



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

**GEOQUÍMICA EN SUELOS SALINOS EN EL DISTRITO
MINERO MANTOS DE LA LUNA: UTILIZACIÓN EN
EXPLORACIÓN MINERA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

MATHIAS FRANCISCO ABARCA ITHURRALDE

PROFESOR GUÍA:
CARLOS PALACIOS MONASTERIO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARTÍN REICH MORALES
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

Santiago de Chile
Agosto 2010

Resumen

La gran mayoría de los depósitos mineros aflorantes en el norte de Chile se encuentra bajo explotación o bien ya han sido explotado. Frente a esto, surge la necesidad de generar nuevas metodologías de exploración en zonas cubiertas enfocadas a encontrar depósitos de cobre aún no descubiertos.

El objetivo de este trabajo es demostrar que la presencia de anomalías geoquímicas de los diferentes elementos (Cu, Na y Cl) al interior de vetillas y fracturas rellenas en superficie presenta una fuerte relación con la mineralización en el subsuelo. Para este fin se realizaron estudios geoquímicos y mineralógicos en el sector sur del Yacimiento Mantos de la Luna, un depósito del tipo estratoligado ubicado 20 km al sur de Tocopilla al interior de la Cordillera de la Costa.

Para identificar cualitativamente el contenido mineralógico de las distintas vetillas se realizaron análisis de difracción de rayos X, mientras que para la determinación cuantitativa de los distintos elementos se realizaron análisis mediante espectrometría por plasma acoplado inductivamente por espectroscopía de emisión atómica (ICP-AES).

Se identificaron tres poblaciones según contenido en cobre al interior de las vetillas, encontrándose una fuerte relación entre la población anómala positiva alta (>200 ppm) presente en arcillas y la mineralización del yacimiento en el subsuelo. Adicionalmente se reporta relación entre las anomalías de Na y Cl soluble en superficie contenidas en yesos y arcillas con la distribución de la mineralización del depósito.

Se sugiere que estas anomalías serían generadas producto de bombeo tectónico, mediante el cual fluidos ascendentes lixiviarían metal base en el subsuelo acarreándolo hacia la superficie.

Finalmente se concluye que la metodología aquí presentada es bastante útil y puede usarse como guía de exploración en zonas cubiertas.

“A mi familia por darme la dicha de su compañía y hacer de mi lo que soy”

Agradecimientos

Mis más profundos agradecimientos al Doctor Carlos Palacios por su tiempo, ideas, y colaboración en la elaboración de este documento.

Agradecimientos a Felipe Rabajille, excelente amigo, compañero de carrera, terrenos y memoria junto a quien vamos cerrando este ciclo para empezar otro.

Agradecimientos especiales al Departamento de Geología y la totalidad de sus funcionarios siempre dispuestos ayudar a los estudiantes tanto en asuntos estudiantiles como extraprogramáticos, destacando principalmente a María Rosa, la segunda madre de todos en geología y a Don Jaime por su ayuda con la geoquímica.

También agradecimientos a Daniel Bertin, Mauricio Muñoz, Manuel Olivares, Joaquín Bastías y demás compañeros de carrera con quienes este camino de aprendizaje se hacía menos duro cada día.

Agradecimientos a mi madre Hilda por inculcarme las ganas de aprender, a mi padre Juan por su constante apoyo y a mis hermanos Thomas y Javiera con quienes sonrío día a día.

Agradecimientos especiales a mi novia Jennifer por todo su amor, sinceridad y quererme tal y como soy.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. Formulación del Problema.....	9
1.2. Hipótesis de Trabajo.....	10
1.3. Objetivos y Metodologías.....	10
1.3.1. Objetivo General.....	10
1.3.2. Objetivos Específicos.....	11
1.4. Ubicación y Vías de Acceso.....	11
1.5. Metodología y Plan de Trabajo.....	14
1.5.1. Trabajo en Campaña.....	14
1.5.2. Trabajo en Gabinete Post-Campaña.....	14
2. MARCO GEOLÓGICO.....	16
2.1. Generalidades.....	16
2.2. Marco Estructural.....	20
2.3. Geología del Distrito Minero Mantos de la Luna.....	21
2.3.1. Características del Depósito.....	21
2.3.2. Rocas Estratificadas de la Formación La Negra.....	21
2.3.3. Unidades Intrusivas.....	23
2.3.4. Estructuras Mayores.....	25
2.3.5. Mineralización.....	27
2.3.6. Alteración.....	28
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	35
3.1. Metodología de Muestreo.....	32
3.2. Metodología de Análisis Químicos y Físicos.....	34

4. Resultados.....	39
4.1. Resultados de Difracción de Rayos X.....	39
4.2. Resultados Químicos.....	40
5. Discusiones.....	43
5.1. Generalidades.....	43
5.2. Elementos Mayores.....	45
5.3. Elementos Menores y Trazas.....	50
5.4. Tierras Raras.....	52
5.5. Aplicación en exploración de depósitos cubiertos: Detección de Anomalías.....	56
5.6. Aplicación en exploración de depósitos cubiertos: Anomalías en Perfil.....	58
6. CONCLUSIONES.....	65
7. REFERENCIAS.....	67
8. ANEXO A: Foto de una herramienta minigrinder.....	71
9. ANEXO B: Difractogramas.....	72
10. ANEXO C: Procedimientos de Laboratorio.....	86
11. ANEXO D: Composición Condrito Carbonaceo.....	89
12. ANEXO D: Elementos Químicos en Agua Oceánica.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: <i>Ubicación de la zona de estudio</i>	12
Figura 1.2: <i>Rutas de acceso y principales centros urbanos</i>	13
Figura 2.1: <i>Mapa Geología Regional</i>	18
Figura 2.2: <i>Leyenda y Simbología Geología Regional</i>	19
Figura 2.3: <i>Mapa estructural de la Cordillera de la Costa</i>	20
Figura 2.4: <i>Mapa geológico del distrito Minero Mantos de la Luna</i>	24
Figura 2.5: <i>Mapa de mina</i>	30
Figura 2.6: <i>Perfil de mineralización de la Sección 7525025N</i>	31
Figura 2.7: <i>Perfil de mineralización de la Sección 7524975N</i>	32
Figura 2.8: <i>Perfil de mineralización de la Sección 7524750N</i>	33
Figura 2.9: <i>Perfil de mineralización de la Sección 7524562N</i>	34
Figura 3.1: <i>Puntos de muestreo y traza de perfil a trabajar</i>	35
Figura 3.2: <i>Vetillas de muestreo en superficie</i>	36
Figura 5.1: <i>Valores Normalizados de elementos menores y traza analizados respecto a lavas de la Formación La Negra</i>	50
Figura 5.2: <i>Rangos Composicionales de tierras raras según dominio mineralógico</i>	53
Figura 5.3: <i>Comparativa de tierras raras en dominios mineralógicos y otros estudios</i>	54
Figura 5.4: <i>Gráfico de Probabilidad de Excedencia versus Concentración de Cu en vetillas</i>	57
Figura 5.5: <i>Zona de estudio y perfil de trabajo</i>	59
Figura 5.6: <i>Concentración de Cu y perfil de mineralización</i>	60
Figura 5.7: <i>Concentración de Na y perfil de mineralización</i>	61
Figura 5.8: <i>Concentración de Cl soluble y perfil de mineralización</i>	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: <i>Exactitud de las mediciones geoquímicas realizadas</i>	37
Tabla 4.1: <i>Resumen de los minerales identificados en cada muestra</i>	39
Tabla 4.2: <i>Resultados de Análisis por Elementos Mayores mediante ICP-AES</i>	40
Tabla 4.3: <i>Resultados de Análisis por REE mediante ICP-AES</i>	41
Tabla 4.4: <i>Resultados de Análisis por Elementos Menores mediante ICP-AES</i>	42
Tabla 4.5: <i>Resultados de Aniones mediante Cromatógrafo Iónico</i>	42
Tabla 5.1: <i>Separación cualitativa del muestreo</i>	43
Tabla 5.2: <i>Geoquímica resumida de elementos mayores, menores y tierras raras</i>	44
Tabla 5.3: <i>Matriz de Pearson para muestras del tipo yeso-dominante</i>	46
Tabla 5.4: <i>Matriz de Pearson para muestras del tipo arcilla-dominante</i>	47
Tabla 5.5: <i>Concentraciones geoquímicas de lavas de la Formación la Negra al norte del distrito minero Mantos de la Luna</i>	49
Tabla 5.6: <i>Geoquímica resumida de Tierras Raras respecto a cada dominio</i>	52

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Formulación del Problema

En la actualidad la gran mayoría de los depósitos aflorantes del Desierto de Atacama se encuentran bajo explotación, o bien, ya han sido explotados. Esto último fuerza a las exploraciones mineras a enfocar sus trabajos hacia zonas cubiertas, con lo cual es necesario idear nuevas metodologías que permitan optimizar estas campañas.

En la Cordillera de la Costa del norte de Chile, es posible encontrar numerosos depósitos de cobre estratoligados del Jurásico Superior, los cuales se encuentran hospedados en rocas volcánicas jurásicas (Maksaev et al. 2007).

El Desierto de Atacama del norte de Chile es una de las zonas más áridas del mundo, en consecuencia la superficie en la Cordillera de la Costa está formada por un suelo salino rico en yeso y halita, además de presentar minerales de arcillas y fragmentos de rocas entre otros. Este suelo salino presenta espesores que comprenden desde 1 a 5 m de potencia, los cuales se desarrollan en planicies, laderas, cumbres de cerros y quebradas (Palacios et al. 2005). Debido a la aridez que ha sido episódica en los últimos 6 Ma y extrema en los últimos 3 Ma (Hartley y Chong 2002), los procesos erosivos han tenido un pequeño impacto en la evolución de superficies en el actual ambiente climático. Frente a todo lo anterior la geoquímica de superficie se propone como una herramienta importante en la exploración minera en esta zona, ya que es capaz de proveer valiosa información relacionada a los procesos que pueden formar anomalías sobre depósitos minerales cubiertos.

Palacios et al (2005) realizó un estudio geoquímico de suelos en torno a los yacimientos de cobre: Mantos Blancos y Sierra Miranda, ubicados entre 50 y 60 km al ENE de Antofagasta, en la Cordillera de la Costa. Estos autores reportan importantes anomalías de cobre (> 500 ppm Cu) en eforescencias salinas ubicadas sobre fallas que cortan a los mencionados yacimientos. Estas anomalías son interpretadas como producto de fluidos ascendentes que lixiviaron el metal base desde las zonas

mineralizadas infrayacentes llegando a los niveles superiores del depósito, o bien a superficie.

Estudios posteriores proponen que estos fluidos ascendentes podrían corresponder a aguas de formación o “deep formation waters” canalizadas por fracturas mediante bombeo tectónico producido durante los frecuentes terremotos que ocurren en la zona (Reich et al. 2008; 2009).

Considerando todo lo anterior, en el presente trabajo se plantea realizar estudios geoquímicos de vetillas de yeso y arcillas en suelos salinos ubicados sobre fallas y fracturas en el sector sur del distrito minero Mantos de la Luna, ubicado 20 km al sur de la ciudad de Tocopilla, con la finalidad de contrastar los resultados obtenidos con el modelo de mineralización de la zona sur del depósito, para así evaluar la viabilidad de esta metodología dentro de la exploración minera de zonas cubiertas.

1.2. Hipótesis de Trabajo

Se plantea que la existencia de anomalías geoquímicas (Cu, Na y Cl) presentes en superficie son producto de bombeo tectónico, por lo cual estas anomalías serían un reflejo de las concentraciones de ciertos elementos bajo el subsuelo

1.3. Objetivos y Metodologías

1.3.1. Objetivo General

Demostrar que la presencia de anomalías geoquímicas (Cu, Na y Cl) en suelos salinos ubicados sobre facturas y fallas al interior del depósito Mantos de la Luna, ubicado en el sector occidental de la Cordillera de la Costa, 200 km al norte de Antofagasta y 20 km al sur de Tocopilla, presenta una estrecha relación con la distribución de la mineralización del depósito en el subsuelo.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Estudiar la expresión geoquímica en fracturas superficiales rellenas por yesos y arcillas sobre suelos salinos de los cuerpos mineralizados en el sector sur del yacimiento Mantos de la Luna.
- Comparar los resultados geoquímicos obtenidos en Mantos de la Luna, con los estudios realizados por Palacios et al. (2005) en los yacimientos Mantos Blancos y Sierra Miranda.
- Evaluar la factibilidad de emplear la geoquímica de superficie en sales y arcillas como una potencial herramienta en la exploración minera.

1.4. Ubicación y Vías de Acceso

El área de estudio se encuentra en la Región de Antofagasta al interior de la Cordillera de la Costa, entre los 22°22'0" S y 22°23'20" S y entre los 70°10'00" W y 70°14'23" W (Fig. 1.1). Se encuentra aproximadamente a 145 km al norte de la ciudad de Antofagasta y a 36 km al sur de la ciudad de Tocopilla.

Para acceder desde Antofagasta se debe recorrer la ruta costera B-1 que conecta con la ciudad de Tocopilla, a la altura del kilómetro 130 existe un desvío señalado hacia la ruta B-178 por el cual se recorren 20 km de camino no pavimentado, el cual sólo es accesible por vehículos de doble tracción.

Desde Tocopilla debe recorrerse la ruta B-24 que une a Tocopilla y Calama, mediante el cual se accede a un desvío a la altura del kilómetro 20, frente a la estación FFCC "Barriles", por el cual se recorren 59 km en dirección sur, hasta llegar a la zona de estudio (Fig. 1.1 y 1.2)

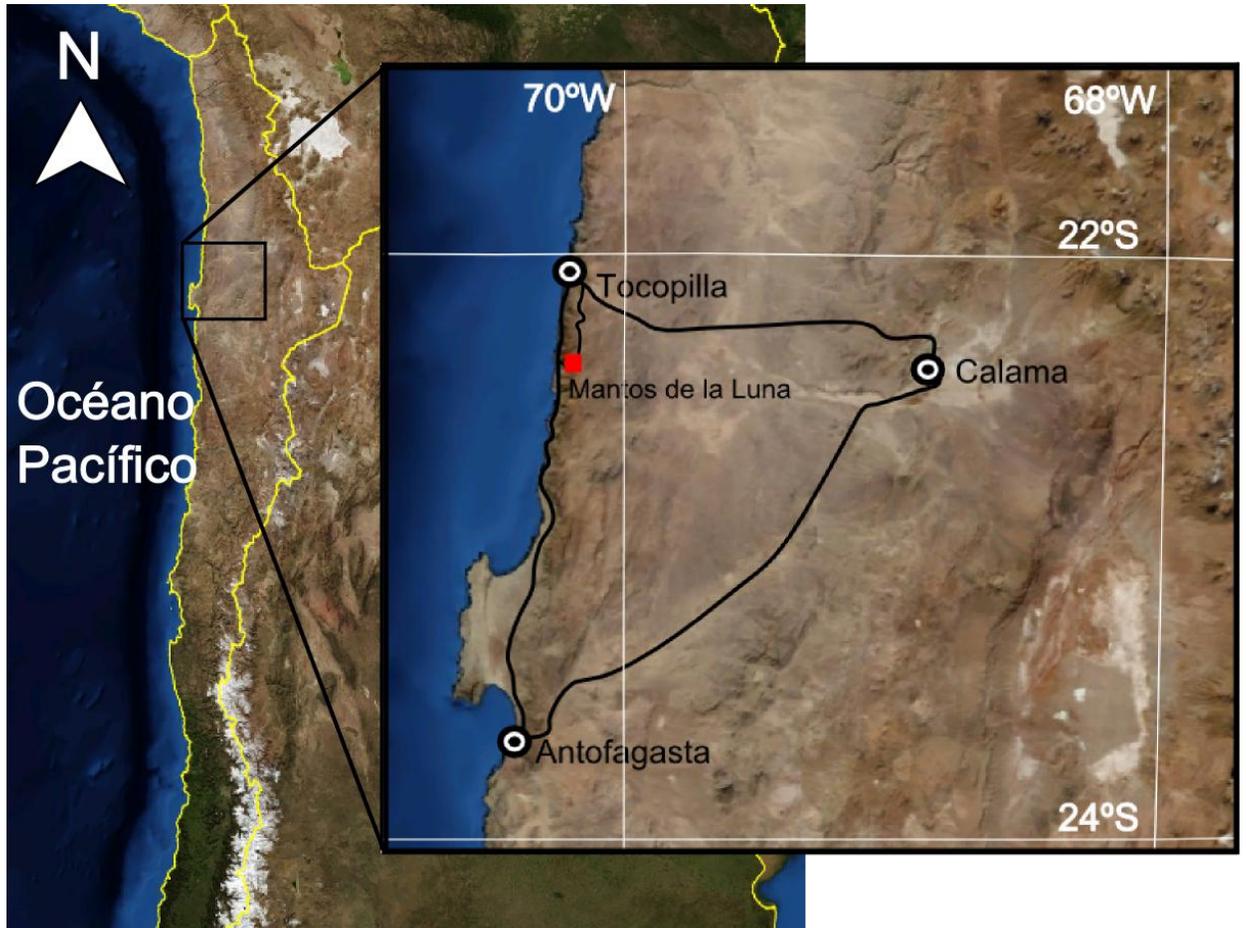


Figura 1.1: *Ubicación de la zona de estudio.*
En rojo la zona de estudio

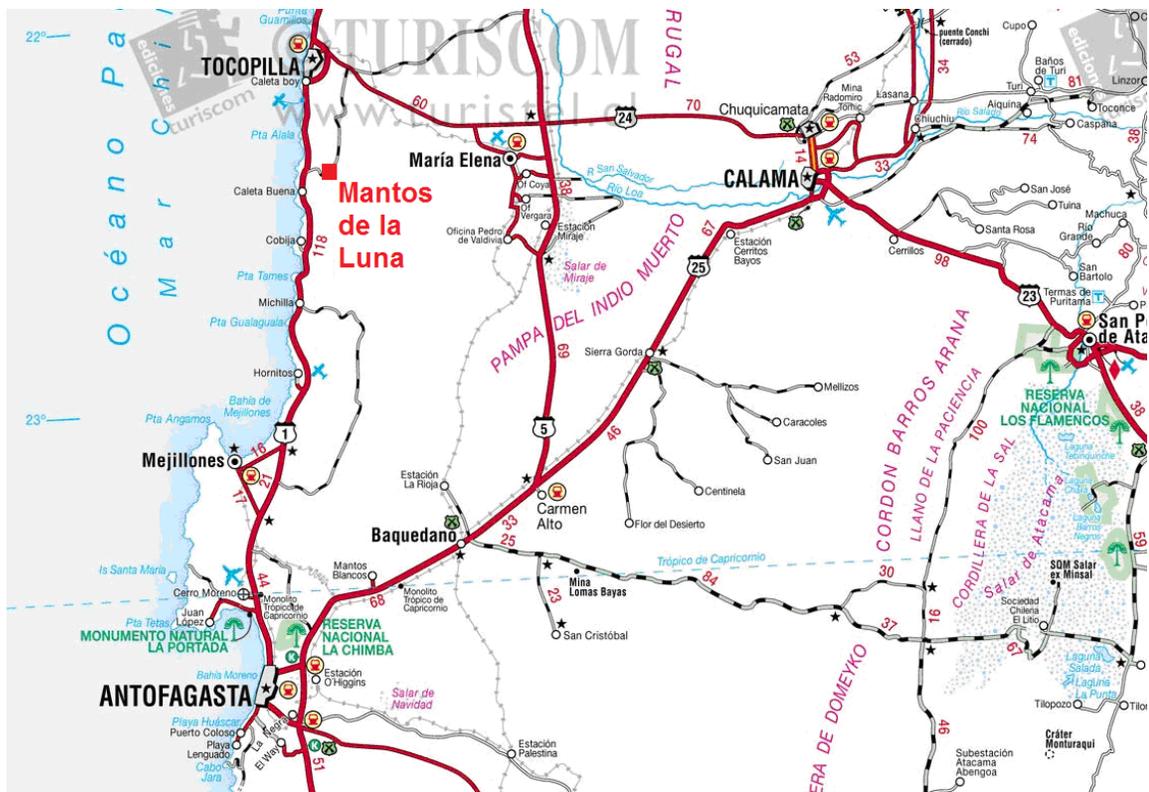


Figura 1.2: Rutas de acceso y principales centros urbanos.

1.5. Metodología y Plan de Trabajo

1.5.1. Trabajo en Campaña

Se establecieron puntos de control y toma de muestra sobre estructuras superficiales rellenas, ubicadas en el sector sur del yacimiento Mantos de la Luna. La toma de muestra consistió en la recolección del relleno presente en fracturas y vetillas obteniéndose un total de 14 muestras útiles.

1.5.2. Trabajo en Gabinete Post-Campaña

- Se realizó un trabajo de separación y limpieza de las muestras obtenidas, con la finalidad de separar solo el contenido de vetillas del resto de roca.
- Se analizaron químicamente las muestras para determinar sus concentraciones de elementos mayores (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K y P), elementos menores (Co, Ni, Cu, Cr, V y Zn), tierras raras (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Yb y Lu) y elementos trazas (Sr, Zr y Ba), mediante espectrometría por plasma acoplado inductivamente por espectroscopía de emisión atómica (ICP-AES), en el Laboratorio de Geoquímica del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Además se realizó análisis de aniones mediante Cromatógrafo Iónico para determinar concentraciones de cloro y sulfato soluble.
- Se realizó difracción de rayos X para determinar los principales minerales contenidos en cada muestra.
- Se contrastaron las anomalías geoquímicas detectadas (Cu, Na y Cl) con el modelo de mineralización del depósito, para determinar relaciones entre las anomalías y la presencia de minerales de valor económico en el subsuelo.

- Se compararon los resultados del presente estudios con aquel reportado por Palacios et al. (2005), en suelos salinos sobre planicies en los distritos Mantos Blancos y Sierra Miranda.
- Se evaluó la factibilidad de esta metodología para ser empleada en la exploración minera de zonas cubiertas en la Cordillera de la Costa del norte de Chile.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. Generalidades

La Cordillera de la Costa del norte de Chile comprendida entre los 22°S y 22°30'S está constituida principalmente por secuencias de lavas pertenecientes a la Formación La Negra (García, 1967) las cuales se encuentran cortadas por extensos cuerpos intrusivos pertenecientes al Batolito de la Costa. Hacia el sector oriente de la Cordillera de la Costa y sobreyaciendo a la Formación La Negra se encuentra una serie de sedimentos aluviales con características de suelos salinos. Finalmente el litoral costero y paralelo a la línea de costa se encuentra cubierto por depósitos tanto de origen coluvial como aluvial no consolidados entre los que destacan los abanicos aluviales (Ver Figura 2.1).

A continuación se señala una breve descripción de las principales unidades geológicas mencionadas.

- **Formación La Negra** (Jurásico)

Corresponde a una secuencia de lavas andesíticas afaníticas y porfíricas con una menor medida de unidades sedimentarias tales como areniscas, conglomerados volcánicos, y lutitas y calizas con fósiles marinos hacia la base. Las lavas se caracterizan por poseer facies brechizadas hacia el techo y base, mientras que la sección media se presenta masiva además de presentar un desarrollo no menor de vesículas las cuales aumentan en cantidad hacia el techo de la colada (Greiner, 1982). En general las lavas presentan rumbos cercanos a NS con manteos que van desde los 20° a los 35° E (García, 1967), presentando potencias estimadas a la latitud de Tocopilla cercanas a los 3.800 m (Maksaev y Marinovic, 1980).

A la Formación La Negra se le ha asignado una edad entre Sinemuriano y Kimeridgiano, en base a su posición estratigráfica y contenido fosilífero en sus intercalaciones calcáreas (amonites) (Bobenrieth, 1980; Maksaev y Marinovic, 1980;

Naranjo y Puig, 1984). Esto último está corroborado por dataciones radiométricas en roca total mediante Rb-Sr las cuales entregan valores de 186 ± 1.2 Ma en lavas del sector sur de Tocopilla (Rogers y Hawkeswork, 1986), y edades $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ en plagioclasas de 161 ± 1.2 Ma y 164 ± 1.7 Ma (Oliveros et al, 2004).

Las rocas de la Formación La negra se encuentran intruidas por diques, filones-manto y pequeños stocks subvolcánicos, de amplia composición; basálticos, andesíticos, dioríticos y gábricos (Boric et al., 1990)

- **Batolito de la Costa** (Jurásico Superior – Cretácico Inferior)

Corresponde a un grupo de complejos plutónicos, principalmente granodioritas y dioritas de grano medio a grueso que se distribuyen en una franja continua de orientación NS intruyendo a las rocas volcánicas de la Formación La Negra (Alfaro, 1972). Estos intrusivos se encuentran cortados por numerosos diques y filones en toda su extensión (Boric et al., 1990; Greiner, 1982).

Dataciones radiométricas indican edades Rb-Sr en roca total de 154 ± 13.4 Ma y 158.3 ± 5.8 Ma (Rogers y Hawkesworth, 1989), y edades $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ en biotita de 159.9 ± 0.7 y 158.8 ± 0.7 Ma (Maksaev, 1988). Sin embargo relaciones de contacto con las unidades a las cuales intruye le asignan una edad Jurásico Superior – Cretácico Inferior (Ferraris, 1978).

- **Depósitos no Consolidados**

Básicamente se describen dos tipos de depósitos no consolidados:

a) Sedimentos aluviales salinos distribuidos sobre la Formación La Negra y hacia el sector oriental, corresponden a gravas y areniscas con características de suelos salinos los cuales se distribuyen sobre y en discordancia con la Formación La Negra y el Batolito de la Costa rellorando depresiones y quebradas. En función de las relaciones de contactos se le asigna una edad Holocena (Ferraris, 1978).

Leyenda

Secuencias Sedimentarias

- Qa**
Pleistoceno - Holoceno
Abánicos aluviales y coluviales: gravas, arenas y limos.
- Qe**
Pleistoceno - Holoceno
Depósitos eólicos: arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas en dunas.
- Pl1m**
Pleistoceno
Secuencias sedimentarias marinas litorales, areniscas y conglomerados coquinaáceos.
- MP1c**
Mioceno Superior - Plioceno
Secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte aluviales, coluviales o fluviales.
- Mp1l (Fm. El Loa)**
Mioceno Superior - Plioceno
Secuencias sedimentarias fluviales y aluviales: limos, arenas, conglomerados y calizas.
- M1c**
Mioceno Inferior - Medio
Secuencias sedimentarias de abánicos aluviales: gravas, arenas y limos.
- J1m**
Jurásico - Neocomiano
Secuencias sedimentarias marinas carbonatadas y clásticas: calizas, lutitas, areniscas

Secuencias Volcanosedimentarias

- Ks2c**
Cretácico Superior
Secuencias volcanosedimentarias continentales: rocas epiclásticas y piroclásticas riolíticas, lavas andesíticas y traquíticas.
- J2m**
Jurásico
Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas: lavas y brechas, andesíticas y basálticas, calizas y areniscas marinas fosilíferas.

Secuencias Volcánicas

- Pe3a**
Paleoceno-Eoceno Inferior
Secuencias y complejos volcánicos continentales ácidos principalmente rocas piroclásticas dacíticas a riolíticas.
- Ks3i**
Cretácico Superior
Secuencias volcánicas continentales: lavas, domos y brechas basálticas a dacíticas con intercalaciones piroclásticas epiclásticas.
- Kia3**
Cretácico Inferior alto
Secuencias y complejos volcánicos continentales: lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas andesíticas a riolíticas.

- Trj3**
Triásico-Jurásico Inferior
Secuencias volcánicas continentales y transicionales: lavas, domos, brechas basálticas a riolíticas con intercalaciones de areniscas y conglomerados.
- J3i**
Jurásico
Secuencias volcánicas continentales y marinas: lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas riolíticas con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales.

Rocas Intrusivas

- Pag**
Paleoceno (65-53 Ma)
Mozodioritas de piroxeno y biotita, granodioritas y granitos de hornblenda y biotita; pórfidos dacíticos y riolíticos, asociados a mineralización tipo pórfido cuprífero y chimenes de brechas
- KTg**
Cretácico Superior-Terciario Inferior
Granodioritas, dioritas y pórfidos graníticos.
- Ksg**
Cretácico Superior (90-65 Ma)
Monzodioritas, granodioritas, gabros y dioritas de piroxeno, biotita y hornblenda; pórfidos andesíticos y dioríticos.
- Klbg**
Cretácico Inferior bajo (144-124 Ma)
Monzodioritas y dioritas de piroxeno, hornblenda y biotita, granodioritas y tonalitas.
- Jkg**
Jurásico-Cretácico (150-100 Ma)
Granodioritas, dioritas, monzodioritas y granitos; pórfidos dacíticos y andesíticos.
- Jsg**
Jurásico Medio-Superior (180-142 Ma)
Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda.
- Jig**
Jurásico Inferior (202-178 Ma)
Dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita.
- Cpg**
Carbonífero-Pérmico (328-235 Ma)
Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente muscovita.

Rocas Metamórficas

- Dc4**
Devónico-Carbonífero
Metaareniscas, filitas y, en menor proporción mármoles, cherts, metabasaltos y metaconglomerados; metaturbiditas con facies de "mélange".
- pCO4**
Precámbrico-Ordovícico
Esquistos micáceos, gneises, migmatitas y, en menor proporción, anfibolitas, ortoneises, cuarcitas y filitas con protolitos de edades y de metamorfismo del Cámbrico-Ordovícico.

Simbología

- | | | | |
|---|------------------|---|------------------|
|  | Nitratos |  | Falla observada |
|  | Río |  | Falla inferida |
|  | Carretera |  | Capital Regional |
|  | Camino principal |  | Ciudad o Pueblo |

Figura 2.2: Leyenda y Simbología Geología Regional.

b) Depósitos aluviales y coluviales distribuidos de forma discordante sobre la Formación La Negra y al oeste del escarpe costero, corresponden a gravas, areniscas y arcillas no consolidadas destacándose la presencia de abanicos aluviales. En base a relaciones de contacto se le asigna una edad mínima Pleistocena (Ferraris, 1978).

2.2. Marco Estructural

El distrito minero Mantos de la Luna se encuentra emplazado sobre el Sistema de Fallas de Atacama (SFA), el cuál es el principal sistema estructural que controla la deformación de las rocas en la Cordillera de la Costa del Norte de Chile (Fig. 2.3). El SFA se constituye principalmente por fallas subparalelas de rumbo cercano a NS y manteos subverticales y ha sido dividido en tres segmentos curvos, cóncavos hacia el W los cuales son de norte a sur: Salar del Carmen, Paposo y El Salado-Vallenar (Charrier et al., 2007).

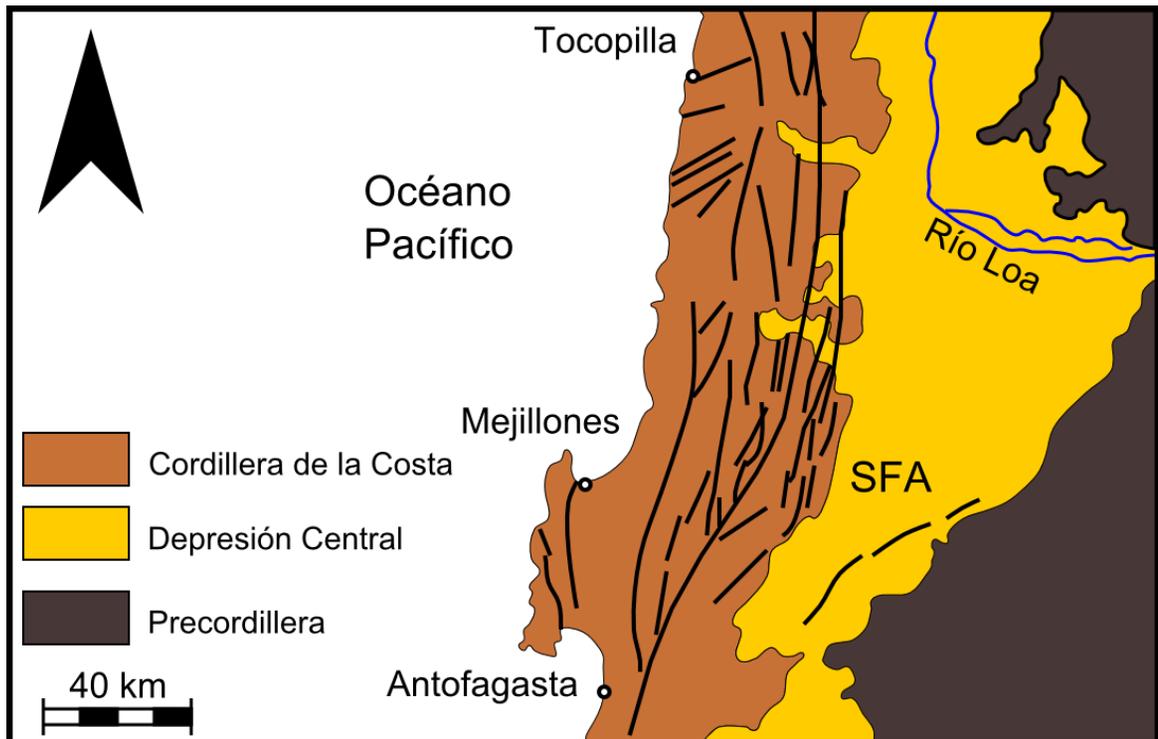


Figura 2.3: Mapa estructural de la Cordillera de la Costa.
Modificado de Cembrano et. Al., 2007.

La zona de estudio se enmarca dentro del segmento Salar del Carmen, el cual abarca desde la ciudad de Antofagasta hasta Iquique presentando tres ramas principales de orientación NS comprendidas entre los 22°00'S y 22°30', estas fallas se encuentran acompañadas por un conjunto de estructuras ramificadas de orientación NE a NEE configurando así un arreglo geométrico tipo duplex transcurrente. Este grupo de fallas es el principal causante de la deformación observada a nivel regional y en la zona de estudio.

El movimiento de estas fallas al interior del segmento Salar del Carmen ha sido descrito como sinistral con deformación frágil y dúctil durante el Jurásico Medio al Jurásico Superior temprano. A la vez que se reconocen eventos de régimen extensional durante el Jurásico Superior Tardío lo cual se ha asociado al emplazamiento de intrusivos y a la generación de fallas normales durante este mismo período (Scheuber y González, 1999).

2.3. Geología del Distrito Minero Mantos de la Luna

2.3.1. Características del Depósito

El yacimiento cuprífero Mantos de la Luna ha sido catalogado como un depósito del tipo estratoligado perteneciente a la Franja Metalogénica de la Cordillera de la Costa del Norte de Chile (Boric et al., 1990), el cual presenta reservas medidas de 40,5 Mton de 1,39% Cu más reservas inferidas de 6 Mton con 1.4% Cu (Maksaev et al., 2007).

2.3.2. Rocas Estratificadas de la Formación La Negra

Las rocas estratificadas al interior del distrito minero Mantos de la Luna pertenecen a la Formación La Negra y consisten en su totalidad en lavas andesíticas de color rojo oscuro a pardo, con una amplia variedad textural y la orientación de los estratos presenta un rumbo aproximado a NS con manteo alrededor de 25° a 30° E (Leiva, 2010). Se caracterizan al menos cuatro tipos litológicos de lavas, siendo estas las siguientes:

Brecha Andesítica

Son producto del transporte de fragmentos de la colada subyacente por acción de coladas de lava. Corresponden a rocas volcánicas andesíticas con bloques de la misma composición, y se caracterizan por presentar alteración selectiva y penetrativa de hematita y clorita en la masa fundamental obliterando así la textura primaria de la roca. Las brechas pueden contener parte de la mineralización de mena en pátinas, vetillas o bien cavidades irregulares (Leiva, 2010).

Andesita Afanítica

Corresponden a rocas volcánicas andesíticas con desarrollo de cristales de plagioclasas no mayores a 1 mm en tamaño, a su vez son poco abundantes dentro del distrito minero. Esta litología raramente presenta minerales de alteración y/o mineralización debido a su escaso desarrollo de estructuras que permitan el ingreso de fluidos hacia el interior de la roca. Los minerales de alteración predominantes aquí son: clorita, epidota y hematita diseminados únicamente en la masa fundamental (Leiva, 2010).

Andesita Porfírica

Corresponden a rocas volcánicas andesíticas con desarrollo de cristales tabulares de plagioclasas mayores a 1 mm, destacándose niveles con cristales mayores a 5 mm y 15 mm. Se presenta de color rojo oscuro producto de alteración diseminada en la masa fundamenta debido a la presencia de hematita, clorita y epidota, además de la presencia de vetillas de cuarzo, calcita y/o yeso. La mineralización aquí observada corresponde a oxidados de cobre en vetillas y patinas (Leiva, 2010).

Andesita Porfírica Amigdaloidal

Se consideran aquí las andesitas porfíricas caracterizadas por la presencia de amígdalas, las cuales por lo general sobrepasan los 10 mm de largo y se encuentran rellenas por cuarzo, calcita, hematita, clorita, epidota y oxidados de cobre. Las

amígdalas rellenas presentan formas esferoidales, irregulares y elipsoidales, en donde el eje mayor de estas últimas coincide con la dirección del flujo volcánico. Se reconocen por su color rojo oscuro a pardo producto de alteración a minerales de hematita y clorita diseminadas en la masa fundamental y por la presencia de amígdalas rellenas, a lo cual se suma en ocasiones un vetilleo similar a la litología de Andesita Porfírica. Este tipo de rocas es el que alberga la mayor parte de la mineralización de cobre la cual suele darse a menudo al interior de las amígdalas en forma de crisocola y atacamita formando mantos de amplia extensión producto de la alta permeabilidad de la roca frente a soluciones mineralizadoras (Leiva, 2010).

2.3.3. Unidades Intrusivas

Batolito de la Costa

Corresponde a la casi totalidad de los cuerpos intrusivos, que instruyen a la Formación La Negra y se encuentran distribuidos en la zona de estudio (Fig. 2.1 y 2.4). La composición principal es granodiorítica con leves variaciones menores de dioritas y monzodioritas (Leiva, 2010). Por extensión, ubicación y litología, estos cuerpos intrusivos se relacionan a la Unidad del Batolito Costero (Parada et al., 2007).

Diques Granodioríticos

Se denomina así a los cuerpos intrusivos granodioríticos de color rojizo que cortan a las secuencias estratificadas y al Batolito de la Costa con rumbos N60°E y N10°W y manteos variables desde 55°E a subverticales (Leiva, 2010).

Diques Dioríticos

Corresponden a cuerpos intrusivos dioríticos con espesores de 1 a 3 m y con rumbo preferencial NS acompañado de manteos de 75° a 80°W. En ocasiones albergan parte de la mineralización de cobre, comúnmente en vetillas y pátinas de minerales oxidados de cobre (Leiva, 2010).

Sill Andarivel

Se describe como un cuerpo intrusivo diorítico, de color rosado a pardo producto de alteración supérgena (limonitas), levemente concordante a discordante con la estratificación de las rocas de la Formación La Negra (Fig. 2.4). Presenta rumbo N15°W a N15°E y manto aproximado a 30°E. Su espesor estimado es de 10 m (Leiva, 2010).

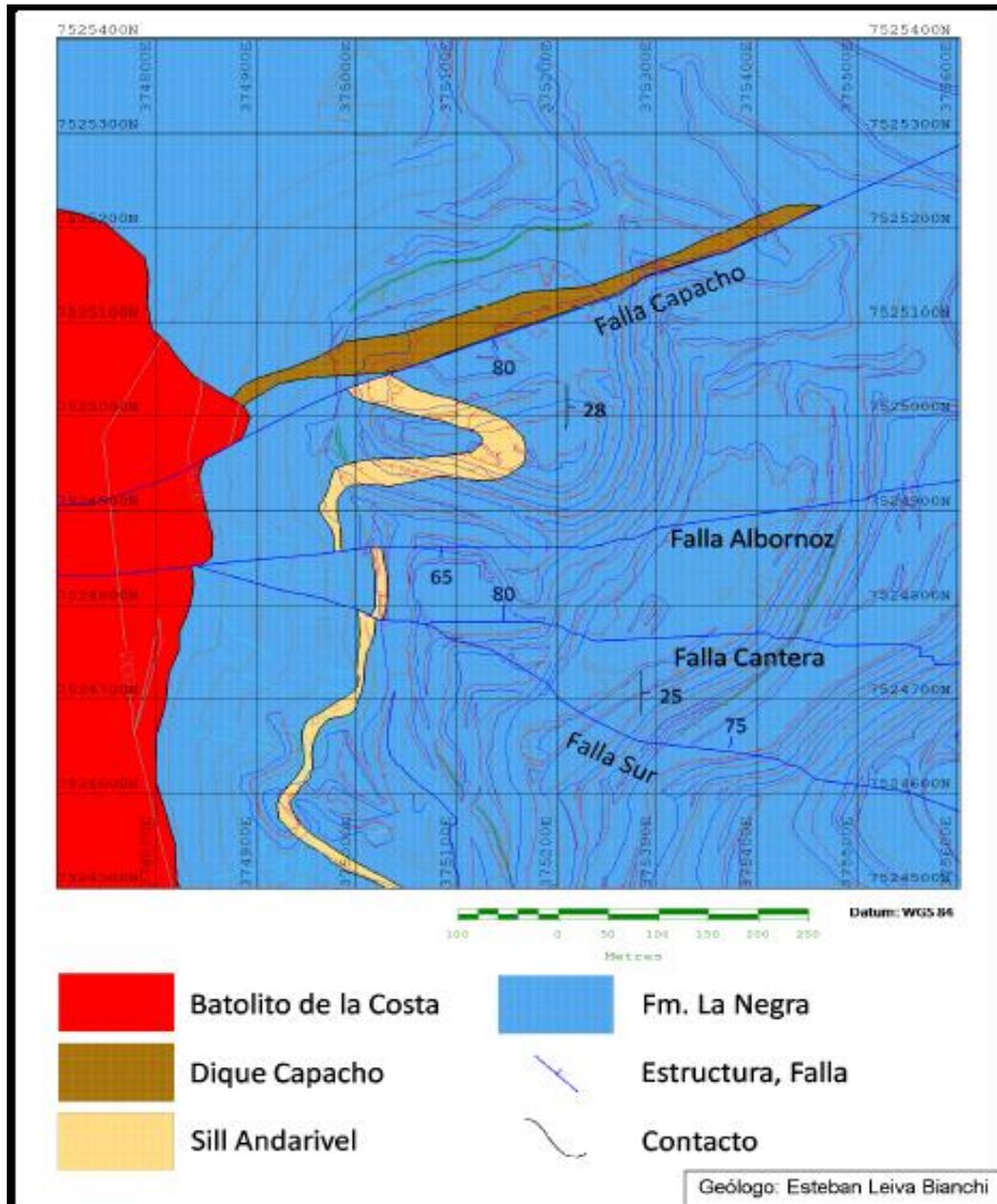


Figura 2.4: Mapa geológico del distrito Minero Mantos de la Luna. Extracto Memoria de Título Leiva, 2010.

2.3.4. Estructuras Mayores

Al interior del yacimiento Mantos de la Luna se reconocen cuatro fallas principales, las cuales de norte a sur son las siguientes:

Falla Capacho

Corresponde a una falla de orientación N80°E con manteo aproximado de 75-80°S. Presenta un ancho variable de 1 a 3 m, y una longitud observada de 4 km (Fig. 2.4) (Leiva, 2010).

La zona de falla esta caracterizada por el desarrollo de una brecha de falla con matriz de arcillas y fragmentos de rocas volcánicas. Adyacente a esta estructura se destaca la presencia de vetillas de yeso unidireccionales y paralelas a la falla (Leiva, 2010). La falla presenta un rol importante en la distribución de los cuerpos de mena cortándolos y desplazándolos

Falla Albornoz

Corresponde a una falla de rumbo N65°E y manteo 63°S, con espesor variable de 0,8 a 4 m y desarrollo de brecha de falla con fragmentos de rocas volcánicas cementada por arcillas blancas (Leiva, 2010). Se reconocen movimientos del tipo sinestral sin presencia de desplazamiento verticales, los cuales han desplazado horizontalmente en 140 m aproximadamente a los cuerpos vetiformes (Leiva, 2010). Esta falla juega un rol importante en la distribución de la mineralización cortando y desplazando a cuerpos mantiformes y vetiformes. No se observan desarrollo de vetillas de yeso al interior o adyacente a la falla.

Falla Cantera

Se identifica como una falla de rumbo variable N (80-95) °E con manteo 60-70°N. Presenta un espesor aproximado de 4 m caracterizado por una brecha de falla con matriz de salbanda y fragmentos de rocas volcánicas. La falla Cantera produce desplazamientos de tipo sinistral en los cuerpos vetiformes de aproximadamente 40 m, no detectándose en estos desplazamientos verticales (Leiva, 2010). En la zona de falla se aprecia la presencia de yeso en vetillas delgadas y pátinas con abundancia no mayor al 2% de roca total (Leiva, 2010).

Falla Sur

Corresponde a una falla con traza reconocida de 3 km, rumbo variable de N (70-90) °W y manteos 70-85°NNW. Presenta un espesor observado variable de 3 a 5 m de brecha de falla con matriz de salbanda, arcillas blancas y fragmentos de rocas volcánicas (Leiva, 2010).

En sectores adyacentes a la brecha de falla se han observado vetillas de yeso asociada por lo general a mineralización de mena, en particular atacamita (Leiva, 2010).

2.3.5. Mineralización

En base a la geometría de los cuerpos mineralizados, Mantos de la Luna se considera un yacimiento de cuerpos vetiformes, mantiformes y bolsonadas de cobre (Leiva, 2010), cuya hipótesis de origen mas aceptada corresponde a una génesis hidrotermal epigenética (Definis y Bello, 2000).

Entre los cuerpos mineralizados al interior del yacimiento se encuentran cuatro vetas tabulares subparalelas de orientación N35°W a NS (depende de la posición de la veta) con espesores que varían entre los 10 a 25 m y longitudes verticales de hasta 190 m, los cuales corresponden a los cuerpos de mayor ley al interior del yacimiento presentando crisocola, atacamita y calcosina en menor medida. Los mantos corresponden a cuerpos tabulares concordantes a la estratificación (N10°E/30°E) con potencias variables comprendidas entre 10 a 25 m presentando mineralización de crisocola y atacamita. Finalmente las bolsonadas de cobre se emplazan en zonas altamente permeables, tales como las andesitas porfíricas amigdaloidales o zonas de fracturamiento intenso (Leiva, 2010).

La mineralogía de mena presente en el yacimiento está conformada principalmente por mineralización de origen supérgeno como crisocola, atacamita y calcosina; de origen hipógeno como bornita, calcopirita, pirita, hematita, especularita y trazas de magnetita. La presencia de estos minerales se restringe a vetillas, amígdalas y diseminaciones locales. En base a la abundancia y características de las especies minerales, Mantos de la Luna es considerado principalmente como un yacimiento de oxidados de cobre con gran desarrollo de la mineralización supérgena y con escaso desarrollo de perfil de mineralización hipógena, en donde esta última se encuentra restringida a niveles profundos del yacimiento (Leiva, 2010).

Para comprender mejor la mineralización del depósito véase las figuras 2.5 a 2.9.

2.3.6. Alteración

Los principales minerales de alteración presentes en el yacimiento corresponden a los siguientes minerales de alteración hipógena: cuarzo, feldespatos, albita, sericita, carbonatos; calcita y menor siderita, hematita, magnetita, clorita y epidota; y alteración supérgena consistente en yeso, arcillas y limonita (Leiva, 2010).

Leiva (2010) describe dos variedades de cuarzo al interior del yacimiento: el primero como un una masa criptocristalina amorfa, posiblemente ópalo, y el segundo como cristales euhedrales a subhedrales, sin embargo ambos tipos estarían presentes en vetillas rectas e irregulares cuyo espesor no supera los 4 mm, además es posible encontrarlos en amígdalas y cavidades irregulares, y muy ocasionalmente en vetas mayores a 5 cm de espesor. El cuarzo de alteración estaría asociado frecuentemente a la presencia de carbonatos y/o hematitas.

Los feldespatos se encontrarían generalmente como masas cristalinas de color rosado diseminadas al interior de las rocas y presentando distribución acotada en el yacimiento, y comúnmente asociada a cuerpos con mineralización hipógena, principalmente bornita (Leiva, 2010).

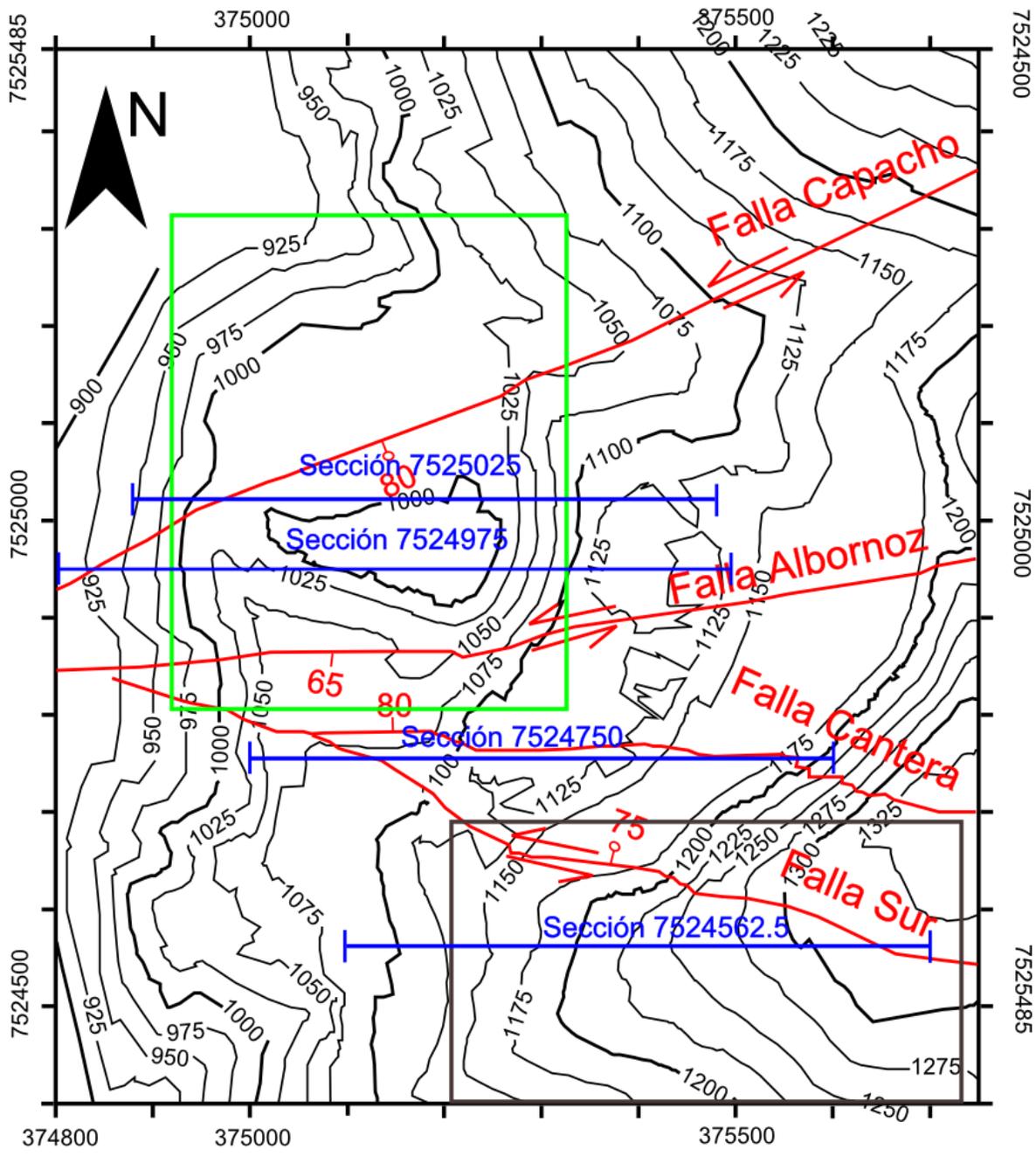
La Albita y sericita son perceptibles a nivel microscópico y se encuentran como alteración de plagioclasas de las rocas volcánicas con una presencia no mayor al 20% de roca total, sin embargo la abundancia de estas especies se intensifican en proximidades a cuerpos vetiformes llegando a componer un 40% de roca total (Leiva, 2010).

Leiva (2010) describe dos tipos de carbonatos: calcita y siderita, el primero presente en vetillas irregulares y en amígdalas, presentando hábito cristalino en ambas estructuras, mientras que el segundo es considerado poco frecuente y asociado a vetillas con presencia de cuarzo con hábito cristalino.

Se describen la existencia de minerales oxidados de hierro: hematita y magnetita,

la primera se encuentra caracterizada por su alta penetración de manera diseminada al interior de las lavas de la Formación La Negra, además suele encontrarse en vetillas irregulares y rectas, pátinas y amígdalas con un hábito masivo, siendo poco común encontrar hematita cristalina. En las estructuras de vetillas y amígdalas, la hematita se encuentra asociada a cuarzo. Por otro lado la magnetita se encuentra diseminada al interior de cuerpos intrusivos tales como diques y sills (Leiva, 2010).

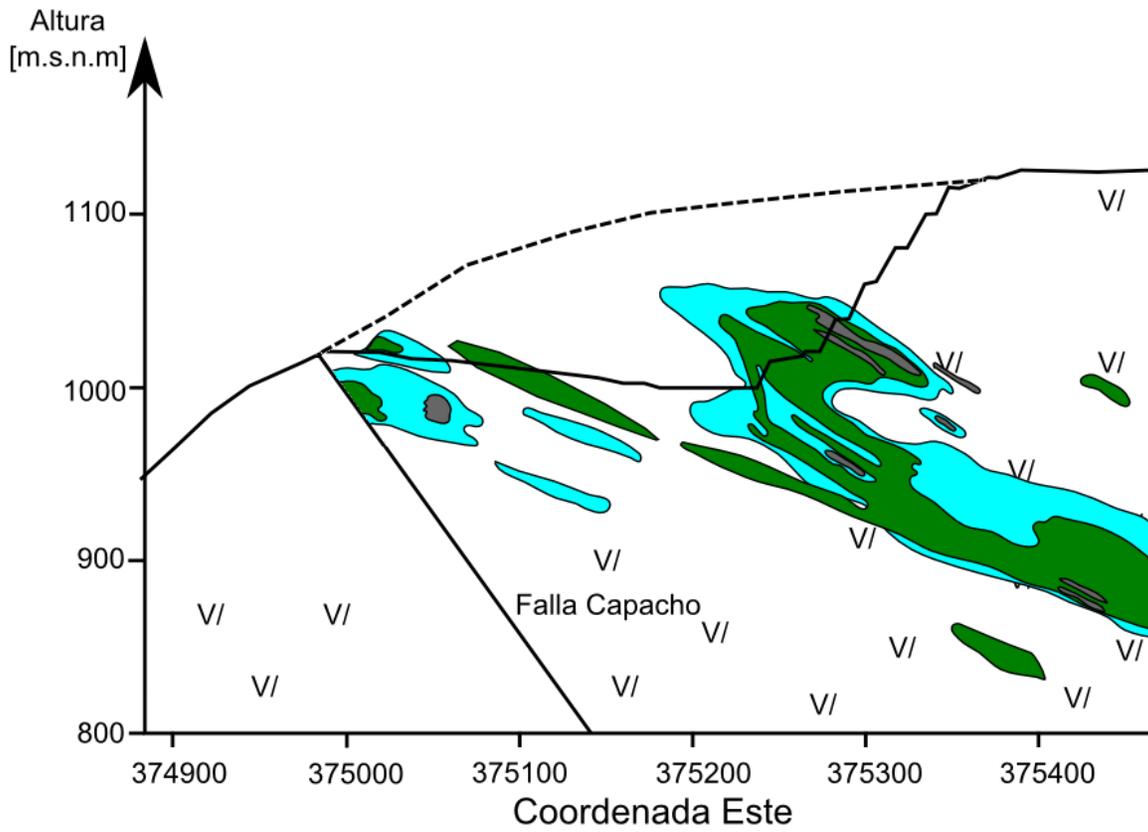
En cuanto a silicatos ferromagnesianos de alteración se describen la ocurrencia de clorita y epidota. La clorita se encuentra generalmente diseminada al interior de la masa fundamental de las rocas volcánicas, y en ocasiones en los bordes de amígdalas y halos de vetillas. Se reconoce por su coloración verde oscuro característico al interior de las lavas. Los minerales de epidota aparecen como cúmulos de cristales diseminados en la masa fundamental. En gran parte de los casos, los cúmulos de epidota se asocian a clorita diseminada (Leiva, 2010).



Simbología

- | | | | |
|---|-------------------------|---|--------------------|
|  | Zona de Estudio |  | Principales Fallas |
|  | Zona de Producción Mina |  | Curvas de Nivel |
| | |  | Secciones |

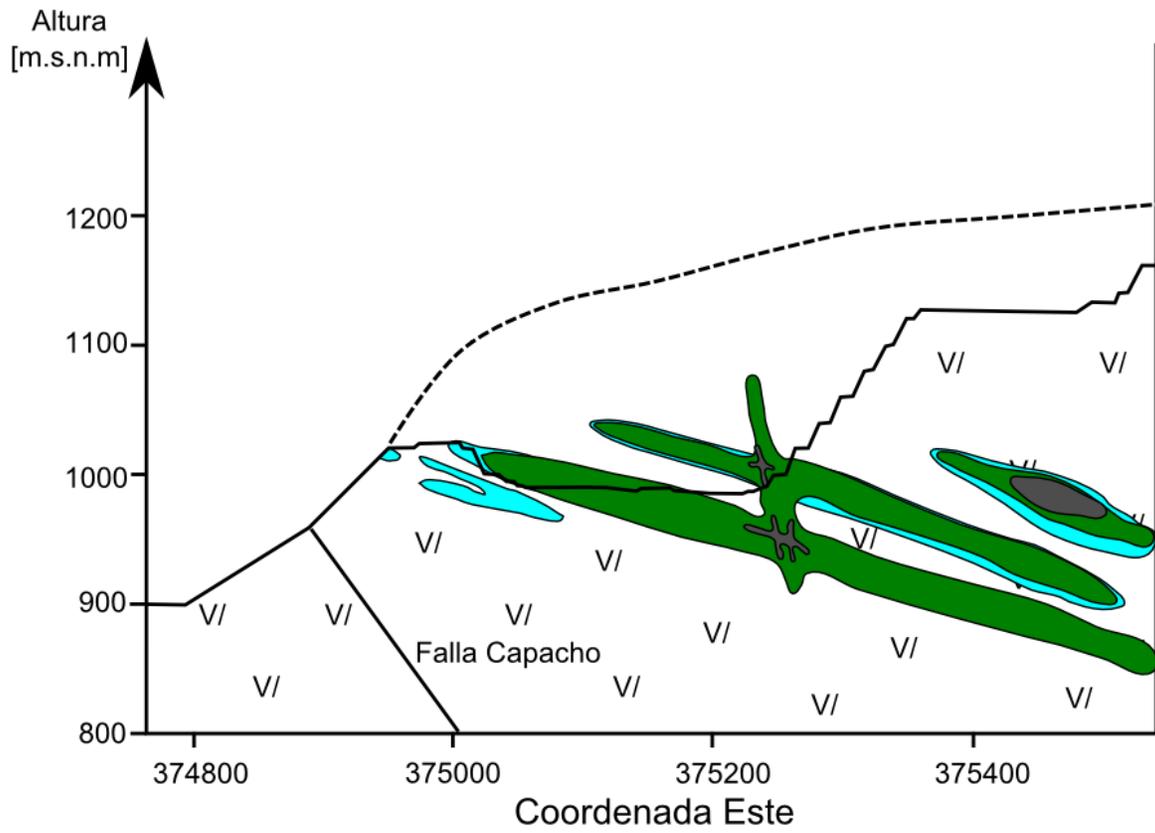
Figura 2.5: Mapa de mina.
Modificado de Leiva, 2010.



Simbología

VI VI	Andesita Porfídica		Crisocola y Atacamita
	Topografía		Crisocola
	Superficie original		Crisocola-Atacamita y Calcosina

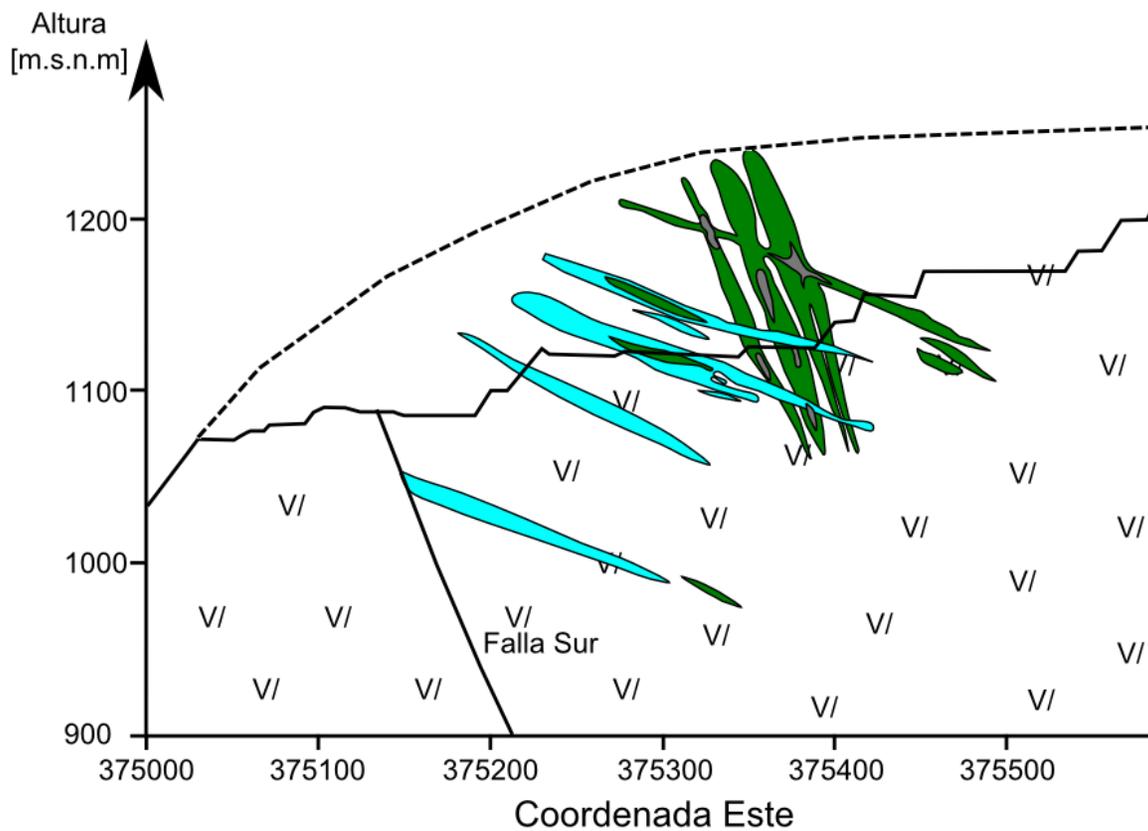
Figura 2.6: Perfil de mineralización de la Sección 7525025N.
Modificado de Leiva, 2010.



Simbología

 Andesita Porfídica	 Crisocola y Atacamita
 Topografía	 Crisocola
 Superficie original	 Crisocola-Atacamita y Calcosina

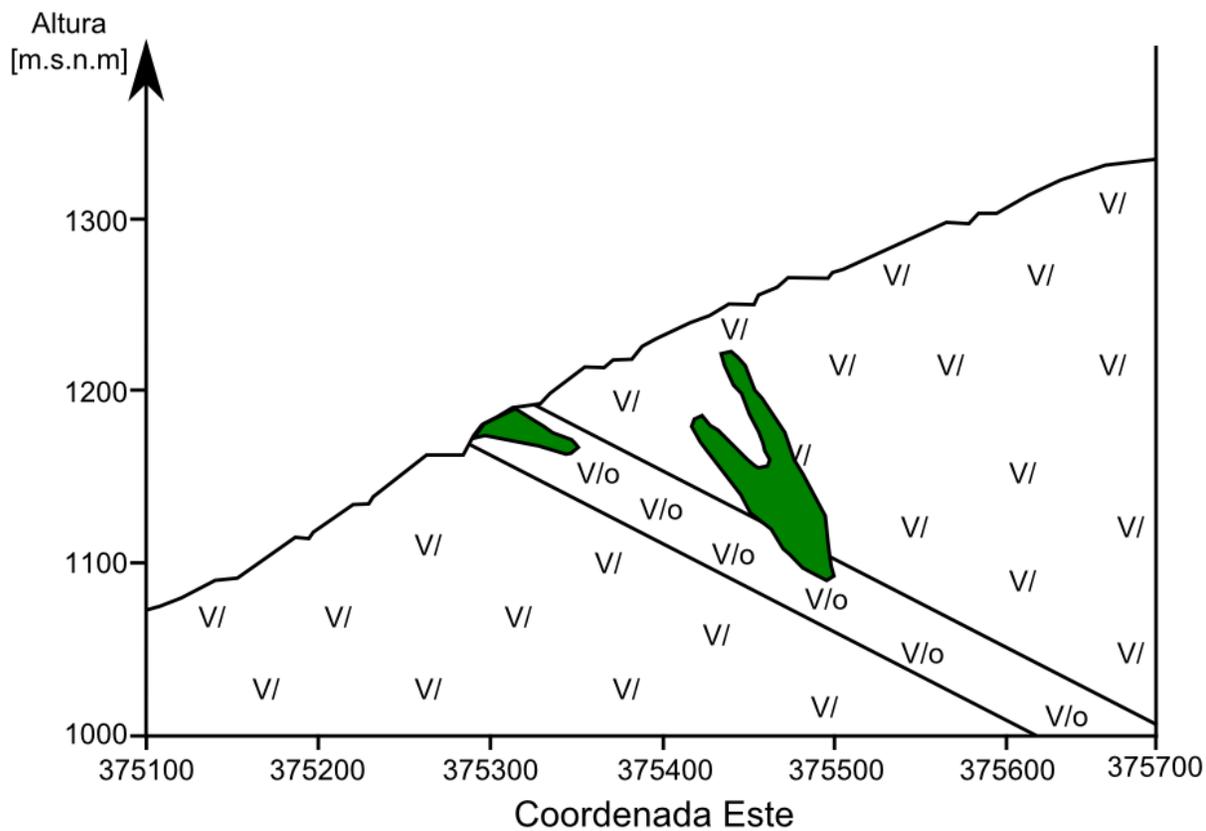
Figura 2.7: Perfil de mineralización de la Sección 7524975N.
Modificado de Leiva, 2010.



Simbología

	Andesita Porfídica		Crisocola y Atacamita
	Topografía		Crisocola
	Superficie original		Crisocola-Atacamita y Calcosina

Figura 2.8: Perfil de mineralización de la Sección 7524750N.
Modificado de Leiva, 2010.



Simbología

	Andesita Porfídica		Crisocola y Atacamita
	And. Porfídica Amigdaloidal		Topografía

Figura 2.9: Perfil de mineralización de la Sección 7524562N.
Modificado de Leiva, 2010.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

3.1. Metodología de Muestreo

Se definieron puntos de muestreo al interior de la zona sur del yacimiento Mantos de la Luna con la intención de generar un perfil de mineralización de sentido NW-SE (Fig. 3.1), el cual sería contrastado con las concentraciones anómalas de elementos Los puntos de muestreo debían contener principalmente arcillas y/o yesos en vetillas aflorantes en superficie (Fig. 3.2).

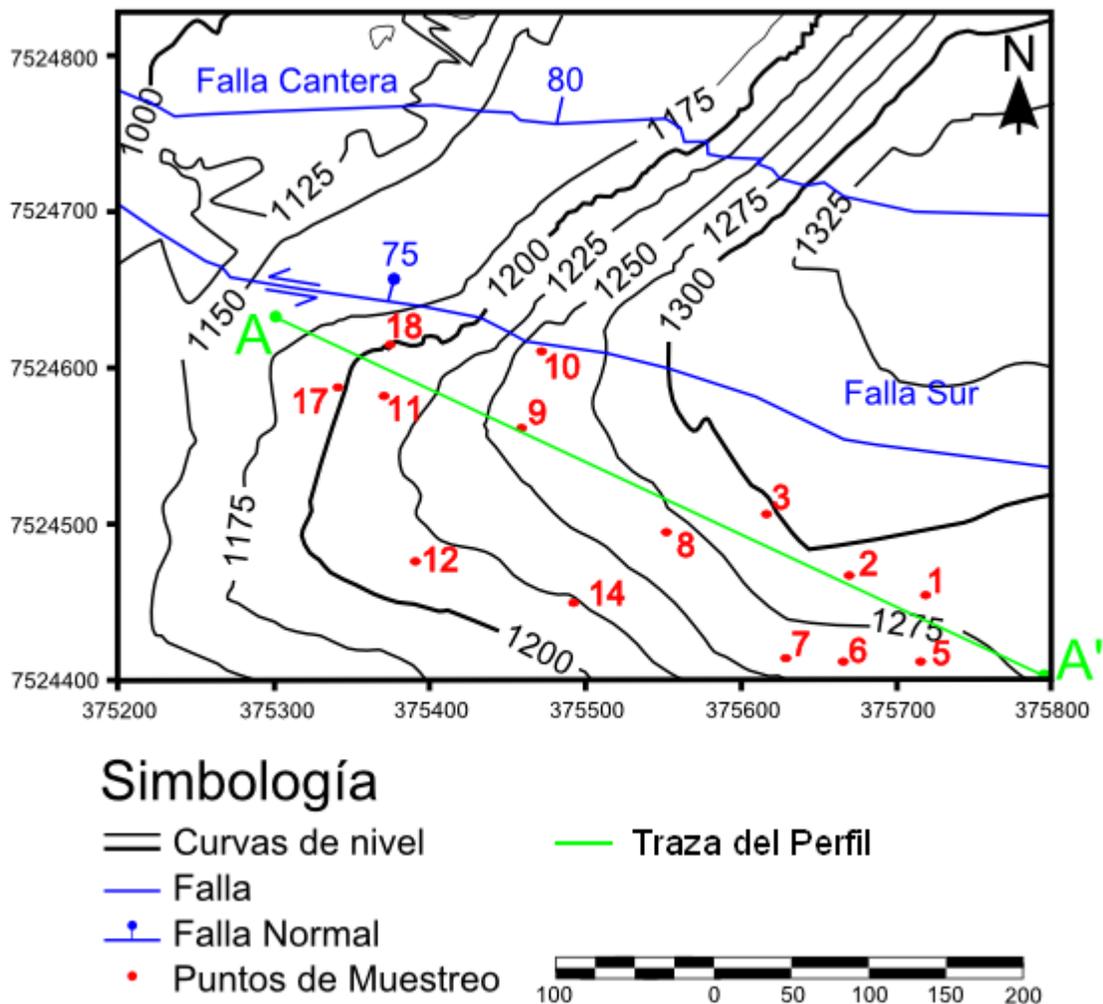


Figura 3.1: Puntos de muestreo y traza de perfil a trabajar.

La extracción de las muestra se realizó golpeando con martillo las vetillas de yeso y/o arcillas expuestas en superficie, de este modo fueron obtenidas muestras inmediatas de minerales tamaño polvo y muestras de rocas con vetillas. Los minerales de mayor dureza fueron extraídos de las vetillas utilizando una herramienta multipropósito MINI GRINDER (**Anexo A**)

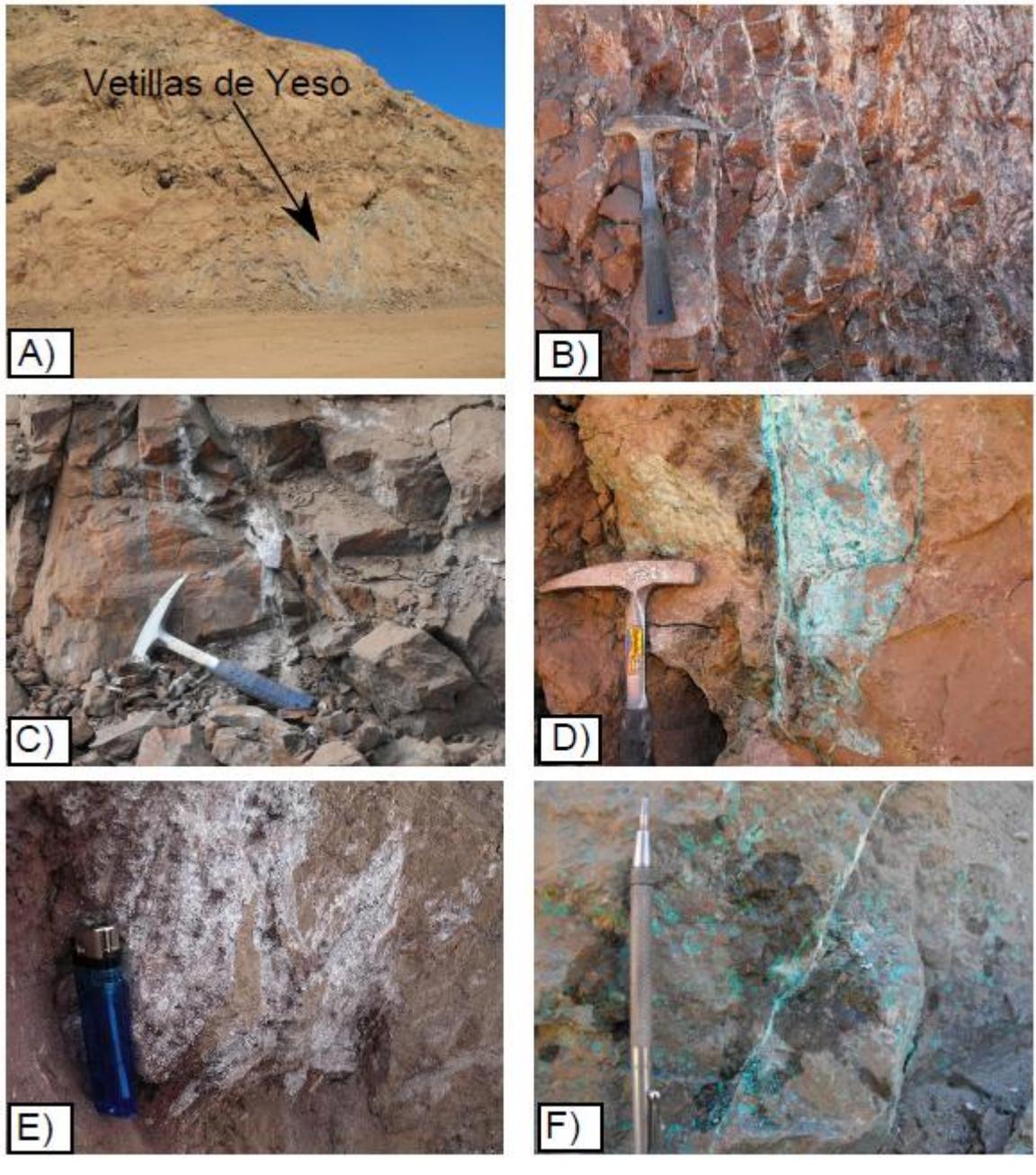


Figura 3.2: *Vetillas de muestreo en superficie. A),B),C) y E) Vetillas de Yeso, D) Vetillas de yeso con presencia de crisocola, F) Vetilla de yeso cortando amígdalas rellenas de crisocola.*

3.2. Metodología de Análisis Químicos y Físicos

A continuación se procede a describir las metodologías a través de las cuales se realizaron los diversos análisis geoquímicos contenidos en este trabajo. Para este propósito fueron necesarios al menos 3 gramos de muestra para análisis químicos y entre 0.5 a 1 gramos de muestra molida bajo malla 200 para análisis físicos.

Para los análisis químicos se realizó espectrometría por plasma acoplado inductivamente por espectroscopía de emisión atómica (ICP-AES) mediante un ICP-AES modelo 13300B Perkin Helmer. Para los análisis de elementos mayores, elementos menores y elementos trazas se ocupó el Standard BHVO2 del US. Geological Survey. Para la medición de tierras raras se utilizó el Standard QL01 de la Geostandards Newsletter (K. Govindaraju, 1994). La exactitud de las mediciones se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 3.1: *Exactitud de las mediciones geoquímicas realizadas.*

Elemento	Exactitud [%]	Elemento	Exactitud [%]
SiO₂	0,1	La	1,4
Al₂O₃	0,7	Ce	8,5
TiO₂	1,6	Nd	7,0
∑Fe₂O₃	2,1	Sm	7,0
CaSO₄	0,2	Eu	0,5
MgO	2,4	Gd	4,5
Na₂O	4,2	Dy	4,1
K₂O	5,1	Ho	8,4
P₂O₅	2,5	Er	2,9
MnO	4,1	Yb	1,4
		Lu	6,2
Zn	3,2		
Co	7,1	Zr	6,5
Ni	5,6	Cr	0,2
Ba	4,6	Y	9,8
Sc	5,5		
V	2,8		
Cu	8,5		
Sr	2,7		

Se realizó una identificación cualitativa de los minerales presentes en cada muestra. Para realizar las mediciones se utilizó un difractómetro Siemens modelo D5000 para polvo cristalino de geometría Bragg-brentano con radiación de Cu de 1.5406 Å, perteneciente al Departamento de Física de la Universidad de Chile. Las medidas fueron realizadas a una velocidad de barrido de 0.02°/s con una potencia de tubo de 40kV y 30 mA. Para la interpretación de los difractogramas se utilizó el software EVA versión 11 Suite Diffract Plus. El resultado de cada difractograma se presenta en el **Anexo B** y en la Tabla 4.1 del siguiente capítulo.

4. Resultados

4.1. Resultados de Difracción de Rayos X

A través del análisis mediante difracción de rayos X, se ha podido identificar los siguientes minerales asociados a cada muestra.

Tabla 4.1: *Resumen de los minerales identificados en cada muestra.*

Muestra	Cuarzo	Yeso	Anhidrita	Calcita	Caolinita	Haloisita	Hematita
A01	x	x	x				
A02	x	x					
A03	x	x					
A05	x			x	x		
A06	x	x	x				
A07	x	x			x		
A08	x	x			x		
A09	x	x	x				
A10	x			x	x		
A11	x			x	x		
A12		x					
A14		x		x			
A17	x				x	x	x
A18	x				x	x	x

4.2. Resultados Químicos

Los diferentes resultados químicos obtenidos se resumen en las siguientes tablas.

Tabla 4.2: Resultados de Análisis por Elementos Mayores mediante ICP-AES. El contenido de calcio es expresado mediante sulfato de calcio debido a su abundancia en algunas vetillas. * = Concentración expresada como CaO, PPC = pérdida por calcinación.

%	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	ΣFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaSO ₄	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PPC	TOTAL
AO1	5,9	0,09	1,36	1,41	6	0,31	71,47	0,46	0,21	0,03	17,1	98,35
AO2	0,57	0,01	0,03	0,13	1	0,02	71,86	0,29	0,04	<0,02	25,9	98,86
AO3	26,84	0,07	1,03	0,6	4	10,36	33,5	1,39	0,24	0,02	24,3	98,35
AO5	43,8	0,1	18,5	0,62	18	3,66	10,54	1,26	0,5	<0,02	22,4	101,3
AO6	3,78	0,07	0,8	0,58	5	0,15	71,86	0,41	0,24	0,02	20,1	98,01
AO7	41	0,5	25,7	3,03	23	0,21	9,03	0,75	1,3	0,06	16,8	98,4
AO8	44,9	0,23	25,7	1,36	10	0,17	7,74	0,74	0,49	0,04	18,6	99,98
AO9	16,3	0,08	10,3	0,87	29	0,16	58,02	0,84	0,41	0,03	11,3	98,34
A10	39	0,23	22,45	3,13	92	0,25	12,6*	0,3	0,14	0,08	20,1	85,77
A11	45,19	0,2	28,99	0,9	10	0,15	5,46	0,76	0,25	<0,02	17,2	99,11
A12	32,46	0,08	18,18	0,48	9	0,31	25,83	4,1	0,27	<0,02	16,4	98,12
A14	1,94	0,03	0,17	1,2	23	0,06	81,93	0,16	0,05	<0,02	23,8	109,37
A17	46,52	0,18	29,32	1,16	31	0,36	6,94	1,29	0,73	0,06	12,93	99,52
A18	40,08	0,28	28,09	1,92	41	0,19	14,54	0,2	0,39	0,09	15,46	101,28

Tabla 4.3: Resultados de Análisis por REE mediante ICP-AES. La muestra A02 no es presentada debido a problemas en su medición.

<i>ppm</i>	<i>La</i>	<i>Ce</i>	<i>Nd</i>	<i>Sm</i>	<i>Eu</i>	<i>Gd</i>	<i>Dy</i>	<i>Ho</i>	<i>Er</i>	<i>Yb</i>	<i>Lu</i>
A01	4,9	12	7,8	1,43	0,4	1,01	0,91	0,17	0,4	0,41	54
A03	1,9	4,4	2,7	0,45	0,16	0,49	0,58	0,12	0,29	0,29	0,05
A05	3	5,3	3,3	0,58	0,21	0,72	0,78	0,17	0,39	0,35	58
A06	2,1	4,8	4	0,53	0,17	0,54	0,61	0,14	0,3	0,3	48
A07	10	28	16	4,55	1,66	9,35	13,2	2,2	4,73	3,38	0,46
A08	4,5	10,2	7	1,26	0,27	1,29	1,65	0,37	0,96	0,91	0,14
A09	4,2	8,1	3,9	0,74	0,21	0,63	0,7	0,12	0,32	0,29	48
A10	13	28	14	2,5	0,61	1,81	1,7	0,33	0,72	0,63	98
A11	3,5	7,8	4,7	0,87	0,24	0,81	0,88	0,19	0,46	0,46	0,07
A12	2,4	4,7	1,8	0,24	0,1	0,26	0,3	0,06	0,14	0,14	24
A14	2,8	5,3	4,3	1,07	0,27	1,05	0,8	0,14	0,22	0,18	28
A17	5,6	12,8	7	1,18	0,27	0,96	0,93	0,18	0,46	0,43	69
A18	7	14,4	6,5	1	0,22	0,87	1,01	0,22	0,54	0,54	90

Tabla 4.4: Resultados de Análisis por Elementos Menores mediante ICP-AES.

ppm	Zn	Co	Ni	Ba	Cr	V	Cu	Sr	Zr
AO1	3,8	<2	<2	8,4	14	6,5	56	63	46
AO2	1,8	<2	<2	2,8	14	8,6	35	65	0,7
AO3	6,5	<2	<2	27	6	15	43	99	28
AO5	10	2,1	<2	45	12	19	368	13	59
AO6	1,6	<2	15	23	8	11	22	79	18
AO7	6,5	3,1	<2	46	5	13	19	11	241
AO8	44	<2	<2	24	2	15	18	11	62
AO9	10	3,8	<2	155	6	21	12	246	34
A10	9,3	6,1	<2	18	2	25	21	19	102
A11	14	<2	<2	35	4	31	282	13	66
A12	7,9	<2	<2	206	6	21	8000	46	31
A14	<2	<2	<2	4,4	11	13	47	155	5
A17	14	6	<2	67	3	55	245	13	62
A18	13	7,7	13	38	6	82	484	11	97

Tabla 4.5: Resultados de Aniones mediante Cromatógrafo Iónico. Solo se consideran el cloro y sulfato soluble

%	AO1	AO2	AO3	AO5	AO6	AO7	AO8	AO9	A10	A11	A12	A14	A17	A18
Cl-	0,07	0,03	1,85	1,61	0,19	0,3	0,42	0,59	0,06	0,23	0,36	0,07	1,21	0,02
SO4--	13,1	11,5	10,97	1,06	13,42	2,45	1,98	11,99	0,11	2,73	10,06	10,51	0,46	0,04

5. Discusiones

5.1. Generalidades

A partir de los resultados obtenidos de difracción de rayos X y la geoquímica propia de cada muestra, es necesario separar el muestreo en los siguientes dominios mineralógicos principales: yeso-dominante y arcilla-dominante (Tabla 5.1). El primer grupo se define por la presencia de yeso y concentraciones de CaSO_4 mayores 50%, mientras que el grupo arcilla-dominante se define por la presencia de caolinita y en donde la suma de SiO_2 y Al_2O_3 es mayor al 50%.

Tabla 5.1: Separación cualitativa del muestreo.

Yeso-dominante	Arcilla-dominante
A01	A05
A02	A07
A03	A08
A06	A10
A09	A11
A14	A12
	A17
	A18

Debido a que la presencia de yeso o caolinita puede estar asociada a diferentes orígenes y a su vez contener elementos químicos en distintas proporciones, es prioridad estudiar los rangos composicionales geoquímicos de elementos mayores, menores y tierras raras de las muestras en forma separada para cada dominio. La información

geoquímica para cada dominio puede verse en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Geoquímica resumida de elementos mayores, menores y tierras raras. PPC = Pérdida por calcinación.

	Yeso Dominantes				Arcilla Dominante			
	Min	Máx	Promedio	Desv. Estándar	Min	Máx	Promedio	Desv. Estándar
SiO₂	0,57	26,84	9,22	23	32,46	46,52	41,62	12,07
TiO₂	0,01	0,09	0,06	0	0,08	0,5	0,22	0,34
Al₂O₃	0,03	10,3	2,28	8,86	18,18	29,32	24,62	11,80
ΣFe₂O₃	0,13	1,41	0,8	1,03	0,48	3,13	1,58	2,73
MnO	0	0,03	0,01	0	0,01	0,09	0,03	0,1
MgO	0,02	10,36	1,84	9,33	0,15	3,66	0,66	3,21
CaSO₄	33,5	81,93	64,77	38,25	5,46	25,83	11,44	17,11
Na₂O	0,16	1,39	0,59	1,01	0,2	4,1	1,18	3,29
K₂O	0,04	0,41	0,2	0,3	0,14	1,3	0,51	0,98
P₂O₅	0,02	0,03	0,03	0	0,04	0,09	0,07	0
PPC	11,3	25,9	20,42	12,28	12,93	22,4	17,49	7,67
ppm								
Zn	1,6	10	4,7	7,07	6,5	44	14,8	32,03
Co	3,8	3,8	3,8	0	2,1	7,7	5	4,64
Ni	15	15	15	0	13	13	13	0
Ba	2,8	155	36,8	131	18	206	59,9	161,10
Cr	6	14	9,8	8,29	2	12	5	8,6
V	6,5	21	12,5	11,50	13	82	32,6	63,37
Cu	12	56	35,8	36,64	18	484	205,29	464,06
Sr	63	246	117,8	159,59	11	46	17,1	31,63
Zr	0,7	46	22	38,91	31	241	90	171,99
ΣREE	11,5	29,5	15	21,66	10,2	92,9	36,5	73,93

5.2. Elementos Mayores

A partir de la Tabla 5.2, se aprecia que las concentraciones de SiO_2 , Al_2O_3 y CaSO_4 varían en promedio bastante de un dominio a otro, lo cual evidentemente es producto de la clasificación por dominios mineralógicos.

En cuanto a pérdida por calcinación se observan contenidos cercanos al 20% en ambos dominios mineralógicos. Esto último se interpreta como pérdida de agua desde el interior de los minerales. Esta agua sería contenida en la estructura cristalina de yesos y/o retenida por las propiedades absorbentes de las arcillas.

Respecto a los restantes elementos mayores no se observan fuertes cambios de concentraciones entre uno y otro dominio, sin embargo, para comprender el comportamiento de éstos al interior de los distintos dominios mineralógicos es que se muestran los datos de correlación de Pearson para tanto elementos mayores y elementos menores al interior de los dominios: yeso-dominante (Tabla 5.3) y arcilla dominante (Tabla 5.4).

Con las matrices de Pearson es posible definir un coeficiente de correlación R mayor a 0.5 como significativo y R mayor a 0.8 como excelente (Townley et. al., 2000). Bajo este criterio se observa que al interior de las muestras yeso-dominante existen 23 pares de elementos con un factor de correlación excelente, sin embargo, ninguno de ellos incluye a los elementos Ca y sulfato soluble. Considerando que el Ca y el sulfato, tanto soluble como no, son los constituyentes mayoritarios al interior de este dominio mineralógico es permisible decir a priori que los yesos aquí muestreados no presentan preferencia por encapsular uno u otro elemento. Por último se observa que el trío Cl soluble, Na y Mg presenta un excelente R entre estos elementos, lo cual reflejaría la disposición de estos elementos a ser incorporados como sales al interior de los yesos, o a la presencia de halita.

Tabla 5.3: Matriz de Pearson para muestras del tipo yeso-dominante. En verde se señalan los coeficientes de correlación excelentes y en amarillo los significantes (Townley et. Al., 2006).

Elemento	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	ΣFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaSO ₄	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Zn	Ba	Cr	V	Cu	Sr	Zr	Cl-	SO ₄ --
SiO ₂	1,00																		
TiO ₂	0,48	1,00																	
Al ₂ O ₃	0,40	0,43	1,00																
ΣFe ₂ O ₃	-0,04	0,55	0,13	1,00															
MnO	0,09	0,10	0,71	0,46	1,00														
MgO	0,84	0,19	-0,15	-0,19	-0,31	1,00													
CaSO ₄	-0,96	-0,36	-0,25	0,26	0,16	-0,90	1,00												
Na ₂ O	0,99	0,47	0,33	-0,15	-0,06	0,87	-0,99	1,00											
K ₂ O	0,62	0,79	0,82	0,16	0,37	0,16	-0,51	0,60	1,00										
P ₂ O ₅	-0,23	0,84	0,61	0,82	0,62	-0,57	0,39	-0,32	0,44	1,00									
Zn	0,75	0,45	0,86	0,32	0,84	0,28	-0,59	0,68	0,81	0,45	1,00								
Ba	0,45	0,39	0,99	0,04	0,69	-0,08	-0,31	0,39	0,83	0,48	0,86	1,00							
Cr	-0,75	-0,36	-0,53	0,13	-0,37	-0,51	0,66	-0,71	-0,71	0,46	-0,64	1,00							
V	0,61	0,17	0,79	-0,04	0,73	0,23	-0,47	0,53	0,65	0,87	-0,63	-0,63	1,00						
Cu	-0,13	-0,02	-0,68	0,45	-0,37	0,22	0,11	-0,13	-0,58	0,07	-0,35	-0,75	0,60	1,00					
Sr	0,31	0,13	0,85	0,23	0,94	-0,13	-0,11	0,19	-0,55	0,45	0,89	0,86	-0,57	0,90	1,00				
Zr	0,49	0,96	0,45	0,56	0,08	0,19	-0,39	0,48	0,73	0,84	0,52	0,39	-0,22	0,12	-0,56	1,00			
Cl-	0,95	0,29	0,13	-0,19	-0,10	0,96	-0,97	0,40	0,96	-0,49	0,52	0,21	-0,70	0,48	-0,02	0,09	1,00		
SO ₄ --	-0,24	0,58	0,10	0,10	-0,29	-0,38	0,21	-0,16	0,41	0,17	-0,40	0,07	0,09	-0,34	-0,23	-0,30	0,49	-0,35	1,00

Tabla 5.4: Matriz de Pearson para muestras del tipo arcilla-dominante. En verde se señalan los coeficientes de correlación excelentes y en amarillo los significantes (Townley et. Al., 2006).

Elemento	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	ΣFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaSO ₄	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Zn	Co	Ba	Cr	V	Cu	Sr	Zr	Cl-	SO ₄ --
SiO ₂	1,00																			
TiO ₂	0,12	1,00																		
Al ₂ O ₃	0,61	0,46	1,00																	
ΣFe ₂ O ₃	-0,08	0,79	0,22	1,00																
MnO	-0,16	0,16	0,00	0,71	1,00															
MgO	0,18	-0,42	-0,57	-0,38	-0,15	1,00														
CaSO ₄	-0,96	-0,36	-0,66	-0,29	-0,10	-0,03	1,00													
Na ₂ O	-0,63	-0,53	-0,59	-0,59	-0,44	0,06	0,81	1,00												
K ₂ O	0,25	0,72	0,24	0,34	-0,26	-0,01	-0,33	-0,14	1,00											
P ₂ O ₅	-0,73	-0,01	-0,05	0,41	0,69	0,04	0,88	-0,66	-0,40	1,00										
Zn	0,42	-0,05	0,25	-0,17	-0,28	-0,18	-0,33	-0,22	-0,10	-0,70	1,00									
Co	-0,26	-0,03	0,67	0,22	0,53	-0,70	0,39	-0,61	-0,49	0,77	0,64	1,00								
Ba	-0,71	-0,44	-0,51	-0,49	-0,37	-0,07	0,88	-0,12	-0,12	-0,09	-0,31	-0,17	1,00							
Cr	-0,10	-0,31	-0,55	-0,42	-0,32	0,87	0,27	0,24	0,07	0,51	-0,40	-0,63	0,19	1,00						
V	0,10	-0,01	0,54	-0,01	0,22	-0,22	0,02	-0,28	-0,16	0,65	-0,13	-0,63	-0,11	-0,05	1,00					
Cu	-0,80	-0,47	-0,58	-0,46	-0,31	-0,09	0,92	-0,28	-0,28	0,61	-0,25	0,25	0,97	0,16	-0,15	1,00				
Sr	-0,84	-0,49	-0,63	-0,35	-0,11	-0,11	0,89	-0,37	-0,37	0,37	-0,30	0,16	0,92	0,07	-0,23	0,97	1,00			
Zr	0,01	0,95	0,23	0,79	0,19	-0,21	-0,27	-0,42	0,77	0,06	-0,28	-0,37	-0,34	-0,10	-0,16	-0,39	1,00			
Cl-	0,44	-0,45	-0,26	-0,52	-0,30	0,79	-0,22	-0,21	0,21	-0,49	-0,04	-0,58	0,04	0,58	-0,12	-0,10	-0,29	1,00		
SO ₄ --	-0,70	-0,33	-0,51	-0,45	-0,49	-0,15	0,79	-0,14	-0,14	-0,76	-0,15	-0,76	0,92	0,10	-0,38	0,94	-0,26	-0,14	-0,14	1,00

De la matriz de Pearson para el dominio arcilla-dominante se observa que existen 20 pares con coeficiente de correlación R excelente y ninguno de ellos presenta a los elementos Si y Al. Considerando esto último y que el dominio arcilla-dominante se caracteriza por la presencia de caolinita, se interpreta que este mineral en su formación no tiene preferencia por captar uno u otro elemento.

Para dirigir el estudio hacia la búsqueda de anomalías geoquímicas presentes en vetillas, es necesario conocer la composición geoquímica de las lavas de la Formación la Negra de la zona. Para esto se han considerado los datos de Palacios (1978), donde se aborda el estudio geoquímico de las lavas del Jurásico desde la ciudad de Tocopilla hasta Antofagasta. La información relevante y a considerar se resume en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Concentraciones geoquímicas de lavas de la Formación la Negra al norte del distrito minero Mantos de la Luna. Extracto de Palacios, 1978.

%	Min	Máx	Promedio	Desv. Estándar
SiO₂	59,6	64,2	61,9	10,58
TiO₂	0,07	1,22	0,65	0,66
Al₂O₃	15,89	16,06	15,98	0,01
ΣFe₂O₃	3,14	7,39	5,27	3
MnO	0,08	0,11	0,1	0
MgO	1,32	2,25	1,79	0,43
CaO	2,29	3,62	2,96	0,88
Na₂O	4,4	4,43	4,42	0
K₂O	3,62	4,11	3,87	0,12
P₂O₅	0,17	0,31	0,24	0,01
PPC	0,78	2,64	1,71	1,73
ppm				
Zn	100	107	103,5	4,95
Co	11	67	39	39,60
Ni	13	38	25,5	17,67
Ba	674	689	681,5	10,61
Cr	18	112	65	66,47
V	55	90	72,5	24,75
Cu	74	105	89,5	21,92
Sr	160	180	170	14,14
Zr	121	408	264,5	202,94
ΣREE			209,2	

5.3. Elementos Menores y Trazas

A partir de las concentraciones ya conocidas de las lavas de la Formación La Negra (Tabla 5.5), y las concentraciones de las muestras recolectadas para cada dominio mineralógico (Tabla 5.2), es posible contrastar los resultados de elementos menores y elementos traza. Para esto se han normalizado la geoquímica respectiva de ambos dominios mineralógicos respecto de las lavas de la zona, y el resultado de esto se observa en la siguiente figura. No se incluyen valores de elementos menores y trazas en aguas subterráneas debido la ausencia de estos datos.

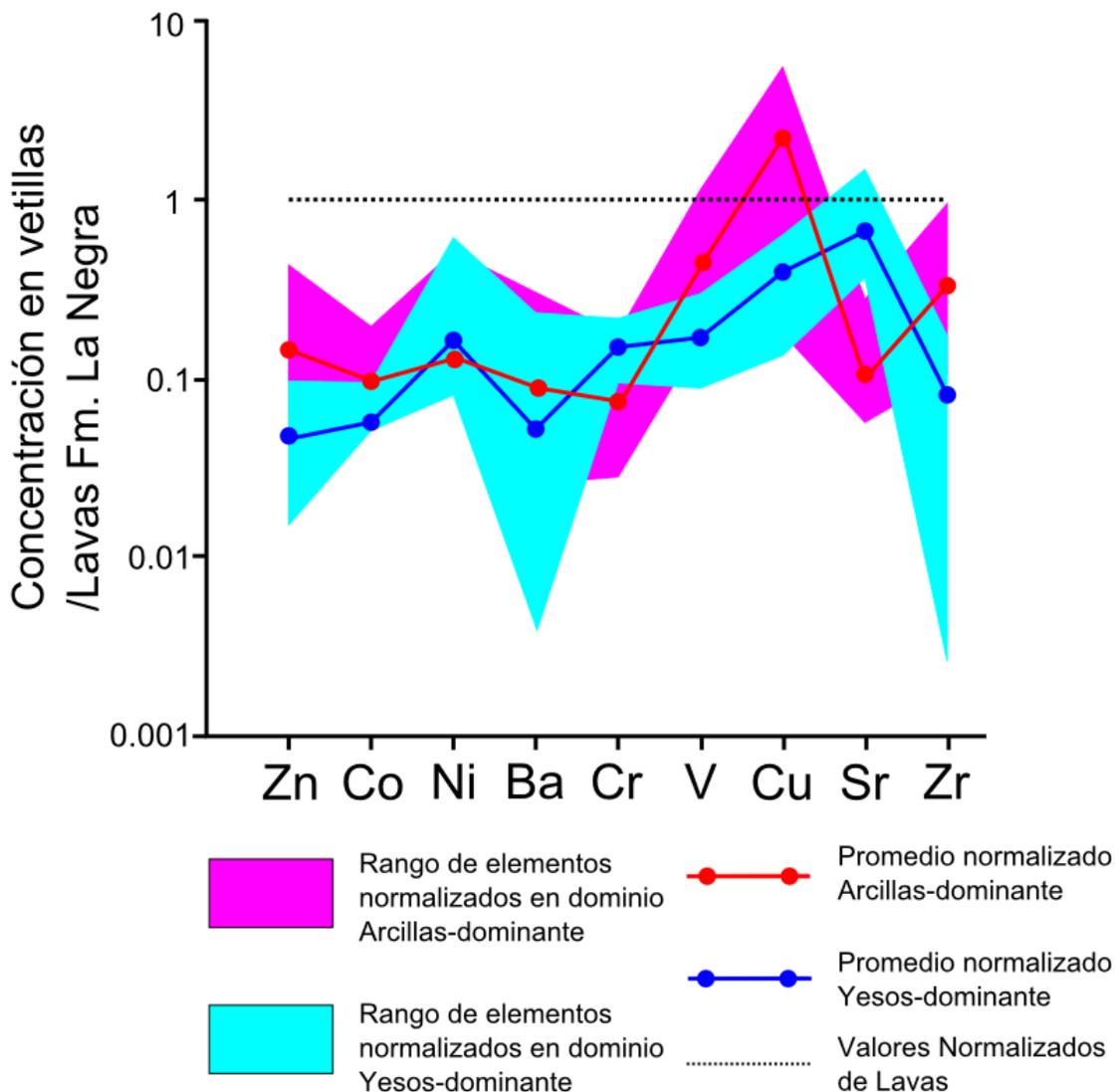


Figura 5.1: Valores Normalizados de elementos menores y traza analizados respecto a lavas de la Formación La Negra.

De la figura anterior se pueden obtener varias interpretaciones tales como:

- Las concentraciones promedio de Zn, Co, Ba, V, Cu y Zr en las muestras arcilla-dominante son mayores que en aquellas yeso-dominante, mientras esta última presenta concentraciones promedio mayores en Ni, Cr y Sr.
- Los rangos composicionales de cada elemento y para cada dominio coinciden con lo anteriormente descrito.
- Solamente el Cu contenido en el dominio arcilla-dominante es mayor que el contenido en las lavas de la Formación La negra, presentando concentraciones promedio de 205,29 ppm de Cu en vetillas rellenas de arcillas en contraste a los 89,5 ppm de las correspondientes lavas (Tablas 4.2 y 4.3).
- El resto de los elementos trazas y menores presentes en ambos dominios se encuentra empobrecido respecto de las rocas volcánicas aflorantes de la zona.
- Las diferencias composicionales de los elementos ya mencionados entre un dominio y otro puede tener su razón en función de: 1) La capacidad de los minerales yeso y arcilla por encapsular estos elementos, 2) el origen de los fluidos que generaron estos minerales y 3) eventos de lixiviación desfavorables para uno u otro dominio.

En base a todo lo anterior, se concluye que el Cu contenido en vetillas rellenas de yeso y arcillas puede servir como indicador de cuerpos mineralizados en el subsuelo.

5.4. Tierras Raras

Respecto a la sumatoria de tierras raras presentes en las muestras (Tabla 5.2) se puede inferir que los valores mínimos del total de tierras raras en ambos dominios no varían de manera significativa, sin embargo las concentraciones máximas varían hasta un 300%, los mayores valores de tierras raras ocurren en aquellas muestras pertenecientes al dominio arcilla-dominante.

La información relevante y resumida de la concentración de tierras raras para cada elemento y dominio mineralógico se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 5.6: *Geoquímica resumida de Tierras Raras respecto a cada dominio.*

ppm	Yeso-dominante				Arcilla-dominante			
	min	máx	promedio	desv. estándar	min	máx	promedio	desv. estándar
La	1,91	4,93	3,19	6,84	2,4	13	6,12	96,6
Ce	4,43	12	6,93	40,52	4,7	28	13,84	594,34
Nd	2,7	7,8	4,53	14,83	1,8	15,9	7,53	172,14
Sm	0,45	1,43	0,84	0,66	0,24	4,55	1,52	13,54
Eu	0,16	0,4	0,24	0,04	0,1	1,66	0,45	1,83
Gd	0,49	1,05	0,74	0,28	0,26	9,35	2,01	63
Dy	0,58	0,91	0,72	0,07	0,3	13,2	2,56	130,93
Ho	0,12	0,17	0,14	0	0,06	2,2	0,46	3,51
Er	0,22	0,4	0,31	0,02	0,14	4,73	1,05	15,88
Yb	0,18	0,41	0,29	0,03	0,14	3,38	0,86	7,63
Lu	0,03	0,05	0,04	0	0,02	0,46	0,13	0,13

En función de la tabla anterior se ha generado la figura 5.2 que ilustra de mejor modo las diferencias composicionales de las tierras raras en ambos dominios, en ella se han normalizado las concentraciones geoquímicas utilizando el condrito carbonaceo descrito por McDonough y Sun, 1995 (**Anexo C**).

A partir de la figura 5.2 se observa que en general el dominio arcilla-dominante presenta concentraciones mayores de las tierras raras estudiadas y no describe un patrón o tendencia clara entre las tierras raras pesadas y ligeras.

Por otro lado el dominio yeso-dominante presenta rangos composicionales más estrechos y se evidencia una tendencia clara en la disminución de tierras raras pesadas respecto de las ligeras.

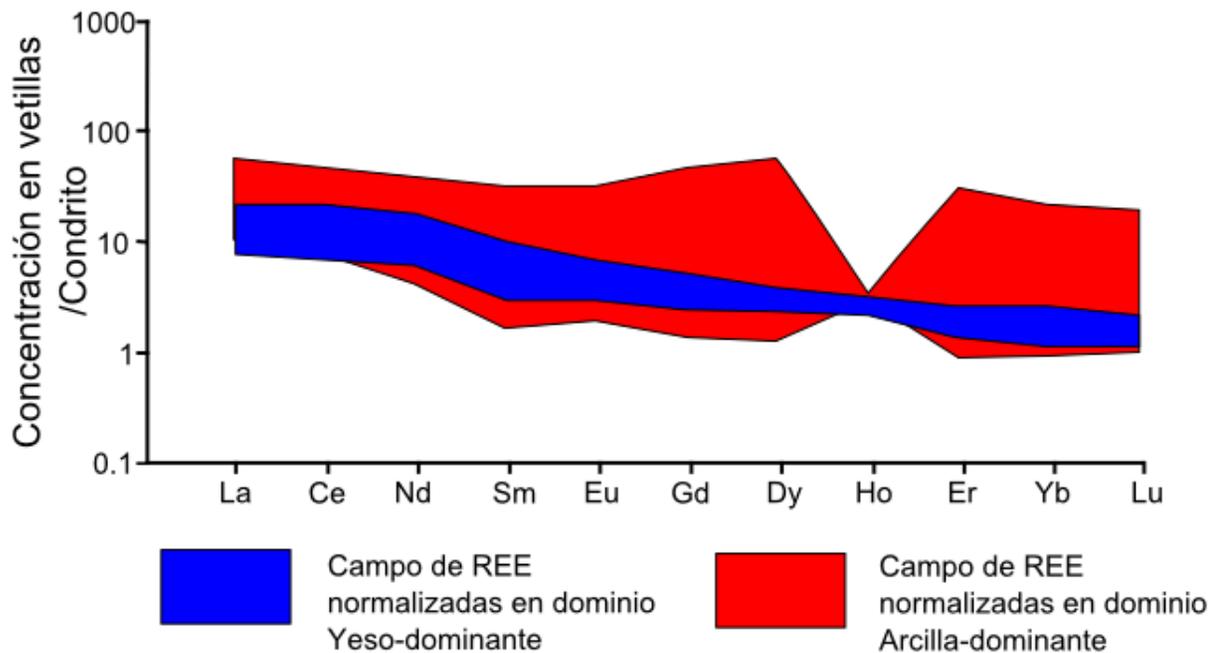


Figura 5.2: Rangos Composicionales de tierras raras según dominio mineralógico.

Para contrastar estos resultados se ha decidido ocupar la información de tierras raras en las lavas de la Formación La Negra al norte del depósito (Palacios, 1978) y la concentración de tierras raras en agua oceánica (Karl, 1968) (**Anexo D**). Se utilizaron estos parámetros considerando que en el margen oeste de la cordillera de la costa no se han detectado niveles de aguas subterráneas a profundidades mayores al nivel del mar.

El resumen de lo anterior se aprecia en la figura 5.3. A partir de esta figura se observa que la concentración de tierras raras en las lavas de la zona se encuentra por sobre ambos dominios mineralógicos muestreados. A su vez la tendencia de disminución desde tierras raras ligeras a pesadas se observa nuevamente en las lavas

así como en las muestras del dominio yeso-dominante. Lo anterior podría ser un reflejo o herencia por parte de las lavas hacia los yesos que rellenan las fracturas, explicado mediante procesos de lixiviación producto de bombeo tectónico.

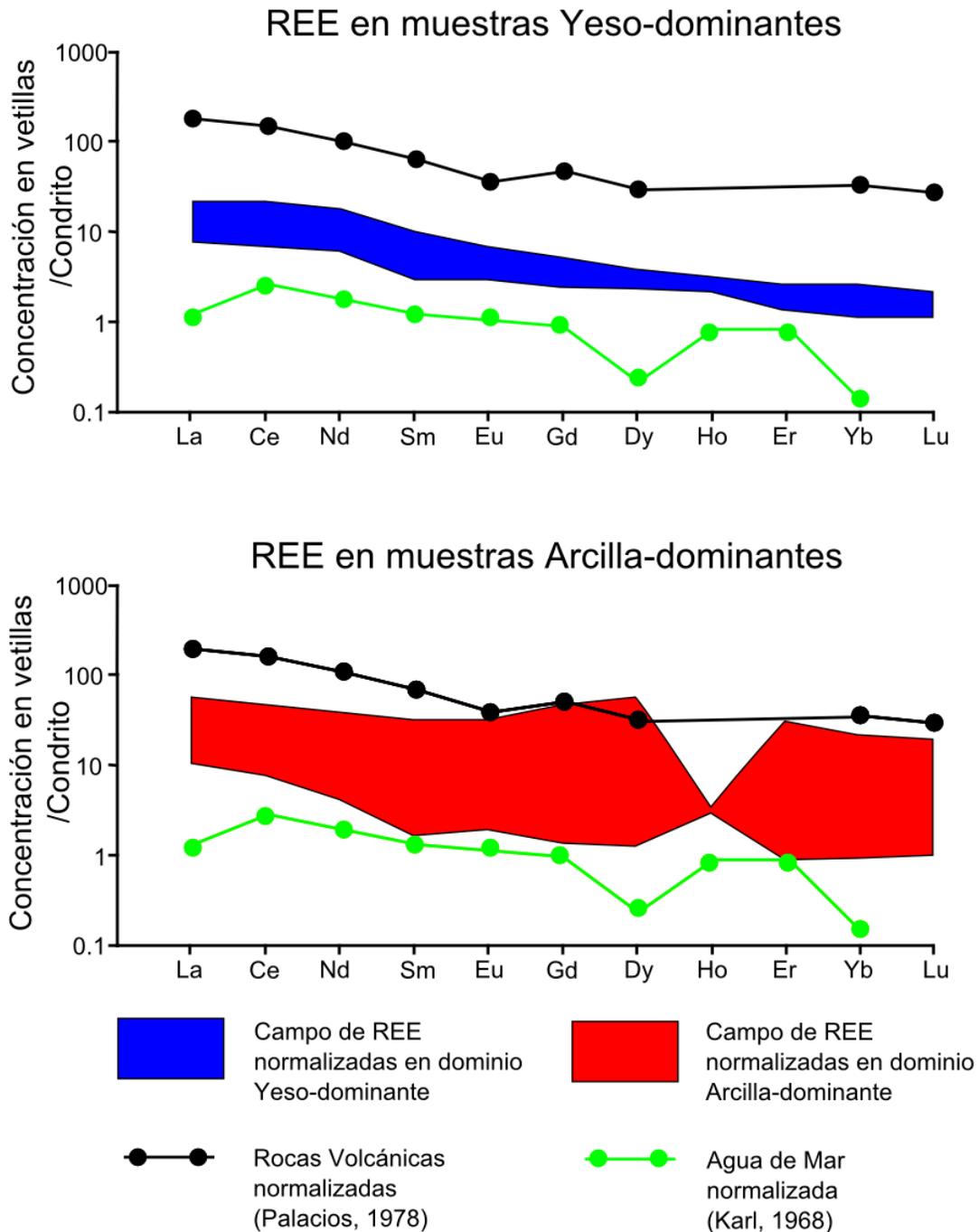


Figura 5.3: Comparativa de tierras raras en dominios mineralógicos y otros estudios. Los valores del estudio de Karl (1968) han sido multiplicados por 10^5 , con el fin de observar la tendencia de ellos dentro de la escala de los gráficos.

Como se mencionó anteriormente, las tierras raras en el dominio arcilla-dominante no presenta patrones claros y el rango composicional de estos elementos es demasiado amplio. Lo anterior conduce a que no se puedan establecer similitudes entre este dominio y las lavas de la zona las cuales permitan identificar posibles fuentes de origen de las tierras raras en arcillas.

No se observan similitudes entre los patrones de tierras raras en agua de mar y aquellas en los dominios yeso-dominante y arcilla-dominante.

Resumiendo, se sugiere que el origen de las tierras raras al menos para el dominio yeso-dominante provendría de rocas volcánicas lixiviadas de la Formación La negra. Sin embargo el origen de las tierras raras en las muestras arcilla-dominante no es concluyente.

5.5. Aplicación en exploración de depósitos cubiertos: Detección de Anomalías

Como se concluye en el capítulo **5.3 Elementos Menores y Trazas**, el elemento Cu contenido en las fracturas debe servir como indicador de cuerpos mineralizados en el subsuelo. Sin embargo, es necesario establecer que valores de concentración de Cu serán aquellos considerados como anomalías y cuales no. Para esto se consideró el estudio de Ahrens (1954) el cual establece que generalmente los elementos en la naturaleza siguen un patrón de distribución log-normal, lo cual en un gráfico log-probabilidades versus log-concentraciones debería estar representado por una línea recta. Si este fuera el caso, se está en presencia de una población cuyo valor promedio esta dado por la intersección de la recta con el valor de ordenada 50%, mientras que los valores anómalos positivos corresponderían a aquellos con una probabilidad de excedencia menor a 2,5% o a aquellos que superan la media de la población más dos desviaciones estándar. Este último límite es tomado como el valor umbral, donde valores superiores al umbral son considerados como anomalías positivas. En el caso que la línea de la población presentase uno o más quiebres quiere decir que se está en presencia de dos o más poblaciones. Si estos quiebres se encuentran por sobre el valor de ordenada 2,5% se pueden considerar como umbrales (Lepeltier, 1969).

A continuación se observa el gráfico probabilidad de excedencia versus contenido de Cu en la figura 5.4. A partir de este se infiere que existen al menos 3 poblaciones, la primera determinada como población de fondo y con valores de Cu menores a 60 ppm, la segunda considerada como población anómala positiva con valores de Cu entre los 60 a 200 ppm, y la tercera como población anómala positiva alta cuyos valores de Cu superan los 200 ppm.

Adicionalmente, se descubrió que la presencia de concentraciones positivas anómalas altas de cobre (>200 ppm) solo se da al interior del dominio arcilla-dominante, por otro lado el dominio yeso-dominante solo presenta concentraciones de cobre bajo los 100 ppm. En consecuencia, este estudio sería el primero en indicar anomalías de cobre presente en arcillas.

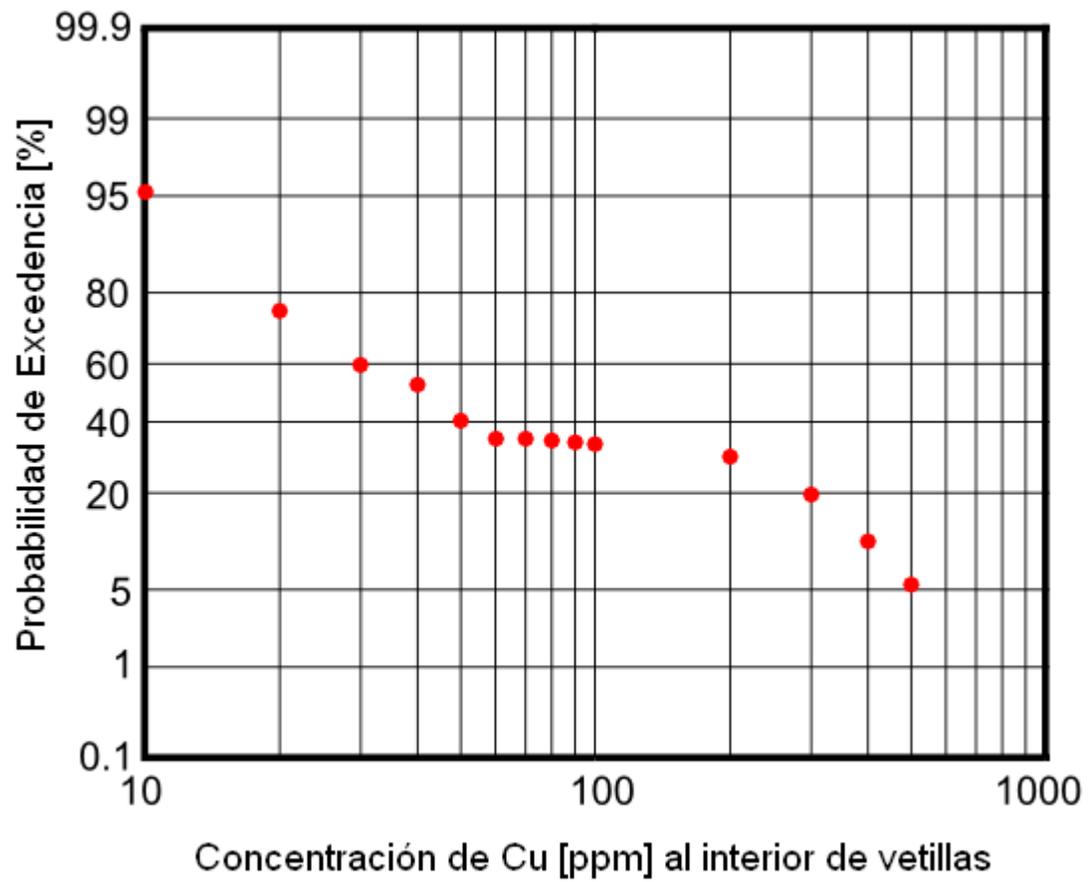


Figura 5.4: Gráfico de Probabilidad de Excedencia versus Concentración de Cu en vetillas.

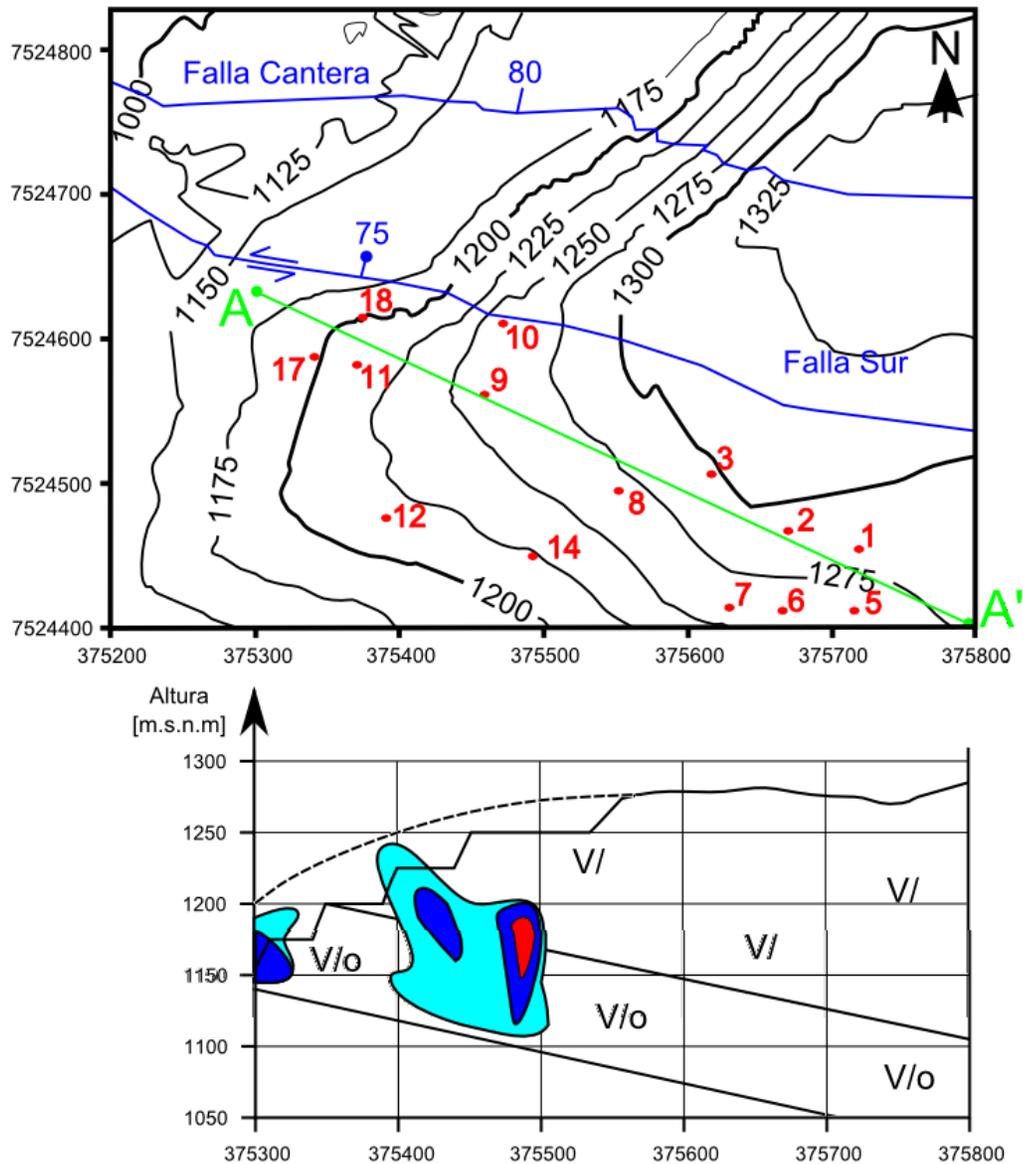
5.6. Aplicación en exploración de depósitos cubiertos: Anomalías en Perfil

A partir de los puntos de muestreo realizados en la zona de estudio, la información de sondajes de la zona sur del yacimiento y el conocimiento de la disposición espacial de los cuerpos mineralizados al interior del mismo, ha sido posible generar un perfil de mineralización útil que sirva para contrastar la presencia de anomalías de cobre en fracturas aflorantes con la mineralización en el subsuelo.

Adicionalmente se contrastaron también los valores de Na_2O y cloro soluble con el perfil anteriormente mencionado pese a que no se determinaron los valores umbrales de estos elementos para ser considerados anomalías positivas.

La zona de estudio y el perfil generado pueden ser observados en la figura 5.5. A partir de esta última se aprecia que el modelo de mineralización presente en la zona en estudio coincide cercanamente con el modelo de mineralización del bloque sur del yacimiento Mantos de la Luna (Fig. 2.8), y cuyos principales minerales de mena son el par atacamita-crisocola en cuerpos vetiformes.

Las concentraciones de Cu, Na y Cl soluble de cada muestra y separadas por dominio adjuntas al perfil de mineralización (Fig. 5.6, 5.7 y 5.8 respectivamente).



Simbología

- == Curvas de nivel
- Falla
- Falla Normal
- Puntos de Muestreo
- Superficie original
- Ley 0.3 - 0.5%
- Ley 0.5 - 1%
- Ley >1%
- V/l V/l Andesita Porfídica
- V/o V/o Andesita Porfídica Amigdaloidal

Figura 5.5: Zona de estudio y perfil de trabajo.

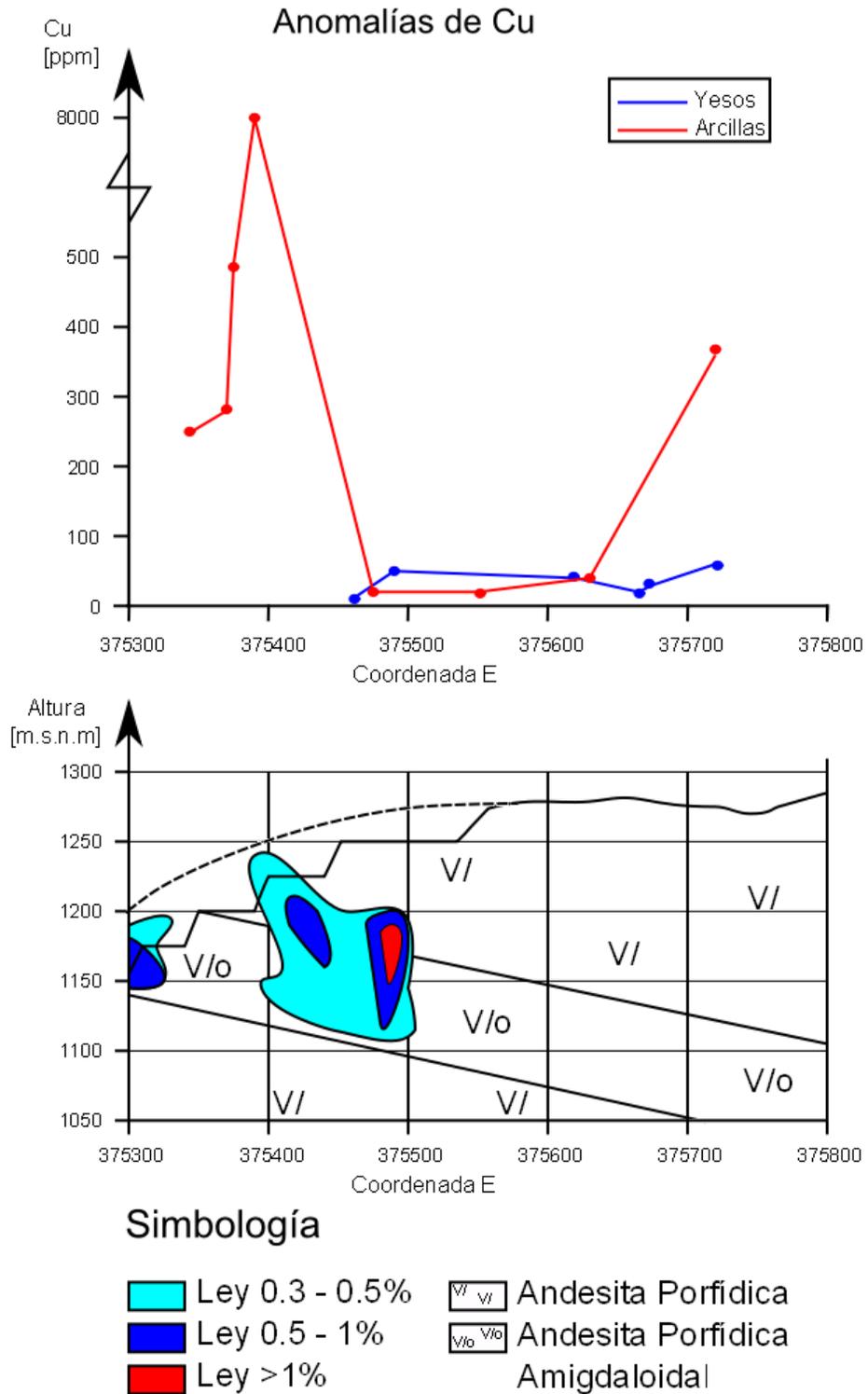


Figura 5.6: Concentración de Cu y perfil de mineralización.

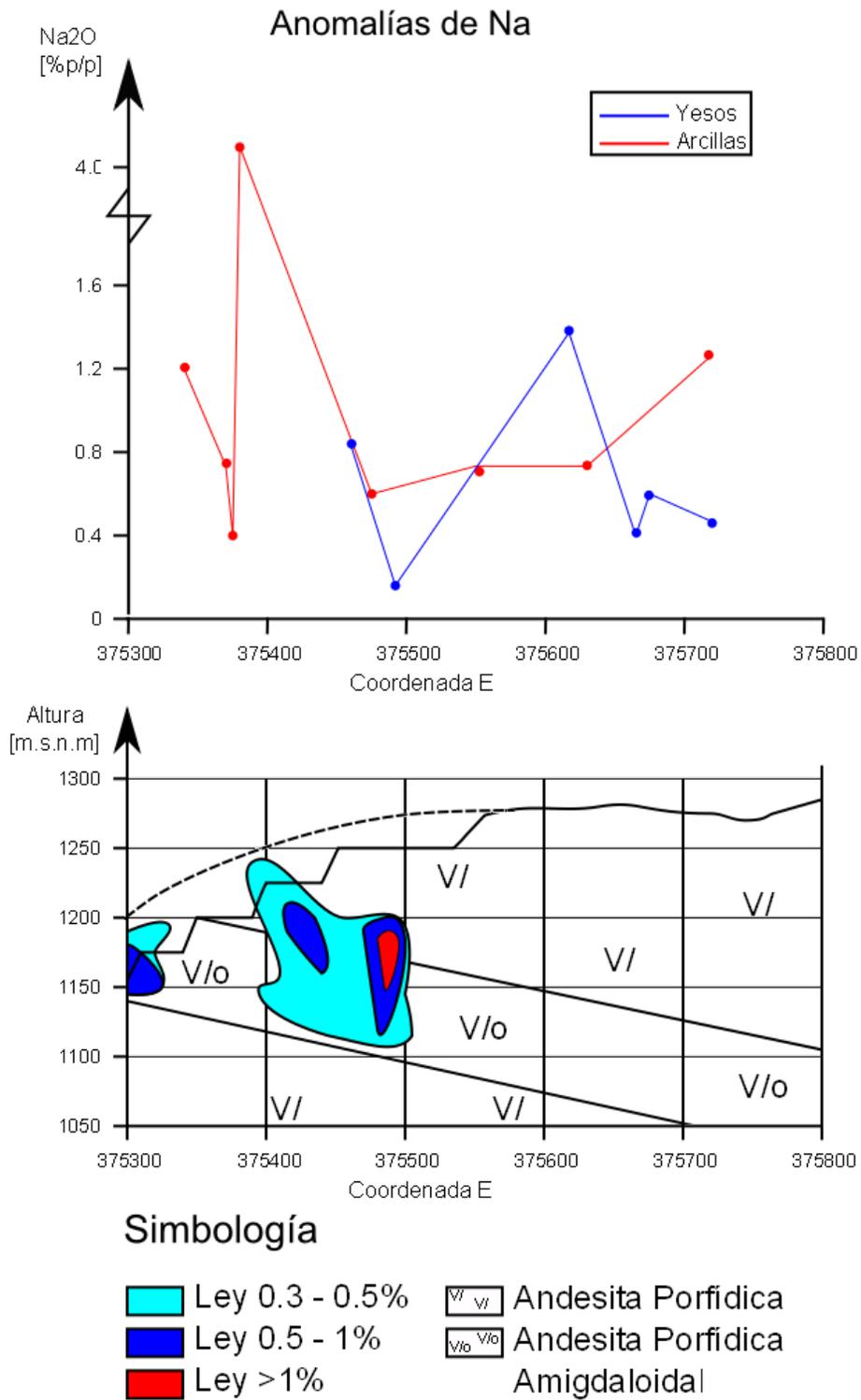


Figura 5.7: Concentración de Na y perfil de mineralización.

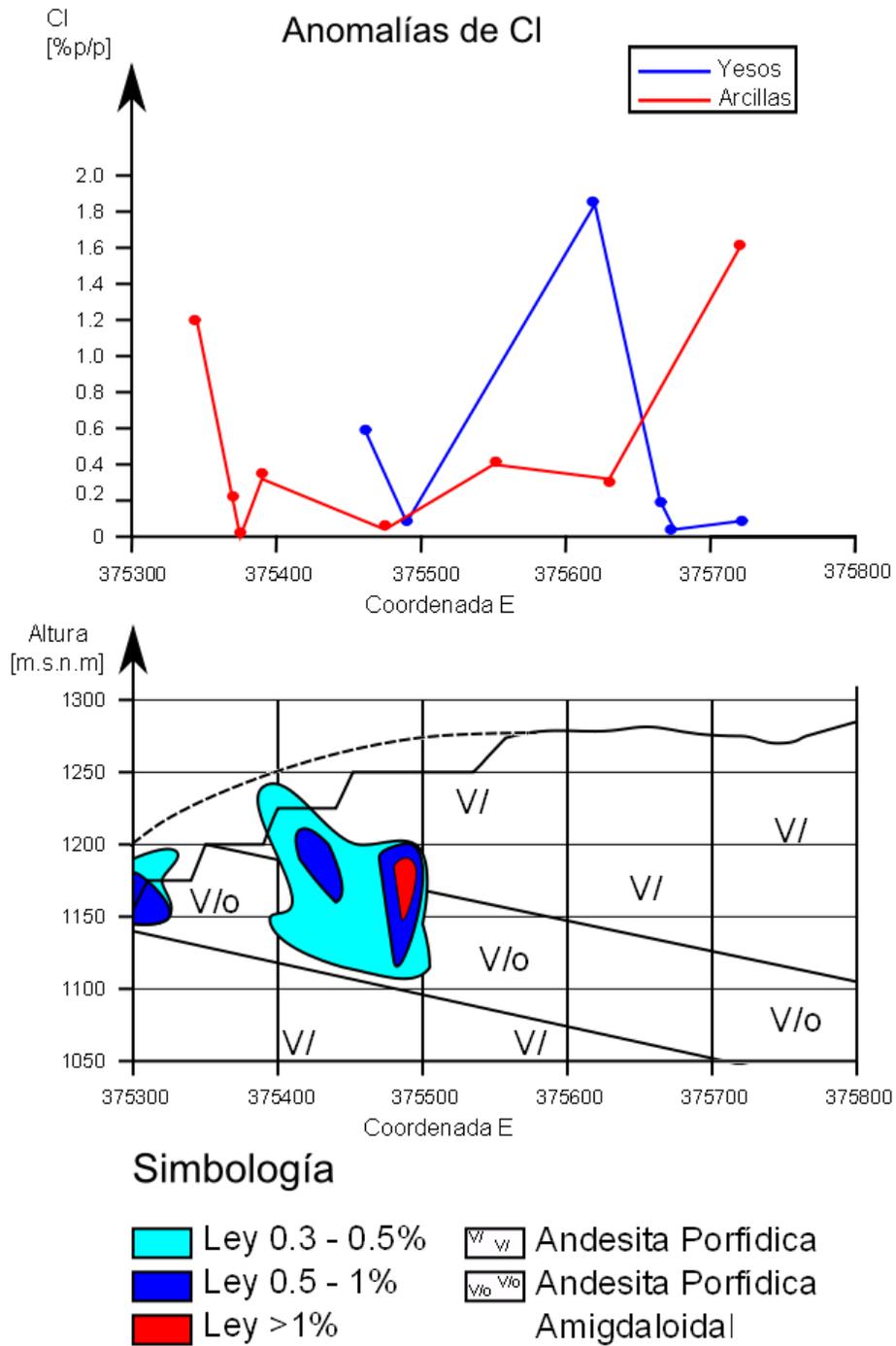


Figura 5.8: Concentración de Cl soluble y perfil de mineralización.

A partir de estas 3 últimas figuras se pueden obtener una serie de interpretaciones:

- Como se mencionó con anterioridad, el contenido de Cu en fracturas rellenas de arcillas es anómalamente positivo, y en la figura 5.6 se observa que existe un máximo de 0,8% de Cu, acompañado por altos de mucha menor intensidad en un intervalo de 200 a 500 ppm, todos ellos considerados como anomalías positivas altas. Estas se sitúan en el sector oeste de la zona de estudio, mismo lugar que según el perfil de mineralización presentaría un cuerpo mineralizado con aspecto vetiforme en el subsuelo con leyes que variables entre los 0.3 a sobre 1% de Cu.
- Hacia el sector este se observa una anomalía de 400 ppm de Cu el cual podría ser un indicativo de mineralización en el subsuelo, sin embargo no se tiene información de sondajes en esa área para contrastar este dato.
- El contenido de Cu en las muestras yeso-dominante no es significativo y pareciera no ser un reflejo de menas en el subsuelo.
- De la figura 5.7; se aprecia un máximo de 4.1% de Na_2O , el cual coincide con la anomalía extremadamente positiva de 0.8% de Cu de la figura 5.6. Adicionalmente hacia el sector oeste de esta anomalía se presentan unos valles de concentración de Na_2O los cuales coinciden con la zona no mineralizada del perfil (entre los 375325 y 375400), para luego aumentar nuevamente al acercarse al cuerpo mineralizado pequeño situado en los 375300E. Esta suerte de valle y posterior aumento de Na_2O se da de igual manera hacia el sector este del perfil, en donde el valor de Na_2O aumenta nuevamente en conjunto con la anomalía de Cu ya mencionada en el mismo sector y cuyo registro de sondajes no existe.
- De la figura 5.8; se observan patrones similares a lo anteriormente mencionados, sin embargo las concentraciones de Cl solubles se disparan hacia los extremos más oeste y este del perfil, alcanzando valores de 1.2 y 1.8%. Sin embargo la

anomalía al oeste no se sitúa por sobre la zona de mineralización sino más bien en donde aflora el contacto entre las lavas afaníticas y las lavas afaníticas amigdaloidales, lo cual daría indicios de que el ascenso del Cl a través de los fluidos ascendentes presentaría un comportamiento preferencial a ascender mediante los canales de estratificación, mientras que el Cu tendería a ascender casi de manera vertical.

- Los anomalías de Cu y los máximos tanto de Na_2O y cloro soluble hacia el sector este del perfil sugieren la existencia de un cuerpo mineralizado en el subsuelo.

Palacios et al. (2005) realizó un estudio geoquímico de suelos en torno a los yacimientos de cobre Mantos Blancos y Sierra Miranda, ubicados entre 50 y 60 km al ENE de Antofagasta, en la Cordillera de la Costa. En aquel estudio se concluye una fuerte relación entre el contenido de cobre presente en sales (yeso, anhidrita y halita) y la mineralización subyacente.

En el trabajo aquí realizado se reportan fuertes relaciones entre el contenido de cobre en superficie contenido en arcillas y la mineralización subyacente, de igual modo se agregan los elementos sodio y cloro soluble contenidos tanto en arcillas y sales (yeso) como posibles indicadores de mineralización en el subsuelo.

La presencia del cobre en superficie contenido en arcillas se atribuye a fluidos ascendentes producto de bombeo tectónico los cuales lixiviarían zonas mineralizadas en profundidad trasladando el cobre a niveles superiores, en donde sería integrado a las arcillas debido a las propiedades absorbentes de este grupo de minerales.

En función de la información aquí expuesta, las anomalías de Cu, Na y Cl presentan correlación con zonas mineralizadas hasta una profundidad de 200 metros.

6. CONCLUSIONES

Las vetillas y fracturas rellenas en la zona sur del Yacimiento Mantos de la Luna se caracterizan por la alta proporción de yeso y arcilla, esto último permite diferenciar en dos dominios mineralógicos: dominio yeso-dominante y dominio arcilla-dominante.

Los resultados de pérdida por calcinación sugieren valores promedios de 20% en vetillas yeso-dominante como arcilla-dominante. Estos valores son atribuidos a priori a la existencia de agua al interior de los minerales. La procedencia de esta agua actualmente se desconoce.

Mediante análisis de coeficientes de correlación se estableció que ninguno de los dos dominios mineralógicos presenta preferencia por absorber tantos elementos menores como trazas.

Existen relaciones claras entre las tierras raras en el dominio yeso-dominante y las rocas volcánicas de la Formación La Negra las cuales sugieren que el origen de estos elementos provendría de las mismas rocas volcánicas. El análisis de tierras raras para el dominio arcilla-dominante no es concluyente.

Respecto a elementos menores, trazas y tierras raras se aprecia que los rangos composicionales de estos se encuentran por debajo de las concentraciones de rocas volcánicas de la Formación La Negra y sobre los valores de agua de mar. Esto último se interpreta como una lixiviación generalizada de las rocas volcánicas, producto de bombeo tectónico, seguido de una posterior incorporación de los elementos liberados hacia el interior de las vetillas.

Se definieron al menos 3 poblaciones de contenidos de Cu al interior de las vetillas: población de fondo, población anómala positiva y población anómala positiva alta. Los valores sobre 200 ppm de Cu definen a la población anómala positiva alta.

Existe una clara relación entre las anomalías positivas altas de Cu encontradas en superficie y la mineralización presente en el subsuelo. En este estudio este tipo de anomalía solo se reporta al interior de las arcillas, no así en yesos como sugiere Palacios et al. (2005). En consecuencia, este estudio sería pionero en reportar anomalías de cobre presente en arcillas y su correlación con la mineralización subyacente.

De igual modo se evidencian fuertes relaciones entre máximos de concentración de Na_2O y cloro soluble en ambos dominios mineralógicos y la mineralización en subsuelo. De esta forma, se agregan 2 nuevos elementos que correlacionan anomalías en superficie con mineralización subyacente.

En base a la evidencia del método de exploración aquí ocupado, se sugiere realizar una campaña de sondajes al sur del yacimiento Mantos de la Luna al interior del cuadrante definido por los vértices 7524500N-375600E y 7524400N-375800E.

Finalmente, los resultados aquí mostrados sugieren que la metodología empleada es útil en exploración de zonas cubiertas, al menos al interior del yacimiento Mantos de la Luna. Además presenta ventajas en cuanto a costos de exploración al ser una metodología económica y rápida de llevar a cabo.

7. REFERENCIAS

- AHRENS, L.H. 1954. The lognormal distribution of the elements (A fundamental law of geochemistry). *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 5, pp. 49-73.
- ALFARO, G. 1972. "Geología y prospección de yacimientos de cobre en la zona de Tocopilla", *Inst. Invest. Geol., Jornadas de Trabajo*, Vol.3, Pp. 3-28
- BOBENRIETH, L. 1980. Geología de los Cuadrángulos Cerro Desamparado y Cerro Soledad, Regiones de Tarapacá y Antofagasta. Memoria de Título (Inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, 171 p.
- BORIC, R., DIAZ, F., y MAKSAEV, V. 1990. Geología y yacimientos metálicos de la II Región, Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N°40, 246 p.
- CHARRIER, R., PINTO, L., RODRÍGUEZ, M. P. 2007. Tectonostratigraphic Evolution of the Andean Orogen in Chile. En: Moreno, T. & Gibbons, W. (eds) *The Geology of Chile*. The Geological Society, London, p. 179-199.
- CEMBRANO, J., LAVENU, A., YÁÑEZ, G., RIQUELME, R., GARCÍA, M., GONZÁLEZ, G., HÉRAIL, G. 2007. Neotectonics. En: Moreno, T. & Gibbons, W. (eds) *The Geology of Chile*. The Geological Society, London, p. 231-261.
- DEFINIS, A. y BELLO, J. L. 2000. El Yacimiento de Cobre Mantos de la Luna: Nuevos Antecedentes de un Origen Hidrotermal Epigenético. Resúmenes del IX Congreso Geológico Chileno, Puerto Varas, 117 p.
- FERRARIS, F. y DI BIASE, F. 1978. Hoja Antofagasta, Región de Antofagasta. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 30, 48 p.
- GARCÍA, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. In *Symposium sobre el Geosinclinal Andino*. Sociedad Geológica de Chile. No. 3, Santiago, 1962, 138 p.

- GREINER, G. 1982. Geología Económica del Yacimiento Cuprífero Mantos de la Luna. Memoria de Título. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- HARTLEY, A.J., CHONG, G. 2002. Late Pliocene age for the Atacama Desert: Implications for the Desertification of Western South America. *Geology* 30: 43-46
- KARL K TUREKIAN. 1968. *Encyclopedia of Ocean Sciences, Second Edition.*
- LEIVA, E. 2010. Caracterización y distribución de minerales oxidados de cobre y alteración en el yacimiento cuprífero Mantos de la Luna, II Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- LEPELTIER, C. 1969. A Simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Economic Geology* 64: 538-550.
- MAKSAEV, V. y MARINOVIC, N. 1980. Cuadrángulos Cerro de la Mica, Quilagua, Cerro Posada y Oficina Prosperidad, Región de Antofagasta. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 45-48, Santiago, 63 p.
- MAKSAEV, V., BORIC, R., ZENTILLI, M., REYNOLDS, P. H. 1988. Significado metalogénico de dataciones K-Ar y ^{40}Ar - ^{39}Ar y trazas de fisión de zonas mineralizadas en el Norte Grande de Chile. *Proceedings 5th Congreso Geológico Chileno*, Santiago, 1, B65–B86.
- MAKSAEV, V., TOWNLEY, B., PALACIOS, C, CAMUS, F. 2007. Metallic Ore Deposits. En: Moreno, T. & Gibbons, W. (eds) *The Geology of Chile*. The Geological Society, London, p. 179-199.

- MCDONOUGH, W. F. y SUN, S. 1995 The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223-254.
- NARANJO, J.A. y PUIG, A. 1984. Hojas Taltal y Chañaral, Regiones de Antofagasta y Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 62-63, 140 p.
- OLIVEROS, V., FÉRAUD, G., AGUIRRE, L., FORNARI, M., RAMÍREZ, L., PALACIOS, C., PARADA, M. A., TRISTÁ, D. 2004. Ar40/Ar39 dating of magmatic and alteration events related to the Mesozoic subduction system in the Coastal Range, northern Chile. EGS Joint Assembly, Niza.
- PALACIOS, C. 1978. The Jurassic Paleovolcanism in Northern Chile. Tesis de doctorado. Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, Tübingen, Alemania, 99 p.
- PALACIOS C, GUERRA N, TOWNLEY B, LAHSEN A, PARADA MA(2005) Copper geochemistry in salt from evaporitic soils, Coastal Range of the Atacama Desert, northern Chile: An exploration tool for blind Cu deposits. *Geochemistry, Exploration, Environment, Analysis* 5: 371-378
- PARADA, M.A., LÓPEZ-ESCOBAR, L., OLIVEROS, V., FUENTES, F., MORATA, D. et al. 2007. Andean Magmatism. In: *The Geology of Chile* (T. Moreno and W. Gibson, eds.). The Geological Society of London. p. 115-146.
- REICH, M., PALACIOS, C., PARADA, MA., FEHN, U., CAMERON, EM., LEYBOURNE, MI., ZUÑIGA, A. 2008. Atacamite formation by deep saline waters in copper deposits from the Atacama Desert, Chile: evidence from fluid inclusions, groundwater geochemistry, TEM, and ³⁶Cl data. *Mineralium Deposita* 43: 663–675
- REICH, M., PALACIOS, C., VARGAS, G., LUO, S., CAMERON, EM., LEYBOURNE, MI., PARADA, MA., ZUÑIGA, A., YOU C-F. 2009. Supergene

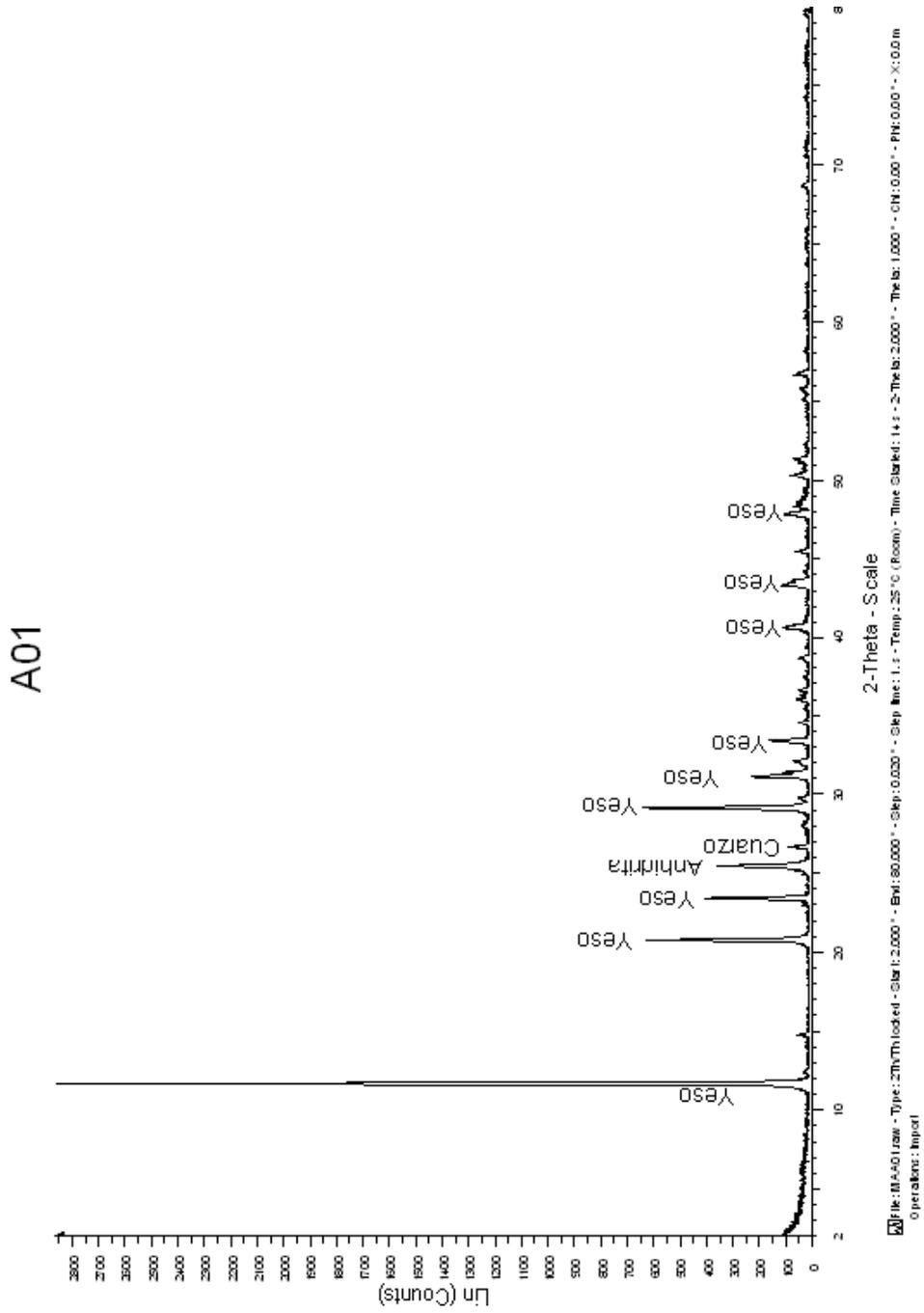
enrichment of copper deposits since the onset of modern hyperaridity in the Atacama Desert, Chile. *Mineralium Deposita* 44: 497-504

- ROGERS, G. y HAWKESWORTH, J. 1989. A geochemical traverse across the North Chilean Andes: evidence for crust generation from the mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 91, p. 271–285.
- SCHEUBER, E. y GONZÁLEZ, G. 1999. Tectonics of the Jurassic – Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22°–26 °S): A story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics*, 18, p. 895–910.
- TOWNLEY, B.; MAKSAEV, V; PALACIOS, C; PARADA, M. 2000. Metals geochemistry of rocks of the mainland Aysén reg, Chile. *Journal of Geochemical Exploration*. Vol 68, pp 21-46.

8. ANEXO A: Foto de una herramienta minigrinder

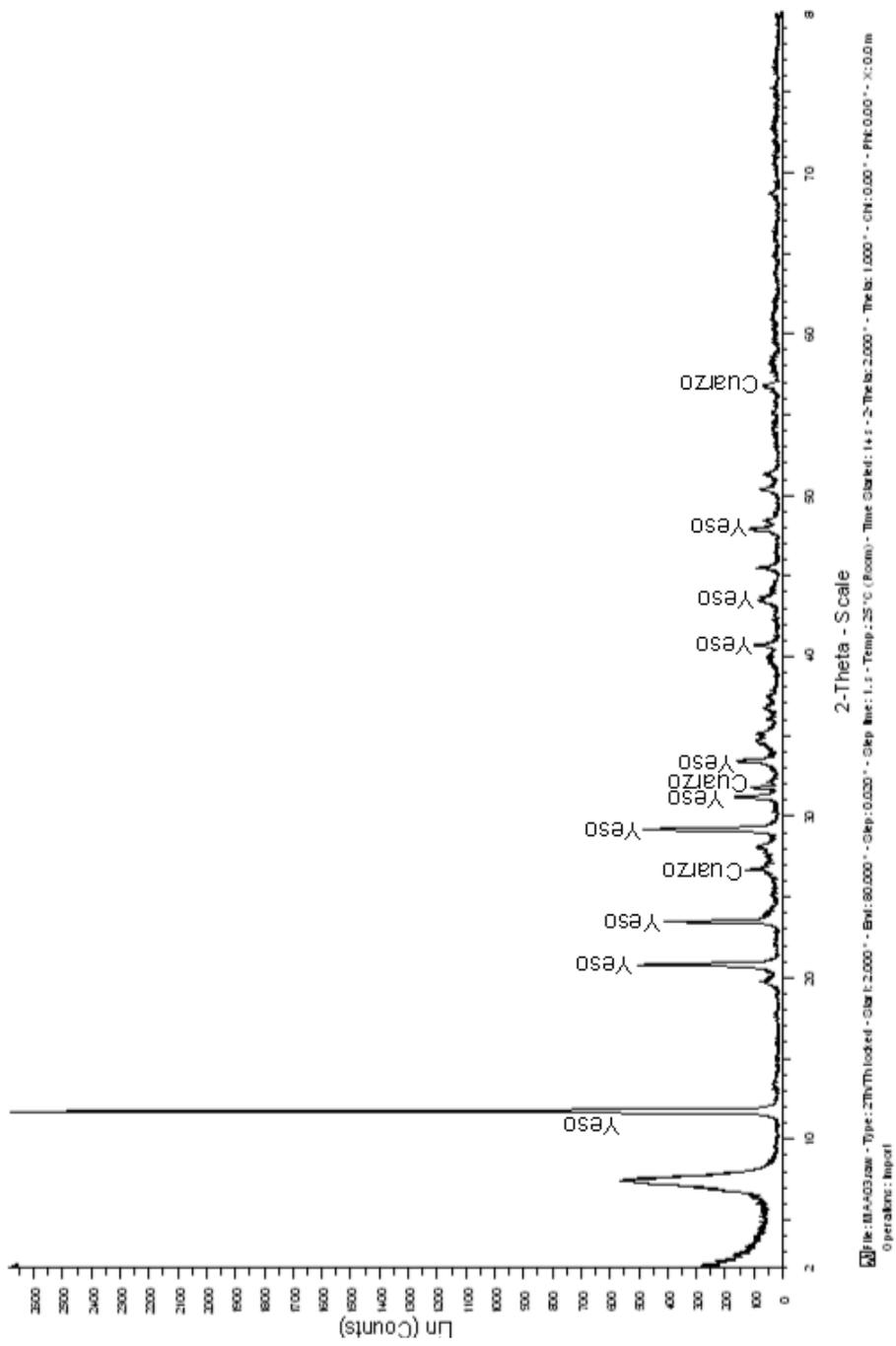


9. ANEXO B: Difractogramas



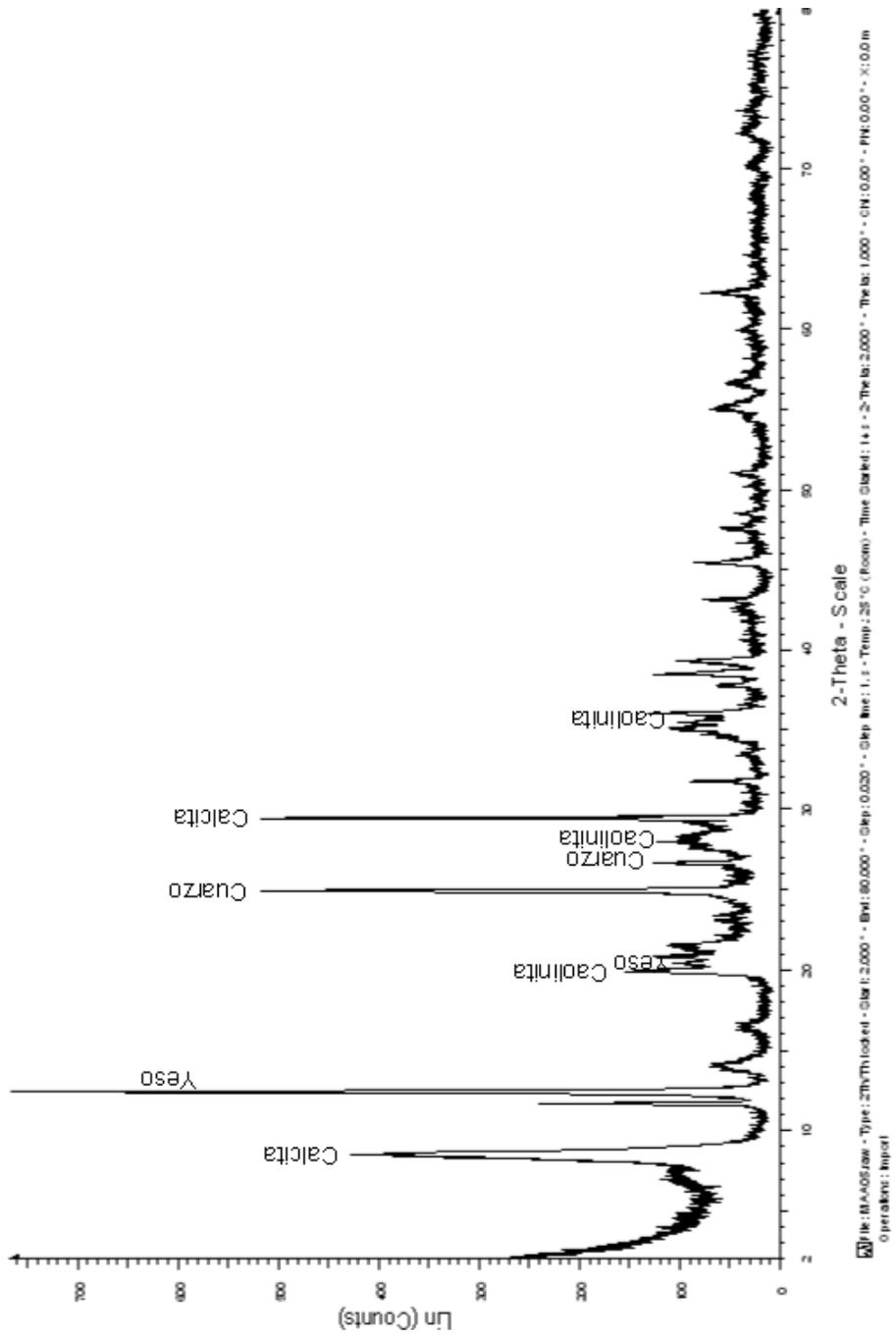
Difractograma de la muestra A01

A03



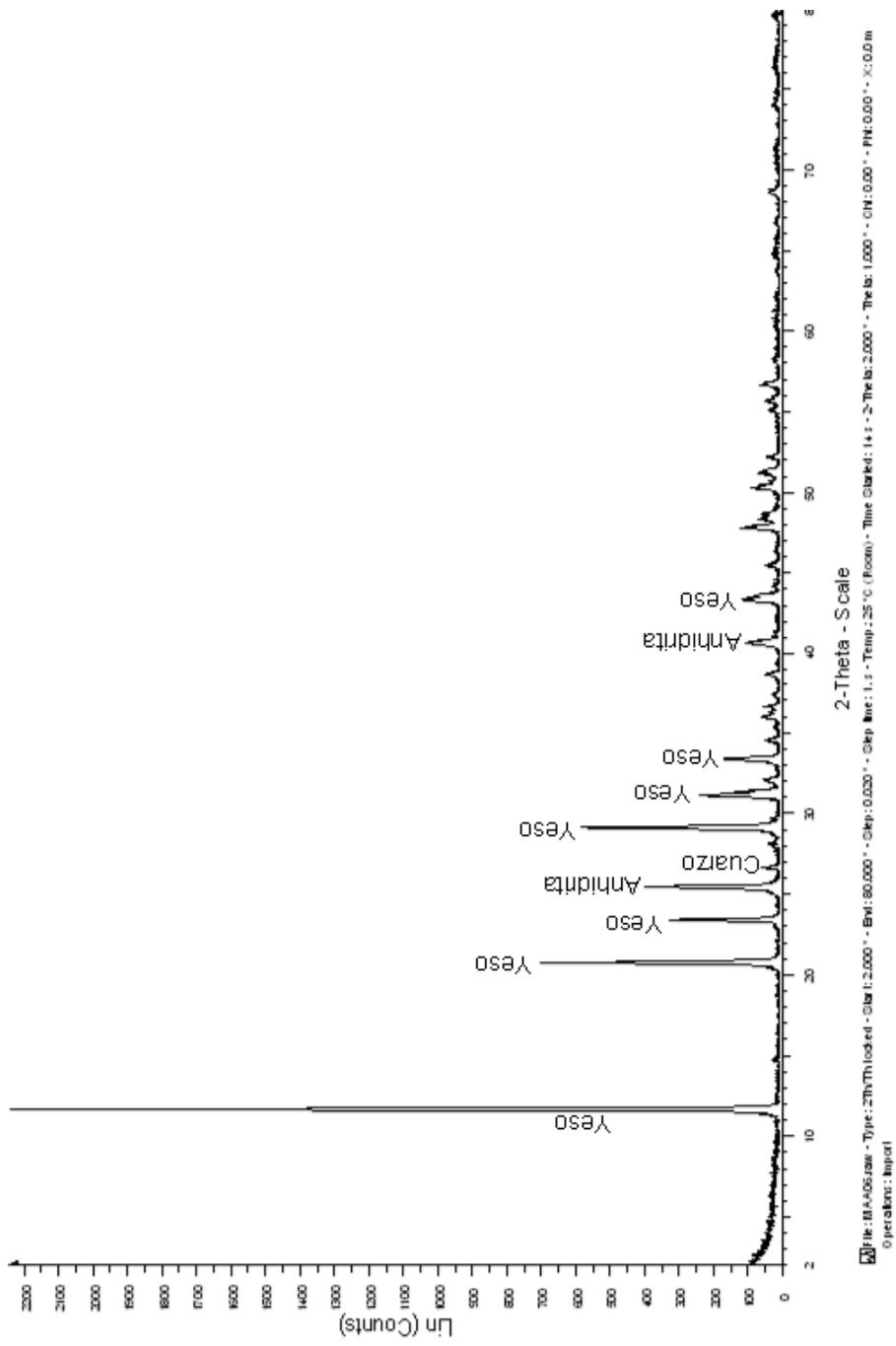
Difractograma de la muestra A03

A05



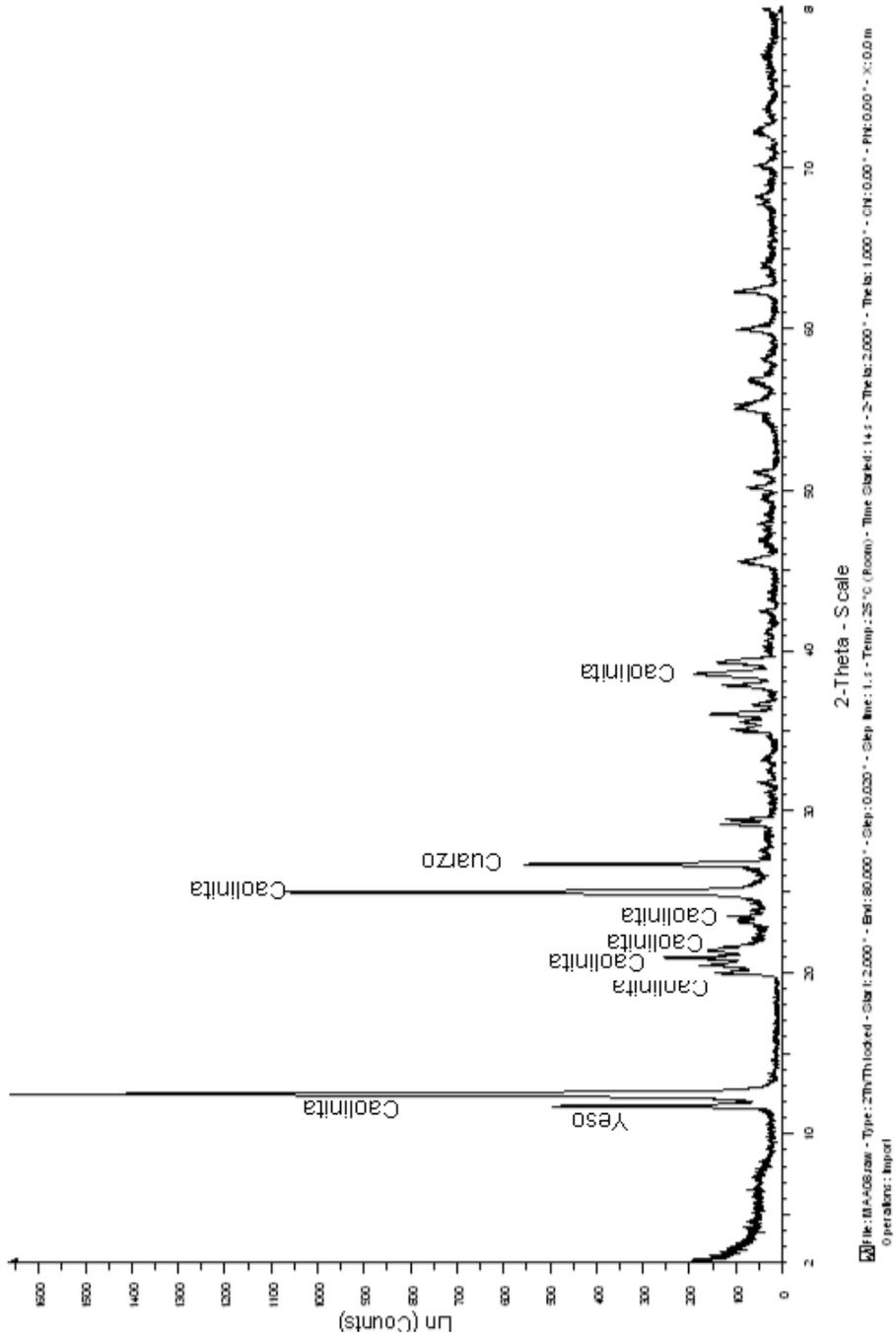
Difractograma de la muestra A05

A06



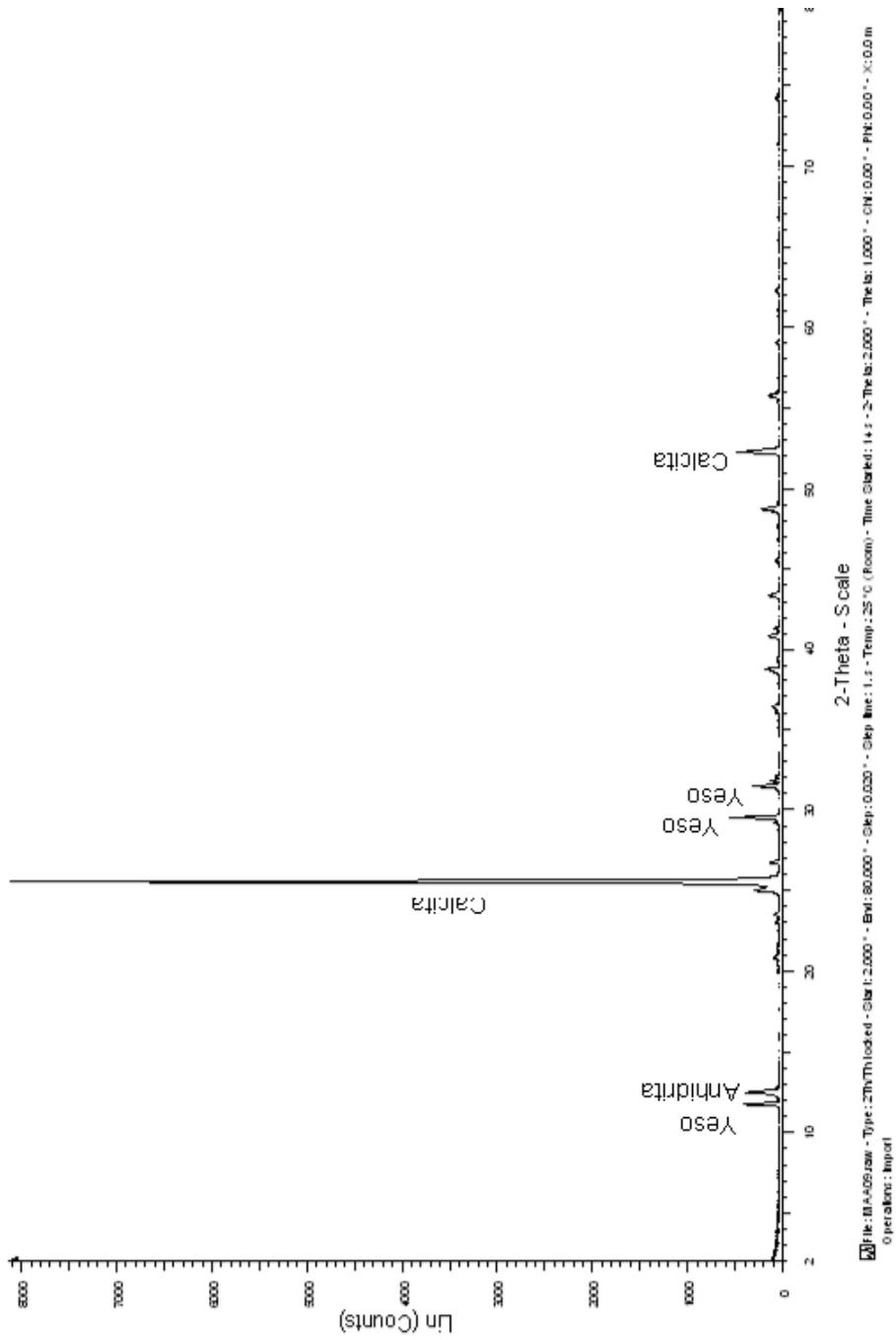
Difractograma de la muestra A06

A08



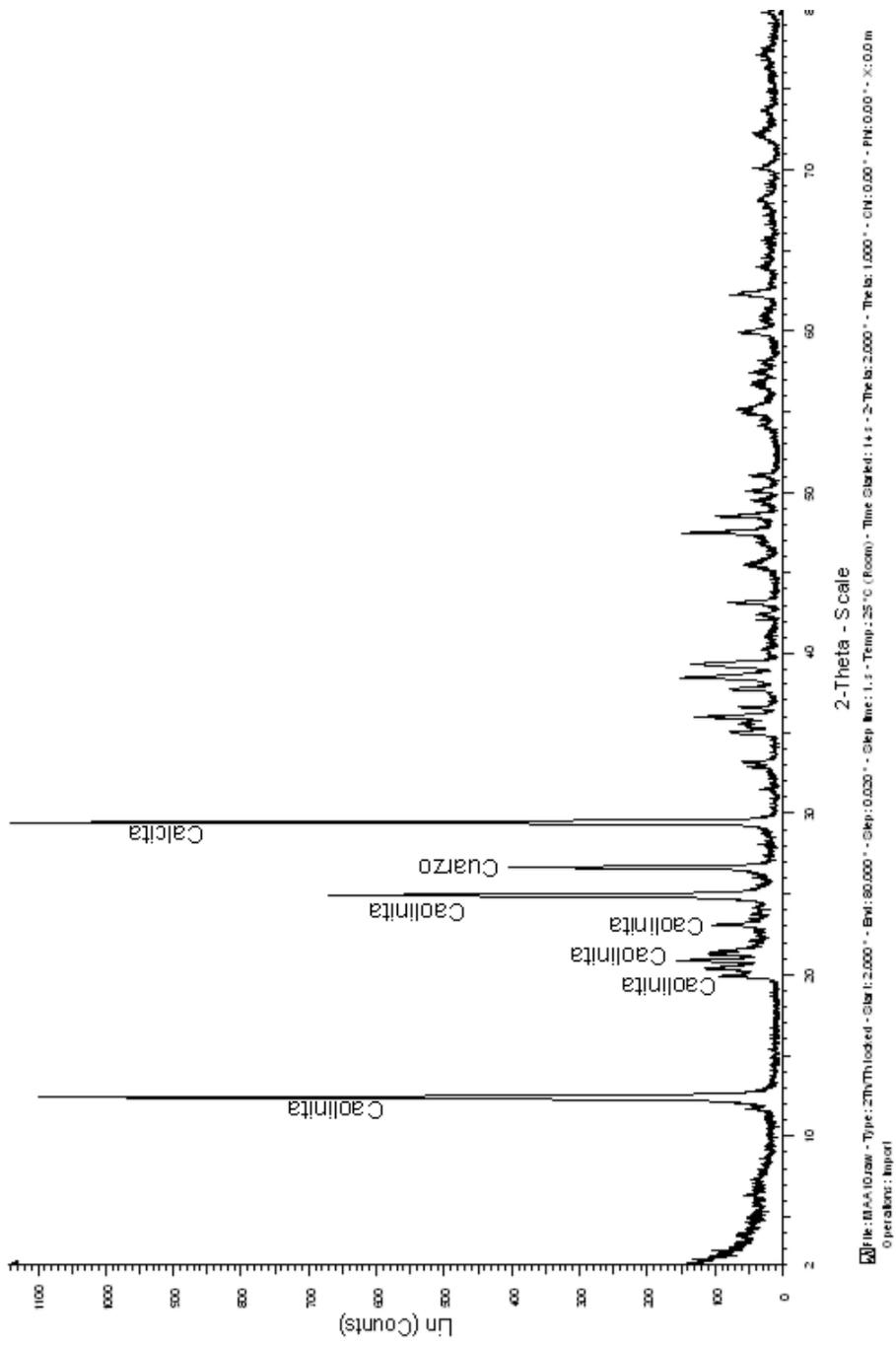
Difractograma de la muestra A08

A09



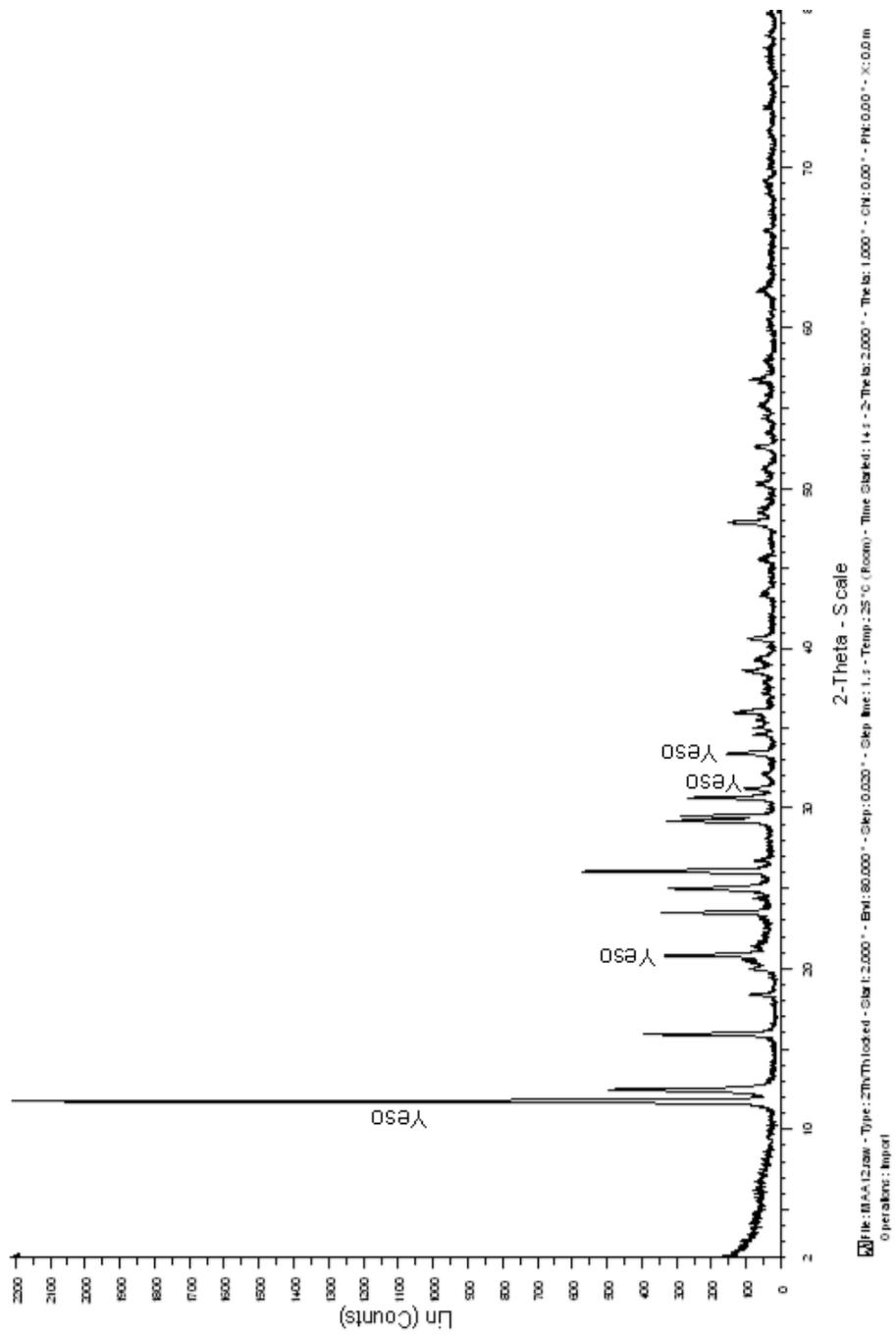
Difractograma de la muestra A09

A10



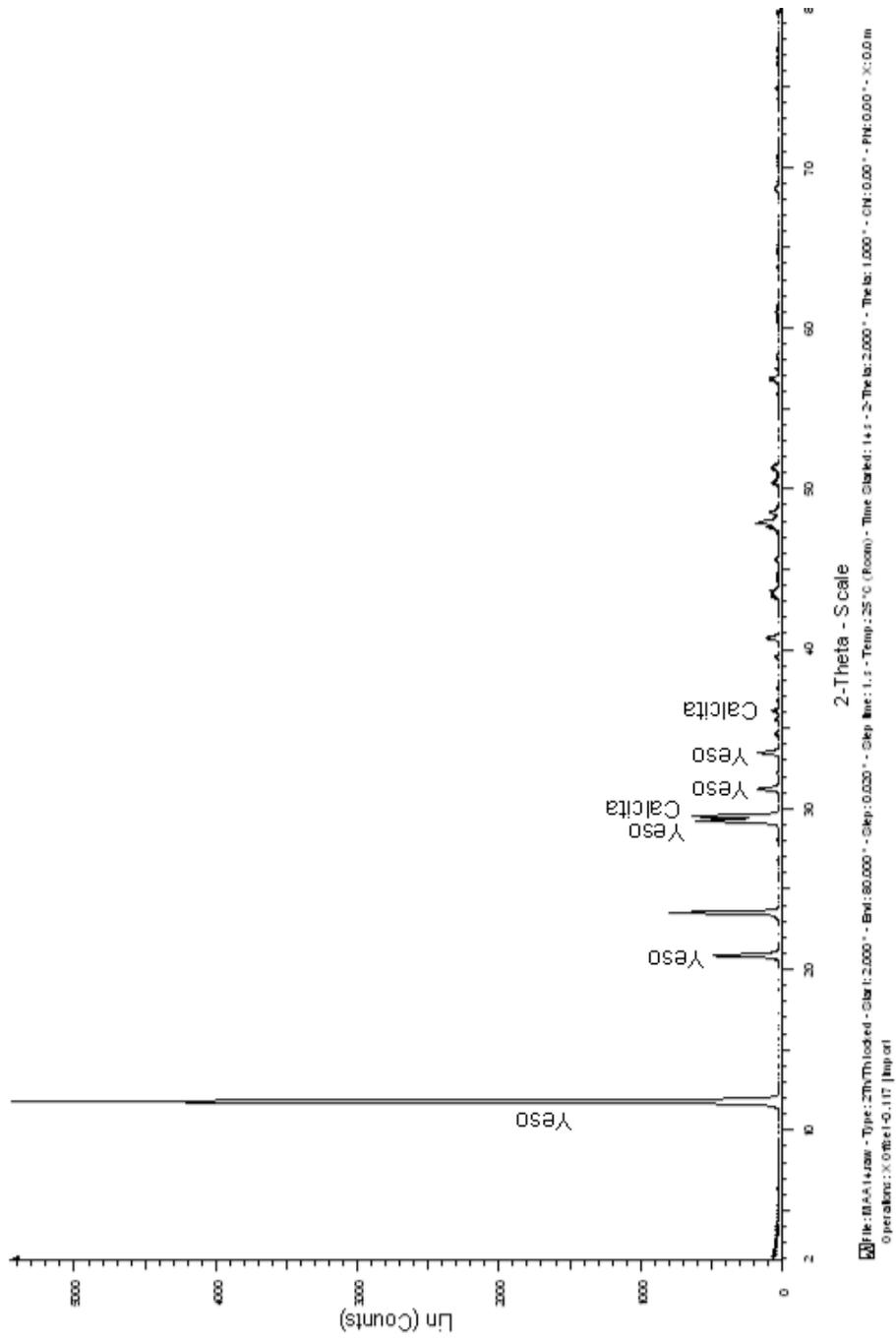
Difractograma de la muestra A10

A12



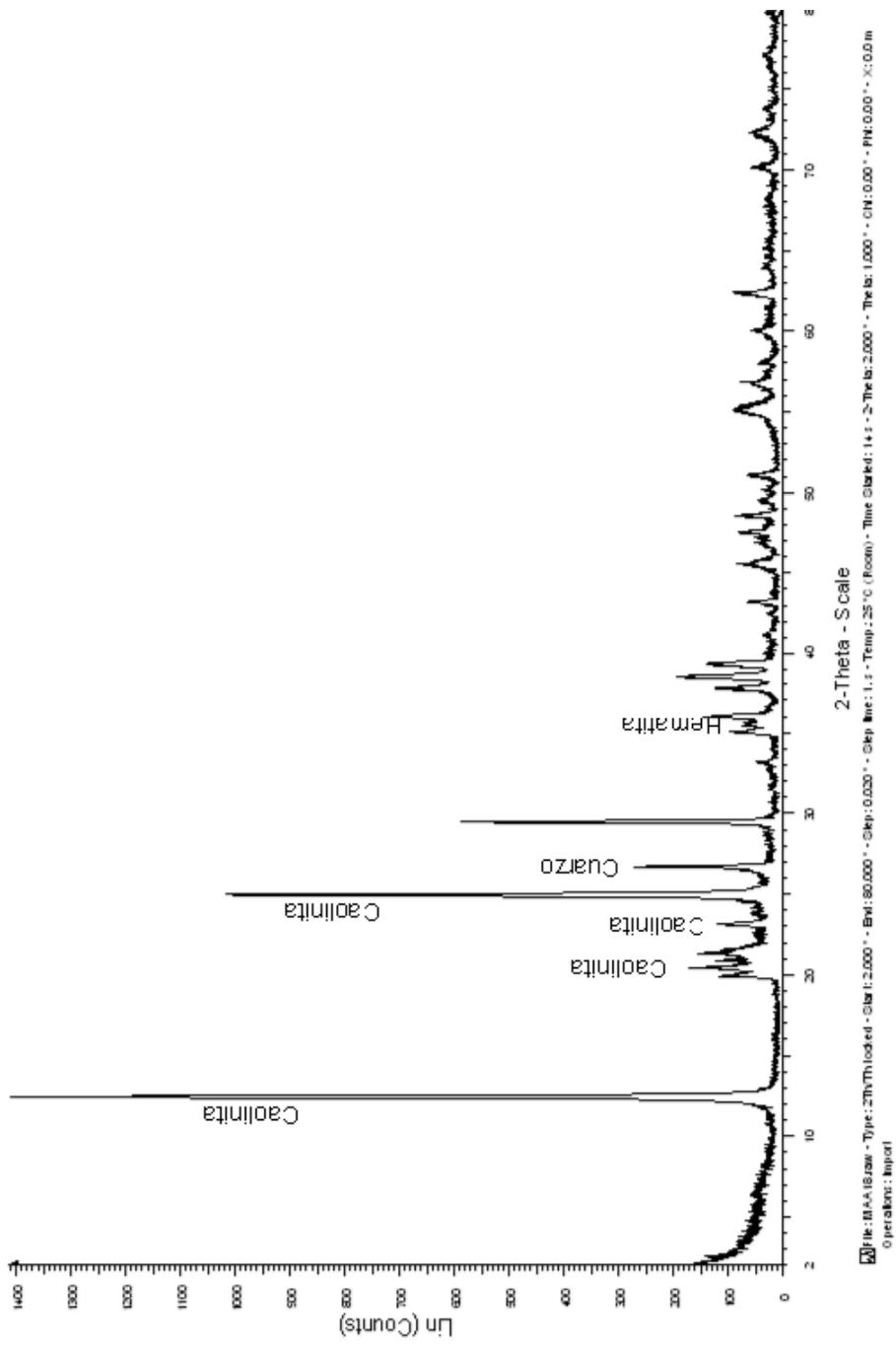
Difractograma de la muestra A12

A14



Difractograma de la muestra A14

A18



Difractograma de la muestra A18

10. ANEXO C: Procedimientos de Laboratorio

A continuación se detallan los procedimientos de laboratorio para las diferentes medidas realizadas.

Análisis Elementos Mayores

- Se pesan 250 miligramos de muestra en crisol de platino.
- Se agrega a cada crisol 1 gr de fundente compuesto de tetraborato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) y carbonato de sodio (Na_2CO_3) en razón 1:2.
- Se lleva cada crisol a mechero bunsen.
- Una vez fundido se espera que enfríe y se agregan 20 ml de agua destilada y 2 ml de ácido nítrico para disolver.
- Posteriormente se enrasa cada muestra en 50 ml de agua destilada en matraz de 100 ml, y luego se diluye la muestra 25 veces
- Una fracción de las muestras es tomada a partir de matraz de disolución 1 para ser llevado a ICP-OES con la finalidad de medir Cr, Zr e Y.
- Las muestras en matraz de disolución 25 son llevadas a ICP-Óptico para medición de elementos mayores.

Análisis Elementos Menores

1. Se pesan 250 miligramos de muestra en vaso de teflón
2. Se agregan en el siguiente orden; 5 ml de ácido nítrico (HNO_3), 5 ml de ácido fluorhídrico (HF) y 5 ml de ácido perclórico (HClO_4) para disolución de compuestos insolubles.
3. Se mantiene plancha calefactora con campana de extracción de gases durante 24 horas a 250°C con la finalidad de evaporar los líquidos.
4. Una vez enfriadas las muestras se agregan 5 ml de ácido clorhídrico y se afora en 50 ml de agua destilada con el objetivo de disolver el residuo restante.
5. Cada muestra es llevada a medición mediante ICP-Óptico.

Análisis Tierras Raras

- Se pesan 1 gr de muestra en vaso de teflón
- Se agregan en el siguiente orden; 5 ml de ácido nítrico (HNO_3), 5 ml de ácido fluorhídrico (HF) y 5 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) para disolución de compuestos insolubles.
- Se llevan las muestras a plancha calefactora con campana de extracción de gases a 250°C hasta que las muestras desprendan humos densos, dejándose por un tiempo de 30 minutos una vez sucedido esto.
- Una vez enfriadas se filtran las muestras trabajadas mediante papel filtro whatman 42, de este modo los sólidos insolubles son atrapados en la malla y la fracción líquida es llevada a resinas de intercambio iónico.
- El residuo sólido atrapado en el papel filtro es calcinado en mechero bunsen en donde se le agrega 1 gramo de fundente compuesto de tetraborato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) y carbonato de sodio (Na_2CO_3) en razón 1:2.
- Una vez que la muestra ha sido fundida y se ha enfriado se le agregan 3 ml de ácido nítrico concentrado y agua destilada para lograr la disolución, posteriormente la muestra tratada es llevada a resina de intercambio iónico.
- Para eliminar los elementos mayores de las resinas de intercambio iónico se drenan en el siguiente orden 100 ml de ácido clorhídrico 1.75 N y 80 ml de ácido nítrico 1.75 N.
- Para retirar las tierras raras de las resinas de intercambio iónico se utilizan 80 ml de ácido nítrico 6 N con oxalato 5 mM, y posteriormente 80 ml de ácido nítrico 8 N.
- Las tierras raras junto a los 160 ml de ácido nítrico son recogidos en vasos precipitados de 250 ml, los cuales son llevados a plancha calefactora para evaporar los ácidos hasta reducir el volumen a 2 ml, para luego enrasar en 5 ml con agua destilada.
- Finalmente las muestras son llevadas a medición mediante ICP-Óptico.

Análisis Aniones

- Se pesan 250 miligramos de muestra en un vaso precipitado pirex de 80 ml.
- Se agregan 20 ml de agua destilada a cada porción de muestra, se agita manualmente y se deja disolver a temperatura ambiente durante 24 horas.
- Se realiza filtración de la muestra para eliminar partículas mayores a 0.2 micrómetros, utilizando filtro de celulosa de 0.2 micrómetros MFS.
- La muestra tratada se analiza por IC (Cromatografía Iónica) para determinar aniones solubles.

Análisis de Pérdida por Calcinación

- Se pesan 1 gramo de muestra en crisol de porcelana previamente tarado.
- Se calientan las muestras en mufla a 950°C por 2 horas.
- Las muestras son llevadas a desecador con sílica gel hasta peso constante.
- Se pesa las muestras tratadas y se mide la diferencia entre el peso inicial y el ya tratado para así determinar la pérdida de volátiles por calcinación.

11. ANEXO D: Composición Condrito Carbonaceo

Elemento	Concentración [ppm]
Y	1,570
La	0,237
Ce	0,613
Nd	0,457
Sm	0,148
Eu	0,056
Gd	0,199
Dy	0,246
Ho	0,055
Er	0,160
Yb	0,161
Lu	0,025

McDonough y Sun, 1995.

12. ANEXO F: Elementos Químicos en Agua Oceánica

Elemento	ppm	Elemento	ppm
H	110	Mo	0.01
O	883	Ru	0.0000007
Na	10,800	Rh	sin dato
Cl	19,400	Pd	sin dato
Mg	1,290	Ag	0.00028
S	904	Cd	0.00011
K	392	In	sin dato
Ca	411	Sn	0.00081
Br	67.3	Sb	0.00033
He	0.0000072	Te	sin dato
Li	0.170	I	0.064
Be	0.0000006	Xe	0.000047
Be	4.450	Cs	0.0003
C	28.0	Ba	0.021
N	15.5	La	0.0000029
F	13	Ce	0.0000012
Ne	0.00012	Pr	0.00000064
Al	0.001	Nd	0.0000028
Si	2.9	Sm	0.00000045
P	0.088	Eu	0.0000013
Ar	0.450	Gd	0.0000007
Sc	<0.000004	Tb	0.00000014
Ti	0.001	Dy	0.00000091
V	0.0019	Ho	0.00000022
Cr	0.0002	Er	0.00000087
Mn	0.0004	Tm	0.00000017
Fe	0.0034	Yb	0.00000082
Co	0.00039	Lu	0.00000015
Ni	0.0066	Hf	<0.00000
Cu	0.0009	Ta	<0.0000025
Zn	0.005	W	<0.000001
Ga	0.00003	Re	0.0000084
Ge	0.00006	Os	sin dato
As	0.0026	Ir	sin dato
Se	0.0009	Pt	sin dato
Kr	0.00021	Au	0.000011
Rb	0.120	Hg	0.00015
Sr	8.1	Tl	sin dato
Y	0.000013	Pb	0.00003
Zr	0.000026	Bi	0.00002
Nb	0.000015	Th	0.0000004

A 3,5% de salinidad. Karl, 1968.