 2 y 3 están asociados a yeso en vetilla, la cual corta a cristales de especularita.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	S	Ca	Fe
Spectrum 1	73.25	14.86	11.79	0.11
Spectrum 2	74.07	14.45	11.38	0.11
Spectrum 3	74.30	14.37	11.33	

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)



2mm

Electron Image 1

Figura Anexo 63. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Se tiene la presencia de yeso (Spectrum 3 y 4) y de atacamita (Spectrum 1 y 2), ambos asociados en una misma vetilla, la cual corta a un clasto andesítico. Valores de Spectrum 5 están asociados a titanomagnetita,

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	S	Cl	Ca	Ti	Fe	Cu
Spectrum 1	67.17		12.76				20.07
Spectrum 2	69.60		11.27				19.12
Spectrum 3	77.49	12.55		9.96			
Spectrum 4	77.89	12.95		9.16			
Spectrum 5	75.70				3.24	21.05	

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

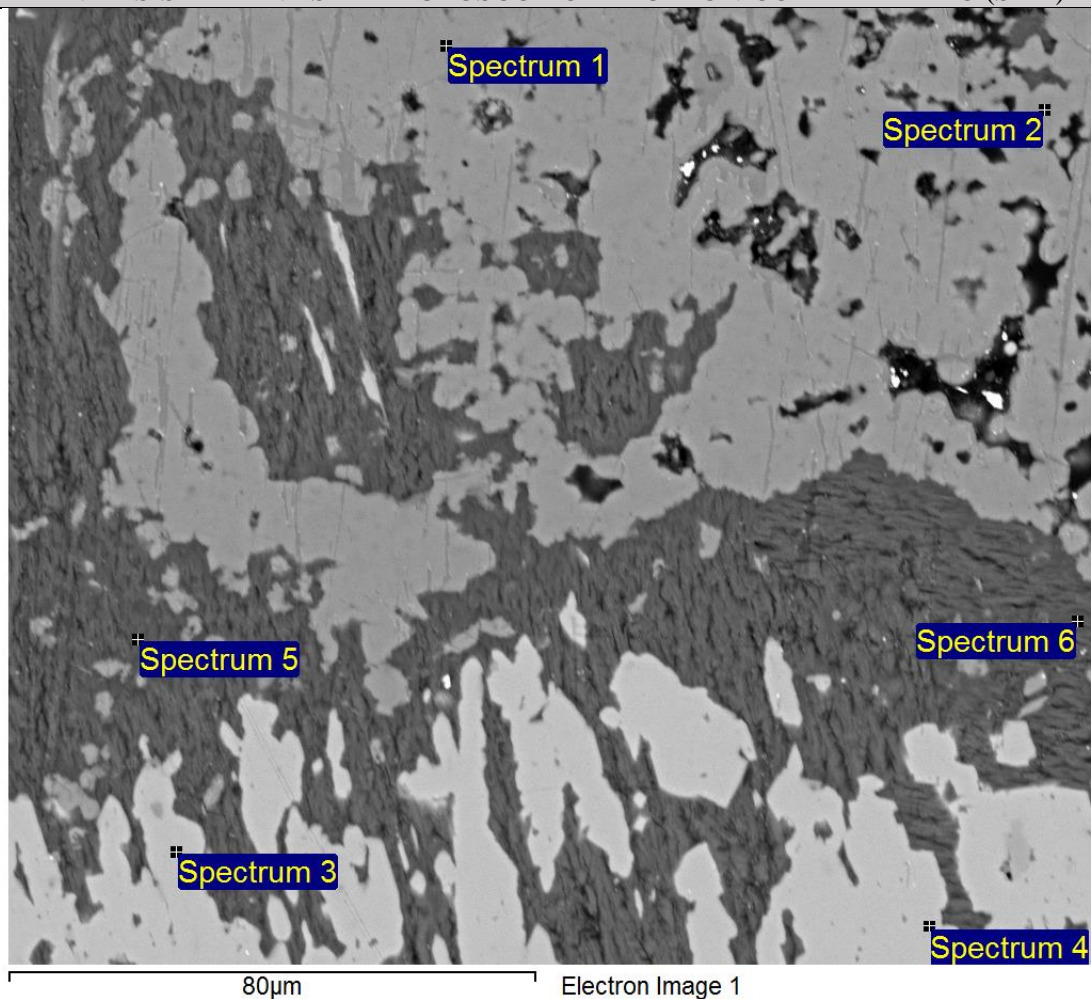


Figura Anexo 64. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Datos de Spectrum 1 y 2 se asocian a la composición química de hidróxidos de hierro. En la parte inferior se observa atacamita (Spectrum 3 y 4) y yeso (Spectrum 5 y 6).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe	Cu
Spectrum 1	78.50	2.39	1.17				16.73	1.20
Spectrum 2	78.58	2.12	1.07				17.35	0.88
Spectrum 3	63.02				14.16			22.82
Spectrum 4	64.29				14.12			21.59
Spectrum 5	74.78			13.78		11.02	0.43	
Spectrum 6	74.35			14.30		11.35		

N° MUESTRA	20
Clasificación Petrográfica	Profundidad
Brecha hidrotermal de especlarita con mineralización supérgena	78.35 m

OBSERVACIONES MICROSCÓPICAS

Brecha hidrotermal con matriz de especlarita y clastos andesíticos. La roca andesítica presenta plagioclasas saussuritizadas.

La mineralización supérgena registra distintos episodios sobre impuestos de crisocola y atacamita. La fase mineral de crisocola presenta contenido de hierro en su composición química

MINERALES OPACOS (50% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Hematita especlar	100	Matriz de la brecha hidrotermal.

MINERALES OXIDADOS DE COBRE (15 % DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Crisocola	25	En patinas y amígdalas.
Atacamita	75	En patinas y amígdalas.

MINERALES PRIMARIOS Y DE ALTERACIÓN (35% DEL TOTAL)

MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Epidota	5	En finos cristales agregados como reemplazo de plagioclasas de roca andesítica.
Plagioclasas	20	Fenocristales de clastos andesíticos.
Hidróxidos de hierro con estequiometría variable	75	En pátinas, reemplazando parcialmente a bordes de cristales anhedrales de atacamita y a crisocola.

ANÁLISIS MICROSCOPIO ÓPTICO

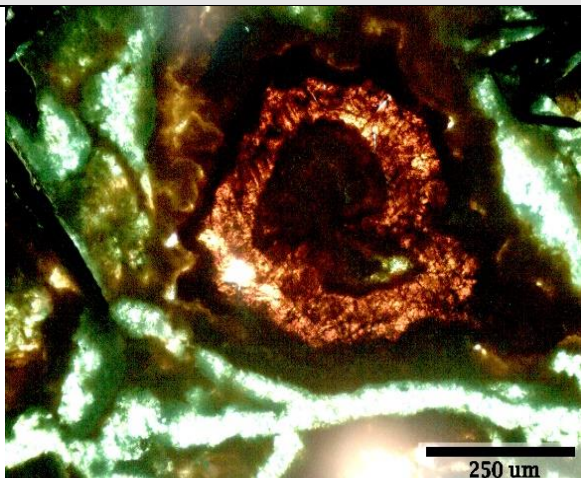


Figura Anexo 65. Fotomicrografía a nícoles paralelos y a luz transmitida, en donde se aprecia amígdala con distintos eventos de crecimientos de bordes. Se dispone atacamita de color verde en el exterior de la amígdala.



Figura Anexo 66. Misma imagen de la izquierda con luz reflejada. Se distinguen cristales de specularita con colores más brillantes.

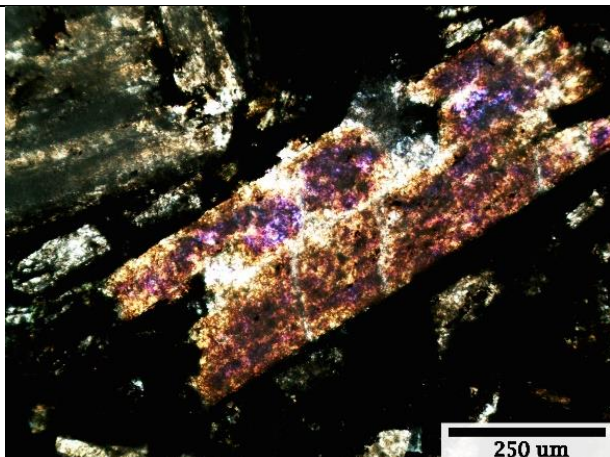


Figura Anexo 67. . Fotomicrografía a nícoles cruzados y a luz transmitida de plagioclasa saussuritizada (plagioclasa alterada a agregados de cristales finos de epidota y de minerales de micas).



ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

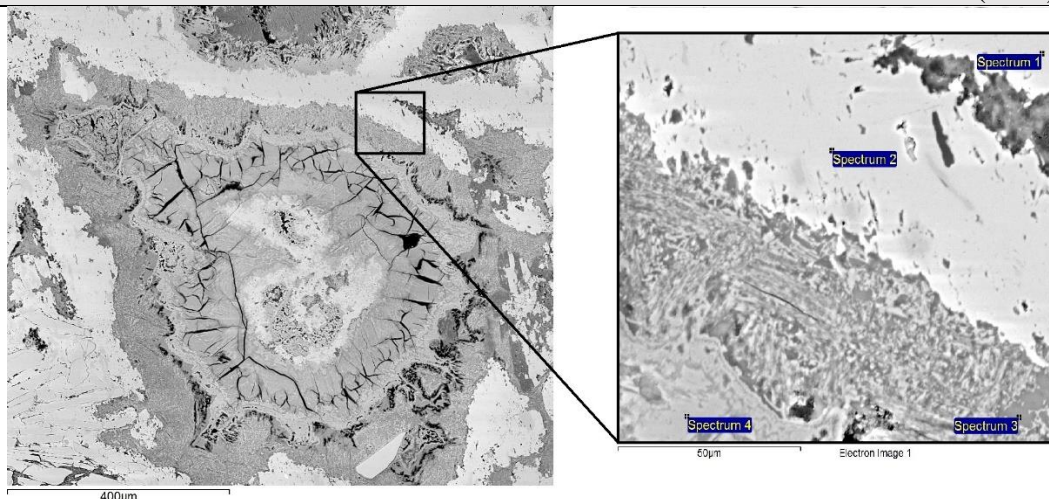


Figura Anexo 68. Fotomicrografías de barrido de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Figura de la derecha corresponde a acercamiento de zona externa de amígdala (vista en Figura Anexo 66). Spectrum 1 y 2 están asociados a atacamita, la cual reemplaza a crisocola en bordes de amígdala (Spectrum 3). Spectrum 4 indica la presencia de hidróxidos de hierro, los cuales presentan contenido de silicio y cobre en su composición química y reemplazan parcialmente a crisocola.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Al	Si	Cl	Ca	Fe	Cu
Spectrum 1	47.08			18.21		0.49	34.23
Spectrum 2	46.23			18.79		0.39	34.59
Spectrum 3	49.15	1.97	25.06	0.78		5.16	17.88
Spectrum 4	60.72		3.77	0.61	0.56	29.10	5.25

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

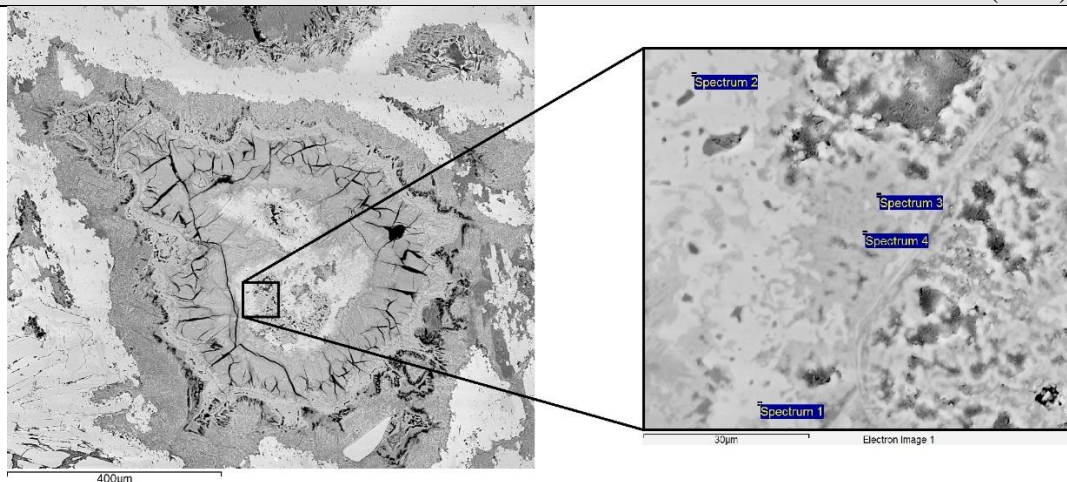


Figura Anexo 69. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 están asociados a atacamita reemplazando a hidróxidos de hierro ubicados en el centro de la amígdala. Estos hidróxidos presentan hierro y silicio en su composición química (Spectrum 3 y 4).

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Al	Si	Cl	Ca	Fe	Cu
Spectrum 1	43.90			19.08		2.31	34.71
Spectrum 2	44.86			18.82		2.28	34.04
Spectrum 3	65.53	1.04	3.38	0.58	0.28	24.54	4.66
Spectrum 4	63.78	0.77	3.45	0.48	0.28	26.61	4.64

N° MUESTRA	21
Clasificación Petrográfica	Profundidad
Brecha hidrotermal de especlarita	86.2 m

OBSERVACIONES MICROSCÓPICAS
Brecha hidrotermal con matriz de especlarita y clastos andesíticos. Se reporta la presencia de plagioclasa y de cúmulos cristalinos de titanomagnetita en la roca andesítica. Los cristales de especlarita se encuentran reemplazados en bordes por goethita. La mineralización supérgena está dada por la formación de crisocola dispuesta principalmente en vetillas. A esta mineralización se sobrepone la formación de copper pitch en fracturas. La más reciente alteración supérgena corresponde a un evento de formación de yeso y de atacamita asociados entre ellos.

MINERALES OPACOS (55% DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Especlarita	100	Matriz de la brecha hidrotermal. Cristales dispuestos sin orientación.

MINERALES OXIDADOS DE COBRE (15% DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Atacamita	65	Dispuesta en vetillas y amígdalas, asociada al yeso.
Crisocola	30	Principalmente en vetillas reemplazada parcialmente por yeso y por atacamita.
Copper pitch	5	En grietas de vetillas, asociado a crisocola.

MINERALES PRIMARIOS Y DE ALTERACIÓN (30% DEL TOTAL)		
MINERAL	% VOLUMEN	OCURRENCIA
Yeso	25	En vetillas, asociado a atacamita.
Titanomagnetita	25	Cúmulos cristalinos en los clastos andesíticos.
Plagioclasas	30	Fenocristales de clastos andesíticos
Goethita	20	Reemplazando a cristales de especlarita y dispuesta en amígdalas.

ANÁLISIS MICROSCOPIO ÓPTICO

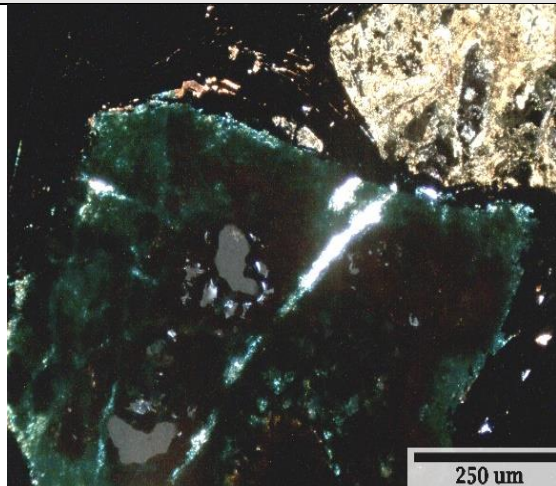


Figura Anexo 70. Fotomicrografía a nicoles cruzados y a luz transmitida, en donde se registra atacamita reemplazando a un cristal de los clastos andesíticos.

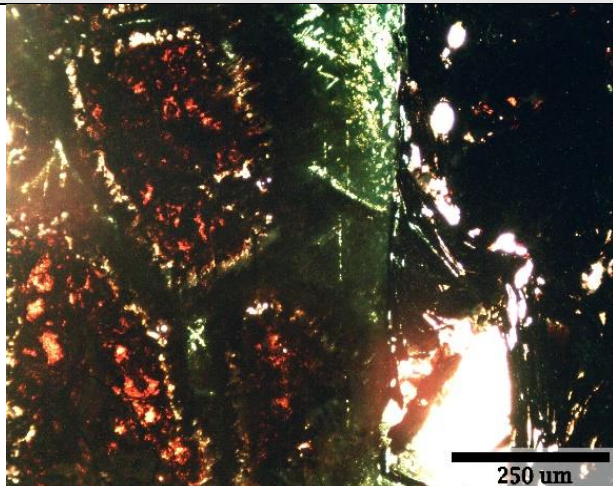
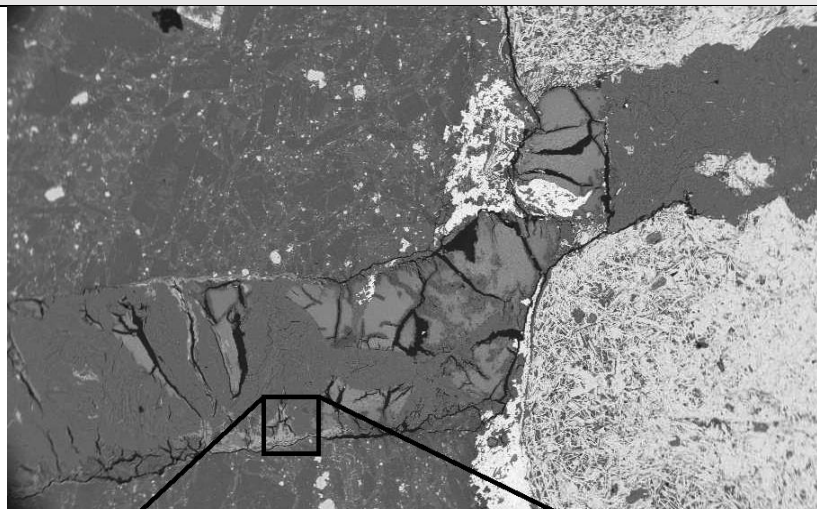
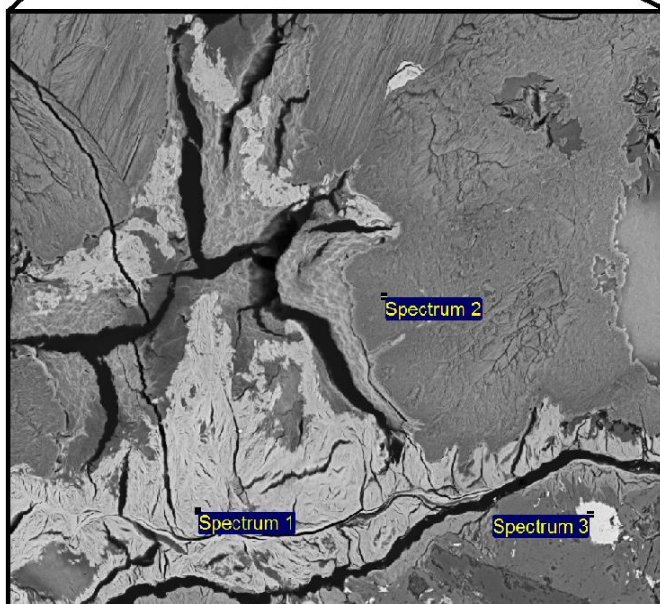


Figura Anexo 71. Fotomicrografía a nicoles paralelos y a luz transmitida, en donde se observa atacamita reemplazando bordes de goethita en amígdalas.

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)



3mm



100µm

Electron Image 1

Figura Anexo 72. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Se registra la formación de copper pitch en grietas de la vetilla (Spectrum 1). Spectrum 2 es asociado a yeso en vetilla. Datos de Spectrum 3 se relacionan a titanomagnetita en cúmulos cristalinos.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Mg	Si	S	Cl	Ca	Ti	Mn	Fe	Co	Cu
Spectrum 1	55.77	2.06	3.35	1.19	0.72	2.03		17.89		0.78	16.20
Spectrum 2	62.06			19.80		18.14					
Spectrum 3	52.50						3.32		44.18		

ANÁLISIS A TRAVÉS DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

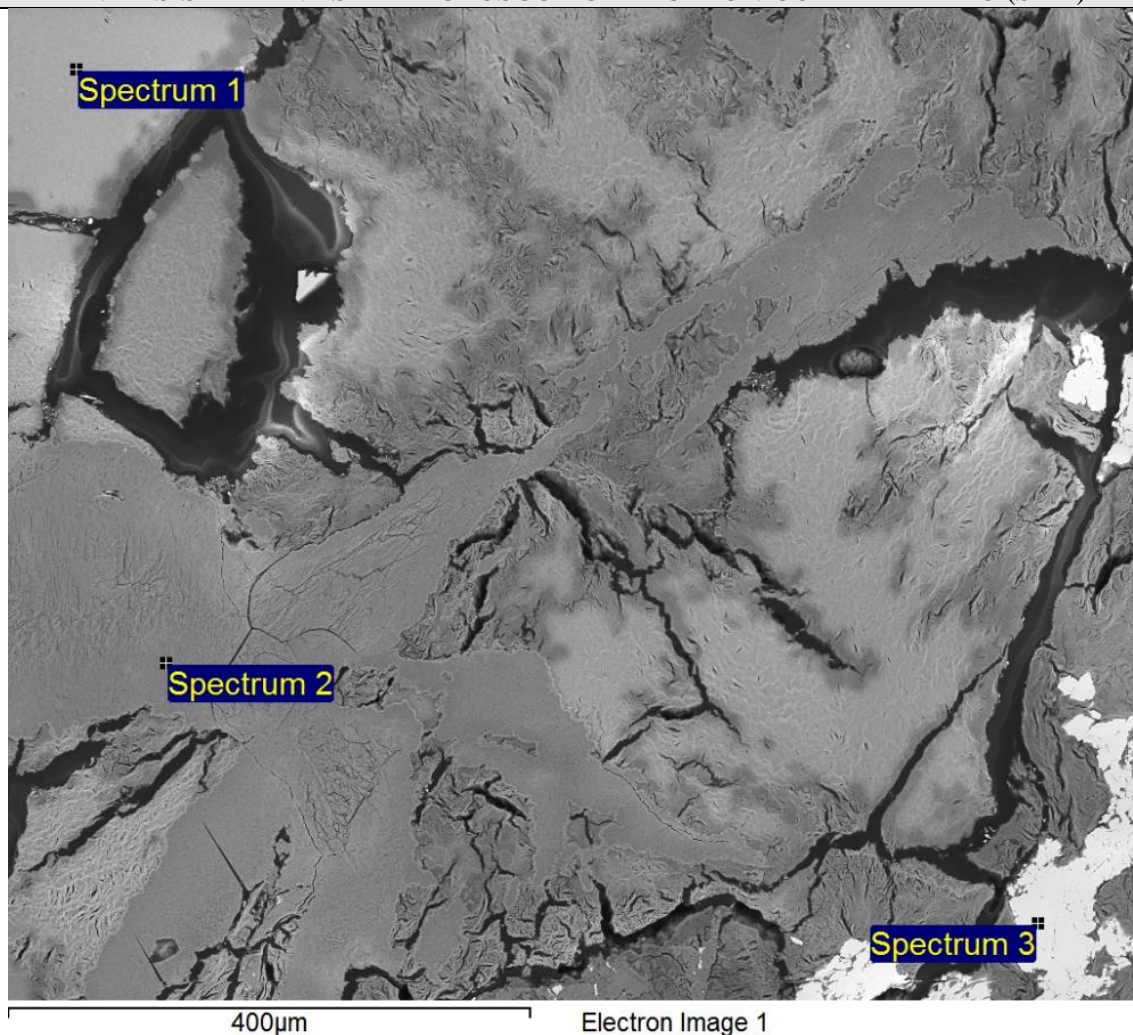


Figura Anexo 73. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Misma vetilla observada en Figura Anexo 72, en donde se dispone crisocola (Spectrum 1) reemplazada parcialmente por yeso (Spectrum 2). Spectrum 3 está asociado a atacamita, la cual está dispuesta en bordes de la vetilla.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

Spectrum	O	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Mn	Cu
Spectrum 1	67.71	0.88	2.13	16.29			0.81		12.18
Spectrum 2	64.40				17.57	0.78	16.14	1.11	
Spectrum 3	51.44					15.99			32.57

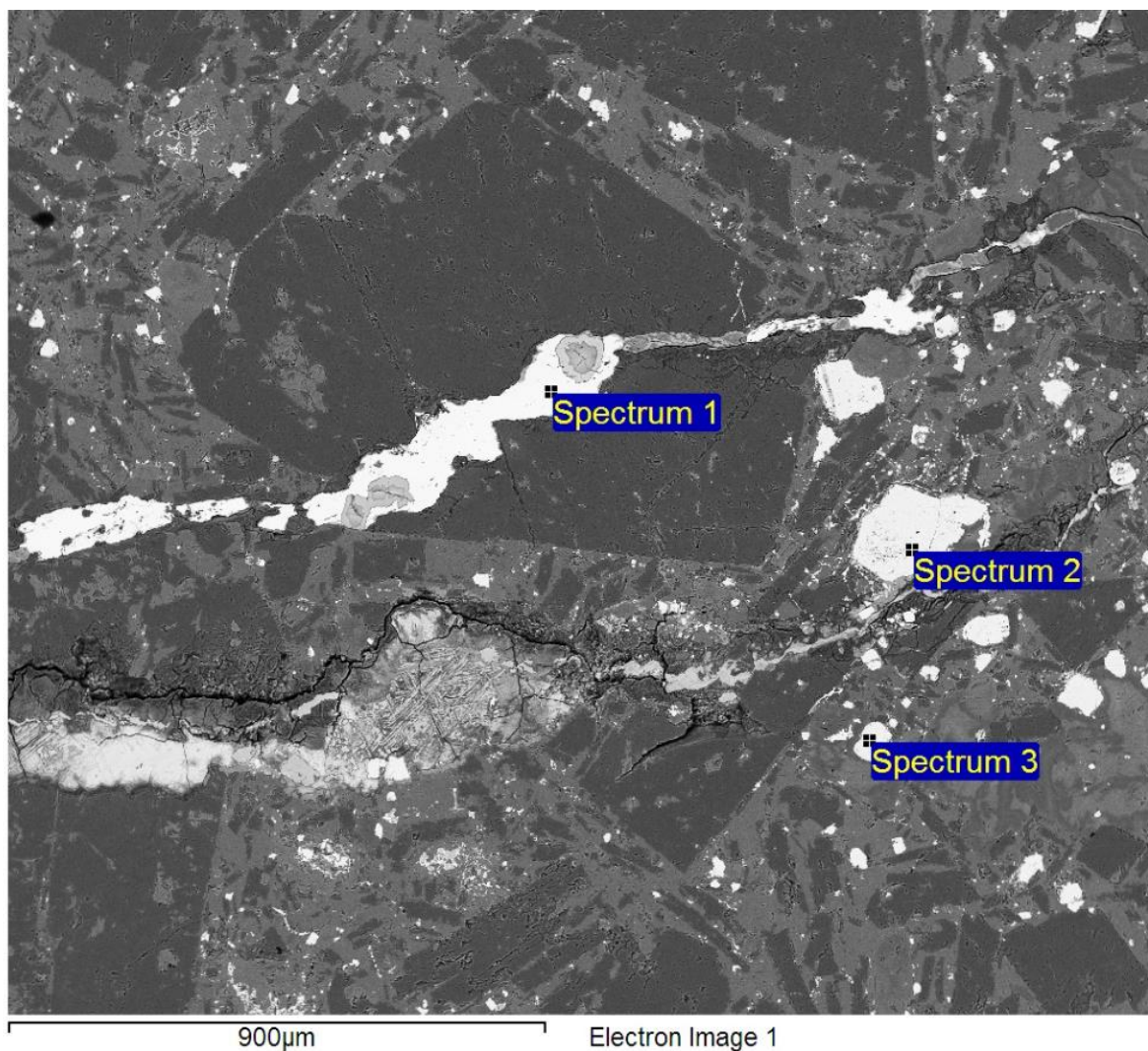


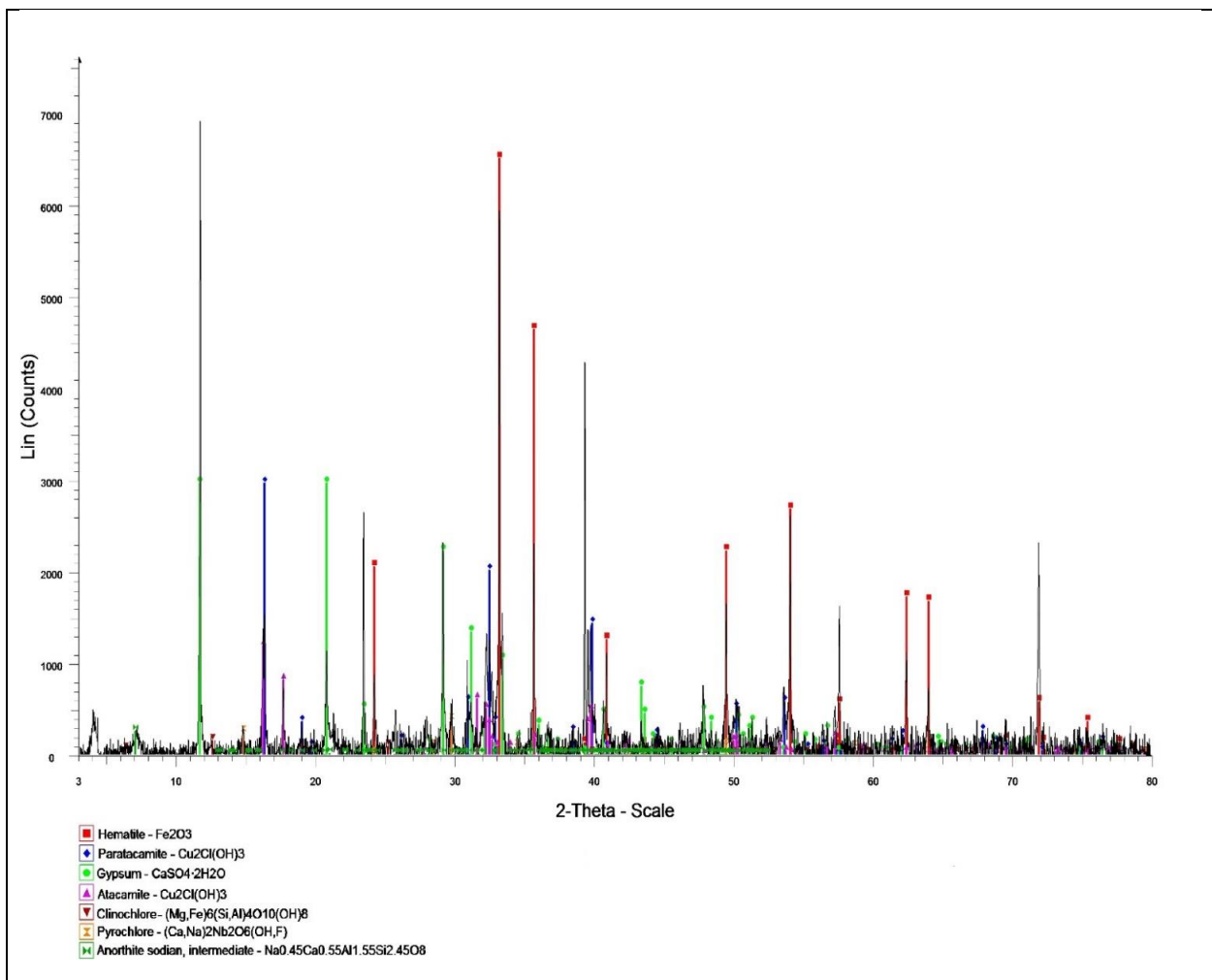
Figura Anexo 74. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 asociado a atacamita dispuesta en vetilla. Se registra la presencia de titanomagnetita en cúmulos cristalinos asociados a la roca andesítica.

Datos de composición mineral química semicuantitativa:

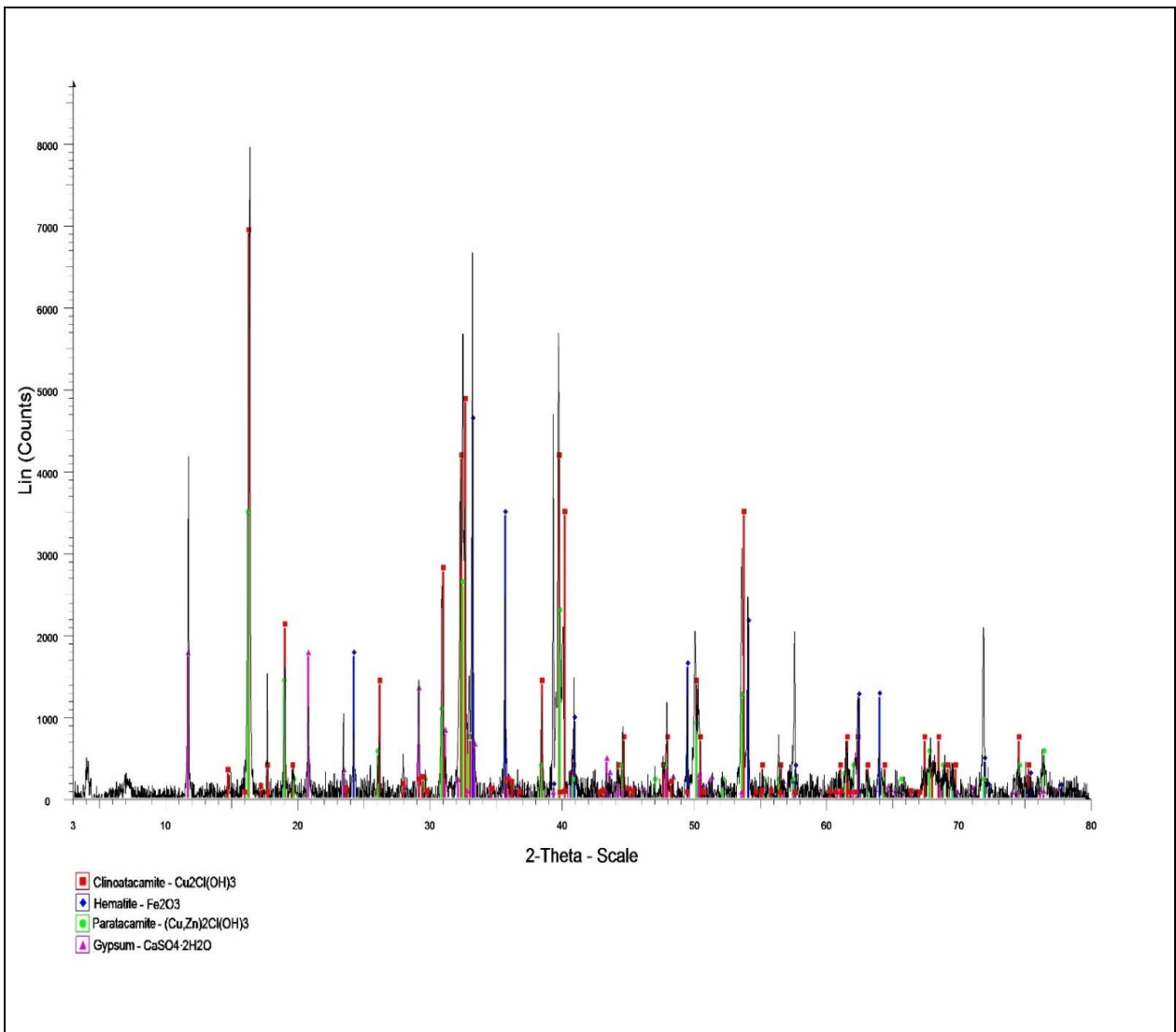
Spectrum	O	Si	Cl	Ti	V	Fe	Cu
Spectrum 1	60.81		16.86				22.34
Spectrum 2	79.41	0.37		4.85	0.39	14.99	
Spectrum 3	80.08	0.36	0.29	6.25	0.41	12.61	

ANEXO B. RESULTADOS XDR

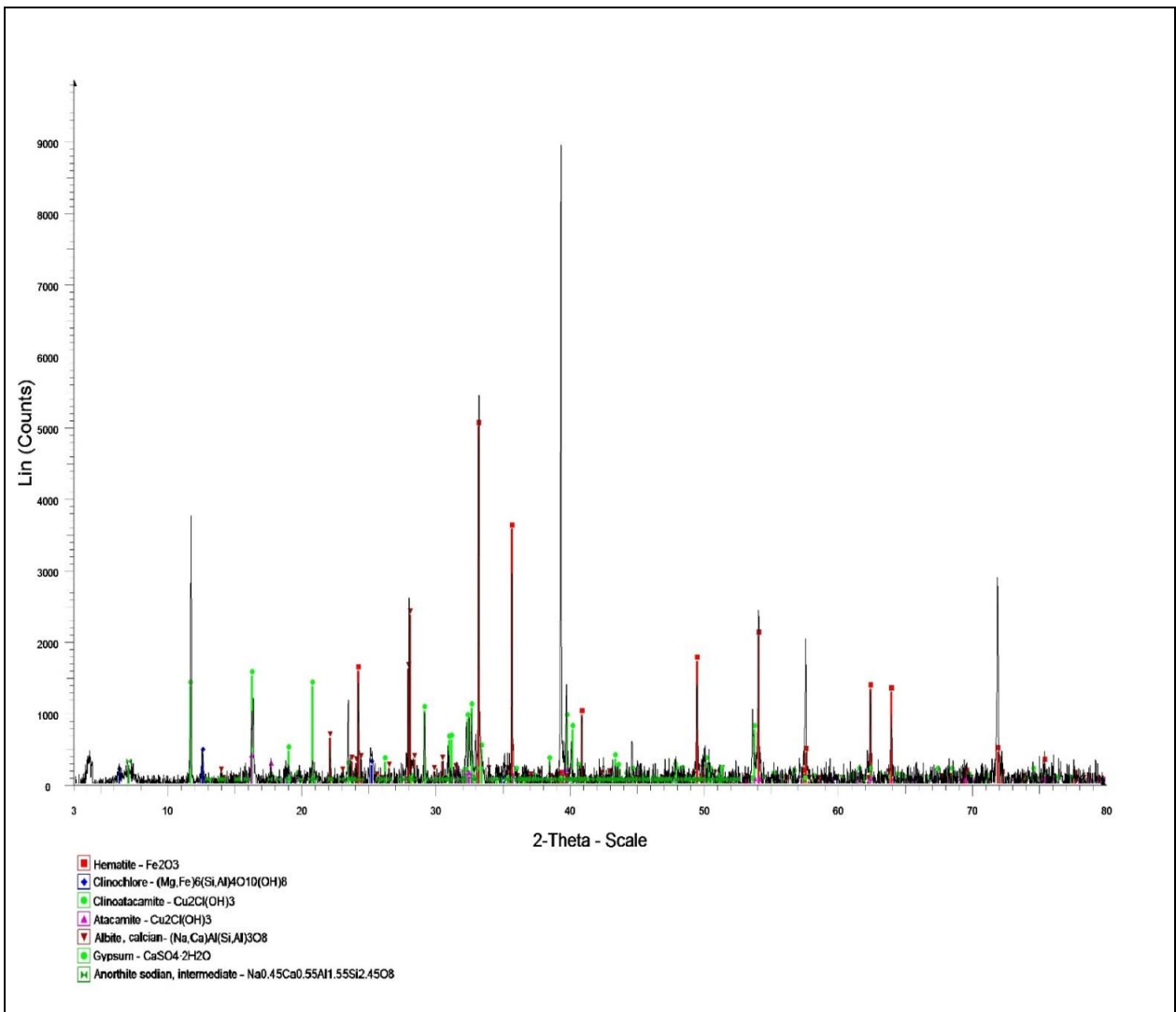
N° MUESTRA	3
PROFUNDIDAD	13.83 m



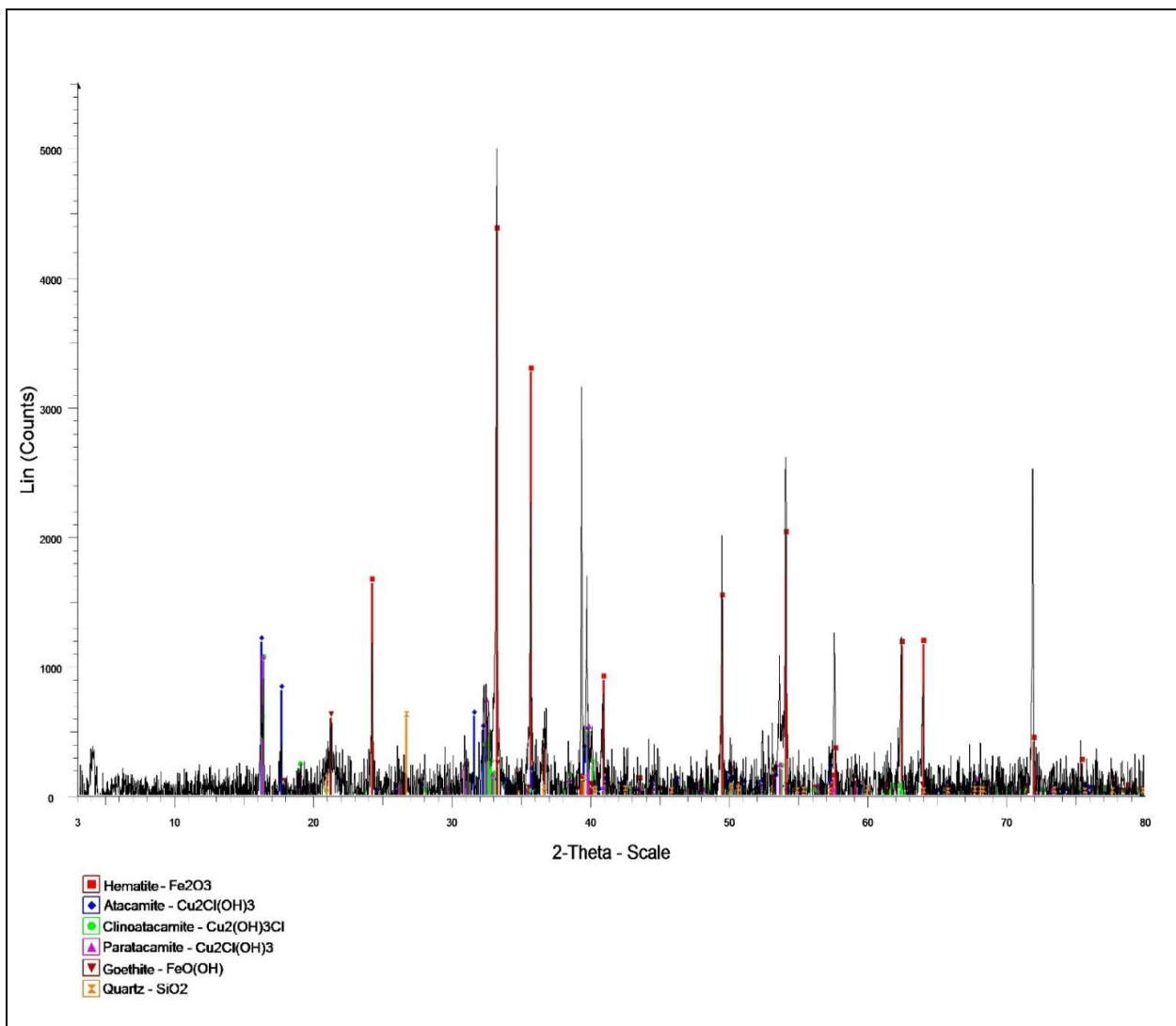
N° MUESTRA	5
PROFUNDIDAD	18.85 m



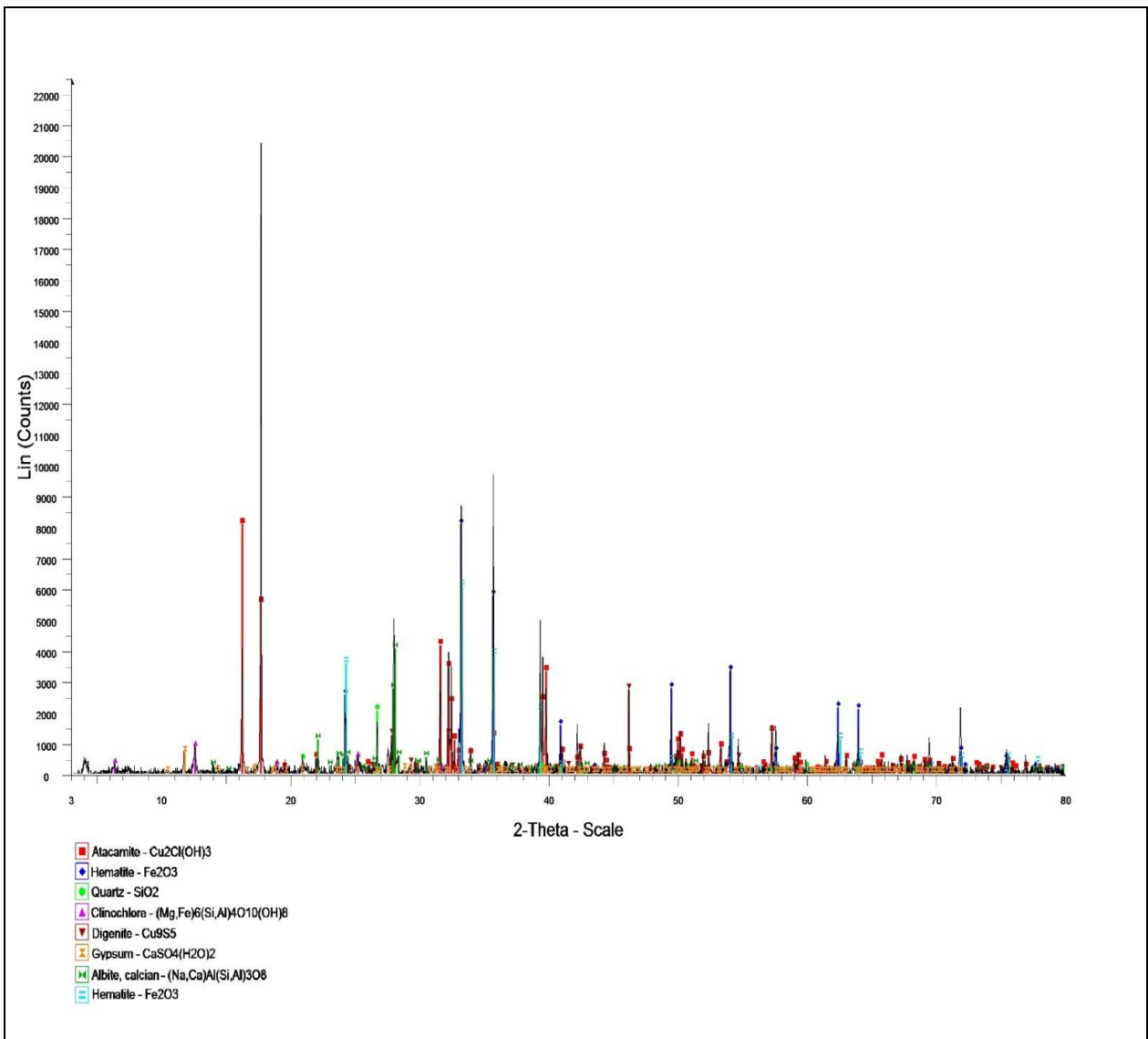
N° MUESTRA	6
PROFUNDIDAD	27.1 m



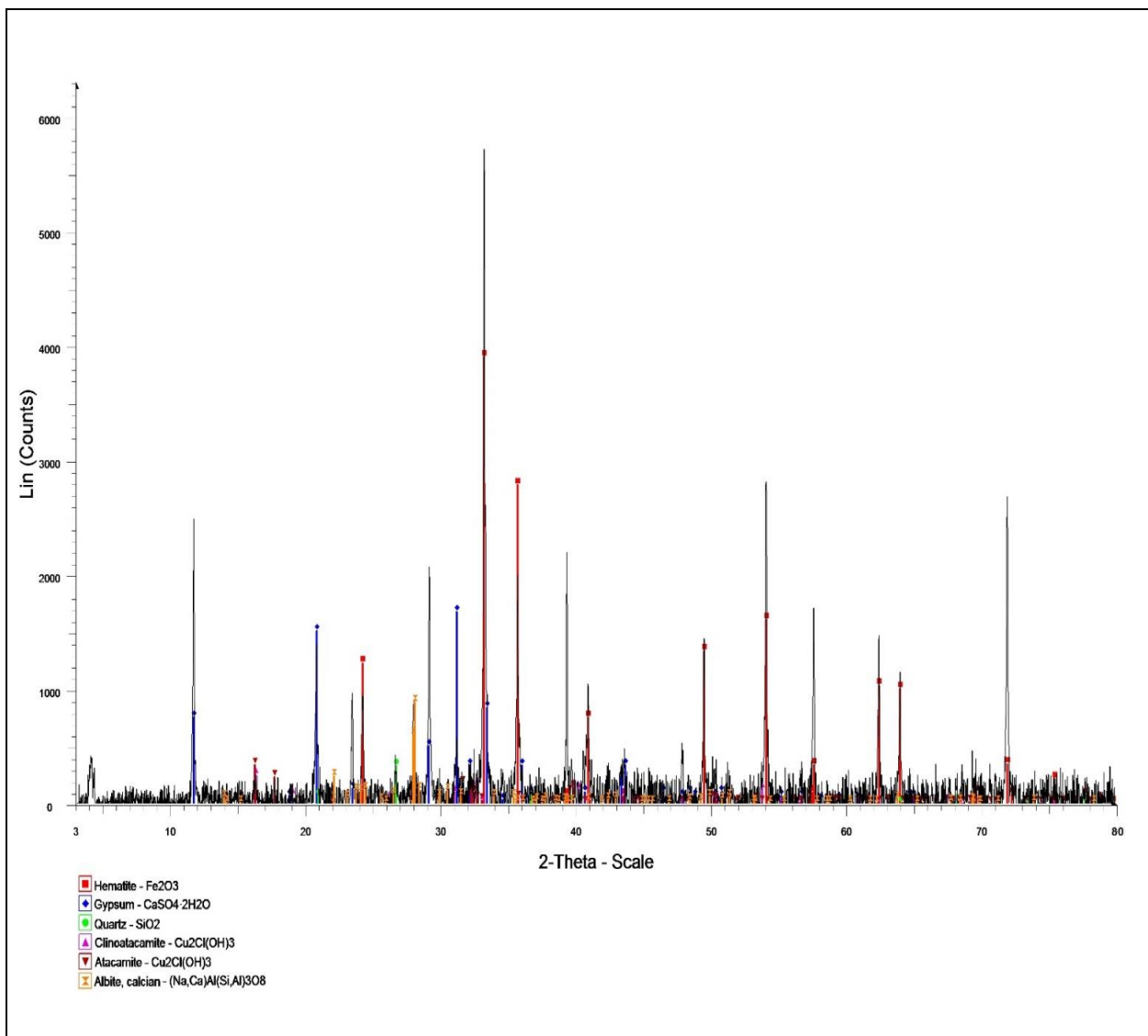
N° MUESTRA	9
PROFUNDIDAD	34.9 m



N° MUESTRA	14
PROFUNDIDAD	58.35 m



N° MUESTRA	19
PROFUNDIDAD	73.3 m



N° MUESTRA	20
PROFUNDIDAD	78.35 m

