

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

**DISTRIBUCIÓN, LÍMITES DE INCORPORACIÓN Y ESPECIACIÓN DE LA Ag EN
SULFUROS EN DEPÓSITOS DE Cu DE LA CORDILLERA DE LA COSTA DEL
NORTE DE CHILE, REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

MACARENA ALEJANDRA ALVEAR CHAHUAN

**PROFESOR GUÍA:
SR. MARTIN REICH MORALES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SR. DIEGO MORATA CÉSPEDES
SR. CARLOS PALACIOS MONASTERIO**

**SANTIAGO DE CHILE,
ENERO 2009**

Resumen

Los yacimientos de Cu de la Cordillera de la Costa de la Región de Antofagasta, denominados depósitos “Tipo Manto” o “estratoligados de Cu” se encuentran hospedados en las rocas Jurásicas de la Formación la Negra. Éstos constituyen la tercera fuente fundamental de Cu en Chile, además de poseer concentraciones subordinadas de Ag, de la cual poco se sabe respecto de su incorporación y distribución. Factores tales como la estructura cristalina, los límites de solubilidad de Ag en los distintos minerales, la saturación de los fluidos parentales, la especiación, e incluso factores climáticos, pueden influir en la incorporación de Ag en otros minerales o en la cristalización de minerales de Ag.

En esta memoria, combinando análisis de espectrometría de masa de ionización secundaria (Secondary-Ionization Mass Spectrometry, SIMS) y microsonda electrónica (Electrón MicroProbe Analysis, EMPA) se estudió la incorporación de Ag, y otros elementos en traza, en los sulfuros de Cu y Cu-Fe, calcopirita, bornita, covelina y calcosina, provenientes de los depósitos Mantos de la Luna, Susana-Lince y Mantos Blancos, actualmente considerado un depósito tipo pórfido pero históricamente considerado el mayor estratoligado.

Se determinó que los sulfuros que presentan mayores concentraciones de Ag, y otros elementos en traza, son la bornita y la calcopirita de grano fino. Las bornitas medidas contienen 81,1 a 730 ppm de Ag con promedios de $432,15 \pm 19,34$ ppm de Ag, mientras que las calcopiritas incorporan de 0,61 a 2211 ppm de Ag con promedios de $321 \pm 33,32$ ppm de Ag. La calcosina por su parte, presenta concentraciones entre 0 y 827 ppm, alcanzando un promedio de apenas $31,24 \pm 371$ ppm de Ag. La forma de incorporación corresponde en la mayoría de los casos a solución sólida donde la plata se incorpora a los sulfuros de Cu con la sustitución $Ag^{+1} = Cu^{+1}$, pudiendo ser una sustitución simple o una sustitución acoplada con As, Te y/o Sb, del tipo:



donde el estado de oxidación del As está sujeto a la fugacidad de O del medio.

En el caso de las calcopiritas y calcosinas se presentan microinclusiones ($<2 \mu m$, $<10 \mu m$ respectivamente) con concentraciones de Ag superiores a los 975 ppm, con lo cual se marca un límite de incorporación de Ag en calcopirita. Las inclusiones pueden corresponder a Ag nativa (Ag^0) o a algún mineral de Ag, por ejemplo la acantita Ag_2S (Ag^{+1}). Además, en las calcosinas, se observan inclusiones de fases ricas en I y Ag, probablemente iodargirita, mineral típico de climas áridos, además de una alteración a fases cloruradas en los bordes y fracturas, correspondientes a atacamita. La presencia de estas inclusiones incluso en el centro de los granos de calcosina indica contemporaneidad para su génesis. Las fases cloruradas, junto con la presencia de I indican aportes salinos externos al sistema convencionalmente propuesto. El origen de estos aportes corresponde a salmueras que ascienden gracias a la existencia de fallas de basamento sísmicamente activas que interactúan con la roca caja, concentrando metales y generando el depósito actual de atacamita y calcosina, en algunos casos con inclusiones de iodargirita. En base a esto, se concluye que, en concordancia con lo planteado por Reich et al. (2008), la alteración supérgena no marca su fin con el cambio en las condiciones climáticas a hiperáridas, sino que, es un proceso actual y que no requiere de la presencia de aguas meteóricas.

Agradecimientos

Quiero agradecer a CONICYT (Travel & research funding from the Chilean National Fund for Science and Technology) por otorgar los recursos para la realización de esta memoria y para el financiamiento de mi viaje a Estados Unidos que me permitió efectuar los análisis con la microsonda electrónica en la Universidad de Michigan. A la Universidad de Michigan y particularmente al grupo de investigación de Rod Ewing y Udo Becker que me acogieron calidamente y me brindaron apoyo con la toma de datos, especialmente Artur Deditius, Akiyoshi Imaura, Carl Henderson y Lindsay Shuller. Además a Stacy Wilkin y Karina Sapunar por ayudarme con la burocracia y los trámites necesarios para el viaje y a Stephen Chryssoulis por la realización de los análisis SIMS en el laboratorio AMTEL, Canadá.

También quiero dar gracias y resaltar el apoyo de Martin por su labor como Profesor Guía de esta memoria; que más allá de una simple memoria ha significado para mi una gran experiencia personal y un proceso de madurez científica en el cual fui muy bien dirigida y en todo momento respaldada tanto por Martin como por los otros 2 miembros de la comisión, los Profesores Carlos Palacios y Diego Morata. Mis sinceros agradecimientos a los 3.

Finalmente quiero agradecer a mi familia por todo el amor, por la formación que recibí y por darme la oportunidad de realizarme académica y personalmente, a Jaime por compartir conmigo este paseo por la vida y apoyarme en mis proyectos y por todo el amor que me ha entregado, y a mis amigos, especialmente a la Caro, Roberto, Vero, Andrés, Dani y Camilo, por su incondicional amor, apoyo y por los grandes momentos que hemos pasado juntos. Gracias por existir y por ser los pilares en mi vida. Los amo mucho a todos y les agradezco por caminar y crecer juntos en esta aventura de la vida.

Índice

1.1 Introducción.....	7
1.2 Objetivos e Hipótesis de trabajo.....	9
1.3 Metodología.....	10
CAPITULO 2: Marco Geológico.....	11
2.1 Marco geológico general de la zona.....	11
2.2 Yacimiento Mantos de la Luna.....	14
2.3 Mantos Blancos.....	15
2.4 Yacimiento Susana-Lince, Distrito Carolina de Michilla.....	17
CAPITULO 3: Muestras y Métodos Analíticos.....	19
3.1 Muestras y Generalidades de los Métodos Analíticos.....	19
3.2 Análisis por microsonda electrónica (Electron MicroProbe Analysis, EMPA).....	21
3.3 Análisis por espectrometría de masa de ionización secundaria (Secondary-Ionization Mass Spectrometry, SIMS).....	23
CAPITULO 4: Resultados.....	25
4.1 Resultados de EMPA.....	25
4.2 Resultados de SIMS.....	43
CAPITULO 5: Discusiones.....	52
5.1 Forma mineralógica de incorporación de Ag (y Au) en los sulfuros de cobre.....	52
5.2 Estado de saturación de la Ag (y Au) en las soluciones hidrotermales parentles y etapas de incorporación de Ag.....	55
5.3 Enriquecimiento supergénico de Ag en yacimientos estratoligados y consideraciones climáticas para Atacama.....	57
CAPITULO 6: Conclusiones.....	60
Referencias.....	62
ANEXO 1: Datos EMPA.....	70
ANEXO 2: Fotomicrografías de granos analizados.....	79
ANEXO 3: Fases cloruradas.....	82
ANEXO 4: Datos SIMS.....	85
ANEXO 5: Resumen de resultados para la calcosina según tipo morfológico.....	90
ANEXO 6: Resumen y caracterización básica del principio de la microsonda electrónica EMPA.....	91
ANEXO 7: Resumen y caracterización básica del principio de la microsonda iónica SIMS.....	94

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa Geológico de la zona de estudio.....	13
Figura 2: Fotomicrografía de asociaciones mineralógicas de Mantos de la Luna.....	14
Figura 3: Perfil E-W del depósito Mantos Blancos	16
Figura 4: Fotomicrografía de asociaciones mineralógicas de Mantos Blancos.....	16
Figura 5: Perfil NW-SE del depósito Susana-Lince.....	18
Figura 6: Fotomicrografía de asociaciones mineralógicas de Susana-Lince.....	18
Figura 7: Representación esquemática de la microsonda electrónica (EMPA) Cameca SX-100.....	22
Figura 8: Representación esquemática de la microsonda iónica (SIMS) Cameca IMS-3f	24
Figura 9: Diagrama ternario Cu-Fe-S para sulfuros de Cu.....	27
Figura 10: Histogramas de frecuencia v/s rangos de concentración de Ag para los distintos sulfuros de Cu, datos EMPA.....	28
Figura 11: Gráfico mostrando tendencias entre elementos mayores y Ag en calcopirita	30
Figura 12: Gráfico mostrando tendencias entre elementos mayores y Ag en bornita	31
Figura 13: Imágenes BSE de calcopiritas con microinclusiones.....	32
Figura 14: Imágenes BSE de calcosinas con microinclusiones.....	33
Figura 15: Gráfico de variación de elementos mayores ante concentraciones importantes de Ag.....	34
Figura 16: Inclusión en grano de calcosina y su Espectro EDS	38
Figura 17: Mapa elemental de calcosina con inclusión de iodargirita.....	39
Figura 18: Imagen BSE de calcosina con fases cloruradas.....	40
Figura 19: Mapa elemental de calcosina con fases cloruradas.....	42
Figura 20: Resumen de datos según SIMS por mineral.....	45
Figura 21: Resumen de datos según SIMS, por yacimiento.....	48
Figura 22: Gráfico de correlación entre Ag (Au) y otros elementos en traza.....	50 y 51

Índice de Tablas

Tabla 1: Número de datos obtenidos por muestra mediante análisis SIMS y EMPA, haciendo distinción para el tipo morfológico.....	20
Tabla 2: Resumen de condiciones analíticas utilizadas para los análisis de microsonda electrónica de sulfuros de cobre.....	22
Tabla 3: Resumen de condiciones analíticas utilizadas para los análisis de SIMS de sulfuros de cobre.....	24
Tabla 4: Promedios de %peso, %atómico para los elementos mayores y fórmula unidad de cada mineral, obtenidos mediante EMPA.....	25
Tabla 5: Resultados de EMPA para elementos en traza (Ag, Se, Te, Sn).....	28
Tabla 6: Resultados de WDS para análisis puntual de microinclusiones de calcopirita de Mantos Blancos.....	34
Tabla 7: Resultados WDS de micro inclusiones de calcosinas de Mantos Blancos y Mantos de la Luna.....	36
Tabla 8: Número de datos obtenidos mediante SIMS para los distintos sulfuros de cobre, según su tipo morfológico cuando corresponda.....	43
Tabla 9: Resumen de datos de análisis SIMS por sulfuro de cobre.....	44
Tabla 10: Resumen de resultados de SIMS según tipo morfológico de calcosina en los 3 yacimientos.....	47

CAPITULO 1: Introducción

1.1 Introducción.

La incorporación de metales preciosos en sulfuros ha sido motivo de diversas investigaciones durante las últimas décadas. En los últimos 20 años la caracterización y estudio de Au y Ag “invisibles” o submicroscópicos en sulfuros se ha transformado en un blanco científico y económico, debido al descubrimiento de grandes yacimientos de baja ley de los cuales se extrae el mineral mediante técnicas de lixiviación selectiva (ejemplo Yacimientos tipo Carlyn, Nevada, USA; Cabri et al., 2000). Además de su importancia económica, los sulfuros ricos en metales preciosos son relevantes desde un punto de vista medio ambiental ya que incorporan elementos altamente tóxicos, tales como el arsénico que puede ser liberado al medio ambiente tras procesos de oxidación (Savage et al., 2000; Sidle et al., 2001; Kolker et al., 2003). Este estudio se concentra principalmente en la incorporación, de Ag y en menor medida Au, en sulfuros de Cu y Cu-Fe de depósitos de Cu de la Cordillera de la Costa de la Región de Antofagasta.

Los yacimientos de Cu de la Cordillera de la Costa en la Región de Antofagasta, denominados por décadas como “Tipo Manto” (Ruíz et al., 1971) o “estratoligados de Cu” constituyen después de los pórfidos cupríferos y de los yacimientos de Fe- Cu- (Au) la mayor fuente de producción de Cu en Chile. Estos yacimientos forman una franja metalogénica que se extiende entre los 22° y 26° Latitud Sur (Tristá, 2007). Estudios realizados en la zona (Kojima et al., 2003; Ramírez et al., 2006; Tristá, 2007; Garay, 2007) evidencian la presencia de importantes concentraciones de Ag asociada a estos yacimientos, la cual puede ser recuperada otorgando un valor agregado y haciendo más rentable la explotación de estos depósitos. Sin embargo, existe escaso conocimiento acerca de la forma de incorporación y distribución de la Ag.

Diversos factores, tales como la estructura cristalina, los límites de solubilidad de la Ag en los distintos minerales, la saturación de los fluidos parentales, la especiación, e incluso factores climáticos, pueden influir en la incorporación de Ag en otros minerales o la cristalización de minerales de Ag. Es por esto que se debe analizar la importancia, intervención en el mecanismo de incorporación y la relación que puedan tener los factores entre sí.

En este estudio se reporta la distribución de plata y sus elementos asociados en sulfuros hipógenos y supérgenos de los depósitos Mantos de La Luna, Susana-Lince (Distrito Carolina de Michilla) y Mantos Blancos. Los minerales analizados corresponden a los sulfuros de cobre calcopirita, bornita, calcosina y covelina; y en ellos se estudiarán los contenidos de Au, Ag, As y otros metales. Para ello se usa una combinación de espectrometría de masa de ionización secundaria (Secondary-Ionization Mass Spectrometry, SIMS) y microsonda electrónica (Electrón MicroProbe Analysis, EMPA). Dichos métodos analíticos entregan resultados con bajo límite de detección y alto poder de resolución para la observación, respectivamente. De esta forma se pretende discernir si los metales traza se encuentran incorporados en la estructura (solución sólida) o en forma de inclusiones sub-micrométricas (nanopartículas)

Así es posible determinar la distribución, especiación y mecanismos de incorporación de los metales preciosos en los sulfuros, con el fin último de establecer el grado de saturación de Ag y elementos asociados en las soluciones hidrotermales y supérgenas. Estos resultados no sólo aportan información respecto al comportamiento de Ag en yacimientos de Cu, sino también serán de relevancia para optimizar los procesos de recuperación metalúrgica de Ag en estos depósitos.

1.2 Objetivos

Objetivo Principal.

El objetivo principal de este estudio es estudiar la distribución, especiación y límites de incorporación de Ag (y en menor medida Au) en sulfuros de cobre en los tres yacimientos de cobre (-plata) de la Cordillera de la Costa del norte de Chile, Región de Antofagasta.

Objetivos Específicos.

Se pretende lograr las siguientes metas:

1. Determinar qué sulfuros de cobre concentran preferencialmente la Ag y otros elementos en traza.
2. Establecer las relaciones de correlación entre la Ag (y Au) y otros elementos como el As y Sb.
3. Determinar la especiación o forma mineralógica de incorporación de la Ag en los sulfuros (solución sólida versus inclusiones)
4. Determinar el grado de saturación en Ag de las soluciones hidrotermales y supérgenas que favorecieron el depósito de metales preciosos
5. Distinguir distintos eventos de incorporación de Ag en estos depósitos y asociar dichos eventos a las etapas de evolución conocidas para los mismos.
6. Relacionar los eventos de enriquecimiento de Ag con las condiciones ambientales y climáticas de la zona de Atacama desde la formación de estos depósitos.

Hipótesis de trabajo.

La incorporación de Ag, en sulfuros de cobre, ocurre tanto en solución sólida como formando inclusiones, como plata nativa o como otros minerales de plata.

1.3 Metodología.

Para lograr el objetivo principal se trabajó con datos obtenidos de los yacimientos de Cu con Ag subordinada: Mantos Blancos, Mantos de la Luna y Susana-Lince (Distrito Carolina de Michilla). Se seleccionan estos depósitos debido a que se consideran los de mayor tamaño e importancia dentro de la franja de los estratoligados de Cu, para el caso de Mantos de la Luna y Susana-Lince, y Mantos Blancos actualmente considerado un depósito tipo pórfido, pero históricamente considerado el estratoligado de mayores proporciones del norte de Chile. En estos yacimientos se ha documentado la existencia de concentraciones considerables de Ag, las cuales se extraen y han sido extraídas desde los años 60 en Mantos Blancos. Los análisis se realizaron utilizando espectrometría de masa de ionización secundaria (Secondary-Ionization Mass Spectrometry, SIMS) y análisis de microsonda electrónica (Electrón MicroProbe Analysis, EMPA); con lo cual se combinan métodos analíticos de bajo límite de detección y alto poder de resolución para la observación.

Para los objetivos específicos 1, 2 y 3 se realizó un estudio estadístico utilizando la base de datos de SIMS y análisis de EMPA, donde estos últimos fueron realizados por la autora de esta memoria. Se confeccionaron, entre otros, gráficos de frecuencias de concentración para cada elemento en los distintos sulfuros de cobre y gráficos de correlación entre metales preciosos y otros elementos en traza presentes. Todo esto apoyado en las imágenes BSE obtenidas mediante la microsonda electrónica.

Para el objetivo específico 4 y 5 se incorporaron los resultados obtenidos para los objetivos anteriores con información bibliográfica y antecedentes previos respecto a la historia geológica de estos depósitos.

Para el objetivo específico 6 se integraron las conclusiones obtenidas para los distintos yacimientos. La discusión se realizó dentro de un contexto de la evolución climática de la Región de Antofagasta, apoyado en estudios de la zona previamente publicados.

CAPITULO 2: Marco Geológico

2.1 Marco geológico general de la zona

Los depósitos en estudio son: Mantos de la Luna, Susana-Lince y Mantos Blancos, y se encuentran en la Segunda Región de Antofagasta, específicamente entre los 22°00' y los 24°50' S y entre los 69°00' y 70°30' W; en el sector de la Cordillera de la Costa y el Valle Central (Figura. 1).

La geología de la Cordillera de la Costa en la región de estudio se caracteriza predominantemente por la presencia de rocas volcánicas, plutónicas y sedimentarias de edad Mesozoica, las que afloran como un homoclinal de hasta 7000 a 10000 metros de espesor (Buchelt y Tellez, 1988; Muñoz et al., 1988). Las rocas volcánicas corresponden a la Formación La Negra, de edad jurásica, que consiste principalmente en lavas porfíricas, con intercalaciones de brechas volcánicas, tobas y rocas sedimentarias. El tipo composicional predominante son las andesitas y andesitas basálticas, con menor basaltos, dacitas y riolitas (Boric et al., 1990; Cortés, 2000; Kramer et al., 2005). Dataciones Rb-Sr han arrojado edades de 186 ± 14 Ma (Rogers y Hawkesworth, 1989) y 173 ± 19 Ma (Venegas et al., 1991) para las rocas volcánicas de la Formación La Negra. Recientemente Oliveros et al. (2004a) obtuvieron edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en plagioclasas de $172,3 \pm 0,9$ Ma y $173,6 \pm 1,4$ Ma.

Las rocas plutónicas intruyen a la Formación La Negra y corresponden a rocas holocristalinas de composición gabrónica a granodiorítica con afinidad calcoalcalina (Ishihara and Ulriksen 1980; Palacios and Espinoza 1982; Ishihara et al. 1984). Dataciones K/Ar (en plagioclasa y en roca total) y Rb/Sr otorgan a los cuerpos intrusivos un rango de edad de 112 a 168 Ma (Palacios and Definis 1981; Astudillo 1983; Espinoza y Orquera 1988; Boric et al. 1990; Rogers 1985; Venegas et al. 1991, Oliveros et al. 2004b). Se observa además diques y stocks porfíricos que cortan las zonas mineralizadas (Kojima et al., 2003).

Estructuralmente, la zona se encuentra dominada por el sistema de fallas de Atacama (Atacama Fault System, AFS), la estructura mas importante del antearco de los Andes centrales (Arabasz, 1971). Ésta posee una extensión de 1000 kms (21-30°S) y corresponde a una serie de fallas de rumbo NS y otras de rumbo NW (Lucassen et

al., 2006). Este sistema se considera como una falla de rumbo sinistral, que empieza su actividad durante el Mesozoico con la subducción de la Placa Farallón bajo la Placa Sudamericana. (Scheuber y Andriessen, 1990; Scheuber y Gonzáles, 1999). Las unidades involucradas en la región de estudio se encuentran afectadas por ramales que provienen del AFS, las de mayor importancia con dirección NS, como la Falla de Mititus, y además por fallas menores con direcciones NE y NW (Oliveros et al., 2007).

Se reconocen 2 etapas principales del desarrollo del arco en la evolución del segmento sur de Los Andes centrales, las cuales se manifiestan en el área de estudio:

1. Jurásico temprano a Cretácico temprano, caracterizado por el desarrollo de un arco y cuenca de trasarco bajo un régimen extensional (Maksaev y Zentilli, 2002).
2. Cretácico tardío a Holoceno, caracterizado por el desarrollo de una faja plegada y corrida bajo régimen compresivo (Maksaev y Zentilli, 2002).

Numerosos eventos hidrotermales relacionados a magmatismo intra-arco y sistemas de fallas de rumbo ocurren entre el Jurásico Tardío y el Oligoceno temprano provocando mineralización de cobre. Dicha actividad magmática-hidrotermal, dio origen a cuatro cinturones metalogénicos N-S, decrecientes en edad de oeste a este: Jurásico Tardío, Cretácico Temprano, Paleoceno Tardío- Eoceno Temprano y Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano (Camus, 2003; Palacios et al., 2007). Mantos de la Luna y Susana-Lince pertenecen al primer cinturón, Jurásico Tardío, y Mantos Blancos al segundo, Cretácico Temprano (Kojima et al., 2003) (Figura 1 a y b).

Los depósitos en estudio corresponden a algunos de los mayores exponentes de los estratoligados de Cu del norte de Chile (Maksaev et al., 2007; Tristá et al., 2006), considerando que Mantos Blancos ha sido catalogado recientemente como un depósito “tipo pórfido” por Ramírez et al. (2006) ya que presenta una geometría de mantos pero se han encontrado sus raíces. Para el caso de Mantos de la Luna y Susana-Lince, se discute si se formaron singenéticamente o epigenéticamente (Ruíz et al., 1971; Losert, 1973; Espinoza, 1982; Sato, 1984; Espinoza y Orquera, 1988; Klohn et al., 1990; Vivallo y Herriquez, 1998; Kojima et al., 2003). A continuación se describe la geología de los depósitos mencionados.

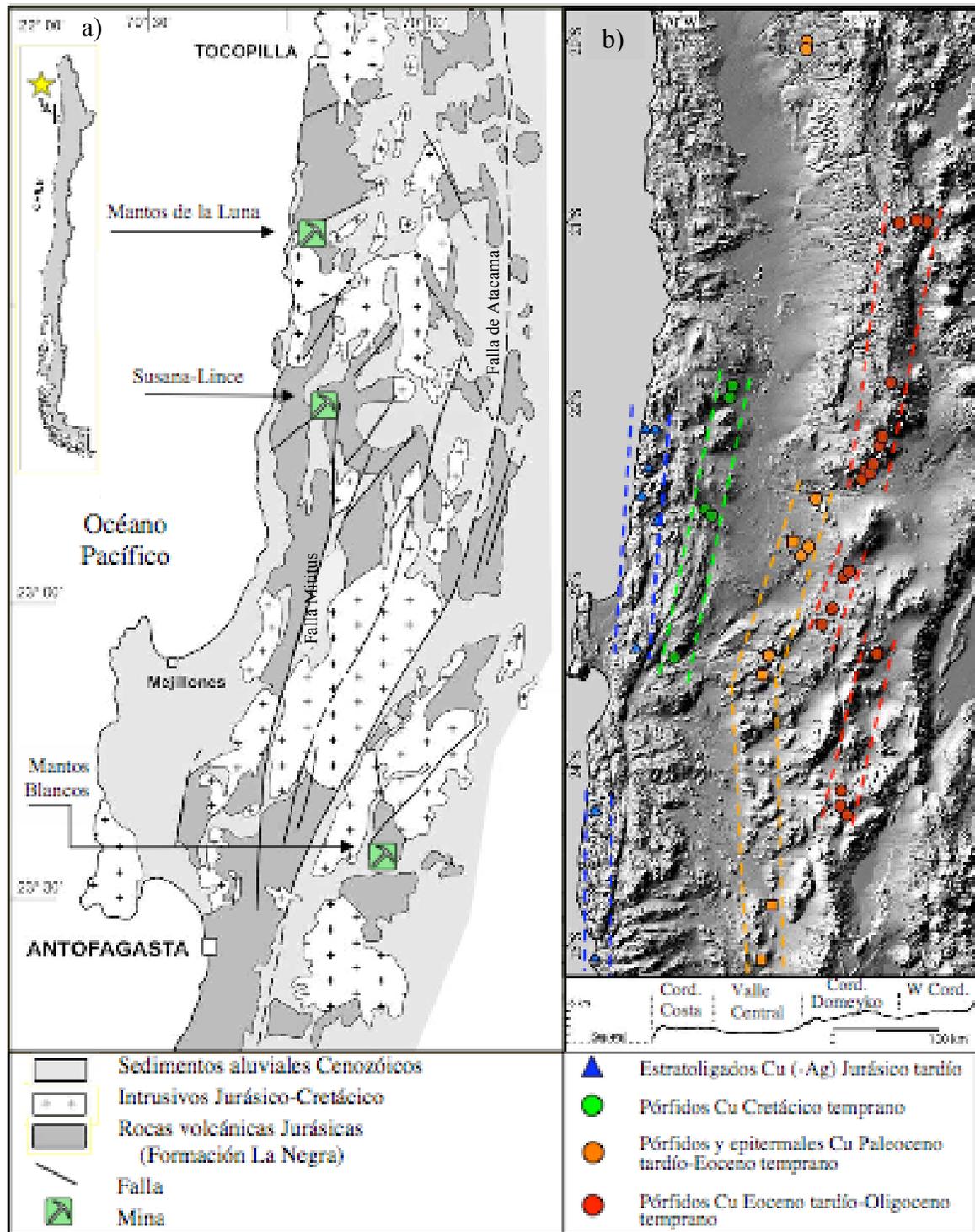


Figura 1: Mapa de ubicación mostrando la zona de estudio. a) Ubicación de los depósitos de cobre (-Ag) en estudio, y geología general de la Cordillera de la Costa en el norte de Chile (modificado de Kojima et al., 2003) b) Modelo Digital de elevación, DEM, obtenido de un radar topográfico Shuttle. Se muestran los rasgos y unidades geomorfológicas; y las 4 franjas metalogénicas del norte de Chile, sector Antofagasta (modificado de Palacios et al., 2007).

2.2 Yacimiento Mantos de la Luna

Corresponde a un depósito estratoligado de cobre perteneciente al cinturón metalogénico de estratoligados de cobre (-plata) del Jurásico Tardío, hospedado en los estratos de la Formación La Negra. Se ubica 30 km al sur de Tocopilla, en las coordenadas 22°22.7'S, 70°12.7'W (Fig. 1). Posee recursos medidos de 40.5 Mt al 1.39% Cu (ley de corte de 0.4% Cu) además de 6 Mt al 1.4% Cu de recursos estimados (Minería Chilena 2001).

Este depósito está compuesto por tres cuerpos mineralizados: Bloque Norte (Capacho), Bloque Central y Bloque Sur; cuyos límites están marcados por dos fallas: una de rumbo EW (Falla Albornoz), y otra de rumbo NWW-EW (Falla Sur) (Kojima et al., 2003). Los cuerpos mineralizados se encuentran en una secuencia volcánica monoclinual de rumbo N10°E y manteo 30°E, exhibiendo texturas afaníticas, amigdaloidales y porfíricas (Greiner, 1982). La alteración hidrotermal corresponde a alteración propilítica con la asociación mineralógica: clorita, epidota, calcita, cuarzo y especularita (Greiner, 1982).

Mantos de la Luna se caracteriza por presentar, casi exclusivamente, oxidados de cobre, los cuales consisten en: atacamita, brocantita, crisocola, malaquita, sulfatos de cobre; y menor cuprita y cobre nativo (Maksaev et al., 2007), además de las fases de enriquecimiento secundario que involucran reemplazos de sulfuros por calcosina, digenita, covelina y menor hematita (Fig. 2) (Kojima et al., 2003).

Estudios de inclusiones fluidas dan temperaturas de homogeneización entre 163-350°C, con salinidades entre 25 y 34 %peso de NaCl. Existe además evidencias de ebullición (Kojima et al., 2003).

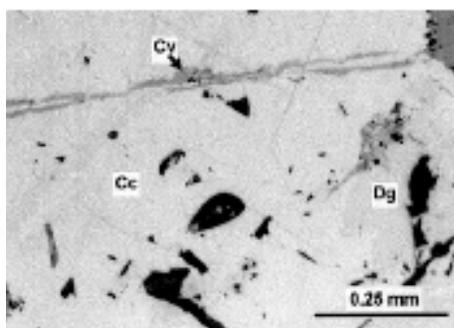


Figura 2: Calcosina (Cc) y digenita (Dg) reemplazadas por agregados fibrosos y venillas de covelina (Cv) (tomado de Kojima et al., 2003).

2.3 Mantos Blancos

Pertenece al cinturón metalogénico del Cretácico Temprano. Se ubica 30 kms al este de Antofagasta (Fig. 1). Actualmente es considerado un depósito tipo “porphyry-like” (Ramírez et al., 2006), luego de haber sido considerado el mayor estratoligado de cobre de Chile (Espinoza et al. 1996; Makshev and Zentilli 2002). Posee reservas de 31 Mt de minerales oxidados con 0.72% Cu, 24 Mt de minerales oxidados con 0.41% Cu, 0.56 Mt del sulfuros con 1.01% Cu y 12 g/t Ag, sumado a los mas de 200 Mt de mineral con 1.2% Cu extraído desde 1960 (Minería Chilena 2003).

Consiste en 4 cuerpos lenticulares, con sulfuros disseminados y rellenando fracturas, con espesores entre 150-350 mts, los cuales se extienden irregularmente en una superficie de 2,6 por 1,2 km (Fig. 3) (Makshev et al., 2007). La roca caja corresponde a un domo riolítico con brechas magmático-hidrotermales félsicas, intruído por stocks y sills dioríticos a granodioríticos, los cuales gradan hacia superficie a brechas magmático-hidrotermales (Ramírez et al., 2006).

Se reconocen 2 eventos de alteración hidrotermal: alteración filica, a los 155 Ma, relacionada con brechización félsica magmático-hidrotermal, y alteraciones potásica, propilítica y sódica, a los 141-142 Ma, contemporáneas con stocks y sills dioríticos y granodioríticos, y diques dioríticos. Ambos eventos se superponen a un metamorfismo regional con facies de prhenita-pumpellyita. La mineralización está mayormente asociada al segundo evento hidrotermal, consistiendo en brechas hidrotermales, disseminación y stockwork asociado a la alteración sódica (Ramírez et al., 2006). La mineralogía de mena consiste mayoritariamente en calcosina y bornita, con menor calcopirita, covelina y localmente digenita asociadas a albita, clorita, cuarzo, hematita, calcita, epidota, esfeno, escapolita, anatasa y menor sericita. Se presenta una zonación lateral hipógena: un núcleo rico en cobre (calcosina, bornita, digenita), rodeado por bornita + calcopirita y finalmente un halo externo de menor ley calcopirita y pirita (Losert, 1973; Chavez, 1985; Palacios, 1986, 1990; Ramírez et al., 2006). La zonda de oxidados supérgenos ha sido explotada quedando parches de atacamita, crisocola y malaquita (Chávez, 1985). Además existe sulfuros secundarios como calcosina y menor covelina, cuprita, cobre nativo y tenorita (Fig. 4) (Ramírez et al., 2006).

Estudios de inclusiones fluidas muestran evidencias de ebullición durante los eventos de alteración potásica y sódica, con temperaturas entre 450-460°C y 350-410°C, y salinidades entre 3-53 y 13-45 %peso de NaCl eq., respectivamente (Ramírez et al., 2006).

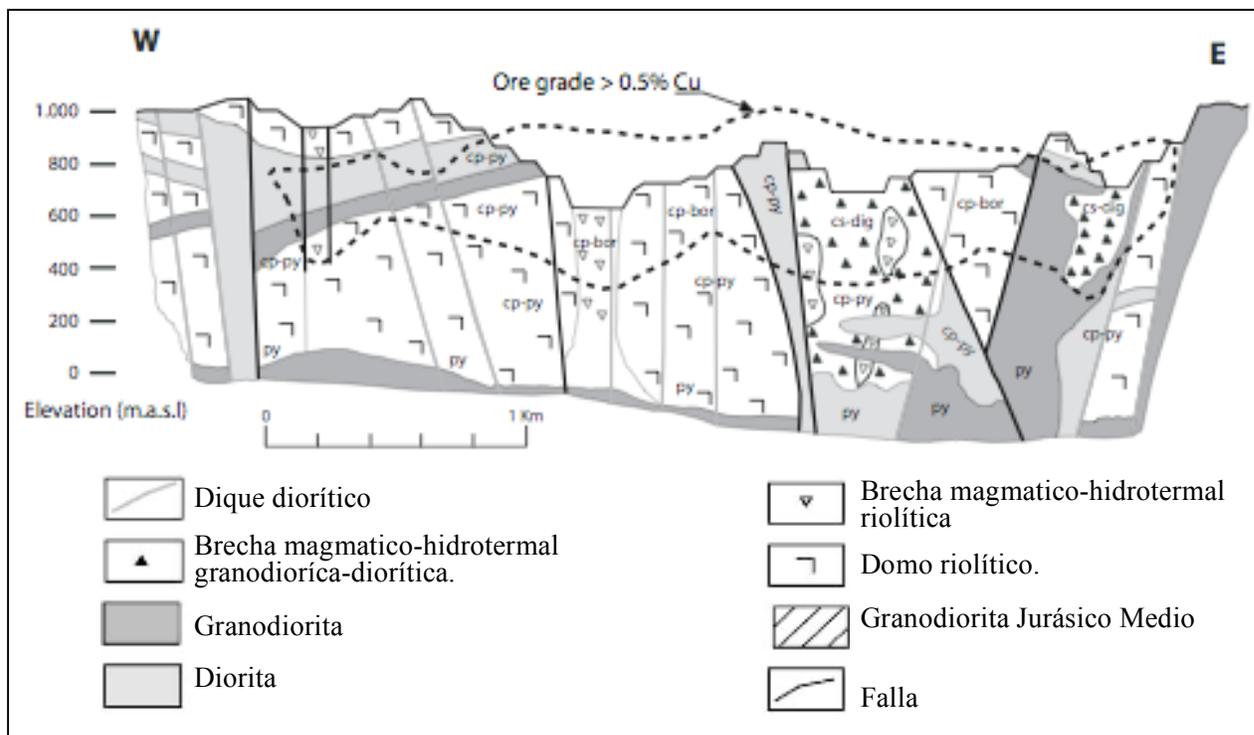


Figura 3: Perfil E-W del depósito Mantos Blancos (tomado de Ramírez et al., 2006).

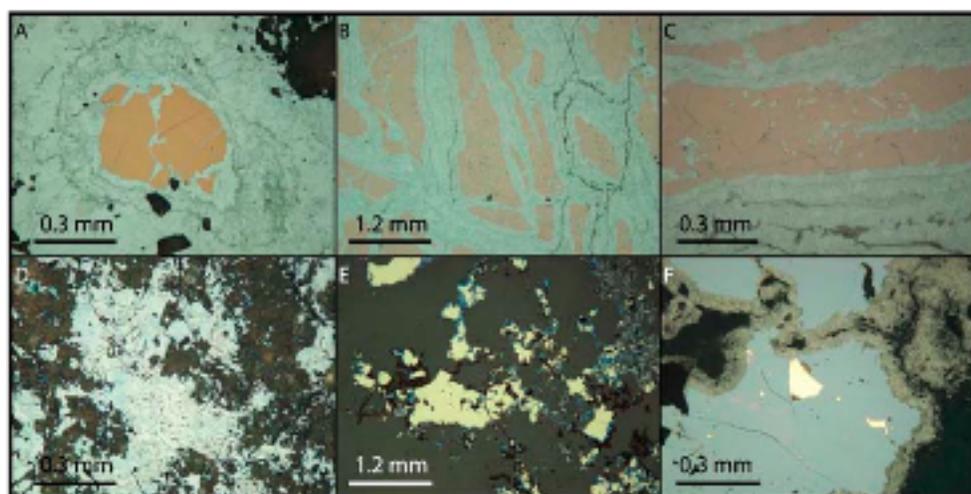


Figura 4: Fotomicrografías de a) relicto de digenita en calcosina, b y c) digenita con hematita reemplazada por calcosina, d) calcosina con inclusiones de covelina (azul), f) cobre nativo en cuprita (reflejos internos rojos en el gris) con borde de reemplazo de tenorita (tomado de Ramírez et al., 2006).

2.4 Yacimiento Susana-Lince, Distrito Carolina de Michilla

El depósito Susana-Lince (Fig. 5) es el estratoligado de mayor tamaño del distrito Carolina de Michilla, el cual pertenece al cinturón de estratoligados de cobre del Jurásico Tardío. Este depósito se ubica 120 km al norte de Antofagasta (22°40.2'S, 70°09.8'W) (Fig. 1) y produce más de 60000 t/mes de Cu con un promedio de 0.6-1% de Cu y 25-26 g/t de Ag (Kojima et al., 2003).

La roca caja corresponde a una secuencia volcánica monoclinial, de al menos 1000 m de espesor, con rumbo N65°E y manteos que varían de 35 a 40°NW. La mineralización ocurre en la matriz de una pipa de brecha central y en cuerpos estratiformes concordantes alrededor de ésta. (Palacios et al., 1990; Espinoza et al., 1996). Los mantos varían de 2 a 25 m de espesor y la mineralización se restringe a las zonas brechizadas y como amígdalas de las lavas Jurásicas, con venas menores en fracturas y fallas locales (Palacios y Definis, 1981 a, b; Dreyer y Soto, 1985). Se presentan 2 eventos hidrotermales: alteración propilítica de bajo grado caracterizada por epidota, clorita, esmectita, titanita, albita, cuarzo y calcita, a la cual se asocia magnetita, pirita y calcopirita (Espinoza et al., 1996). A ésta, se sobreimpone el evento principal de mineralización con calcosina, digenita, bornita, menor calcopirita y hematita y localmente plata y cobre nativos asociados a calcita y cuarzo (Kojima et al., 2003).

Se presenta enriquecimiento secundario, con reemplazo de sulfuros hipógenos por calcosina y covelina supérgenas, menor hematita, y formación de oxidados de cobre: atacamita, crisocola, cuprita y copper wad, asociados a menor goetita y yeso (Kojima et al., 2003).

Susana-Lince exhibe una zonación vertical, pasando de una zona de oxidados de cobre secundarios a una zona de sulfuros de cobre, a través de una zona mixta o de transición entre ambas (Acevedo et al., 1997).

Estudios recientes de Tristá et al. (2006) lograron datar directamente, por primera vez, la edad de la mineralización en Susana-Lince mediante el método de isócrona en el sistema isotópico Re/Os. La edad fue obtenida de mediciones en muestras de calcosina y calcosina-bornita, determinando que la mineralización hipógena de los estratoligados del norte de Chile ocurrió a los 160 ± 16 Ma.

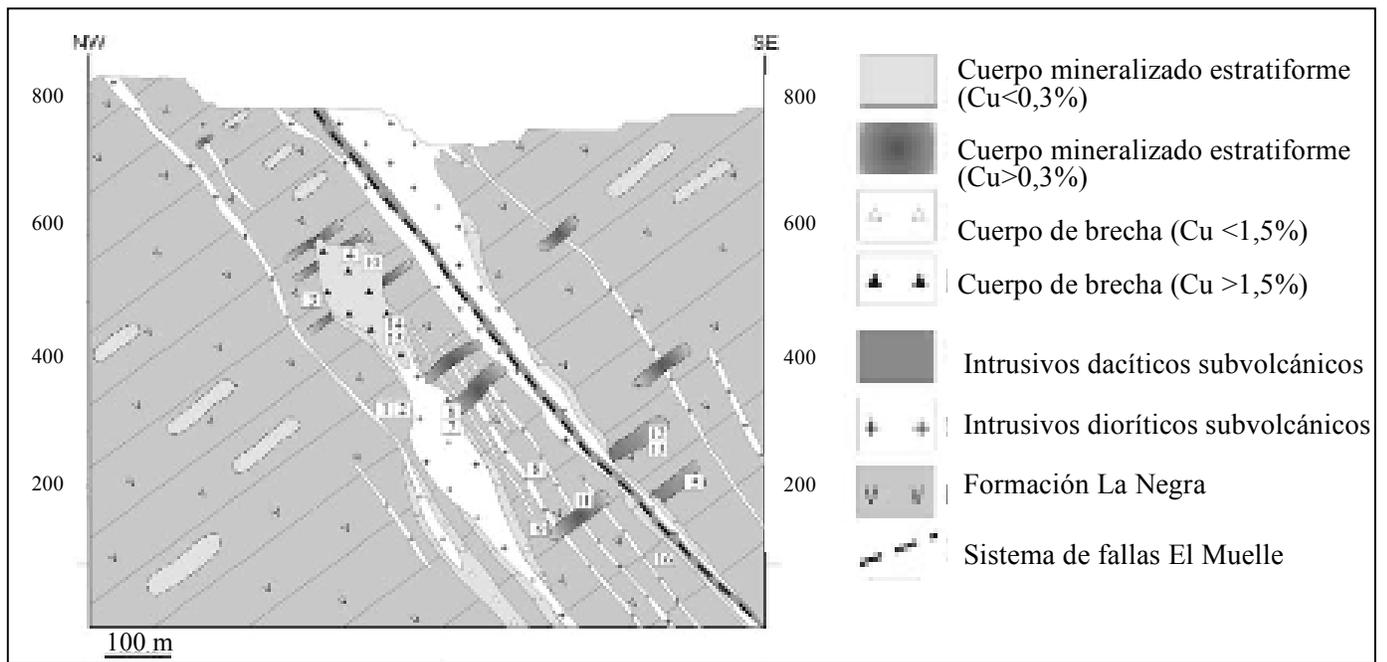


Figura 5: Perfil NW-SE de Susana-Lince mostrando la geología general del depósito (tomado de Tristán et al., 2006).

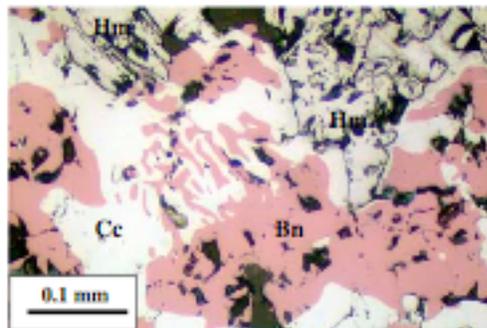


Figura 6: Fotomicrografía mostrando relaciones texturales entre bornita (bn) y calcosina (cc), y el posterior entrecrecimiento de hematita (tomado de Tristán et al., 2006).

CAPITULO 3: Muestras y Métodos Analíticos

3.1 Muestras y Generalidades de los Métodos Analíticos.

Las muestras utilizadas para este estudio corresponden a separados de sulfuros de cobre extraídos de los depósitos Mantos Blancos, Mantos de la Luna y Susana-Lince del Distrito Michilla. Los sulfuros de cobre corresponden a calcopirita, bornita, calcosina y covelina. La separación de minerales se realizó en la Universidad de Chile, y para los análisis se preparan briquetas de 3 centímetros de diámetro compuestas por los granos inmersos en una resina termoestable, epoxy. Estas son posteriormente pulidas para lograr una superficie de análisis plana.

Adicionalmente, y debido a que el análisis mediante microsonda electrónica requiere que la muestra sea conductora, la briqueleta debe ser sometida a un tratamiento de carbonización, el cual le otorga conductividad superficial a la muestra. De esta forma se evita que la muestra se cargue durante el análisis de microsonda.

Para el análisis de SIMS las muestras requieren de una conductividad volumétrica en vez de superficial. La preparación de las muestras para el análisis SIMS se realizó en el Advanced Mineral Technology Laboratories (AMTEL), en Ontario, Canadá, para los cuales los granos de sulfuros fueron inmersos en resina epóxica mezclada con grafito.

Para los análisis mediante SIMS los granos se separaron por tipo morfológico del grano, pudiendo ser: grano grueso, grano fino u oxidado (véase 4.2). La cantidad de resultados para cada muestra, y mediante los distintos métodos analíticos, se expresan en la Tabla 1:

Las muestras de bornita, covelina y calcopirita fueron extraídas únicamente del depósito Mantos Blancos, mientras que las muestras de calcosina provienen de los 3 depósitos en estudio (Tabla 1).

Tabla 1: Número de datos obtenidos por muestra mediante análisis SIMS y EMPA, haciendo la distinción para SIMS de acuerdo al tipo de grano: GG grano grueso, GF grano fino, Ox oxidado. √: posee datos analíticos; X, -: no posee datos analíticos.

Yacimiento	Muestra	Mineral	SIMS				EMPA		
				GG	GF	Ox.	Total		#
Mantos de la Luna	ML-1	Calcosina	√	6	7	-	13	√	38
	ML-8	Calcosina	√	6	2	5	13	X	-
	ML-4	Calcosina	√	9	3	-	12	√	10
	ML-6	Calcosina	√	10	-	-	10	X	-
Mantos Blancos	MB-14	Calcosina	√	6	8	-	14	√	55
	MB-16	Calcosina	√	7	4	-	11	X	-
	MB-22	Calcosina	√	6	6	-	12	X	-
	MB-12	Bornita	√	-	-	-	12	√	59
		Covelina	√	-	-	-	6	X	-
	MB-13	Bornita	√	-	-	-	8	√	87
		Covelina	√	-	-	-	6	X	-
	MB-11	Calcopirita	√	6	6	-	12	√	24
	MB-8	Calcopirita	√	8	8	-	16	√	106
MB-6	Calcopirita	√	8	8	-	16	√	52	
Susana-Lince	SS-9	Calcosina	√	11	-	2	13	X	-
	SS-1	Calcosina	√	7	5	-	12	√	10
	SS-5	Calcosina	√	6	6	-	12	X	-
	SS-3	Calcosina	√	7	6	-	13	X	-

3.2 Análisis por microsonda electrónica (Electron MicroProbe Analysis, EMPA)

Los datos de EMPA fueron realizados por la autora de esta memoria utilizando una microsonda electrónica CAMECA modelo SX100 en la Universidad de Michigan en el Electron Microbeam Analysis Laboratory (EMAL).

El principio del método se basa en la detección y análisis de un conjunto de señales emitidas por una muestra al ser bombardeada por un haz de electrones. Este método permite realizar análisis cualitativos y cuantitativos no destructivos, obteniendo resultados con sensibilidad al nivel de los cientos de ppm, para todos los elementos del Berilio al Uranio; los cuales permiten conocer acerca de la composición y distribución de los elementos presentes.

Para este estudio, mediante este método analítico, se obtuvieron resultados de análisis químicos puntuales, cuantitativos para elementos mayores y para elementos en traza, espectros EDS de rayos X, mapas elementales e imágenes de electrones retrodispersados (BSE) de los granos a nivel micrométrico.

En la Figura 7 se presenta un esquema de la microsonda electrónica utilizada con sus partes más básicas y en la Tabla 2 se presentan las condiciones analíticas que se aplicaron en este estudio. Para mayores detalles ver Anexo 6.

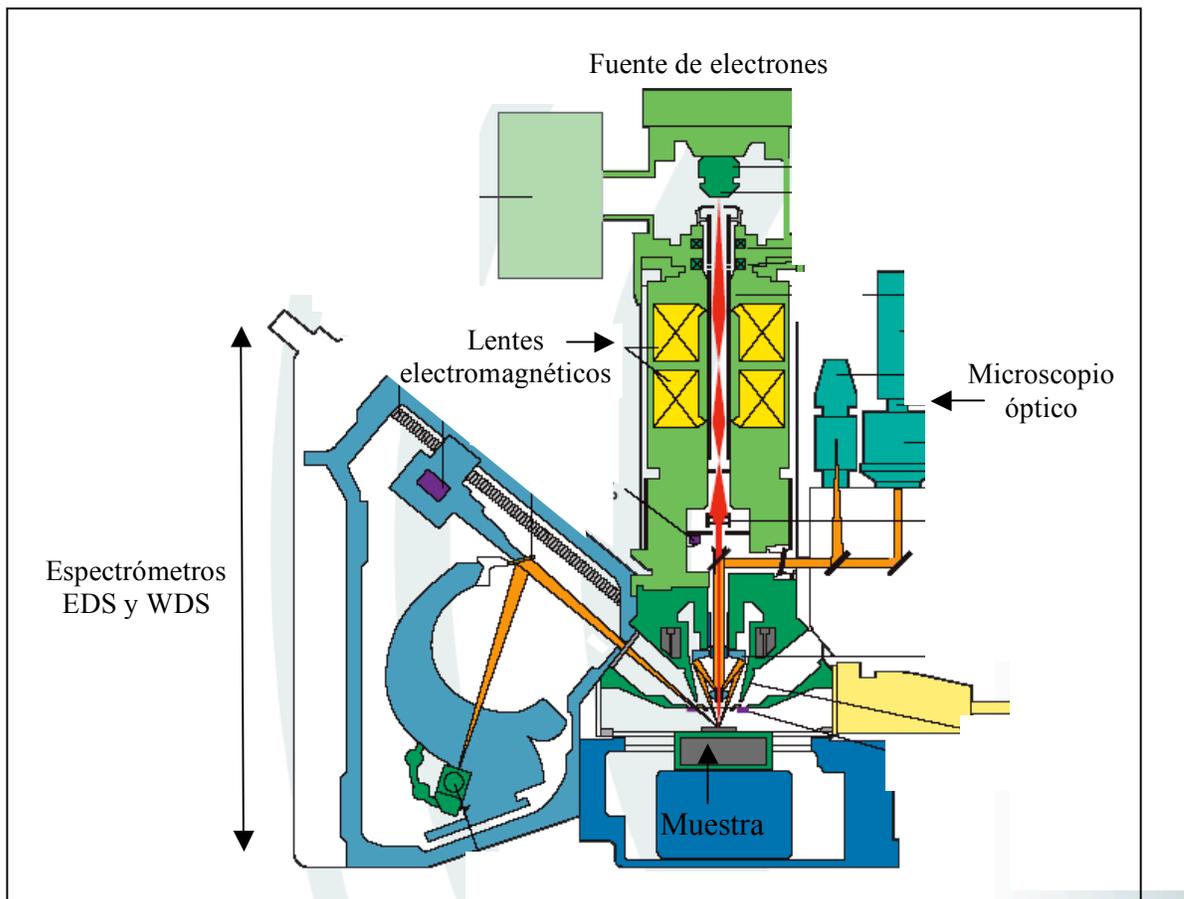


Figura. 7: Representación esquemática de CAMECA SX-100 (www.cameca.fr).

Tabla 2: Resumen de condiciones analíticas utilizadas para los análisis de microsonda de sulfuros de cobre.

	Condición 1			Condición 2			
	S	Fe	Cu	Ag	Se	Te	Sn
Intensidad (típica)	20-40 nA (30 nA)			20-40 nA (30 nA)			
Voltaje	20 kV			20 kV			
Cristal	PET	LLIF	LLIF	PET	LTAP	LLIF	PET
Standard	FeS ₂	FeS ₂	Cu ₂ S	Ag ⁰	Se ⁰	SbTe	SnS
Línea característica	Kα	Kα	Kα	Lα	Lα	Lα	Lα
Tiempo de conteo típico (s)	30	30	30	80 - 100	50 - 60	80	70
Límite de detección (ppm)	250 - 300	180 - 220	250 - 300	250 - 350	130 - 150	160 - 200	200 - 300

3.3 Análisis por espectrometría de masa de ionización secundaria (Secondary-Ionization Mass Spectrometry, SIMS)

Los análisis con SIMS se realizaron utilizando una microsonda iónica CAMECA modelo IMS-3f en el Laboratorio de Tecnologías Avanzadas para Minerales (Advanced Mineral Technology Laboratory, AMTEL), London, Ontario, Canadá.

El principio del método se basa en la medición de un haz de partículas ionizadas al bombardear una muestra sólida con un haz de iones. La importancia de este método radica en la alta sensibilidad (ppm a ppb) al entregar de resultados cuantitativos para los análisis realizados. Esta característica es de suma importancia para el estudio y cuantificación de metales preciosos, que en general ocurren en muy bajas concentraciones. Además de análisis químicos, mediante este método se puede obtener imágenes iónicas, espectros de masa y perfiles de profundidad, a través de un método destructivo.

En este estudio se utilizó este método únicamente para los análisis químicos puntuales y cuantitativos.

En la Figura 8 se presenta un esquema de la microsonda iónica con sus partes más básicas y en la Tabla 3 se presentan las condiciones analíticas que se aplicaron en este estudio. Para mayores detalles ver Anexo 7.

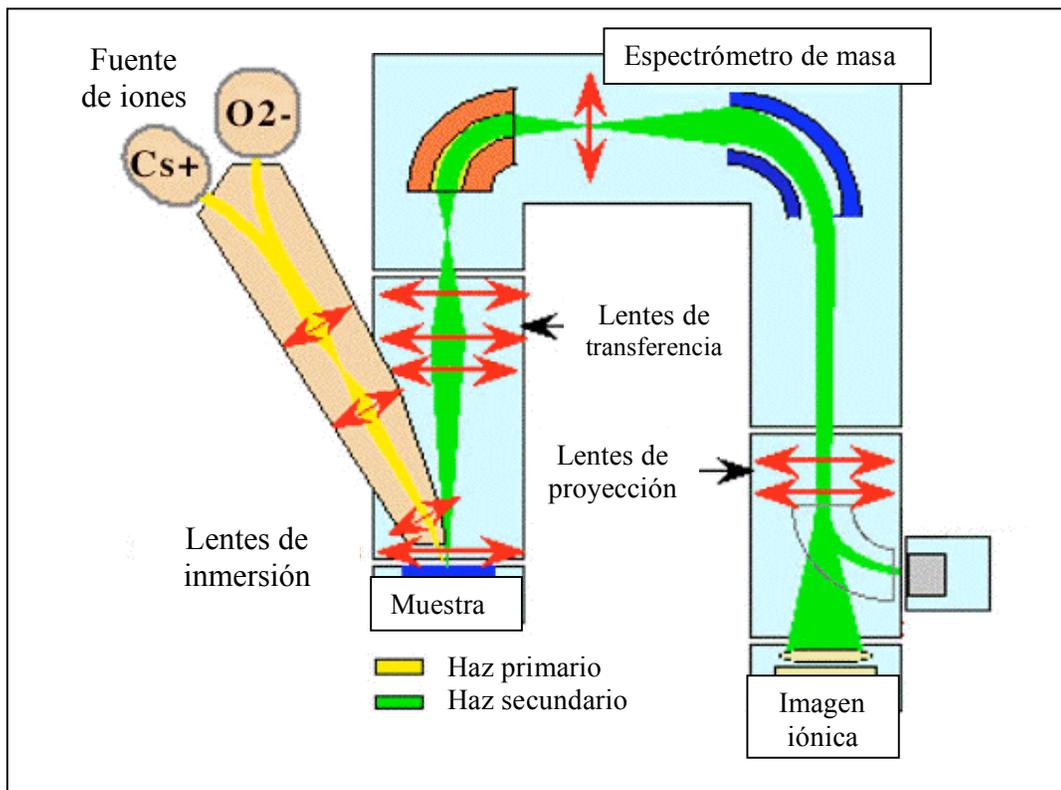


Figura 8: Representación esquemática de CAMECA IMS-3f (www.curie.u-psud.fr/U350/SIMS.html)

Tabla 3: Condiciones analíticas utilizadas para los análisis de SIMS.

	Condiciones generales					
Diámetro de muestreo	15 μm					
Análisis de profundidad	0,8 - 2 μm					
Intensidad haz primario	8 nA					
	Au	As	Ag	Sb	Te	Se
Límites de detección (ppm)	0.07	0.5	1.4	0.88	0.07	0.05

CAPITULO 4: Resultados

4.1 Resultados de EMPA

De las 18 muestras disponibles se analizaron 9 mediante EMPA (calcosina, bornita, calcopirita), a partir de las cuales se obtuvo el resultado de 400 análisis aproximadamente. Los resultados corresponden al %peso y %atómico tanto para elementos mayores (Cu, Fe, S) como para algunas trazas. Los elementos en traza que se detectaron (valores sobre el límite de detección de cada elemento) fueron Ag, Se, Sn y Te.

En la Tabla 4 se presenta un resumen con los promedios del %peso y %atómico para los elementos mayores, y la fórmula unidad calculada para los distintos sulfuros de cobre.

Tabla 4: Promedios de %peso, %atómico para los elementos mayores y fórmula unidad de cada mineral, obtenidos mediante EMPA.

Mineral		Calcosina	Bornita	Calcopirita
Fórmula unidad ideal		Cu_2S	Cu_5FeS_4	CuFeS_2
Fórmula unidad calculada		$\text{Cu}_{1,82}\text{S}$	$\text{Cu}_5\text{Fe}_{0,89}\text{S}_4$	CuFeS_2
Cu	%peso ideal	79,85	63,3	34,62
	prom %peso	77,56	63,33	34,48
	prom %atómico	64,64	50,18	25,26
Fe	%peso ideal	0	11,12	30,43
	prom %peso	0,04	10,97	30,1
	prom %atómico	0	9,89	25
S	%peso ideal	20,15	25,56	39,94
	prom %peso	21,47	25,49	34,48
	prom %atómico	35,46	40,02	49,71

En la Tabla 4 se verifica que la fórmula unidad calculada y la fórmula unidad ideal son bastante similares, además de la similitud entre los promedios de %peso calculados y los %peso ideal para cada elemento en los distintos minerales.

Ploteando los resultados del %atómico en un diagrama ternario Cu-Fe-S se obtiene como resultado la Figura 9.

Se observa de la Tabla 4 y de la Figura 9 que los 3 sulfuros de cobre bornita, calcosina y calcopirita son bastante estequiométricos, presentando campos bien definidos en el diagrama ternario.

Cabe señalar que para el caso de la calcosina, la fórmula unidad calculada (Tabla 4) se asemeja más a la de la digenita que a la de la calcosina.

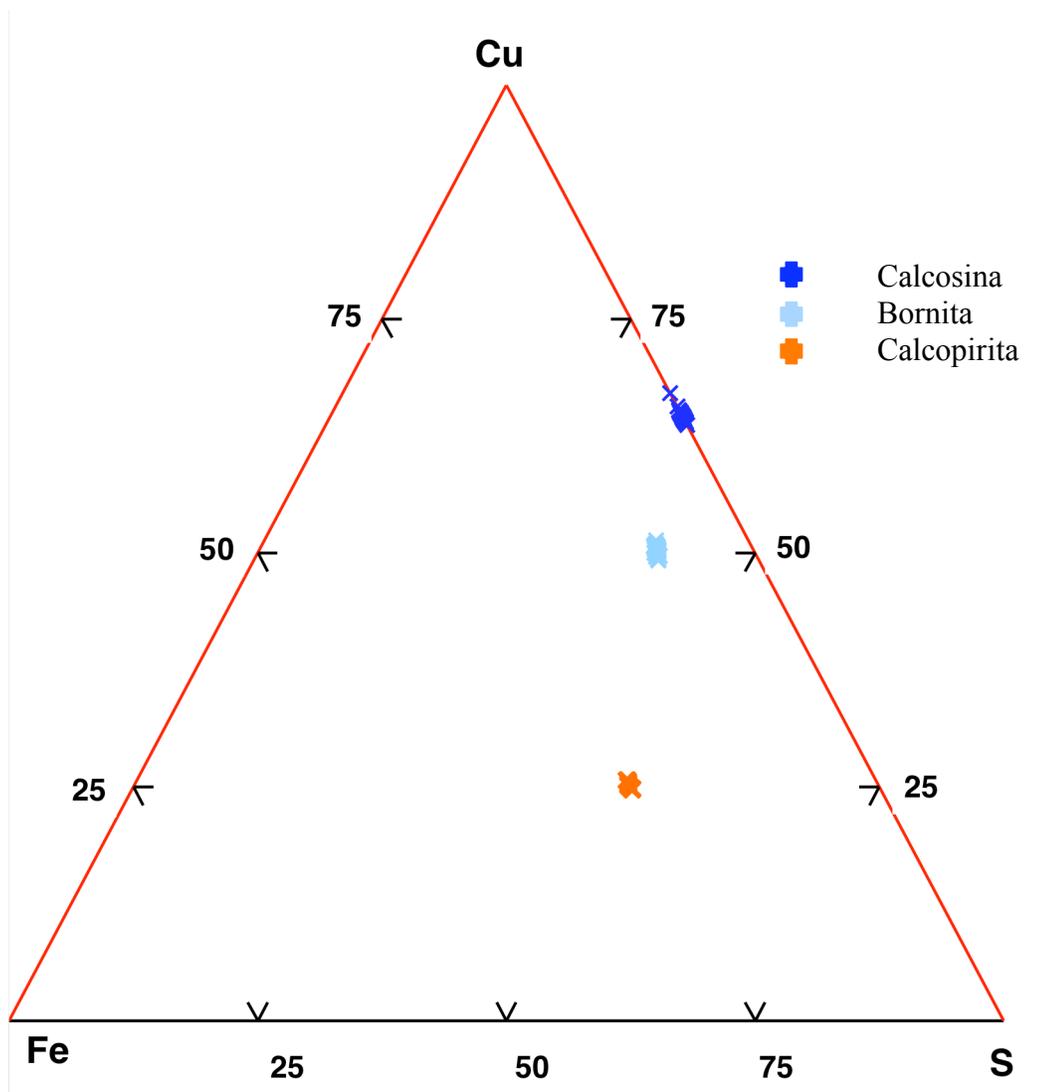


Figura 9: Diagrama ternario Cu-Fe-S mostrando la composición de los sulfuros de cobre calcosina, bornita y calcopirita. Los parámetros ploteados son los %atómicos de cada elemento llevados al 100%

Los elementos en traza presentes en los distintos sulfuros de cobre (sin considerar las inclusiones) se presentan en la Tabla 5, donde se señala la cantidad de puntos (#) con concentraciones de algún elemento sobre el límite de detección, el rango de concentraciones que abarcan (min-max) y el promedio de éstas. Además, bajo el nombre de cada mineral se señala el número de análisis realizados para cada uno de los minerales (sin considerar los análisis de inclusiones).

Tabla 5: Resultados de EMPA para elementos en traza (Ag, Se, Te, Sn)

Mineral (#)	Ag (ppm)			Se (ppm)			Te (ppm)			Sn (ppm)		
	#	Rango	prom	#	Rango	prom	#	Rango	prom	#	Rango	prom
Calcosina (73)	2	520-827	674	2	405-434	420	1	128	128			
Bornita (146)	33	325-730	481							1	252	252
Calcopirita (177)	25	435-975	567				2	481-1332	907	4	235-495	378

La plata es el único elemento que se presenta con frecuencias considerables, y además se incorpora en los tres sulfuros de cobre analizados. Hay que recordar que las bornitas y calcopiritas provienen de Mantos Blancos, y para el caso de las calcosinas, los 2 puntos con concentraciones de Ag, de un total de 73 medidos, provienen de Mantos de la Luna. En la Figura 10 se muestran histogramas de frecuencia v/s rangos de concentración de Ag en los distintos minerales.

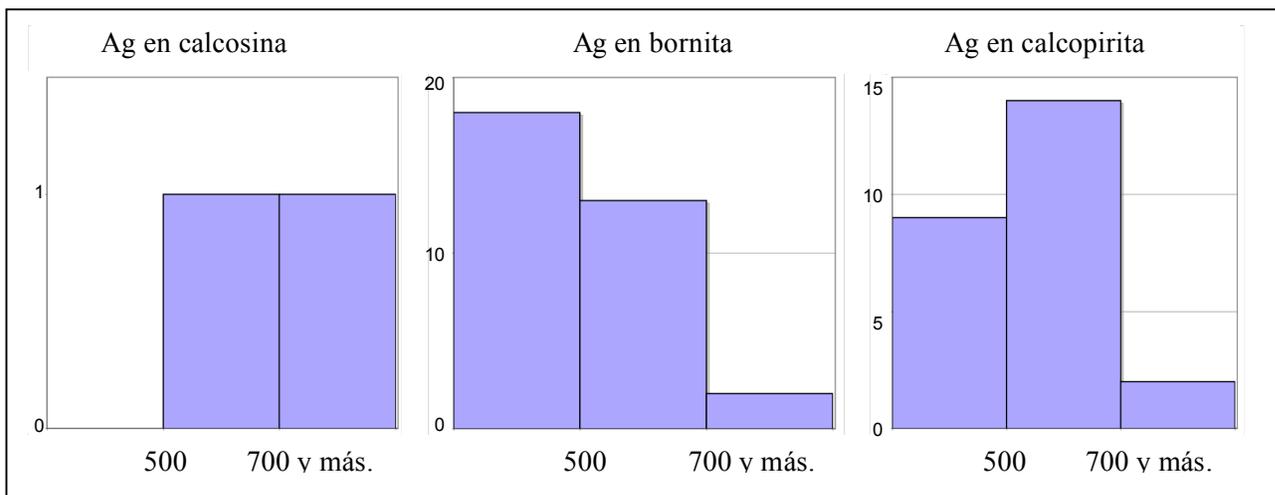


Figura 10: Histogramas mostrando rango de concentración ppm (eje X) v/s frecuencia (eje Y) de Ag en los distintos sulfuros de cobre con datos de EMPA.

Se observa que la calcosina posee frecuencias de análisis con Ag considerablemente menores que los otros dos sulfuros de cobre (sólo 2 puntos con Ag

sobre el límite de detección), es decir, la Ag se incorpora preferentemente en bornitas y calcopiritas. Proporcional a los análisis realizados para cada sulfuro de Cu, la bornita presenta mayor cantidad de puntos con Ag, 33 de 146, con concentraciones que corresponden principalmente al primer intervalo de rangos, el de las menores concentraciones. La calcopirita exhibe menos análisis con Ag que la bornita, sólo 25 de 177, sin embargo, éstos presentan mayor frecuencia en los rangos de concentración de Ag intermedio y alto.

Cabe señalar que los resultados de SIMS revelan concentraciones de Ag en todas las bornitas y calcopiritas, en un rango de 81,1 a 649 ppm para la bornita y de 0,61 a 2211 ppm para la calcopirita (ver sección 4.2). Por lo tanto, las bornitas y calcopiritas sin plata probablemente poseen este elemento pero en concentraciones menores a los 250-350 ppm alcanzados por EMPA.

Para determinar la existencia de alguna relación entre plata y elementos mayores y para verificar si la Ag ocupa el espacio, en las estructuras, de alguno de estos elementos, se realizan gráficos para Cu, S, Fe y Ag en calcopiritas y bornitas de las líneas de muestreo mostradas en imágenes BSE (Figs 11 y 12). Se plotean únicamente los valores sobre el límite de detección.

La Figura 11, en calcopirita, muestra la aparición de una especie de plateau para los 3 elementos mayores en los puntos donde aparece Ag.

La Figura 12, en bornita, muestra una correlación inversa entre Cu y Ag, ya que, en los puntos con altas concentraciones de Ag bajan las de Cu, y viceversa.

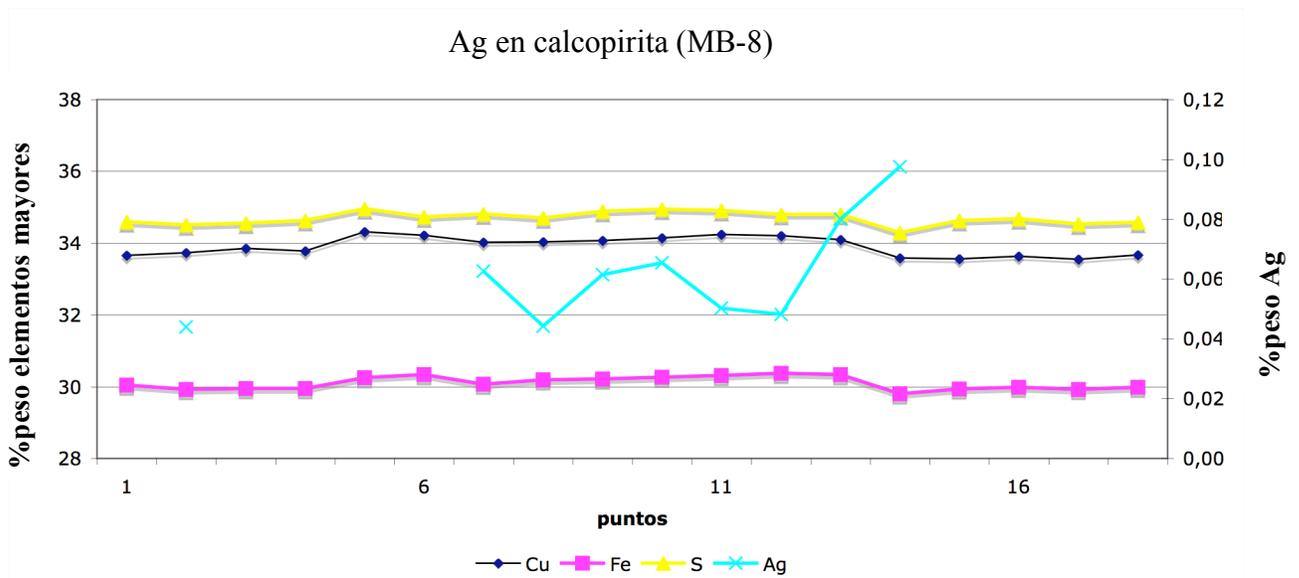
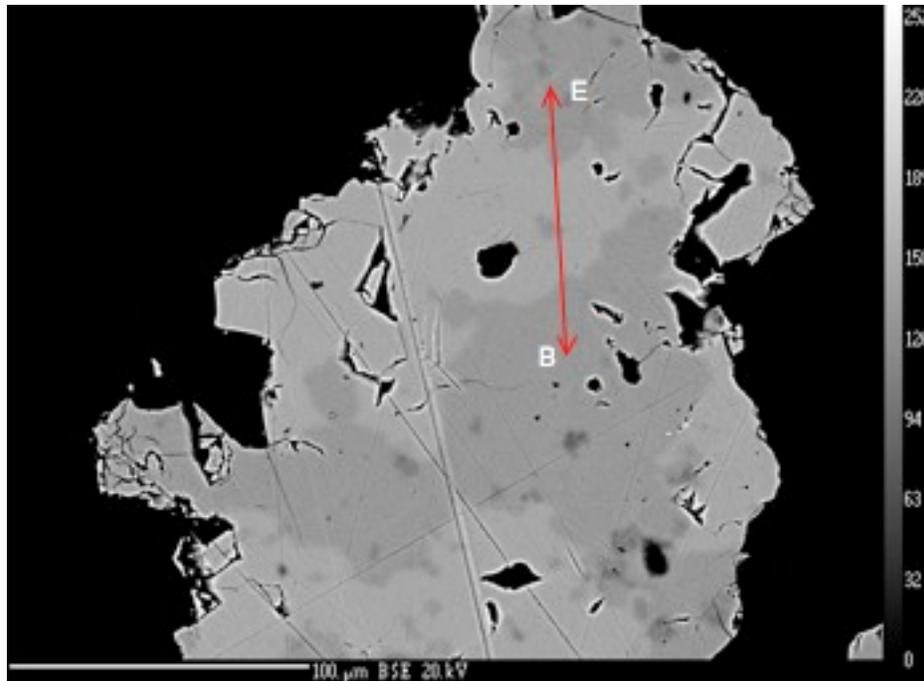


Figura 11: Imagen BSE de calcopirita con línea de muestreo en rojo, B es el comienzo y E el final. Abajo gráfico de elementos mayores y Ag en calcopirita MB-8 para determinar tendencias y/o posibles reemplazos.

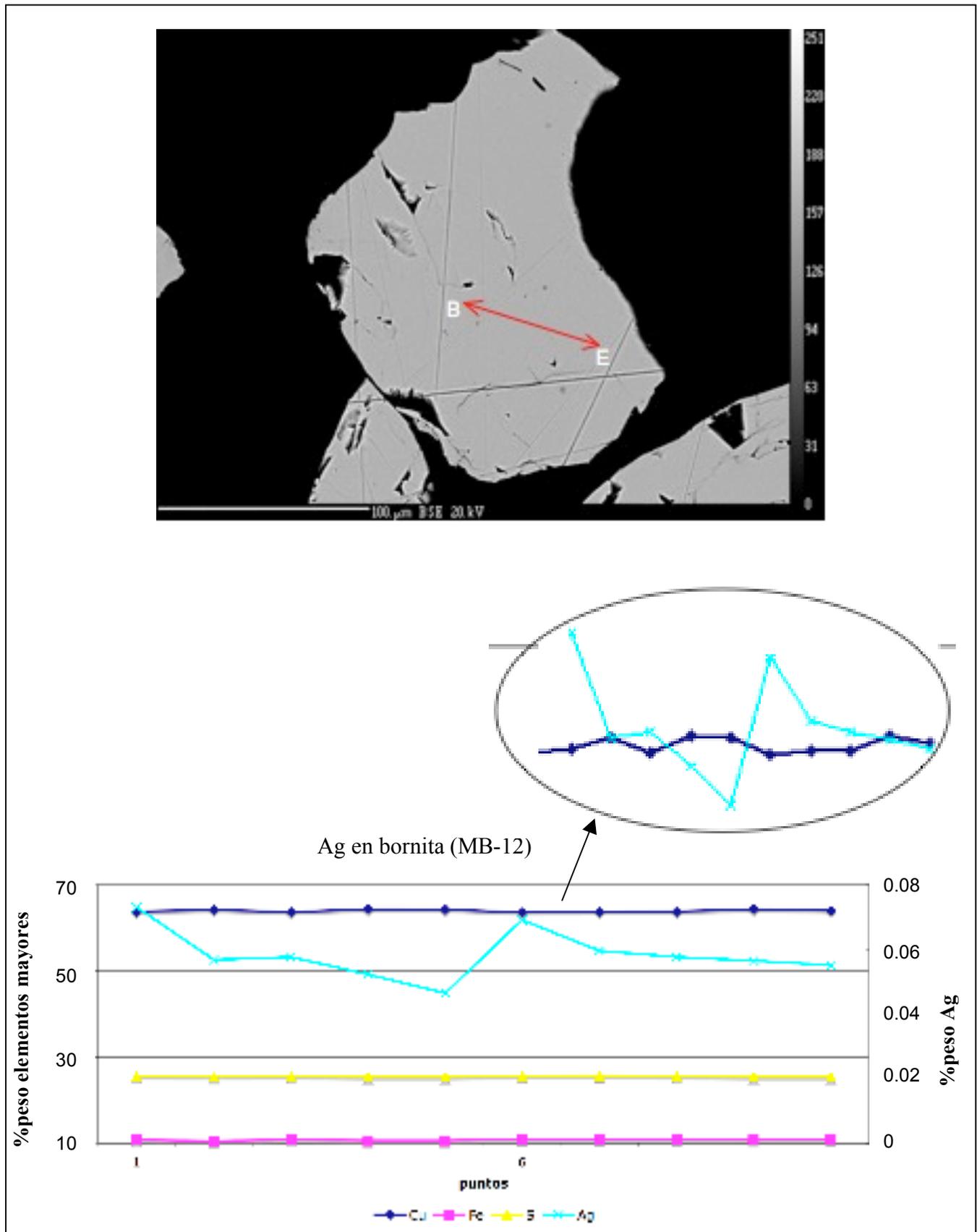


Figura 12: : Imagen BSE de bornita con línea de muestreo en rojo, B es el comienzo y E el final. Abajo gráfico de elementos mayores y Ag en bornita MB-12 para determinar tendencias y/o posibles reemplazos. En el elipsoide un acercamiento con la variaciones de Ag superpuestas sobre la de Cu

Además se distingue la presencia de inclusiones micrométricas en calcopiritas (<math><2\ \mu\text{m}</math>) y calcosinas (<math><10\ \mu\text{m}</math>) (Fig 13 y 14 respectivamente). Éstas ocurren en bordes de granos, en fracturas y en algunos casos en el centro de los granos. Las inclusiones vistas en calcosinas son de mayor tamaño que las de calcopiritas.

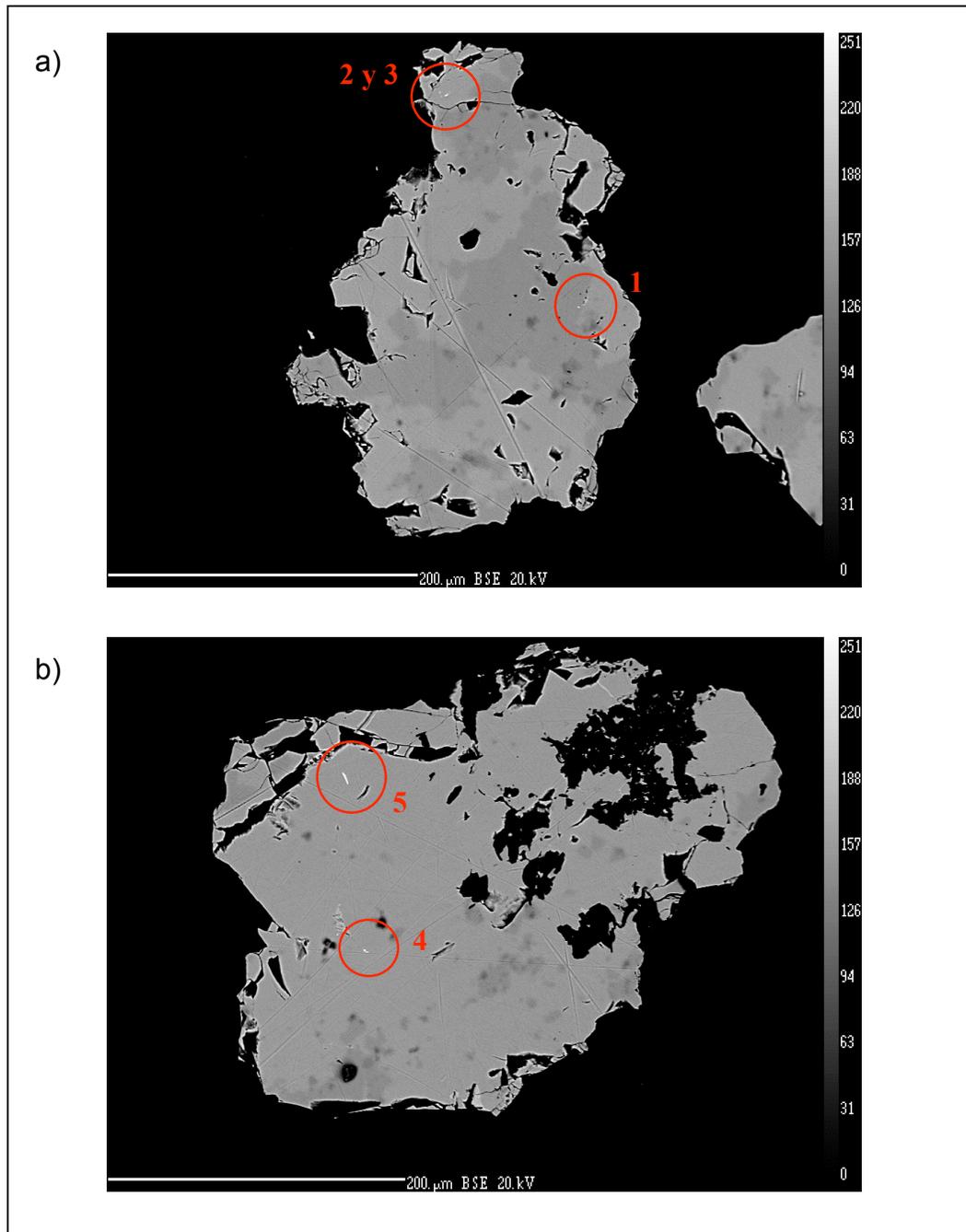


Figura 13 a y b: Imágenes BSE de granos de calcopirita de Mantos Blancos MB-8, con microinclusiones (en círculo rojo). Los números en rojo corresponden a los puntos de los análisis en la Tabla 6..

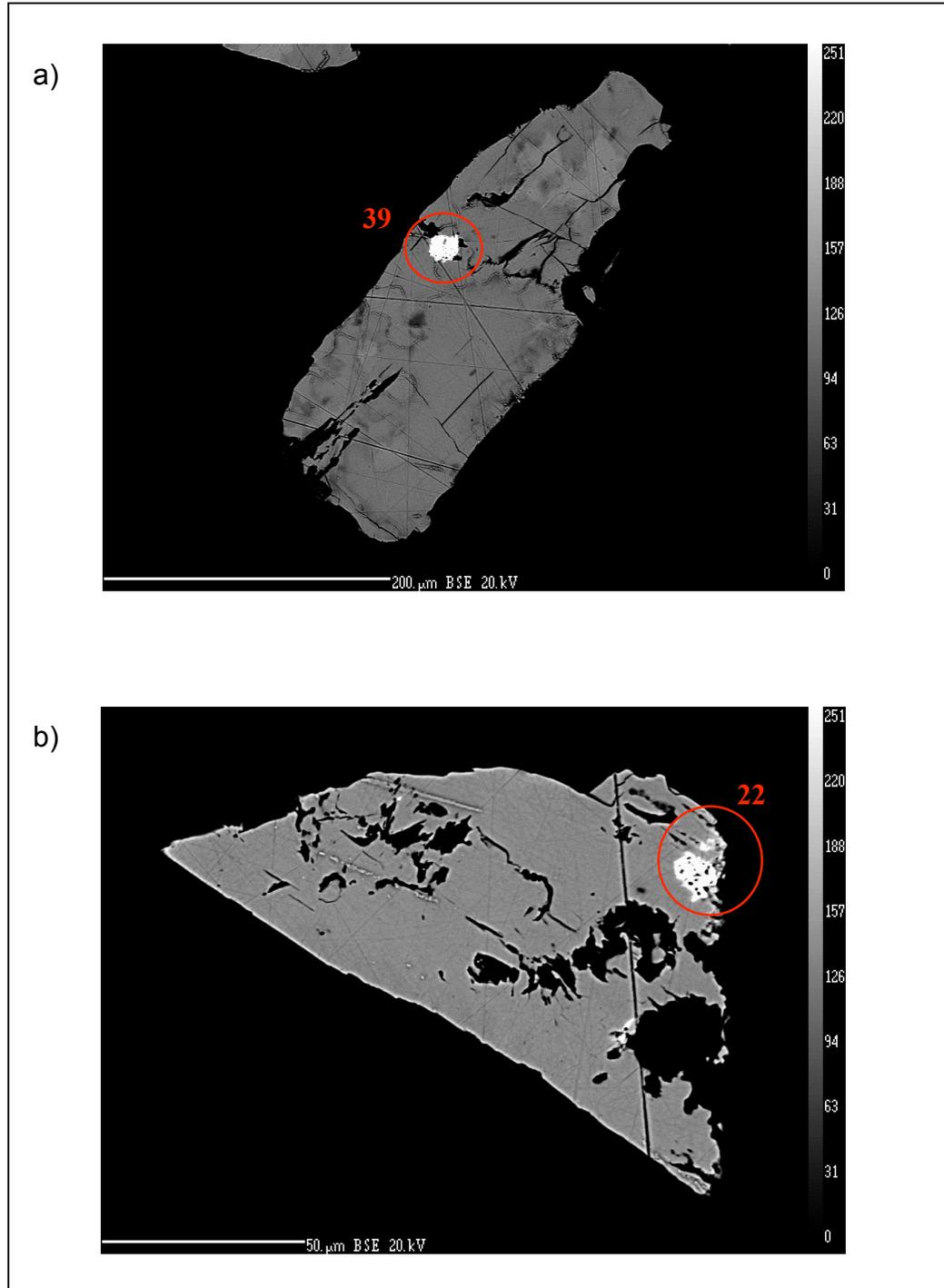


Figura 14: Imágenes BSE de granos de calcosina (a) de Mantos Blancos MB-14 y (b) de Mantos de la Luna ML-1, con microinclusiones (en círculo rojo). Los números en rojo corresponden a los puntos de los análisis en la Tabla 7.

Se realizaron análisis puntuales con WDS para verificar la composición de las inclusiones. Sin embargo, debido a su tamaño ($<2 \mu\text{m}$ para la calcopirita, $<10 \mu\text{m}$ para la calcosina) no se logra medir únicamente su composición, sino que un traslape entre la composición de la inclusión y la matriz de la calcopirita. Los resultados se presentan en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6: Resultados de WDS para análisis puntual de microinclusiones en calcopirita de Mantos Blancos, muestra MB-8.

Puntos	S (% peso)	Fe (% peso)	Cu (% peso)	Ag (% peso)	Total
1	34,04	29,24	33,57	0,13	96,97
2	33,36	27,36	34,01	3,98	98,71
3	34,33	29,48	33,97	0,89	98,67
4	31,51	23,46	32,40	13,10	100,46
5	31,13	25,62	30,21	15,57	102,53

Las concentraciones de Ag son variables entre 1300 a 150000 ppm, aproximadamente. En la Figura 15 se grafican estos datos para tratar de encontrar alguna tendencia o correlación entre estos elementos.

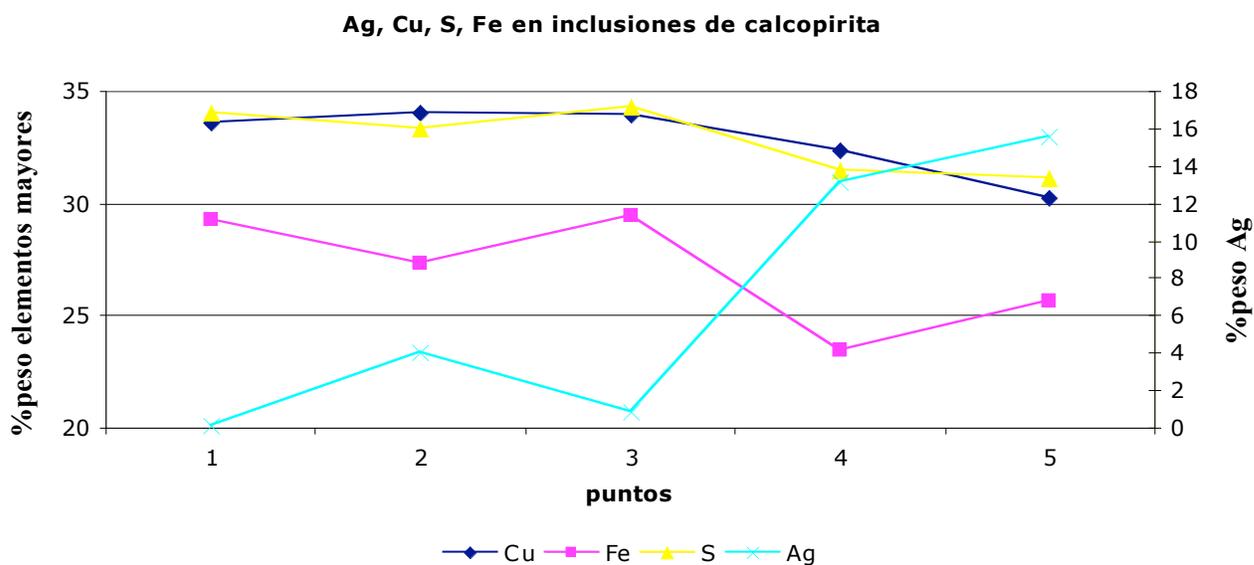


Figura 15: Gráfico de Ag, Cu, S y Fe para las micro inclusiones, en 2 granos de calcopiritas de la muestra MB-8 de Mantos Blancos, mostrando el comportamiento de los elementos.

En la Figura 15 se puede observar que la presencia de inclusiones hace variar irregularmente los valores de Fe, Cu y S respecto de la calcopirita estequiométrica. Los puntos 4 y 5, que presentan más de 1% peso de Ag, muestran valores para los elementos mayores bastante más bajos que los ideales. Cabe señalar que todas las inclusiones poseen concentraciones de Ag sobre los 1000 ppm, pudiendo corresponder a minerales de plata, por ejemplo acantita.

Para la calcosina también se obtienen datos con WDS de la composición de las inclusiones, (Tabla 7). En este caso, al igual que para la calcopirita, se mide un traslape entre las inclusiones y la matriz de la calcosina. Esto se verifica al observar que algunos de los datos que poseen buenos totales presentan una composición cercana a la de la calcosina promedio de estos yacimientos, con valores de % peso para Cu y S similares a los de la Tabla 4, además de las trazas de Ag.

Tabla 7: Resultados de %peso para los análisis con WDS de microinclusiones en calcosinas de Mantos de la Luna y Mantos Blancos. Del 1 al 27 son análisis e inclusiones en la muestra ML-1 de Mantos de la Luna, y los puntos 30, 31 y 39 provienen de la muestra MB-14 de Mantos Blancos. Recuadros en blanco corresponden a valores bajo el límite de detección.

Ptos	S (%peso)	Fe (%peso)	Cu (%peso)	Se (%peso)	Ag (%peso)	Te (%peso)	Total
1	19,55		74,02		7,01		100,58
2	20,77		77,00		0,86		98,63
3	18,81		77,33		0,14		96,28
4	20,89		75,53		2,55		98,97
5	20,99		77,09		1,05		99,13
6	20,62		75,86		3,58		100,06
7	21,67		77,74		0,43		99,83
8	20,50		74		3,63	0,02	98,15
9	21,74		78,33		0,15		100,22
10	21,16		76,35		0,60		98,11
11	15,42	0,06	59,21		12,79	0,02	87,50
12	19,74		71,79		9,97		101,50
13	21,72		77,44		0,21		99,37
14	21,94		78,47		0,04		100,45
15	14,73		60,06	0,03	11,71	0,02	86,55
16	7,00		36,16		59,52	0,02	102,70
17	7,43		30,52		38,24	0,04	76,22
18	21,80		77,60		1,16		100,56
19	15,86		56,76		8,12		80,73
20	21,80	0,49	76,94		0,21		99,44
22	0,53		10,32		37,18	0,07	48,10
23	20,12		71,88		4,99	0,02	97
24	20,01		71,80		11,49		103,31
25	21,71		74,17	0,02	0,22		96,12
26	21,09		75,93		0,05		97,08
27	16,66		60,28		10,64		87,59
30	8,81		31,09	0,02	18,74	0,02	58,68
31	20,54	0,08	74,30		4,64		99,56
39	0,77	0,02	4,71		67,61		73,10

Se observa en las inclusiones la presencia menor de otros elementos en traza, tales como Te y menor Se; además de la presencia en algunos casos de trazas de Fe.

Los totales en muchos casos son inferiores incluso al 90%. Para casi la totalidad de estos casos, los contenidos en plata superan los 10000 ppm. Para verificar si este total es tan bajo debido a la existencia de otros elementos aparte de los incluidos en la calibración EMPA, se realiza un análisis de EDS a una de las inclusiones en calcosina (puntos 16 y 17 en Tabla 7), Figura 16.

La Figura 16 muestra el grano de calcosina con la inclusión y el espectro EDS para esta última. Se observa la presencia de los notorios peaks de Ag y I en las líneas $L\alpha$ y $L\beta$ para ambos casos, lo que habla de concentraciones considerables de estos elementos.

Para determinar la distribución de algunas de sus componentes, se realiza un mapeo elemental con WDS en el grano de calcosina de la Figura 16 para los elementos Cu, S, Ag, I, Cl.

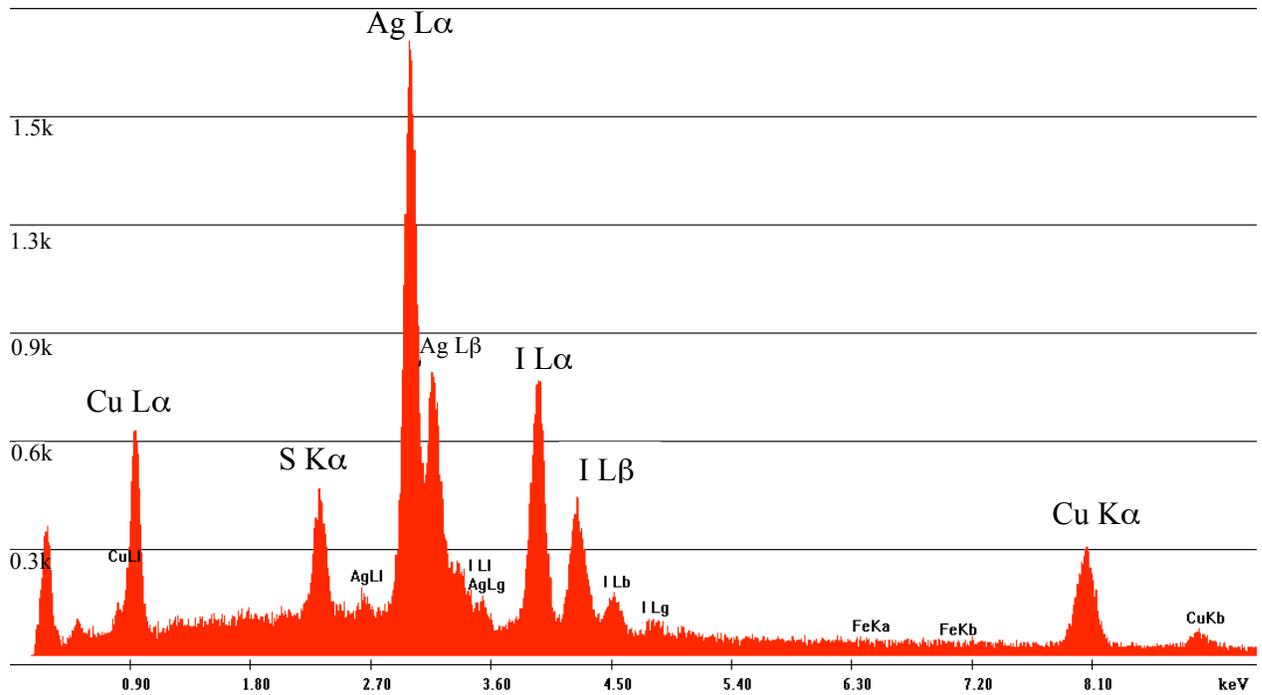
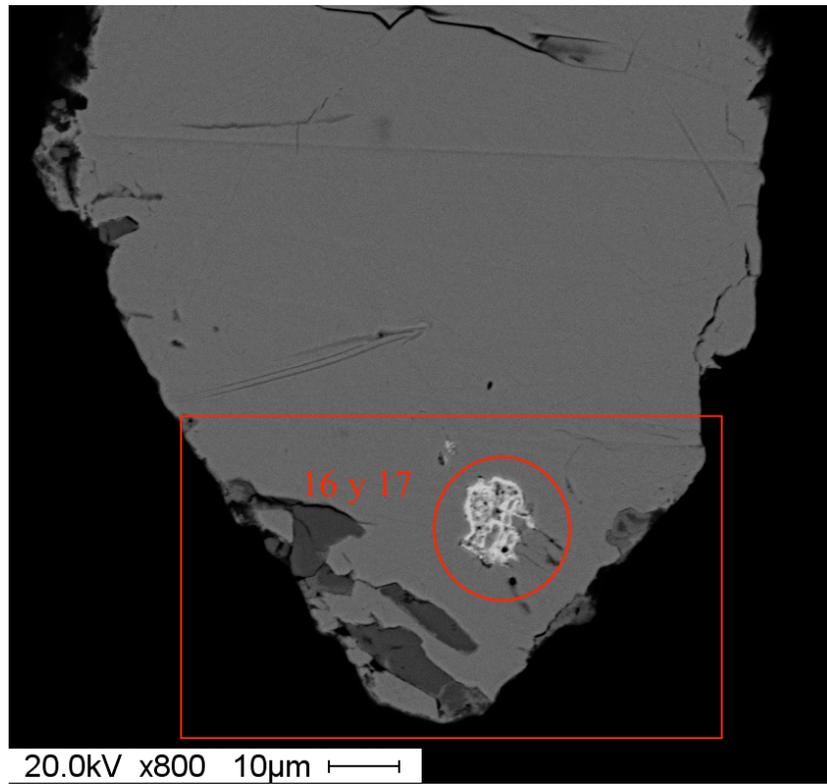
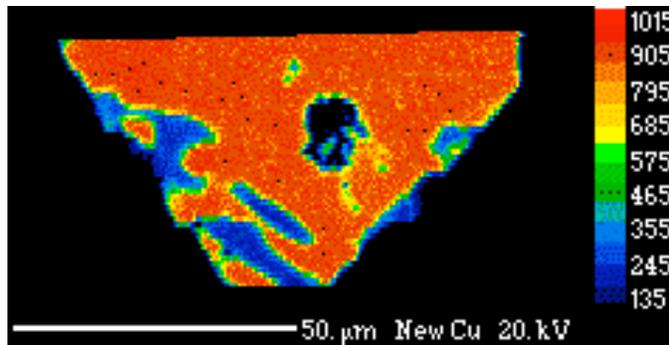
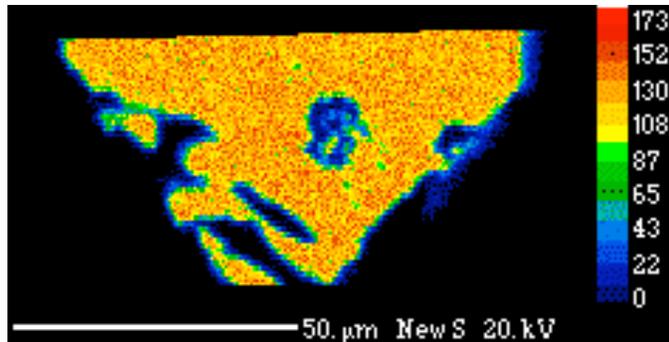


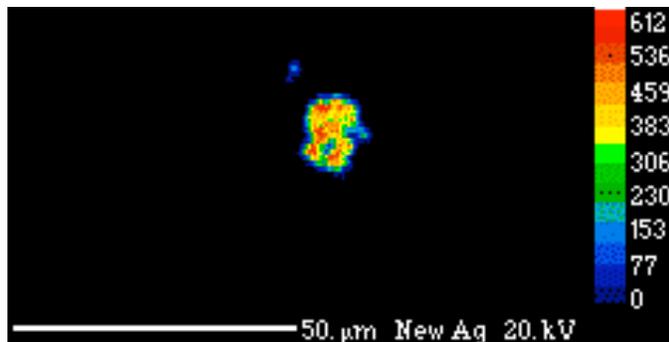
Figura 16: a) Imagen BSE de un grano de calcosina ML-1 de Mantos de la Luna, con microinclusión (círculo rojo). Números en rojo corresponden a los resultados de análisis mediante EMPA (WDS), Tabla 7. En cuadro rojo área del mapeo elemental (Figura 12). b) Espectro EDS de rayos X para la inclusión en a.



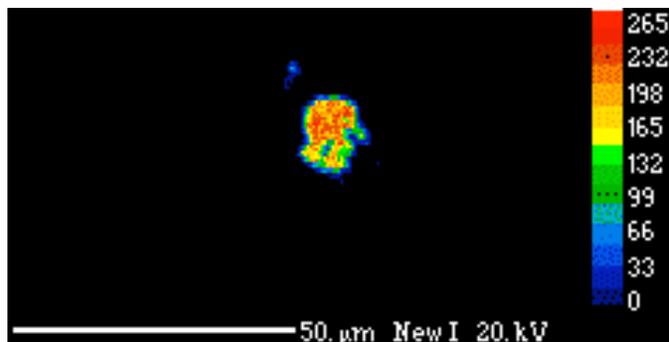
Mapa elemental de Cu
Usando línea $L\alpha$



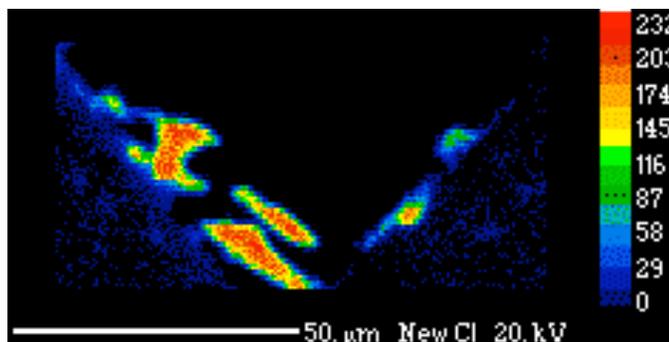
Mapa elemental de S
Usando línea $K\alpha$



Mapa elemental de Ag
Usando línea $L\alpha$



Mapa elemental de I
Usando línea $L\alpha$



Mapa elemental de Cl
Usando línea $K\alpha$

Figura 17: Mapas elementales mediante WDS para Cu, S, Ag, I, Cl en grano de calcosina de Figura 16. 39

De la Figura 17 se verifica que la inclusión efectivamente es de Ag y I, elementos presentes únicamente en ella. Utilizando el WDS se mide la existencia de oxígeno, obteniendo un resultado negativo, el cual se respalda con el espectro EDS (Fig 16), donde no se presenta el peak de este elemento.

Se observa una distribución relativamente uniforme para los elementos Cu y el S, sin embargo, aparece una fase donde disminuye la concentración de Cu, prácticamente desaparece el S y aparecen concentraciones importantes de Cl. Esta zona corresponde al sector gris oscuro de la Figura 16, ubicado en el sector inferior izquierdo del grano.

Para estudiar esta fase clorurada se realizan análisis puntuales, líneas de barrido y mapas elementales para un grano de calcosina (Fig 18) que presente estas zonas grises.

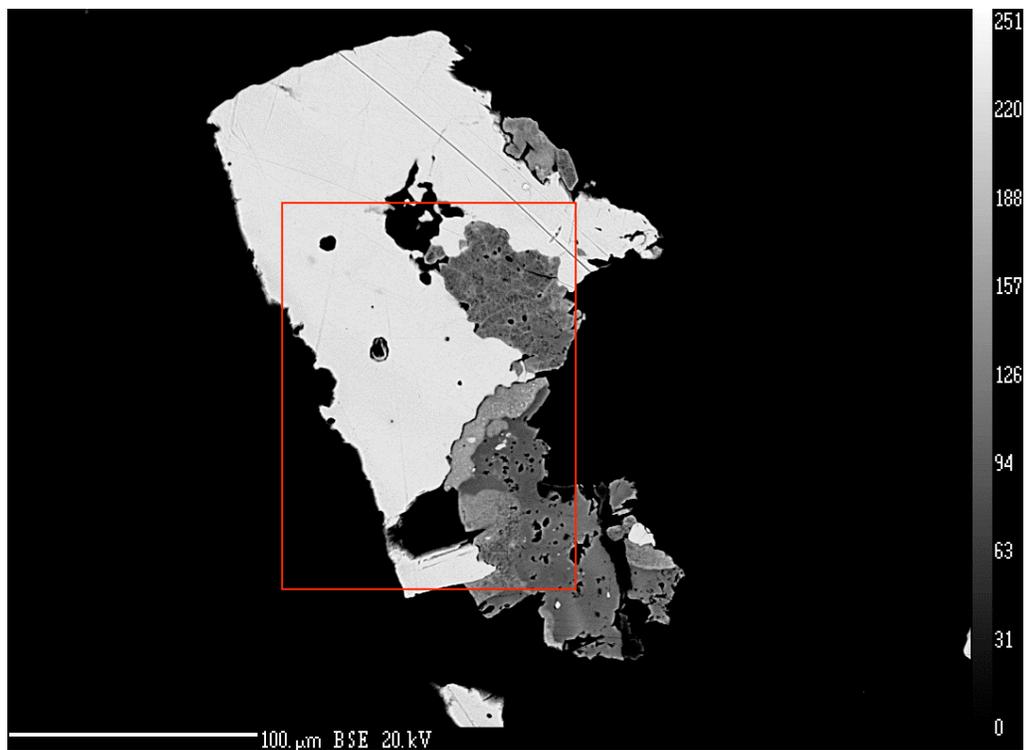
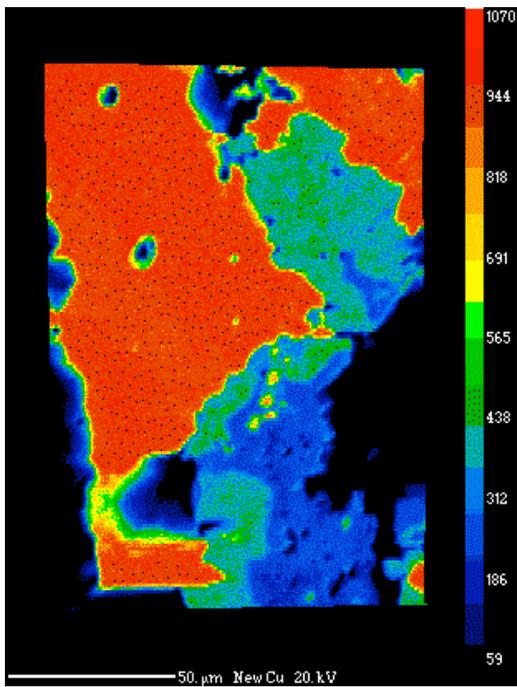


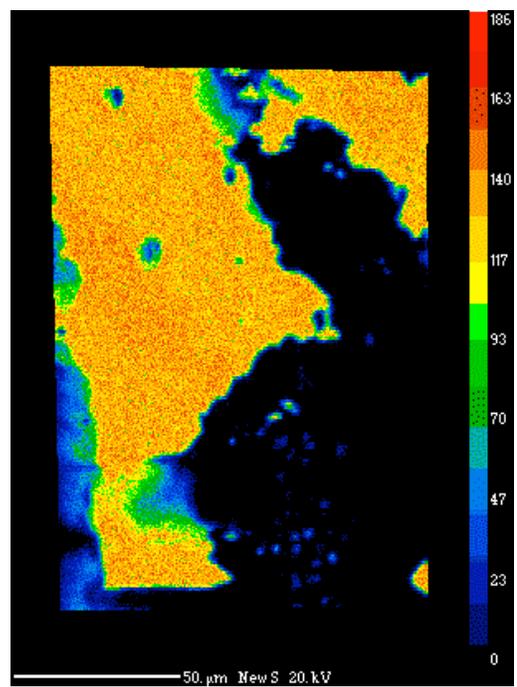
Figura 18: Imagen BSE de un grano de calcosina de la muestra ML-1 de Mantos de la Luna con fases cloruradas. En cuadro rojo área del mapeo elemental de la Figura 19.

Los análisis obtenidos en los análisis puntuales WDS de las fases cloruradas entregan totales, en su mayoría, cercanos al 75 %peso, lo cual indica que hay una fase o elemento que no está siendo medido con el WDS (véase Anexo 3). Adicionalmente, cabe señalar que en las zonas cercanas al grano de calcosina no alterado (blanco en la Figura 18), es decir, el sector gris claro, se encuentran concentraciones de Ag que varían entre los 380 y 2200 ppm.

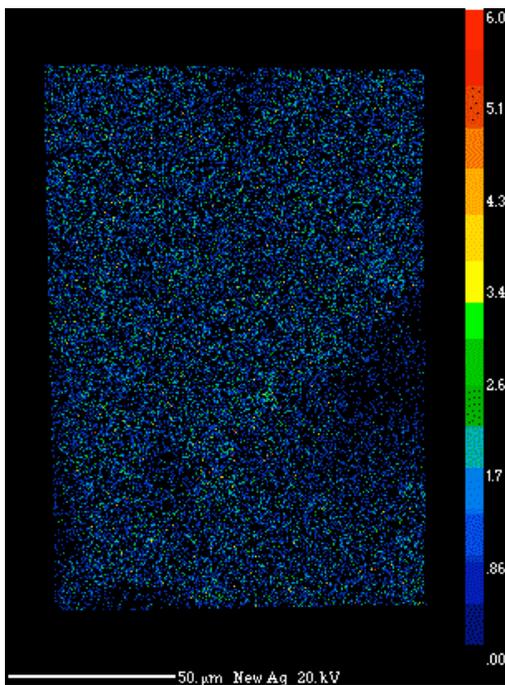
De la figura 19 se observa que Cu y Cl presentan comportamientos inversos; a medida que aumenta la concentración de Cl disminuye la de Cu. El S y Ag se comportan homogéneamente en el grano, sin embargo, se observa que el S desaparece en las fases cloruradas.



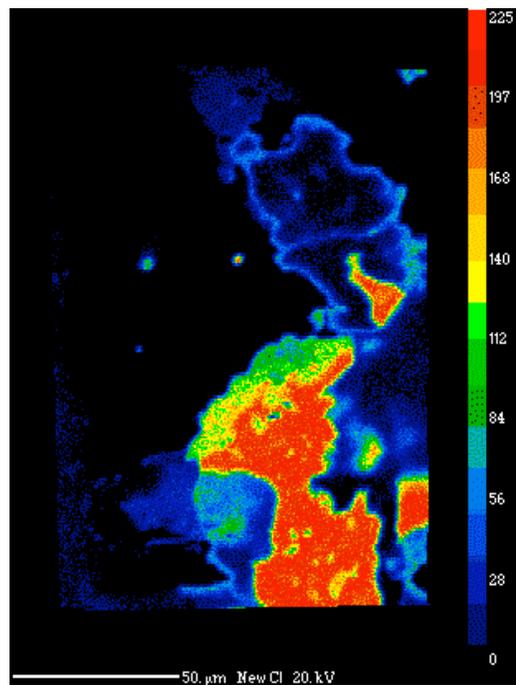
Mapa elemental de Cu usando línea $L\alpha$



Mapa elemental de S usando línea $K\alpha$



Mapa elemental de Ag usando línea $L\alpha$



Mapa elemental de Cl usando línea $K\alpha$

Figura 19: Mapas elementales para Cu, S, Ag, Cl en grano de calcosina de Figura 18.

4.2 Resultados de SIMS

De las 18 muestras analizadas (Tabla 1) se obtuvo un total de 237 análisis. Las mediciones fueron realizadas para determinar concentraciones submicroscópicas de oro, plata, arsénico, antimonio, telurio y selenio en los sulfuros de cobre, en un límite de detección menor al del análisis EMPA.

Como primera aproximación se presentan los máximos, mínimos, promedios y error estándar de los distintos elementos medidos en los 4 sulfuros de cobre, para los 3 yacimientos (Tabla 9). Se descartaron algunos datos al momento de calcular el promedio ya que escapaban de la tendencia, haciendo que la media no fuera representativa (Mantos de la Luna: 90,8 y 134 ppm As, 464 ppm Ag, 10,3 ppm Sb; Mantos Blancos: para calcosina se eliminó 55,3 ppm As, para bornita 156 ppm As, 0 ppm Te, 27,5 ppm Sb, para calcopirita 102 y 79,6 ppm As, 2211 ppm Ag, y 5052 ppm Se; Susana-Lince: 173 y 71,6 ppm As, 128; 140 y 101 ppm Ag, 102 ppm Se).

Para los análisis mediante SIMS la calcosina y la calcopirita se clasifican, en el laboratorio, según el tipo morfológico del grano, pudiendo ser: de grano grueso o grano fino, y además para el caso de la calcosina puede ser oxidada. La cantidad de análisis de acuerdo a la caracterización de los granos de los sulfuros de cobre se muestra en la siguiente tabla

Tabla 8: Número de datos obtenidos mediante SIMS para los distintos sulfuros de cobre, según su tipo morfológico cuando corresponda.

Mineral	Grano grueso	Grano fino	Oxidada	Total
Calcosina	81	47	7	135
Bornita	20			20
Covelina	12			12
Calcopirita	22	22		44

En la Figura 20 se muestra la frecuencia de incorporación de determinados rangos de concentración para los distintos elementos en los 4 sulfuros de cobre.

Yacimiento	Mineral	# datos	Ag (ppm)	Au (ppm)	As (ppm)	Te (ppm)	Sb (ppm)	Se (ppm)
			Max-Min <X> ± σ	Max-Min <X> ± σ	Max-Min <X> ± σ	Max-Min <X> ± σ	Max-Min <X> ± σ	Max-Min <X> ± σ
Mantos de la Luna	Calcosina	48	0,38 – 464 29,72 ± 6,40	0 - 5,98 0,41 ± 0,10	0,04 – 134 8,34 ± 2,08	0,63 – 13 2,51 ± 0,27	0 - 10,30 1,04 ± 0,30	1,82 - 15,90 7,63 ± 0,51
			Mantos Blancos	Calcosina	37	0,03 – 369 54,19 ± 12,30	0 - 1,92 0,33 ± 0,08	0,02 – 55,3 4,44 ± 1,28
Calcopirita	44	0,61 – 2211 179 ± 35,73				0,05 – 0,85 0,24 ± 0,02	0 – 102 9,84 ± 1,81	0 – 3,24 0,64 ± 0,10
		Bornita		20	81,1 – 649 351,96 ± 34,63	0,08 – 2,38 1,16 ± 0,16	0 – 156 1,44 ± 0,54	0 – 7,92 5,11 ± 0,35
Covelina	12				89,8 – 372 215,82 ± 24,92	0 – 0,67 0,17 ± 0,06	0,36 – 10,8 3,27 ± 1,12	1,07 – 2,08 1,56 ± 0,09
		Total		113	0,03 – 2211 166,70 ± 17,64	0 – 2,38 0,43 ± 0,05	0 – 156 7,83 ± 1,44	0 – 7,92 1,96 ± 0,17
Susana-Lince	Calcosina	50	0 – 140 17,35 ± 2,77	0 – 3,13 0,36 ± 0,09	0 – 173 5,23 ± 1,54	0,58 – 6,69 2,20 ± 0,18	0 – 11,9 0,67 ± 0,29	2,53 – 102 9,23 ± 0,57

Tabla 9: Resultados SIMS para análisis de Au, As, Ag, Te, Sb y Se. Número de datos, concentración máxima, mínima, promedio y error típico para Au, As, Ag, Te, Sb, Se en los distintos sulfuros de cobre: calcosina, calcopirita, bornita, covelina, por depósito.

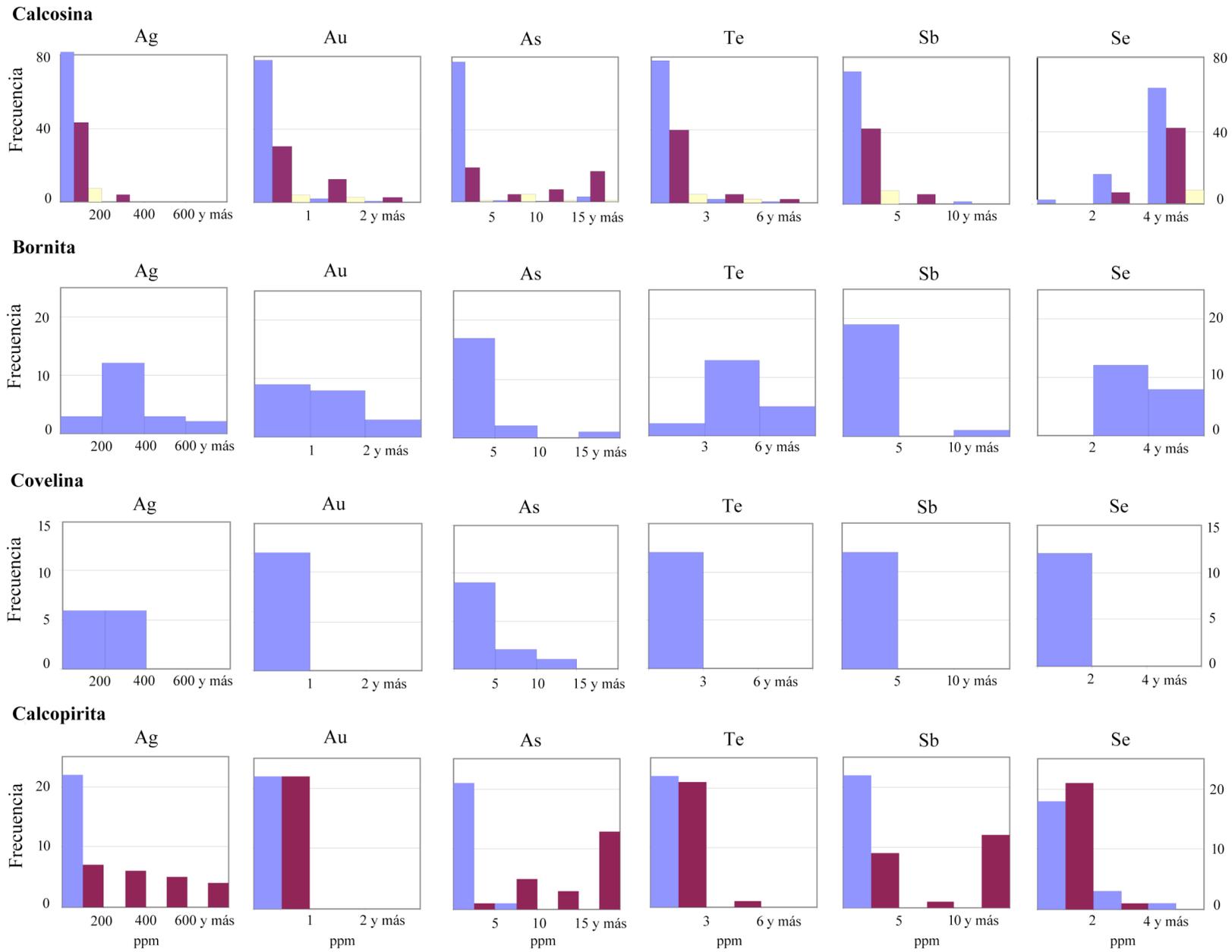


Figura 20: Gráficos rango de concentración en ppm (eje X) v/s frecuencia (eje Y) ■ Grano grueso, ■ Grano fino, ■ Oxidado

De la Figura 20 se observa que la calcosina y la covelina presentan bajos niveles de concentración de metales traza, reflejado en altos peaks hacia la izquierda de los histogramas, y menor frecuencia, o inexistente en algunos casos, para los rangos de concentraciones medias y mayores (para el caso de la plata, concentraciones medias son del orden de los 400 a 600 ppm y mayores corresponden a concentraciones mayores a 600 ppm). La bornita y calcopirita muestran mayor distribución de los datos en los histogramas, abarcando además los intervalos con mayores rangos de concentración.

La calcosina y la calcopirita presentan concentraciones muy distintas de acuerdo al tipo morfológico del grano. En ambos casos los minerales de grano grueso presentan casi la totalidad de datos en el menor rango de concentración; mientras que los de grano fino abarcan más rangos y con mayores frecuencias, al igual que los oxidados para el caso de la calcosina. La única excepción ocurre para el caso del Se en la calcosina, donde las calcosinas de grano grueso presentan las mayores concentraciones de Se.

Usando los antecedentes de la Tabla 9 y la Figura 20, se puede señalar que Ag y Au muestran mayor afinidad con la bornita, y para el caso de la Ag, también con la calcopirita de grano fino.

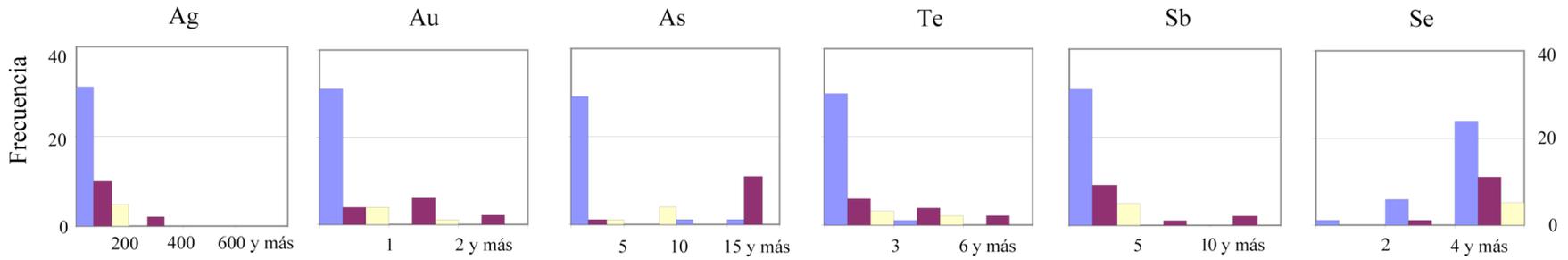
A continuación se estudiará la incorporación de trazas de acuerdo a los tipos morfológicos de calcosina en los distintos yacimientos. En la Tabla 10 se presenta un resumen de los datos para las calcosinas. Para conseguir valores representativos se eliminaron algunos datos al momento de calcular el promedio ya que escapaban de la tendencia, haciendo que la media exhibiera valores mucho más altos que la realidad (Mantos de la Luna: 58,9 y 10,24 ppm As y 116 ppm Ag en calcosina gruesa; 90,8 y 134 ppm As, 464 ppm Ag, 13 ppm Te en calcosina fina. Mantos Blancos: 369 ppm Ag y 6,41 ppm Te en calcosina fina. Susana-Lince: 71,6 y 173 ppm As para calcosina gruesa; 48,3 y 43,6 ppm As, 140; 128 y 101 ppm Ag para calcosina fina).

Tabla 10: Resumen de resultados de SIMS de los distintos tipos de calcosina (según morfología) en los 3 yacimientos, mostrando valores mínimo, máximo, promedio y error típico de los distintos elementos en los sulfuros de cobre

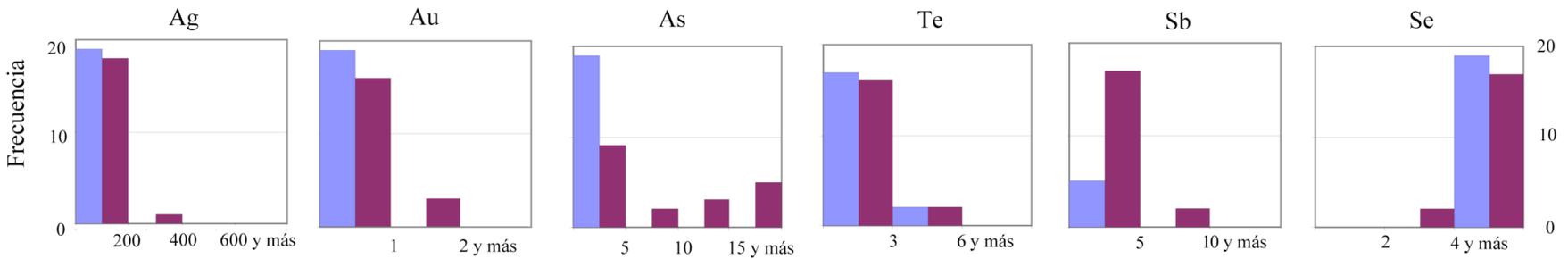
			Ag (ppm)	Au (ppm)	As (ppm)	Te (ppm)	Sb (ppm)	Se (ppm)
	Tipo grano	# datos	Max-Min <X> ± σ	Max-Min <X> ± σ	Max-Min <X> ± σ	Max-Min <X> ± σ	Max-Min <X> ± σ	Max-Min <X> ± σ
Mantos de la Luna	grueso	31	0,38 - 116 12,82 ± 0,14	0 - 0,77 0,11 ± 0,04	0,04 - 58,9 0,78 ± 0,20	0,63 - 3,24 1,86 ± 2,84	0 - 3,73 0,33 ± 0,16	1,82 - 15,90 7,73 ± 0,70
	fino	12	5,63 - 464 75,77±19,17	0 - 5,98 1.02 ± 0,19	0,7 - 134 26,54 ± 3,87	1,05 - 13 3,20 ± 0,40	0,01 - 10,3 3,66 ± 1,03	3,59 - 12,2 7,33 ± 0,82
	oxidada	5	3,76 - 23,4 12,51 ± 3,19	0 - 1,44 0.44 ± 0,26	1,58 - 7,32 5,29 ± 0,97	1,87 - 4,61 2,93 ± 0,48	0 - 1,8 0,54 ± 0,34	5,44 - 11,3 7,70 ± 1,14
Mantos Blancos	grueso	19	0,03 - 104 16,45 ± 5,46	0 - 0,5 0.04 ± 0,03	0,02 - 1,78 0,35 ± 0,09	0,63 - 3,26 1,75 ± 0,19	0 - 0,19 0,02 ± 0,01	7,45 - 17,6 11,41 ± 0,71
	fino	18	23 - 369 77,85±14,28	0 - 1,92 0.64 ± 0,13	0,95 - 55,3 11,59 ± 3,33	1,67 - 6,41 2,25 ± 0,11	0 - 6,2 1,75 ± 0,47	2,79 - 12,7 8,55 ± 0,61
Susana-Lince	grueso	31	0 - 53,5 9,13 ± 2,34	0 - 3,13 0.24 ± 0,11	0 - 173 0,64 ± 0,11	0,58 - 6,69 2,05 ± 0,22	0 - 11,9 0,49 ± 0,41	2,53 - 18,90 8,7 ± 0,74
	fino	19	6,04 - 140 31,97 ± 5,17	0 - 2,6 0.55 ± 0,16	0,68 - 48,3 6,07 ± 1,1	0,73 - 5 2,16 ± 0,26	0 - 5,86 0,85 ± 0,39	3,79 - 19,9 10,33 ± 0,96
	oxidada	2	29,8 - 55 42,4 ± 12,6	1.3 - 1,44 1.37 ± 0,07	11 - 38,4 24,7 ± 13,7	3,72 - 5,89 4,81 ± 1,09	1,48 - 2,3 1,89 ± 0,41	5,78 - 10,5 8,14 ± 2,36

En la Figura 21 se presentan gráficos de rango de concentración en ppm v/s frecuencia para los 3 tipos de calcosina en los 3 depósitos. Se observa, para la calcosina gruesa, la presencia en la mayoría de los casos de un peak unitario en el rango de menor concentración, mientras que para los otros dos tipos morfológicos los datos se encuentran distribuidos en los distintos rangos. Para las calcosina de los 3 depósitos, la calcosina de grano grueso es la que concentra el Se, mientras que los 5 elementos restantes se concentran en los granos finos y oxidados.

Mantos de la Luna



Mantos Blancos



Susana-Lince

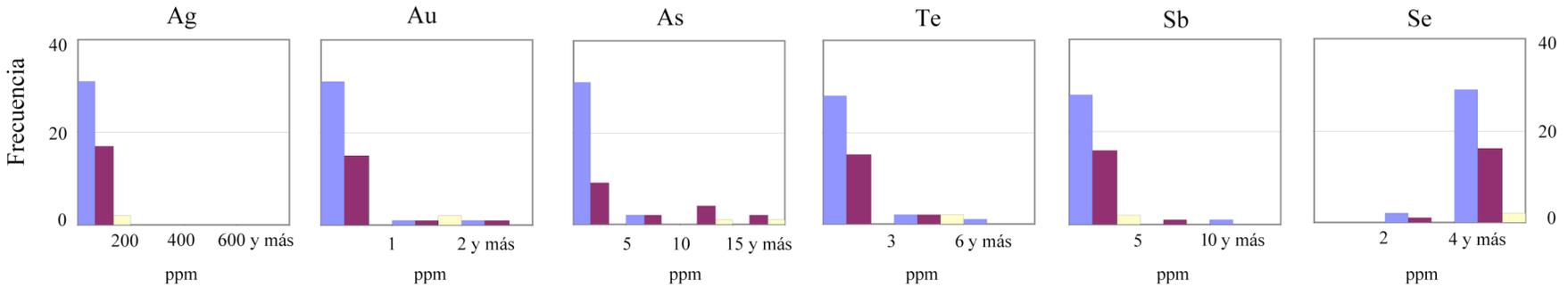


Figura 21: Gráficos rango de concentración en ppm (eje X) v/s frecuencia (eje Y) en calcosina ■ Grano grueso, ■ Grano fino, ■ Oxidado

En general, todos los tipos morfológicos exhiben comportamientos similares en los 3 depósitos, por lo que se hablará, para los análisis SIMS, de las calcosinas subdividiendo según su tipo morfológico, y no necesariamente según su depósito.

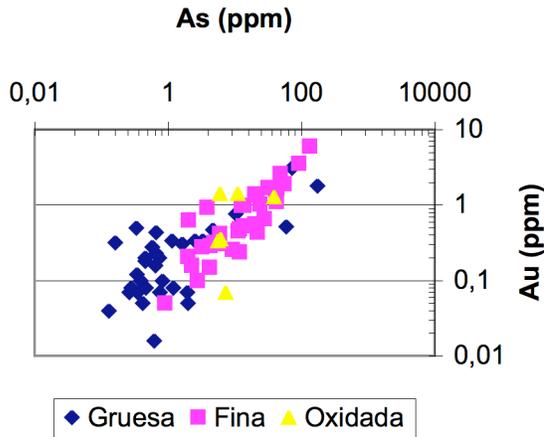
Para determinar si existe relación entre Ag (Au), con los otros elementos en traza se realizan gráficos de correlación (Fig 22), ploteados en escala logarítmica para apreciar de mejor forma la distribución de los puntos. Para la covelina y bornita no se presentan correlaciones importantes entre Ag (Au) y otros elementos en traza.

En la Figura 22 se puede observar que la calcosina y la calcopirita si presentan tendencias marcadas. Además, las correlaciones entre elementos en las calcosinas son más claras que en las calcopiritas.

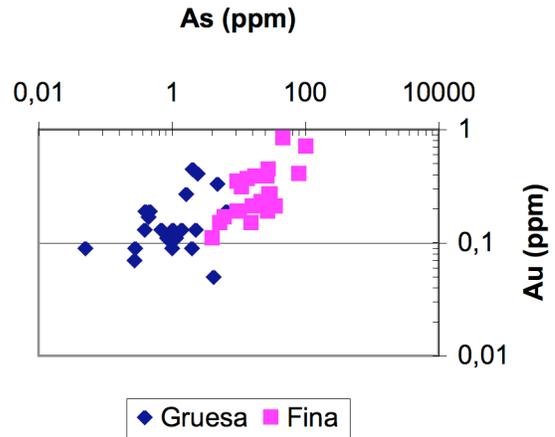
Para calcosinas existe buena correlación entre: Au/As, Au/Sb; regular para Au/Te Ag/Sb y Ag/As e insignificante para las otras combinaciones de metal precioso/otros elementos en traza.

Para calcopiritas existe buena correlación entre Ag/As, Ag/Te, regular para Au/As, Au/Sb, Ag/Sb e insignificante para las otras combinaciones.

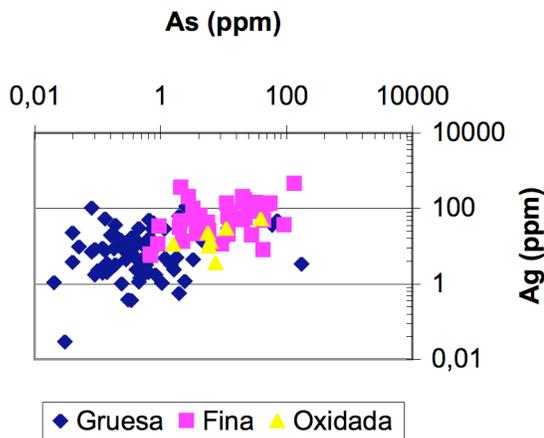
Au/As en Calcosina



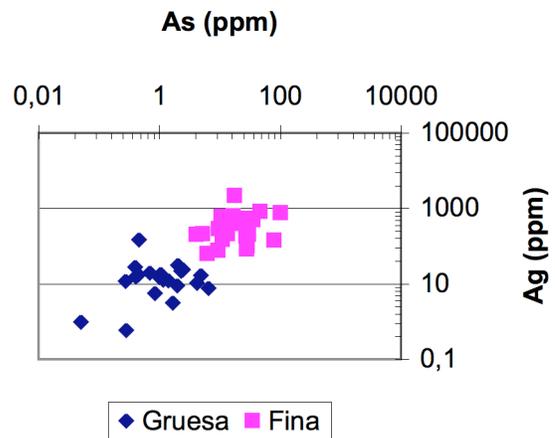
Au/As en Calcopirita



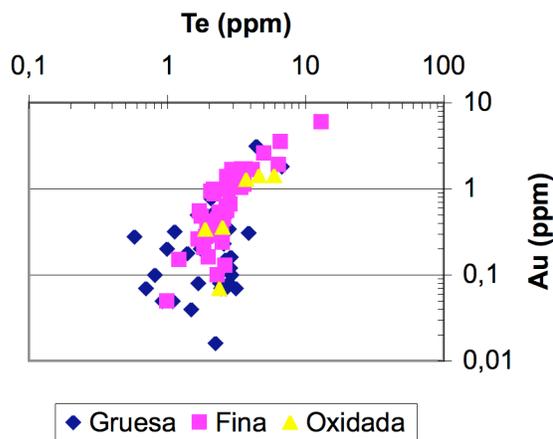
Ag/As en Calcosina



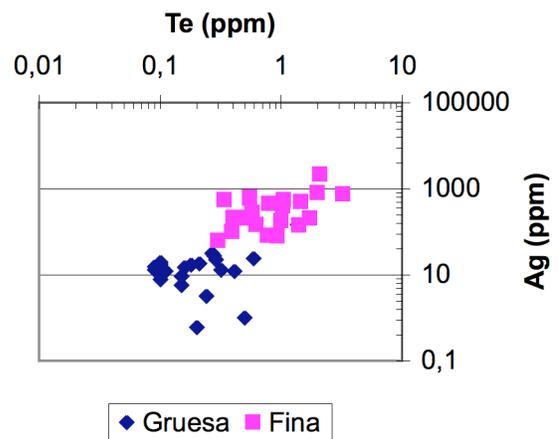
Ag/As en Calcopirita



Au/Te en Calcosina



Ag/Te en Calcopirita



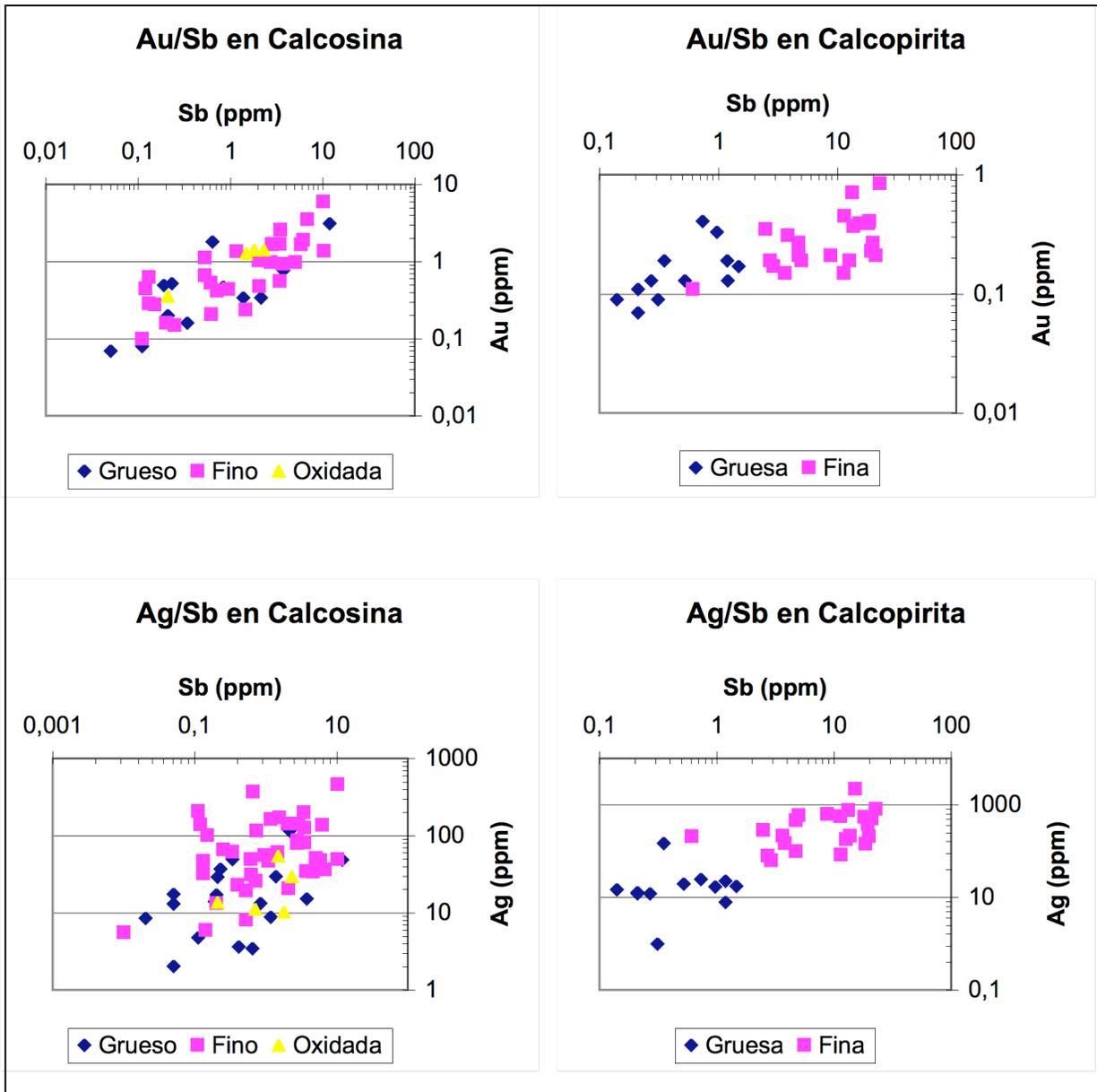


Figura 22: Gráficos de correlación entre Ag y Au, y otros elementos en traza para calcosinas y calcopiritas. Ploteados en escala logarítmica para apreciar distribución de los puntos.

CAPITULO 5: Discusiones.

5.1 Forma mineralógica de incorporación de Ag (y Au) en los sulfuros de cobre.

Los análisis realizados mediante SIMS y EMPA indican que la bornita y la calcopirita son los sulfuros de cobre que concentran la mayor proporción de metales traza. Para la plata, en particular, también son estos dos sulfuros los que presentan mayores concentraciones (Figs 10, 20 y Tablas 5, 9). La bornita (20 datos SIMS, 33 datos EMPA) incorpora 81,1 a 730 ppm de Ag, con promedios y error estándar de $432,15 \pm 19,34$ ppm de Ag; mientras que la calcopirita (44 datos SIMS, 25 datos EMPA) incorpora de 0,61 a 2211 ppm de Ag con $321 \pm 33,32$ ppm de Ag. Si se considera la calcopirita según su tipo morfológico, se observa que la calcopirita de grano fino presenta un rango de incorporación de Ag entre los 63,5 y los 2211 ppm y promedio $345,09 \pm 52,43$ ppm.

Tanto la bornita como la calcopirita presentan una mayor distribución de sus datos en los histogramas de la Figura 16, abarcando además los intervalos con mayores rangos de concentración para la mayoría de los elementos en traza.

La calcosina (135 datos SIMS, 2 datos EMPA) incorpora Ag en un rango de 0 a 827 ppm, alcanzando un promedio de apenas $31,24 \pm 371$ ppm, un orden de magnitud menor a los otros dos sulfuros.

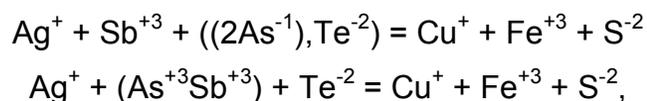
Las concentraciones medidas mediante SIMS permiten identificar importantes correlaciones entre la Ag (y Au) con otros elementos trazas (As, Sb) para los distintos sulfuros estudiados. Aunque la bornita y covelina no exhiben correlaciones importantes, probablemente por la escasez de datos analíticos, la calcopirita y la calcosina sí lo hacen (Fig 17). La calcopirita muestra una correlación positiva para Ag/As, Ag/Sb y Ag/Te (Fig 17), mientras que la calcosina se exhibe una correlación positiva para Ag/As y menor para Ag/Sb. Con esto se sugiere una posible incorporación acoplada entre Ag y otros elementos.

Además, de las imágenes obtenidas utilizando la microsonda electrónica (Anexo 2) se observa que todos los cristales de bornita son homogéneos, independiente de su

contenido de Ag, sin inclusiones micrométricas de Ag u otros metales. Respecto a las variaciones composicionales, en la Figura 12, se observa un comportamiento inverso entre Cu y Ag (teniendo en cuenta que se puede caer en un efecto escala, ya que se está comparando 2 elementos con al menos 1 orden de magnitud de diferencia entre sus concentraciones). En base a esto se puede decir que, a nivel micrométrico, la bornita incorpora la Ag en solución sólida, reemplazando al Cu como Ag^{+1} . La existencia de esta solución sólida se respalda en la concordancia entre los estados de oxidación, radio covalente y electronegatividad para ambos elementos.

Cabe señalar que las calcosinas son en realidad calcosinas y digenitas, de acuerdo a la fórmula unidad calculada para cada uno de los sulfuros de Cu. Esto se puede deber a que el campo de estabilidad de la digenita (76 a 83°C) es de menor temperatura que el de la calcosina (hasta 103°C), temperaturas que pueden ser superadas variando un poco su composición y cambiando sus sistemas cristalográficos. Debido a que los estratoligados no son depósitos que se generen a altas temperaturas y ya que la alteración supérgena es a su vez de bajas temperaturas (~25°C) se estarán formando calcosinas y en mayor medida digenitas debido a su mayor estabilidad bajo las condiciones de estos depósitos.

Para las calcopiritas se observan imágenes de dos tipos de grano: cristales homogéneos, y otros con inclusiones (<2µm). Se sugiere que las calcopiritas homogéneas podrían tener, a escala micrométrica, características similares a las bornitas homogéneas, con incorporación de la Ag en solución sólida (Ag^{+1}). El reemplazo de Ag por Cu en calcopirita no resulta tan evidente como en la bornita. En la Figura 11, se observa que variaciones en los contenidos de Ag están relacionados con variaciones en los contenidos de Cu, S y Fe. Esto es consistente con el desarrollo de sustituciones acopladas entre Ag (Ag^{+1} cuando forma solución sólida con cobre) y otros elementos en traza, del tipo:



Anteriormente se señaló una buena correlación, para calcopiritas, entre Ag y: As, Sb y Te. El As y Te entrarían como As^{-1} y/o Te^{-2} por el S^{-2} , mientras que Sb entraría como Sb^{+3} por Fe^{+3} ; de la misma forma lo haría el As, si la fugacidad de oxígeno del

medio hace que se encuentre como As^{+3} , reemplazando al Fe^{+3} . Esto explicaría las variaciones en los patrones de los 3 elementos al incorporarse plata en la estructura, considerando para la calcopirita Cu en valencia +1 y Fe en valencia +3 de acuerdo a los antecedentes espectroscópicos más recientes reportados por Goh et al. (2006)

En el caso de las inclusiones en calcopiritas, estas podrían corresponder a Ag nativa (Ag^0) o a algún mineral de Ag, por ejemplo la acantita Ag_2S (Ag^{+1}). El tamaño de las inclusiones ($<2 \mu\text{m}$) impide su correcta caracterización química mediante EMPA. Cabe señalar que todas las calcopiritas presentan concentraciones de plata que superan los 1000 ppm en los análisis SIMS o EMPA, se correlacionan fuertemente con la ocurrencia de inclusiones de minerales de Ag. Con ello se trazaría un límite de incorporación de Ag a nivel micrométrico, para calcopiritas, de unos 900 ppm. Hay que recalcar la condición de micrométrico de este resultado, ya que podría ser que al analizar estos granos a nivel nanométrico lo que en la microsonda parece cristal homogéneo podrían ser inclusiones nanométricas.

El caso de las calcosinas es similar al de la calcopirita. Las imágenes muestran mayoritariamente calcosinas (digenita $\text{Cu}_{1.82}\text{S}$ promedio) homogéneas, y otras con inclusiones. Las calcosinas homogéneas no poseen niveles de plata detectables mediante EMPA, sin embargo, de los resultados de SIMS se sabe que prácticamente todas las calcosinas poseen trazas de plata del orden de las decenas de ppm. Lo más probable es que estas trazas se incorporen en solución sólida, entrando como Ag^{+1} y reemplazando al Cu^{+1} mediante sustituciones simples del tipo $\text{Ag}^{+1} = \text{Cu}^{+1}$.

Además, existen calcosinas con inclusiones (de hasta $10 \mu\text{m}$), con mayor frecuencia y tamaño que las de las calcopiritas, las cuales pueden corresponder a inclusiones de plata nativa o minerales como acantita. En otros casos la plata forma inclusiones asociada a yodo (Fig. 16), atribuidas a iodargirita AgI (Ag^{+1}). Este mineral es característico de zonas áridas (Boyle, 1997) lo cual es consistente con el contexto climático, acotando su formación a cuando comienza la aridez en la zona. En todos los tipos de inclusiones en calcosinas anteriormente mencionados, se presentan puntos con concentraciones de selenio y telurio detectables con microsonda, lo que indica la presencia de estos elementos como trazas en los sulfuros hipógenos y el desarrollo de procesos capaces de concentrar al orden de los cientos de ppm dichos elementos.

A pesar de no ser considerados yacimientos ricos en Au, los sulfuros de los depósitos estudiados contienen cantidades medibles, aunque sub-económicas de Au. Se establece que el Au se incorpora preferencialmente en la bornita y en mucha menor medida en calcosina de grano fino. En bornita presenta concentraciones un orden de magnitud mayores que en los otros sulfuros de Cu, con un rango de 0,08 a 2,38 ppm, y un promedio y error típico igual a $1,16 \pm 0,16$ ppm de Au (Tabla 9). Cabe señalar que, en bornita, todos los puntos analizados presentan Au, varios con concentraciones mayores a 1 ppm (Fig. 20).

En calcosinas de grano fino el Au presenta concentraciones en el rango de los 0 a 5,98 ppm de Au con un promedio y error estándar de $0,72 \pm 0,11$ ppm de Au, llegando, en el caso de las calcosinas de grano fino de Mantos de la Luna, a presentar rangos de 0 a 5,98 ppm, y un promedio y error típico igual a $1,02 \pm 0,19$

Existen marcadas correlaciones entre el Au y otros elementos en traza (Fig. 22), sobretodo con Sb en calcopiritas y calcosinas, As en calcosinas y una correlación no tan evidente con Te en calcosina, calcopirita y bornita. Estudios anteriores (Reich et al., 2005) señalan la existencia de una correlación entre Au y As en piritas ricas en As, señalando que se incorporan en sustitución acoplada, donde el oro se incorpora Au^{+1} reemplazando al Cu. Probablemente, como en las piritas ricas en As, y al igual que la Ag en este estudio, el Au se incorporaría en solución sólida por el Cu, generando sustituciones acopladas con otras trazas. Estas últimas realizarían los mismos reemplazos señalados anteriormente para el caso de Ag

5.2 Estado de saturación de la Ag (y Au) en las soluciones hidrotermales parentales y etapas de incorporación de Ag.

La correcta caracterización del estado de incorporación de la Ag (y Au) en los sulfuros permite inferir el grado de saturación de las soluciones hidrotermales respecto de la Ag (y Au).

Las soluciones hidrotermales parentales que generan estos depósitos de Cu, son de origen magmático, derivadas de la cristalización de magmas provenientes del manto, y se caracterizan por un pH cercano al neutro o ligeramente alcalino (Vivallo et al.,

1998). El depósito masivo de sulfuros primarios de Cu indica que estos fluidos se encontraban sobresaturados en Cu (cristalización de calcopirita y bornita) pero subsaturados en Ag, ya que la mayor parte de la Ag es extraída de la solución hidrotermal, entrando en solución sólida en la estructura cristalina de los sulfuros de Cu.

Garay (2007), en base a un análisis termodinámico, plantea que, en Mantos Blancos, la solubilidad de la plata en el fluido hidrotermal pasa de 1000 ppm para la alteración potásica (450° C), a 100 ppm para la alteración sódica (380° C). Esto lo explica señalando que la disminución de la solubilidad de los metales está asociada al descenso de temperatura, lo cual condicionaría la depositación de Cu y Ag y explicaría además la existencia de calcopiritas con distintas concentraciones de Ag de acuerdo al tipo de alteración.

En Mantos de la Luna, y en Susana-Lince ocurren eventos de alteración hidrotermal cuya asociación mineralógica corresponde, para ambos casos, a alteración propilítica (200-250° C). Además Kojima et al. (2003), en base a datos de inclusiones fluidas, indica que la temperatura de formación y mineralización de estos depósitos varía entre los 200 y 380° C. En base a lo anterior y a los resultados de Garay (2007); en los yacimientos Mantos de la Luna y Susana-Lince la solubilidad de plata en los fluidos hidrotermales sería del orden de los 100 ppm. Ambos están acotados por la solubilidad asociada a la alteración potásica de Mantos Blancos, evento en el cual se habrían depositado minerales con las menores concentraciones de Ag.

De esta misma forma se puede explicar la existencia de distintas poblaciones de sulfuros de cobre. En este estudio se encuentran bornitas y calcopiritas con concentraciones de Ag detectables por EMPA y otras no detectables por EMPA pero detectables por SIMS. Con ello se puede distinguir dos poblaciones para bornitas y calcopiritas de acuerdo a sus contenidos de plata, lo cual, a su vez, se encuentra documentado. Chávez (1985) describe dos tipos de bornita en Mantos Blancos: una variedad de tono anaranjado, rica en azufre y pobre en plata que se encuentra en las partes más profundas del yacimiento; y una de tono rosáceo, relativamente más rica en Cu y Ag, paragenéticamente posterior a las anaranjadas y ubicada en cotas superiores. Garay (2007) por su parte, describe dos poblaciones de calcopirita según la alteración: la alteración potásica presenta calcopiritas con 6 a 9 ppm de Ag; y la alteración sódica presenta calcopiritas hasta con 344 ppm de Ag.

Observaciones macroscópicas y microscópicas dividen la mineralización para estos depósitos en tres etapas: etapa hidrotermal, etapa de enriquecimiento supérgeno y etapa de oxidación (Kojima et al., 2003). La primera etapa presenta dos eventos hidrotermales, siendo el segundo evento el de mayor importancia para la mineralización (Kojima et al., 2006; Ramírez et al., 2006). Como se señala al comienzo de esta sección, los fluidos mineralizadores de esta etapa se encuentran subsaturados en Ag, incorporando este elemento en solución sólida en los sulfuros primarios, preferentemente en bornitas y calcopiritas.

Tanto la segunda etapa de enriquecimiento secundario como la de oxidación requieren de la existencia de fluidos, que en este caso existen acotados por el cambio climático a clima hiperárido en la región, (9-14 Ma, Alpers y Brimhall, 1988, 3-6 Ma, Hartley y Rice, 2005). Estos fluidos de origen meteórico circulan por fracturas, lixivian los sulfuros de Cu y se van enriqueciendo en Cu, Ag y otros metales. Al alcanzar el nivel freático los fluidos se reducen, precipitando sulfuros secundarios, principalmente calcosina y covelina. A su vez, los fluidos se pueden saturar antes de alcanzar el nivel freático cristalizando en niveles superiores como oxidados de Cu, entre ellos malaquita, crisocola, brocantita y en menor medida atacamita, probablemente con concentraciones de Ag. Posiblemente las calcosinas supérgenas corresponden a las que se atribuye inclusiones de Ag nativa o acantita.

5.3 Enriquecimiento supergénico de Ag en yacimientos estratoligados y consideraciones climáticas para Atacama.

Adicional a las etapas de evolución y enriquecimiento típicas (eventos hipógenos y supérgenos), en estos depósitos se observa una fase posterior. Esta se evidencia por alteraciones en las calcosinas, tanto hipógenas como supérgenas, en la aparición de algunas inclusiones de iodargirita y en la abundante cristalización de atacamita. Reich et al. (2008) postula que actualmente, y desde que se impuso la hiperaridez, ha estado ocurriendo la formación de atacamita ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$). Para la cristalización de este mineral se requiere condiciones de alta salinidad en los fluidos, lo suficientemente altas para que el cloro se sature en el fluido y pueda precipitar asociado al cobre y al grupo OH. Evidencias de la existencia y considerables concentraciones de cloro se observan en las Figuras 16 y 17 y en el Anexo 3. Además de cloro estos fluidos poseen

considerables concentraciones de yodo, el cual cristaliza asociado a la plata formando inclusiones.

Leybourne y Cameron (2006) atribuyen la existencia de elevadas concentraciones de cloro y yodo a la mezcla de fluidos diluidos con salmueras provenientes de profundidad. Éstas ascenderían a través de fracturas, las mismas fracturas responsables de la circulación de los fluidos mineralizadores de estos depósitos, las cuales representan fallas de basamento sísmicamente activas (Cameron et al., 2002; Cameron y Leybourne, 2005). El origen de ellas sería agua de mar que se ha ido modificando y enriqueciendo gracias a la interacción fluido-roca. Estas salmueras, en base a isótopos de cloro, poseen cloruros de edades mayores a 1.5 Ma, pero el proceso de cristalización sería más reciente (<1.5 Ma) (Reich et al., 2008). Ya que nos encontramos bajo la presencia de un clima árido, los fluidos diluidos corresponderían a las aguas del nivel freático con las que interactúan las salmueras y continúan circulando por fracturas previo a depositarse.

La atacamita aparece alterando los granos de calcosina, por los bordes, con texturas de corrosión y/o disolución. Los análisis realizados en lo que se interpreta como atacamita exhiben totales cercanos al 75%, lo que se atribuye a que no se midió el I, O y el H. El porcentaje de Cu de la atacamita corresponde a 59.5% Cu, valor que coincide en algunos puntos analizados de las fases cloruradas; sin embargo, en otros sectores los valores son mucho mayores. Esto puede deberse a que la atacamita tiende a formarse como pátina, alterando por oxidación a los sulfuros, a la calcosina en este caso, o como agregados cristalinos, pudiendo de esta manera captar parte de los componentes de la calcosina, o puede tratarse de una fase en transición entre la calcosina y la atacamita. Según Reich et al 2008, basado en isótopos de cloro, la cristalización de atacamita comenzó hace 1,5 Ma y es un proceso que continúa en la actualidad.

En relación a la inclusión de iodargirita en la calcosina de Mantos de la Luna, en las Figuras 16 y 17, se observa que la inclusión se encuentra inmersa en el grano de calcosina, sin la existencia, aparentemente de un conducto que transporte el fluido hasta ese sitio. Esto sugiere, al menos para el caso de Mantos de la Luna, que las iodargiritas se formaron: a) asociadas a los oxidados de Cu en niveles más superficiales y posteriormente transportadas y depositadas en el nivel de la tabla de agua donde

cristalizan los sulfuros secundarios quedando como inclusión en las calcosinas, b) en el nivel de la tabla de agua, anterior a la cristalización de la calcosina que la contiene. La alternativa b, sugiere la existencia de importantes concentraciones de Ag en el nivel de los oxidados de Cu ya que sería esta la secuencia que entraría en interacción y sería lixiviada por las salmueras profundas. Aún así, con cualquiera de las opciones a o b necesariamente la calcosina se formaría posterior a las inclusiones de iodargirita, estando ambas acotadas por el cambio climático a árido e hiperárido; correspondiente a lo planteado por Reich et al. (2008), quién señala que la alteración supérgena es reciente (<1.5 Ma), y no como se señala según los modelos climáticos del norte de Chile (9-14 Ma, Alpers y Brimhall, 1988, 3-6 Ma, Hartley y Rice, 2005).

CAPITULO 6: Conclusiones.

Los resultados expuestos a lo largo de esta memoria corroboran la hipótesis de trabajo, evidenciando la incorporación de Ag en los sulfuros de Cu de estos depósitos como solución sólida y en algunos casos formando inclusiones.

La bornita y la calcopirita son los sulfuros de Cu que concentran más elementos en traza, y particularmente, más Ag. Las bornitas y calcopiritas, particularmente de grano fino, poseen concentraciones del orden de los 300 a 400 ppm de Ag en promedio. En la mayoría de los casos, la Ag se incorpora, en estos sulfuros, en solución sólida como Ag^{+1} , reemplazando al Cu en una sustitución del tipo $\text{Ag}^{+1}=\text{Cu}^{+1}$. Esta sustitución puede ser simple o acoplada con otros elementos en traza incorporados, como son el As, Te y Sb. En otros casos, se observa inclusiones en calcopiritas ($<2\mu\text{m}$) de minerales de Ag, ya sea Ag nativa (Ag^0) o por ejemplo acantita, Ag_2S (Ag^{+1}). En estos depósitos calcopiritas, bornitas y algunas calcosinas son hipógenas, por lo tanto, en base a lo anterior se deduce que los fluidos que generaron la mineralización estaban enriquecidos en Cu y Ag, pero subsaturados a saturados en esta última, ya que de lo contrario se observaría abundantes minerales o inclusiones de Ag. Las inclusiones observadas a nivel micrométrico poseen concentraciones de Ag mayores a los 975 ppm, con lo que se establece un límite de incorporación para calcopiritas, y a nivel micrométrico, de unos 900 ppm.

Posterior a los eventos de mineralización primaria ocurre alteración supérgena y oxidación en estos depósitos. Debido a la alteración supérgena se deposita calcosina y/o digenita secundaria, la cual posee concentraciones de Ag (Ag^{+1}) inferiores a los 60 ppm de Ag en promedio, y en algunos casos calcosinas con inclusiones ($<10\mu\text{m}$). Algunas de estas inclusiones podrían ser de Ag nativa o acantita, como en calcopirita, y se formarían gracias a la lixiviación de los sulfuros, enriqueciendo los fluidos meteóricos en metales. Este enriquecimiento secundario, dado el contexto climático de la zona debe ser anterior al cambio a hiperaridez en la región. Por otro lado, existen inclusiones de iodargirita y calcosinas alteradas a fases cloruradas correspondientes a atacamita. Esto implica nuevos componentes y variables que ingresan al sistema. La presencia de estos elementos se puede explicar mediante la teoría de Leybourne y Cameron (2006) que plantean el ascenso de salmueras antiguas, a través de fallas de basamento

sísmicamente activas, que se mezclan con fluidos diluidos, probablemente del nivel freático. Las calcosinas con inclusiones de iodargirita denotan la existencia de una nueva población de calcosinas relativamente jóvenes. Debido a la ubicación de la inclusión de iodargirita, en el interior del cristal, se deduce que la calcosina es posterior a la iodargirita. Además, considerando que la iodargirita es un mineral indicador de condiciones climáticas áridas, la cristalización de ésta y de la calcosina que la hospeda se pueden acotar a partir de la ocurrencia del cambio climático a árido e hiperárido en la zona de estudio.

El hecho de que la atacamita presenta edad de cristalización <1.5 Ma (Reich et al., 2008) termina de confirmar la existencia de una fase de mineralización secundaria reciente y que se sigue desarrollando, la cual no se ve limitada exclusivamente por la existencia de aguas meteóricas, las cuales dejarían de existir al imponerse las condiciones de aridez; ya que actualmente continúan cristalizando minerales de Cu y con inclusiones de Ag.

Finalmente, en contraste a los resultados obtenidos por Garay (2007) quien señala que, a nivel de roca total, a mayor %Cu se encuentran mayores concentraciones de Ag; en este caso se concluye que a nivel micrométrico, la calcosina que es la fase con mayor %Cu es la que menos Ag concentra, mientras que calcopirita y bornita con %Cu bajo y medio respectivamente poseen importantes concentraciones de Ag.

Referencias

Acevedo, J.; Herrera, H.; Camacho, J.; Alfaro, H. 1997. Antecedentes y modelo geológico del yacimiento Susana, distrito minero Carolina de Michilla, II Región de Antofagasta, Chile. Actas VIII Congreso Geológico Chileno 2, p. 826 – 831.

Alpers, CN.; Brimhall GH. 1988. Middle Miocene climatic change in the Atacama Desert, northern Chile: evidence from supergene mineralization at La Escondida. Geological Society of America Bulletin, Vol. 100, p. 1640-1656.

Arabasz, W.J., 1971. Geological and geophysical studies of the Atacama Fault zone in northern Chile. Unpublished PhD Thesis, California Institute of Technology.

Astudillo, O. 1983. Geología y metalogénesis del distrito minero Carolina de Michilla, Antofagasta, II Región, Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad Católica del Norte, Departamento de Geociencias, 131 p. Antofagasta.

Boric, R.; Díaz, F.; Maksaev, V. 1990. Geología y yacimientos metalíferos de la Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, No. 40, 246 p., 2 mapas escala 1:500.000

Boyle, D. 1997. Iodargyrite as an indicator of arid climatic conditions and its association with gold-bearing glacial tills of the Chibougamau - Chapais area, Quebec. The Canadian Mineralogist, Vol. 35, p. 23-34.

Buchelt, M.; Tellez, C. 1988. The Jurassic La Negra Formation in the area of Antofagasta, northern Chile (lithology, petrography, geochemistry). In The Southern Central Andes (Bahlburg, H.; Breitzkreuz, C.; Giese, P.; editors). Springer, Heidelberg. Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 17, p. 171-182

Cabri, L. J.; Newville, M.; Gordon, R. A.; Crozier, E. D.; Sutton, S. R.; McManon, G.; Jiang, D. T. 2000. Chemical speciation of gold in arsenopyrite. *Canadian Mineralogist*, Vol. 38, p. 1265 - 1281.

Cameron, E.; Leybourne, M. (2005) Relationship between ground-water chemistry and soil geochemical anomalies at the Spence copper porphyry deposit, Chile. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, Vol. A 5, p. 135 - 145

Cameron EM, Leybourne MI, Kelley DL (2002) Exploring for deeply covered mineral deposits: formation of geochemical anomalies in northern Chile by earthquake-induced surface flooding of mineralized groundwaters. *Geology* 30:1007–1010.

Camus, F. 2003. Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. SERNAGEOMIN, Chile, p 267

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

Dreyer, H.; Soto, H. 1985. Geología de Mina Susana. Un yacimiento novedoso en Carolina de Michilla. In Congreso Geológico Chileno, No. 4, Actas, Vol. 2, p. 3354-3382. Antofagasta.

Espinoza, S. 1982. Definición del tipo diseminado infravolcánico de sulfuros de cobre, vol. 3. Actas 3er Congreso Geológico Chileno, Concepción, p. E201–E219

Espinoza, S.; Orquera, W. 1988. El yacimiento de cobre Buena Esperanza, geología y alteración de la zona de superficie. Nuevas evidencias sobre edad y génesis, vol. 3. Actas 5to Congreso Geológico Chileno, Santiago, p. G1–G20

Espinoza, S.; Véliz, H.; Esquivel, J.; Arias, J.; Moraga, A. 1996. The cupriferous province of the Coastal Range, Northern Chile. In: Camus F, Sillitoe RH, Petersen R (eds) Andean copper deposits: new discoveries, mineralization, styles and metallogeny. Economic Geology, Special Publication, Vol. 5, p. 19 - 32

Garay, M. 2007. Concentración de plata en sulfuros de cobre del yacimiento Mantos Blancos, Cordillera de la Costa, norte de Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, p.76.

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

Goh, S.W.; Buckley, A.; Lamb, R.; Rosenberg, R.; Moran, D. 2006. The oxidation status of copper and iron in mineral sulfides, and the oxides formed on initial exposure of chalcopyrite and bornite to air. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, Vol. 70, p. 2210-2218.

Greiner, G. 1982. Geología económica del yacimiento cuprífero Mantos de la Luna, Provincia de Tocopilla, II Región, Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 70 p.

Hartley, A.J.; Rice, C.M. 2005. Controls on supergene enrichment of porphyry copper deposits in the Central Andes: a review and discussion. *Mineralium Deposita* 40, p. 515-525.

Ishihara, S.; Ulriksen, C.E. 1980. The magnetite-series and ilmenite-series granitoids in Chile. *Mining Geology*, Vol. 30, p. 183-190.

Ishihara, S.; Ulriksen, C.; Sato, K.; Terashima, S.; Sato, T.; Endo, Y. 1984. Plutonic rocks of north-central Chile. *Geological Survey of Japan, Bulletin*, Vol. 35, No. 11, p. 503-536.

Klohn, E.; Holmgren, C.; Ruge, H. 1990. El Soldado, a stratabound copper deposit associated with alkaline volcanism in the central Chilean Coastal Range. In: Fontboté L, Amstutz G, Cardozo M, Cedillo E, Frutos J (eds) *Stratabound Ore Deposits in the Andes*. Springer, Berlin Heidelberg New York, p. 435–448

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*, Vol. 38, p. 208 – 216.

Kolker A.; Haack S. K.; Cannon W. F.; Westjohn D. B.; Kim M. J.; Nriagu J.; Woodruff L. G. 2003. Arsenic in southeastern Michigan. In *Arsenic in Ground Water* (eds. A. H. Welch and K. G. Stollenwerk). Kluwer Academic Publishers, Boston, p. 281–294.

Leybourne, M.; Cameron, E. 2006. Composition of groundwaters associated with porphyry-Cu deposits, Atacama Desert, Chile: Elemental and isotopic constraints on water sources and water-rock reactions. *Geochemica et Cosmochimica Acta* 70, p. 1616-1635.

Losert, J. 1973. Genesis of copper mineralization and associated alterations in the Jurassic volcanic rocks of Buena Esperanza mining area. Universidad de Chile, Departamento de Geología, Publicación, No. 40, 104 p.

Lucassen, F.; Kramer, W.; Bartsch, V.; Wilke, HG.; Franz, G.; Romer, R.; Dulski, P. 2006. Nd, Pb, and Sr isotope composition of juvenile magmatism in the Mesozoic large magmatic province of northern Chile (18–27°S): indications for a uniform subarc mantle. *Contrib Mineral Petrology*, Vol. 152, p. 571 – 589.

Maksaev, V.; Zentilli, M. 2002. Chilean stratabound Cu–(Ag) deposits: an overview. In: Porter TM (ed) *Hydrothermal iron oxide copper–gold and related deposits: a global perspective 2*. PCG, p. 185–205

Maksaev, V.; Townley, B.; Palacios, C.; Camus, F. 2007. Metallic ore deposits. In: Moreno T, Gibbons W (eds) The geology of Chile. The Geological Society, London, p. 179–199

Muñoz, N.; Venegas, R.; Tellez, C. 1988. La Formación La Negra: Nuevos antecedentes estratigráficos en la Cordillera de la Costa de Antofagasta. In Congreso Geológico Chileno, No. 5, Actas 1, p. A283 - A311.

Oliveros, V.; Féraud, G.; Aguirre, L.; Fornari, M. 2004a. Beginning of the Andean subduction system: new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and geochemical data from the Coastal Range, Northern Chile ($18^{\circ}30' - 24^{\circ}\text{S}$, $70 - 70^{\circ}30'\text{W}$). CD-R, IAVCEI, Pucón, Chile

Oliveros V, Féraud G, Aguirre L, Fornari M, Ramirez L, Palacios C, Parada MA, Tristá D. 2004b. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of magmatic, alteration and copper mineralization events related to the Mesozoic subduction system in the Coastal Range, Northern Chile ($22 - 24^{\circ}\text{S}$, $70 - 70^{\circ}30'\text{W}$). CD-R, IAVCEI, Pucón, Chile

Oliveros, V.; Tristá-Aguilero, D.; Féraud, G.; Morata, D.; Aguirre, L.; Kojima, S.; Ferraris, F. 2007. Time relationships between volcanism-plutonism-alteration-mineralization in Cu-stratabound ore deposits from the Michilla mining district, northern Chile: a $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological approach. Mineralium Deposita, Vol. 43, p. 61-78.

Palacios, C., 1986. Subvolcanic Cooper deposits in the Coastal Range of Northern Chile. Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I, 1985, H.9/10, Stuttgart, Juni 1986, p. 1605-1615

Palacios, C. 1990. Geology of the Buena Esperanza copper-silver deposit, northern Chile. In Stratabound ore deposits in the Andes (Fonboté, L.; Amstutz, G.C.; Cardozo, M.; Cedillo, E.; Frutos, J.; editors). Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Special Publication, No. 8, Springer-Verlag, p. 313-318.

Palacios, C.; Definis, A. 1981a. Petrología del Yacimiento Buena Esperanza, II Región, Norte de Chile. In Coloquio sobre volcanismo y metalogénesis. Universidad Católica del Norte, Departamento de Geociencias, Actas, No. 1, p. 48-67. Antofagasta.

Palacios, C.; Definis, A. 1981b. Geología del Yacimiento estratiforme Susana, distrito Michilla, Antofagasta. In Coloquio sobre volcanismo y metalogénesis. Universidad Católica del Norte, Departamento de Geociencias, Actas, No. 1, p. 82-91. Antofagasta.

Palacios, C.; Espinoza, S. 1982. Geología y Petrología del Complejo Plutónico de la Cordillera de la Costa entre Tocopilla y el río Loa, Norte de Chile. In Congreso Geológico Chileno, No. 3, Actas, Vol. 2, p. D154-D171. Concepción

Palacios, C.; Ramírez, L.E.; Townley, B.; Solari, M.; Guerra, N. 2007. The role of the Antofagasta-Calama Lineament in ore deposit deformation in the Andes of northern Chile. *Mineralium Deposita*, Vol. 42, p. 301 – 308.

Ramírez, L.E.; Palacios, C.; Townley, B.; Parada, M.A.; Sial, A.N.; Fernández-Turiel, J.L.; Gimeno, D.; García-Valles, M.; Lehman, B. 2006. The Mantos Blancos copper deposit: an upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the Coastal Range of Northern Chile. *Mineralium Deposita*, Vol. 41, p. 246 – 258.

Reich, M.; Kesler, S.E.; Utsunomiya, S.; Palenik, C.S.; Chryssoulis, S.; Ewing, R.C. 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 69, p. 2781-2796.

Reich, M.; Palacios, C.; Parada, M.A.; Fehn, U.; Cameron, E.M.; 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 ³⁶Cl data. *Mineralium Deposita*, Vol. 43, p. 663 – 675.

Rogers, G. 1985. A geochemical traverse across the north Chilean Andes. Ph.D. Thesis (Unpublished), Open University, Department of Earth Sciences, 333 p.

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

Ruíz, C.; Aguilar, A.; Egert, E.; Espinoza, W.; Peebles, F.; Quezada, R.; Serrano, M. 1971. Stratabound copper sulphide deposit of Chile. *Society of Mining Geologists of Japan, Special Issue 3*, p. 252 – 260.

Sato K (1984) Manto type copper deposits in Chile: a review. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, Vol. 35, p. 565–582.

Savage, K. S.; Tingle, T. N.; O'Day, P. A.; Waychunas, G. A.; Bird, D. K. 2000. Arsenic speciation in pyrite and secondary weathering phases, Mother Lode gold district, Tuolumne County, California. *Applied Geochemistry*, Vol. 15, p. 1219 - 1244.

Scheuber, E.; Andriessen, PAM 1990. The kinematic and geodynamic significance of the Atacama Fault Zone, northern Chile. *Journal of Structural Geology*, Vol. 12, p. 243–257.

Scheuber, E.; Gonzales, 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* Vol. 18, p. 895–910, Vol. 107, p. 1427–1440.

Sidle, W. C.; Wotten, B.; Murphy, E. 2001. Provenance of geogenic arsenic in the Goose River basin, Maine, USA. *Environmental Geology*, Vol. 41, p. 62–73.

Sillitoe, R.H.; McKee, E.H. 1996. Age of supergene oxidation and enrichment in the Chilean porphyry copper province. *Economic Geology*, Vol. 91, p. 164–179.

Tristá, D.; Barra, F.; Ruíz, J.; Morata, D.; Talavera-Mendoza, O.; Kojima, S.; Ferraris, F. 2006. Re–Os isotope systematics for the Lince–Estefanía deposit: constraints on the timing and source of copper mineralization in a stratabound copper deposit, Coastal Cordillera of Northern Chile. *Mineralium Deposita*, Vol. 41, p. 99 – 105.

Tristá, D. 2007. Génesis de los sulfuros de Cu primarios de los yacimientos estratoligados de Cu del norte de Chile: el caso del yacimiento Lince-Estefanía, Distrito Michilla, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, mención Geología, Universidad Católica del Norte.

Venegas, R.; Munizaga, F.; Tassinari, C. 1991. Los yacimientos de Cu-Ag del distrito de Carolina de Michilla, Región de Antofagasta, Chile: nuevos antecedentes geocronológicos. In Congreso Geológico Chileno, No. 6, Actas, Vol. 1, p. 452-455.

Vivallo, W.; Henríquez, F. 1998. Génesis común de los depósitos estratoligados y vetiformes de cobre del Jurásico Medio a Superior en la Cordillera de la Costa, Región de Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 25, No 2.

ANEXO 1: Datos EMPA.

Recuadros en blanco corresponden a valores bajo el límite de detección alcanzado por la microsonda. La proveniencia de las muestras es: MB de Mantos Blancos, ML de Mantos de la Luna, SS de Susana-Lince.

Análisis calcosinas, todos los datos expresados en %peso (sin inclusiones ni fases cloruradas).

	S	Fe	Cu	Se	Ag	Te	Total	
3 / 1 . A	21,49		78,16				99,65	cc MB-14
3 / 2 .	21,56		78,03				99,60	cc MB-14
3 / 3 .	21,69		77,99				99,68	cc MB-14
3 / 4 .	21,36		78,04				99,39	cc MB-14
3 / 5 .	21,56		77,82				99,37	cc MB-14
3 / 6 .	22,04		77,88				99,92	cc MB-14
3 / 7 .	21,37		76,97				98,34	cc MB-14
3 / 8 .	21,36		76,72				98,08	cc MB-14
3 / 9 .	21,38		76,85				98,22	cc MB-14
3 / 10 A	21,48		76,88				98,36	cc MB-14
4 / 1 . A	21,59		77,61				99,20	cc ML-4
4 / 2 .	21,37		78,03				99,40	cc ML-4
4 / 3 .	21,64		78,08				99,72	cc ML-4
4 / 4 .	21,29		78,17				99,47	cc ML-4
4 / 5 .	21,58		77,97				99,55	cc ML-4
4 / 6 .	21,55		77,96				99,51	cc ML-4
4 / 7 .	19,35		78,00				97,35	cc ML-4
4 / 8 .	21,39		77,78				99,16	cc ML-4
4 / 9 .	21,48		77,51				98,99	cc ML-4
4 / 10 A	21,63		77,97				99,60	cc ML-4
5 / 1 . A	21,40		77,65				99,05	cc SS-1
5 / 2 .	21,15		77,78				98,93	cc SS-1
5 / 3 .	21,10		77,75				98,85	cc SS-1
5 / 4 .	21,24		77,91				99,15	cc SS-1
5 / 5 .	21,32		77,87				99,18	cc SS-1
5 / 6 .	21,07		77,53				98,60	cc SS-1
5 / 7 .	21,28		77,80				99,08	cc SS-1
5 / 8 .	21,08		77,88				98,96	cc SS-1
5 / 9 .	21,33		77,55				98,87	cc SS-1
5 / 10 A	21,17		77,53				98,69	cc SS-1
8 / 1 . B	21,43		79,01				100,44	cc MB-14
8 / 2 .	21,21		78,94				100,15	cc MB-14
8 / 3 .	21,36		78,60				99,96	cc MB-14
8 / 4 .	21,11		77,55				98,66	cc MB-14
8 / 5 .	21,27		77,46				98,72	cc MB-14
8 / 6 .	21,33		76,81				98,15	cc MB-14
8 / 7 .	21,46	0,022	77,43				98,92	cc MB-14
8 / 8 .	21,68		76,28				97,97	cc MB-14

8 / 9 .	21,33		78,37				99,69	cc MB-14
8 / 10 .	21,35		78,80				100,15	cc MB-14
8 / 11 .	21,50		77,60				99,11	cc MB-14
8 / 12 B	21,21		77,70				98,91	cc MB-14
9 / 1 . B	21,79		77,61				99,40	cc MB-14
9 / 2 .	21,64		77,62			0,013	99,27	cc MB-14
9 / 3 .	21,59		77,46				99,05	cc MB-14
9 / 4 .	21,57		77,54				99,12	cc MB-14
9 / 5 .	21,98		77,30				99,28	cc MB-14
9 / 6 .	21,83		77,56				99,38	cc MB-14
9 / 7 .	21,07		75,82				96,88	cc MB-14
9 / 8 .	21,90		77,51				99,40	cc MB-14
9 / 9 .	21,77		77,73				99,50	cc MB-14
9 / 10 .	21,84		77,64				99,49	cc MB-14
9 / 11 .	21,85		77,72				99,57	cc MB-14
9 / 12 B	21,73		77,56				99,29	cc MB-14
21 / 5 .	21,75	0,060	78,35				100,16	cc-ML-1
21 / 6 G	21,87	0,053	78,22				100,14	cc-ML-1
21 / 7 .	21,97	0,038	78,53				100,54	cc-ML-1
28 / 1 .	21,67		78,36		0,052		100,08	cc-ML-1
29 / 1.G	21,57		77,36		0,083		99,01	cc-ML-1
32 / 5 .	19,91		75,33	0,043			95,28	cc-MB-14
32 / 6 G	21,87		77,16				99,03	cc-MB-14
32 / 7 .	21,97		77,19				99,17	cc-MB-14
32 / 8 G	21,99		77,43				99,42	cc-MB-14
33 / 1 .	21,51		77,19				98,70	cc-MB-14
33 / 2 G	21,58		77,34				98,91	cc-MB-14
33 / 3 .	21,33		77,59				98,92	cc-MB-14
33 / 4 G	21,77		75,73				97,50	cc-MB-14
33 / 5 .	21,49		76,19				97,68	cc-MB-14
33 / 6 G	21,50		76,35				97,85	cc-MB-14
33 / 7 .	21,33		77,07				98,41	cc-MB-14
33 / 8 .	21,65		76,83				98,49	cc-MB-14
33 / 9 G	21,89		77,22				99,10	cc-MB-14
33 / 10 .	21,51		77,49				99,00	cc-MB-14

Datos Bornita (todos los datos expresados en %peso)

	S	Fe	Cu	Ag	Sn	Total	
6 / 1 . A	25,66	10,86	62,23			98,74	bo MB-13
1 / 1 . B	25,93	11,33	63,22			100,47	bo MB-13
1 / 2 .	26,02	11,36	63,37			100,75	bo MB-12
1 / 3 .	25,95	11,43	63,17			100,56	bo MB-12
1 / 4 .	25,96	11,38	63,29			100,63	bo MB-12
1 / 5 .	25,95	11,34	63,18			100,48	bo MB-12
1 / 6 .	25,84	11,37	63,31			100,52	bo MB-12
1 / 7 . B	25,83	11,42	63,07			100,31	bo MB-12
2 / 1 . B	25,40	11,17	63,42			99,99	bo MB-12
2 / 2 .	25,49	11,18	63,43			100,10	bo MB-12
2 / 3 .	25,32	11,20	63,50			100,03	bo MB-12
2 / 4 .	25,35	11,27	63,31			99,92	bo MB-12
2 / 5 .	25,38	11,22	63,37			99,97	bo MB-12
2 / 6 .	25,27	11,24	63,37			99,87	bo MB-12
2 / 7 .	25,38	11,20	63,22			99,80	bo MB-12
2 / 8 . B	25,41	11,29	63,22			99,92	bo MB-12
3 / 1 . B	25,52	11,36	63,19	0,045		100,11	bo MB-12
3 / 2 .	25,35	11,24	63,24			99,83	bo MB-12
3 / 3 .	25,26	11,27	63,21			99,74	bo MB-12
3 / 4 .	25,29	11,29	63,20			99,78	bo MB-12
3 / 5 .	25,53	11,30	63,07			99,90	bo MB-12
3 / 6 .	25,30	11,16	63,22			99,69	bo MB-12
3 / 7 .	25,41	11,22	63,27			99,90	bo MB-12
3 / 8 . B	25,43	11,20	63,08			99,71	bo MB-12
4 / 1 . B	25,32	11,27	63,26			99,84	bo MB-12
4 / 2 .	25,21	11,23	63,12			99,55	bo MB-12
4 / 3 .	25,48	11,32	62,90			99,70	bo MB-12
4 / 4 .	25,57	11,32	63,15			100,03	bo MB-12
4 / 5 .	25,45	11,26	62,99			99,70	bo MB-12
4 / 6 .	25,48	11,29	62,99			99,77	bo MB-12
4 / 7 . B	25,42	11,29	63,05			99,76	bo MB-12
10 / 1 . B	25,99	11,26	62,17			99,42	bo MB-13
10 / 2 .	25,77	11,26	62,15			99,19	bo MB-13
10 / 3 .	25,82	11,15	62,20			99,17	bo MB-13
10 / 4 .	25,79	11,25	62,36			99,40	bo MB-13
10 / 5 .	26,03	11,25	62,19			99,47	bo MB-13
10 / 6 .	25,41	11,29	61,95			98,65	bo MB-13
10 / 7 .	25,96	11,27	62,23			99,45	bo MB-13
10 / 8 .	25,88	11,27	62,19			99,34	bo MB-13
10 / 9 .	25,73	11,19	62,12			99,04	bo MB-13
10 / 10 .	25,94	11,22	62,18			99,35	bo MB-13
10 / 11 .	25,86	11,20	62,27			99,32	bo MB-13
10 / 12 B	25,93	11,27	62,13			99,33	bo MB-13
1 / 1 . D	25,71	10,69	63,56	0,041		100,00	bo MB-13
1 / 2 .	25,71	10,90	63,27	0,061		99,94	bo MB-13
1 / 3 .	25,89	10,79	62,83	0,040		99,56	bo MB-13
1 / 4 .	25,72	10,81	63,56			100,09	bo MB-13
1 / 5 .	25,63	10,67	63,83	0,059		100,20	bo MB-13

1 / 6 .	25,86	10,97	63,29	0,061		100,18	bo MB-13
1 / 7 .	25,68	11,07	63,11	0,055		99,92	bo MB-13
1 / 8 .	25,82	11,10	63,07	0,040		100,03	bo MB-13
1 / 9 .	25,77	11,05	63,07			99,89	bo MB-13
1 / 10 . D	25,68	11,24	62,64	0,052		99,61	bo MB-13
2 / 1 . D	25,43	10,63	63,29			99,35	bo MB-13
2 / 2 .	25,58	10,75	63,45			99,78	bo MB-13
2 / 3 .	25,48	10,55	63,85			99,88	bo MB-13
2 / 4 .	25,64	10,74	63,56	0,036		99,98	bo MB-13
2 / 5 .	25,43	10,65	63,50			99,57	bo MB-13
2 / 6 .	25,45	10,83	63,59			99,86	bo MB-13
2 / 7 .	25,50	10,76	63,79			100,05	bo MB-13
2 / 8 .	25,45	10,66	64,03	0,034		100,18	bo MB-13
2 / 9 .	25,66	10,77	63,57			100,00	bo MB-13
2 / 10 .	25,68	10,66	63,75			100,09	bo MB-13
2 / 11 .	25,61	10,94	63,33	0,042		99,93	bo MB-13
2 / 12 . D	25,46	10,94	63,31	0,033		99,75	bo MB-13
1 / 1 . E	25,60	11,09	63,13		0,025	99,84	bo MB-13
1 / 2 .	25,27	10,60	64,21			100,08	bo MB-13
1 / 3 .	25,22	10,76	63,85	0,041		99,87	bo MB-13
1 / 4 .	25,52	10,96	63,64			100,12	bo MB-13
1 / 5 .	25,52	10,97	63,53			100,02	bo MB-13
1 / 6 .	25,61	10,91	63,64			100,16	bo MB-13
1 / 7 .	25,48	10,60	64,06			100,14	bo MB-13
1 / 8 .	25,56	10,97	63,14	0,039		99,71	bo MB-13
1 / 9 .	25,55	11,00	63,49			100,04	bo MB-13
1 / 10 .	25,46	10,71	63,84			100,01	bo MB-13
1 / 11 .	25,39	10,92	63,55			99,86	bo MB-13
1 / 12 .	25,38	10,66	64,13			100,18	bo MB-13
1 / 13 .	25,55	10,83	63,80			100,18	bo MB-13
1 / 14 .	25,40	10,71	63,91			100,03	bo MB-13
1 / 15 .	25,32	10,90	63,63			99,85	bo MB-13
1 / 16 .	25,43	10,79	63,92			100,14	bo MB-13
1 / 17 . E	25,11	10,68	63,90			99,68	bo MB-13
2 / 1 . E	25,42	10,67	63,97	0,036		100,10	bo MB-13
2 / 2 .	25,56	10,93	63,29	0,034		99,81	bo MB-13
2 / 3 .	25,54	10,79	63,64			99,98	bo MB-13
2 / 4 .	25,42	10,91	63,57	0,038		99,94	bo MB-13
2 / 5 .	25,44	10,92	63,53	0,045		99,93	bo MB-13
2 / 6 .	25,61	10,94	63,43	0,038		100,01	bo MB-13
2 / 7 .	25,31	10,90	63,46			99,68	bo MB-13
2 / 8 .	25,37	10,99	63,53	0,047		99,94	bo MB-13
2 / 9 .	25,44	11,10	63,23	0,041		99,81	bo MB-13
2 / 10 . E	25,82	10,93	63,44	0,047		100,23	bo MB-13
3 / 1 . E	25,13	10,36	64,95			100,44	bo MB-12
3 / 2 .	25,33	10,68	64,44			100,45	bo MB-12
3 / 3 .	25,16	10,87	63,98			100,02	bo MB-12
3 / 4 .	25,25	10,56	64,42			100,22	bo MB-12
3 / 5 .	25,30	10,72	63,87			99,88	bo MB-12
3 / 6 .	25,08	10,75	63,95			99,77	bo MB-12
3 / 7 .	25,25	10,66	63,93			99,83	bo MB-12
3 / 8 .	25,07	10,61	64,05			99,74	bo MB-12

3 / 9 .	25,35	10,78	63,77			99,90	bo MB-12
3 / 10 .	25,13	10,48	64,04			99,65	bo MB-12
3 / 11 .	25,25	10,71	63,66			99,62	bo MB-12
3 / 12 .	25,43	10,75	63,74			99,92	bo MB-12
3 / 13 .	25,41	10,68	63,26			99,35	bo MB-12
3 / 14 .	25,22	10,65	63,83			99,70	bo MB-12
3 / 15 .	25,41	10,59	63,90			99,89	bo MB-12
3 / 16 .	25,29	10,71	63,81			99,80	bo MB-12
3 / 17 .	25,31	10,59	63,99			99,89	bo MB-12
3 / 18 .	25,34	10,65	63,67			99,66	bo MB-12
3 / 19 .	25,46	10,75	63,74			99,95	bo MB-12
3 / 20 . E	25,50	10,82	63,63			99,96	bo MB-12
4 / 1 .	25,54	10,81	63,77	0,073		100,19	bo MB-12
4 / 2 .	25,49	10,50	64,15	0,057		100,19	bo MB-12
4 / 3 .	25,51	10,82	63,63	0,058		100,02	bo MB-12
4 / 4 .	25,37	10,61	64,25	0,052		100,29	bo MB-12
4 / 5 .	25,41	10,65	64,21	0,046		100,31	bo MB-12
4 / 6 .	25,63	11,00	63,56	0,069		100,27	bo MB-12
4 / 7 .	25,70	11,00	63,69	0,060		100,45	bo MB-12
4 / 8 .	25,54	10,96	63,73	0,058		100,28	bo MB-12
4 / 9 .	25,40	10,77	64,28	0,057		100,50	bo MB-12
4 / 10 . E	25,40	10,99	63,96	0,055		100,41	bo MB-12
1 / 1 . F	25,10	10,79	63,12			99,01	bo-MB-13
1 / 2 .	25,49	10,93	62,88			99,31	bo-MB-13
1 / 3 .	25,46	10,95	62,97			99,38	bo-MB-13
1 / 4 .	25,49	11,04	63,06			99,60	bo-MB-13
1 / 5 .	25,44	11,00	63,11			99,55	bo-MB-13
1 / 6 .	25,39	11,01	63,30			99,70	bo-MB-13
1 / 7 . F	25,36	10,50	63,69			99,54	bo-MB-13
1 / 8 .	25,35	10,98	63,04			99,37	bo-MB-13
1 / 9 .	25,33	11,19	62,84			99,36	bo-MB-13
1 / 10 .	25,12	11,11	62,54			98,76	bo-MB-13
1 / 11 .	25,29	11,02	62,83			99,14	bo-MB-13
1 / 12 . F	25,19	11,06	62,67			98,91	bo-MB-13
2 / 1 . F	25,40	11,09	62,80			99,29	bo-MB-13
2 / 2 .	25,53	11,13	62,54			99,20	bo-MB-13
2 / 3 .	25,65	10,99	62,83			99,47	bo-MB-13
2 / 4 .	25,54	10,82	63,53			99,89	bo-MB-13
2 / 5 .	25,42	10,87	63,45			99,74	bo-MB-13
2 / 6 . F	25,31	11,04	62,89			99,24	bo-MB-13
2 / 7 .	25,34	10,97	63,23			99,54	bo-MB-13
2 / 8 .	25,35	10,93	63,22			99,49	bo-MB-13
2 / 9 .	23,57	12,11	60,26			95,94	bo-MB-13
2 / 10 .	25,56	10,78	63,02			99,36	bo-MB-13
2 / 11 .	25,63	11,07	62,38			99,08	bo-MB-13
2 / 12 . F	25,72	10,94	62,74			99,41	bo-MB-13

Datos calcopirita (todos los datos expresados en %peso) sin inclusiones.

	S	Fe	Cu	Ag	Sn	Te	Total	
1 / 1 . A	34,69	30,09	34,17				98,95	cpy MB-8
1 / 2 .	34,92	30,09	34,08				99,09	cpy MB-8
1 / 3 .	34,89	30,00	34,08				98,97	cpy MB-8
1 / 4 .	34,78	30,21	33,96				98,96	cpy MB-8
1 / 5 .	34,71	30,12	34,07				98,91	cpy MB-8
1 / 6 .	34,71	30,23	34,06				99,00	cpy MB-8
1 / 7 .	34,74	30,17	34,14		0,050		99,10	cpy MB-8
1 / 8 .	34,70	30,18	34,13				99,01	cpy MB-8
1 / 9 .	34,94	30,07	33,98				99,00	cpy MB-8
1 / 10 . A	34,75	30,26	33,87				98,88	cpy MB-8
2 / 1 . A	34,44	30,16	34,22				98,82	cpy MB-6
2 / 2 .	34,59	30,20	34,02			0,133	98,94	cpy MB-6
2 / 4 .	34,52	30,04	34,13				98,70	cpy MB-6
2 / 5 .	34,50	30,04	34,09				98,63	cpy MB-6
2 / 6 .	34,51	29,98	34,08				98,56	cpy MB-6
2 / 7 .	34,51	30,02	34,04				98,57	cpy MB-6
2 / 8 .	34,70	30,06	34,10				98,86	cpy MB-6
2 / 9 .	34,47	29,98	34,06				98,51	cpy MB-6
2 / 10 . A	34,53	29,98	34,04				98,55	cpy MB-6
5 / 1 . B	33,96	30,11	34,69	0,053			98,81	cpy MB-6
5 / 2 .	34,27	30,07	34,55	0,050			98,95	cpy MB-6
5 / 3 .	34,15	30,18	34,47	0,047			98,84	cpy MB-6
5 / 4 .	34,15	30,10	34,45	0,054			98,76	cpy MB-6
5 / 5 .	34,22	30,19	34,29				98,70	cpy MB-6
5 / 6 .	34,20	30,07	34,45	0,054			98,78	cpy MB-6
5 / 7 .	34,17	30,29	34,43	0,059			98,94	cpy MB-6
5 / 8 .	34,43	30,19	34,51	0,044			99,18	cpy MB-6
5 / 9 .	34,25	30,23	34,37	0,050			98,90	cpy MB-6
5 / 10 . B	34,14	30,10	34,40	0,064			98,70	cpy MB-6
6 / 1 . B	34,12	30,16	34,38	0,049			98,71	cpy MB-6
6 / 2 .	34,19	30,20	34,20				98,59	cpy MB-6
6 / 3 .	34,11	30,18	34,14	0,050			98,48	cpy MB-6
6 / 4 .	34,17	30,12	34,21	0,065			98,57	cpy MB-6
6 / 5 .	34,13	29,93	33,88	0,068			98,01	cpy MB-6
6 / 6 .	34,14	29,94	34,00	0,058			98,13	cpy MB-6
6 / 7 .	34,26	30,20	34,20				98,66	cpy MB-6
6 / 8 .	34,28	30,11	34,21				98,60	cpy MB-6
6 / 9 .	34,41	30,24	34,09				98,74	cpy MB-6
6 / 10 . B	34,36	30,12	34,09	0,046			98,61	cpy MB-6
7 / 1 . B	34,28	30,13	34,16				98,57	cpy MB-6
7 / 2 .	34,38	30,21	34,20				98,79	cpy MB-6
7 / 3 .	34,35	30,18	34,18	0,054			98,76	cpy MB-6
7 / 4 .	34,29	30,17	34,17				98,63	cpy MB-6
7 / 5 .	34,47	30,16	34,11				98,73	cpy MB-6
7 / 6 .	34,69	30,14	34,22				99,05	cpy MB-6
7 / 7 .	34,49	30,21	34,22				98,92	cpy MB-6
7 / 8 .	34,39	30,21	34,05				98,65	cpy MB-6
7 / 9 . B	34,49	30,19	33,89				98,57	cpy MB-6
11 / 1 . B	34,59	30,04	33,66				98,28	cpy MB-8
11 / 2 .	34,50	29,93	33,73	0,044			98,20	cpy MB-8
11 / 3 .	34,55	29,95	33,85				98,35	cpy MB-8

11 / 4 .	34,63	29,95	33,78				98,36	cpy MB-8
11 / 5 .	34,96	30,25	34,31				99,52	cpy MB-8
11 / 6 .	34,73	30,34	34,22				99,29	cpy MB-8
11 / 7 .	34,81	30,07	34,02	0,063			98,97	cpy MB-8
11 / 8 .	34,71	30,19	34,03	0,044	0,048	0,048	99,07	cpy MB-8
11 / 9 .	34,88	30,22	34,07	0,061			99,23	cpy MB-8
11 / 10 .	34,95	30,27	34,15	0,065			99,43	cpy MB-8
11 / 11 .	34,91	30,31	34,24	0,050			99,52	cpy MB-8
11 / 12 .	34,80	30,37	34,21	0,048			99,43	cpy MB-8
11 / 13 .	34,80	30,34	34,09	0,080			99,31	cpy MB-8
11 / 14 .	34,30	29,80	33,58	0,098			97,78	cpy MB-8
11 / 15 .	34,63	29,93	33,56				98,12	cpy MB-8
11 / 16 .	34,67	29,98	33,63				98,29	cpy MB-8
11 / 17 .	34,53	29,92	33,55				98,00	cpy MB-8
11 / 18 B	34,58	29,99	33,67				98,23	cpy MB-8
1 / 1 . C	34,69	30,32	35,08				100,09	cpy MB-11
1 / 2 .	34,56	30,31	35,26				100,12	cpy MB-11
1 / 3 .	34,12	30,36	35,37				99,84	cpy MB-11
1 / 4 .	34,47	30,21	35,28				99,96	cpy MB-11
1 / 5 .	34,45	30,40	35,29				100,14	cpy MB-11
1 / 6 .	34,34	30,30	35,30				99,94	cpy MB-11
1 / 7 .	34,22	30,28	35,38				99,88	cpy MB-11
1 / 8 .	34,48	30,37	35,30				100,15	cpy MB-11
1 / 9 .	34,32	30,41	35,35				100,08	cpy MB-11
1 / 10 .	34,49	30,28	35,36				100,13	cpy MB-11
1 / 11 .	34,29	30,28	35,35				99,92	cpy MB-11
1 / 12 . C	34,32	30,28	35,36				99,96	cpy MB-11
2 / 1 . C	34,38	30,19	35,33				99,90	cpy MB-11
2 / 2 .	34,32	30,26	35,48				100,06	cpy MB-11
2 / 3 .	34,38	30,18	35,36				99,92	cpy MB-11
2 / 4 .	34,50	30,17	35,35				100,02	cpy MB-11
2 / 5 .	34,33	30,18	35,46				99,97	cpy MB-11
2 / 6 .	34,06	30,16	35,38				99,60	cpy MB-11
2 / 7 .	34,24	30,16	35,45				99,85	cpy MB-11
2 / 8 .	34,32	30,19	35,44				99,94	cpy MB-11
2 / 9 .	34,24	30,28	35,50				100,03	cpy MB-11
2 / 10 .	34,27	30,36	35,37				100,00	cpy MB-11
2 / 11 .	34,23	30,35	35,43				100,01	cpy MB-11
2 / 12 . C	34,12	30,31	35,34				99,77	cpy MB-11
3 / 1 . C	34,23	30,51	35,15				99,88	cpy MB-6
3 / 2 .	34,33	30,24	35,15				99,72	cpy MB-6
3 / 3 .	34,21	30,32	35,06				99,59	cpy MB-6
3 / 4 .	34,26	30,38	35,06				99,70	cpy MB-6
3 / 5 .	34,26	30,32	34,99				99,57	cpy MB-6
3 / 6 .	34,21	30,34	34,95				99,50	cpy MB-6
3 / 7 .	34,31	30,30	34,89				99,50	cpy MB-6
3 / 8 .	34,28	30,24	34,85				99,38	cpy MB-6
3 / 9 .	34,33	30,27	34,84				99,43	cpy MB-6
3 / 10 .	34,14	30,25	34,91				99,29	cpy MB-6
3 / 11 .	34,26	30,23	34,90				99,39	cpy MB-6
3 / 12 .	34,22	30,26	34,90				99,38	cpy MB-6
3 / 13 .	34,15	30,17	34,86				99,18	cpy MB-6
3 / 14 . C	34,20	30,26	34,92				99,38	cpy MB-6
4 / 1 . C	34,43	30,33	35,19				99,95	cpy MB-8

4 / 2 .	34,38	30,32	35,15			99,86	cpy MB-8
4 / 3 .	34,31	30,42	35,19			99,92	cpy MB-8
4 / 4 .	34,33	30,38	35,25			99,96	cpy MB-8
4 / 5 .	34,31	30,45	35,22			99,99	cpy MB-8
4 / 6 .	34,39	30,47	35,28			100,15	cpy MB-8
4 / 7 .	34,28	30,46	35,27			100,00	cpy MB-8
4 / 8 .	34,25	30,36	35,30			99,90	cpy MB-8
4 / 9 .	34,36	30,56	35,33			100,26	cpy MB-8
4 / 10 .	34,20	30,30	35,35			99,85	cpy MB-8
4 / 11 .	34,31	30,62	35,39			100,31	cpy MB-8
4 / 12 .	34,32	30,48	35,38			100,18	cpy MB-8
4 / 13 .	34,22	30,59	35,39			100,20	cpy MB-8
4 / 14 . C	34,20	30,29	35,34			99,83	cpy MB-8
7 / 1 . E	33,82	29,90	34,39			98,11	cpy MB-8
7 / 2 .	34,08	30,02	34,35			98,44	cpy MB-8
7 / 3 .	33,77	30,03	34,34			98,14	cpy MB-8
7 / 4 .	34,15	29,91	34,38			98,44	cpy MB-8
7 / 5 .	34,24	29,91	34,25			98,39	cpy MB-8
7 / 6 .	34,05	29,60	33,84			97,50	cpy MB-8
7 / 7 .	34,53	30,02	34,33			98,88	cpy MB-8
7 / 8 .	34,27	29,92	34,36			98,55	cpy MB-8
7 / 9 .	34,12	29,56	33,75			97,43	cpy MB-8
7 / 10 .	34,02	29,62	33,88			97,52	cpy MB-8
7 / 11 .	33,87	29,68	33,86			97,42	cpy MB-8
7 / 12 . E	34,08	29,60	34,04			97,73	cpy MB-8
8 / 1 . E	34,24	29,69	34,05			97,97	cpy MB-8
8 / 2 .	34,02	29,59	33,98			97,60	cpy MB-8
8 / 3 .	34,30	29,66	34,10			98,07	cpy MB-8
8 / 4 .	34,43	30,00	34,60			99,04	cpy MB-8
8 / 5 .	34,35	30,01	34,69			99,05	cpy MB-8
8 / 6 .	34,28	30,04	34,56			98,88	cpy MB-8
8 / 7 .	34,39	30,00	34,67			99,06	cpy MB-8
8 / 8 .	34,07	29,53	34,04	0,024		97,67	cpy MB-8
8 / 9 .	34,03	29,59	34,05			97,67	cpy MB-8
8 / 10 .	34,19	29,63	34,07			97,88	cpy MB-8
8 / 11 .	34,16	29,57	34,11			97,85	cpy MB-8
8 / 12 . E	34,25	29,58	33,96			97,79	cpy MB-8
9 / 1 . E	34,23	29,90	34,29			98,43	cpy MB-8
9 / 2 .	34,16	30,00	34,57			98,73	cpy MB-8
9 / 3 .	34,11	29,59	33,86			97,55	cpy MB-8
9 / 4 .	33,92	29,69	33,80			97,40	cpy MB-8
9 / 5 .	33,93	29,66	33,90			97,48	cpy MB-8
9 / 6 .	34,01	29,67	33,82			97,50	cpy MB-8
9 / 7 .	34,23	30,07	34,41			98,71	cpy MB-8
9 / 8 .	34,28	30,04	34,42	0,030		98,77	cpy MB-8
9 / 9 .	34,16	29,60	33,70			97,46	cpy MB-8
9 / 10 .	33,96	29,67	33,79			97,41	cpy MB-8
9 / 11 .	34,16	29,64	33,89			97,69	cpy MB-8
9 / 12 .	34,16	29,67	33,81			97,64	cpy MB-8
9 / 13 .	33,92	29,69	33,92			97,53	cpy MB-8
9 / 14 .	34,19	30,13	34,46			98,78	cpy MB-8
9 / 15 . E	34,24	30,04	34,49			98,78	cpy MB-8
3 / 1 . F	34,18	29,97	34,41			98,57	cpy-MB-8
3 / 2 .	34,01	29,85	34,38			98,24	cpy-MB-8

3 / 3 . F	34,16	30,00	34,44				98,60	cpy-MB-8
3 / 4 .	34,15	30,00	34,46				98,61	cpy-MB-8
3 / 5 . F	34,13	29,98	34,46				98,58	cpy-MB-8
3 / 6 .	34,23	29,97	34,37				98,57	cpy-MB-8
3 / 7 . F	33,92	29,95	34,40				98,27	cpy-MB-8
3 / 8 .	34,06	29,92	34,32				98,29	cpy-MB-8
3 / 9 . F	34,00	30,04	34,37				98,41	cpy-MB-8
3 / 10 .	34,10	29,96	34,40				98,46	cpy-MB-8
3 / 11 . F	34,07	30,03	34,35				98,45	cpy-MB-8
3 / 12 . F	34,11	30,02	34,38				98,51	cpy-MB-8
3 / 13 . F	34,15	29,98	34,31				98,45	cpy-MB-8
3 / 14 .	34,08	30,02	34,33				98,42	cpy-MB-8
3 / 15 . F	34,32	29,96	34,48				98,76	cpy-MB-8
3 / 16 .	34,15	29,95	34,56				98,66	cpy-MB-8
3 / 17 . F	34,18	29,95	34,55				98,68	cpy-MB-8
3 / 18 .	34,09	29,99	34,59				98,67	cpy-MB-8
3 / 19 .	34,09	29,96	34,56				98,61	cpy-MB-8
3 / 20 . F	34,25	30,06	34,70				99,01	cpy-MB-8

ANEXO 2: Fotomicrografías de granos analizados.



Fig A: grano de calcosina (MB-14) sin niveles detectables de Ag para EMPA.

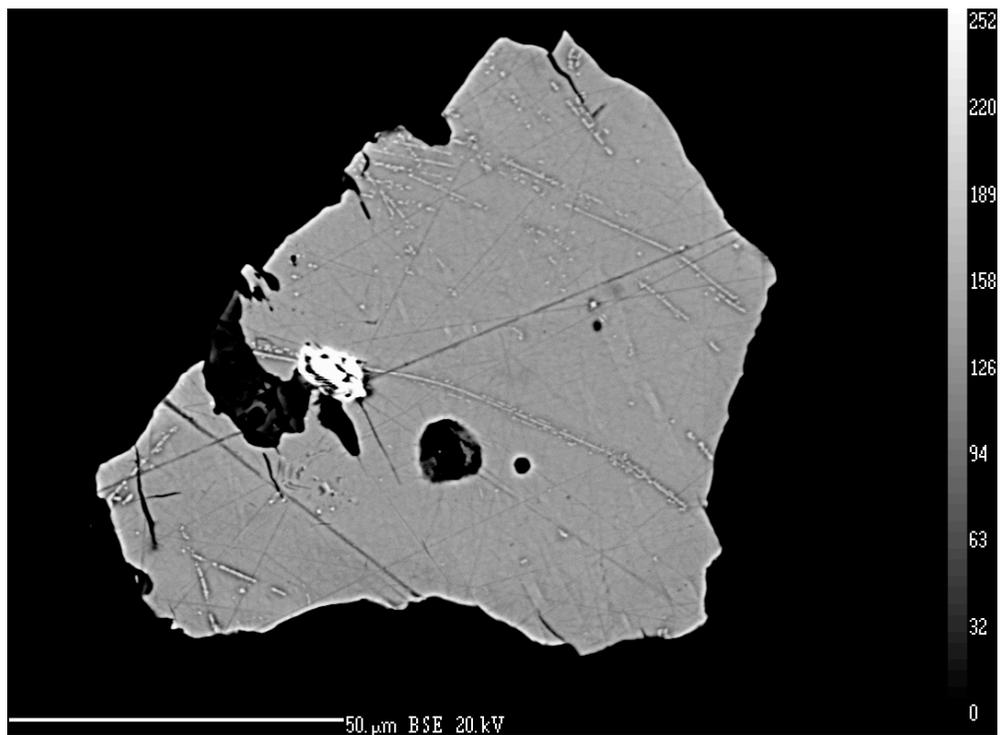


Fig B: grano de calcosina (MB-14) con inclusión de mineral de plata (brillante)

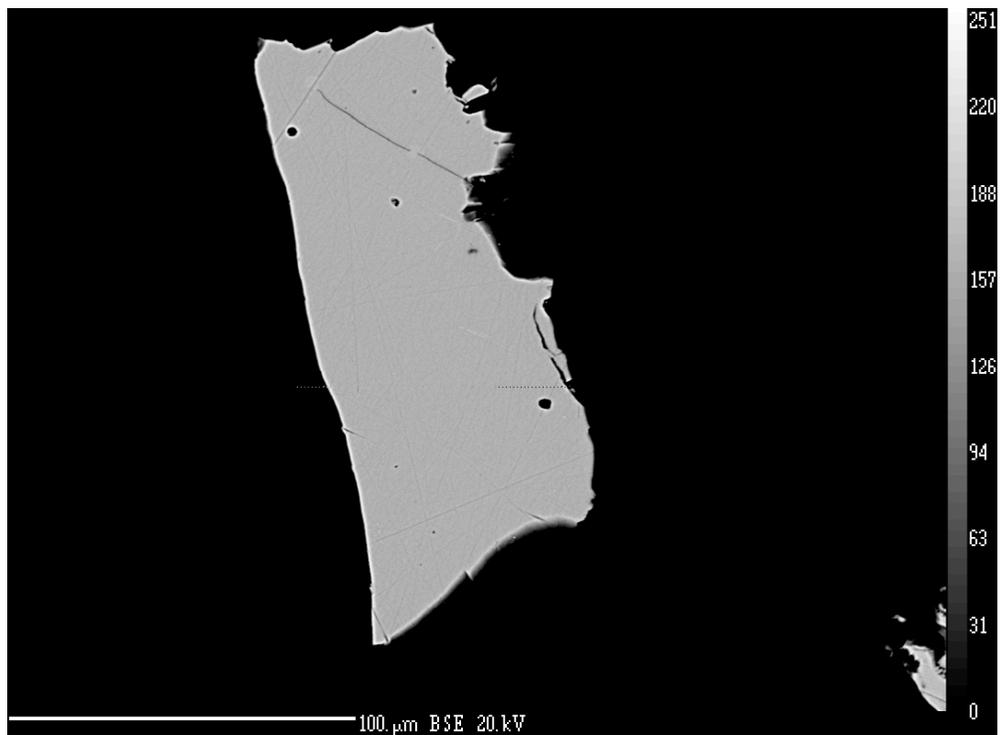


Fig C: grano de bornita (MB-12) rica en plata.

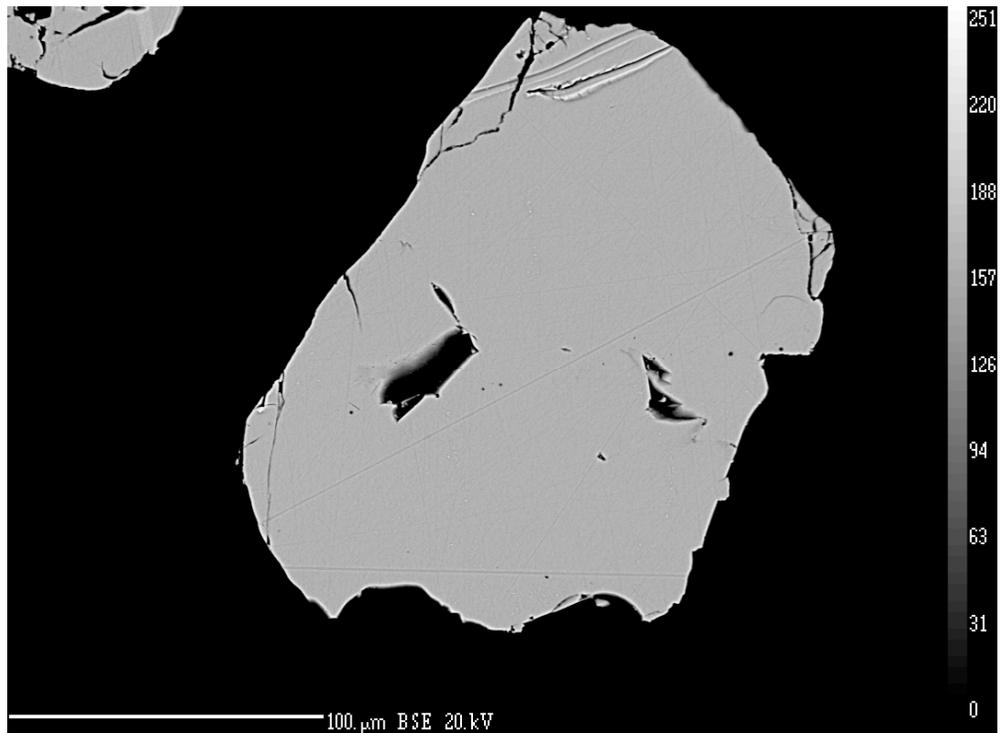


Fig D: grano bornita (MB-12) sin niveles detectables de Ag para EMPA.

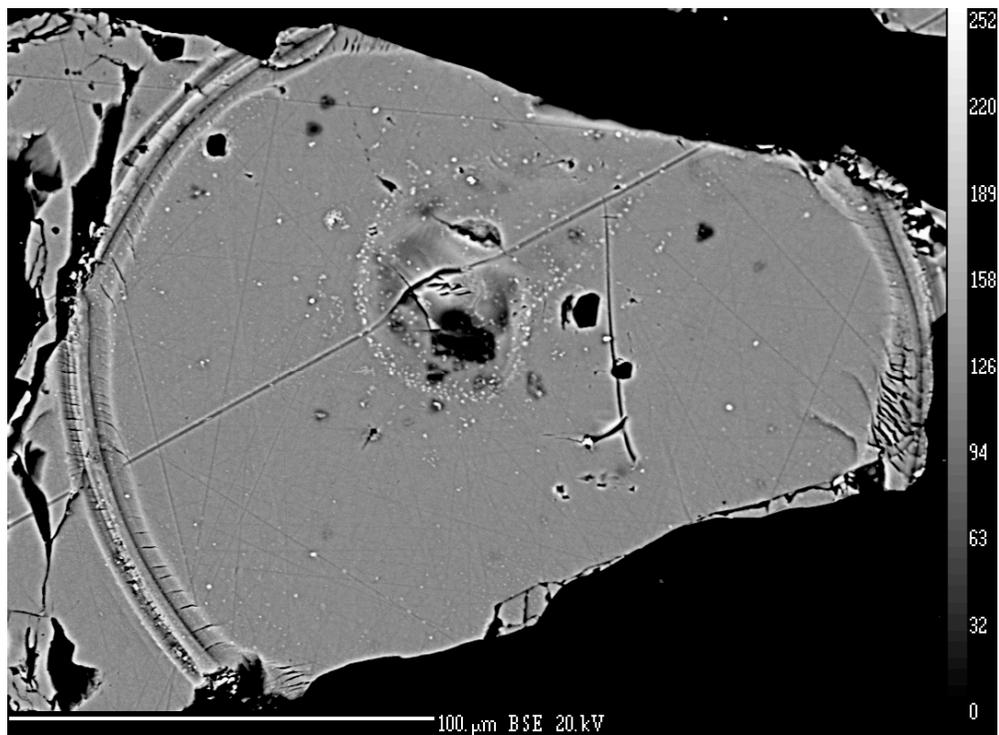


Fig E: grano de calcopirita (MB-6) rico en Ag. Se observa cicatriz del análisis SIMS.

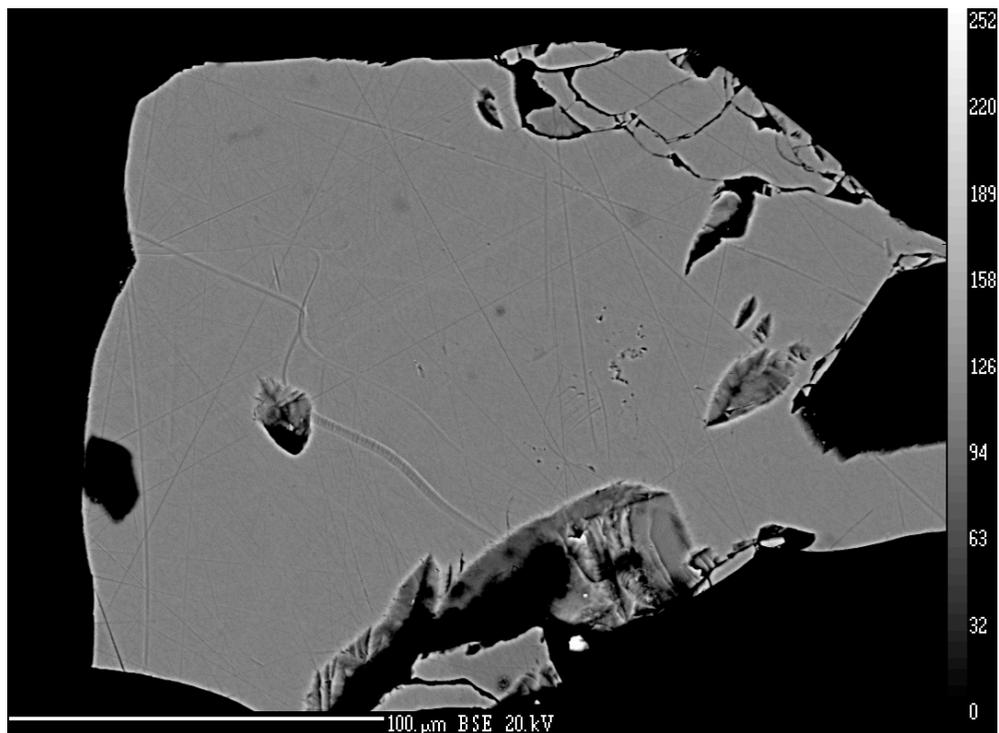


Fig F: grano de calcopirita (MB-8) sin niveles detectables de Ag para EMPA.

ANEXO 3: Fases cloruradas.

Análisis puntual fases cloruradas calcosina de Mantos de la Luna ML-1 (Figura 13).

Números en rojo en la Figura G corresponden en la siguiente tabla.

	S (%peso)	Cl (%peso)	Fe (%peso)	Cu (%peso)	Ag (%peso)	Total (%peso)
1 / 1 .	0,94	15,47	0,58	55,66		72,68
2 / 1 .		16,15	0,27	63,50		79,92
3 / 1 .	0,06	15,30	2,25	55,31		72,92
4 / 1 .	0,38	16,03	0,91	57,29		74,62
5 / 1 .	0,04	16,06	0,37	57,23		73,70
6 / 1 .	0,05	15,48	1,01	61,54		78,09
7 / 1 .	13,42	3,73	0,08	76,17		93,40
8 / 1 .	0,22	1,04	0,12	71,28		72,70
9 / 1 .	0,19	4,10	0,13	71,49		75,90
10 / 1 .	0,06	16,25	0,39	61,53		78,23
11 / 1 .	0,14	4,87	0,10	71,36	0,07	76,55
12 / 1 .	0,12	18,74	0,07	59,19	0,09	78,21
13 / 1 .	0,16	11,17	0,06	72,19	0,13	83,72
14 / 1 .	0,71	13,13	0,06	72,42	0,15	86,47
15 / 1 .	0,43	8,79	0,05	70,83	0,07	80,16
16 / 1 .		16,01	0,07	60,50		76,59
17 / 1 .	0,08	12,01	0,05	59,64	0,12	71,88
18 / 1 .	0,20	0,84	0,02	72,74		73,81
19 / 1 .	0,22	0,94	0,02	70,37	0,079	71,63
20 / 1 .	0,25	0,42		69,15	0,22	70,05
21 / 1 .	0,18	0,76	0,02	71,23		72,21
22 / 1 .		15,63	0,53	57,17		73,34
23 / 1 .	0,19	2,34	0,50	72,84		75,92

Línea de análisis en calcosina Figura 14.

El comienzo de la línea es el tramo inferior izquierdo. Los totales bajos corresponden a las fases cloruradas y los 3 puntos con totales de 100% corresponden a la calcosina que aún no ha sido alterada.

	S (%wt)	Fe (%wt)	Cu (%wt)	Se (%wt)	Ag (%wt)	Total (%wt)
21 / 1	0,06	0,07	64,12			64,24
21 / 2	0,05	0,08	59,91		0,12	60,16
21 / 3	0,18	0,07	67,52	0,04	0,2	68,01
21 / 4	0,17	0,06	69,61		0,04	69,88
21 / 5	21,75	0,06	78,35			100,16
21 / 6	21,87	0,05	78,22			100,14
21 / 7	21,97	0,04	78,53			100,54
21 / 8	0,23	0,03	70,46			70,72
21 / 9	0,22	0,02	70,92			71,15
21 / 10	0,20	0,03	69,79		0,05	70,07



Figura G: Grano de calcosina ML-1 de Mantos de la Luna con puntos para fases cloruradas.

ANEXO 4: Datos SIMS.

En rojo valor máximo, en amarillo el segundo mayor y en verde el tercer lugar.

Datos calcosina grano grueso

Muestra	ID Grano	Au (ppm)	As (ppm)	Ag (ppm)	Te (ppm)	Sb (ppm)	Se (ppm)
ML-1	04ccc226	0	0,09	8,29	1,2	0	10,3
ML-1	04ccc227	0	0,1	2,3	0,63	0	10,3
ML-1	04ccc228	0	0,19	36,5	1,69	0	11
ML-1	04ccc229	0	0,09	1,77	2,1	0	11,8
ML-1	04ccc230	0	0,64	2,04	2,01	0,05	11,9
ML-1	04ccc231	0	0,67	17,2	1,6	0,2	9,28
ML-8	04ccc211	0	0,04	3,85	2,11	0	2,7
ML-8	04ccc212	0,08	0,28	4,51	2,41	0	3,67
ML-8	04ccc213	0	0,05	10	1,89	0	2,88
ML-8	04ccc214	0	0,18	8,6	0,73	0	5,75
ML-8	04ccc215	0,016	0,62	2,12	2,23	0	6,38
ML-8	04ccc216	0,05	1,96	64,7	1,09	0	3,55
MB-14	04ccc197	0	0,02	1,09	0,75	0	13,3
MB-14	04ccc198	0	0,43	13,6	1,81	0	9,15
MB-14	04ccc199	0	0,08	7,16	1,98	0	17,6
MB-14	04ccc200	0,2	0,45	29,8	0,99	0	12,7
MB-14	04ccc201	0	1,78	5,1	2,08	0	14,8
MB-14	04ccc207	0	0,12	1,97	0,82	0	13,5
SS-9	04ccc184	0,32	0,16	20	1,13	0	4,76
SS-9	04ccc185	0	0,16	2,66	2,12	0	3,83
SS-9	04ccc186	0,08	1,18	4,83	1,67	0,11	4,05
SS-9	04ccc187	0,44	0,66	8,54	1,83	0	4,09
SS-9	04ccc188	0,2	0,74	29,5	1,75	0,21	5,68
SS-9	04ccc189	0,18	0,45	1,15	1,39	0	2,53
SS-9	04ccc190	0,28	0,58	3,73	0,58	0	4,37
SS-9	04ccc191	0	0,5	4,44	2,06	0	7,56
SS-9	04ccc192	0,07	0,75	9,61	0,7	0	2,61
SS-9	04ccc193	0,1	0,39	10,1	0,81	0	4,42
SS-9	04ccc194	0,05	0,41	2,38	0,92	0	4,05
SS-1	04ccc160	0,08	0,46	4,24	2,77	0	12,3
SS-1	04ccc161	0	0,78	8,88	1,92	0	8,96
SS-1	04ccc162	0	0,2	17,5	0,75	0,05	14,8
SS-1	04ccc163	0	0,13	2,22	2,12	0	9,7
SS-1	04ccc164	3,13	71,6	48,5	4,41	11,9	5,39
SS-1	04ccc165	0	1,43	3,32	0,95	0	102
SS-1	04ccc166	0,1	0,82	1,77	2,91	0	12,4
SS-5	04ccc134	0,04	0,13	53,5	1,49	0	18,9
SS-5	04ccc135	1,82	173	3,46	6,69	0,64	15,6
SS-5	04ccc136	0	0,45	0	0,83		10,4
SS-5	04ccc137	0	0,21	16,4	1,84	0	11,7
SS-5	04ccc138	0,31	1,62	2,42	3,87	0	11,8
SS-5	04ccc139	0,07	1,94	0,57	2,45	0	8,64
SS-3	04ccc146	0,15	0	2,21	2,65	0	7,63

SS-3	04ccc147	0	0,59	8,88	1,64	1,17	10,2
SS-3	04ccc149	0	2,43	1,2	1,96		12
SS-3	04ccc150	0	0,38	5,2	2,78	0	9,72
SS-3	04ccc153	0	0,3	0,39	2,41	0	10,7
SS-3	04ccc154	0	0,58	3,23	2,11	0	9,93
SS-3	04ccc155	0	0,14	2,09	2,19	0	10,8
ML-4	04ccc122	0	0,74	9,67	1	0	15,9
ML-4	04ccc123	0	0,14	3,6	0,7	0	10,8
ML-4	04ccc124	0	0,22	11,9	2,06	0	9,89
ML-4	04ccc125	0	1,04	1,05	1,23	0	12,8
ML-4	04ccc126	0,52	58,9	37,1	2,16	0,23	12,2
ML-4	04ccc130	0	0,23	14,8	1,91	0	11,1
ML-4	04ccc131	0	0,39	5,25	0,67	0	12,6
ML-4	04ccc132	0	0,19	3,33	0,93	0	11,8
ML-4	04ccc133	0	0,62	5,89	2,27	0	9,33
MB-16	04ccc111	0,07	0,35	17,5	3,14		8,46
MB-16	04ccc112	0,07	0,26	13,1	2,65	0,05	8,39
MB-16	04ccc113	0	0,12	9,13	2,2		9,01
MB-16	04ccc118	0	0,28	6,95	3,26	0	10
MB-16	04ccc119	0	0,08	104	0,97	0	14,7
MB-16	04ccc120	0	0,13	7,78	0,75	0	17,3
MB-16	04ccc121	0	0,65	13,4	1,78	0	7,45
ML-6	04cc089	0,16	0,65	50,1	2,86	0,34	4,83
ML-6	04cc090	0,34	1,13	29,6	2,45	1,38	6,91
ML-6	04cc091	0,34	2,52	116	2,78	2,15	3,98
ML-6	04cc092	0	0,5	3,63	0,91	0,41	4,07
ML-6	04cc093	0,77	10,24	15,3	2,06	3,73	4,38
ML-6	04cc094	0,23	0,66	4,67	2,56		4,53
ML-6	04cc095	0	0,33	8,58	3,24	0,02	4,8
ML-6	04cc096	0,12	0,34	0,38	2,83		1,82
ML-6	04cc097	0,34	3,27	4,56	2,6		5,33
ML-6	04cc098	0,47	4,7	13,4	2,6	0,84	2,95
MB-22	04ccc077	0	0,03	0,03	0,63	0	9,78
MB-22	04ccc078	0,5	0,33	14,1	1,65	0,19	11,6
MB-22	04ccc081	0	0,04	22,8	2,18	0	9,04
MB-22	04ccc083	0	0,75	42,5	1,5	0	11
MB-22	04ccc084	0	0,47	1,45	1,49	0	8,06
MB-22	04ccc085	0	0,24	1,03	2,61		11

Datos calcosina oxidada SIMS

Muestra	ID Grano	Au (ppm)	As (ppm)	Ag (ppm)	Te (ppm)	Sb (ppm)	Se (ppm)
ML-8	04cco217	0	1,58	11,3	3,3	0,71	9,38
ML-8	04cco218	0,36	6,06	13,8	2,5	0,21	5,44
ML-8	04cco219	0,34	5,6	23,4	1,87	0	6,8
ML-8	04cco220	1,44	5,9	10,3	4,61	1,8	11,3
ML-8	04cco221	0,07	7,32	3,76	2,38	0	5,6
SS-9	04cco195	1,44	11	29,8	5,89	2,3	10,5
SS-9	04cco196	1,3	38,4	55	3,72	1,48	5,78

Datos calcosina grano fino SIMS

Muestra	ID Grano	Au (ppm)	As (ppm)	Ag (ppm)	Te (ppm)	Sb (ppm)	Se (ppm)
ML-1	04ccp225	1,39	20	50	2,7	10,3	4,53
ML-1	04ccp232	0,56	20	202	2,7	3,45	8,97
ML-1	04ccp233	0,44	22	56	2,33	0,95	7,53
ML-1	04ccp234	1,03	24	143	3,41	2,03	9,89
ML-1	04ccp235	5,98	134	464	13	10,2	3,59
ML-1	04ccp236	1,71	32	143	3,68	2,89	8,85
ML-1	04ccp237	1,71	36	82	3,45	3,46	9,15
ML-8	04ccp222	3,54	90,8	36,5	6,58	6,79	4,16
ML-8	04ccp223	1,12	42,7	8,09	3,58	0,53	5,39
MB-14	04ccp202	0,42	5,91	26,1	1,93	0,72	9,26
MB-14	04ccp203	0,98	13,7	80,6	2,61	2,72	7,29
MB-14	04ccp204	0	0,95	34,3	1,75	0	9,63
MB-14	04ccp205	0	3,5	51,4	1,97		9,62
MB-14	04ccp206	0	2,09	369	1,67	0,66	7,35
MB-14	04ccp208	1,92	55,3	139	6,41	6,2	6,51
MB-14	04ccp209	1,36	21,8	165	3,17	1,16	3,55
MB-14	04ccp210	0,1	2,76	207	2,3	0,11	11,9
SS-1	04ccp159	0,32	4,85	27,5	2,35	0	3,79
SS-1	04ccp167	0,26	9,33	11,6	1,67	0	9,72
SS-1	04ccp168	0,29	4,27	32,4	2,36	0,13	10,1
SS-1	04ccp169	0	3,79	34,4	1,92	0	7,43
SS-1	04ccp170	0,15	4,17	66,7	1,21	0,25	9,1
SS-5	04ccp140	2,6	48,3	128	5	3,5	10,3
SS-5	04ccp141	0,31	5,61	42,7	2,47	0	10,4
SS-5	04ccp142	0,28	3,23	101	1,89	0,15	6,93
SS-5	04ccp143	0,05	0,9	11,5	0,99	0	7,11
SS-5	04ccp144	0,45	11,2	140	2,55	0,12	9,42
SS-5	04ccp145	0	3,93	21,6	0,73	0	14,1
SS-3	04ccp148	0,16	2,26	13,3	1,98	0,2	16,9
SS-3	04ccp151	0,48	11,7	20,9	1,77	2,07	19,9
SS-3	04ccp152	1,66	43,6	47,8	4,12	5,86	12,8
SS-3	04ccp156	0,24	11,8	61,5	2,49	1,45	12,1
SS-3	04ccp157	0	0,68	6,04	0,84	0,14	8,97
SS-3	04ccp158	0,53	13,4	49,6	2,37	0,61	6,46
ML-4	04ccp127	0,66	27,9	19,5	2,84	0,53	12,2
ML-4	04ccp128	1,66	40,1	87,7	2,93	2,81	4,19
ML-4	04ccp129	0	0,7	5,63	1,05	0,01	9,48
MB-16	04ccp114	0,93	3,81	34,8	2,07	3,7	8,63
MB-16	04ccp115	0,21	2	31,3	1,84	0,62	12,7
MB-16	04ccp116	0,63	2,03	47,3	2,66	0,13	2,79
MB-16	04ccp117	0,98	12,6	51,7	2,15	5,07	9,47
MB-22	04ccp079	0,99	28,1	34	2,74	4,6	10,3
MB-22	04ccp080	0,55	6,85	172	1,71	1,54	7,76
MB-22	04ccp082	0,13	3,34	23	2,62	0,4	9,6
MB-22	04ccp086	0,87	11	117	2,17	0,73	7,26
MB-22	04ccp087	0,26	3,21	62	1,82	0,34	8,35
MB-22	04ccp088	1,14	29,6	47	3	1,09	11,9

Datos Calcopirita SIMS.

Muestra	ID Grano	Au (ppm)	As (ppm)	Ag (ppm)	Te (ppm)	Sb (ppm)	Se (ppm)
MB-11	04cc33	0,19	6,49	7,87	0,1	1,18	1,29
MB-11	04cc34	0,05	4,21	10,5	0	0	0,53
MB-11	04cc35	0,41	2,42	24,6	0,59	0,73	0,92
MB-11	04cc36	0,33	4,82	17,2	0,18	0,97	1,24
MB-11	04cc37	0,27	1,64	3,2	0,24	0	2,09
MB-11	04cc38	0,45	2,02	31,7	0,27	0	1,29
MB-8	04cc17	0,07	0,27	12,1	0,11	0,21	1,32
MB-8	04cc18	0,11	0	13,1	0,09	0	1,82
MB-8	04cc19	0,09	0,28	0,61	0,2	0	2,03
MB-8	04cc20	0,13	0,69	19,6	0,1	0,52	1,14
MB-8	04cc21	0,09	1,98	9,19	0,15	0	1,54
MB-8	04cc22	0,13	2,25	22,6	0,29	1,19	1,41
MB-8	04cc23	0,11	1,15	13,1	0,32	0,21	1,15
MB-8	04cc24	0,09	0,05	1,01	0,5	0,31	5052
MB-6	04cc02	0,13	1,4	12,3	0,41	0,27	1,33
MB-6	04cc03	0,17	0,44	17,9	0,1	1,47	1,08
MB-6	04cc04	0,19	0,46	150	1,37	0,35	3,38
MB-6	04cc05	0,09	0,99	14,9	0,16	0,14	0,55
MB-6	04cc06	0,11	0,84	5,7	0,15	0	1,46
MB-6	04cc07	0,13	1,03	18,3	0,21	0	0,67
MB-6	04cc08	0,19	0,4	15,7	0,09	0	1,22
MB-6	04cc09	0,13	0,39	27,7	0,28	0	0,84
MB-11	04cp39	0,39	26,4	553	0,34	18,2	1,23
MB-11	04cp40	0,27	30	208	1,72	19,9	0,96
MB-11	04cp41	0,39	17,7	2211	2,08	15,2	1,96
MB-11	04cp42	0,31	11	148	0,62	3,82	1,4
MB-11	04cp43	0,35	9,5	287	0,58	2,49	0,71
MB-11	04cp44	0,37	13,5	213	0,5	13,7	1,45
MB-8	04cp25	0,15	5,23	216	0,4	3,62	0,92
MB-8	04cp26	0,15	15,5	565	1,05	11,3	0,85
MB-8	04cp27	0,19	10,4	600	0,55	4,99	0,95
MB-8	04cp28	0,11	4,02	207	0,47	0,61	0,55
MB-8	04cp29	0,27	28,5	101	0,39	4,73	0,99
MB-8	04cp30	0,21	16,7	633	0,55	8,76	1,16
MB-8	04cp31	0,71	102	770	3,24	13,3	1,06
MB-8	04cp32	0,19	9,4	79,1	0,93	2,71	1,08
MB-6	04cp01	0,21	16,2	463	0,79	4,73	0,63
MB-6	04cp10	0,21	35,5	512	1,45	21	0,81
MB-6	04cp11	0,23	21,8	392	1,03	19,3	1,85
MB-6	04cp12	0,45	28	83,3	0,77	11,4	1,12
MB-6	04cp13	0,17	6,1	63,5	0,3	2,9	1,36
MB-6	04cp14	0,85	46,3	826	1,98	22,7	0,95
MB-6	04cp15	0,41	79,6	144	1,4	18,5	2,17
MB-6	04cp16	0,19	27,1	183	0,99	12,6	0,75

-----Calcopiritas grano grueso-----
-----Calcopiritas grano fino-----

Datos Bornita SIMS

Muestra	ID Grano	Au (ppm)	As (ppm)	Ag (ppm)	Te (ppm)	Sb (ppm)	Se (ppm)
MB-12	04bo059	0,38	0,07	234	3,56	1,11	4,12
MB-12	04bo060	0,64	0,21	183	3,44	0,37	3,57
MB-12	04bo061	0,24	0,11	365	2,92	1,15	3,8
MB-12	04bo062	0,32	0,05	262	3,01	0	3,47
MB-12	04bo063	0,68	0,06	607	3,11	0,3	3,07
MB-12	04bo064	0,08	0	224	3,2	0	3,23
MB-12	04bo065	2,38	0,4	504	6,07	0	2,37
MB-12	04bo066	0,98	0,41	386	5,77	1,13	3,73
MB-12	04bo067	0,50	0,06	281	5,07	0	2,97
MB-12	04bo068	1,98	0,48	506	5,7	0,19	3,93
MB-12	04bo069	0,58	6,25	88	7,92	0,52	4,8
MB-12	04bo070	1,18	2,66	381	6,47	0,34	3,93
MB-13	04bo45	1,88	0,42	395	0	1,42	5,11
MB-13	04bo46	1,46	0,19	649	5,58	1,18	4,03
MB-13	04bo47	2,00	1,18	531	5,84	3,93	4,24
MB-13	04bo48	1,58	0,41	310	5,01	0,92	4,83
MB-13	04bo49	1,18	4,55	313	6,6	0,16	4,64
MB-13	04bo50	1,36	8,06	386	7,41	1,63	3,93
MB-13	04bo57	1,64	1,76	353	5,37	0	5
MB-13	04bo58	2,18	156	81	5,06	27,5	2,7

Datos covelina SIMS

Muestra	ID Grano	Au (ppm)	As (ppm)	Ag (ppm)	Te (ppm)	Sb (ppm)	Se (ppm)
MB-12	04co071	0,51	2,42	226	2,08	0,9	0,43
MB-12	04co072	0,27	9,64	306	1,86	0,44	0,47
MB-12	04co073	0,00	1,68	329	1,54	1,17	0,57
MB-12	04co074	0,25	10,8	223	1,98	1,58	0,43
MB-12	04co075	0,03	0,49	89,8	1,69	1,05	0,44
MB-12	04co076	0,13	0,74	246	1,24	0,26	0,48
MB-13	04co51	0,05	8,3	174	1,41	0,6	0,62
MB-13	04co52	0,00	1,96	176	1,36	0,69	0,5
MB-13	04co53	0,15	1,5	372	1,58	0,74	0,57
MB-13	04co54	0,67	0,79	105	1,44	0,87	0,72
MB-13	04co55	0,03	0,36	180	1,07	0	0,47
MB-13	04co56	0,00	0,58	163	1,49	0,2	0,72

ANEXO 5: Resumen de resultados para la calcosina según tipo morfológico

Resumen de resultados para la calcosina según tipo morfológico. Se consideran las calcosinas de los 3 depósitos. Todos los datos expresados en ppm.

Calcosina					
		Gruesa (81)	Fina (47)	Oxidada (7)	General (135)
Au	mínimo	0	0	0	0
	máximo	3,13	5,98	1,44	5,98
	promedio	0,17	0,77	0,71	0,41
	Error std	0,05	0,16	0,25	0,07
As	mínimo	0	0,68	1,58	0
	máximo	173	134	38,4	173
	promedio	4,03	17,25	10,84	9,15
	Error std	1,15	2,72	4,71	2,01
Ag	mínimo	0	2,93	3,76	0
	máximo	116	464	55	464
	promedio	12,37	66,57	21,05	32,53
	Error std	1,91	8,13	6,54	4,46
Te	mínimo	0,58	0,73	1,87	0,58
	máximo	6,69	13	5,89	13
	promedio	1,94	2,78	3,47	2,31
	Error std	0,11	0,28	0,53	0,13
Sb	mínimo	0	0	0	0
	máximo	11,9	10,3	2,3	11,9
	promedio	0,33	1,81	0,93	0,92
	Error std	0,17	0,38	0,35	0,18
Se	mínimo	1,82	2,79	5,44	1,82
	máximo	102	19,9	11,3	102
	promedio	9,71	8,81	7,83	9,30
	Error std	0,45	0,49	0,95	0,32

ANEXO 6: Resumen y caracterización básica del principio de la microsonda electrónica EMPA.

El principio del método se basa en la detección y análisis de un conjunto de señales emitidas por una muestra al ser bombardeada por un haz de electrones. La generación del haz de electrones se produce al elevar la temperatura (2500°C) de un filamento de hexaborato de lantano (LaB6), con lo cual se logra la emisión termoiónica de electrones. Una vez liberados, los electrones son encauzados utilizando una serie de lentes electromagnéticas, formando un haz convergente y de diámetro cercano a 1 μm , el cual interactuará con la muestra (Figura. 2).

De acuerdo a los elementos y el tipo de muestra a analizar el haz electrónico se caracteriza con distintos valores para intensidad, voltaje y tiempo de conteo. Con el correcto manejo de estos parámetros se logra bajar los límites de detección y se evita causar daños a los granos de la muestra producidos por el haz de electrones. Las condiciones utilizadas en este estudio para los distintos elementos se muestran en la Tabla 2.

Tras la interacción haz electrónico-muestra se obtienen las siguientes señales de la muestra:

- Electrones secundarios.

Son aquellos que se desprenden de la superficie de la muestra como resultado del bombardeo y con ellos se obtiene imágenes topográficas (útil para análisis en los que se requiere información morfológica de superficie).

- Electrones retrodispersados (Back Scattered Electrons, BSE).

Se originan producto de la desaceleración de los electrones debido a un choque inelástico con la muestra, emergiendo luego de la superficie. La fracción de electrones incidentes que sufren retrodispersión (η) va aumentando con el número atómico (Z), con lo cual se generan imágenes de contraste, donde lo más brillante corresponde a mayor Z . Este tipo de imágenes fueron utilizadas en este estudio para observar la presencia de inclusiones de metales preciosos (brillantes) en las matrices sulfuradas (grises).

- Rayos X.

La emisión de rayos X se debe a la liberación de energía producida al excitar un electrón interno de un átomo de la muestra, el cual sale de su órbita produciendo una vacante que se rellena con la “caída” de un electrón de una capa más externa. De los rayos X se puede obtener: espectros de rayos X, mediante un mapeo puntual; e imágenes o mapas de distribución de elementos a través de un barrido electrónico. Para generar las imágenes, se usa el haz de electrónico en modo de barrido (Scanning Mode). Para el análisis químico puntual se requiere un espectrómetro de rayos X con el cual se mide la señal de rayos X emitidos por la muestra, transformándola en una línea característica para cada elemento. Esta señal puede ser la energía o la longitud de onda del rayo X que emerge de la muestra, la que se comparará con tablas standard para la identificación del elemento que la emite.

Para medir la energía se utiliza un espectrómetro de dispersión de energía (Energy Dispersive Spectrometer, EDS), y para medir la longitud de onda, un espectrómetro de dispersión de longitud de onda (Wavelength-Dispersive Spectrometer, WDS), con los cuales se obtiene un espectro en un gráfico intensidad (número de cuentas) v/s Energía o longitud de onda. En estos gráficos existen 2 poblaciones: el ruido de fondo (background) y los picos (peaks) que se sobreponen en el background.

Existen diferencias entre el EDS y el WDS tanto en la función que cumple cada uno como en la precisión de los resultados.

El EDS entrega la composición química cualitativa a semicuantitativa del mineral en forma rápida (tiempo real), alcanzando un límite de detección cercano al 1% en peso, por lo tanto, es útil para los elementos mayoritarios. Éste funciona en base a la medición de la energía de los rayos X, analizando todo el espectro de energía en forma simultánea, por lo que se obtiene un panorama global en tiempos reducidos.

El WDS entrega resultados cuantitativos de la química de los minerales, a través de la medición de las longitudes de onda usando distintos monocristales difractores específicos para las líneas de rayos X características (K_{α} , K_{β} , L_{α} , L_{β} , etc) de los distintos elementos, aplicado a la ley de Bragg. La medición no es simultánea, lo que permite la cuantificación de resultados, mayor precisión y límites de detección del orden de los cientos de ppm, pero tiempos de análisis mayores a los del EDS.

Para obtener resultados de %peso de los elementos, para los análisis WDS presentados en este estudio, se mide la intensidad de un standard y luego la de la muestra. El %peso será la razón entre la intensidad del standard y la intensidad del elemento en la muestra ($\% \text{peso} = I_{\text{muestra}}/I_{\text{standard}}$ de un determinado elemento) Al resultado obtenido se le realizan correcciones automáticas en el software, debido al número atómico (Z), a la absorción (A), y la fluorescencia (F), llamada corrección ZAF, entre otros algoritmos.

ANEXO 7: Resumen y caracterización básica del principio de la microsonda iónica SIMS.

El principio del método se basa en la medición de un haz de partículas ionizadas al bombardear una muestra sólida con un haz de iones.

A diferencia del haz electrónico del método EMPA, el haz incidente corresponde a un haz iónico, o haz primario, producido en un duoplasmatron o una fuente de cesio, de la cual los iones son extraídos, filtrados, acelerados por un alto voltaje (10-30 kV) y focalizados por una serie de lentes electroestáticos y aperturas (Figura 3). Las condiciones analíticas utilizadas en este estudio se presentan en la Tabla 3

La interacción entre el haz iónico y la muestra produce las siguientes señales:

- iones secundarios (positivos o negativos)
- átomos neutrales
- rayos X y electrones.

De estas señales se puede obtener, según el modo escogido: espectros de masa, análisis químicos cuantitativos, perfiles de profundidad o imágenes iónicas. En este estudio el SIMS fue utilizado para la obtención de resultados de análisis químicos puntuales, cuantitativos, alcanzando límites de detección 4 ordenes de magnitud menor a la microsonda electrónica.

Los iones secundarios son acelerados y encauzados fuera de la muestra a una columna secundaria por un voltaje cuya polaridad determinará si los iones extraídos son positivos o negativos. El haz secundario es focalizado mediante lentes hacia la entrada del espectrómetro donde su masa es analizada. Los iones secundarios se pueden contar usando una copa de Faraday o un multiplicador electrónico; o alternativamente se puede transformar en una imagen usando una pantalla fluorescente.

Los análisis, según el modo escogido, pueden entregar resultados del tipo: espectros de masa, perfiles de profundidad o imágenes iónicas, requiriendo correcciones, que se realizan en forma automática a través del software, debido a efectos de matriz, interferencia de masas y fraccionamiento de masa instrumental.

Los espectros de masa muestran la intensidad de los iones secundarios de las especies detectadas en función de la masa. Debido a que las intensidades de las medidas pueden variar hasta 9 ordenes de magnitud, los espectros de masa exhiben los resultados de la intensidad en escala logarítmica.

Los perfiles de profundidad se realizan gracias a la capacidad erosiva del haz utilizado en este método. Debido a ello se puede ir midiendo la intensidad del peak como una función del tiempo y así conocer la distribución del elemento en profundidad. La escala tiempo se puede traducir en profundidad, obteniendo una buena resolución si el disparo es homogéneo y si se consideran únicamente las cuentas de iones secundarios cercanos al centro del cráter. Estos perfiles también se expresan en escala logarítmica.

La importancia de este método radica en la alta sensibilidad (ppm a ppb) y entrega de resultados cuantitativos. Esta característica es de suma importancia para el estudio y cuantificación de metales preciosos, que en general ocurren en muy bajas concentraciones.