



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

**CARACTERIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE MINERALES OXIDADOS DE COBRE
Y ALTERACIÓN EN EL YACIMIENTO CUPRÍFERO MANTOS DE LA LUNA,
II REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

ESTEBAN PABLO LEIVA BIANCHI

**PROFESOR GUÍA:
SR. CARLOS PALACIOS MONASTERIO**

**MIEMBROS DE LA COMISION:
SR. VICTOR MAKSAEV JURCHUC
SR. BRIAN TOWNLEY CALLEJAS**

**SANTIAGO DE CHILE
ENERO DE 2010**

RESUMEN

El yacimiento estratoligado de cobre Mantos de la Luna pertenece a la Franja Metalogénica de la Cordillera de la Costa del Norte de Chile. Su mineralización se caracteriza por presentar principalmente, los minerales oxidados de cobre crisocola y atacamita.

El objetivo de este trabajo es caracterizar macroscópica y microscópicamente la mineralización de mena de cobre y alteración asociada, y determinar la distribución de los minerales oxidados de cobre presentes en tres sectores del yacimiento Mantos de la Luna, los cuales son: Bloque Norte, Central y Sur.

Para identificar y caracterizar los minerales oxidados de cobre, se realizaron descripciones macroscópicas y microscópicas de estos y se analizaron muestras por la técnica de difracción de rayos X en distintos sectores estudiados. La distribución de la mineralización se estudió a través de la confección de perfiles y en base a información de mapeo de sondajes y de bancos.

Los minerales oxidados de cobre se distribuyen formando cuerpos mantiformes, vetiformes y bolsonadas. El principal control en la distribución de los cuerpos vetiformes es de carácter estructural, por medio de arreglos de diaclasas de orientación en rumbo NNW-SSE y manteos de 80°E. Los cuerpos mantiformes y las bolsonadas están controlados esencialmente por la permeabilidad de la roca, hospedándose preferencialmente en las secciones más vesiculares de coladas de lavas. Finalmente existe desplazamiento de los cuerpos de mena definidos a escala local mediante fallas de rumbo aproximado EW, los cuales definen desplazamientos tipo sinistral de los cuerpos mineralizados.

Las especies minerales reconocidas son, en orden de abundancia: crisocola (y/o dioptasa), atacamita (y/o paratacamita), calcosina, y menores cantidades de tenorita, malaquita, melanotalita y nantokita. Asimismo se reconoce mineralización acotada y aislada de minerales sulfurados entre los cuales se cuenta pirita, calcopirita y bornita. Estos minerales se encuentran principalmente en vetillas, amígdalas, pátinas y diseminaciones. Los minerales de ganga asociados corresponden a alteración hipógena caracterizada principalmente por cuarzo, albita, calcita y hematita y alteración supérgena caracterizada principalmente por yeso, limonitas y arcillas.

Por medio de la observación de las relaciones de corte en las ocurrencias de minerales oxidados de cobre, se han distinguido dos eventos de mineralización supérgena en el yacimiento. El primer evento fue responsable de formar atacamita y crisocola en asociación con calcosina, y un segundo evento fue responsable de formar crisocola, atacamita y yeso. Para el primer evento se propone mecanismos de transporte por aguas meteóricas percolantes. Para el último evento, se proponen mecanismos de bombeo tectónico en aguas de formación profunda y agua subterránea diluída. El bombeo tectónico es un proceso recurrente y activo hasta el presente, responsable de formar atacamita y crisocola en condiciones hiperáridas.

A mi madre y maestra, Rosser, por su guía y consejo.

A mi padre Marcelo, por su cariño, afecto y aprecio.

A mis hermanos Marcelo y Bettina, por la suerte de haber crecido junto a ellos.

A mis amigos, por las conversaciones y los buenos momentos.

A Carolina, por su amor y paciente espera.

AGRADECIMIENTOS

En el desarrollo de esta tesis hubo gran cantidad de personas sin las cuales este trabajo no podría haber tenido término y de las cuales me siento profundamente agradecido. Mis más profundos agradecimientos al profesor Carlos Palacios y al señor Jorge Pizarro, principales gestores de esta iniciativa, quienes también han aportado con sus ideas y conocimiento en el desarrollo de la misma. Agradecimientos especiales al Área de Geología de la Compañía Minera Mantos de la Luna S.A. por su apoyo moral, logístico e intelectual. Extiendo mis agradecimientos a los trabajadores de la Compañía Minera Mantos de la Luna S.A. por su apoyo moral y logístico durante las jornadas de terreno. Por último agradecer a todos quienes han sido parte directa o indirecta del desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Presentación	1
1.2 Reseña Histórica	1
1.3 Ubicación y Accesos	2
1.4 Geomorfología y clima	4
1.5 Objetivos	4
1.5.1 Objetivo Principal	4
1.5.2 Objetivos Específicos	4
1.6 Metodología de Trabajo	5
1.7 Estudios Anteriores	6
CAPÍTULO 2 MARCO GEOLÓGICO	9
2.1 Geología Regional	9
2.1.1 Generalidades	9
2.1.2 Mesozoico	9
2.1.3 Cenozoico	11
2.2 Marco Estructural	13
2.3 Geología Local	13
2.3.1 Estructuras en el yacimiento Mantos de la Luna	15
2.3.2 Geología Local	19
2.3.2.1 Rocas de la Formación La Negra	19
2.3.2.2 Unidades Intrusivas	22
2.3.2.3 Mineralización	23
2.3.2.4 Alteración	24

CAPÍTULO 3

CARACTERIZACIÓN LITOLÓGICA Y ESTRUCTURAL DE LOS SECTORES ESTUDIADOS	27
3.1 Bloque Norte o Capacho	28
3.1.1 Litología y estructuras	28
3.1.2 Mineralización y Alteración	29
3.2 Bloque Central	31
3.2.1 Litología y estructuras	31
3.2.2 Mineralización y alteración	31
3.3 Bloque Sur	34
3.3.1 Litología y estructuras	34
3.3.2 Mineralización y Alteración	34

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN DE LOS OXIDADOS DE COBRE Y MINERALES DE ALTERACIÓN ASOCIADOS	36
4.1 Caracterización de los minerales oxidados de cobre	38
4.1.1 Crisocola	38
4.1.1.1 Antecedentes bibliográficos	38
4.1.1.2 Características macroscópicas	40
4.1.2 Atacamita	42
4.1.2.1 Antecedentes bibliográficos	42
4.1.2.2 Características macroscópicas	44
4.1.3 Malaquita	46
4.1.3.1 Antecedentes bibliográficos	46

4.1.3.2	Características Macroscópicas	46
4.1.4	Tenorita	47
4.1.4.1	Antecedentes bibliográficos	47
4.1.4.2	Características macroscópicas	48
4.1.5	Melanotalita y Nantokita	49
4.1.5.1	Antecedentes bibliográficos	49
4.1.6	Relación atacamita-crisocola.	50
4.2	Caracterización de los minerales sulfurados de cobre	50
4.2.1	Calcosina	50
4.2.2	Bornita	51
4.2.3	Pirita y Calcopirita	52
4.3	Caracterización macroscópica de los minerales asociados a la mena de cobre.	53
4.4	Caracterización Microscópica de Minerales	56
4.4.1	Vetillas	56
4.4.2	Amígdalas	61

CAPÍTULO 5

DISTRIBUCIÓN DE LOS OXIDADOS DE COBRE 64

5.1	Bloque Norte	64
5.2	Bloque Central	68
5.3	Bloque Sur	71

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES 73

6.1	Discusión	73
-----	-----------	----

6.1.1	Eventos de mineralización en el yacimiento	73
6.1.2	Origen de la mineralización hipógena de cobre	74
6.1.3	Eventos de mineralización supérgena	75
6.1.4	Mecanismos de formación de los minerales oxidados de cobre	76
6.1.5	Origen y mecanismos de transporte de las soluciones supérgenas	77
6.1.6	Condiciones termodinámicas de las soluciones mineralizadoras	78
6.1.7	Desarrollo del perfil de mineralización	79
6.1.8	Sobre la caracterización de nuevas especies de mena en minerales oxidados de cobre	81
6.1.9	Distribución de los oxidados de cobre	82
6.2	Conclusiones	84
	REFERENCIAS	86
	ANEXO	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa Económico-Minero la II Región de Antofagasta	3
Figura 1.1. Mapa Ubicación Mina Mantos de la Luna y Principales Centros Urbanos	3
Figura 2.1. Mapa Geológico Regional	12
Figura 2.2. Mapa Estructural de la Cordillera de la Costa	13
Figura 2.3. Mapa Geológico Local	14
Figura 2.4. Falla Capacho	15
Figura 2.5. Falla Albornoz	16
Figura 2.6. Falla Cantera	17
Figura 2.7. Falla Sur	18
Figura 2.8. Brecha Andesítica	20
Figura 2.9. Andesita porfídica amigdaloidal	22
Figura 3.1. Sección Geológica E375.200	28
Figura 3.2. Sección Geológica Bloque Norte	30
Figura 3.3. Sección Geológica Bloque Central	33
Figura 3.4. Sección Geológica Bloque Sur	35
Figura 4.1. Diagramas de estabilidad de oxidados de cobre	37
Figura 4.2. Fotografías de hábitos y ocurrencias de crisocola y atacamita	42
Figura 4.3. Atacamita	45
Figura 4.4. Malaquita	47
Figura 4.5. Tenorita	48
Figura 4.6. Calcosina	51
Figura 4.7. Bornita	52
Figura 4.8. Pirita	53
Figura 4.9. Relaciones de cortes entre vetillas de yeso y cuarzo-calcita-hematita-crisocola	55

Figura 4.10. Relaciones de cortes entre vetillas de yeso-atacamita y calcosina-bornita	56
Figura 4.11. Microscopía de vetillas poliminerales y vetillas de crisocola-atacamita	57
Figura 4.12. Microscopía de vetillas de hematita-atacamita-crisocola	58
Figura 4.13. Microscopía de vetilla de cuarzo-atacamita-crisocola y cuarzo	59
Figura 4.14. Microscopía de vetilla de crisocola-atacamita-yeso	60
Figura 4.15. Microscopía de amígdalas de cuarzo y crisocola	62
Figura 4.16. Microscopía de amígdalas de hematita, atacamita y crisocola	63
Figura 5.1. Sección mineralógica sector Bloque Norte (N7.525.025)	66
Figura 5.2. Sección mineralógica sector Bloque Norte (N7.525.012,5)	67
Figura 5.3. Sección mineralógica sector Bloque Central (N7.524.775)	69
Figura 5.4. Sección mineralógica sector Bloque Central (N7.524.750)	70
Figura 5.5. Sección mineralógica sector Bloque Sur (N7.524.562,5)	72

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Presentación

El presente trabajo de memoria de título se enmarca dentro de un proyecto de modelación del yacimiento impulsado por la Compañía Minera Mantos de la Luna S.A. y cuenta con la aprobación del profesor Sr. Carlos Palacios Monasterio y del Jefe de Geología Sr. Jorge Pizarro Carvallo.

El depósito de cobre y plata Mantos de la Luna se encuentra en la Cordillera de la Costa, provincia de Tocopilla en la II Región de Antofagasta, Chile y es considerado como un depósito estratoligado de cobre de la Franja Metalogénica de la Cordillera de la Costa del Norte de Chile (Boric et al., 1990) (Figura 1.1.). A pesar que gran parte del mineral extraído y de las reservas y recursos que contempla corresponden a minerales oxidados de cobre, no se ha abordado con profundidad el tema de la caracterización mineral ni de la distribución espacial del yacimiento.

Este trabajo pretende entregar nueva información sobre las características y distribución de los minerales oxidados de cobre y alteración asociada, contribuyendo así al modelamiento, extracción y exploración de nuevos recursos.

1.2 Reseña Histórica

La primera mención en la literatura del yacimiento Mantos de la Luna aparece en la “Monografía Minera de la Provincia de Antofagasta” de Kuntz (1928). Desde ese entonces hasta 1954 el yacimiento se explotó artesanalmente.

En el año 1957 se conformó la Compañía Cuprífera Mantos de la Luna la cual impulsó distintos proyectos de desarrollo y evaluación del yacimiento. El geólogo Mervin Bernstein realizó estudios de evaluación durante 1957 y 1959, señalando reservas minerales entre 336.000 ton. y 470.000 ton. con una ley media de 3% Cu soluble.

En mayo de 1961, la Compañía puso en marcha la primera planta de la mina. En 1965 la planta y la mina fueron arrendadas a la Compañía Wells Cobre, la cual paralizaría las faenas en

1966. A partir de ese año, ENAMI impulsa nuevos estudios de evaluación del yacimiento, demostrando su interés de adquirir la mina y la planta.

En 1971 el directorio de ENAMI compra las faenas en conjunto con COMINA con fondos aportados por INCONOR. A partir de ese año, la mina empezó a ser administrada por la Sociedad Filial de ENAMI llamada Compañía Minera Regional de Tocopilla, "COMIRETO". El año 1978 las faenas volvieron a paralizar en espera de su venta mediante licitación pública por parte de ENAMI.

En 1988 ENAMI licitó todas las pertenencias mineras correspondientes al complejo Mantos de la Luna, las que fueron adquiridas por Química y Metalúrgica Tocopilla S.A., filial de Compañía Minera de Tocopilla S.A., la cual es la actual propietaria de las faenas.

1.3 Ubicación y Accesos

El yacimiento Mantos de la Luna se ubica en la Cordillera de la Costa de la Provincia de Tocopilla, II Región de Antofagasta, Chile. Se encuentra aproximadamente a 145 km al norte de la ciudad de Antofagasta y a 36 km al sur de la ciudad de Tocopilla (Figura 1.1.). El área de estudio de este trabajo comprende un cuadrante localizado entre los 7.525.500N a 7.524.000N y los 374.500E a 376.500E lo cual corresponde a un total de 3 km² de superficie.

Desde Antofagasta se accede al yacimiento mediante la ruta costera B-1 que conecta esta ciudad con el puerto de Tocopilla. A la altura del kilómetro 130 existe un desvío previamente señalado (ruta B-178) por el cual se recorren 20 km de camino sólo accesible por vehículos de doble tracción. También existe un camino optativo por la ruta B-24 que une Tocopilla y Calama mediante el cual se accede a un desvío a la altura del kilómetro 20, frente a la estación de FFCC "Barriles", el cual es un camino secundario en buen estado, por el que se recorren 59 km en dirección sur, hasta llegar al área de estudio (Figura 1.1. y 1.2.).

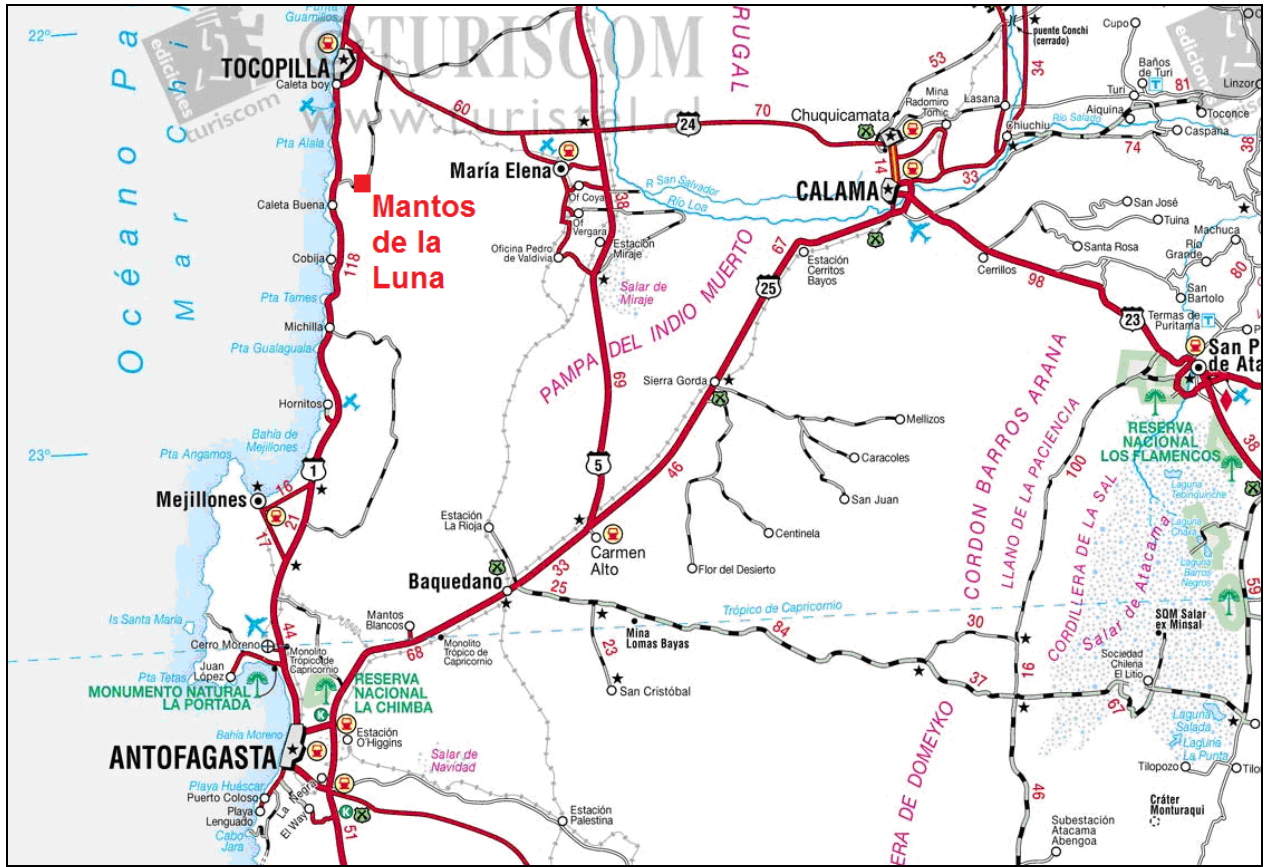


Figura 1.1. Mapa Ubicación Mina Mantos de la Luna y Principales Centros Urbanos.



Figura 1.2. Ubicación Mina Mantos de la Luna.

1.4 Geomorfología y clima

El yacimiento Mantos de la Luna se encuentra ubicado en la unidad geomorfológica de la Cordillera de la Costa. El rasgo más característico del área de estudio es el escarpe costero que flanquea por el occidente a la Cordillera de la Costa y que se extiende en una franja paralela a la línea de playa alejada unos 2 km al E de la misma. El escarpe tiene unos 75° a 80° de pendiente promedio y se eleva hasta aproximadamente los 1.300 m.s.n.m. La mina se encuentra en la cornisa superior del acantilado. Hacia el oriente de la Cordillera de la Costa se presenta un relieve suave flanqueado por amplias rampas de deyección, el cual disminuye gradualmente de altura hacia el este (Boric et al., 1990).

El clima es del tipo desértico costero. Esta aridez se debe esencialmente a la posición casi permanente del Anticiclón del Pacífico, el cual está formado por masas de aire frío y seco provenientes de las zonas ecuatoriales, contribuyendo a mantener altas presiones y cielos despejados. Las aguas superficiales del Océano Pacífico permanecen habitualmente frías, lo cual impide que las masas del aire provenientes de la costa obtengan una cantidad significativa de humedad.

La neblina costera o 'camanchaca' es un fenómeno frecuente en la costa, acaecido principalmente por el ascenso de las masas de aire al enfrentar el acantilado costero. Rara vez se originan precipitaciones de importancia, sin embargo las 'camanchacas' contribuyen a atrapar la poca humedad del aire, acentuando la aridez hacia el interior.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Principal

Este trabajo tiene como objetivos principales determinar la mineralización asociada existente en el yacimiento Mantos de la Luna e identificar la distribución de los principales minerales de mena.

1.5.2 Objetivos Específicos

Este trabajo tiene como objetivos específicos la caracterización macroscópica y microscópica de los minerales de mena de cobre presentes y mineralización asociada, zonificar

el yacimiento por asociaciones minerales observadas y relacionar la litología y las estructuras con la mineralogía en estudio.

1.6 Metodología de Trabajo

El trabajo de terreno y gabinete se realizó conjuntamente en dependencias de la mina Mantos de la Luna, los primeros 20 días de cada mes, desde Agosto hasta Noviembre de 2009. El trabajo de descripción de cortes transparentes y pulidos se realizó en el laboratorio de microscopía del Departamento de Geología de la Universidad de Chile durante los últimos diez días de cada mes.

Se distinguieron tres sectores principales en el yacimiento, los cuales son: Bloque Norte o Capacho, Bloque Central y Bloque Sur. Estos tres sectores comprenden la totalidad del yacimiento en estudio.

En cada sector del yacimiento se realizaron mapeos de bancos a escala 1:1000 con observaciones litológicas, estructurales, mineralógicas y de alteración así como la recolección simultánea de muestras de mano, las cuales fueron descritas macroscópicamente, con énfasis en la abundancia relativa de minerales de mena, su estilo de ocurrencia y asociaciones minerales.

Se confeccionaron cortes transparentes para describir aquellas especies minerales que presentaban dificultades para ser identificadas, así como cortes pulidos en aquellas muestras que presentaban contenido de minerales sulfurados de cobre y mineralización oxidada. Estas muestras fueron preparadas en el Taller de Cortes Pulidos y analizadas mediante un microscopio Olympus modelo CX31-P en los Laboratorios de Mineralogía del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

También se analizaron mediante la técnica de difracción de rayos X muestras correspondientes a distintos estilos de mineralización, como vetillas, amígdalas y pátinas, con el objetivo de reconocer nuevas especies minerales. Las muestras fueron analizadas en el Difractómetro de Rayos X marca Siemens, modelo D5000, perteneciente al Laboratorio de Geoquímica Aplicada del Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad Católica del Norte.

Para obtener un modelo litológico y estructural del yacimiento y modelar la distribución de la mineralización en oxidados de cobre, se confeccionaron secciones este-oeste cada 12,5 m con información litológica, estructural y mineralógica con ayuda de los mapeos de bancos y sondajes de aire reverso. Los sondajes de exploraciones suman cerca de 20.000 metros de pozos perforados y reúnen información de mapeos desde el año 2000 hasta mayo del año 2009 abarcando principalmente los sectores Bloque Norte y Bloque Central. Con ayuda del programa Vulcan 6.0., se digitalizó tal información, obteniendo secciones y mapas de superficie.

Para realizar el modelo geológico, se utilizaron como unidades las lavas de la Formación La Negra, el Batolito de la Costa y cuerpos intrusivos menores, así como los principales sistemas de fallas. Para realizar el modelo mineralógico según las especies minerales más abundantes del yacimiento, se generaron cuerpos de las asociaciones siguientes: crisocola, atacamita, atacamita-crisocola y mixto (atacamita-crisocola-calcosina y menor bornita). En este trabajo los cuerpos mineralizados descritos corresponden a los volúmenes dentro de los que se identificó visualmente, a partir de los mapeos de sondajes y superficie, mineralización de cobre.

1.7 Estudios Anteriores

Desde la primera mención de Kuntz en 1928 hasta 1972 se realizó un gran número de informes inéditos sobre el yacimiento Mantos de la Luna, los cuales obtenían datos a partir de estudios geológicos de superficie, mapeos y muestreos de las pocas labores subterráneas existentes.

A partir del año 1977, las campañas de exploración geológica fueron orientadas principalmente a la cuantificación de recursos. En un principio ENAMI orientó sus esfuerzos de exploración a los sectores con mayor desarrollo en labores subterráneas. Posteriormente, entre los años 1995 a 2001, la Compañía Minera de Tocopilla S.A. realizó reconocimientos y campañas de sondajes más agresivas, descubriéndose con ello nuevos sectores mineralizados.

Rodríguez, E. (1969) en su trabajo "Geología Económica de la Mina Mantos de la Luna" identificó tres cuerpos mantiformes de atacamita, crisocola, azurita y menor calcosina secundaria y primaria. Postula la formación del yacimiento a través de soluciones ascendentes por un sistema de diaclasas de rumbo NS.

Olcay (1970) reconoce siete mantos mineralizados con oxidados de cobre y calcosina. La extensión este de la mineralización se explica mediante una concentración producto de la lixiviación de la mineralización primaria existente en el yacimiento.

Greiner (1977) propone para el yacimiento Mantos de la Luna la clasificación de “Yacimiento Secundario Oxidado” con muy poco a nulo transporte vertical.

La División de Exploraciones de la Compañía Minera Mantos de la Luna S.A. realizó el año 2002 un informe en el cual se reconoce en Mantos de la Luna a un yacimiento del tipo estratiforme irregular de origen epigenético con dos estilos de mineralización: el primero es mantiforme y de bolsonadas irregulares y el segundo corresponde a sistema de vetas de oxidados de cobre asociados a fallas de dirección noroeste.

Durante los últimos años, el yacimiento Mantos de la Luna ha sido objeto de importantes estudios que abordan distintos aspectos de la problemática de la génesis del yacimiento.

Kojima et al. (2003) concluyen sobre las etapas de mineralización del yacimiento Mantos de la Luna y otros yacimientos de la Cordillera de la Costa del Norte de Chile. Basados en la mineralogía reconocen tres eventos de mineralización: etapa hidrotermal primaria, etapa secundaria de enriquecimiento y etapa de alteración en oxidados. La mayoría de la mineralización de oxidados de cobre del yacimiento se formó producto del último evento. Asimismo concluyen que las condiciones fisicoquímicas estudiadas a partir de inclusiones fluidas sugieren la influencia de fluidos meteóricos de alta temperatura (causantes de alteración propilítica) con mezclas de salmuera de cuenca de menor temperatura.

Reich et al. (2009a y 2009b) a partir del estudio de inclusiones de iodargirita (yoduro de plata) hospedada en calcosina, sugieren la formación de aguas profundas salinas, ricas en yodo, ascendentes por procesos de bombeo tectónico involucradas en los procesos de mineralización supérgena que llevaron posteriormente a la formación de oxidados de cobre en el yacimiento Mantos de la Luna. Con apoyo de la geoquímica del Cl^{36} y las observaciones mineralógicas de la atacamita, más la correspondencia de los datos obtenidos del análisis de inclusiones fluidas con la geoquímica de aguas subterráneas, estos autores concluyen que la formación de aguas profundas es la responsable del desarrollo de la atacamita en condiciones hiperáridas como las desarrolladas en los yacimientos del Desierto de Atacama hasta nuestros días. Por último, estos autores dataron yeso entrecrecido con atacamita (serie de desequilibrio

del Uranio), obteniendo una edad de 84.000 años para la formación del yeso asociado con el oxiclورو de cobre del yacimiento.

CAPÍTULO 2 MARCO GEOLÓGICO

2.1 Geología Regional

2.1.1 Generalidades

La geología regional de la Cordillera de la Costa del norte de Chile entre los 22° 30' y los 22° latitud Sur está constituida principalmente por una secuencia de gran potencia de lavas estratificadas de la Formación La Negra (García, 1967) la cual está interrumpida por extensos cuerpos intrusivos pertenecientes al Batolito de la Costa. Sobreyaciendo a la Formación La Negra hacia el litoral costero y en una franja paralela al mismo, se encuentran una serie de depósitos sedimentarios coluviales y aluviales no consolidados. Hacia el oriente de la Cordillera de la Costa, una serie de sedimentos aluviales se disponen sobre las lavas de la Formación La Negra.

2.1.2 Mesozoico

La Formación La Negra definida por García en el sector Quebrada La Negra al sur de la ciudad de Antofagasta (1967) corresponde a una serie de coladas de lavas andesíticas y en menor medida basálticas, porfídicas y afaníticas con intercalaciones de niveles de brechas y tobas, así como de areniscas y conglomerados volcánicos y de areniscas, lutitas y calizas con fósiles marinos hacia la base, las cuales afloran a lo largo de la Cordillera de la Costa entre Arica y Chañaral (Figura 2.1.). Las rocas ocurren estratificadas en capas gruesas y homoclinales, con rumbos cercanos a NS y manteos de 20° a 35° al E. La potencia de la secuencia de lavas es variable, estimado por García (1967) en un máximo de 10.000 m en la quebrada La Negra al SE de la ciudad de Antofagasta. A la latitud de la ciudad de Tocopilla, se ha estimado una potencia de 3.800 m (Maksaev y Marinovic, 1980):

Las coladas de lava se caracterizan por poseer porciones hacia el techo y la base brechizadas, mientras que la sección medial se presenta masiva (tipo lavas 'aa') (Boric et al., 1990). Se observa también el desarrollo de vesículas que aumentan de cantidad hacia el techo de cada colada (Greiner, 1982).

Las rocas de la Formación La Negra están intruídas por varios diques, filones-manto y pequeños stocks subvolcánicos, de composición basáltica, andesítica, diorítica y gábrica (Boric et al., 1990).

De acuerdo a su posición estratigráfica y contenido fosilífero en sus intercalaciones calcáreas (amonites), se asigna a la Formación La Negra una edad entre el Sinemuriano y Kimerigdiano (Bobenrieth, 1980; Makshev y Marinovic, 1980; Naranjo y Puig, 1984). Apoyan lo anterior las dataciones radiométricas de Rogers y Hawkesworth (1989) quienes obtuvieron edades Rb-Sr en roca total de 186.5 ± 13.6 Ma en lavas del sector sur de Tocopilla ($22^{\circ}21,1'S$ y $70^{\circ}15,3'W$) y estudios de Oliveros et al. (2004) quienes obtuvieron edades $^{40}Ar/^{39}Ar$ en plagioclasas de 161.6 ± 1.2 Ma (muestra en $22^{\circ}20,7'S$ $70^{\circ}14,8'W$) y de 164.9 ± 1.7 Ma (muestra en $22^{\circ}08,7'S$ y $70^{\circ}13,1'W$).

Sobre la interpretación geotectónica de estas rocas, en base a sus características geoquímicas, Palacios (1978) postula la existencia de un arco de islas, mientras que Rogers (1985) postula la existencia de un arco magmático de borde continental.

El Batolito de la Costa corresponde a un grupo de complejos plutónicos, principalmente gabros, dioritas, granodioritas y escasas tonalitas y granitos que intruyen a las secuencias volcánicas del Jurásico de la Formación La Negra (Figura 2.1.). Por lo general la textura de los intrusivos es fanerítica de grano medio a fino. Los minerales máficos de estas rocas corresponden a hornblenda, biotita y/o piroxeno. Los intrusivos están cortados por numerosos diques y filones en toda su extensión (Boric et al., 1990; Greiner, 1982).

Dataciones radiométricas en rocas del Batolito de la Costa entre los paralelos 22° y $22^{\circ} 30'$ permiten asignar edades Rb-Sr (roca total) de 154.7 ± 13.4 Ma (muestra en $22^{\circ}04,5'S$ y $70^{\circ}07,5'W$) y 158.3 ± 5.8 Ma (muestra en $22^{\circ}27,5'S$ y $70^{\circ}14,5'W$) (Rogers y Hawkesworth, 1989) y edades $^{40}Ar/^{39}Ar$ en Biotita de 159.9 ± 0.7 Ma (muestra en $22^{\circ}40'S$ y $70^{\circ}10'W$ aproximadamente) y 158.8 ± 0.7 Ma (muestra en $22^{\circ}28'S$ y $70^{\circ}14'W$ aproximadamente) (Makshev, 1988).

Geoquímicamente, estos intrusivos son granitoides tipo 'I' (Boric et al., 1990) y de carácter calcoalcalino (Palacios, 1978; Rogers, 1985). Según Boric et al. (1990) estas evidencias apuntan a escasa contaminación cortical y plutonismo asociado a un margen convergente.

2.1.3 Cenozoico

A lo largo de una estrecha franja NS adyacente al litoral costero de Chile entre los 22°30'S y los 22°S se observa una secuencia de rocas sedimentarias marinas aterrazadas que Ferraris y Di Biase (1978) denominaron Formación Mejillones. En base a la presencia de bivalvos y gastrópodos, se asigna a la Formación Mejillones una edad pleistocena a holocena (Herm, 1969).

Depósitos aluviales semiconsolidados de color rojizo, mal seleccionados, constituidos por gravas, arenas y arcillas, se disponen en sectores bien acotados hacia el oeste del escarpe costero y en amplias zonas al oriente del mismo, sobreyaciendo en discordancia angular a las rocas de la Formación La Negra y en no-conformidad con respecto a intrusivos del Batolito de la Costa (Unidad Informal Aluvios Antiguos, ver Figura 2.1.). Estas relaciones de contacto permiten asignar a estas unidades una edad mínima Pleistocena.

Depósitos aluviales y fluviales de gravas polimícticas de edad holocena rellenan depresiones y quebradas, encajonándose en quebradas formadas en los depósitos aluviales más antiguos (Unidad Informal Aluvios Modernos, ver Figura 2.1.).

El principal rasgo geomorfológico de la zona, el escarpe costero, es resultado de la abrasión marina del margen continental alzado desde el Plioceno (Hartley y Jolley, 1995; Niemeyer et al. 1996).

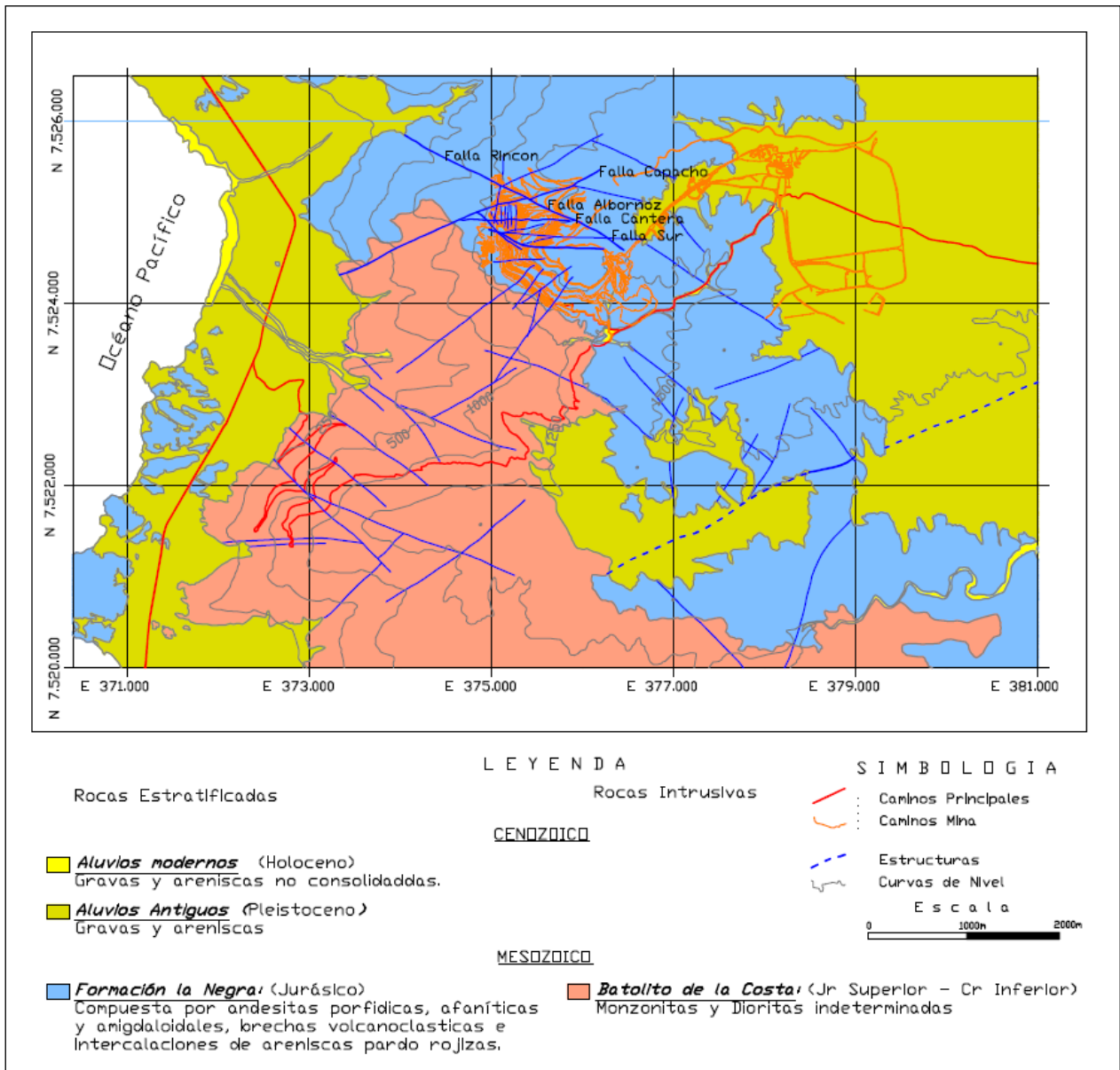


Figura 2.1. Mapa Geológico Regional. (Tomado y modificado de Mapa Geológico Regional elaborado por Geología de Exploraciones, Compañía Minera Mantos de la Luna S.A.).

2.2 Marco Estructural

El principal sistema estructural que controla la deformación de las rocas en la Cordillera de la Costa del Norte de Chile corresponde al Sistema de Fallas de Atacama (SFA) (Ver Figura 2.2). El SFA está constituido por fallas subparalelas de rumbo aproximado NS y manteos subverticales. El SFA ha sido dividido en tres segmentos curvos, cóncavos hacia el W los cuales de norte a sur son: Salar del Carmen, Paposo y El Salado-Vallenar (Charrier et al, 2007).

El segmento Salar del Carmen se extiende desde Antofagasta hasta Iquique, donde presenta entre los 22°00'S y 22°30'S tres ramas principales de orientación NS, acompañadas de un patrón de fallas ramificadas de orientación NE a NEE los cuales configuran un arreglo geométrico tipo "dúplex" transcurrente. Este grupo de fallas es el principal causante de la deformación observada a nivel regional, en la zona de estudio (Ver Figura 2.1. y 2.2.).

Scheuber y González (1999) reconocen en el segmento Salar del Carmen movimientos de rumbo sinistral con deformación frágil y dúctil durante el Jurásico Medio al Jurásico Superior temprano y reconocen eventos de régimen extensional asociados al emplazamiento de intrusivos y a la generación de fallas normales durante el Jurásico Superior Tardío.



Figura 2.2. Mapa Estructural de la Cordillera de la Costa. (Cembrano et. al, 2007).

2.3 Geología Local

El yacimiento Mantos de la Luna se emplaza principalmente en rocas volcánicas de la Formación La Negra e intrusivos menores como diques o sills.

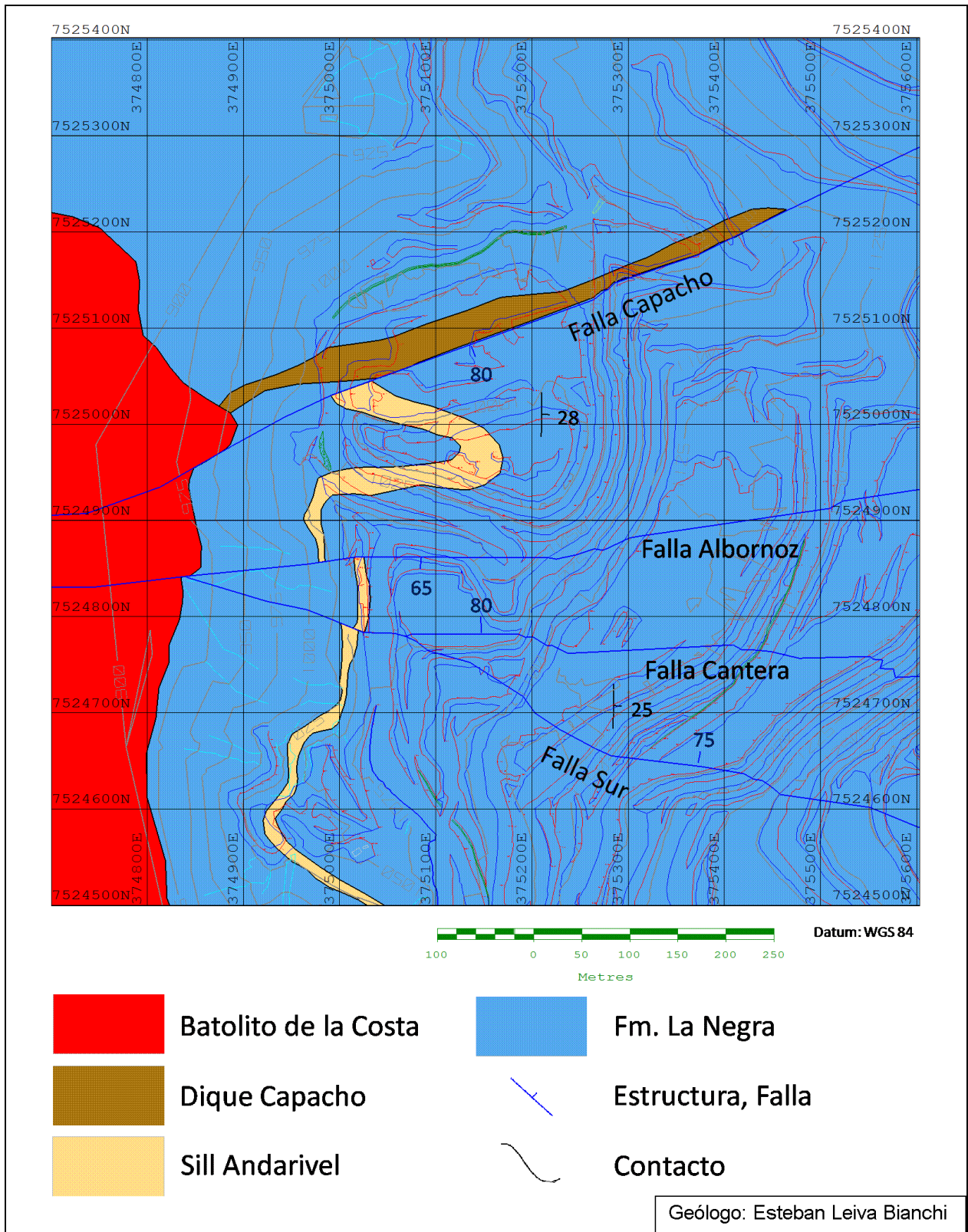


Figura 2.3. Mapa Geológico Local

2.3.1 Estructuras en el yacimiento Mantos de la Luna

En el yacimiento Mantos de la Luna se reconocen cuatro fallas principales que, de norte a sur, son: Falla Capacho, Falla Albornoz, Falla Cantera y Falla Sur (Figura 2.3.).

Falla Capacho

Corresponde a una falla de orientación N80°E con un manteo aproximado de (80-75)°S. Presenta un ancho variable de 3 a 1 m y una longitud aproximada observada de 4 km (Figura 2.4. a).

En la zona de falla se desarrolla una brecha de falla con matriz de arcillas y fragmentos de rocas volcánicas. Adyacente a la misma, es frecuente observar un vetilleo de yeso, por lo general en vetillas unidireccionales paralelas a la falla (Figura 2.4. b).

La falla Capacho tiene un rol importante en la distribución de los cuerpos de mena, cortando y desplazando a los mismos.

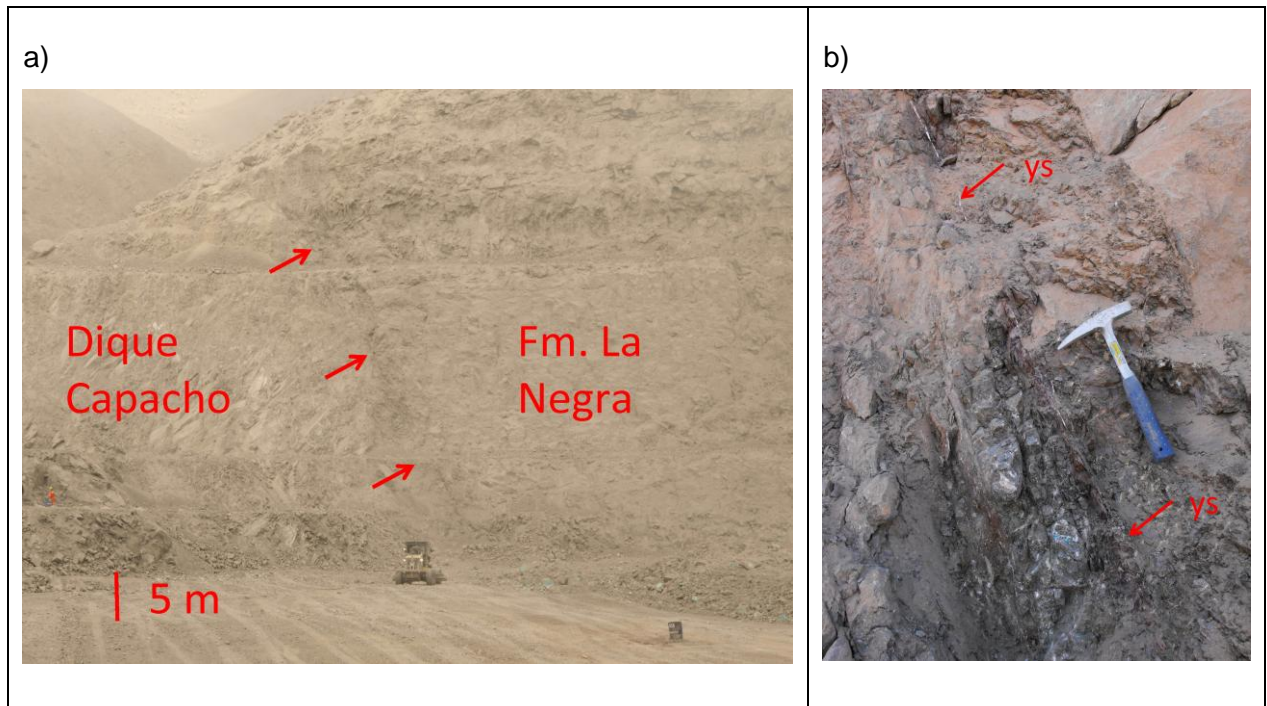


Figura 2.4. Falla Capacho. a) Vista panorámica al E de la Falla Capacho en la cual se indica las unidades litológicas de los bloques. b) En primer plano se observa la brecha de falla y vetillas de yeso unidireccionales, paralelas a la estructura principal.

Falla Albornoz

Corresponde a una falla con rumbo aproximado N65°E y manteo de 63° al S (Figura 2.5. a).

La falla presenta entre 0,8 a 4 m de espesor con desarrollo de brecha de falla con fragmentos de rocas volcánicas, cementada por arcillas blancas. En informes de exploración inéditos desarrollados durante el año 2004, se determinan movimientos trascurrentes de tipo sinistral para esta falla. Se puede determinar que efectivamente existen tales movimientos de tipo rumbo sinistral los cuales han desplazado horizontalmente en 140 m aproximadamente a los cuerpos vetiformes. No se detectan desplazamientos del tipo vertical.

Esta falla juega un rol importante en la distribución de la mineralización en donde corta y desplaza a los mantos y vetas (Figura 2.5. b). No se ha observado un desarrollo de vetillas de yeso en la falla o adyacente a la misma.

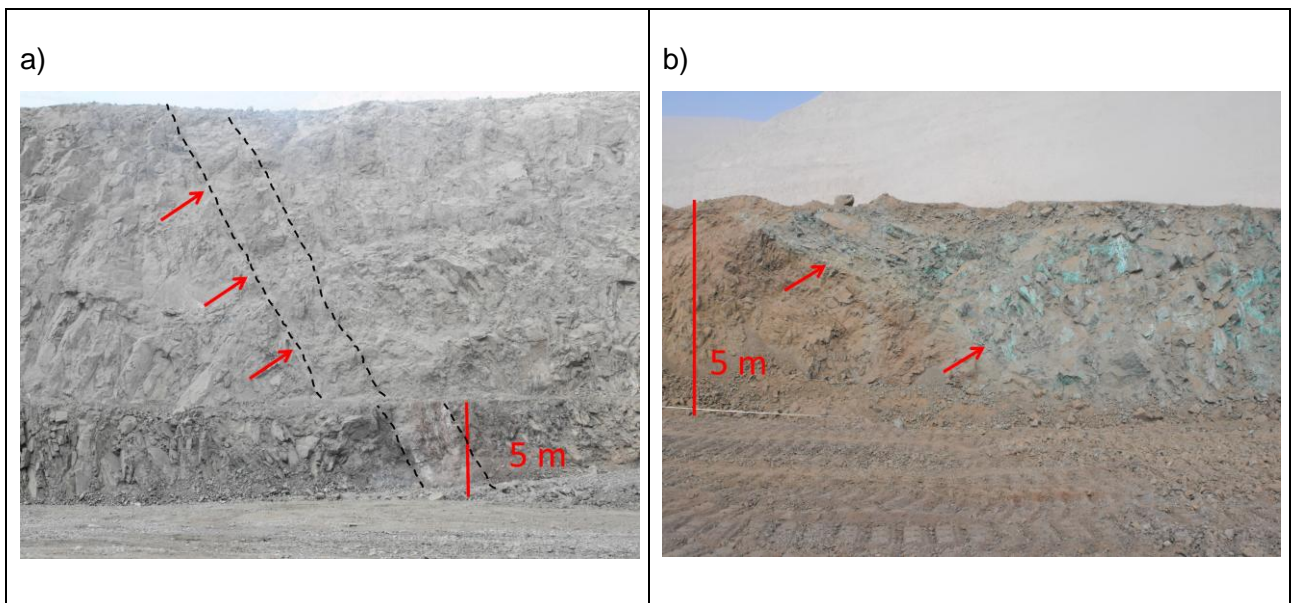


Figura 2.5. Falla Albornoz. a) Vista hacia el E. b) Vista hacia el E, cortando cuerpo de veta mineralizada.

Falla Cantera

Corresponde a una falla de rumbo variable $N(80-95)^{\circ}E$ con manteos entre los $60^{\circ}N$ y $70^{\circ}N$. Su espesor aproximado es de 4 m caracterizados por una brecha de falla con matriz de salbanda y fragmentos de rocas volcánicas (Figura 2.6. a y b), y su corrida mínima observada en superficie es de 2 km aproximadamente. La falla Cantera produce desplazamientos de tipo sinistral en los cuerpos vetiformes de aproximadamente 40 m, no detectándose en estos desplazamientos verticales.

En la zona de falla se aprecia yeso en vetillas delgadas y pátinas, las cuales en abundancia no superan el 2% de la roca total, según estimaciones visuales.

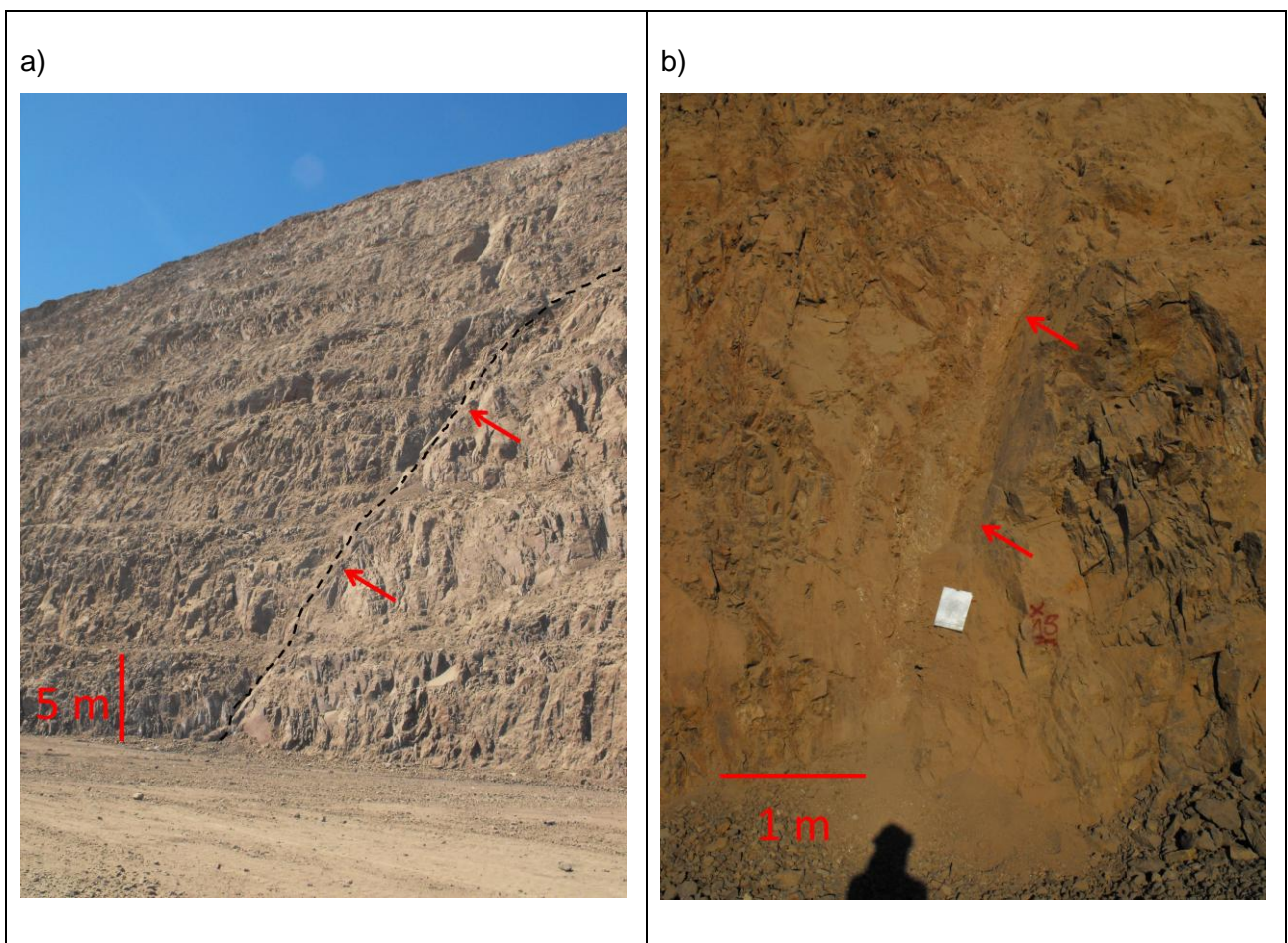


Figura 2.6. Falla Cantera. a) Vista Panorámica al E. b) Vista en primer plano.

Falla Sur

Corresponde a una falla con traza reconocida de 3 km, rumbo variable N(70-90)°W y manteos de 70° a 85° NNW. Al este, la falla presenta un rumbo EW pero en la coordenada 375.200E empieza a cambiar paulatinamente a un rumbo N70°W. Su espesor observado varía entre 3 a 5 m de brecha de falla con matriz de salbanda, arcillas blancas y fragmentos de rocas volcánicas (Figura 2.7. a y b).

A partir de la dislocación de los cuerpos vetiformes, se verifican movimientos recientes tipo sinistral en esta falla.

En algunos sectores adyacentes a la zona de falla, se ha observado yeso en vetillas asociada por lo general a mineralización de mena, en particular atacamita.

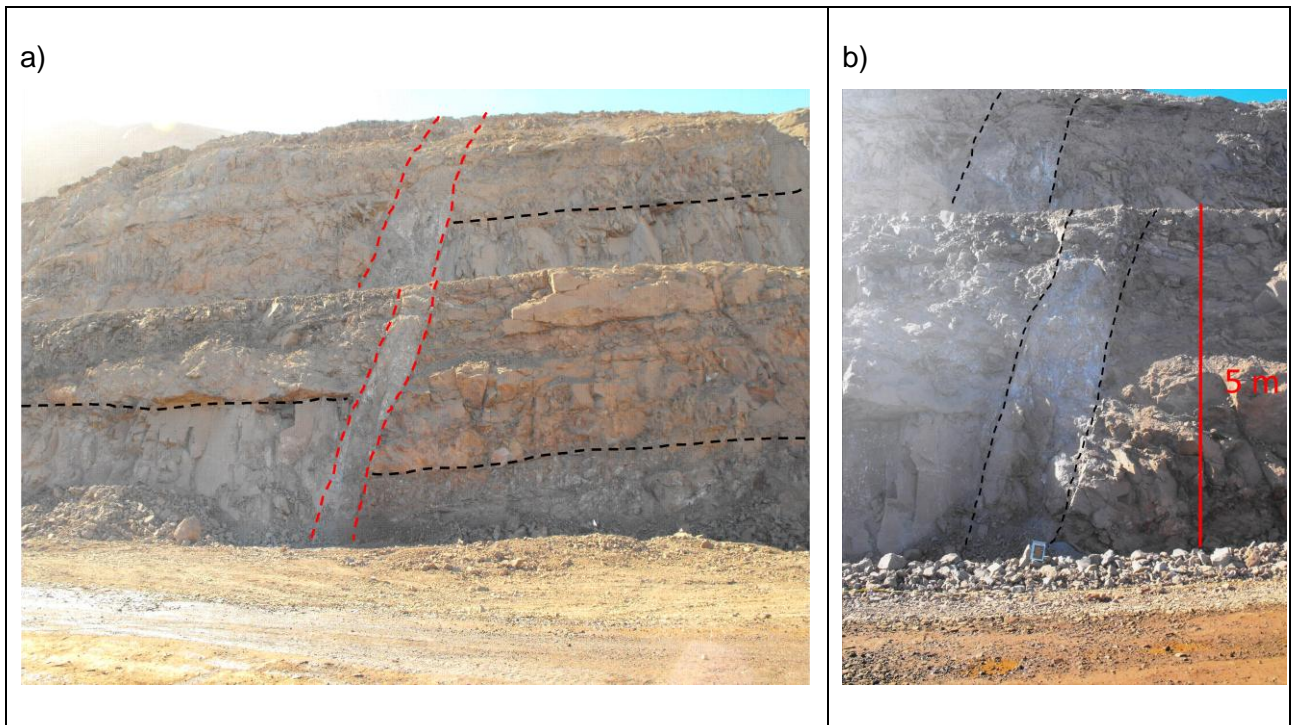


Figura 2.7. Falla Sur. a) Vista Panorámica al E. b) Vista en acercamiento.

2.3.2 Geología Local

El yacimiento cuprífero Mantos de la Luna pertenece a la serie de depósitos estratoligados de la Franja Metalogénica de la Cordillera de la Costa del Norte de Chile (Boric et al., 1990). Presenta reservas medidas de 40,5 Mton de 1,39% Cu (ley de corte 0,35%) más reservas inferidas de 6 Mton con 1,4% Cu (Maksaev et al., 2007).

2.3.2.1 Rocas de la Formación La Negra

Las rocas representantes de la Formación La Negra en el sector de estudio son esencialmente lavas andesíticas de color rojo oscuro a pardo en su masa fundamental, las cuales presentan variaciones texturales en diversos niveles. La orientación de los estratos es de rumbo aproximado NS y manteo entre 30° a 25° E.

Con las distintas campañas de exploraciones y de producción realizadas en el yacimiento, se han reconocido varios tipos litológicos en las lavas andesíticas. Los tipos litológicos se pueden encontrar dentro de un mismo estrato y se producen como consecuencia del flujo diferenciado que se observa dentro de una colada de lava. Hacia la base de la colada se transportan algunos fragmentos de la colada subyacente formándose una brecha andesítica. El interior de la colada, que es menos viscoso, forma una roca andesítica afanítica o porfídica. Hacia el techo se forman vesículas producto de la liberación de volátiles y, a medida que se llega al techo, la lava se enfría y solidifica en bloques los cuales son fragmentos constituyentes de otras brechas andesíticas.

La distinción en tipos litológicos tiene como objetivo distinguir aquellas rocas que por sus condiciones de permeabilidad son más propensas a interactuar con soluciones mineralizadoras y, por ende, albergar mineralización metálica de cobre. Son, por lo tanto, consideraciones útiles en la minería de producción y prospección geológica del yacimiento.

Andesita Afanítica

Corresponden a rocas volcánicas andesíticas, con desarrollo de cristales de plagioclasas no mayores a 1 mm en tamaño. De las rocas volcánicas distribuidas en la zona de estudio, la menor parte de ellas está asociada a este tipo (menor al 5% de las rocas observadas).

Esta roca raramente presenta minerales de alteración y oxidados de cobre, debido principalmente al escaso desarrollo de estructuras que permitan el ingreso de soluciones ricas en cobre. Las ocurrencias de la mineralización oxidada de cobre albergada por esta unidad, cuando existen, corresponden principalmente a vetillas o pátinas de mineral, las cuales son resultado indirecto de la impregnación de fracturas.

Los minerales de alteración predominantes en este tipo de rocas son clorita, epidota y hematita, las cuales están diseminadas en la matriz. Además estas rocas pueden presentar yeso en vetillas y pátinas, y arcillas blancas y limonita en pátinas.

Brecha Andesítica

Corresponden a rocas volcánicas andesíticas con bloques de la misma composición. Estas rocas se caracterizan por tener una masa de mineralogía y textura obliterada acompañada de fragmentos escasamente alterados de andesitas (Figura 2.8. a y b). Por lo general estas rocas presentan alteración selectiva y penetrativa de hematita y clorita en la masa fundamental, así como limonita y arcillas, Las brechas pueden contener parte de la mineralización de mena en pátinas, vetillas o bien en cavidades irregulares (Figura 2.8. a y b).

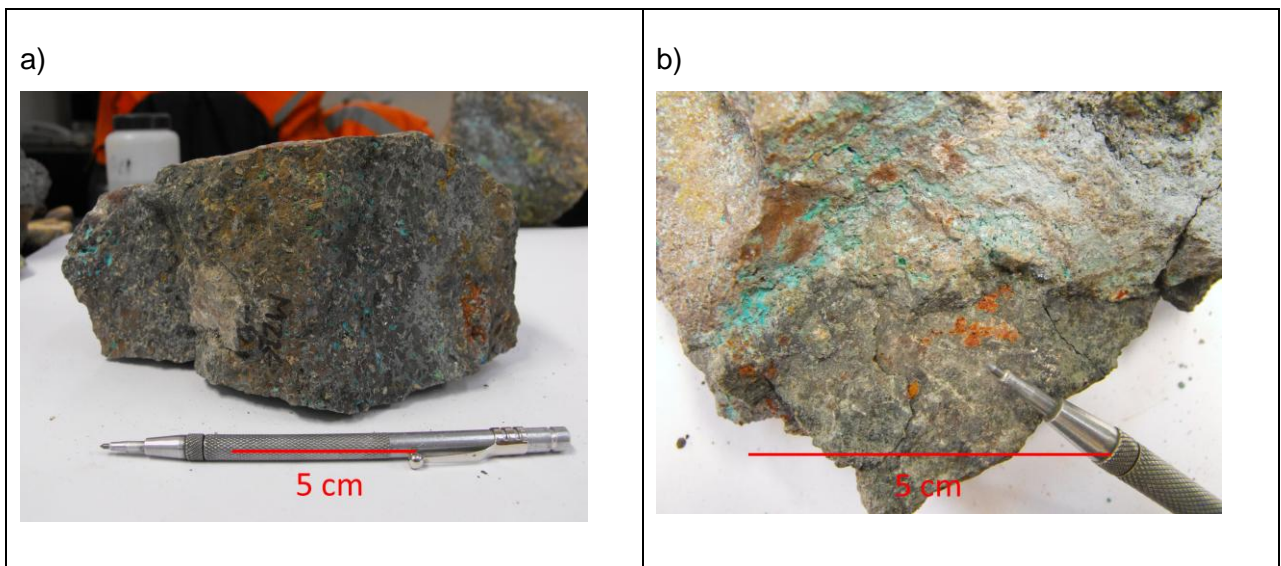


Figura 2.8. Brecha Andesítica. a) Brecha andesítica con escasa mineralización oxidada de cobre; b) Brecha andesítica y crisocola como relleno de vesículas irregulares.

Andesita Porfídica

Corresponden a rocas volcánicas andesíticas con desarrollo de cristales tabulares de plagioclasas mayores a 1 mm. En varios niveles, el tamaño de los cristales de plagioclasas es mayor a 5 mm y en algunos casos llegan a alcanzar 15 mm. Macroscópicamente esta unidad presenta color rojo oscuro producto de la alteración diseminada que presenta en la matriz, compuesta principalmente por hematita (visualmente un 20% de los minerales), clorita (10%), y epidota (10%). Asimismo se observan vetillas de cuarzo (visual aproximado 10%), calcita (10%) y yeso (5%). Microscópicamente presenta sericita y albita diseminada en fenocristales; hematita y clorita diseminada en la masa fundamental; clorita y epidota en halo y cuarzo, calcita y hematita en relleno de vetillas.

La mineralización oxidada de cobre que se observa en estas rocas corresponde principalmente a vetillas y pátinas. En algunas ocasiones se puede observar el desarrollo de cavidades irregulares rellenas por lo general de limonitas y menor cantidad de oxidados de cobre.

Andesita Porfídica Amigdaloidal

Este grupo reúne a las andesitas porfídicas que se caracterizan por la presencia de amígdalas (Figura 2.8. a y b). Por lo general, las vesículas sobrepasan los 10 mm de tamaño y se encuentran rellenas por cuarzo, calcita, hematita, clorita, epidota y oxidados de cobre (Figura 2.9. a y b). Las amígdalas tienen formas regulares esferoidales e elipsoidales y también se observan con formas irregulares. Cuando son regulares elipsoidales, el eje mayor de las amígdalas está orientado preferentemente en una dirección común, la cual coincide con la dirección del flujo volcánico. Macroscópicamente estas rocas presentan color rojo oscuro a café parduzco producto de la alteración de hematita (15%) y clorita (10%) que se puede hallar diseminada en la matriz. En las amígdalas se halla calcita, cuarzo, hematita y clorita (el yeso está ausente en las amígdalas). Puede presentar un vetilleo similar en mineralogía al observado en las andesitas porfídicas. Microscópicamente se observa que la masa fundamental tiene hematita y clorita diseminada, que los fenocristales presentan sericita diseminada y que las vesículas están rellenas de clorita, epidota, cuarzo, calcita y hematita.

Estas rocas albergan la mayor parte de la mineralización de cobre, la cual se da a menudo dentro de las mismas amígdalas en forma de crisocola y atacamita formando mantos

de gran extensión (Figura 2.8. b). Esto se debe a la alta permeabilidad de la roca frente a soluciones supérgenas, la cual permite la precipitación de gran cantidad de especies minerales oxidadas de cobre. En las periferias a los cuerpos vetiformes principales, la andesita porfídica amigdaloidal se presenta con un vetilleo intenso de yeso y vetilleo menos intenso de otros minerales de alteración como cuarzo, calcita, hematita. Los minerales de alteración están asociados a menudo a la mineralización de mena.

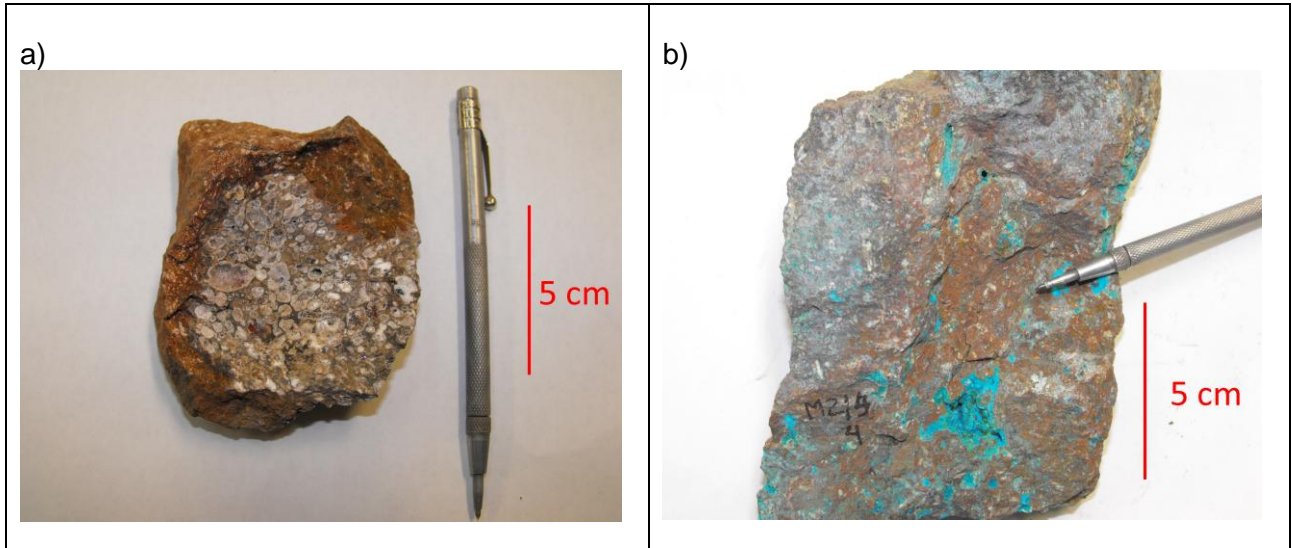


Figura 2.9. Andesita porfídica amigdaloidal. a) Sin mineralización en oxidados de cobre; b) Con mineralización en oxidados de cobre (crisocola y atacamita).

2.3.2.2 Unidades Intrusivas

Batolito de la Costa

Con esta denominación se alude a los intrusivos que se ubican al oeste de la zona de estudio (Figura 2.3.). Su composición principal es granodiorítica, con leves variaciones locales de dioritas a monzodioritas. Por su extensión, ubicación y litología, estos cuerpos intrusivos se pueden relacionar a la Unidad del Batolito Costero (Parada et al., 2007).

El Batolito de la Costa intruye a las rocas de la Formación La Negra. A partir del análisis de perfiles geológicos y descripción de sondajes en el área de estudio se puede señalar que estas últimas constituyen un bloque colgante (Figuras 3.1., 3.2., 3.3. y 3.4).

Diques granodioríticos

Son cuerpos intrusivos granodioríticos de color pardo rojizo, con orientaciones entre los N60°E y N10°W y manteos que varían de los 55°E a subverticales. En la parte norte del yacimiento se encuentra el denominado dique Capacho (Figura 2.3.), el cual corresponde a un cuerpo granodiorítico de 20 m de espesor y corrida reconocida mínima de 2 km. Por lo general este dique alberga trazas de mineralización oxidada de cobre en vetillas y disseminaciones y trazas de sulfuros de hierro en disseminaciones. Esta mineralización raramente logra superar el 0,35% de ley de corte.

En el halo de contacto del dique capacho se preservan zonas poco extensas y aisladas de mineralización hipógena, compuestas principalmente de pirita, calcopirita y bornita.

Diques dioríticos

Se denominan así a un grupo de cuerpos intrusivos dioríticos de espesores que varían entre los 1 y 3 m. Tienen orientación preferencial de rumbo NS con manteos entre los 75° y 80°W. Albergan parte de la mineralización de cobre, comúnmente en vetillas y pátinas de oxidados.

Sill Andarivel

Cuerpo intrusivo diorítico, de color rosado a pardo producto de la alteración supérgena (limonitas), concordante a levemente discordante con la estratificación. Posee rumbo N15°W a N15°E y manteo aproximado 30°E. Su espesor medido es aproximadamente 10 m (Figura 2.3.).

Dentro del sill, se desarrolla mineralización oxidada de cobre en forma de vetillas y disseminaciones. Adyacente a este cuerpo y hacia niveles profundos, se ha podido identificar mineralización primaria de cobre de pobre desarrollo, constituida por pirita, calcopirita y bornita en vetillas y disseminaciones, relacionadas genéticamente al desarrollo de intrusivos menores granodioríticos y dioríticos del sector de estudio.

2.3.2.3 Mineralización

Por la geometría de los cuerpos mineralizados, Mantos de la Luna se considera un yacimiento de cuerpos vetiformes, mantiformes y bolsonadas de cobre. Las vetas son cuatro

cuerpos tabulares subparalelos de orientación general N35°W a NS (dependiendo del sector), subverticales y corresponden a los cuerpos de mayor ley del yacimiento (valores superiores al 0,8% ley de cobre total) presentando crisocola, atacamita y menor calcosina. La corrida reconocida en superficie de las vetas es variable, presentando un máximo superior a los 600 m. Sus espesores varían entre los 10 y 25 m y sus longitudes verticales pueden alcanzar los 190 m. Los mantos son cuerpos tabulares concordantes a la estratificación (N10°E/30°E) con espesores variables entre los 10 y 25 m que están compuestos (en orden de abundancia) con crisocola y atacamita. Las bolsonadas se emplazan en zonas altamente permeables, en general en las andesitas porfídicas amigdaloidales o zonas de fracturamiento intenso.

La mineralización metálica del yacimiento Mantos de la Luna está conformada principalmente por mineralización de origen supérgeno como crisocola, atacamita y calcosina; y de origen hipógeno como bornita, calcopirita, pirita, hematita, especularita y trazas de magnetita. Estos minerales se encuentran en vetillas, amígdalas y disseminaciones. Por la abundancia y características de las especies minerales, este yacimiento es considerado principalmente de oxidados de cobre con un gran desarrollo de la mineralización supérgena (crisocola, atacamita, calcosina) y con escaso desarrollo de un perfil de mineralización hipógena, la cual se halla restringida a los niveles más profundos del yacimiento (bornita, calcopirita, pirita).

Sobre el origen del yacimiento Mantos de la Luna, la hipótesis más aceptada es un origen hidrotermal epigenético (Definis y Bello, 2000).

2.3.2.4 Alteración

Los principales minerales de alteración presentes en el yacimiento corresponden a alteración hipógena consistente en cuarzo, feldespatos, albita, sericita, carbonatos (calcita y menor siderita), hematita, magnetita, clorita y epidota; y alteración supérgena consistente en yeso, arcillas y limonita.

El cuarzo se encuentra por lo general en vetillas rectas e irregulares no mayores a 4 mm de espesor, en amígdalas y cavidades irregulares y, muy ocasionalmente, en vetas mayores a los 5 cm. Se observa como una masa criptocristalina amorfa (ópalo) y como cristales euhedrales a subhedrales. En distintas partes del yacimiento, es posible encontrarlo formando

cristales alargados en las vetas. Se puede observar frecuentemente asociada a carbonatos, hematita o en ambas a la vez.

Los feldespatos se encuentran generalmente como una masa cristalina de color rosado, dispersa en la matriz. Tienen distribución acotada en el yacimiento, preferente en torno a cuerpos localizados con mineralización hipógena, principalmente bornita.

La albita y la sericita se pueden ver a nivel microscópico, alterando plagioclasas de las rocas volcánicas en un porcentaje promedio no mayor al 20% roca total. Cercano a los cuerpos vetiformes, se observan algunas zonas en que esta alteración es muy intensa, estimándose una abundancia visual del 40% total roca.

Entre los carbonatos se cuenta principalmente la calcita. Esta se presenta en vetillas irregulares y en amígdalas, con un hábito cristalino característico en ambas ocurrencias. Otro carbonato muy poco frecuente es la siderita la cual se encuentra en las vetas asociada a cuarzo con un hábito cristalino.

La hematita se presenta como alteración penetrativa en las lavas. Principalmente está diseminada en la masa fundamental de las rocas volcánicas. Es común distinguir en las andesitas un color rojo en la masa fundamental y los cristales producto de esta forma de alteración. También la hematita suele presentarse en vetillas irregulares o rectas, pátinas y amígdalas con un hábito masivo. Es muy poco frecuente observarla en hábito cristalino. En las vetillas y/o amígdalas se encuentra muchas veces asociada a cuarzo.

La magnetita se encuentra frecuentemente diseminada en diques y sills, así en parte de las rocas encajantes, aumentando la susceptibilidad magnética de las rocas.

La clorita se encuentra generalmente diseminada en la masa fundamental de las rocas volcánicas y, ocasionalmente, en los bordes de amígdalas y halo de vetillas. Se reconoce en la masa fundamental por teñir a las rocas de una tonalidad verde oscura. Se observa en algunas vetillas y amígdalas un halo compuesto de clorita diseminada de un color verde intenso y raya blanca.

La epidota se encuentra como cúmulos de cristales diseminados en la matriz. En la mayor parte de los casos observados está asociada a clorita diseminada en la masa fundamental.

El yeso se presenta relleno de grietas o fracturas abiertas. Presenta un hábito cristalino y su diafanidad permite conservar muy bien la apariencia de los cristales de atacamita y crisocola cuando estas especies están presentes.

La arcilla y la limonita están ampliamente distribuidas en el yacimiento. Sin embargo, sectores acotados del yacimiento presentan porcentajes mayores al 10% modal de arcillas que corresponden a zonas de fracturamiento intenso y fallas, y mayores al 10% modal de limonitas en rocas con gran desarrollo de cavidades irregulares y escasa presencia de minerales de cobre, interpretados como zonas de lixiviación de minerales sulfurados de cobre. Los minerales de arcilla no han podido ser identificados.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZACIÓN LITOLÓGICA Y ESTRUCTURAL DE LOS SECTORES ESTUDIADOS

Las fallas principales que se distinguen en el yacimiento Mantos de la Luna determinan tres bloques que contienen los cuerpos de mena del yacimiento. Estos bloques se llaman Bloque Norte o Capacho, Bloque Central y Bloque Sur, los cuales están separados entre sí por las fallas Albornoz y Sur (Figura 3.1.). El Bloque Norte y el Bloque Central albergan cuerpos con minerales oxidados de cobre importantes económicamente debido a que se encuentran actualmente en explotación, mientras que el Bloque Sur alberga algunos cuerpos que se encuentran en la etapa de exploración.

Este capítulo establece las litologías existentes, las estructuras principales, las asociaciones de alteración y las especies oxidadas de cobre existentes para cada bloque en estudio. Las disposiciones y dimensiones de los cuerpos mineralizados se especifican en el Capítulo 5.

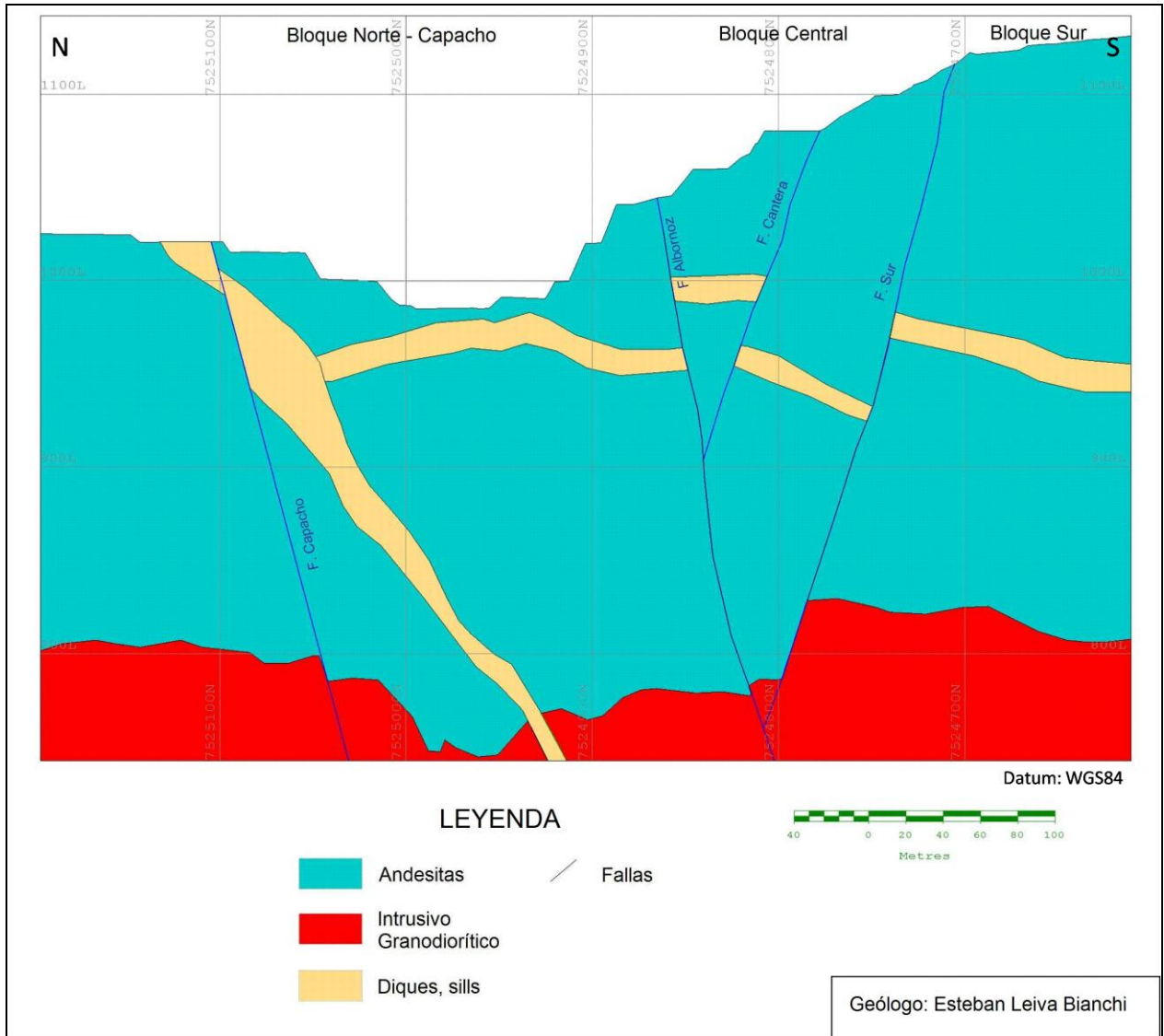


Figura 3.1. Sección Geológica E375.200

3.1 Bloque Norte o Capacho

3.1.1 Litología y estructuras

Los tipos de roca que abundan en este sector corresponden en orden de abundancia, a la andesita porfídica y andesita porfídica amigdaloidal. Las rocas volcánicas están sobre el Batolito de la Costa, configurando un “roof pendant”. Además se reconocen dos cuerpos intrusivos de composición granodiorítica y masa fundamental microgranular, que corresponden a los

denominados Dique Capacho y Sill Andarivel, y algunos diques dioríticos menores de orientación NS (Figura 3.2.).

Las principales estructuras que se reconocen en el sector son la Falla Capacho, de rumbo aproximado N80°E y manteo 65°S, y la Falla Albornoz, de rumbo aproximado N65°E y manteo de 63°S, la cual delimita al bloque Norte por el sur.

3.1.2 Mineralización y Alteración

En este sector, los cuerpos mineralizados de cobre corresponden a cuerpos vetiformes, mantiformes y bolsonadas.

La mineralización está contenida en las rocas del tipo andesita porfídica amigdaloidal, presentándose en amígdalas y vetillas, y también en las andesitas porfídicas y los cuerpos intrusivos como vetillas y/o relleno de cavidades irregulares.

En este sector se observa tanto mineralización en oxidados como en sulfurados de cobre. Los oxidados de cobre en orden de abundancia corresponden a crisocola y atacamita. En el nivel 1.000 m.s.n.m. aproximadamente, se puede observar una mineralización menor de sulfurados de cobre y hierro entre los que se destacan la pirita, la calcopirita, la bornita y la calcosina.

La alteración principal en el sector corresponde a cuarzo-albita-calcita-hematita-clorita-epidota. En el sector abunda la hematita diseminada, en vetillas y amígdalas. El cuarzo y la calcita se presentan en amígdalas, vetillas y rellenando cavidades irregulares. La pirita se presenta por lo general diseminada y en pequeños cúmulos. La albita se observa en cantidades traza en las rocas volcánicas, sin embargo cerca de los intrusivos menores se distinguen zonas en que la albitización es más intensa.

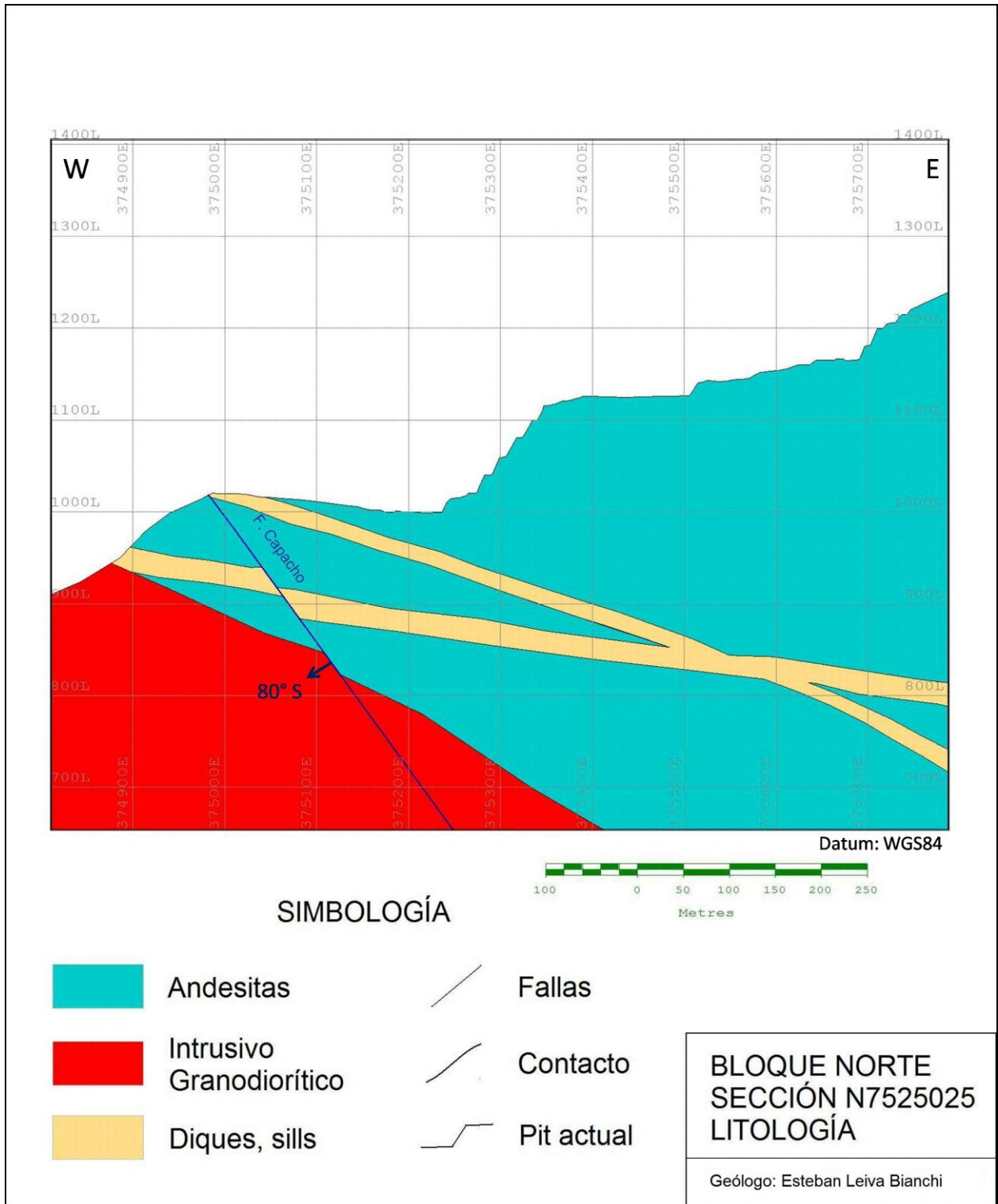


Figura 3.2. Sección Geológica Bloque Norte

3.2 Bloque Central

3.2.1 Litología y estructuras

En este sector se reconocen principalmente la andesita porfídica y andesita porfídica amigdaloidal. Las andesitas porfídicas presentan por lo general cristales entre los 5 mm hasta los 15 mm de plagioclasas acompañadas ocasionalmente de cristales de 1 mm de anfíbolos. Las andesitas porfídicas amigdaloidales presentan por lo general una composición mineral consistente en plagioclasas, cuarzo y feldespato similar a las de las andesitas porfídicas, presentando a menudo cristales de 1 a 5 mm de plagioclasas. Su rasgo característico son las amígdalas que pueden presentar bordes curvos e irregulares con tamaños entre los 2 y los 10 mm, llegando algunas veces a sobrepasar los 15 mm. Están compuestas de cuarzo, calcita, hematita y, en algunos casos, limonitas, yeso, crisocola, atacamita y calcosina.

Cortando a las rocas andesíticas del bloque central se encuentra el sill Andarivel e intruyendo por debajo de las mismas se observa el Batolito de la Costa (Figura 3.3.)

Estructuralmente el sector comprende dos grandes fallas que delimitan el bloque por el norte y por el sur las cuales son la Falla Sur y la Falla Albornoz. Este bloque se encuentra cortado también por la Falla Cantera (Figura 3.3.)

3.2.2 Mineralización y alteración

En este sector, los cuerpos mineralizados de cobre corresponden a cuerpos vetiformes y mantiformes.

Las rocas que contienen la mineralización oxidada corresponden a las andesitas porfídica amigdaloidal y la andesita porfídica, mostrando la primera de ellas una mayor cantidad de mineralización oxidada de cobre.

Los oxidados de cobre principales en orden de abundancia son la crisocola y la atacamita. En las andesitas porfídicas se presentan generalmente en vetillas irregulares y rectas, junto a cuarzo, calcita y hematita. Asimismo se puede observar la presencia de minerales sulfurados de cobre calcosina en asociación con crisocola principalmente en amígdalas, donde la calcosina ocupa el núcleo de estas.

La crisocola presenta casi siempre colores verdes azulados, sin embargo en las amígdalas se aprecia ocasionalmente una zonación ya sea variando de color verde azulado por fuera a verde claro por dentro, o bien la amígdala corresponde exclusivamente de crisocola de color verde claro.

Cercana por lo general al cuerpo vetiforme y cortando a la anterior asociación, existe un grupo de vetillas de yeso asociadas a atacamita y crisocola.

La alteración principal corresponde a cuarzo, albita, calcita y hematita, alteración hipógena reconocida por Kojima et al. (2003). En las vetillas se observa la presencia exclusiva de yeso y arcillas, mientras que en las amígdalas y vetillas se observan limonitas, todos estos minerales de proveniencia supérgena.

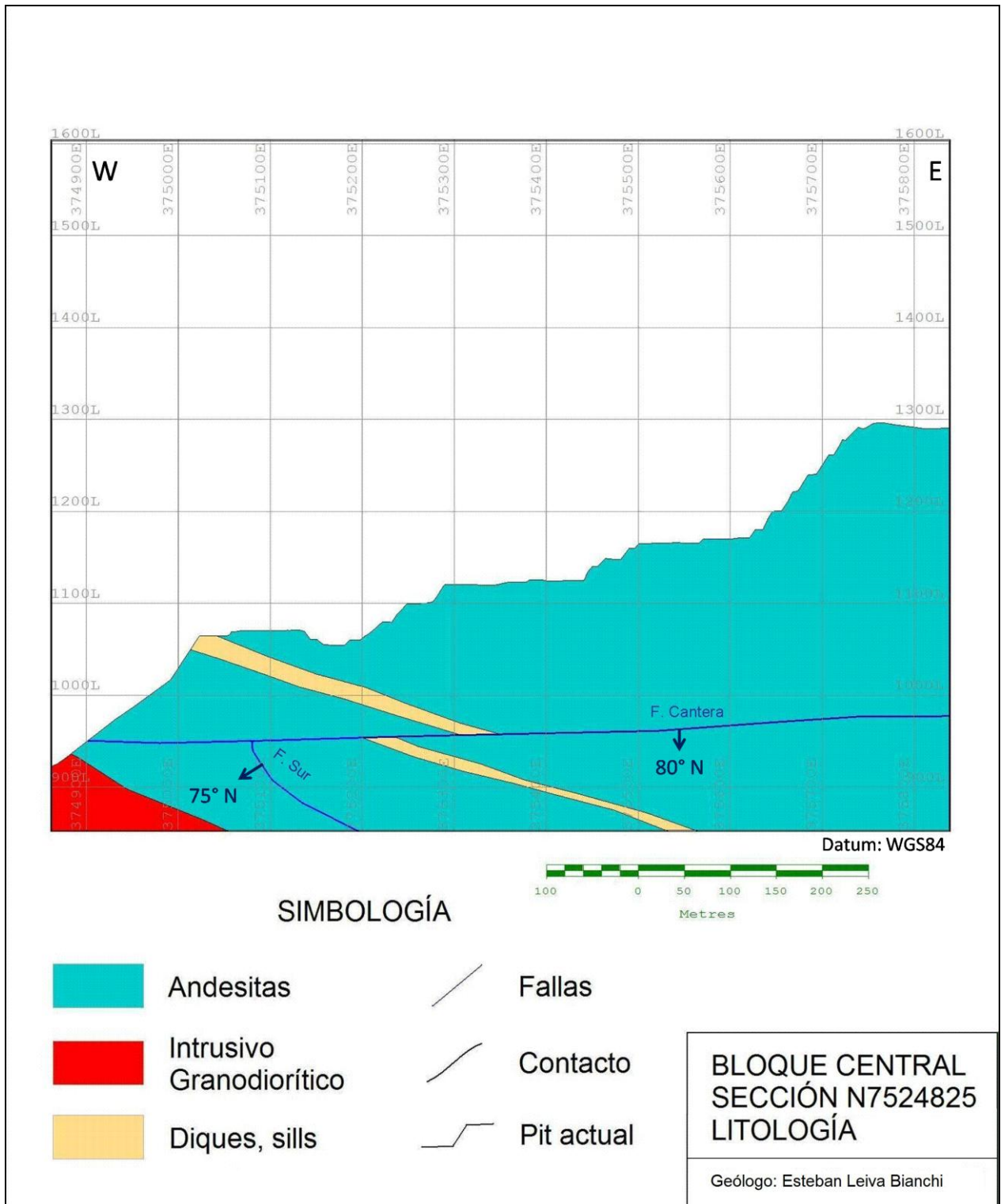


Figura 3.3. Sección Geológica Bloque Central

3.3 Bloque Sur

3.3.1 Litología y estructuras

La roca que más abunda en el bloque sur es la andesita porfídica seguida de la andesita porfídica amigdaloidal (relación aproximada de un 60% y un 30% respectivamente). Las rocas volcánicas en este sector, al igual que en el norte, configuran un “roof pendant”. Se aprecia un cuerpo intrusivo subconcordante a la estratificación el cual es identificado con el Sill Andarivel.

La estructura más importante del Bloque Sur corresponde a la Falla Sur que limita al bloque por el norte. Una segunda estructura limita al Bloque Sur por el sur llamada Falla Sur-Sur, la cual se encuentra fuera del área de estudio de este informe.

3.3.2 Mineralización y Alteración

Los cuerpos mineralizados encontrados por las campañas de sondajes se interpretan principalmente como dos cuerpos vetiformes y un manto. El manto reconocido coincide con un nivel donde abundan las andesitas amigdaloidales. La mineralización oxidada de cobre corresponde principalmente a crisocola y atacamita, los cuales están en amígdalas y vetillas.

La alteración corresponde principalmente a cuarzo, calcita, clorita, hematita y menor epidota. También se observa yeso en vetillas.

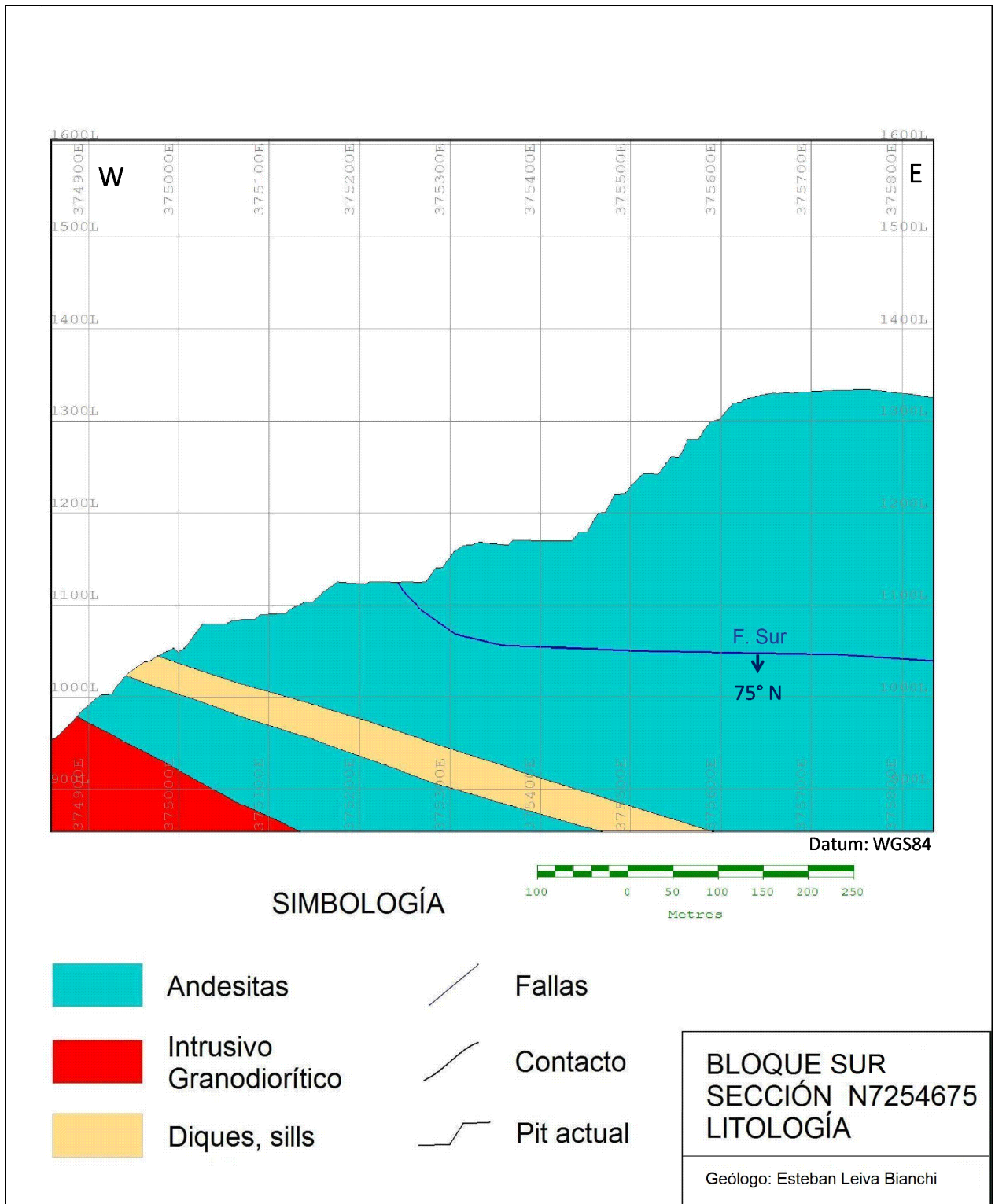


Figura 3.4. Sección Geológica Bloque Sur.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN DE LOS OXIDADOS DE COBRE Y MINERALES DE ALTERACIÓN ASOCIADOS

En este capítulo, se presentan en detalle las características de los oxidados de cobre y los minerales de alteración asociados que se observan en cada uno de los sectores en estudio, así como una breve descripción de su composición química y condiciones de formación. También se presentan características de los sulfurados de cobre que se observan en el yacimiento.

Cuando se habla de la formación de nuevas especies minerales durante la interacción entre un fluido electrolítico y la roca, también se habla de la estabilidad de los complejos metálicos disueltos en la solución. En términos generales, el comportamiento termodinámico de los complejos electrolíticos es función de la presión, la temperatura y la composición. Sin embargo, a diferencia de los procesos hidrotermales, los procesos supérgenos se caracterizan por tener presiones y temperaturas bastante definidas, por lo que el problema de la estabilidad consiste en determinar la composición de la solución.

Al respecto, se ha planteado que los valores de pH y Eh tienen una relevancia determinante en el control de la mineralogía de cobre supérgeno, hierro y enriquecimiento secundario de sulfuros. Empíricamente se han determinado los campos de estabilidad del ión cúprico y se ha concluido que la solubilidad del cobre y del hierro dependen principalmente del pH y la fugacidad del oxígeno o potencial de oxidación (Figura 4.1. a y b).

Rodríguez (1980) logró determinar campos de estabilidad para oxidados de cobre a partir de la presencia del radical hidroxilo OH⁻ los cuales están íntimamente relacionados a la razón entre pH y la concentración del ión cúprico (Figura 4.1. c).

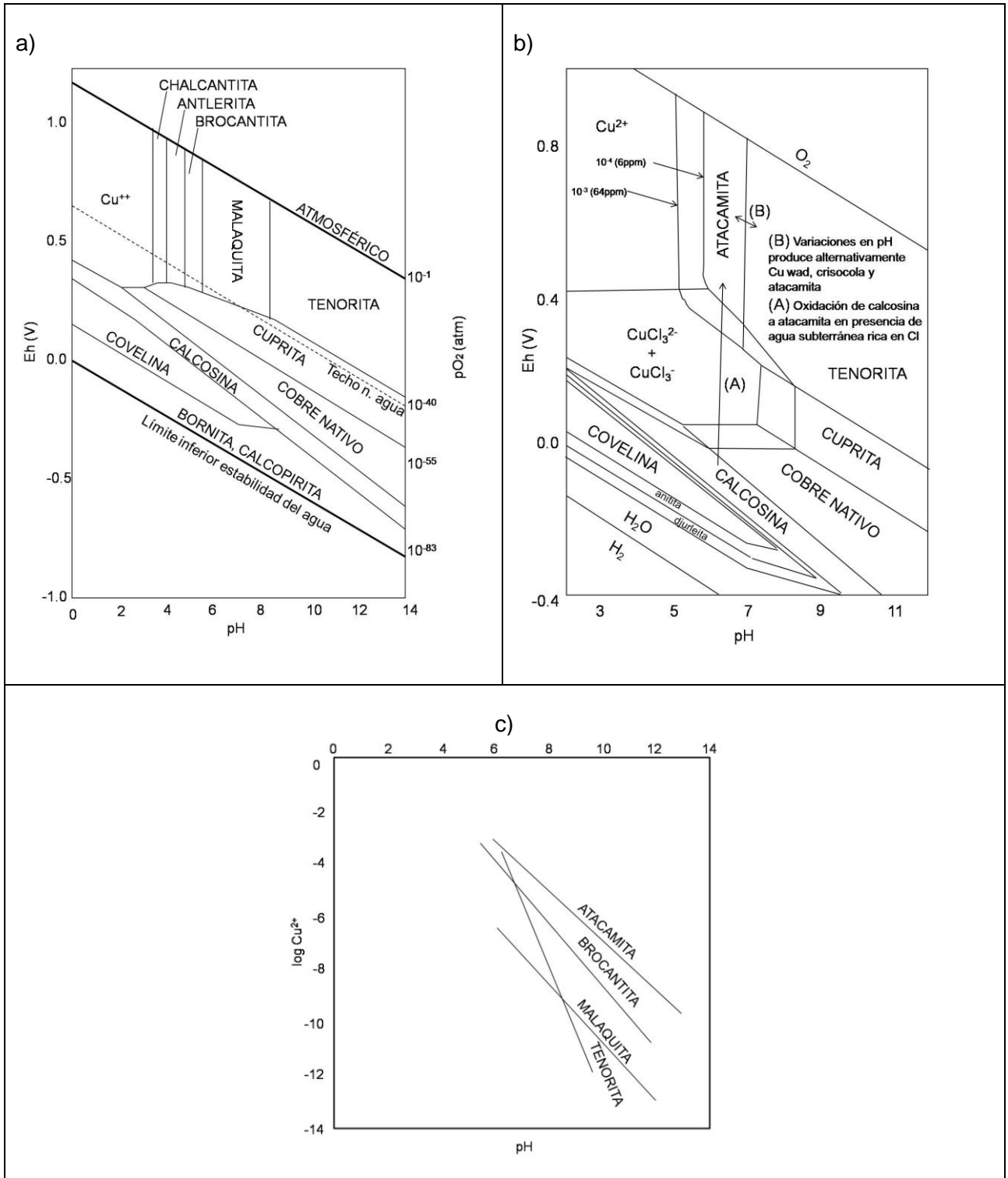


Figura 4.1. Diagramas de estabilidad de oxidados de cobre. a) Diagrama pH-Eh del sistema Cu-O-H-S-Fe a 25°C y 1 atm. b) Diagrama pH-Eh del sistema Cu-O-H-S-Cl a 25°C con $\Sigma S=10^{-4}$ m y $\text{Cl}=0,5$ M (Rose, 1976). c) Diagrama de estabilidad de algunos minerales oxidados de cobre a 25°C y 1 atm (Rodríguez, 1980).

4.1 Caracterización de los minerales oxidados de cobre

En los sectores estudiados se ha reconocido macroscópicamente la presencia de crisocola y atacamita como los principales minerales oxidados de cobre del yacimiento. La atacamita y la crisocola conforman cuerpos mineralizados que corresponden a cuerpos mantiformes, vetiformes y bolsonadas. La distribución, disposición y geometría de los cuerpos se discutirá en los capítulos siguientes.

La crisocola es el oxidado de cobre más abundante del yacimiento Mantos de la Luna, seguida por la atacamita la cual se observa frecuentemente asociada con la misma crisocola. Estos dos minerales son fácilmente diferenciables en el terreno por sus propiedades diagnósticas. Cantidades menores de malaquita y tenorita fueron observadas en muestras de mano y confirmadas por la difracción de rayos X.

También se pudo observar en cortes transparentes dioplasa y paratacamita, minerales cuya presencia se confirmó por la difracción de rayos X. Finalmente un grupo de especies minerales fueron solamente reconocidas mediante la técnica de difracción de rayos X, entre los que se cuenta la melanotalita y la nantokita.

4.1.1 Crisocola

4.1.1.1 Antecedentes bibliográficos

La crisocola es un filosilicato de cobre hidratado. Químicamente puede contener impurezas como arcillas, sílice u óxidos de hierro. Su composición es (Gaines et al., 1997):

Aluminio	2,05 %	Al ₂ O ₃	3,88 %
Cobre	33,86 %	CuO	42,39 %
Silicio	17,10 %	SiO ₂	36,59 %
Hidrógeno	1,92 %	H ₂ O	17,14 %
Oxígeno	45,06 %		

Total elementos	100,00 %	Total óxido	100,00 %
-----------------	----------	-------------	----------

En sentido estricto, la crisocola es un mineraloide, dado que no presenta estructura interna o es defectuosa.

La diopstasa, que no es más que la crisocola mineral (presenta estructura interna), pertenece al sistema trigonal-rombohédrico. Su composición teórica es (Gaines et al., 1997):

Cobre	40,31 %	CuO	50,46 %
Silicio	17,82 %	SiO ₂	38,11 %
Hidrógeno	1,28 %	H ₂ O	11,43 %
Oxígeno	40,60 %		
Total elementos	100,00 %	Total óxido	100,00 %

Condiciones de Formación

La crisocola se forma a partir de la precipitación de la sílice coloidal o a partir de la reacción a pH ácido de cobre y sílice en solución (Rodríguez, 1980).

La sílice coloidal corresponde a la precipitación y polimerización del ácido monosilícico (Si(OH)₄). El ácido monosilícico se sobresatura por evaporación de líquido o por adición de sílice, entre otras razones, y forma sílice coloidal el cual es capaz de adsorber iones cúpricos, alúmina y otras impurezas. La reacción posterior de los iones cúpricos y la sílice permiten la formación de crisocola

La precipitación de crisocola a condiciones de presión y temperatura ambiente en un sistema rico en ión cloruro, se realiza mediante aumentos leves de pH neutro a alcalino (Figura 4.1. b), ya sea por soluciones con baja concentración de cobre o por soluciones con una concentración alta de sílice y baja de otros aniones.

4.1.1.2 Características macroscópicas

La crisocola se observa generalmente con un hábito masivo y brillo vítreo el cual se presenta principalmente en vetillas con relleno total (Figura 4.2. a) y amígdalas con relleno total a parcial de sus cavidades (Figura 4.2. b) así como pátinas (Figura 2.7. b). El color predominante es el verde azulado el cual se presenta tanto en vetillas como amígdalas.

Otro hábito menos común es el botroidal donde la crisocola se presenta con su brillo y color característico. Este hábito se observa principalmente en vesículas irregulares con relleno parcial de sus cavidades (Figura 4.2. b).

La crisocola también tiene un hábito terroso, en el cual se observa como una masa de baja tenacidad, fácilmente pulverizable en arcillas, con un color verde pálido. Este hábito se presenta por lo general en pátinas delgadas producto de la impregnación de fracturas (Figura 2.7. b).

Las principales ocurrencias de la crisocola en el yacimiento corresponden a la crisocola en vetillas y amígdalas. Sobre las superficies de fractura suele formar pátinas de color verde azulado que algunas veces están acompañadas por atacamita y/o arcillas blancas.

Se puede observar crisocola en vetillas y vetas menores, compuesta generalmente por atacamita o calcosina así como de minerales de ganga como calcita, cuarzo, hematita y yeso. Las vetas menores son irregulares, tienen espesores de hasta 7 cm y la crisocola se aprecia acompañada de grandes cantidades de calcita, cuarzo y menor hematita. Las vetillas presentan espesores inferiores al centímetro y mayores al milímetro y la crisocola presente puede o no estar acompañada de atacamita y calcosina o de los minerales de ganga calcita, cuarzo, hematita y yeso.

La crisocola dentro de las amígdalas suele estar acompañada de otros minerales de ganga como cuarzo, hematita o calcita, y ocasionalmente de atacamita y/o calcosina. Las amígdalas tienen tamaños entre los 3 mm a los 10 mm, aunque en casos excepcionales pueden alcanzar los 5 cm.

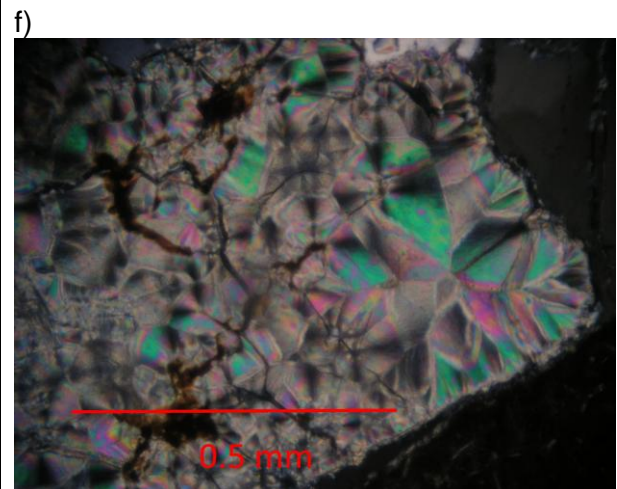
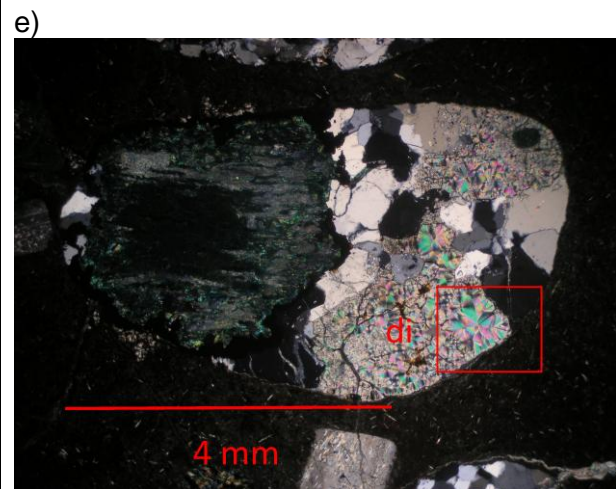
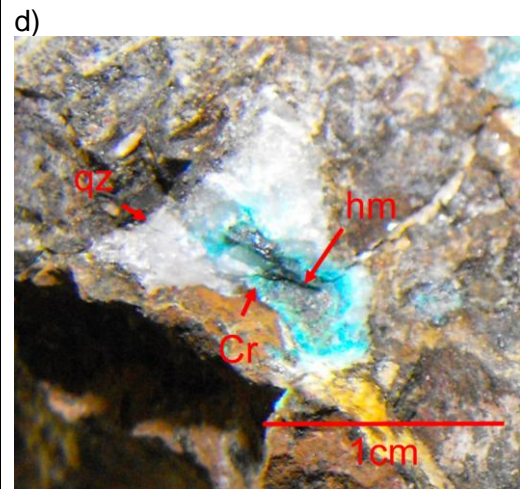
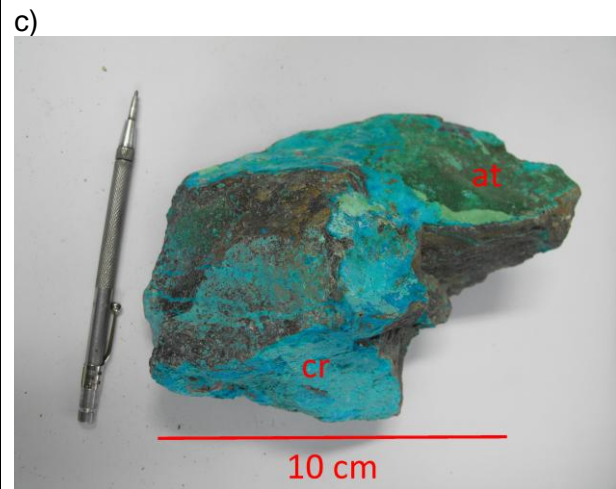
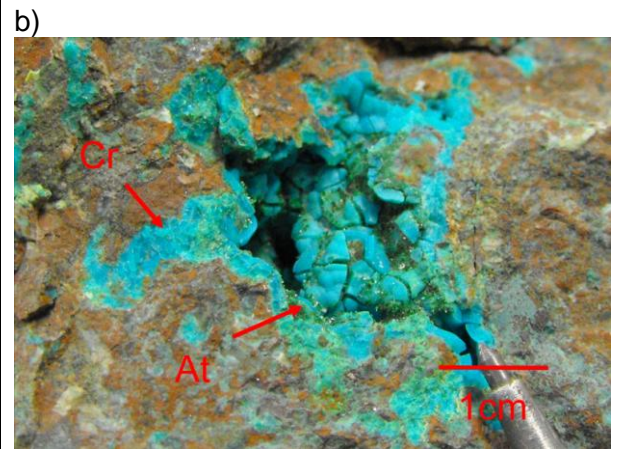
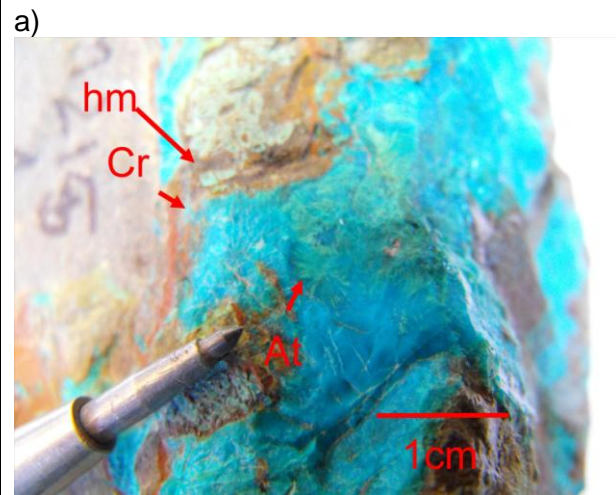


Figura 4.2. Fotografías de hábitos y ocurrencias de crisocola y atacamita. a) Vetilla de crisocola (Cr) masiva con atacamita (At) acicular radiada asociada con hematita (hm) masiva. Bloque Norte. b) Amígdala irregular de crisocola (Cr) botroidal con atacamita (At) cristalina. Bloque Norte. d) Amígdala irregular de cuarzo (qz), hematita (hm) y crisocola (cr). Bloque Norte. e) Amígdala irregular de cuarzo asociada con dioptasa, nícoles cruzados. f) Vista acercada de dioptasa de la amígdala a nícoles cruzados.

Por lo general, cuando la crisocola está acompañada de atacamita en las vetillas y amígdalas, la crisocola se encuentra como relleno externo y la atacamita hacia el centro del relleno.

La dioptasa es difícil de distinguir macroscópicamente. Sin embargo una característica óptica que la diferencia de la crisocola son sus colores de birrefringencia (tercer orden). Esta característica permitió distinguir la presencia de dioptasa principalmente en vetillas y amígdalas, estas últimas acompañadas de cuarzo (Figura 4.2. e y f). Asimismo, de las muestras de fracciones analizadas por difracción de rayos X, tan sólo en las amígdalas de cuarzo se logró identificar dioptasa. Por lo tanto existe una estrecha relación entre este mineral, el estilo de mineralización y los minerales de ganga asociados.

4.1.2 Atacamita

4.1.2.1 Antecedentes bibliográficos

La atacamita es un hidroxiclورو de cobre perteneciente al sistema ortorrómbico dipiramidal. La composición teórica de la atacamita es (Gaines et al., 1997):

Cobre	59,51 %	CuO	74,49 %
Hidrógeno	1,42 %	H ₂ O	12,65 %
Cloro	16,60 %	Cl	16,60 %
Oxígeno	22,47 %		
Total elementos	100,00 %	Total óxido	103,75 %

La atacamita tiene dos polimorfos, estos son la paratacamita y botallackita, de sistema trigonal y monoclinico, respectivamente.

En la paratacamita el cobre puede ser reemplazado por zinc, por tanto sus concentraciones teóricas varían a (Gaines et al., 1997):

Zinc	15,24 %	ZnO	18,97 %
Cobre	44,44 %	CuO	55,63 %
Hidrógeno	1,41 %	H ₂ O	16,53 %
Cloro	16,53 %	Cl	12,60 %
Oxígeno	22,38 %		
Total elementos	100,00 %	Total óxido	103,73 %

Condiciones de Formación

Las condiciones de estabilidad de la atacamita bajo condiciones de presión y temperatura ambiente, son de un pH entre 5 y 7 y potencial de oxidación mayor a 0,4 (Figura 4.1. b). Dependiendo de la actividad de aniones Cl respecto a aniones SO₄, se formará brocantita o atacamita. En este sentido, la atacamita puede formarse de la oxidación de la calcosina en presencia de soluciones con una alta actividad de iones cloruro (Figura 4.1. b). Otro punto a considerar es que, a mayor concentración de cobre en solución, la atacamita requiere un ambiente más ácido para su precipitación (Figura 4.1. c).

Condiciones climáticas hiperáridas (<10mm/año de precipitaciones) permiten la conservación de la atacamita, debido a que este mineral es fácilmente soluble en agua fresca. Además entre los oxidados de cobre la atacamita es, por lo general, el último en formarse.

4.1.2.2 Características macroscópicas

Los hábitos observados para la atacamita son: granular, acicular y en cristales euhedrales. Estos hábitos se aprecian en todo el yacimiento.

La atacamita en hábito granular consiste en cúmulos de cristales subhedrales donde no se distinguen cristales individuales. La atacamita en este tipo de hábito presenta generalmente brillo vítreo y color verde oscuro (Figura 4.3. b).

El hábito acicular es poco frecuente en la atacamita. Consiste en un grupo de cristales con forma de aguja que se propagan a menudo radialmente desde un punto en común. Por lo general, las especies observadas con este hábito presentan colores verde claro “manzana” y brillo vítreo (Figura 4.2. a y b).

Por último la atacamita se puede hallar como cristales euhedrales, separados entre sí. Los cristales que exhiben este hábito se caracterizan por tener brillo adamantino y color verde oscuro.

Las ocurrencias principales de la atacamita en el yacimiento son como relleno de fracturas y fallas. También se puede observar ocasionalmente relleno de vesículas regulares y/o irregulares dentro de las andesitas amigdaloidales. Asimismo se puede observar en algunas muestras del Bloque Central superficies de fractura con pátinas delgadas de color verde claro, sin presencia de otros minerales de ganga y de mena.

Principalmente la atacamita se puede encontrar en vetillas ya sea junto con minerales de mena como crisocola y calcosina, como con minerales de ganga como cuarzo-calcita-hematita y yeso. Excepcionalmente se puede encontrar en amígdalas junto a crisocola, cuarzo, calcita y hematita.

Cuando la atacamita está asociada a crisocola como relleno de espacios, la atacamita suele ocupar el centro del relleno.

La paratacamita, al presentar propiedades físicas muy similares a la atacamita, es difícilmente distinguible a nivel macroscópico. Sin embargo, microscópicamente se diferencia de la atacamita por sus colores de birrefringencia de tercer orden, en contraste a la atacamita, cuyos colores de birrefringencia pertenecen al segundo. Este punto ha sido corroborado

mediante análisis de difracción de rayos X en muestras fraccionadas del Bloque Central y Sur los cuales demuestran la presencia de paratacamita en vetillas y amígdalas, acompañadas de cuarzo, yeso, crisocola, atacamita, melanotalita y nantokita.

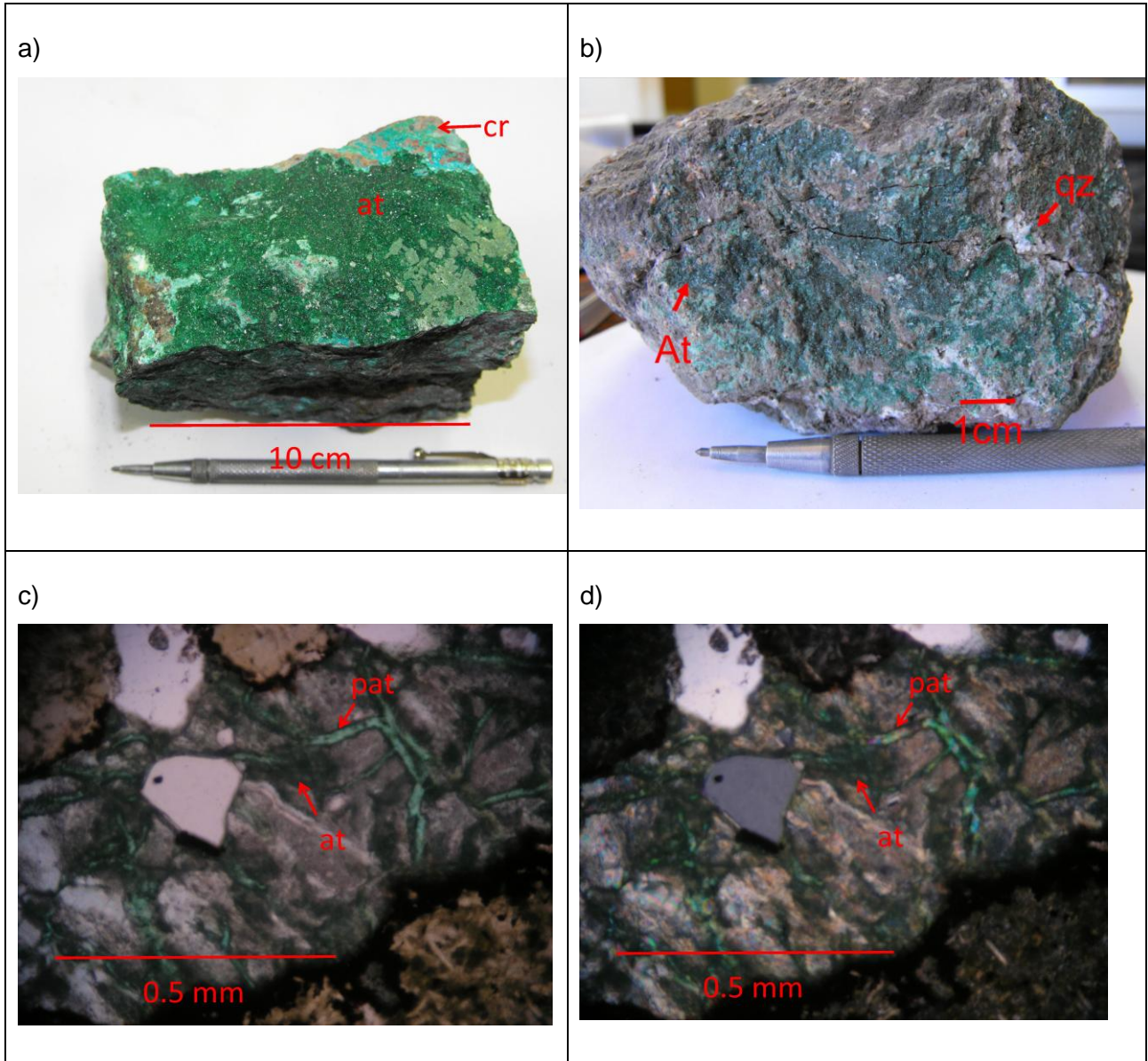


Figura 4.3. Atacamita. a) Atacamita (at) acicular en vetilla asociada con crisocola, b) Atacamita (At) granular formando pátina en fractura junto a amígdalas de cuarzo (qz). Bloque Centro. c) Corte a vetilla de atacamita, nícoles paralelos. d) Corte a vetilla de atacamita, nícoles cruzados. En las dos últimas fotos se logró diferenciar la paratacamita (pat) de la atacamita (at) por su color de birrefringencia. La muestra del corte transparente fue analizada por difracción de rayos X arrojando que efectivamente existe paratacamita en esta vetilla.

4.1.3 Malaquita

4.1.3.1 Antecedentes bibliográficos

La malaquita es un mineral de la clase de los carbonatos de cobre perteneciente al sistema monoclinico prismático. Su composición teórica es (Gaines et al., 1997):

Cobre	57,48 %	CuO	71,95 %
Hidrógeno	0,91 %	H ₂ O	8,15 %
Carbono	5,43 %	CO ₂	19,90 %
Oxígeno	36,18 %		
Total elementos	100,00 %	Total óxido	100,00%

Condiciones de Formación

La malaquita es estable bajo condiciones normales de presión y temperatura, de la precipitación de soluciones con pH entre 6 a 7 y potencial de oxidación mayor a 0,6, así como de concentraciones de cobre en solución $\log X_{Cu} > 7$ bajo las condiciones de pH antes mencionadas (Figura 4.1. a y c).

4.1.3.2 Características Macroscópicas

La malaquita es un mineral bastante poco frecuente de observar en el yacimiento. Con la ayuda de la difracción de rayos X se pudo determinar la presencia de malaquita en amígdalas con marcadas diferencias físicas entre otros minerales oxidados de cobre. La malaquita del yacimiento se caracteriza por poseer un color verde claro, hábito botroidal y brillo vítreo, Se ha podido observar malaquita en amígdalas junto con cuarzo y atacamita.



Figura 4.4. Malaquita. La malaquita es un mineral poco frecuente en el yacimiento. La muestra de mano que se muestra en la figura contiene pátinas de crisocola (cr) y una amígdala de cuarzo, atacamita y malaquita (mq), esta última fácilmente diferenciable por sus propiedades físicas. Esta muestra de mano fue sometida a análisis en muestras fraccionadas de difracción de rayos X arrojando valores positivos para la malaquita de la amígdala.

4.1.4 Tenorita

4.1.4.1 Antecedentes bibliográficos

La tenorita es un óxido de cobre perteneciente al sistema monoclinico prismático. Su composición teórica es (Gaines et al., 1997):

Cobre	79,89%	CO ₂	100,00 %
Oxígeno	20,11 %		
Total elementos	100,00 %	Total óxido	100,00 %

Condiciones de Formación

La Tenorita en un ambiente de aguas subterráneas se forma en condiciones oxidantes imperantes sobre el nivel de aguas, entre pH levemente básico (entre 7 y 8) a básico (Figura 4.1. a y b).

4.1.4.2 Características macroscópicas

La tenorita es un mineral muy poco frecuente de encontrar en el yacimiento. Se identifica macroscópicamente en pátinas de color negro, con brillo terroso y raya negra, y generalmente está asociada a crisocola. Cuando entra en contacto con ácido clorhídrico y un clavo de acero, es capaz de broncearlo.

La tenorita es un mineral difícil de distinguir en amígdalas o vetillas. Sin embargo, fracciones en amígdalas de una muestra del Bloque Central fueron analizadas mediante la técnica de difracción de rayos X entregando resultados positivos sobre la presencia de tenorita, lo que indica que puede haber tenorita en asociación con crisocola tanto en amígdalas como en pátinas.

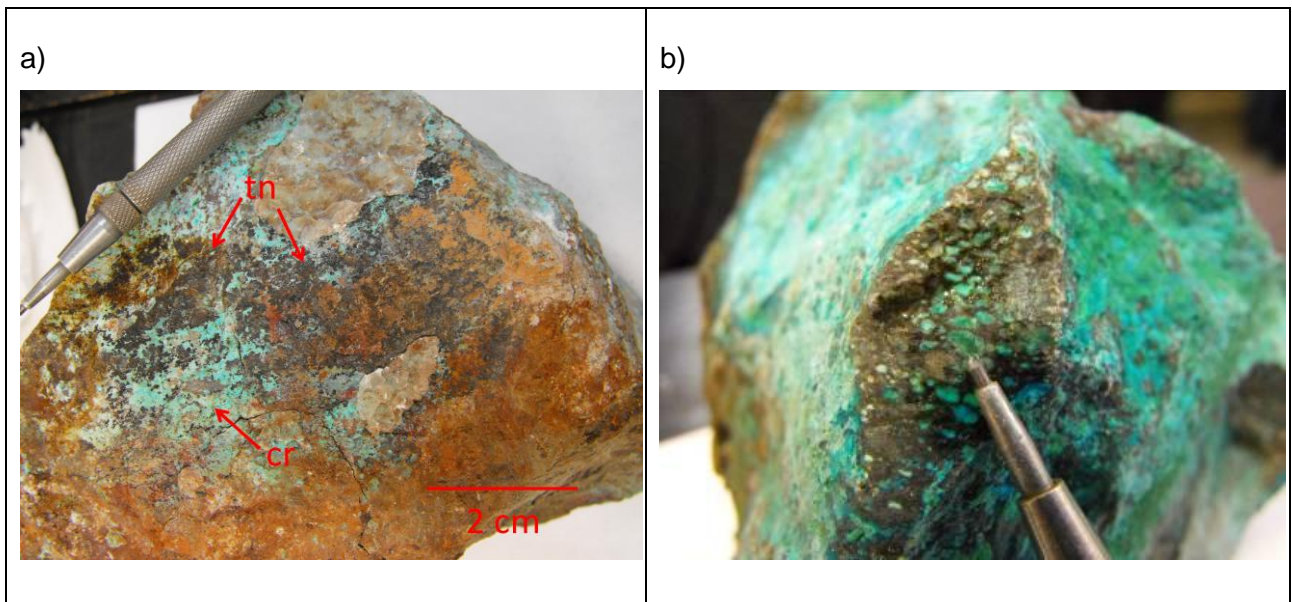


Figura 4.5. Tenorita. a) Pátina de tenorita (tn) y crisocola (cr). b) Amígdalas de cuarzo, crisocola (dioplasa), atacamita y tenorita. La tenorita es un mineral muy poco frecuente en el yacimiento. Macroscópicamente puede ser visto en pátinas como la que se muestra en la Figura a. El puntero de la Figura b) muestra una amígdala que fue analizada vía difracción de rayos X. La muestra dio positiva a la presencia de tenorita, esta última difícilmente distinguible a simple vista.

4.1.5 Melanotalita y Nantokita

4.1.5.1 Antecedentes bibliográficos

La melanotalita es un oxiclورو de la serie de la atacamita de color negro verdoso o azulado. Pertenece al sistema cristalino ortorrómbico dipiramidal y su composición teórica es (Gaines et al., 1997):

Cobre	59,39 %
Cloro	33,13 %
Oxígeno	7,48 %
	100,00 %

La nantokita es un cloruro de cobre perteneciente al sistema isométrico. Su composición teórica es (Gaines et al., 1997):

Cobre	72,27 %
Cloro	35,81%
	108,08 %

Ambos minerales fueron reconocidos por la difracción de rayos X. La melanotalita fue posible reconocerla en amígdalas de muestras del Bloque Norte, junto a atacamita, paratacamita y cuarzo. La nantokita fue reconocida en una vetilla expuesta de yeso y crisocola del Bloque Norte.

4.1.6 Relación atacamita-crisocola.

Entre la atacamita y la crisocola observadas macroscópicamente, se conservan relaciones de orden de relleno en vetillas y amígdalas bien definidas. Como relación general se observa que, cuando ambas son parte de una misma ocurrencia, la crisocola se encuentra hacia el borde y la atacamita se encuentra hacia el centro.

4.2 Caracterización de los minerales sulfurados de cobre

A pesar que el yacimiento Mantos de la Luna está compuesto principalmente de oxidados de cobre, existe una cantidad no despreciable de minerales sulfurados en algunos niveles de la mina. Entre las especies minerales de este tipo se destaca por su abundancia la calcosina la cual está ampliamente distribuida en el yacimiento. También se ha observado la presencia de pirita, calcopirita y bornita bajo la cota de los 1.000 m en el sector Bloque Norte.

Los sulfurados de cobre se distribuyen en pequeñas zonas aisladas. La distribución de los sulfuros de cobre está ligada estrechamente a la presencia de intrusivos los cuales han sido identificados en distintos sectores de la mina. A continuación se describirán brevemente las características de cada una de estas especies.

4.2.1 Calcosina

Los hábitos más comunes de la calcosina son: masivo y en cristales euhedrales.

El hábito masivo por lo general se aprecia tanto en vetillas como en amígdalas en asociación con otros oxidados de cobre. Asimismo, los cristales euhedrales de calcosina se pueden observar en vetillas y amígdalas (Figura 4.6. a y b).

La calcosina en vetillas presenta un color negro y brillo submetálico y puede estar acompañada de atacamita y crisocola o bornita. La calcosina en amígdalas presenta un color negro a mate y brillo submetálico y está acompañada de atacamita y crisocola.

Por lo general cuando la calcosina se encuentra asociada a los oxidados de cobre en rellenos de fracturas y vesículas, ocupa el relleno central de la estructura y los oxidados de cobre ocupan el relleno externo (de borde hacia el centro: crisocola, atacamita y calcosina), y

cuando está asociada a bornita en vetillas comúnmente ocupa el relleno más externo de la estructura.

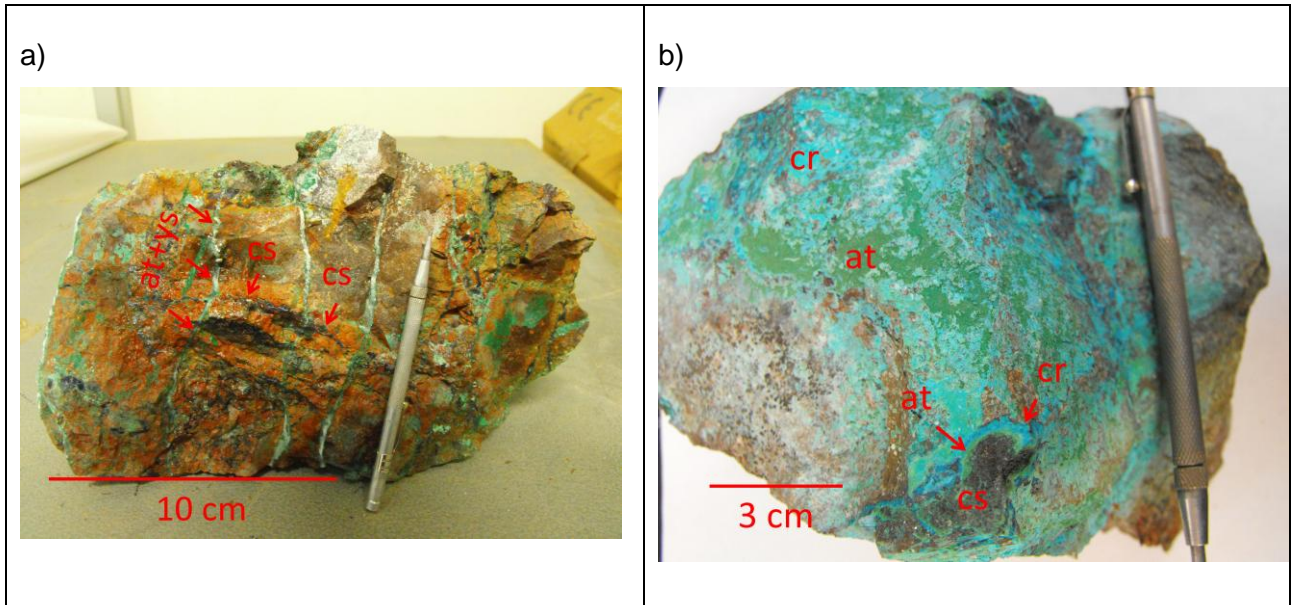


Figura 4.6. Calcosina. a) Atacamita (at) y yeso (ys) en vetillas unidireccionales cortando vetillas de calcosina (cs), b) Parte inferior de la muestra, vesícula rellena por (desde borde hacia núcleo del relleno) crisocola (cr), atacamita (at) y calcosina (cs). Parte superior de la muestra, pátina de crisocola masiva con atacamita granular.

4.2.2 Bornita

La bornita en el yacimiento presenta un hábito granular consistente en cúmulos de cristales subhedrales a anhedrales. También se presenta con un hábito reniforme. Su brillo característico es el metálico y su color es el púrpura a café bronceado.

Las ocurrencias registradas para la bornita consisten principalmente en vetillas, las cuales pueden estar acompañadas de otros oxidados y sulfurados de cobre. También se aprecia en pátinas sobre fracturas abiertas. La aparición de bornita se ha observado bajo el nivel 1.000 del yacimiento, en el sector Bloque Norte.

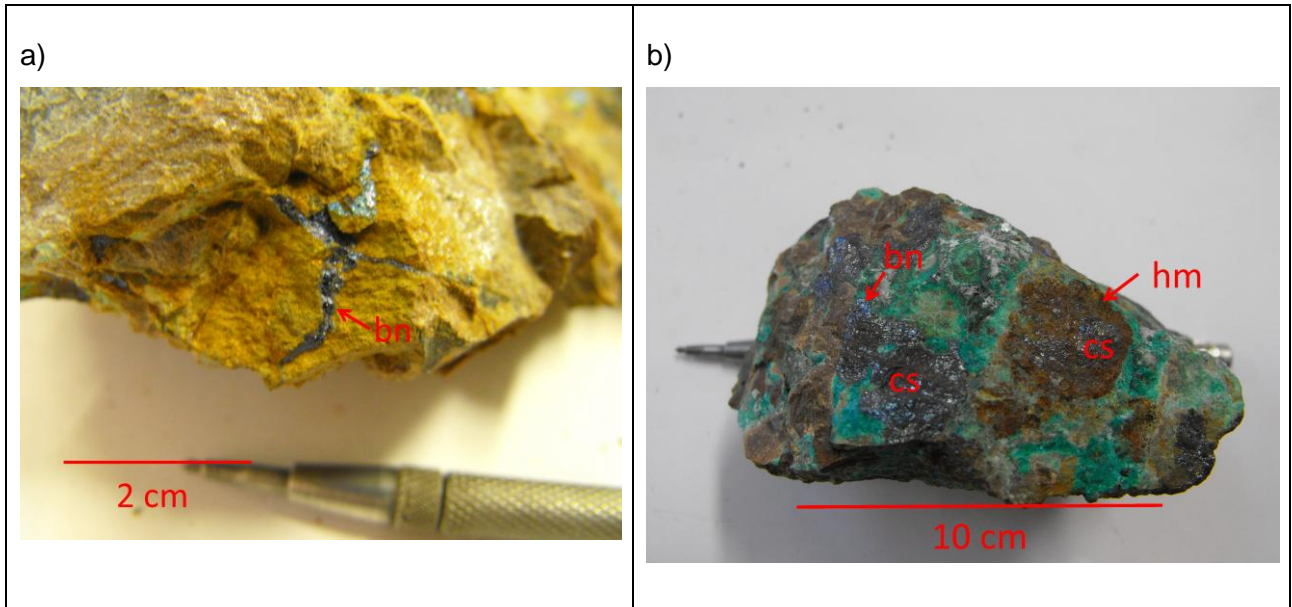


Figura 4.7. Bornita. a) Vetilla de bornita (bn) y menor calcosina (bordes de la vetilla) b) Pátina de bornita (bn) de hábito reniforme en asociación con calcosina (cs). Calcosina en asociación con hematita (hm). Atacamita junto a calcosina con bordes de reacción.

4.2.3 Pirita y Calcopirita

La pirita y calcopirita del yacimiento se observa generalmente en asociación como diseminados de cristales euhedrales a subhedrales y en pátinas de mineral. En los bancos observados, la pirita y la calcopirita no superan el 1% del total roca. La pirita exhibe un color plateado y brillo metálico, mientras que la calcopirita tiene un color amarillo bronceado y brillo metálico.

Adyacente a algunas zonas de mineralización de pirita y calcopirita, se pueden apreciar subzonas muy lixiviadas con desarrollo de boxwork rellenos por limonita.

La cantidad de pirita y calcopirita es considerable en el nivel 1.000 m.s.n.m. del sector Bloque Norte, en donde se puede distinguir un halo piritoso que rodea a un halo de pirita-calcopirita y a su vez, este último rodea a un halo de bornita. Los halos están relacionados con los diques y sills, y se desarrollan mejor en las cercanías del dique Capacho.

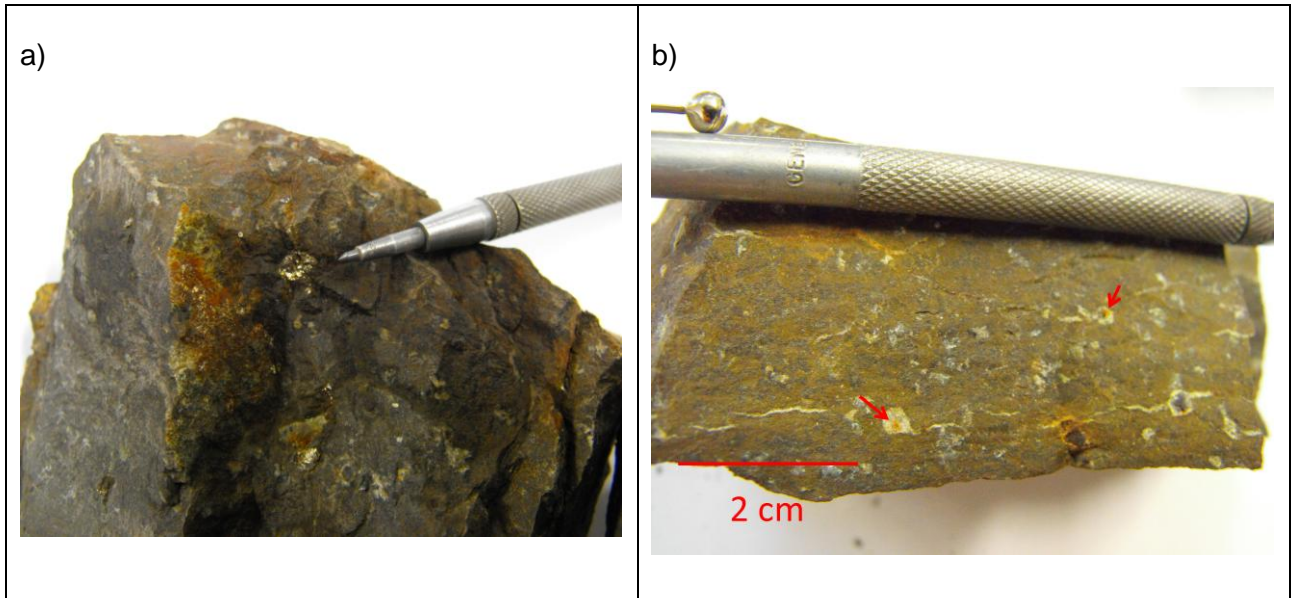


Figura 4.8. Pirita. a) Cristales de pirita diseminada junto a pátina de pirita y calcopirita b) Boxwork rellenos por limonita.

4.3 Caracterización macroscópica de los minerales asociados a la mena de cobre.

Los minerales asociados a la mineralización de cobre pueden ser divididos en dos grupos en razón a las asociaciones que conforman y las ocurrencias que presentan. El primer grupo corresponde a cuarzo-calcita-hematita y el segundo corresponde a yeso.

Grupo clorita-epidota-cuarzo-albita-calcita-hematita

El grupo clorita-epidota-cuarzo-calcita-hematita está ampliamente distribuido en el yacimiento y puede estar o no asociada a mineralización de mena.

Por lo general, la clorita y la epidota se encuentran diseminadas en la matriz y, en algunas ocasiones pueden formar cúmulos de minerales. En los halos de alteración de vetillas así como las partes externas de amígdalas con mineralización hipógena, se observa un aumento importante de la clorita y la epidota.

El cuarzo presenta un hábito cristalino euahedral a subhedral y masivo criptocristalino. Por lo general está asociada a calcita. La calcita presenta un hábito cristalino con formas romboédricas distinguibles, en la mayoría de los casos, a simple vista. La hematita está

asociada a calcita y se presenta, por lo general, con hábito masivo y brillo metálico. Bajo los 1.000 m.s.n.m. se observa la presencia de goetita en hábito masivo en asociación con hematita (Bloque Norte).

La albita ha sido identificada en cantidades no mayores al 10% en la mayoría de las rocas volcánicas. Sin embargo existen cantidades mayores de albita en rocas con mineralización hipógena como bornita.

Las principales ocurrencias de los minerales cuarzo, calcita y hematita corresponden a vetillas irregulares y rectas, y amígdalas. Asimismo, se pueden ver pátinas muy delgadas de hematita correspondientes a mineralización en fracturas. Por lo general, cuando los tres minerales están presentes, las vetillas y amígdalas presentan la siguiente zonación en su relleno (de afuera hacia el centro de la vetilla): cuarzo, calcita, hematita.

La hematita en algunos casos se encuentra asociada a calcosina. También puede hallarse en asociación con crisocola o con atacamita.

Yeso

El yeso corresponde a un mineral de alteración supérgena importante del yacimiento la cual puede estar asociada a mineralización de mena o no.

El yeso se presenta, casi exclusivamente, en vetillas rectas verticales, rellenando fracturas y fallas. En algunas fallas se puede observar abundante yeso acompañado de arcillas blancas.

El yeso posee distribución restringida y abunda en las zonas de fracturamiento intenso o en las zonas de falla, formando cuerpos subverticales.

Por lo general, el yeso presenta un hábito cristalino distinguible a simple vista aunque en algunos casos tiende a formar cúmulos blancuzcos donde no se distinguen cristales individuales. Se encuentra asociada a atacamita en vetillas, generando en muchos casos una capa translúcida de yeso sobre la misma. La atacamita que está junto al yeso se encuentra casi siempre en asociación con crisocola. Cuando el yeso acompaña a la crisocola y la atacamita en vetillas, se puede apreciar en orden desde sus paredes hacia el núcleo del relleno, los minerales crisocola, atacamita y yeso.

Relaciones entre los grupos

En algunos sectores se observa que las vetillas de yeso cortan a las vetillas de cuarzo-calcita-hematita-crisocola (Figura 4.9.). Asimismo se ha podido observar que las vetillas de yeso cortan a algunas vetillas de sulfurados de cobre. (Figura 4.10.) No se han observado vetillas de cuarzo-calcita-hematita que corten vetillas de yeso.

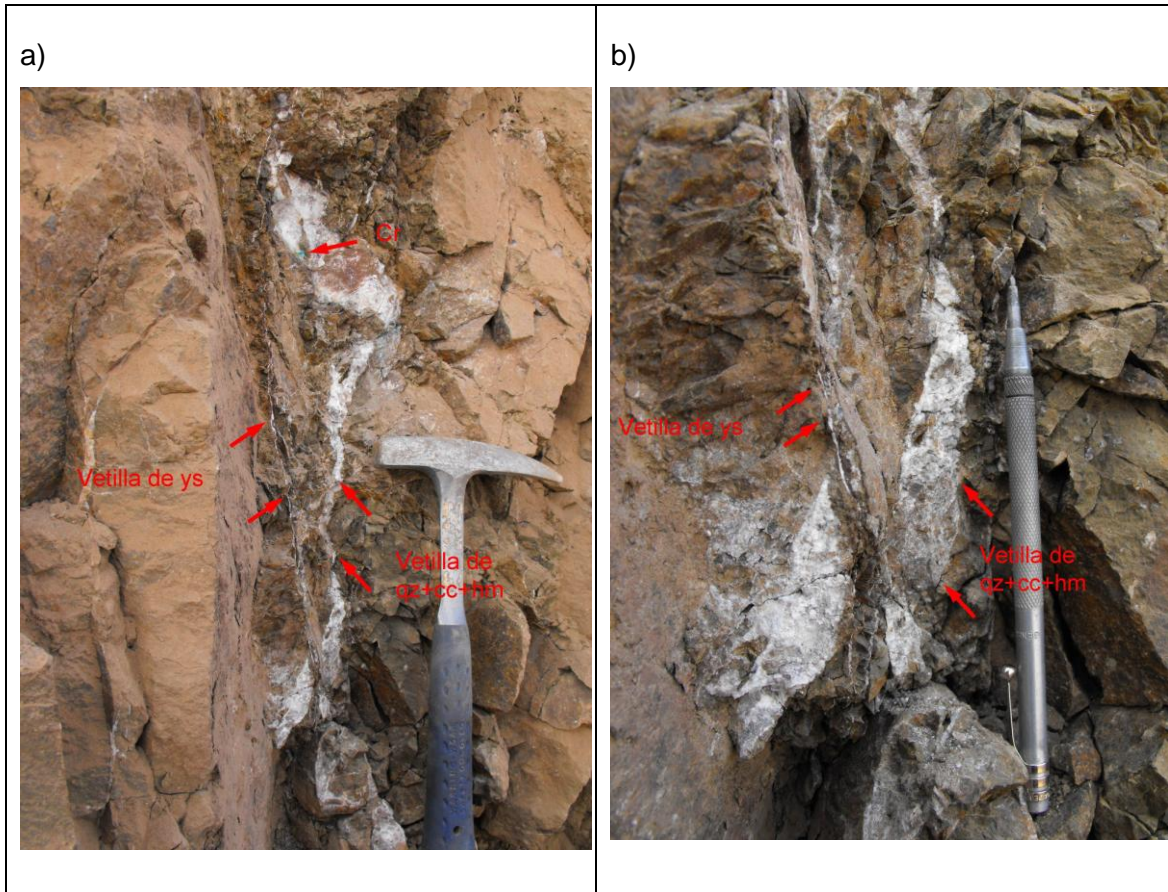


Figura 4.9. Relaciones de cortes entre vetillas de yeso y cuarzo-calcita-hematita-crisocola. a) Vista general; b) Vista aumentada. Yeso (ys), Cuarzo (qz), calcita (cc), hematita (hm).

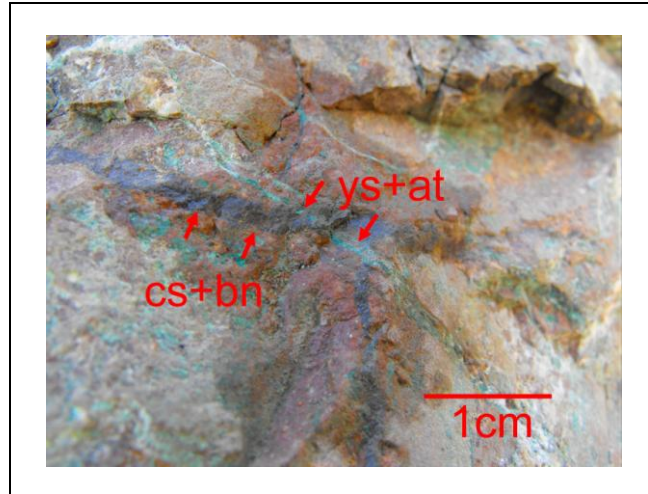


Figura 4.10. Relaciones de cortes entre vetillas de yeso-atacamita y calcosina-bornita. Yeso (ys), atacamita (at). Calcosina (cs), bornita (bn).

4.4 Caracterización Microscópica de Minerales

Con el objetivo de indicar las características y ocurrencias que se pueden observar a nivel microscópico, así como reportar nuevas especies minerales que son difíciles de distinguir a nivel macroscópico en el yacimiento, se realizó la descripción de cortes transparentes de muestras obtenidas durante las jornadas de terreno en la mina.

La microscopía logró determinar las características y ocurrencias distinguibles a nivel macroscópico de los oxidados de cobre presentes en el yacimiento. Se detectó también la presencia de sericita microscópica como alteración de plagioclasas.

4.4.1 Vetillas

Microscópicamente se observan vetillas poliminerales de clorita-epidota-cuarzo-hematita-atacamita-crisocola, hematita-atacamita-crisocola, cuarzo-atacamita-crisocola y yeso-atacamita-crisocola.

Vetillas poliminerales de clorita, epidota, cuarzo, hematita, atacamita y crisocola

Las vetillas incluidas en este grupo presentan halos de alteración de clorita-epidota y relleno de cuarzo-hematita acompañado de crisocola y atacamita. Poseen un ancho máximo de 4 mm y bordes por lo general sinuosos (Figura 4.11. a y b).

El relleno de la vetilla presenta granos de cuarzo monocristalino y hematita subhedral libremente dispuestos. Desde el borde hacia el centro de la vetilla el material está compuesto de crisocola, atacamita y cuarzo policristalino. La crisocola puede presentar microvetillas de atacamita.

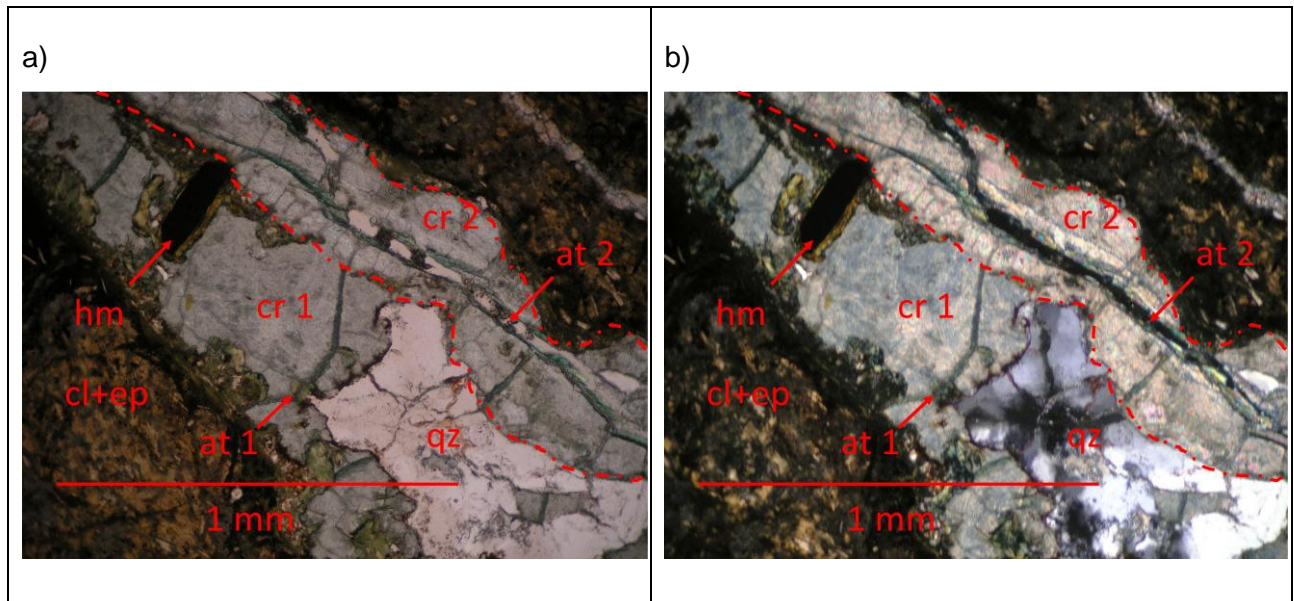


Figura 4.11. Microscopía de vetillas poliminerales y vetillas de crisocola-atacamita. a) Nícoles Paralelos; b) Nícoles Cruzados. Se aprecia como la vetilla de crisocola (cr2) -atacamita (at2) corta a la vetilla poliminerale de clorita (cl), epidota (ep), cuarzo (qz), hematita (hm), crisocola (cr1) y atacamita (at1), revelando la existencia de dos generaciones de mineralización distintas.

Vetillas de hematita-atacamita-crisocola

Las vetillas de este grupo presentan desde el borde hacia el centro hematita subhedral, crisocola y atacamita (Figura 4.12. a y b). Por lo general se tratan de vetillas con bordes irregulares, polidireccionales, de espesor no mayor al milímetro.

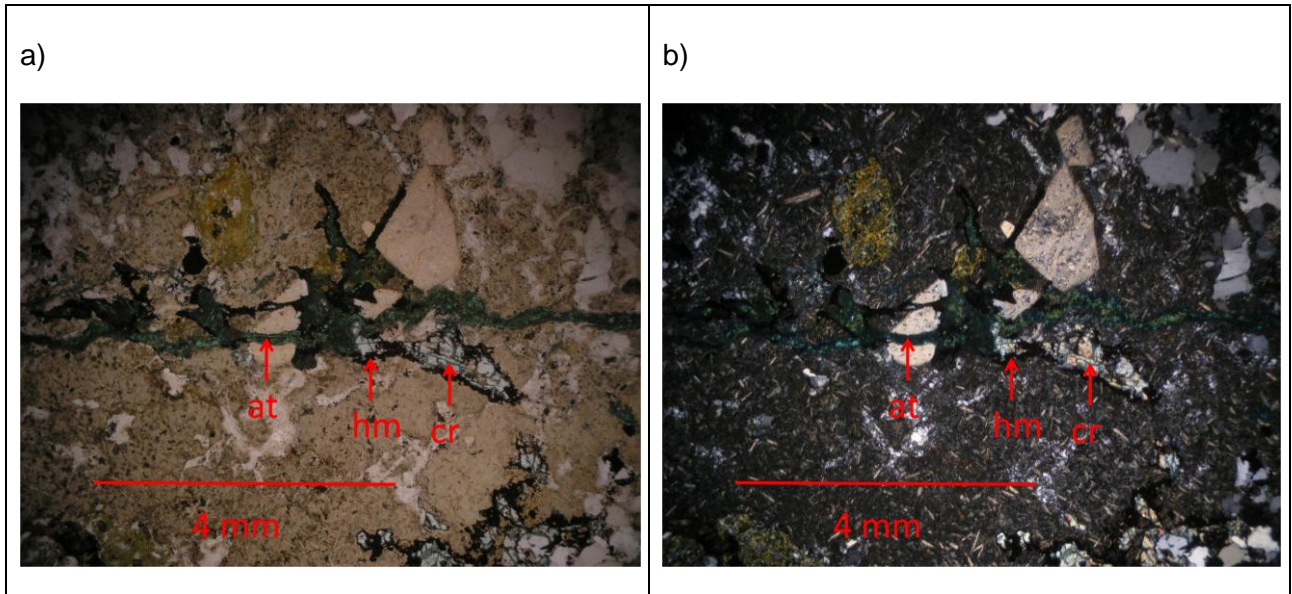


Figura 4.12. Microscopía de vetillas de hematita-atacamita-crisocola. a) Nícoles Paralelos; b) Nícoles Cruzados. Atacamita (at), hematita (hm), crisocola (cr).

Vetillas de cuarzo

Las vetillas de este grupo presentan cuarzo del tipo criptocristalino el cual se puede observar microscópicamente como una masa carente de continuidad óptica (Figura 4.13. a y b).

Vetillas de cuarzo-atacamita-crisocola

Las vetillas de este grupo se caracterizan por desarrollar desde el borde hacia el centro crisocola, atacamita y cuarzo criptocristalino. Se trata de vetillas rectas, polidireccionales. La crisocola se observa como un mineral con alto color de birrefringencia, mientras que la atacamita puede formar microvetillas en los cristales de crisocola (Figura 4.13. a y b).

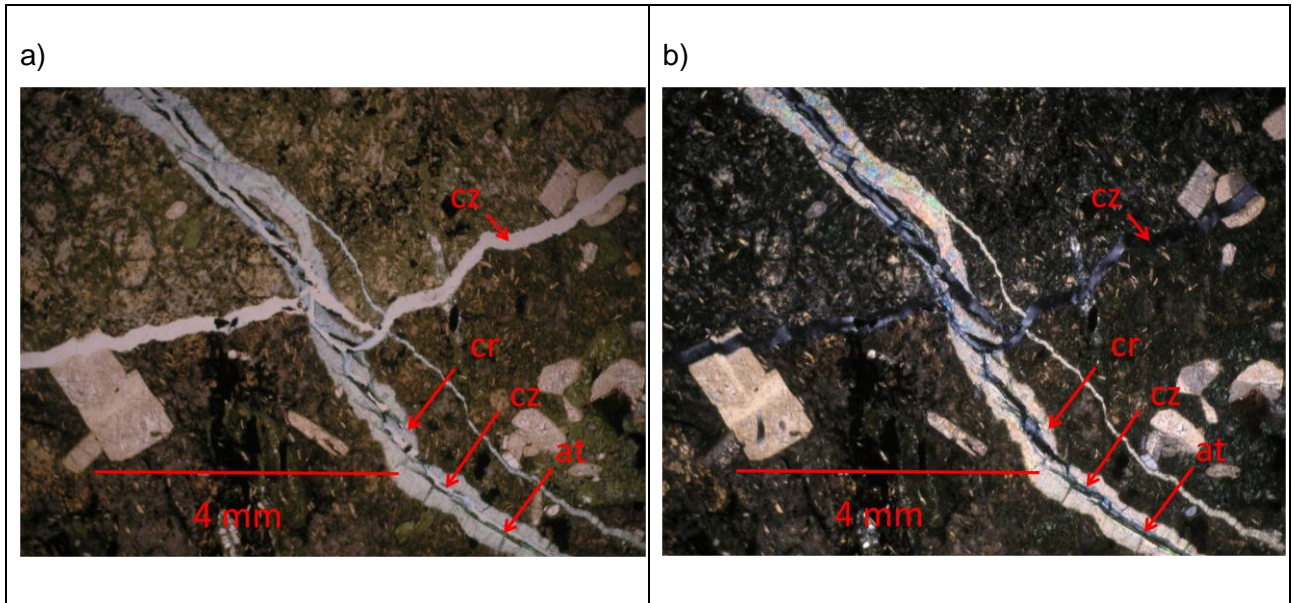


Figura 4.13. Microscopía de vetilla de cuarzo-atacamita-crisocola y cuarzo. Muestra perteneciente al Bloque Central. a) Nícoles Paralelos; b) Nícoles Cruzados. Crisocola (cr), atacamita (at), cuarzo (qz).

Vetillas de Crisocola-Atacamita

Las vetillas de este tipo presentan en los bordes crisocola y en el núcleo, atacamita. Por lo general, la crisocola presenta un hábito botroidal, colores de birrefringencia de alto orden (los cuales se atribuyen a dioplasa) y color celeste claro a nícoles paralelos (Figura 4.11. a y b; Figura 4.15. c y d). La crisocola a menudo está cortada por microvetillas de atacamita.

Se ha observado que las vetillas de crisocola-atacamita cortan a vetillas poliminerales (Figura 4.11. a y b), a amígdalas de cuarzo-crisocola (Figura 4.15. c y d) y de hematita, crisocola y atacamita, por lo tanto constituyen una generación más reciente de mineralización supérgena.

Vetillas de crisocola, atacamita y yeso

Las vetillas de este grupo presentan, desde el borde hacia el núcleo del relleno, crisocola, atacamita y yeso. Entre el yeso y la atacamita se puede observar en los cortes suturas en zigzag producto del crecimiento de cristales fibrosos de yeso en los cristales de atacamita. En la crisocola se aprecia un microvetilleo de atacamita (Figura 4.14. a y b).

La atacamita presenta un color verde oscuro a nícoles paralelos y presenta cristales bien formados, a menudo aciculares. El yeso se caracteriza por su alto relieve en sección delgada y cristales euhedrales fibrosos que suelen crecer entre los cristales de atacamita.

Estas vetillas se han observado cortando a amígdalas de cuarzo-crisocola y hematita-crisocola-atacamita (Figura 4.14. c y d), por lo que los minerales asociados también pertenecen a una generación más reciente de mineralización supérgena.

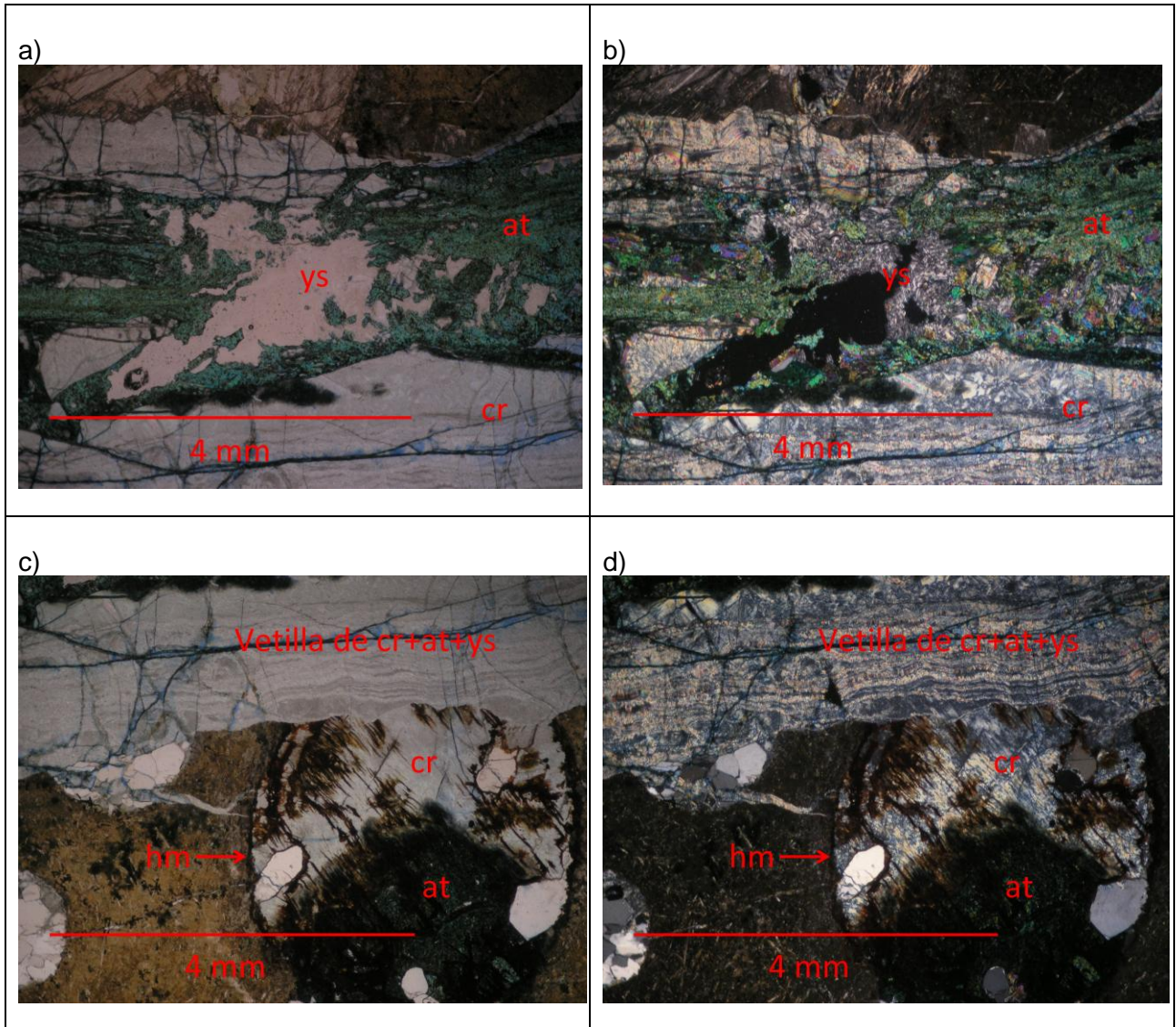


Figura 4.14. Microscopía de vetilla de crisocola-atacamita-yeso. Muestra perteneciente al Bloque Central. a) Nícoles Paralelos; b) Nícoles Cruzados. La microscopía revela una vetilla de crisocola (cr), atacamita (at) y yeso (ys). Notar que la atacamita crece entre cristales de yeso. c) Nícoles Paralelos; d) Nícoles Cruzados. Las fotos muestran las relaciones de corte existentes

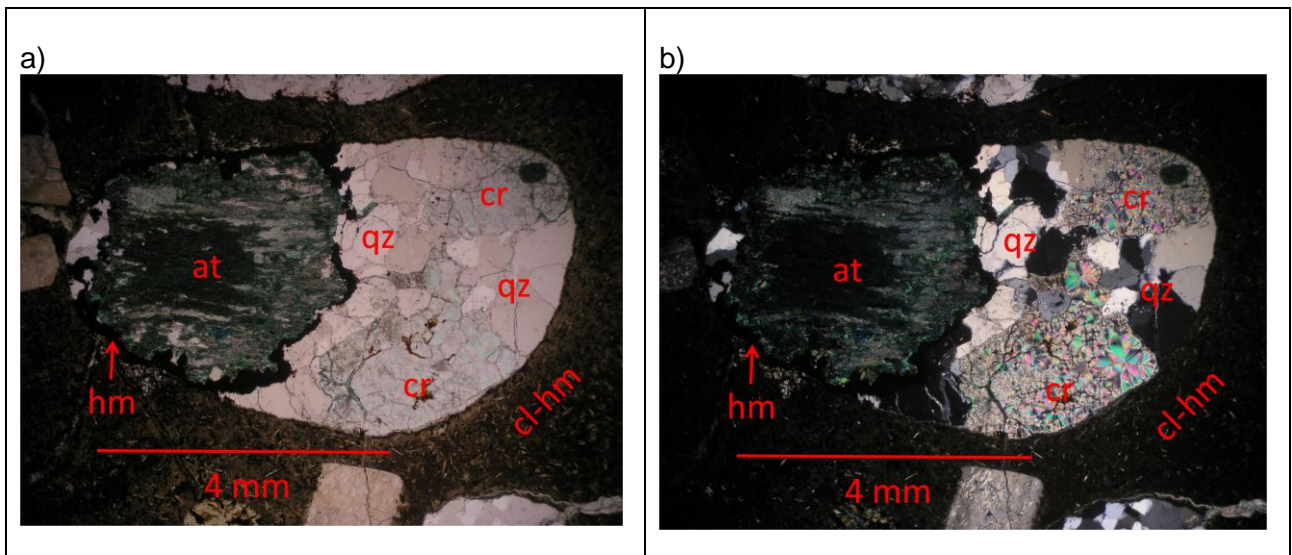
entre las vetillas de crisocola, atacamita y yeso y las amígdalas de crisocola (cr), atacamita (at) y hematita (hm), lo cual revela la presencia de dos generaciones distintas de mineralización supérgena.

4.4.2 Amígdalas

Las amígdalas que se observan microscópicamente corresponden a amígdalas poliminerales que contienen cuarzo- crisocola, y hematita-atacamita- crisocola. Las amígdalas tienen una amplia distribución en el yacimiento y pueden observar con mineralización de mena en todos los sectores estudiados.

Amígdalas de cuarzo-crisocola

Estas amígdalas poseen, desde el borde hacia el centro, cuarzo y crisocola. El cuarzo es monocristalino, el cual se puede observar microscópicamente como un mosaico de granos. Las amígdalas de este grupo por lo general presentan formas esféricas y elipsoidales (Figura 4.15. a, b, c y d).



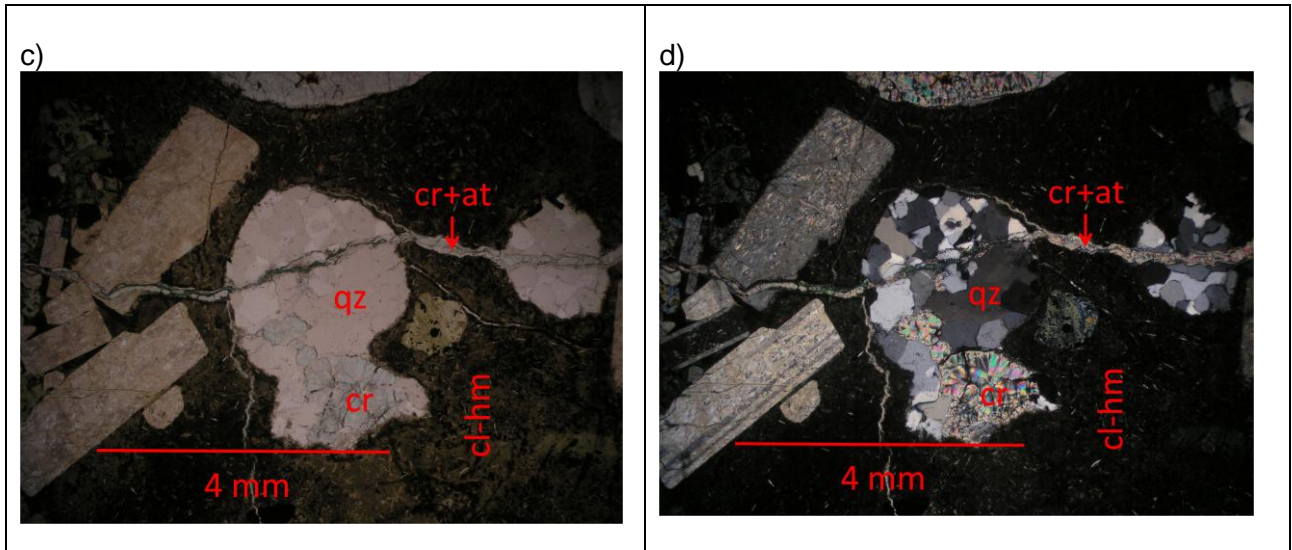


Figura 4.15. Microscopía de amígdalas de cuarzo y crisocola. a) Nícoles Paralelos; b) Nícoles Cruzados. La microscopía revela en la misma amígdala la presencia de dos asociaciones de mineralización: hematita, atacamita y crisocola; cuarzo y crisocola (dioplasa). El estilo de mineralización permite concluir que las dos asociaciones se formaron en el mismo evento de mineralización. c) Nícoles Paralelos; d) Nícoles Cruzados. Las dos últimas fotos muestran una amígdala de cuarzo (qz) y crisocola (cr; dioplasa) cortada por una vetilla de crisocola (cr) y atacamita (at) perteneciente a una segunda etapa de mineralización supérgena.

Amígdalas de hematita, atacamita y crisocola

En este tipo de amígdalas se observa, desde el borde hacia el centro, hematita, crisocola y atacamita. La hematita por lo general forma cúmulos de cristales subhedrales formando un borde de espesor aproximado 0,1 mm. La crisocola crece también en bordes de espesores aproximados de 0,1 mm (Figura 4.15. a y b; Figura 4.16. a y b).

También se observan amígdalas que desde el borde hacia el centro presentan hematita, atacamita y crisocola. La crisocola crece en agregados amorfos dentro de la atacamita (Figura 4.16. c y d).

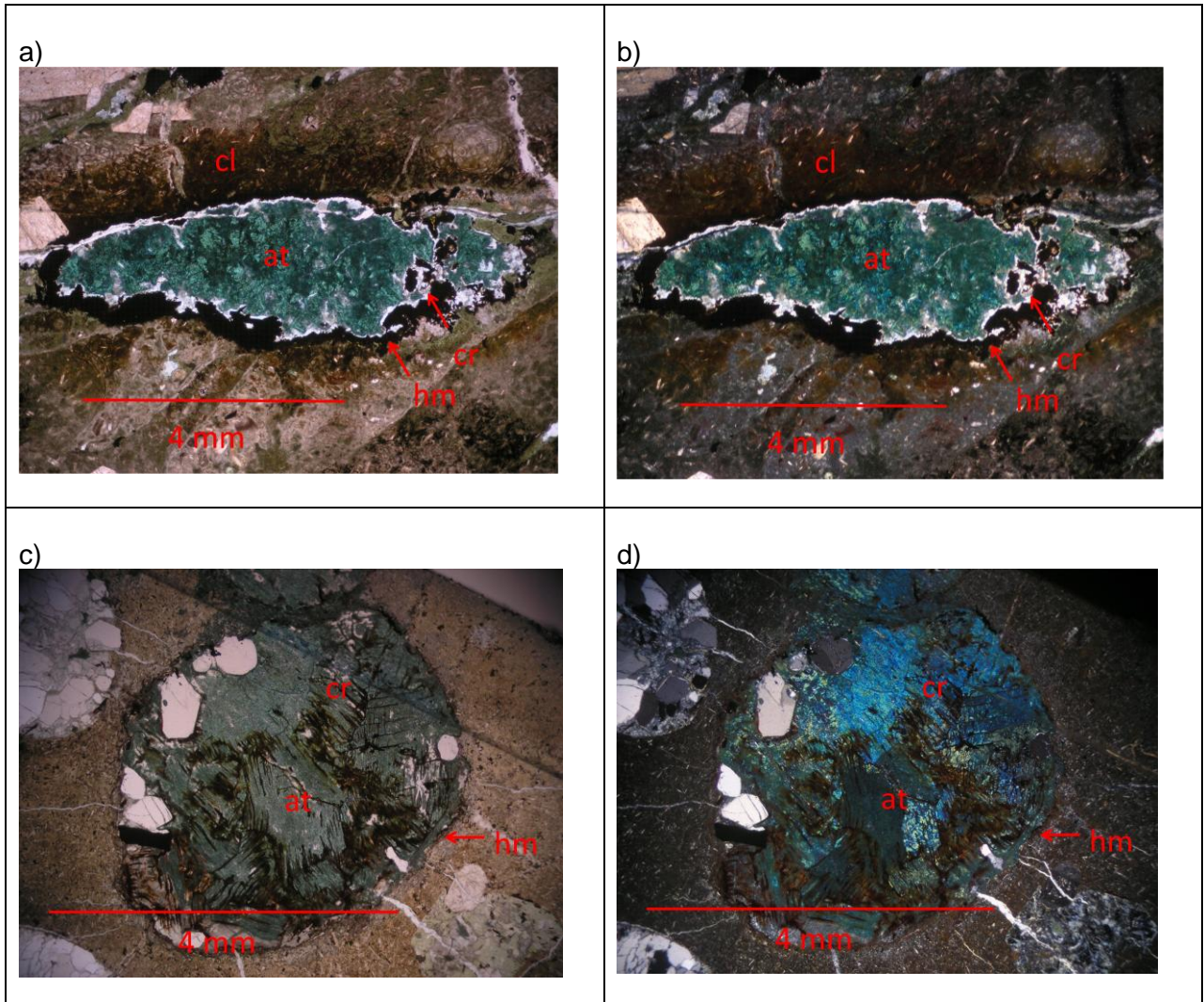


Figura 4.16. Microscopía de amígdalas de hematita, atacamita y crisocola. a) Nícoles Paralelos; b) Nícoles Cruzados. Las primeras dos fotos muestran una vesícula irregular rellena por (desde el borde hacia el centro) hematita (hm), crisocola (cr) y atacamita (at). c) Nícoles Paralelos; d) Nícoles Cruzados. Las dos últimas fotos muestran una amígdala de hematita (hm), atacamita (at) y crisocola (cr), en la cual la crisocola se encuentra asociada a la atacamita.

CAPÍTULO 5

DISTRIBUCIÓN DE LOS OXIDADOS DE COBRE

La distribución de los minerales oxidados de cobre en el yacimiento se ha definido en base a cuerpos de mineralización oxidada, los cuales se desarrollan en una zona de oxidación. Los cuerpos definidos corresponden a aquellos volúmenes que albergan oxidados de cobre. Con esto se pretende establecer la distribución de la mineralización observada en los mapeos de bancos y sondajes, sin abordar el tema de su abundancia relativa o ley de cobre.

Los minerales de mena de cobre que se pueden encontrar en los cuerpos mineralizados corresponden a crisocola, atacamita y menor calcosina. En base a la presencia de estos minerales dentro de un cuerpo mineralizado, se han establecido tres zonas mineralógicas: zona de crisocola, zona de atacamita y crisocola, y zona de atacamita, crisocola y calcosina o “zona mixta”.

A continuación, se señala y describe la distribución espacial de los cuerpos mineralizados y zonas mineralógicas definidas en el yacimiento para cada sector estudiado.

5.1 Bloque Norte

Las secciones mineralógicas confeccionadas con la ayuda de los mapeos de superficie y de sondajes permiten identificar hacia el sur de este sector un conjunto de cuerpos mineralizados mantiformes distribuidos en cuatro niveles, con grandes variaciones en su continuidad lateral (Figura 5.1.) y hacia el norte un conjunto de bolsonadas (Figura 5.2.). Las secciones permiten distinguir asimismo un cuerpo vetiforme de pobre extensión vertical que une a los cuerpos mantiformes y al grupo de bolsonadas (Figura 5.1.).

Los cuerpos mantiformes tienen potencias variables, entre los 15 y 25 m y se extienden lateralmente en la dirección EW varios metros, sobrepasando los 150 m de longitud. Estos cuerpos presentan discontinuidades en la dirección EW, lo cual sugiere que cada nivel hospeda cúmulos de cuerpos lenticulares subconcordantes a la estratificación. La distribución de tales

cuerpos indica que desde el sur hacia el norte están mejor conectados a pobremente conectados lateralmente en la dirección EW. Por lo tanto hacia el sur del Bloque Norte forman un único cuerpo mantiforme en cada nivel, mientras que hacia el norte del mismo forman grupos de cuerpos mantiformes disgregados en un mismo nivel (Figura 5.1. y Figura 5.2.).

Se puede distinguir también que los niveles se intersectan verticalmente hacia el norte del Bloque Norte, lo cual genera, a partir de mantos discontinuos lateralmente y reagrupados verticalmente, formas que sugieren bolsonadas de cobre dispersas (Figura 5.2.).

En los cuerpos mantiformes se aprecia una zonificación general correspondientes a bordes donde la crisocola es el mineral principal y núcleos compuestos por atacamita y crisocola, así como por zonas mixtas.

A partir de relaciones texturales entre litologías, mineralización de mena y alteración entre rocas de este sector con la distribución de los cuerpos mineralizados, se distingue un único cuerpo lenticular que corta verticalmente a la estratificación, reconocido como un cuerpo vetiforme, de espesor variable entre los 10 y 15 m y de poca expresión vertical, no mayor a los 40 m, la cual disminuye su longitud progresivamente hacia el norte.

El cuerpo vetiforme se hospeda principalmente en andesitas porfídicas y andesitas porfídicas amigdaloidales. El estilo de mineralización predominante en el cuerpo vetiforme son amígdalas de calcosina con bordes de reacción de atacamita, y vetillas de crisocola, atacamita y yeso. Existe una concentración considerable de vetillas de yeso en el sector donde se emplaza el cuerpo vetiforme el cual está por lo general asociado a atacamita.

El cuerpo vetiforme alberga zonas de crisocola y atacamita, así como zonas mixtas de alta ley, las cuales pueden llegar a superar el 2% de cobre total. Sin embargo, los cuerpos vetiformes pueden presentar zonas de leyes bajas, muchas veces bajo la ley de corte del yacimiento (menos de 0,35% de ley en cobre total).

Los cuerpos mineralizados se desarrollan en un perfil de espesor máximo aproximado de 180 m. Hacia el norte del Bloque Norte, el espesor máximo de esta zona disminuye drásticamente. No se ha distinguido el nivel de aguas subterráneas en este bloque que permita concluir sobre el espesor mínimo de la zona oxidada.

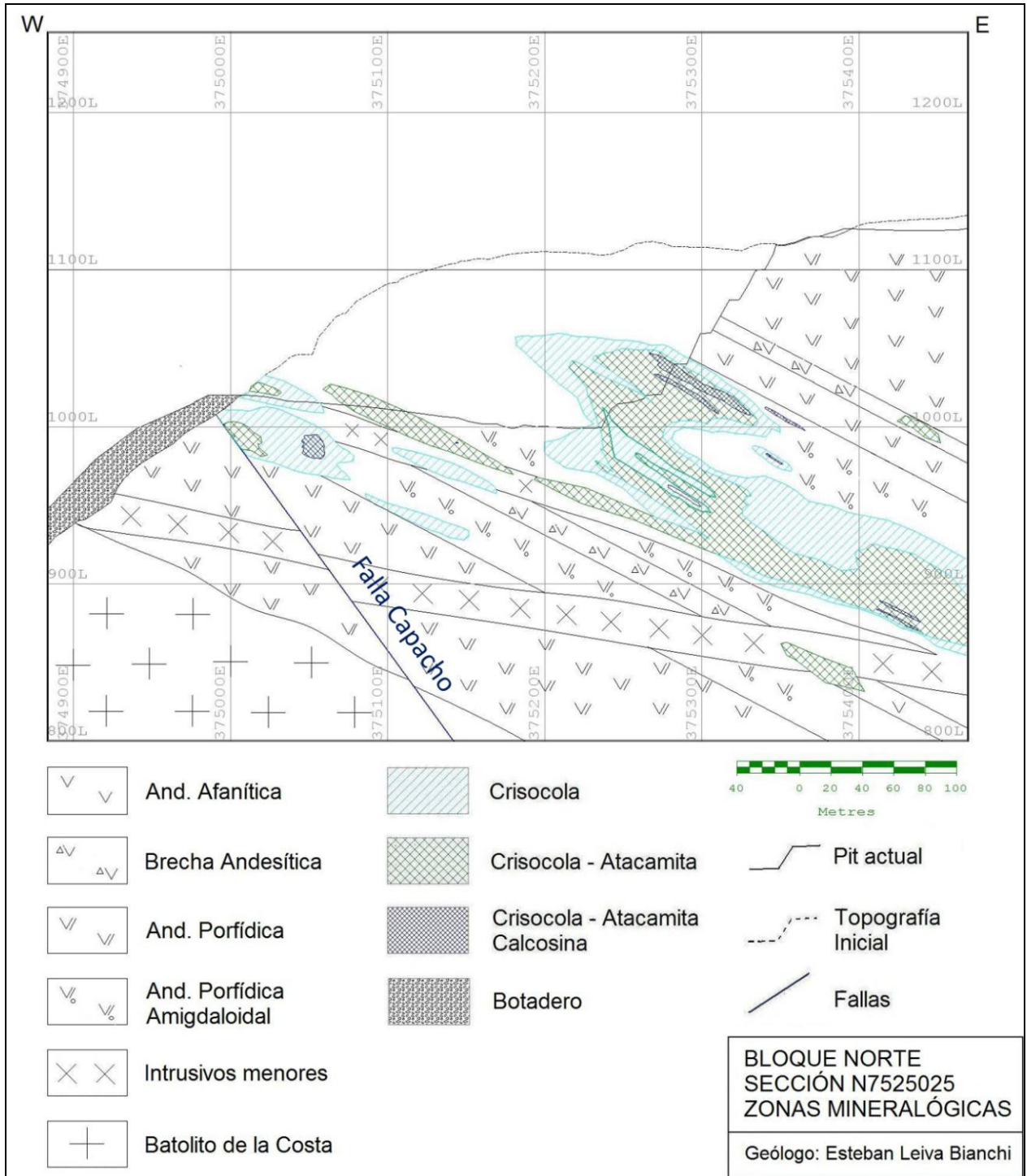


Figura 5.1. Sección mineralógica sector Bloque Norte (N7.525.025). La sección muestra como hacia el norte del sector de estudio, los tres niveles de cuerpos mantiformes pierden continuidad lateral y se intersectan en la vertical, generando cuerpos del tipo bolsnadas.

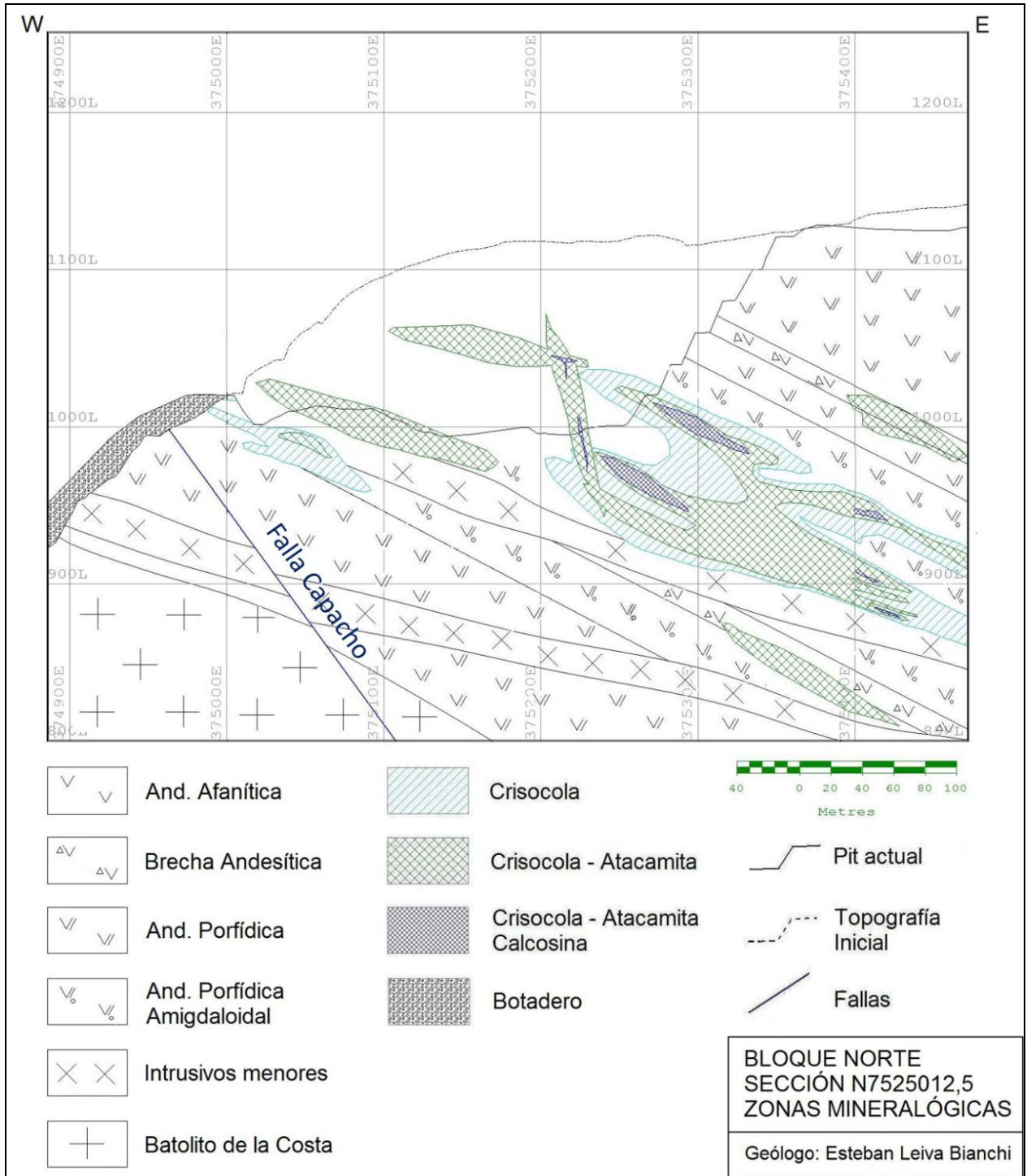


Figura 5.2. Sección mineralógica sector Bloque Norte (N7.525.012,5). La sección permite distinguir a lo menos tres niveles de cuerpos mantiformes y un cuerpo vetiforme. Notar que la crisocola empieza a predominar sobre la atacamita en el nivel inferior.

5.2 Bloque Central

En este sector, se han reconocido entre tres a cuatro cuerpos vetiformes y cinco cuerpos mantiformes. Los cuerpos mantiformes identificados corresponden a cuerpos de rumbo aproximado NS y manteo de 25°E con gran continuidad lateral. Los cuerpos vetiformes corresponden a cuerpos de rumbo aproximado N10W y manteo 70°E (Figura 5.3. y 5.4.).

Los cuerpos mantiformes tienen espesores cercanos a los 10 m y se extienden en la dirección EW una longitud lateral aproximada a los 200 m. Al igual que en el Bloque Norte, los cuerpos mineralizados se hospedan de preferencia en andesitas porfídicas amigdaloidales, sin embargo la mineralización también se hospeda en andesitas porfídicas y brechas andesíticas en donde los estilos característicos de la mineralización para estas rocas son vetillas. No existe una mineralización de alteración anómala en estos cuerpos.

Otra diferencia entre los niveles encontrados es la presencia de los minerales atacamita y crisocola en cada nivel. El cuerpo correspondiente al nivel superior define una basta zona de atacamita y crisocola, mientras que los dos cuerpos subyacentes siguientes presentan en bordes con espesor variable la presencia única de crisocola y en el núcleo zonas de atacamita y crisocola. Finalmente los dos cuerpos mantiformes inferiores están compuestos de crisocola, lo cual sugiere que la crisocola aumenta hacia niveles inferiores del yacimiento.

Los cuerpos vetiformes están muy cerca unos de otros (separados no más de 10 m) y muchas veces se intersectan observando hasta un máximo de cuatro cuerpos en sección EW. Los cuerpos vetiformes poseen espesores variables entre 3 a 20 m, y longitudes verticales mínimas de unos 180 m aproximadamente. Estos cuerpos se hospedan en todos los tipos litológicos reconocibles en el yacimiento. Una diferencia sustancial de los cuerpos vetiformes con respecto a los cuerpos mantiformes es la aparición de calcosina en la zona mixta y la presencia de albitización en la roca huésped en halos poco extensos y localizados en la periferia de cuerpos intrusivos menores adyacentes.

Según se observa de la interpretación mineralógica, la Falla Cantera, que divide al Bloque Central en dos, ha desplazado sinistralmente a los cuerpos mineralizados unos 10 m.

La zona de desarrollo de los cuerpos mineralizados definidos se extiende alrededor de unos 260 m de profundidad y no se ha reconocido el nivel de aguas subterráneas.

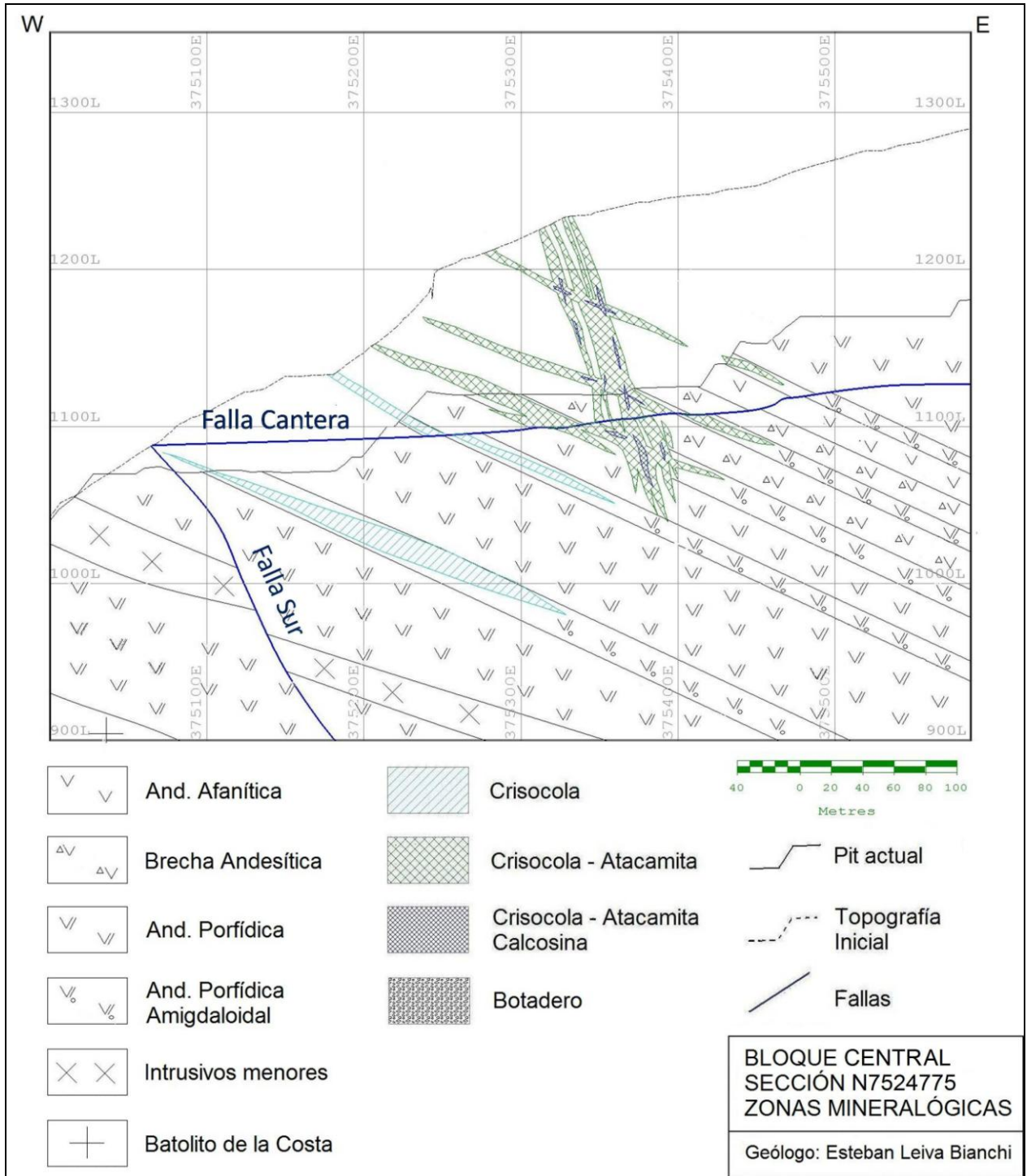


Figura 5.3. Sección mineralógica sector Bloque Central (N7.524.775). La sección muestra cinco niveles de cuerpos mantiformes y cuatro a tres cuerpos vetiformes (dependiendo de cómo se intersecten). Se observa como la Falla Cantera desplaza horizontalmente a los cuerpos mineralizados. Se muestra también como predomina crisocola sobre atacamita en los dos niveles inferiores.

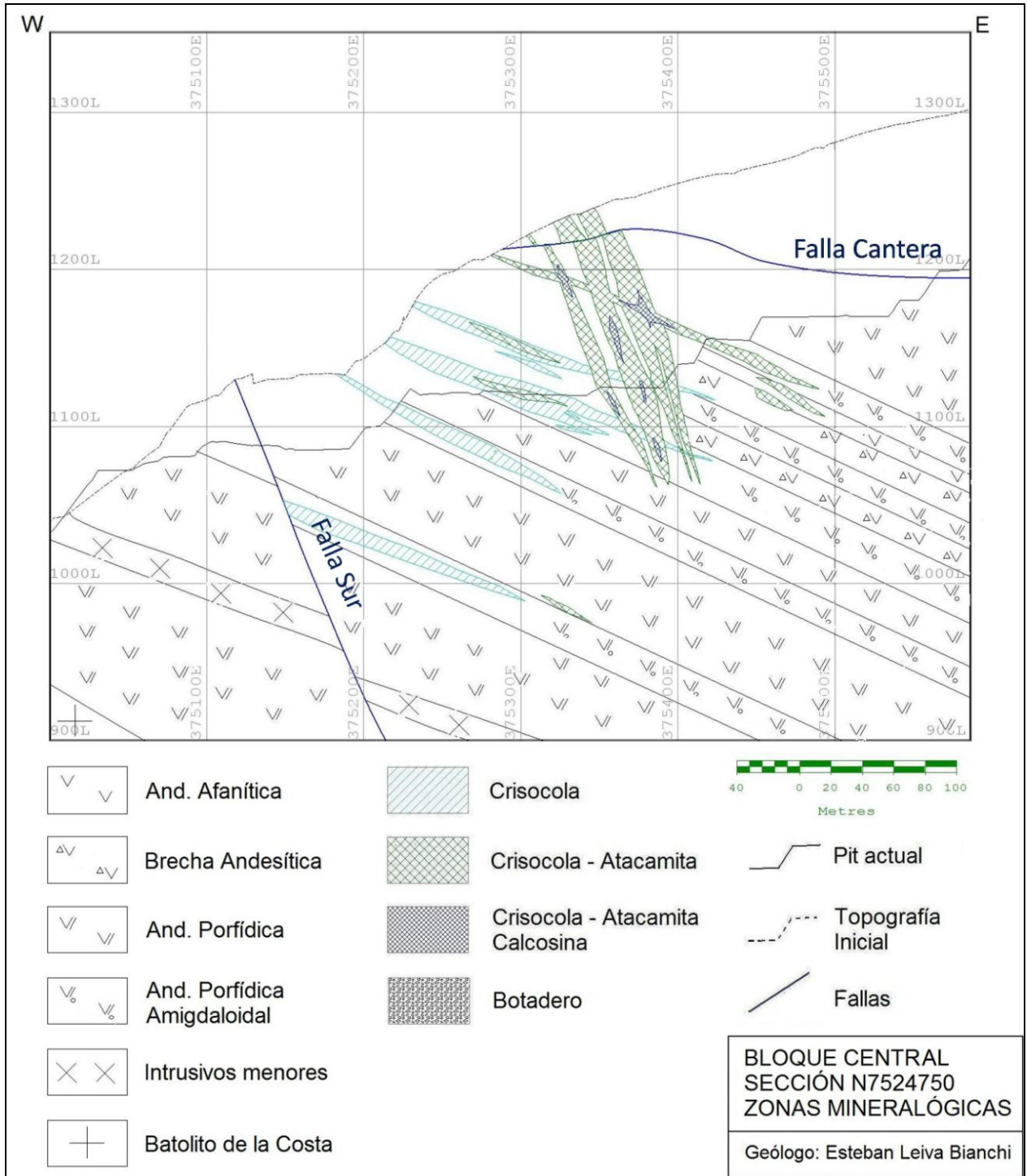


Figura 5.4. Sección mineralógica sector Bloque Central (N7.524.750). La sección muestra cinco niveles de cuerpos mantiformes y cuatro a tres cuerpos vetiformes (dependiendo de cómo se intersecten). Se observa como la Falla Cantera desplaza horizontalmente a los cuerpos mineralizados. Se muestra también como predomina crisocola sobre atacamita en los cuatro niveles inferiores.

5.3 Bloque Sur

En el Bloque Sur se ha podido reconocer tres cuerpos mineralizados. Estos corresponden principalmente a un cuerpo mantiforme de pobre desarrollo en la dirección EW y a un par de cuerpos vetiformes de poca expresión vertical (Figura 5.5.).

El cuerpo mantiforme es subconcordante a la estratificación regional y presenta un espesor aproximado de 20 m y una longitud mínima en la dirección EW de 60 m, según la interpretación de perfiles. En su interior se extiende una zona de crisocola y atacamita, hospedada en rocas andesíticas porfídicas y afaníticas.

Los cuerpos vetiformes son dos cuerpos de rumbo aproximado NS y manteo entre 50° a 62° E, con espesores cercanos a los 10 m y largo aproximado de 120 y 140 m respectivamente. Los cuerpos se intersectan en profundidad generando un único cuerpo vetiforme de rumbo NS y manteo aproximado 60° E. En el cuerpo se desarrolla básicamente una gran zona de atacamita y crisocola sin embargo se pueden apreciar en algunos sectores aislados que la atacamita y la crisocola están acompañadas por calcosina.

El perfil de desarrollo de estos cuerpos en este bloque tiene aproximadamente unos 160 m de profundidad y no se ha reconocido el nivel de aguas subterráneas.

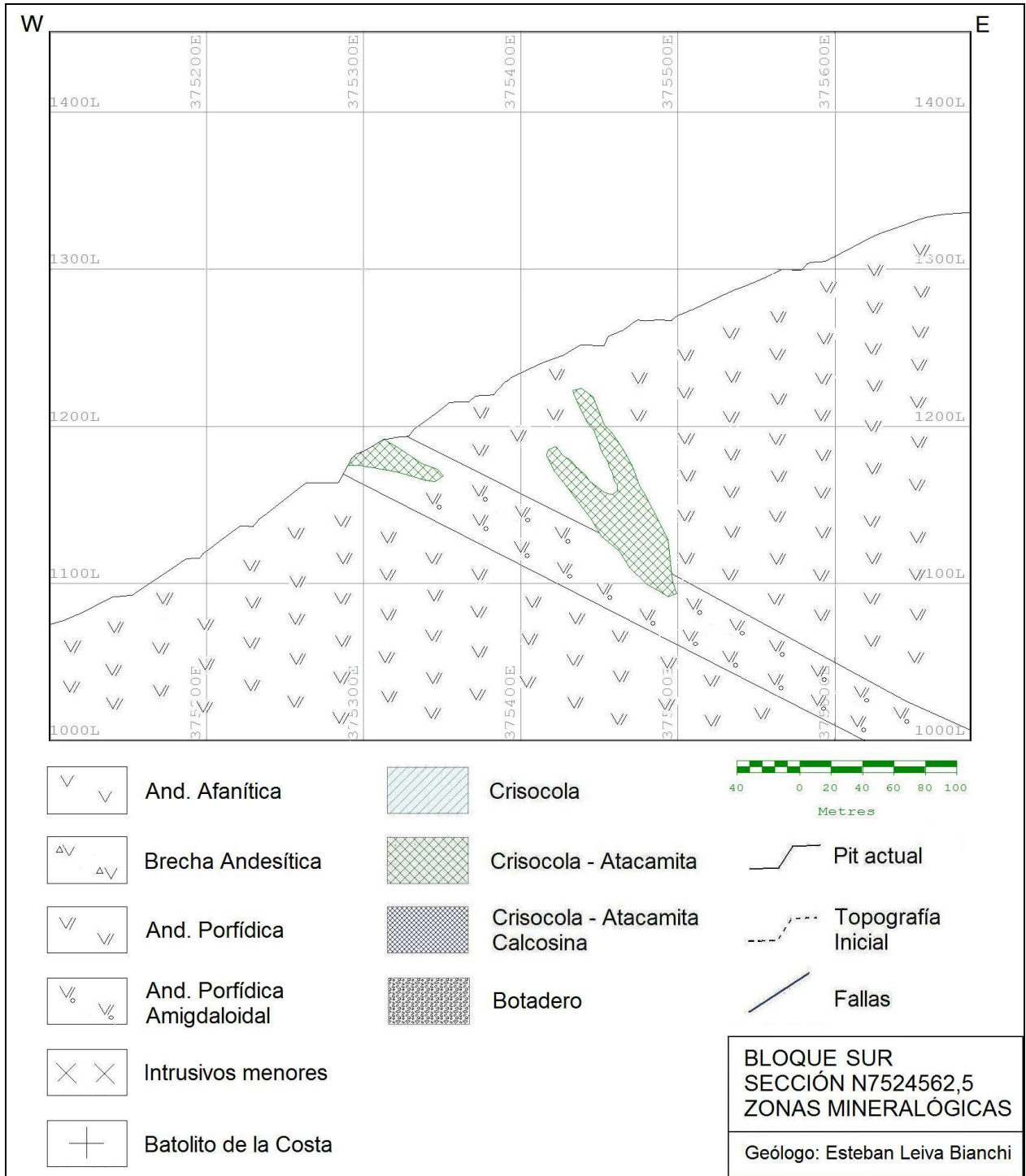


Figura 5.5. Sección mineralógica sector Bloque Sur (N7.524.562,5). La sección muestra un nivel mantiforme de poco desarrollo lateral en la dirección EW y dos cuerpos vetiformes. Se observa como la Falla Cantera desplaza horizontalmente a los cuerpos mineralizados. Los cuerpos delimitados, a diferencia de los Bloques Central y Norte, representan un volumen menor de mineralización económicamente extraíble por la mina.

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

6.1 Discusión

6.1.1 Eventos de mineralización en el yacimiento

Kojima et al. (2003) concluye sobre las etapas de mineralización del yacimiento Mantos de la Luna y otros yacimientos de la Cordillera de la Costa del norte de Chile. Basados en la mineralogía, este autor reconoce cuatro eventos de mineralización:

1. Etapa hidrotermal primaria temprana con desarrollo de albita, sericita, epidota, clorita, cuarzo, pirita, calcopirita y magnetita.
2. Etapa hidrotermal primaria principal con desarrollo de hematita y calcita junto a calcopirita, bornita y calcosina hipógena.
3. Etapa secundaria de enriquecimiento con desarrollo de calcosina supérgena.
4. Etapa de alteración en oxidados con desarrollo de atacamita, crisocola y yeso. Gran parte de la mineralización de oxidados de cobre del yacimiento se formó producto del último evento.

A pesar que es difícil distinguir entre la temporalidad de los minerales de ganga diseminados en la masa fundamental de las rocas volcánicas (clorita, epidota, hematita, magnetita), el orden del relleno en amígdalas y vetillas indica que la hematita se formó más tarde que la calcita y, a su vez, que la calcita es más tardía que el borde (cuarzo) y que el halo (clorita, epidota). Por último, el yeso en vetillas, que corta a las estructuras presentes y está asociado a oxidados de cobre, se formó en la etapa de oxidación. En este sentido, las observaciones recogidas en terreno encajan dentro del esquema propuesto por Kojima et al. (2003).

extenso. Según lo antes expuesto, en el yacimiento los alimentadores principales de la mineralización hipógena observada son el dique Capacho y los diques dioríticos menores, los cuales se emplazaron durante el Jurásico Superior en los sistemas estructurales EW y NS, respectivamente.

6.1.3 Eventos de mineralización supérgena

En base a la distribución y las características de los minerales oxidados de cobre y en especial de los grupos mencionados de minerales de alteración presentes, se distinguen dos eventos de mineralización supérgena en el yacimiento:

- Un primer evento responsable de formar atacamita, crisocola, calcosina, y malaquita en asociación con los minerales de alteración hipógena cuarzo-calcita y hematita.
- Un segundo evento posterior al anterior que es el responsable de formar crisocola, atacamita y yeso.

Las evidencias que soportan este modelo son:

- Distribución de los minerales de alteración asociados a la mena, donde el yeso se encuentra como alteración supérgena superpuesta a las áreas integradas por los demás minerales de alteración.
- Características de las ocurrencias estudiadas, en donde las vetillas de yeso se presentan como estructuras unidireccionales, de mayor continuidad y menor resistencia al cizalle, versus estructuras polidireccionales, del tipo amígdalas y vetillas, de menor continuidad y mayor resistencia al cizalle.
- Relaciones de corte entre las asociaciones de alteración cuarzo-calcita-hematita y yeso observadas en vetillas de distintos sectores del yacimiento, en bancos y muestras de mano, las cuales son evidencias también de la temporalidad de tales eventos.
- Relaciones de corte observadas en oxidados a nivel macroscópico y microscópico en el yacimiento tanto en vetillas como amígdalas que contienen mineralización

oxidada de cobre, revelan la presencia de dos generaciones de minerales oxidados de cobre.

6.1.4 Mecanismos de formación de los minerales oxidados de cobre

Diversos autores (Greiner, 1982; Definis et al., 2000) han propuesto que el principal mecanismo de formación de mineralización en oxidados de cobre del yacimiento es la oxidación in-situ. Las evidencias recolectadas en este trabajo que sustentan un modelo de estas características son:

- Las bajas cantidades de pirita o evidencias de lixiviación de la misma (boxwork de limonitas) y presencia de cavidades irregulares rellenas de limonitas interpretadas como la lixiviación de sulfuros que producen ácidos más débiles (calcosina) son argumentos fuertes para caracterizar a una fuente en la cual domina la oxidación in-situ.
- La presencia de amígdalas de hematita terrosa con bordes de atacamita en algunos sectores indicarían la formación de oxidados de cobre in-situ a partir de la asociación calcosina-hematita. Asimismo, la calcosina y la hematita serían producto de la oxidación de una mineralogía primaria pobre en pirita, consistente principalmente en calcopirita y bornita.
- La ocurrencia y relación espacial de la atacamita, hematita y relictos de calcosina en los sectores estudiados.
- La presencia de atacamita relleno de cavidades irregulares relacionadas con relictos de sulfuros, la cual indica la existencia de mineralización hipógena previa al evento de mineralización supérgena.
- Presencia de mineralización hipógena aislada en algunos sectores (pirita, calcopirita y bornita).
- Asociaciones y texturas de reemplazo de sulfuros por oxidados de cobre observadas macroscópicamente y microscópicamente.

6.1.5 Origen y mecanismos de transporte de las soluciones supérgenas

Sobre el origen de las aguas que formaron la mineralización supérgena de los yacimientos de cobre del Norte de Chile y, en particular, del yacimiento Mantos de la Luna, se han propuesto diversas teorías que involucran fluidos de distintas naturalezas mediante diversos procesos de removilización. La más difundida es el modelo clásico de mineralización supérgena el cual involucra aguas meteóricas percolantes en la oxidación de sulfuros hipógenos la cual pudo haber sido la causante de una parte importante de la mineralización supérgena del yacimiento. Este proceso debió necesariamente desarrollarse en condiciones de clima semiárido (> 10 mm/año de precipitaciones) entre los 45 y 9 a 5 Ma (Rech et al., 2006; Arancibia et al., 2006).

Sin embargo, Reich et al. (2009^b) argumentan que gran parte de la atacamita generada antes del comienzo de la hiperaridez debió haber sido disuelta por la infiltración de los últimas aguas meteóricas percolantes (entre los 5 a 1,5 Ma). Por lo tanto una cantidad no menor de la atacamita supérgena conservada en los yacimientos de cobre actuales se ha formado desde los 1,5 Ma hasta la actualidad. Esto ya ha sido ratificado con dataciones ^{230}Th - ^{234}U en cristales de yeso asociados a atacamita en distintos depósitos del Norte de Chile. En particular, para Mantos de la Luna, la atacamita tiene una edad de 84 ± 11 ka (Reich et al., 2009^b).

Reich et al. (2008, 2009^a) y Cameron et al. (2007) proponen como origen de la mineralización supérgena reciente, la presencia de soluciones hipersalinas, relacionadas con aguas de formación profunda que ascendieron a la superficie a través de procesos de bombeo tectónico a lo largo de fallas y fracturas, y que son capaces de lixiviar minerales supérgenos de cobre preexistentes, además de permitir la formación de atacamita mediante el reemplazo de la mineralización primaria y secundaria de cobre. Una evidencia del origen de las soluciones supérgenas proviene del estudio de Reich et al. (2009a) de la geoquímica del yodo en inclusiones de yodargirita (yoduro de plata) hospedada en calcosina supérgena, cuyas concentraciones son más parecidas a las del yodo en las aguas de formación profunda hipersalinas que a las aguas meteóricas o subterráneas

Como ya se ha mencionado, las relaciones de corte entre vetillas de yeso y vetillas de cuarzo-calcita-hematita-crisocola observadas en algunos sectores del yacimiento Mantos de la Luna son evidencia concluyente para identificar al menos dos eventos de mineralización supérgena. En contexto de los mecanismos de transporte de fluidos supérgenos ya propuestos,

una primera generación de crisocola y atacamita encontrada en Mantos de la Luna junto a los minerales de origen hipógeno cuarzo, calcita y hematita en vetillas pudo haberse formado durante la etapa de mineralización por aguas subterráneas, mientras que una segunda generación de crisocola y atacamita junto al mineral de origen supérgeno yeso encontrados en una misma vetilla pudieron formarse durante la etapa de formación de atacamita por aguas hipersalinas de formación profunda ascendentes por bombeo tectónico.

Un argumento a favor del transporte vertical de soluciones es la distribución exclusiva de los minerales oxidados de cobre asociados a yeso por medio de cuerpos vetiformes. En menor escala, se ha observado en estos cuerpos una orientación subvertical de las vetillas de yeso, gran continuidad de las estructuras y desarrollo preferencial en zonas de falla y fracturamiento intenso, características que muestran que los fluidos que precipitaron yeso y atacamita sufrieron transporte vertical a través de fallas y fracturas. El transporte vertical puede estar relacionado al bombeo tectónico propuesto por Reich et al. (2009^a, 2009^b).

En consideración a las especies minerales encontradas en este tipo de ocurrencias se propone que los fluidos hipersalinos deben estar concentrados en iones cloruro e iones sulfato de tal manera de permitir el transporte de Cu y precipitar las especies antes mencionadas. Condiciones hipersalinas favorecerían la precipitación de yeso.

6.1.6 Condiciones termodinámicas de las soluciones mineralizadoras

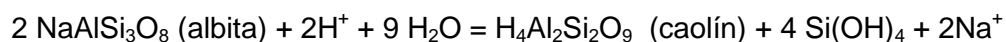
Bajo condiciones oxidantes y de bajo pH, el cobre y el hierro se transportan como iones cúprico Cu^{+2} y ferroso Fe^{+2} . En particular, las interacciones entre solución electrolítica y roca caja cumplen un rol preponderante sobre el valor del pH. El pH de las soluciones lixiviantes es entendido como el equilibrio neto entre la producción y consumo de ácido sulfúrico. La producción de ácido sulfúrico está controlada principalmente por la cantidad de sulfuros presentes y la relación entre sulfuros productores y no productores, mientras que el consumo de ácido sulfúrico está principalmente relacionado con la reactividad de la roca caja.

La atacamita y la crisocola se forman de la precipitación de fluidos con pH moderadamente ácido a neutro (5 a 7). Por lo tanto, la producción de ácido sulfúrico en la solución electrolítica depende en gran medida de la escasez de pirita y la abundancia de calcosina, la cual no genera ácido sulfúrico durante su oxidación. En efecto, la baja cantidad de pirita e indicios de la existencia de la misma, así como la presencia de calcosina a distintos

niveles de mineralización supérgena de cobre observada del yacimiento, está relacionada al equilibrio pH de las soluciones presentes durante la lixiviación.

La reactividad de la roca está íntimamente relacionada a su mineralogía de alteración. Una roca caja reactiva debe presentar una mineralogía capaz de interactuar con las soluciones lixiviantes intercambiando cationes y consumiendo hidrógeno mediante la hidrólisis de silicatos y óxidos originales en la roca, tales como feldespatos, minerales máficos y carbonatos. Por otra parte, la mineralogía de una roca caja poco reactiva se compone de especies que tienen una capacidad limitada para intercambiar cationes con la solución y, a su vez, neutralizar las soluciones lixiviantes, como es el caso de los filosilicatos y las arcillas.

La roca lixiviada y oxidada corresponde principalmente a las lavas de la Formación La Negra las cuales presentan una mineralogía primaria en plagioclasas y minerales máficos, así como una mineralogía de alteración hipógena compuesta por cuarzo, albita, calcita, hematita y clorita, por lo tanto, es una roca muy propensa a la hidrólisis. Por otra parte, en los halos de alteración de los intrusivos existen zonas aisladas y acotadas fuertemente albitizadas, las cuales son también ambientes propicios para la hidrólisis de la albita y disminución del pH de las soluciones supérgenas según muestra la siguiente fórmula:



Debido principalmente a las características del pH de las soluciones presentes se puede concluir sobre una lixiviación ineficiente, la cual se manifiesta en Mantos de la Luna en niveles con escasez de boxwork de pirita, casi nula presencia de pirita y oxidación in situ de sulfuros de cobre relictos.

6.1.7 Desarrollo del perfil de mineralización

Según las especies minerales reconocidas en la zona oxidada (crisocola y atacamita), las condiciones termodinámicas en las cuales precipitaron son oxidantes (sobre el nivel de aguas subterráneas) y de pH entre 5 a 7.

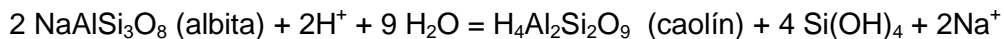
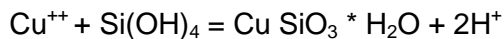
La formación de la atacamita y la crisocola depende de una alta actividad de iones cloruro y silicio respectivamente, y de una baja actividad de aniones SO_4^{-2} y CO_3^{-2} las cuales están relacionadas a la formación de brocantita y malaquita, minerales ausentes en el yacimiento y

que se forman bajo las mismas condiciones de oxidación y pH. Además una alta actividad del cobre y de iones Cl^- en la solución favorece la precipitación de atacamita.

Sin embargo la actividad de SO_4^{-2} no ha sido despreciable como lo muestra la formación de yeso durante el último evento de mineralización supérgena. Por lo tanto, las actividades de Cl^- y Cu^{++} debiesen ser considerablemente mayores para precipitar atacamita.

Por otra parte, bajo condiciones de alta actividad de SO_4^{-2} , si el pH es cercano a neutro, la calcosina al oxidarse debiese generar brocantita, pero si además la actividad del ión cloruro es alta, la calcosina es reemplazada por atacamita (Chávez, 2000), rasgo común de todas las zonas de mixtos observadas que posee el yacimiento y que indica que el ión cloruro tuvo un rol preponderante en el transporte de metales en el yacimiento.

La crisocola se forma a partir de la sobresaturación del ácido monosilícico el cual, a su vez, se forma a partir de la disolución de albita y otros silicatos.



La albitización observada en las rocas andesíticas es escasa y sólo visible a nivel microscópico. Sin embargo, las campañas de sondajes y las observaciones en terreno han hallado evidencias de albitización en el halo externo de los intrusivos. Una hipótesis es que gran parte del ácido monosilícico haya sido removido desde estas zonas y las soluciones hayan ascendido verticalmente a través de fallas y fracturas, removilizando parte del cobre y que posteriormente la saturación de ácido monosilícico haya permitido la precipitación de crisocola. Otra hipótesis es que la fuente que aporta el ácido monosilícico esté más profunda que lo que se cree y que el transporte vertical haya sido aún mayor.

El transporte de cobre en la solución está limitado principalmente por el pH de los fluidos, el cual va aumentando a medida que interactúa con la roca. El orden observado de las especies dentro de una misma ocurrencia, ya sean vetillas o amígdalas (crisocola en los bordes y atacamita hacia el centro del relleno) responde a la precipitación secuencial de oxidados de cobre que puede ser explicada por estos cambios de pH. Por otra parte, la actividad de Cl^- fomenta la movilidad de Cu^{++} , favoreciendo el transporte vertical de las soluciones.

Como indican las campañas de sondajes, el yacimiento Mantos de la Luna presenta un gran desarrollo de su zona oxidada y mixta (aproximadamente unos 200 m), sin embargo no se observa una zona de enriquecimiento supérgeno ni una zona de mineralización hipógena en profundidad. La ausencia de una zona de mineralización secundaria puede deberse, entre otros factores, a la escasez de pirita. Por otra parte, la mineralización hipógena que se encuentra en el yacimiento está asociada a los intrusivos menores, reemplazadas en algunos casos por mineralización supérgena y no tiene una distribución amplia en el yacimiento como para ser caracterizada en un mismo perfil de mineralización.

6.1.8 Sobre la caracterización de nuevas especies de mena en minerales oxidados de cobre

La principal mineralización de oxidados de cobre observada en el yacimiento Mantos de la Luna a lo largo de las campañas de terreno fue, en orden de abundancia, crisocola y atacamita.

Sin embargo, los análisis de difracción de rayos X realizados durante el presente año entre los que se cuentan los realizados durante la campaña de terreno, rinden cuenta de la presencia del mineral dioptasa en proporciones menores al 1% de roca total.

En ninguna de las muestras de mano descritas macroscópicamente durante las jornadas de terreno se logró determinar algún mineral que compartiera las propiedades físicas del mineral dioptasa. Sin embargo, en la mayoría de los cortes microscópicos realizados en la crisocola macroscópica, se pudo observar tanto en amígdalas como en vetillas un tipo de crisocola por lo general asociada a cuarzo, bien cristalizada con un alto color de birrefringencia y extinción tipo abanico que, por sus propiedades ópticas observadas, puede ser considerada dioptasa, en porcentajes menores al 1% en roca total. Los análisis de difractometría de rayos X en muestras fraccionadas lograron confirmar la presencia de dioptasa en amígdalas asociadas a cuarzo.

Una hipótesis que explique la formación de dioptasa con estas características es que las soluciones supérgenas involucradas deben estar excepcionalmente concentradas en ácido monosilícico e iones cobre. De esta forma se podría obtener un gel de sílice con contenido de cobre libre de impurezas en la estructura atómica del mineral. Que la dioptasa esté generalmente asociada a cuarzo indica que esta se formó durante el primer evento de mineralización supérgena, por lo tanto el estudio detallado de las condiciones de formación de

la dioplasa puede ser útil para determinar algunas de las características de las soluciones supérgenas involucradas durante el primer evento.

6.1.9 Distribución de los oxidados de cobre

La forma, distribución y orientación de los cuerpos mineralizados de cobre, así como la localización de sus zonas minerales, son consecuencia directa de los procesos geológicos que formaron la mineralización supérgena en el yacimiento.

Debido a la ausencia de un nivel continuo y homogéneo de mineralización, a la presencia de zonas aisladas y reducidas de sulfuros, y presencia de mineralización hipógena y de enriquecimiento en algunos sectores del yacimiento, no es posible establecer un perfil de mineralización supérgena.

Explicar la heterogeneidad de la distribución solamente con el modelo clásico de mineralización supérgena por aguas meteóricas percolantes es bastante difícil. Frente a esta problemática, se propone una explicación que involucre junto a los mecanismos anteriores, procesos supérgenos que sean capaces de removilizar una parte del cobre en solución. En apoyo a esta hipótesis, ya se ha propuesto que existen por lo menos dos eventos de mineralización en el yacimiento y, en adición, Reich et al. (2009^a) indican que existió transporte vertical de soluciones supérgenas en el yacimiento mediante bombeo tectónico. El bombeo tectónico pudo haber deformado y redelimitado el perfil clásico de mineralización preexistente removilizando grandes cantidades de cobre en solución desde profundidad hacia el techo, generando heterogeneidades, redistribuciones y reconcentraciones respecto a las especies minerales existentes dentro del mismo sector de estudio. El proceso de transporte vertical de soluciones supérgenas es vital para comprender la génesis en este y otro tipo de yacimientos de cobre que están casi exclusivamente oxidados y que no presentan evidencias directas de transporte lateral de soluciones supérgenas.

Por otra parte, la existencia de zonas aisladas y localizadas de sulfuros hipógenos indica que la lixiviación fue poco efectiva y se limitó a redistribuir las especies minerales en márgenes acotados. Como ya se ha mencionado, las características de la roca huésped de la mineralización y la presencia de pirita son los principales controles en una lixiviación deficiente en el yacimiento.

La presencia de sectores localizados y aislados de mineralización en sulfurados de cobre se da por lo general en los cuerpos vetiformes, por lo tanto estos cuerpos pueden estar íntimamente relacionados a procesos de constante recirculación de fluidos con desarrollo de zonas de enriquecimiento supérgeno. Por último, la cercanía espacial que tienen estos cuerpos con respecto a parte de la mineralización hipógena observada (pirita, calcopirita, calcosina y bornita) permite establecer relaciones entre estos cuerpos y probables alimentadores de soluciones supérgenas.

La ausencia del nivel de aguas subterráneas y un nivel de mineralización supérgena distinguible impide distinguir como las fluctuaciones en el nivel freático tuvieron influencia en la mineralización.

Observando la continuidad de los cuerpos en los tres sectores estudiados, en particular los cuerpos vetiformes, podemos concluir que un factor importante que controló la distribución de la mineralización son las fallas de orientación aproximada EW. Estos sistemas desplazan a los cuerpos mineralizados de manera sinistral varios metros en el rumbo.

Otro factor importante que tiene que ver con el emplazamiento de los cuerpos vetiformes son arreglos estructurales de orientación NS cuya relación directa se puede observar en cada uno de los sectores estudiados. Estos sistemas estructurales pueden estar relacionados a alimentadores de la mineralización, posiblemente diques dioríticos emplazados en profundidad acompañados de halos de mineralización hipógena, desde los cuales las soluciones ascendentes se dotaron de altas concentraciones de cobre y otros metales.

El control más relevante del emplazamiento de cuerpos mantiformes en el yacimiento es el litológico, dado que se observa que la mineralización se concentra en la sección amigdaloidal porfídica de las lavas. La reconcentración de los cuerpos mantiformes que se ve en el sector Bloque Norte tiene que ver con la presencia de grandes secciones amigdaloidales, los cuales reconcentran la mineralización y generan bolsonadas.

Un aspecto importante es la relación existente entre las zonas mineralógicas de cada yacimiento. Las zonas exteriores a los cuerpos mineralizados corresponden principalmente a crisocola, mientras que hacia el interior aparecen acompañados de atacamita. Las zonas de mayor enriquecimiento corresponden a las zonas de mixtos, las cuales se hospedan al interior de los cuerpos interpretados, en particular de los cuerpos vetiformes. Esta zonificación puede

ser interpretada por cambios composicionales que sufre la solución supérgena mientras interactúa con la roca huésped. Hacia los límites del cuerpo mineralizado, la solución puede enriquecerse en ácido monosilícico y empobrecerse en iones cloruro permitiendo que el borde aumente la crisocola.

Por otra parte, en el Bloque Norte y Central, se detecta un aumento de las zonas de crisocola en profundidad. Si las soluciones supérgenas sufrieron transporte vertical en el pasado, estos aumentos pueden ser interpretados como la precipitación de crisocola en profundidad desde fluidos ligeramente ácidos los cuales, a medida que ascienden, se neutralizan, favoreciendo las condiciones termodinámicas que permitan la formación de atacamita.

6.2 Conclusiones

- En el yacimiento Mantos de la Luna, el origen de los minerales oxidados de cobre corresponde a la oxidación in-situ.
- Las formas de los cuerpos mineralizados de oxidados de cobre distinguibles en Mantos de la Luna son cuerpos vetiformes, cuerpos mantiformes y bolsonadas, producto de la reconcentración de cuerpos mantiformes y vetiformes en zonas de mayor permeabilidad.
- Una baja proporción de pirita e indicios de lixiviación en piritas (boxwork rellenos con limonita) y la abundancia de calcosina e indicios de lixiviación en sulfuros de cobre (oquedades rellenas con limonita) indican que la lixiviación de sulfuros determinó fluidos mineralizadores de pH moderado a neutro. Esto se traduce, en definitiva, en un transporte limitado y lixiviación ineficiente.
- Se distinguen por lo menos dos eventos de mineralización supérgena en el yacimiento. El primer evento fue responsable de formar atacamita y crisocola en asociación con calcosina y los minerales de alteración cuarzo-calcita y hematita, y un segundo evento responsable de formar crisocola, atacamita y yeso. Para el primer evento se propone mecanismos de transporte por aguas meteóricas percolantes. Para el último evento, se proponen mecanismos de bombeo tectónico en aguas de formación profunda.

- Las especies minerales de cobre identificadas en el yacimiento Mantos de la Luna, en orden decreciente son: crisocola (y/o dioplasa), atacamita (y/o paratacamita), calcosina, y menores cantidades de tenorita, malaquita, melanotalita y nantokita. Los principales parámetros termodinámicos en la formación de tales minerales son Eh-pH y mayor actividad de los iones Cl^- y Si^{+4} , respecto a SO_4^{-2} y CO_3^{-2} .
- Parte de la atacamita formada durante el primer evento corresponde a la oxidación de la calcosina y la crisocola se forma producto de la saturación del ácido monosilícico en la solución hipógena. El orden de las especies minerales dentro de una misma ocurrencia, indica que la crisocola en ambos eventos precipita antes que la atacamita, lo cual indica aumento leve del pH y caídas de las actividades en primer término de ácido monosilícico y por último de iones cloruro en las soluciones involucradas.
- Existe un control estructural en el emplazamiento de los cuerpos vetiformes, este es el emplazamiento a través de arreglos de estructuras de orientación NS. Por último en el emplazamiento de los cuerpos mantiformes existe un control litológico, en donde la mineralización se concentra en las secciones amigdaloidales de las coladas de lava. Las fallas principales (Falla Capacho, Falla Albornoz, Falla Cantera y Falla Sur) cortan y desplazan de modo sinistral los cuerpos mineralizados del yacimiento.

REFERENCIAS

Referencias Bibliográficas

ARANCIBIA, G., MATTHEWS, S., DE ARCE, C. 2006. K-Ar y Ar^{40}/Ar^{30} geochronology of supergene processes in the Atacama Desert, Northern Chile: Tectonic and climatic relations. *Journal of Geological Society, Londres*, v. 163, p. 107-118.

BOBENRIETH, L. 1980. Geología de los Cuadrángulos Cerro Desamparado y Cerro Soledad, Regiones de Tarapacá y Antofagasta. Memoria de Título (Inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, 171 p.

BORIC, R., DIAZ, F., y MAKSAEV, V. 1990. Geología y yacimientos metálicos de la II Región, Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N°40, 246 p.

CAMERON, E., LEYBOURNE, M., PALACIOS, C. 2007. Atacamite in the oxide zone of cooper deposits in Northern Chile: involvement of deep formation Waters? *Mineralium Deposita*, v. 42, p. 205-218.

CEMBRANO, J., LAVENU, A., YÁÑEZ, G., RIQUELME, R., GARCÍA, M., GONZÁLEZ, G., HÉRAIL, G. 2007. Neotectonics. En: Moreno, T. & Gibbons, W. (eds) *The Geology of Chile*. The Geological Society, London, p. 231-261.

CHARRIER, R., PINTO, L., RODRÍGUEZ, M. P. 2007. Tectonostratigraphic Evolution of the Andean Orogen in Chile. En: Moreno, T. & Gibbons, W. (eds) *The Geology of Chile*. The Geological Society, London, p. 179-199.

CHAVEZ, W. 1985. Geological setting and the nature and distribution of disseminated cooper mineralization of the Mantos Blancos district, Antofagasta Province, Chile. Ph. D. Thesis. California University, Berkeley, 142 p.

CHAVEZ, W. 2000. Supergene Oxidation of Cooper Deposits: Zoning and Distribution of Copper Oxide Minerals. En *SEG Newsletter N° 41*, Abril 2000, Society of Economic Geologists, 11 p.

DEFINIS, A. y BELLO, J. L. 2000. *El Yacimiento de Cobre Mantos de la Luna: Nuevos Antecedentes de un Origen Hidrotermal Epigenético*. Resúmenes del IX Congreso Geológico Chileno, Puerto Varas, 117 p.

ESPINOZA, S. 1981. *Esbozo metalogénico del distrito de Michilla, II Región, Chile*. In Coloquio sobre Volcanismo y Metalogénesis, No. 1, Actas, Universidad del Norte, Departamento de Geociencias, Antofagasta, p. 71-81.

FERRARIS, F. y DI BIASE, F. 1978. Hoja Antofagasta, Región de Antofagasta. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 30, 48 p.

GAINES, R., SKINNER, C., FOORD, E., MASON, B., ROSENZWEIG, A., 1997. *Dana's new mineralogy*. John Wiley & Sons, Inc.

GARCÍA, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. In Simposium sobre el Geosinclinal Andino. Sociedad Geológica de Chile. No. 3, Santiago, 1962, 138 p.

GREINER, G. 1982. Geología Económica del Yacimiento Cuprífero Mantos de la Luna. Memoria de Título. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.

HARTLEY, A. y JOLLEY, E. J. 1995. Tectonic implication of Late Cenozoic sedimentation from the Coastal Cordillera in northern Chile (22°–24°S). *Journal of the Geological Society, London*, 152, p. 51–63.

HERM, D. 1969. *Marines Pliozän und Pleistozän in Nord und Mittel Chile unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung der Mollusken-Faunen*. Zitteliana, Alemania. 159 p.

ISHIHARA, S. 1985. Concentration of heavy metals during granitoid magmatic processes. In *Mineral resources and engineering geology* (Sasaki, A. et al.; editors). John Wiley and Sons, p. 24-27.

KOJIMA, S., ASTUDILLO, J., ROJO, J., TRISTÁ, D., HAYASHI, K. 2003. Ore mineralogy, fluid inclusion, and stable isotopic characteristics of stratiform copper deposits in the coastal Cordillera of Northern Chile. *Mineralium Deposita*, 38, p. 208-216.

KUNTZ, J. 1928. *Monografía Minera de la Provincia de Antofagasta*. Santiago.

MAKSAEV, V., BORIC, R., ZENTILLI, M., REYNOLDS, P. H. 1988. Significado metalogénico de dataciones K-Ar y ^{40}Ar - ^{39}Ar y trazas de fisión de zonas mineralizadas en el Norte Grande de Chile. Proceedings 5th Congreso Geológico Chileno, Santiago, 1, B65–B86.

MAKSAEV, V. y MARINOVIC, N. 1980. Cuadrángulos Cerro de la Mica, Quilagua, Cerro Posada y Oficina Prosperidad, Región de Antofagasta. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 45-48, Santiago, 63 p.

MAKSAEV, V., TOWNLEY, B., PALACIOS, C., CAMUS, F. 2007. Metallic Ore Deposits. En: Moreno, T. & Gibbons, W. (eds) *The Geology of Chile*. The Geological Society, London, p. 179-199.

NARANJO, J.A. y PUIG, A. 1984. Hojas Taltal y Chañaral, Regiones de Antofagasta y Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 62-63, 140 p.

NIEMEYER, H., GONZÁLEZ, G., MARTÍNEZ-DE LOS RÍOS, E. 1996. Evolución tectónica Cenozoica del margen continental activo de Antofagasta, Norte de Chile. *Revista Geológica de Chile*, 23, p. 165–186.

OLIVEROS, V., FÉRAUD, G., AGUIRRE, L., FORNARI, M., RAMÍREZ, L., PALACIOS, C., PARADA, M. A., TRISTÁ, D. 2004. $\text{Ar}^{40}/\text{Ar}^{39}$ dating of magmatic and alteration events related to the Mesozoic subduction system in the Coastal Range, northern Chile. EGS Joint Assembly, Niza.

OLCAY, L. 1970. Plan de Reconocimiento en Mina Mantos de la Luna. Informe (Inédito) ENAMI. Santiago.

PALACIOS, C. 1978. The Jurassic Paleovolcanism in Northern Chile. Tesis de doctorado. Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, Tübingen, Alemania, 99 p.

PALACIOS, C. 1986. Subvolcanic copper deposits in the Coastal Range of Northern Chile. *Zeitschrift für Geologie Palaeontologie*, Teil I, 1985, H.9/10, Stuttgart, p. 1605-1615.

RECH, J. A.; CURRIE, B.S; MICHALSKI, G.; COWAN, A. M. 2006. Neogene climate change and uplift in the Atacama Desert, Chile. *Geology* 34, p. 761-764.

REICH, M., PALACIOS, C., PARADA, M. A., FEHN, U., CAMERON, E., LEYBOURNE, M., ZÚÑIGA, A. 2008. Atacamite formation by deep saline waters in copper deposits from the Atacama Desert, Chile: evidence from fluid inclusions, groundwater geochemistry, TEM, and CI36 data. *Mineralium Deposita*, [en línea] DOI: 10.1007/s00126-008-0184-4.

REICH, M., PALACIOS, C., ALVEAL, M., CAMERON, E., LEYBOURNE, M., DEDITIUS A. 2009^a. Iodine-rich waters involved in supergene enrichment of the Mantos de la Luna argentiferous Cooper deposit, Atacama Desert, Chile. *Mineralium Deposita*, [en línea] DOI: 10.1007/s00126-009-0235-5.

REICH, M., PALACIOS, C., VARGAS, G., LUO, S., CAMERON, E.M., LEYBOURNE, M.I., PARADA, M.A., ZÚÑIGA, A., YOU, C.F. 2009^b. Supergene enrichment of copper deposits since the onset of modern hyperaridity in the Atacama Desert, Chile. *Mineralium Deposita*, 44, p. 497-504, DOI: 10.1007/s00126-009-0229-3.

RODRIGUEZ, E. 1969. Geología Económica de la Mina Mantos de la Luna. Santiago.

RODRIGUEZ, E. 1980. Condiciones de formación de algunos minerales oxidados de cobre. *Revista Geológica de Chile* N°9, p. 57-61.

ROGERS, G. y HAWKESWORTH, J. 1989. A geochemical traverse across the North Chilean Andes: evidence for crust generation from the mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 91, p. 271–285.

ROGERS, G. 1985. A geochemical transverse across the North Chilean Andes. Tesis de doctorado, Open University, Department of Earth Sciences, Milton Keynes, Londres, 333 p.

ROSE, A. 1976. The effect of cuprous chloride complexes in the origin of red-bed copper and related deposit. *Economic Geology*, 71, p. 1036-1048.

SCHEUBER, E. y GONZÁLEZ, G. 1999. Tectonics of the Jurassic – Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22°–26°S): A story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics*, 18, p. 895–910.

ANEXO

Resultados de la difracción de rayos X

Muestra	Especies reconocidas
Oxidados de cobre en cavidad	Yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Cuarzo SiO_2 ; Paratacamita $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$; Atacamita $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$
Amígdala	Atacamita $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$; Paratacamita $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$; Melanotalita Cu_2OCl_2 ; Cuarzo SiO_2 .
Vetilla color calipso	Paratacamita $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$; Crisocola $\text{Cu}_2 \cdot \text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.
Vetilla verde pálido	Yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Atacamita $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$; Cuarzo SiO_2 .
Amígdala verde claro	Cuarzo SiO_2 ; Atacamita $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$; Malaquita $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$; Saponita-18A $\text{Na}_{0,3}\text{Mg}_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.
Amígdala	Cuarzo SiO_2 ; Albita $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$; Dioptasa $\text{CuSiO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$; Atacamita $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$; Tenorita CuO .
Vetilla expuesta	Yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Crisocola $\text{Cu}_2 \cdot \text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; Cuarzo SiO_2 ; Albita $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
Amígdala color verde oscuro	Cuarzo SiO_2 ; Albita $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$; Clorita-1MIIb $(\text{Mg}_5\text{Al})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$; Dioptasa $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$; Hematita Fe_2O_3 ; Yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Caolinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$.
Vetilla cortada	Yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Atacamita $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$; Paratacamita $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$; Cuarzo SiO_2 ; Nantokita CuCl
Pátina	Cuarzo SiO_2 ; Clorita-1MIIb $(\text{Mg}_5\text{Al})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$; Ortoclasa KAlSi_3O_8 ; Albita $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$; Hematita Fe_2O_3 ; Yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.