



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE MINA LA NEGRITA 1/44 PARCELA
22, DISTRITO CERRO NEGRO, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE**

Zhi-Ping Lu Gómez
Copiapó, Chile, 2024



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE MINA LA NEGRITA 1/44 PARCELA
22, DISTRITO CERRO NEGRO, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE**

“Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título
de GEÓLOGO”

Profesor guía Dr. Karl Riveros Jensen

Zhi-Ping Lu Gómez
Copiapó, Chile, 2024

Dedicatoria

A mis queridos padres, en agradecimiento del amor, apoyo incondicional y las enseñanzas entregadas a lo largo de mi vida. Han sido mi guía y aliento a perseguir todos mis sueños. Su nobleza, amor y sabiduría han sido el motor que me impulsa en cada etapa de este camino. A través de su sacrificio han construido un hogar lleno de cariño y valores que siempre llevaré conmigo, sin importar donde me encuentre. Este logro también es suyo.

Agradecimientos

Antes que todo agradecer a Dios, también quisiera expresar mi profundo agradecimiento a todas aquellas personas que me han brindado su apoyo y acompañamiento durante todo este proceso académico, cuya culminación representa un hito importante en mi vida.

En primer lugar, me gustaría agradecer al Sr. Herman Bacho Cortés, dueño de la mina en donde realice el trabajo de titulación, quien desde el primer día tuvo toda su disposición hacia mí para poder realizar este estudio.

Agradecer también a los académicos del departamento de geología por todo lo entregado y su dedicación, especialmente a mi profesor guía Dr. Karl Riveros Jensen.

Para finalizar agradecer de igual manera a toda mi familia y amigos que me apoyaron y ayudaron todo este tiempo, quienes fueron un pilar fundamental en este proceso, sin ustedes nada hubiese sido posible.

Resumen

Mina La Negrita 1/44, parcela 22, concesionada por ENAMI al Sr. Herman Bacho, se encuentra ubicada dentro del distrito Cerro Negro, comuna de Chañaral, región de Atacama. Corresponde a la categoría de pequeña minería y extrae minerales de óxido de cobre del yacimiento Cerro Negro. El yacimiento está emplazado dentro de los depósitos volcánicos de la Formación La Negra y se encuentra estructuralmente controlado por una falla normal que forma parte del Sistema de Fallas de Atacama. Este estudio contempla la caracterización geológica de la mina, analizando por niveles la litología, mineralización y alteraciones, revelando cómo estas varían verticalmente. El muestreo de las frentes de los túneles de extracción se realizó mediante el método channel sampling. Se seleccionaron 15 muestras para ser descritas macroscópicamente y luego analizadas mediante fluorescencia de Rayos X, para determinar con mayor exactitud las concentraciones de elementos de interés económico y las posibles asociaciones minerales. Con los datos obtenidos se identificó la roca de caja como una andesita. La mineralización se encuentra hospedada por una brecha hidrotermal que contiene clastos de la roca de caja, magnetita y hematita con una matriz de óxidos de hierro. La mineralogía exhibe una zonación vertical del yacimiento, donde los sectores más someros del depósito presentan oxidación supérgena asociada a atacamita, brochantita y hematita, acompañada con una alteración intensa de limonitas ricas en jarosita y hematita. Los sectores más profundos se caracterizan por la ocurrencia de una zona hipógena con presencia de calcopirita, pirita y magnetita como mineral de mena y en las alteraciones se observan limonitas ricas en hematita con una intensidad baja y specularita con una intensidad moderada. Con respecto a la clasificación del yacimiento, se propone que los sectores someros se asocian a un modelo del tipo IOCG del subclan hematita, mientras que en profundidad podría transicionar a un yacimiento IOCG del subclan magnetita.

Abstract

La Negrita Mine 1/44, plot 22, concessioned by ENAMI to Mr. Herman Bacho, is located within the Cerro Negro district, Chañaral commune, Atacama region. It falls under the category of small-scale mining and extracts copper oxide minerals from the Cerro Negro deposit. The deposit is embedded within the volcanic deposits of the La Negra Formation and is structurally controlled by a normal fault that is part of the Atacama Fault System. This study involves the geological characterization of the mine, analyzing the lithology, mineralization, and alterations by levels, revealing how these vary vertically. Sampling of the extraction tunnels' faces was conducted using the channel sampling method. Seventeen samples were selected for macroscopic description and then analyzed using X-ray fluorescence to determine more accurately the concentrations of economically important elements and possible mineral associations. With the obtained data, the enclosing rock was identified as andesite. The mineralization is hosted by a hydrothermal breccia containing clasts of the host rock, magnetite, and hematite with a matrix of iron oxides. The mineralogy exhibits a vertical zoning of the deposit, where the shallower sectors of the deposit show supergene oxidation associated with atacamite, brochantite, and hematite, accompanied by intense alteration of limonites rich in jarosite and hematite. The deeper sectors are characterized by the occurrence of a hypogene zone with the presence of chalcopyrite, pyrite, and magnetite as ore minerals, and in the alterations, limonites rich in hematite with low intensity and specularite with moderate intensity are observed. Regarding the classification of the deposit, it is proposed that the shallower sectors are associated with a hematite subclan IOCG model, while at depth, it could transition to a magnetite subclan IOCG deposit.

Índice de contenidos

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema de investigación	1
1.2 Ubicación y accesos	2
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Hipótesis	5
Capítulo 2: MARCO TEÓRICO	6
2.1 Yacimientos tipo IOCG.....	6
Capítulo 3: MARCO GEOLÓGICO	9
3.1 Geología regional	9
3.1.1 Contexto geológico.....	9
3.1.2 Geología Estructural: Sistema de Fallas de Atacama.	11
3.1.3 Franja Ferrífera Chilena.....	13
3.2 Geología local.....	14
3.2.1 Formación La Negra (Jln) (Pliensbachiano?-Jurásico Superior) (García, 1967)	14
3.2.2 Distrito Cerro Negro	15
Capítulo 4: METODOLOGÍA	17
4.1 Trabajo pre-terreno	17
4.2 Trabajo de terreno	17
4.2.1 Mapeo superficial	17
4.2.2 Muestreo de niveles	17
4.3 Trabajo de gabinete	18
4.3.1 Descripción petrográfica.....	18
4.3.2 Geoquímica.....	19
Capítulo 5: RESULTADOS	20
5.1 Generalidades	20
5.2 Litología, alteración y mineralización.....	23
5.3 Geoquímica	28

Capítulo 6: DISCUSIONES	32
6.1 Unidades litológicas	32
6.2 Geoquímica de las muestras	32
6.2.1 Correlación de datos geoquímicos	36
6.3 Modelo de yacimiento	40
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones.....	44
Referencias	46
Anexos	51

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema de investigación

La provincia metalogénica de la Cordillera de la Costa en Chile alberga casi la totalidad de los yacimientos de óxidos de hierro-apatito (IOA) y los de óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG), yacimientos como Cerro Negro Norte, Cerro Imán, Los Colorados, Mantoverde, Candelaria, entre otros. Estos yacimientos alineados en el segmento norte de la Cordillera de la Costa Chilena (25-31°S) forman La Franja Ferrífera Chilena (FFC) (Veloso, E. et al., 2016; Vivallo, W., Díaz, A., Jorquera, R., 2009; Sillitoe, 2003).

La FFC está fuertemente controlada por el Sistema de Fallas de Atacama (SFA), que corre paralelo al margen de subducción actual, generando deformación y facilitando la canalización de actividad magmática-hidrotermal y la mineralización (Tornos et al., 2011). Dentro de este contexto, el presente estudio se centra en la mina La Negrita, ubicada en el distrito Cerro Negro, a 26 km al norte de El Salado, en la región de Atacama. Este sector está controlado estructuralmente por el Segmento El Salado del SFA (Maksaev y Zentilli, 2002).

Mina La Negrita no posee una caracterización geológica detallada, lo que limita la comprensión del yacimiento y de los procesos que han dado lugar a su mineralización. Actualmente, no se dispone de información sobre la mineralogía de mena, la configuración litológica ni las alteraciones que podrían influir en su potencial económico. Por ello, este trabajo se propone como objetivo fundamental la caracterización geológica de la mina, a través de estudios petrográficos y geoquímicos, con el fin de proporcionar información valiosa que permita optimizar su explotación y ampliar el conocimiento geológico de la región.

1.2 Ubicación y accesos

Mina La Negrita está dentro del distrito minero Cerro Negro y se encuentra ubicada a 26 km al norte de la localidad minera El Salado, comuna de Chañaral, región de Atacama, Chile (Figura 1). La propiedad minera correspondiente es La Negrita 1/44, parcela 22 que está delimitada por las siguientes coordenadas UTM: (1) N 7.102.325; E 373.550, (2) N 7.102.070; E 373.550, (3) N 7.102.070; E 373.870, (4) N 7.102.325; E 373.870 (Figura 3).

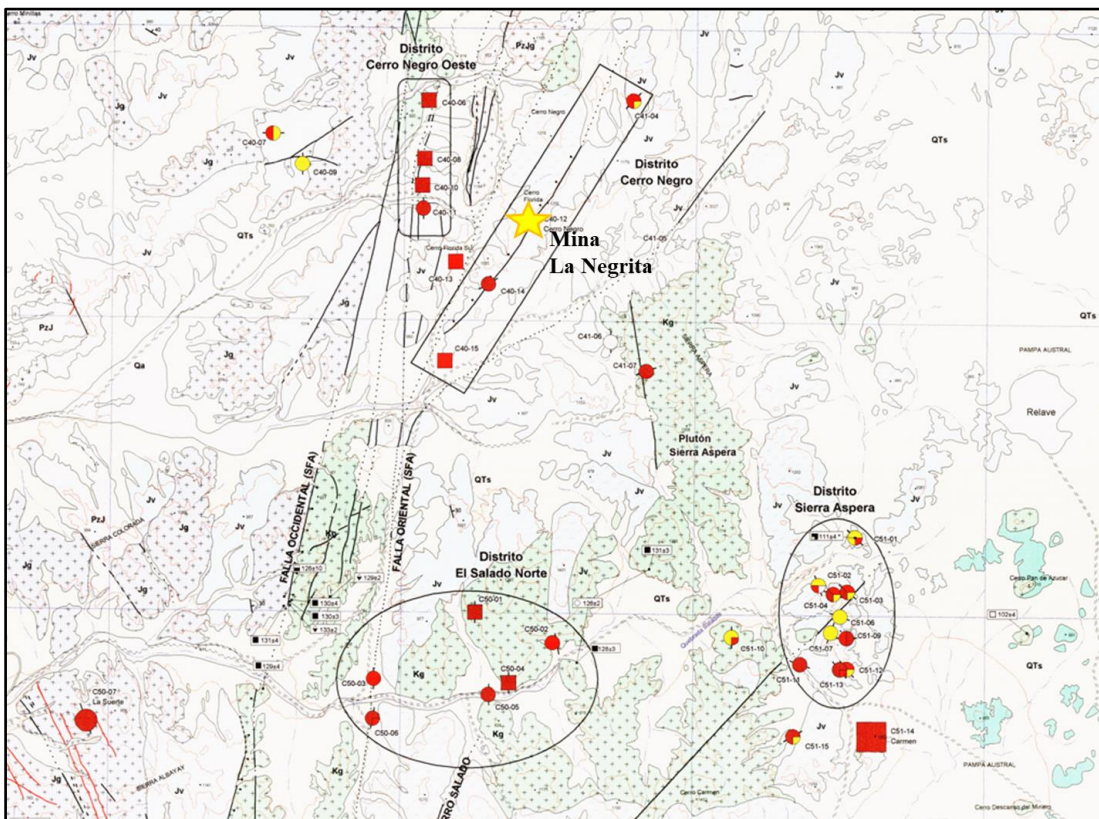


Figura 1: Ubicación de la mina La Negrita, modificado del mapa de recursos minerales de Chile, hoja Chañaral y Diego de Almagro, Gelcich, et al. (1998).

El acceso a la mina desde la ciudad de Chañaral tomando como punto de inicio la Plaza de Armas es por calle Buin en dirección Este por 300 m, virar hacia el Norte por la calle Los Baños durante 350 m y tomar la Ruta 5 S, continuar por esta vía por 14 km hasta el cruce a Chañaral y tomar el desvío por la ruta C-13 durante 20 km, llegando a la localidad

minera El Salado tomar la ruta C-125 avanzando hacia el Norte 27 km, luego virar a la derecha tomando la ruta de servicio C-137 durante 1 km y virar hacia la derecha hacia el camino de tierra que lleva a la entrada de mina La Negrita, la ruta se puede observar en la Figura 2.

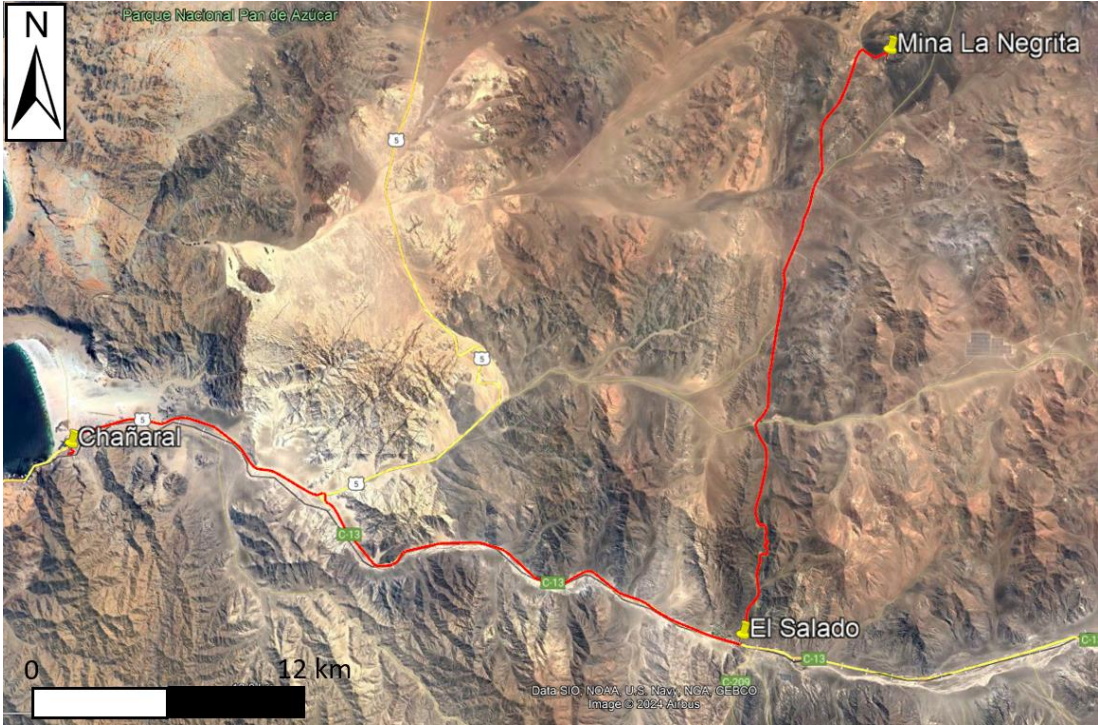


Figura 2: Ruta de acceso a mina La Negrita desde la Plaza de Armas de la ciudad de Chañaral, modificado de Google Earth.



Figura 3: Polígono correspondiente a la propiedad minera La Negrita 1/44, Parcela 22. Escala 1:1.800, con coordenadas UTM, datum WGS 84, huso 19S .

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Generar un modelo geológico para la mina La Negrita 1/44, parcela 22.

1.3.2 Objetivos específicos

- Definir litología, mineralización y alteración asociada al depósito.
- Determinar la zonación mineralógica vertical del depósito.
- Clasificar el tipo de yacimiento y estilo de mineralización.

1.4 Hipótesis

Mina La Negrita corresponde a un yacimiento tipo IOCG y pertenece a la FFC, dentro de la mina existe una zonación vertical en la que se puede apreciar como en profundidad los óxidos de cobre y hematita comienzan a disminuir sus concentraciones y se pueden encontrar indicios de minerales de cobre sulfurados y de magnetita, representando una fase de transición de óxidos a sulfuros.

Capítulo 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Yacimientos tipo IOCG

Los yacimientos IOCG corresponden a depósitos magmáticos-hidrotermales, es decir que son formados a partir de la actividad hidrotermal provocada por la intrusión de cuerpos ígneos emplazados en la corteza terrestre (Barton y Johnsons, 1996). La denominación de los yacimientos IOCG se deriva de la mineralogía principal que los compone, óxidos de hierro-cobre-oro (Iron oxide-copper-gold) y están definidos principalmente por las elevadas cantidades de magnetita y/o hematita (Hitzman, et al., 1992; Sillitoe, 2003; Williams, 2005).

Estos depósitos minerales son globalmente relevantes y corresponden a la segunda fuente de cobre más importante después de los pórfidos cupríferos, tienen una amplia distribución espacial y en el tiempo geológico, formándose desde el Arcaico hasta el Fanerozoico, y presentan ocurrencias en todos los continentes, excepto en la Antártica (Barton, 2014; Yang, 2018). La mayor parte de estos depósitos contienen más del 10% de óxidos de Fe y tienen bajas concentraciones de Ti en combinación con elevadas concentraciones de Cu, Au, REE, P, U, Ag y Co, que tienden a estar estructuralmente o estratigráficamente controlados y espacialmente asociados con un metasomatismo de Na-Ca-K intenso y voluminoso (Ridley, 2013). El estilo de mineralización puede ser muy variado encontrando cuerpos masivos, vetas, stockworks, brechas y de forma diseminada (Barra, et al., 2017).

La génesis de la mineralización aún es materia de discusión en donde se plantean dos modelos principales en base a la fuente o fuentes de los fluidos mineralizadores, representados en la Figura 4, donde: a) origen magmático propuestos por Sillitoe (2003), Tornos et al. (2005) y Pollard (2006) b) origen no magmático en donde los fluidos son aportados por cuencas sedimentarias ricas en evaporitas, en donde los cuerpos intrusivos actúan como fuente de calor, modelo propuesto por Barton y Johnson (2000).

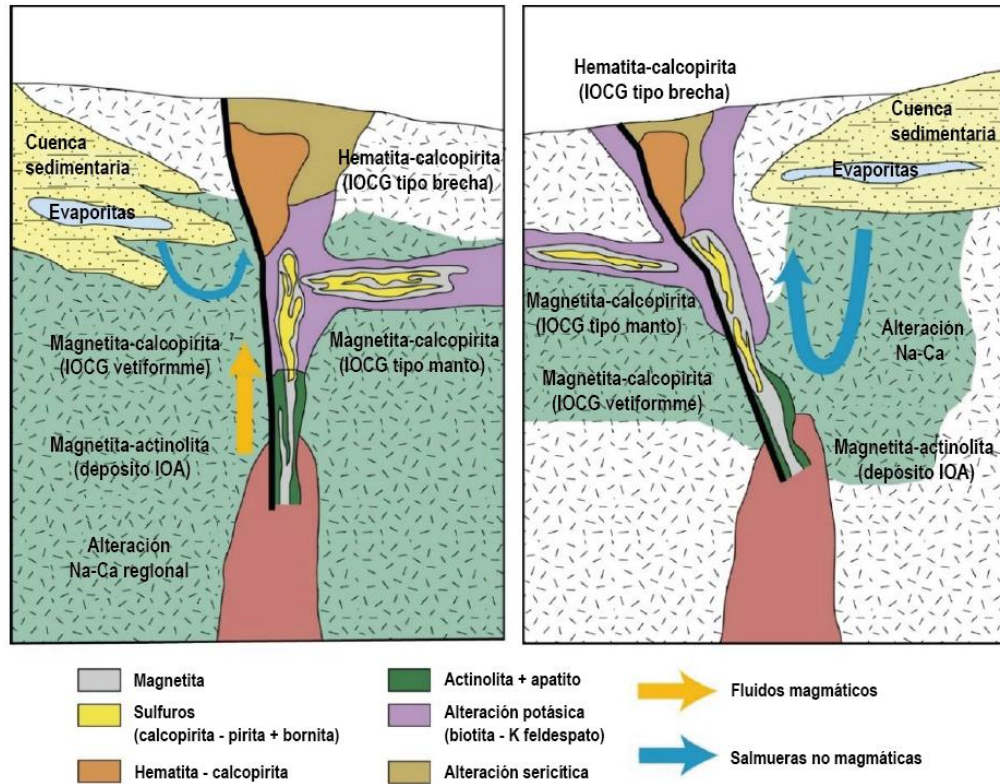


Figura 4: Representación esquemática de los modelos para la génesis de los fluidos mineralizadores en yacimientos tipo IOCG conectados en profundidad a un yacimiento tipo IOA. A) Modelo magmático-hidrotermal en donde los fluidos son de origen principalmente magmático. B) Modelo en donde los fluidos son aportados por cuencas sedimentarias y posteriormente calentados por fuentes ígneas. Los metales son lixiviados de las rocas volcánicas. Modificado de Barra et al. (2017).

La mineralización de los depósitos IOCG está sujeta a una zonación vertical que según algunos autores se conecta en profundidad con yacimientos IOA o tipo Kiruna que representan a la raíz estéril en Cu del clan IOCG, ejemplificado en la Figura 5, teniendo en la zona inferior una predominancia de magnetita-actinolita-apatito y en la zona superior hematita specular-clorita-sericita con mineralizaciones de Cu-Au-Co-Ni-As-Mo-U-LREE (Espinoza et al, 1996; Sillitoe, 2003; Tornos et al, 2005; Barra et al, 2017; Knipping, 2015).

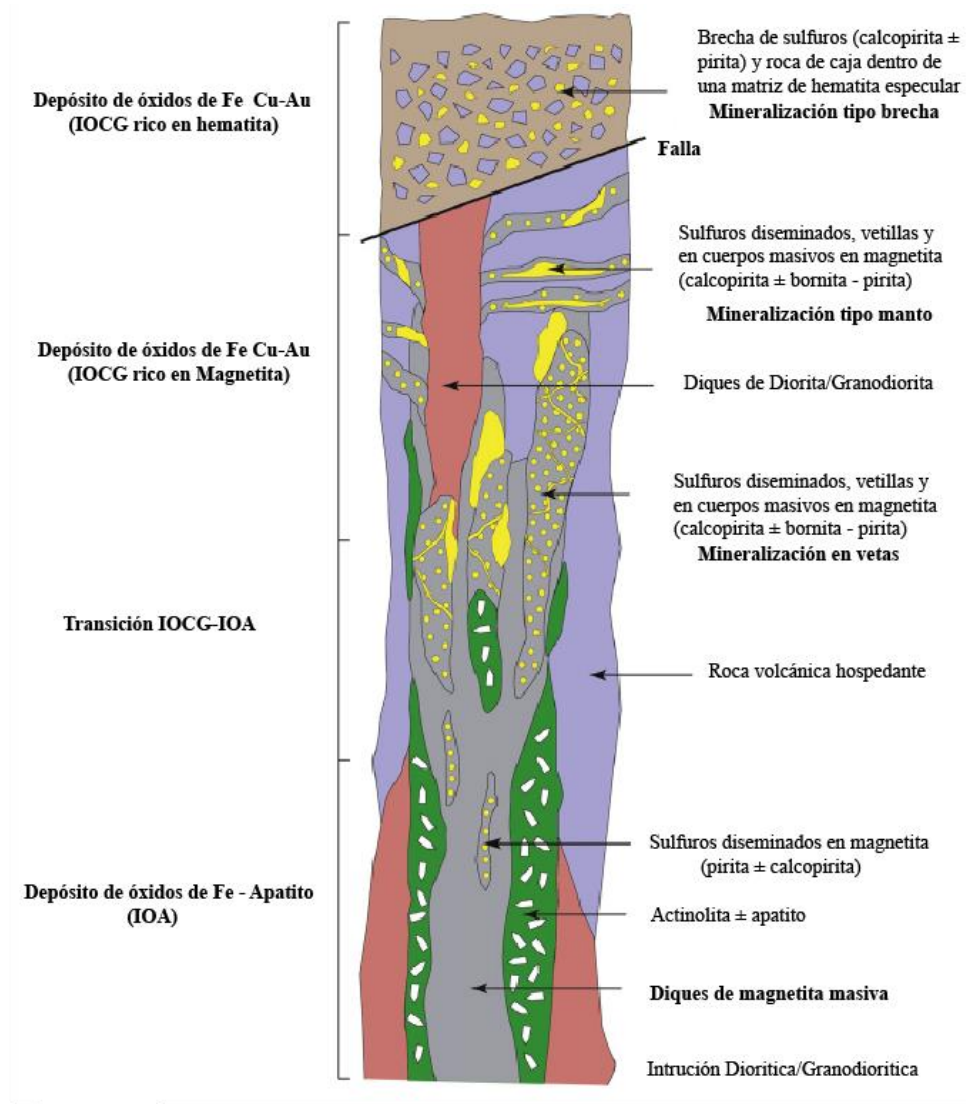


Figura 5: Representación no escalada de la zonación vertical de un yacimiento IOCG conectado en profundidad con un depósito IOA. Modificado de Barra et al. (2017).

Capítulo 3: MARCO GEOLÓGICO

3.1 Geología regional

3.1.1 Contexto geológico

Como consecuencia de los acontecimientos tectónicos en los Andes Centrales de Perú y Chile durante el Jurásico hasta el inicio del Cenozoico, prevaleció un régimen extensional relacionado a un *roll back* de la placa subductante, lo que condujo a una subducción de alto ángulo o tipo Mariana (Mpodozis y Ramos, 1990). Este proceso dio origen a una compleja paleogeografía, debido al desarrollo simultáneo de cuencas de antearco y retroarco, así como otras de tipo transtensional ligadas al movimiento sinistral del Sistema de Fallas de Atacama. Dentro de estas cuencas sedimentarias en el norte de Chile, se encuentran sucesiones de depósitos volcanoclásticos que evidencian el desarrollo de un arco magmático N-S paralelo a la subducción al margen continental, como se ve en la Figura 6 (Benedetto, 2019, Charrier et al. 2007).

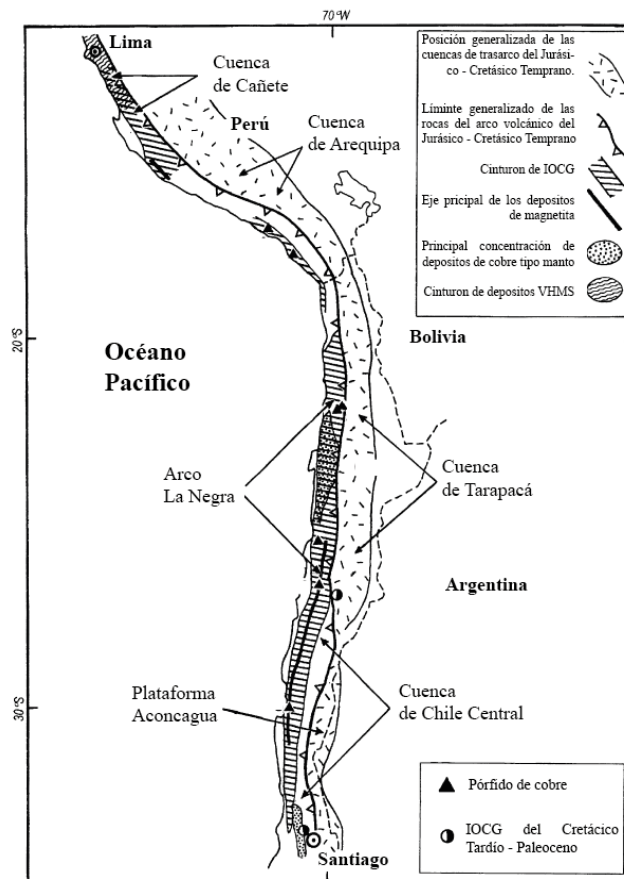


Figura 6: Ubicación del cinturón de IOCG de los Andes del sur de Perú y norte de Chile con respecto al arco magmático Jurásico-Cretácico y una serie de cuencas de retroarco interconectadas. También se destacan las principales provincias metalogénicas con el tipo de yacimiento dentro del cinturón de IOCG. Modificado de Sillitoe (2003).

El periodo entre el Jurásico Inferior y la parte final del Cretácico Inferior corresponde a la primera etapa del Ciclo Andino, que se divide en dos subetapas. La primera subetapa (Figura 7a) contempla desde el Jurásico Inferior hasta el Kimmeridgiense, donde la actividad volcánica es intensa, desarrollando el arco magmático La Negra, extendiéndose desde los 19°S hasta los 33°S. Este período está acompañado de un ciclo de transgresión-regresión en el trasarco. La segunda subetapa (Figura 7b), definida entre el Kimmeridgiense y Aptiense-Albiense, se caracteriza por una reducción en la actividad magmática del arco y una migración paulatina del mismo hacia el Este (Formación Punta del Cobre) (Scheuber y Gonzalez, 1999; Charrier et al., 2007).

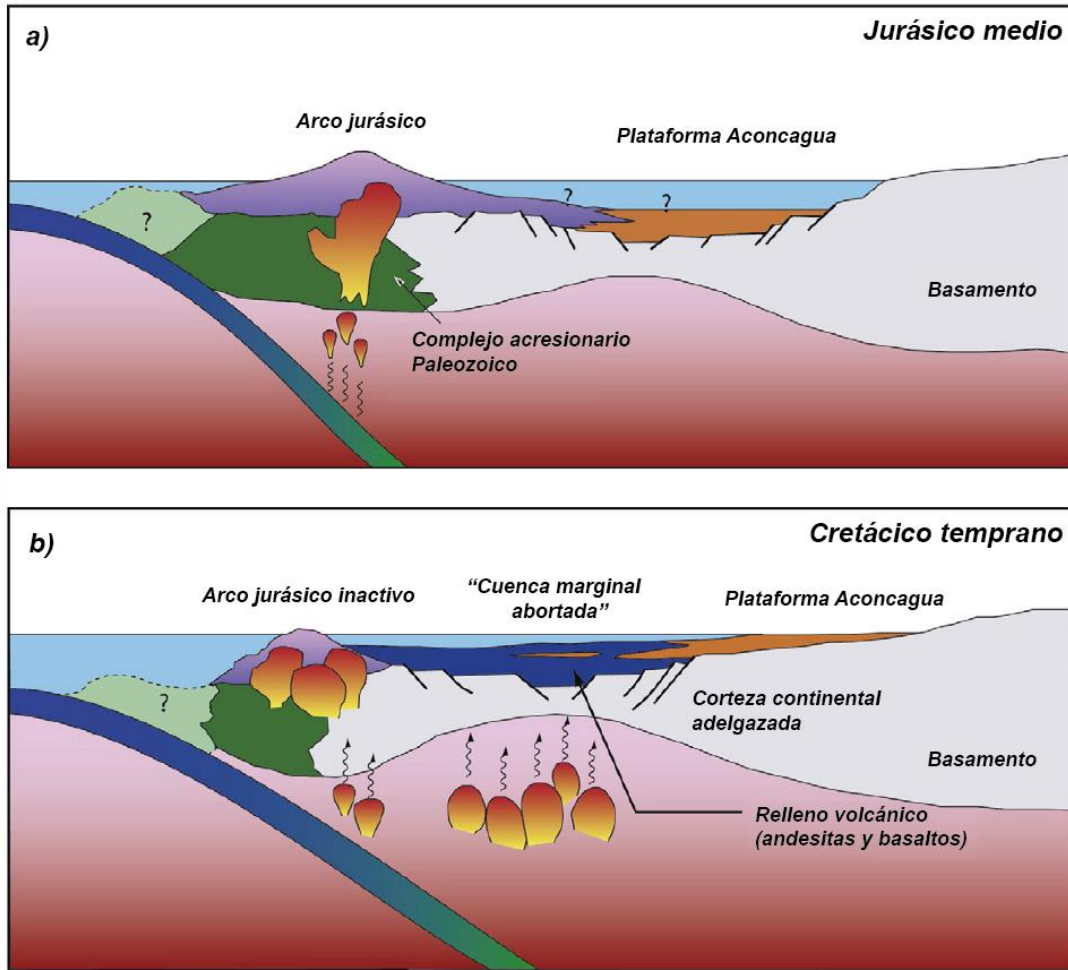


Figura 7: Modelo esquemático de la evolución tectonomagmática en el norte de Chile entre los 27°S y 33°S. Este segmento se caracteriza por un arco magmático jurásico y una cuenca sedimentaria de trasarco (a), posteriormente durante el Cretácico Inferior se desarrolla una cuenca marginal abortada y la emersión de grandes volúmenes de rocas volcánicas. Modificada de Mpodozis y Ramos (2017).

3.1.2 Geología Estructural: Sistema de Fallas de Atacama.

Los sistemas estructurales en la región del antearco en los Andes Centrales se asocian al Sistema de Fallas de Atacama (SFA), el cual se extiende por más de 1.000 km desde la ciudad de Iquique (21°S) hasta La Serena (30°S) y presenta un desplazamiento de rumbo de carácter sinistral transtensional (Scheuber y González, 1999; Cembrano et al., 2005). Se encuentra predominantemente orientado hacia el N-NW y está dividido en tres

segmentos principales: a) Salar del Carmen, b) Paposo, y c) El Salado (Figura 8) (Masoch et al., 2021).

A gran escala, el SFA se formó desde el Jurásico Superior hasta el Cretácico Inferior a lo largo del arco magmático Jurásico como respuesta a la convergencia oblicua entre la placa Fénix y la Sudamericana. La geometría, cinemática y momento de deformación han sido bien documentados a escala regional, donde la mayoría de los autores coinciden en que la deformación intra-arco comienza con un régimen dúctil sinistral transtensional, provocado por una subducción de alto ángulo y un bajo acople entre placas. Este evoluciona a un régimen frágil transpresional sinistral al aumentar la tasa de convergencia entre placas, generando mayor acoplamiento. Esto, acompañado de una disminución del ángulo de subducción, que cesó el magmatismo en el arco, provocando un enfriamiento que condujo a una deformación frágil, expresándose como un sistema de fallas con rumbo N y NW (Scheuber y Andriessen, 1990; Scheuber y González, 1999; Grocott y Taylor, 2002).

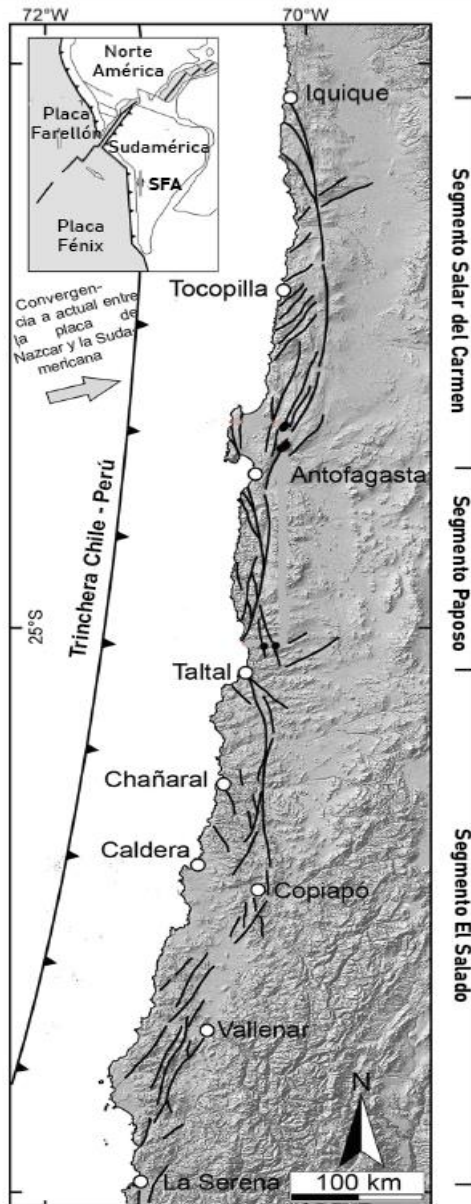


Figura 8: Configuración tectónica del SFA en la Cordillera de la Costa señalando la geometría a escala de sus tres segmentos principales. Modificado de Masoch et al. (2021).

3.1.3 Franja Ferrífera Chilena.

La Franja Ferrífera Chilena es una provincia metalogénica de aproximadamente 600 km que se extiende a lo largo de la Cordillera de la Costa entre las latitudes 25°30'S y 31°S. Esta región alberga los yacimientos IOA e IOCG en el Norte de Chile (Henriquez et al., 1994; Vivallo et al., 2000; Tornos, 2012). El origen de la mineralización ocurre hacia el

Cretácico Superior, convirtiéndose en la franja de IOCGs más joven del mundo (Gelcich et al., 2005; Barra et al., 2017).

La mayoría de los yacimientos se encuentran hospedados por unidades volcánicas y volcanoclásticas del Jurásico (Formación La Negra), y del Cretácico (Formación Punta del Cobre), generalmente asociados a plutones dioríticos de edad cretácica y controlados estructuralmente por el Sistema de Fallas de Atacama (Espinoza, 1990; Sillitoe, 2003; Selles, 2015).

3.2 Geología local

La geología del distrito Cerro Negro se encuentra descrita en la Carta Geológica “Hoja Chañaral y Diego de Almagro, escala 1:100.000” (Godoy y Lara, 1998) y en el Mapa de recursos minerales de Chile “Yacimientos metalíferos de las Hojas Chañaral y Diego de Almagro, escala 1:100.000” (Gelcich et al., 1998).

El distrito Cerro Negro se encuentra hospedado en su totalidad por secuencias volcánicas de la Formación La Negra, las cuales hacia el Este se encuentran cubiertas por secuencias volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Punta del Cobre, y localmente intruida por el Plutón Sierra Áspera, el cual no aflora dentro del distrito Cerro Negro.

El rasgo estructural predominante corresponde a una falla normal de rumbo NE, que corta todo el distrito controlando la mineralización.

3.2.1 Formación La Negra (Jln) (Pliensbachiano?-Jurásico Superior) (García, 1967)

La Formación La Negra aflora a lo largo de la Cordillera de la Costa entre Arica y Chañaral. Consiste en lavas de andesita y andesita basáltica, brechas volcanoclásticas con intercalaciones de sedimentos marinos y continentales (Mpodozis y Ramos, 1990, Grocott, 2002).

Los afloramientos en el distrito Cerro Negro corresponden al Miembro 2 de la formación, específicamente a la sub-unidad (a).

Miembro 2 (Jln2):

El Miembro 2, hacia el Este en la Quebrada Pan de Azúcar, sobreyace al Miembro 1 (Jln1) mientras que hacia el Sur, en Sierra Minillas, lo hace sobre la Formación Pan de Azúcar. Esta unidad se encuentra subdividida en 5 subunidades que están formadas principalmente por 2.000 m de (a) lavas andesíticas grises y negras de piroxeno que se intercalan con (b) areniscas, (c) areniscas calcáreas, (d) delgadas ignimbritas riolíticas e (e) intrusivos andesíticos filonianos.

Los afloramientos de la subunidad (a) al Este del SFA están mayoritariamente representadas por coladas fluidales y ocasionalmente amigdaloidales de espesores métricos, que incluyen niveles piroclásticos con bombas de hasta 50 cm de diámetro. En el sector al noreste de El Salado, las lavas presentan silicificación y alteración argílica donde se desarrolla pumpellita en amígdalas. Poseen una textura afieltrada y/o porfídica, contienen olivino totalmente alterado y clinopiroxeno predominante por sobre el ortopiroxeno, ambos reemplazados por anfíboles, calcita, clorita y esfeno, especialmente en las cercanías del Plutón Sierra Áspera al Sureste del sector de estudio.

3.2.2 Distrito Cerro Negro

El distrito minero Cerro Negro está ubicado 26 km al Norte de la localidad minera de El Salado. Se extiende a lo largo de una franja con orientación NE de aproximadamente 10 km de largo y 2 km de ancho. Según los registros del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), el distrito contiene 9 yacimientos minerales pequeños, de los cuales la mayoría se encuentran controlados por una gran falla normal de rumbo NE que atraviesa al distrito en toda su longitud. Explotando los yacimientos del distrito se encuentran numerosas instalaciones mineras correspondiente a pequeña minería, en la Tabla 1 se detalla información de los yacimientos extraída del Portal SERNAGEOMIN.

Tabla 1: Nombre, ubicación y mineral de mena de los yacimientos ubicados en el distrito Cerro Negro.

Nombre	Norte UTM	Este UTM	Recurso extraído
Fe 1	7100862	372700	Fe
Cerro Negro	7102981	374170	Cu-(Fe,Au)
Las Negritas	7103300	374700	Cu
Marite 1/3	7106200	376650	Cu
Paulina 1/5	7106750	377300	Cu
Ignacia	7107091	377810	Cu-(Au)
Alicia	7107467	378049	Cu
Virginia	7107683	377886	Cu-(Au)
Estrella	7107913	378424	Cu-(Au)

Capítulo 4: METODOLOGÍA

En este capítulo se detalla la metodología utilizada para llevar a cabo este estudio. Se describen todas etapas empleadas para la obtención de los resultados de la investigación.

4.1 Trabajo pre-terreno

En esta primera etapa se recibió información interna de la mina y se definieron los puntos a tratar en la investigación. Luego se reunió información bibliográfica relacionada al sector de estudio, sobre los yacimientos IOCG y geología regional. La información se extrajo de artículos científicos, libros, tesis, cartas geológicas, información pública del SERNAGEOMIN e informes particulares internos.

4.2 Trabajo de terreno

El trabajo en terreno contempló un total de 7 días, donde se realizó un mapeo geológico de mina La Negrita y el muestreo de la mina.

4.2.1 Mapeo superficial

Se realizó un mapeo superficial de la concesión minera de 81.500 m², a escala 1:1.800 (Figura 3). Durante este proceso, se muestrearon las distintas litologías presentes en el sector y se recolectaron muestras de roca de caja para análisis posteriores. También se llevó a cabo un seguimiento de la estructura mineralizada dentro de la parcela, registrando el rumbo y manteo en notación tipo americano, así como la mineralización de mena y alteración.

4.2.2 Muestreo de niveles

Para la recolección de muestras en interior mina, primero se identificaron los niveles de forma ascendente, siendo el Nivel 1 (N1) el más cercano a la superficie y el Nivel 4 (N4) el más profundo.

El muestreo se realizó de igual forma en todos los niveles, utilizando el método channel sampling en la frente norte de cada nivel. Este método consiste en la obtención de muestras realizando una línea recta de forma perpendicular a la estructura mineralizada, como está señalado en la Figura 9. En total, se recolectaron 5 bolsas de muestras de aproximadamente 2 kg cada una, una por cada nivel y una de roca de caja. Se seleccionaron las muestras más representativas para la descripción petrográfica y análisis de fluorescencia de rayos X (XRF).



Figura 9: Imágenes de los frentes de explotación de los niveles 2, 3 y 4 señalando en rojo la zona de muestreo.

4.3 Trabajo de gabinete

Una vez recolectada la información en terreno se procede a la obtención de los resultados mediante las metodologías detalladas a continuación.

4.3.1 Descripción petrográfica

Se llevó a cabo la descripción petrográfica detallada de las muestras utilizando métodos macroscópicos involucrando el uso de lupa de mano, rayador, ácido e imán. Se realizó una observación minuciosa de las características minerales, físicas y magnéticas de las muestras.

Se describieron un total de 15 muestras, las cuales fueron debidamente etiquetadas y empacadas para realizarles análisis geoquímicos mediante fluorescencia de rayos X.

4.3.2 Geoquímica

Las muestras seleccionadas se sometieron a análisis de fluorescencia de rayos X con la finalidad de cuantificar los elementos químicos presentes en las muestras de roca. Para este análisis se utilizó el equipo portátil de XRF modelo S1 TITAN del Laboratorio de Geología Económica del Departamento de Geología de la Universidad de Atacama.

El analizador portátil funciona aplicando la técnica de XRF, que consiste en excitar la muestra con rayos X. Esta interacción con los átomos de la muestra provoca la emisión de radiación fluorescente. La intensidad y energía de la radiación fluorescente están relacionadas con los elementos presentes en la muestra y sus concentraciones. La radiación es captada por un detector sensible incorporado en el equipo, luego es recolectada, procesada y comparada con una base de datos que contiene las firmas de rayos X de diferentes elementos. Finalmente entrega un listado de los elementos en la muestra y sus respectivas concentraciones.

Los elementos obtenidos se representaron en gráficos de cajas y bigotes (box plot) para visualizar concentraciones y distribución estadística, y a través de gráficos dispersión para analizar las asociaciones de elementos. Esto permitió identificar correlaciones en los elementos, con especial énfasis en los elementos estratégicos de interés económico, como el Cu, Au y Co.

Capítulo 5: RESULTADOS

En el siguiente capítulo se presentan los datos obtenidos durante la investigación en la mina La Negrita, detallando la estructura de la mina, su litología, mineralogía de mena, alteraciones y las concentraciones de los elementos de interés, específicamente cobre (Cu), oro (Au) y cobalto (Co).

5.1 Generalidades

Mina La Negrita 1 al 44, parcela 22, se encuentra dentro de la propiedad minera Negrita 1-44 perteneciente a ENAMI y mantiene un contrato de arriendo con el Sr. Herman Bacho Cortés. Litológicamente en la parcela solo afloran andesitas porfíricas (Aln), las cuales a en la base del cerro se encuentran sobreyacidas por depósitos coluviales con clastos de andesitas (Qco) y aporte de clastos cuaternarios de la actividad minera (Qd) en el distrito (Figura 10).

La mina extrae mineral del yacimiento Cerro Negro, ubicado en el distrito minero Cerro Negro. El estilo de mineralización es una gran estructura vetiforme asociada a zonas de brecha hidrotermal. El rasgo estructural principal, que se encuentra controlando no solo el yacimiento sino el distrito Cerro Negro, es una falla normal de orientación N45E;60NW, de aproximadamente 10 km de longitud.

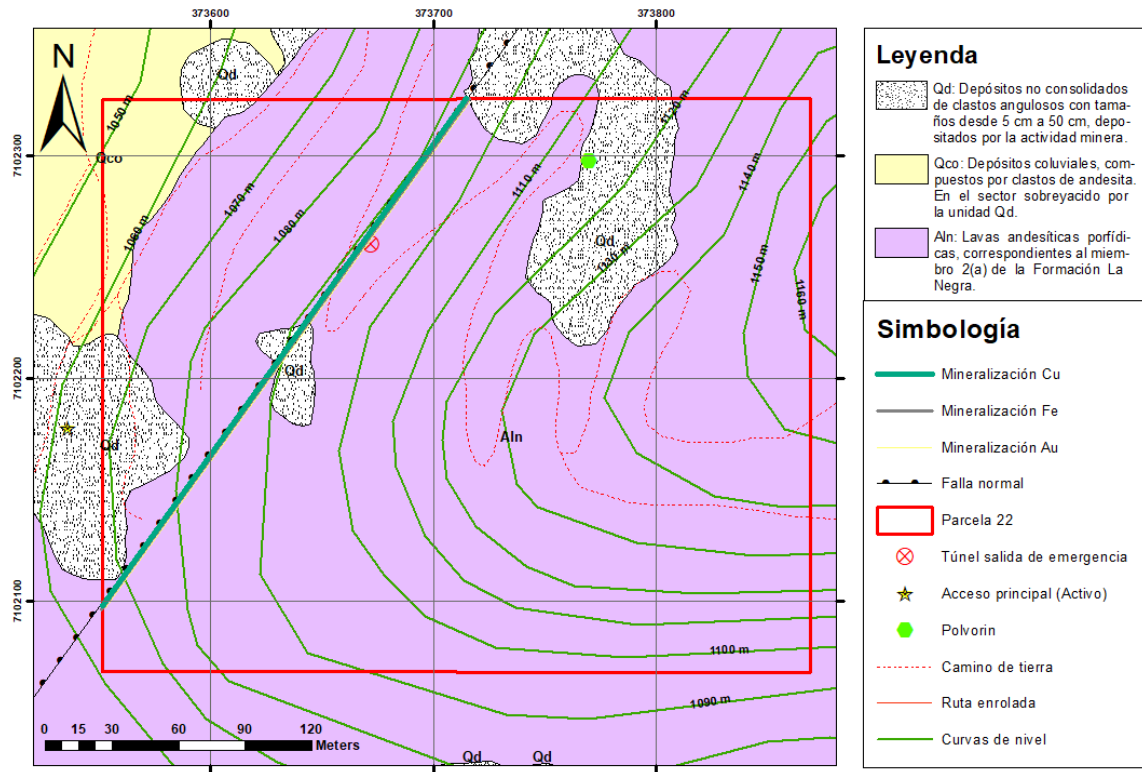


Figura 10: Mapa geológico 1:1.800, de La Negrita 1/44, parcela 22. Confeccionado con coordenadas UTM, Datum WGS 84, Huso 19S.

El método de explotación del yacimiento es subterráneo y por niveles. El primer nivel tiene acceso individual, ubicado en la cota 1.080 m, y está interconectado con el socavón principal, siendo utilizado sólo como salida de emergencia (Figura 11b). La entrada principal es un túnel de aproximadamente 75 m, en la cota 1.060 m (Figura 11a), que conecta hacia el NW con el Nivel 2 de la mina y al SW conecta con una zona antigua de la mina, ya explotada y clausurada (Figura 11c).



Figura 11: Imágenes del interior mina. a) entrada principal al socavón. b) salida de emergencia, conexión al Nivel 1. c) excavación antigua clausurada.

Todos los niveles de la mina están contruidos siguiendo la estructura mineralizada con orientación N45E, interconectando los tres últimos niveles por rampas, como se ve en el modelo 3D de las Figuras 12 y 13, modelo que no incluye el último nivel de la mina (N4). En total, se registran 700 m de avances con una profundidad total de aproximadamente 90 m.

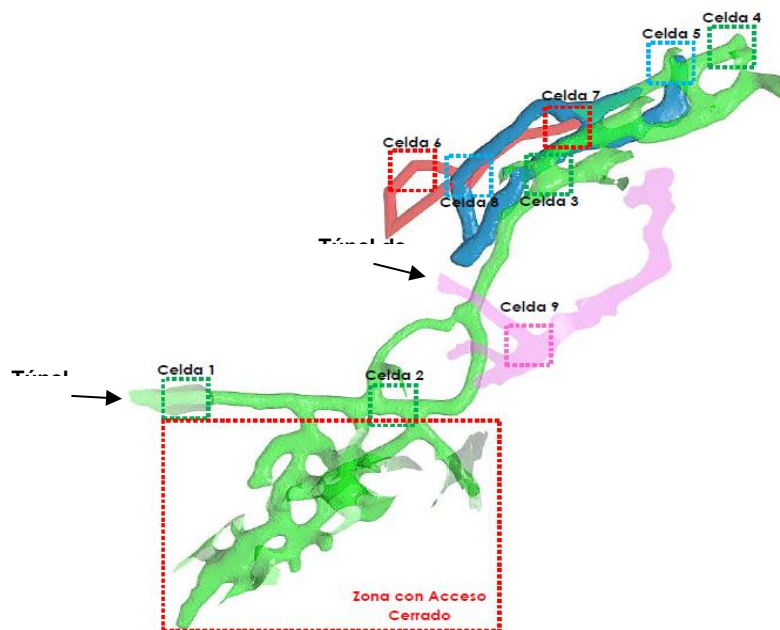


Figura 12: Modelo 3D de mina La Negrita vista de planta, modificado de Godoy, 2023.

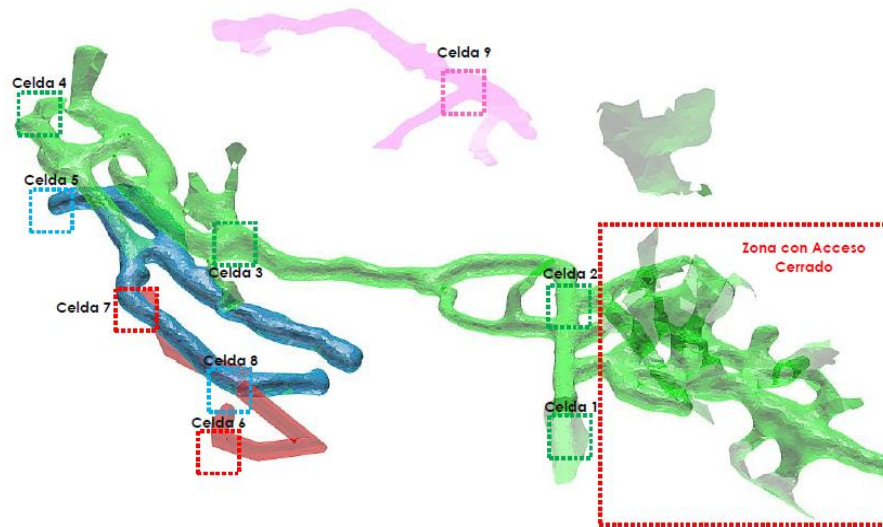


Figura 13: Modelo 3D de mina La Negrita vista lateral, extraído de Godoy, 2023.

5.2 Litología, alteración y mineralización

a) Unidad de andesitas:

La roca de caja del depósito corresponde a una andesita (Figura 14) con textura porfídica. Mineralógicamente, se reconocen fenocristales de plagioclasa de 2 a 3 mm, euhedrales, que constituyen un 40% de la roca, y anfíboles de 1 a 2 mm, alterados levemente a clorita. La masa fundamental es afanítica de color gris. En la mayoría de los afloramientos dentro de la parcela 22, se observa una alteración argílica leve y presencia de limonitas ricas en hematita y jarosita.



Figura 14: Fotos de la roca de caja, se observan cristales de plagioclasa dentro de una masa fundamental microcristalina, con una alteración de arcillas y limonitas.

b) Unidad de brechas hidrotermales:

La litología asociada a la mineralización corresponde a una brecha hidrotermal con matriz de hematita y en los niveles más profundos (N3 y N4) se detectan pequeñas cantidades de magnetita.

En el sector más somero de la mina, el Nivel 1 (N1), la brecha hidrotermal contiene clastos de hematita, magnetita y andesita (roca de caja) que no superan 2 cm en promedio, son angulosos y constituyen el 20% de la roca (Figura 15b). La matriz de hematita se encuentra intensamente alterada a limonitas ricas en jarosita. La mineralización en este nivel se manifiesta principalmente en forma de crisocola y atacamita, presentes tanto en vetillas como, en ocasiones, diseminadas en la matriz (Figura 15a). Adicionalmente, se observa una alteración argílica de grado leve, junto con clorita y epidota, también de intensidad leve.

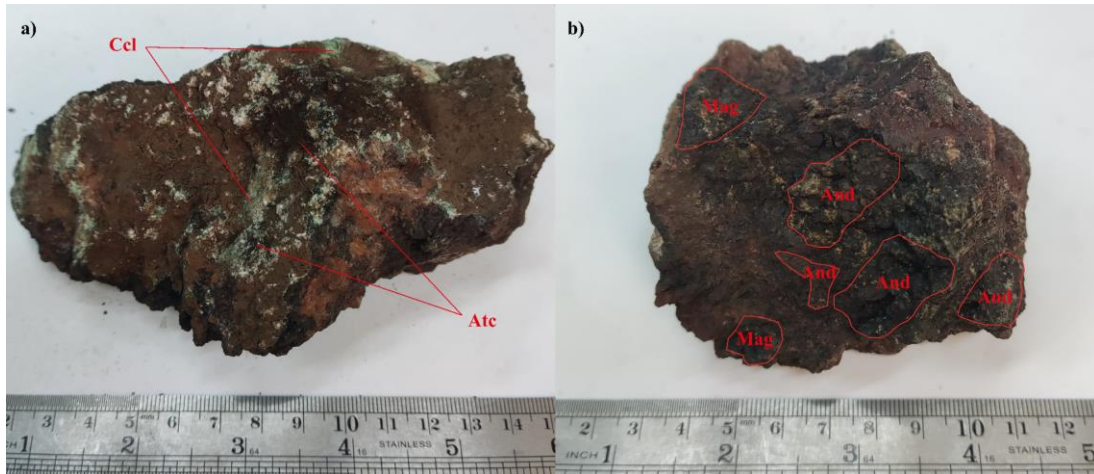


Figura 15: Foto de muestras del N1. Brechas hidrotermales de hematita altamente alterada a limonitas ricas en jarosita. a) Presenta mineralización de atacamita (Atc) y crisocola (Ccl) y alteración argílica. b) Presenta clastos de la roca de caja (And) y magnetita (Mag).

La litología del Nivel 2 (N2) corresponde a una brecha hidrotermal oligomíctica, matriz soportada, con matriz de óxidos de hierro principalmente hematita, similar en composición a la observada en el N1. En este nivel, se aprecia una disminución de las limonitas y una mayor presencia de especularita dentro de la matriz (Figura 16b). Los clastos, de bordes muy angulosos y con un tamaño promedio de 2 a 3 cm, están compuestos por andesitas porfídicas de la roca de caja y magnetitas (Figura 16c y 16d). La mineralización está presente en los minerales de cobre oxidado atacamita con trazas de crisocola (Figura 16a). Con respecto a las alteraciones se identifica epidota y una alteración argílica, ambas de intensidad leve.

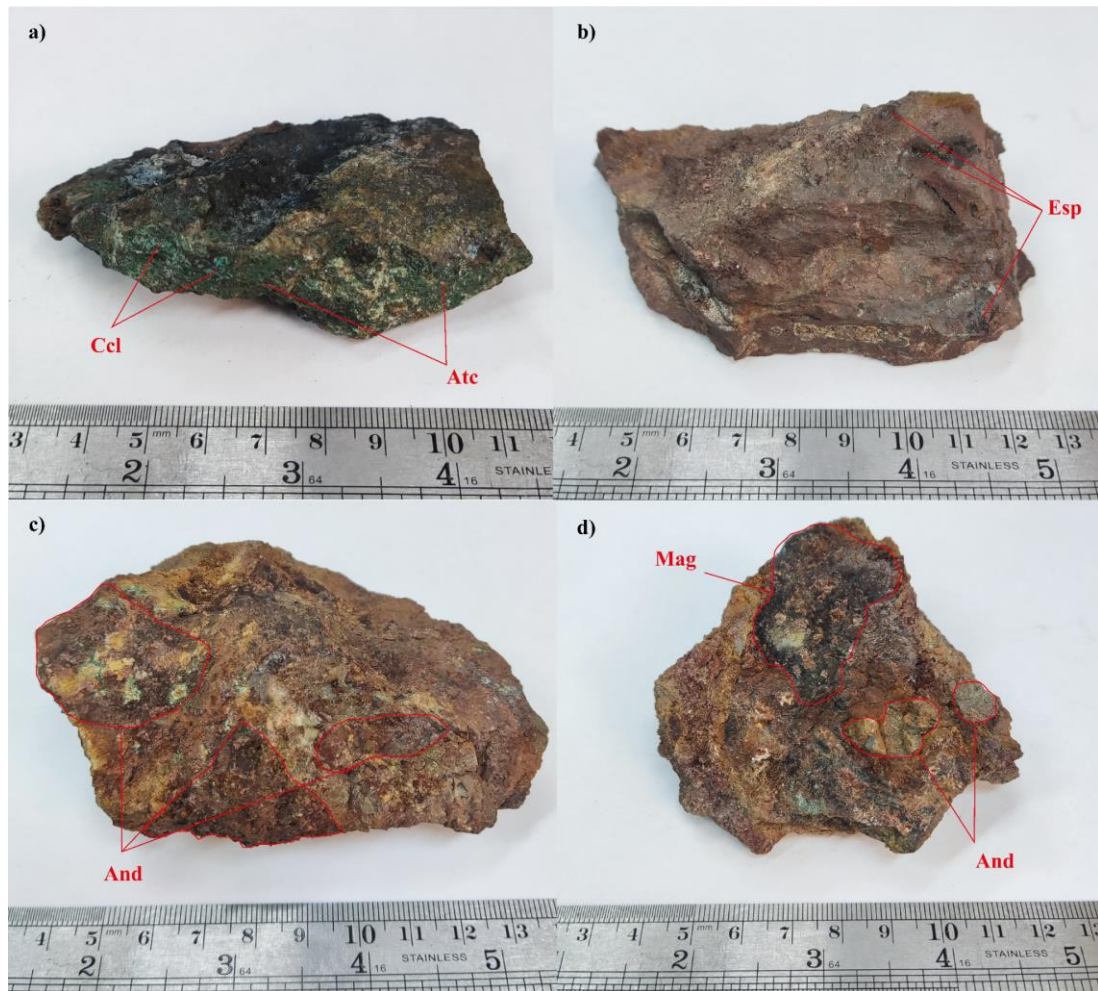


Figura 16: Foto de muestras del N2. Brechas hidrotermales de hematita con presencia de especularita. a) muestra perteneciente a una vetilla mineralizada con atacamita y trazas de crisocola, además alteración de epidota (Ep) y alteración argílica. b) brecha hidrotermal con especularita (Esp) en la matriz. c) la brecha presenta clastos de gran tamaño de la roca de caja (andesitas). c) brecha hidrotermal con especularita en la matriz y clastos de andesita. d) brecha hidrotermal con un gran clasto (4 cm) de magnetita.

En el Nivel 3 (N3), las muestras analizadas exhiben cambios significativos en su composición. Aunque la litología continúa siendo una brecha hidrotermal, se observa un aumento en la presencia de clastos de hematita, los cuales se encuentran prácticamente inalterados, al igual que los clastos de andesita (Figura 17a). En la matriz, se observa una disminución considerable de las limonitas y un aumento de la especularita llegando a encontrar muestras con clastos de hematita y una matriz compuesta casi en su totalidad

por specularita (Figura 17c). Es importante mencionar que algunas muestras extraídas están compuestas netamente por hematita masiva con un leve magnetismo. Desde el punto de vista mineralógico, como minerales de mena se identifica atacamita y en menor cantidad brocantita y como minerales de alteración clorita, epidota y alteración argílica, todas con una intensidad leve (Figura 17b).

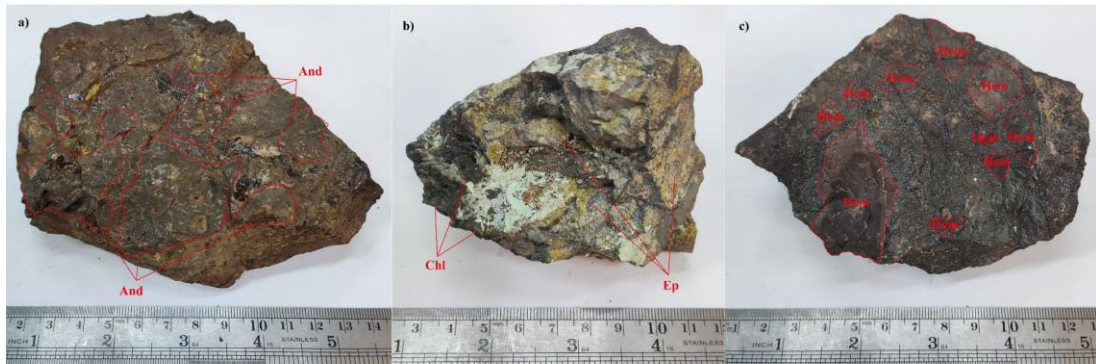


Figura 17: Muestras del N3 a) brecha hidrotermal con gran cantidad de clastos de andesita. b) brecha hidrotermal con alteración de clorita-epidota y alteración argílica. c) brecha hidrotermal compuesta por clastos de hematita dentro de una matriz de specularita.

En el Nivel 4 (N4), que constituye al túnel más profundo de la mina, las muestras están mayoritariamente compuestas por rocas de hematita masiva con una alteración moderada a specularita (Figura 18a, 18c y 18d). Se observa un aumento de la intensidad y ocurrencia de magnetismo en las muestras con respecto a los niveles anteriores, aunque sigue siendo leve y en algunos sectores específicos y muy acotados con una intensidad media. Respecto a la mineralización, predominan los óxidos de cobre como mineral de mena (atacamita y brochantita), sin embargo, se han observado trazas de calcopirita acompañada de cristales milimétricos de pirita dentro de las muestras de hematita masiva (Figura 18d). En este nivel, la presencia de la brecha hidrotermal presente en los niveles anteriores (Figura 15, 16 y 17) es menos frecuente y está acompañada con una alteración de clorita y epidota (Figura 18b).

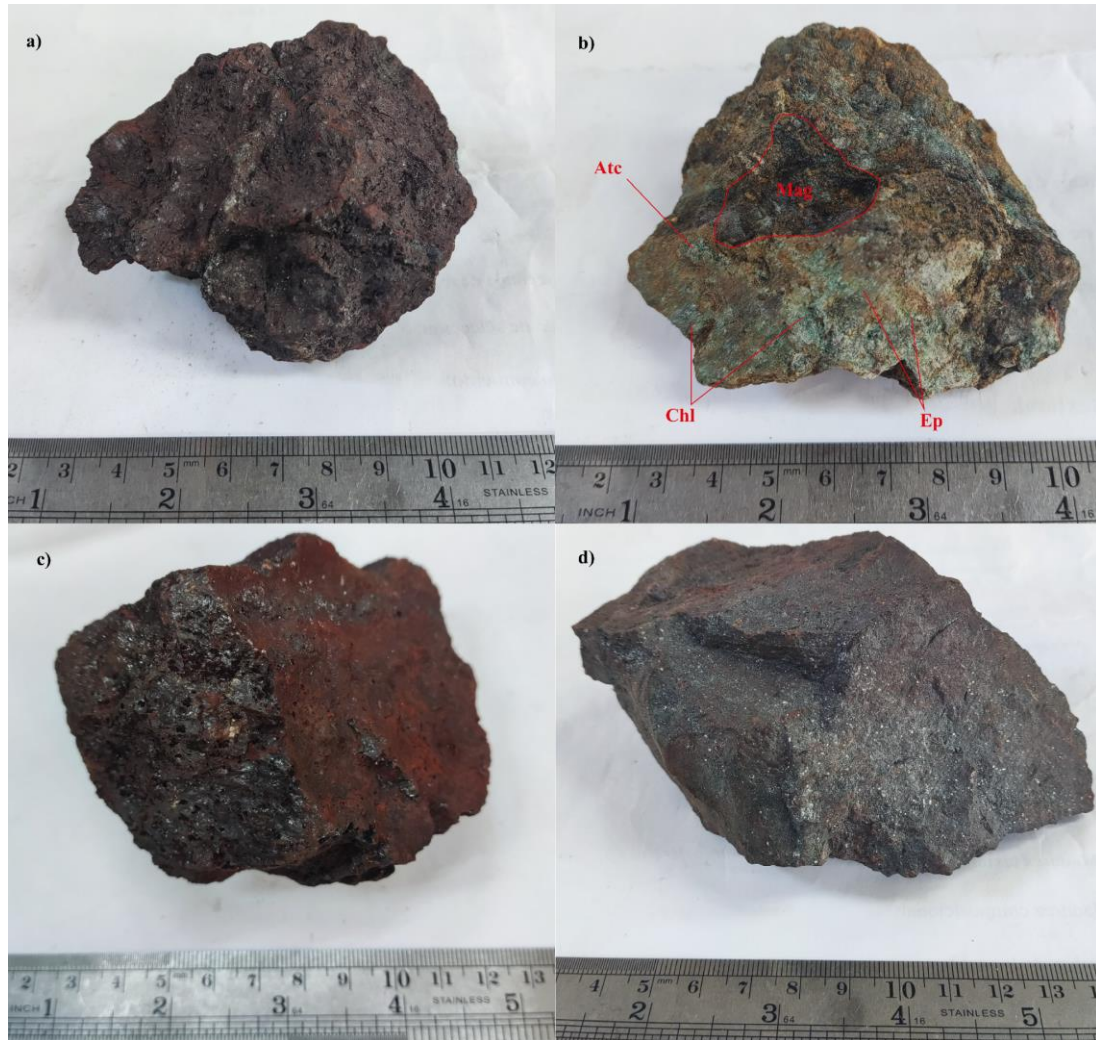


Figura 18: Muestras del N4 a) roca de hematita masiva moderadamente alterada a especularita. b) brecha hidrotermal mineralizada con trazas de atacamita y clastos de magnetita, presenta alteración intensa a limonitas con predominancia en jarosita y especularita, además de clorita y epidota como alteración en la matriz. c) roca de hematita con trazas de magnetita, levemente oxidada. d) roca de hematita masiva con trazas de magnetita, presenta pequeños cristales bien formados de pirita y bajas cantidades de limonitas.

5.3 Geoquímica

Este capítulo presenta los resultados obtenidos mediante el análisis geoquímico de las muestras, mediante la técnica de fluorescencia de rayos X. Se presentan las concentraciones de los elementos de interés en este estudio: Cu, Fe, Co y Au. Los datos se encuentran agrupados en gráficas de caja y bigotes (box plot).

A continuación, se presentan los resultados en %wt de Cu y Fe de las 15 muestras obtenidas al interior de mina La Negrita.

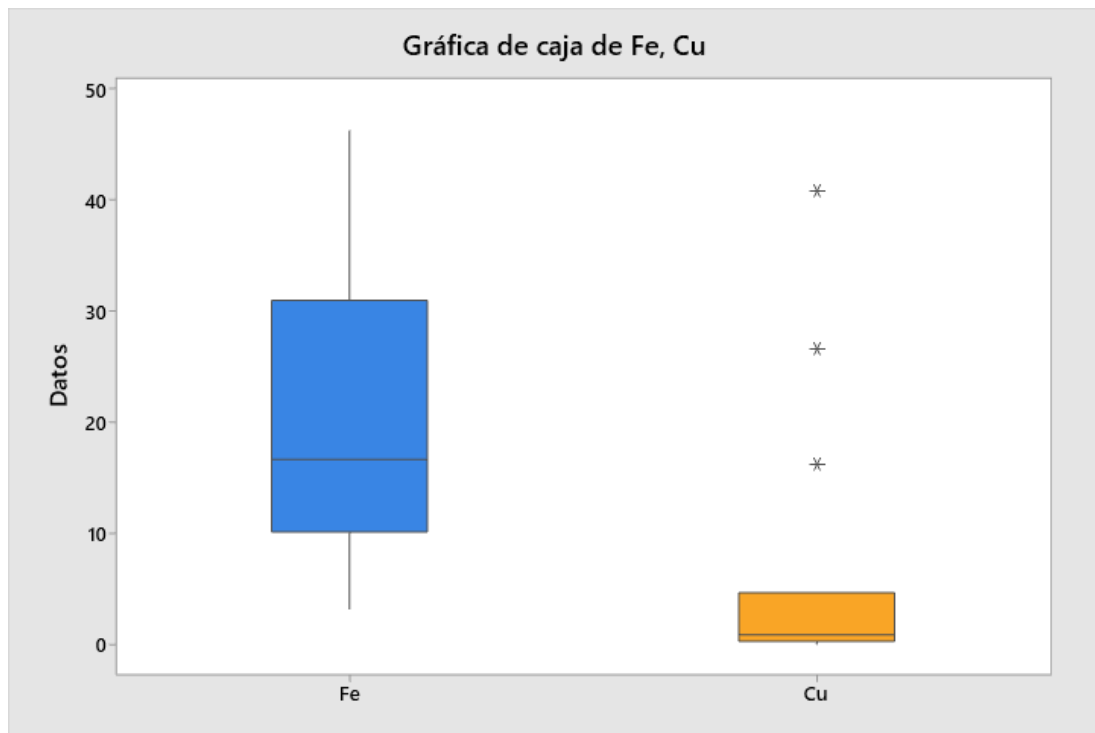


Figura 19: Gráfico de cajas y bigotes (box plot) mostrando las concentraciones (%wt) de Cu y Fe en Mina la Negrita.

En el gráfico de la Figura 19, se observa que el Fe tiene una mediana de 16,909%, con valores extremos que van desde 3,233% hasta 46,148% concentraciones que varían dependiendo de la profundidad de la mina como se refleja en la Figura 20. En el caso del Cu la mediana es 0,879% presentando valores extremos que van desde 0,079% hasta 4,684%.

A continuación, se presentan los resultados por niveles para Fe y Cu.

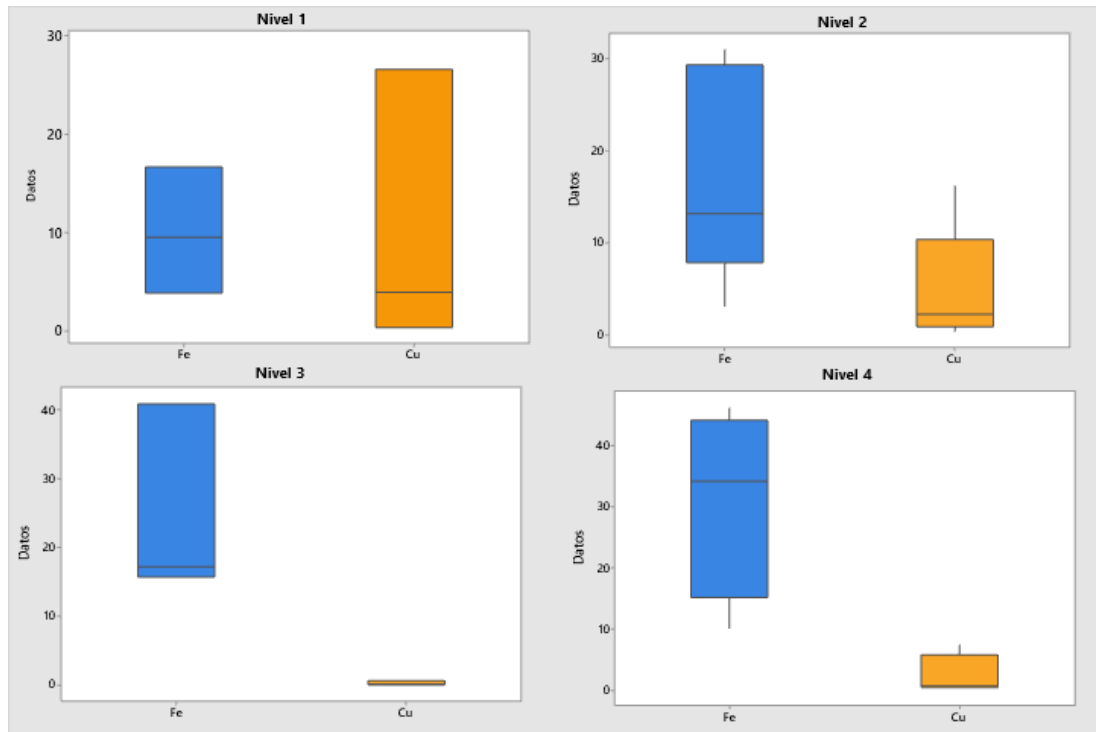


Figura 20: Gráficos de cajas y bigote (box plot), representando las leyes en %wt de Cu y Fe en cada nivel de la mina.

En el gráfico de la Figura 20, para el N1, los valores extremos del Fe van de 3,843% a 16,637%, con una mediana de 9,498% y para el cobre, van de 0,318% a 26,551% con una mediana de 3,916%. En el N2, los valores para el Fe van de 3,233% hasta 30,934% con una mediana de 13,227%, para el Cu, los valores van de 0,536% hasta 16,197% con una mediana de 2,324%. El N3, presenta valores extremos de Fe de 15,716% hasta 40,810% con una mediana de 17,181%, el Cu presenta valores entre 0,079% y 0,659%, con una mediana de 0,161%. En último nivel (N4), los valores del Fe oscilan entre 10,128% y 46,148% con una mediana de 34,202%, en el caso del Cu, los valores van de 0,325% hasta 7,319% con una mediana de 0,647%.

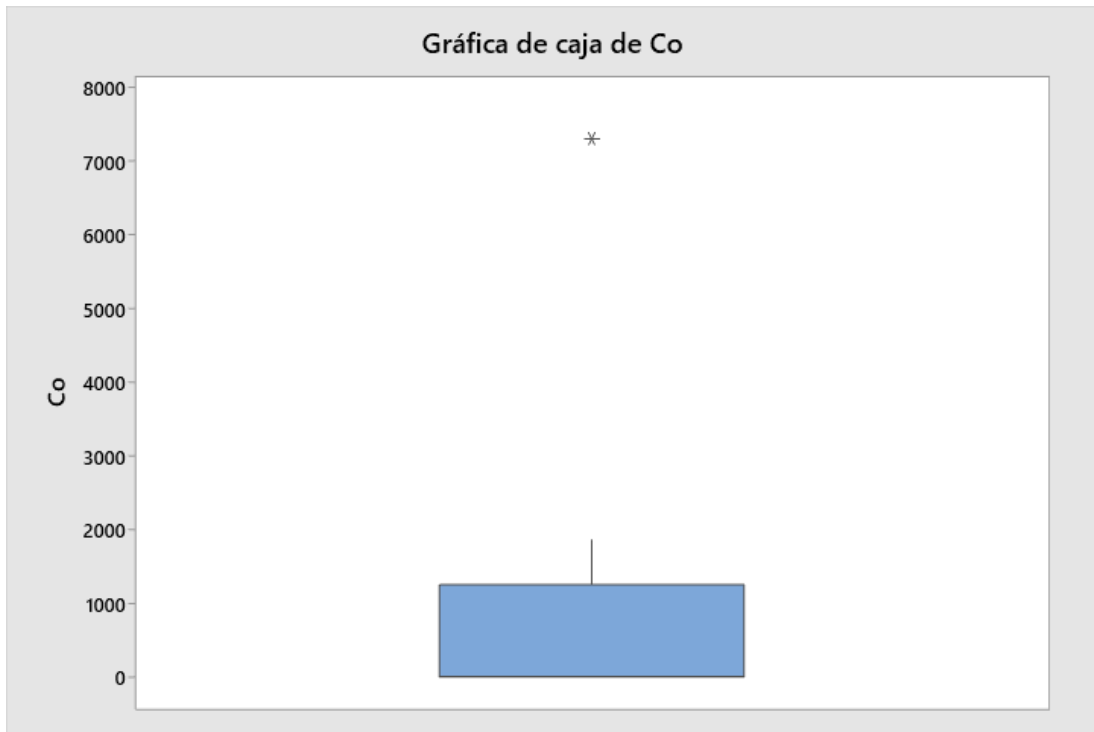


Figura 21: Gráficos de cajas y bigote (box plot), representando las concentraciones en ppm de Co en las muestras de Mina la Negrita.

En el caso de las concentraciones de Co (Figura 21) presentan una mediana de 5 ppm con valores extremos que van desde 0 a 1850 ppm y sólo se registraron concentraciones en 8 de las 15 muestras analizadas. Para el Au se registraron concentraciones en 4 muestras de las 15 muestras analizadas, con valores totales de 0 en el Nivel 1, 10 ppm en el Nivel 2 y 30 ppm en el Nivel 3 y 4.

Capítulo 6: DISCUSIONES

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos a lo largo de la investigación y se contrastan con estudios previos. A partir de los datos presentados en el capítulo anterior se busca profundizar en la comprensión de los procesos geológicos que dieron lugar al yacimiento y validar su coherencia con modelos existentes en la literatura. Además, se discuten aspectos económicos relevantes relacionados con la distribución y concentración de los elementos de interés dentro del yacimiento.

6.1 Unidades litológicas

Las unidades litológicas reconocidas dentro la concesión minera La Negrita 1/44, Parcela 22, corresponden a andesitas porfíricas, brechas hidrotermales y depósitos coluviales, los cuales en su mayoría se encuentran cubiertos por la gran cantidad de material removido por la actividad mineral del sector. Estas unidades se encuentran descritas formalmente dentro de la Carta Geológica Chañaral y Diego de Almagro. La unidad de andesitas se correlaciona con la Formación La Negra, específicamente al miembro 2a (Pliensbachiano? - Jurásico Superior), descrita por García (1967), como coladas fluidales de lavas andesíticas. La brecha hidrotermal corresponde a la unidad hospedante de la mineralización de cobre y se encuentra acotada estructuralmente por una falla normal que atraviesa latitudinalmente no sólo la pertenencia minera sino también el distrito entero.

6.2 Geoquímica de las muestras

En los datos de la Tabla 2 se refleja el enriquecimiento, indicado por un $FE > 1$, el empobrecimiento, caracterizado por un $FE < 1$, de los elementos claves en los yacimientos tipo IOCG en comparación a las concentraciones promedios en la corteza terrestre (Clarke).

Tabla 2: Elementos químicos comunes en yacimientos IOCG (Sillitoe, 2003; Williams, 2005; Yang, 2018) con sus respectivos clarke (Ridley, 2013) o promedio de concentración en la corteza, concentraciones en la Mina La Negrita y su factor de enriquecimiento (FE).

Elemento	Clarke (ppm)	Concentraciones promedio Mina la Negrita (ppm)	Factor de enriquecimiento (FE)
Ag	0,07	0	0
As	2	1,25	0,625
Co	25	896,875	35,875
Mo	2	30,625	15,313
Ni	75	373,125	4,975
U	3	1,25	0,417
Cu	55	66.576,25	1.210,477
Au	0,001	5,625	5.625
Si	281.500	166.154,375	0,590
Ti	5.700	2.491,25	0,437

En mina La Negrita, los datos obtenidos reflejan una ley promedio de 6,657% para el Cu, con una mediana de los datos de 0,879 % y una desviación estándar de 11,919. Esta desviación estándar elevada indica una significativa dispersión de los datos, atribuible a que los niveles muestreados ya se encontraban explotados, lo que explica la presencia de leyes que en algunos casos presentan valores muy bajos y otros, muy altos. En cuanto al Au, se registró en promedio 5,625 ppm con una mediana de 0 ppm y una desviación estándar de 10,089. Sin embargo, estos resultados no son concluyentes debido a que los límites de detección del equipo utilizado no son idóneos para Au. De un total de 15 muestras solo se registró Au en 4 muestras sin una distribución espacial preferente dentro de la mina.

Los depósitos IOCG, además de Cu y Au, exhiben concentraciones elevadas de una o varias LREE, Ag, As, Co, Mo, Ni y U, a menudo en cantidades significativas como para ser extraídos como subproductos (Ridley, 2013; Reeve, et al., 1990; Reynolds, 2001). En

este estudio, las concentraciones de Ag, As, U y LREE no muestran un incremento en comparación al Clarke de la corteza. Sin embargo, estos datos no son concluyentes debido a que la sensibilidad mínima del equipo utilizado es de 10 ppm. Por otro lado, se identifica un aumento considerable en las concentraciones de Co, Mo, y Ni, con valores de FE de 35,875; 15,313 y 4,975 respectivamente.

Las concentraciones de Co en el yacimiento son particularmente relevantes, ya que mostró cantidades significativas, a pesar de la sensibilidad mínima del equipo utilizado, arrojando una ley promedio de 0,09% con una mediana de 0,0005% y una desviación estándar de 0.176. Se registró Co en 8 de 15 muestras analizadas. No se identificó ninguna distribución espacial preferente al analizar las concentraciones por niveles, ni se logró asociar el Co a ningún otro elemento.

Las bajas concentraciones de Ti y Si, con FE de 0,437 y 0,590 respectivamente, son típicos de este tipo de depósitos. En el caso del Ti, su baja concentración se relaciona con el origen hidrotermal de los minerales de óxidos de hierro presentes en el depósito (magnetita y hematita) diferenciándolos de los óxidos de hierro de origen magmáticos que tienen mayores concentraciones de Ti (Knipping et al., 2015). Para la sílice, las bajas concentraciones están relacionadas a los fluidos hidrotermales ricos en hierro y pobres en sílice, lo cual es consistente con el escaso cuarzo observado en los yacimientos IOCG, diferenciándolos de otros yacimientos como, por ejemplo, los pórfidos de cobre que suelen contener cantidades significativas de alteración silíceo (Johanson, Kesler, et al., 2008; Golding, Hollis, et al., 2013).

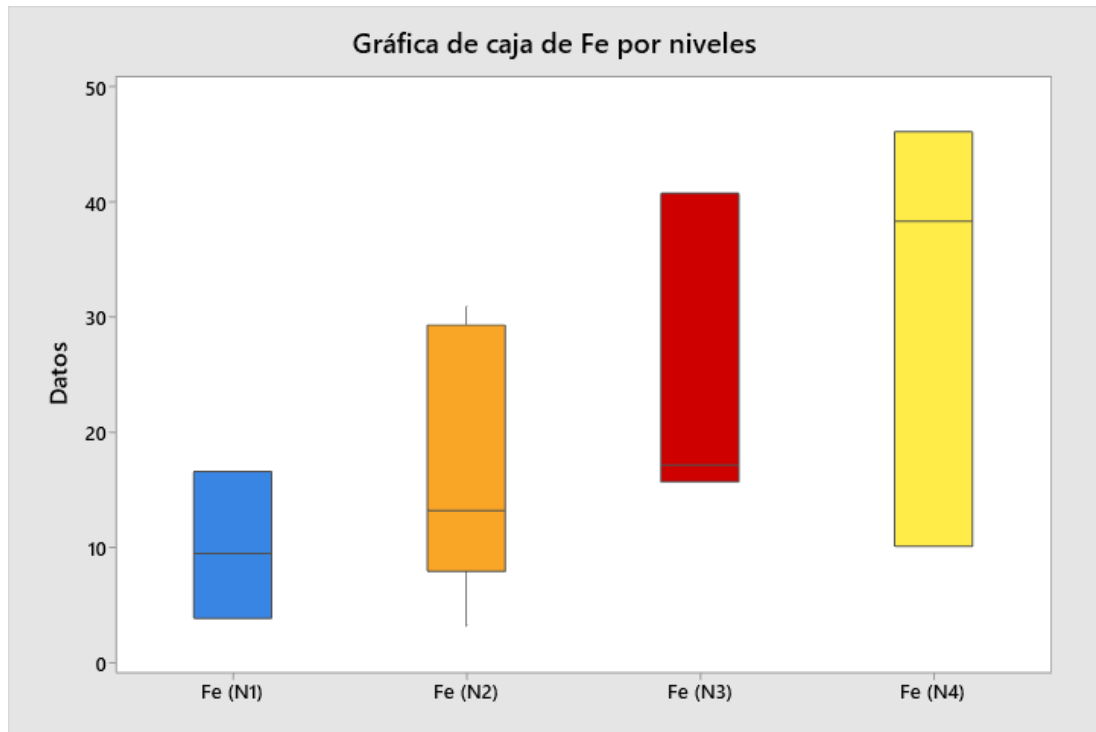


Figura 22: Gráfico de cajas y bigotes (box plot) de las concentraciones de Fe en los distintos niveles de la mina.

Comparando los datos de concentración de Fe en los diferentes niveles del yacimiento, se evidencia un incremento a medida que la profundidad aumenta, como se observa en la Figura 22. Las medianas de concentración en los niveles N1, N2, N3 y N4 son; 9,498%, 13,227%, 17,181%, 38,346% respectivamente. Este patrón de crecimiento en las concentraciones de Fe conforme se profundiza en el yacimiento es consistente con el comportamiento típico observado en yacimientos de tipo IOCG, exhibiendo una posible zonación vertical, lo que resulta en un enriquecimiento progresivo de ciertos elementos, como el hierro (Espinoza et al, 1996; Sillitoe, 2003).

La zonación vertical de los depósitos IOCG desde magnetita en profundidad hasta hematita en niveles superiores es un proceso influenciado por variaciones en temperatura, presión, fugacidad de oxígeno (fO_2) y las condiciones redox a lo largo del sistema hidrotermal (Bastrakov et al., 2007; Porter, 2010; Barra, 2017). En profundidad, donde las temperaturas son elevadas (300-500°C) y las condiciones son más reductoras, se favorece la estabilidad y precipitación de magnetita en asociación con sulfuros como la

calcopirita. A medida que los fluidos hidrotermales ascienden, experimentan un enfriamiento progresivo y una disminución de la presión, provocando un aumento de la fugacidad de oxígeno y creando un ambiente más oxidante. Este cambio favorece mineralizaciones dominadas por hematita en niveles más someros, donde las temperaturas bajan a 200–300 °C (Williams, 2005; Ridley, 2013; Barton, 2014).

6.2.1 Correlación de datos geoquímicos

Se generaron gráficos de dispersión utilizando los datos geoquímicos obtenidos. Estos gráficos muestran las posibles asociaciones entre los elementos de interés identificados, proporcionando una visualización clara de cualquier correlación o patrón de distribución presente en las muestras analizadas.

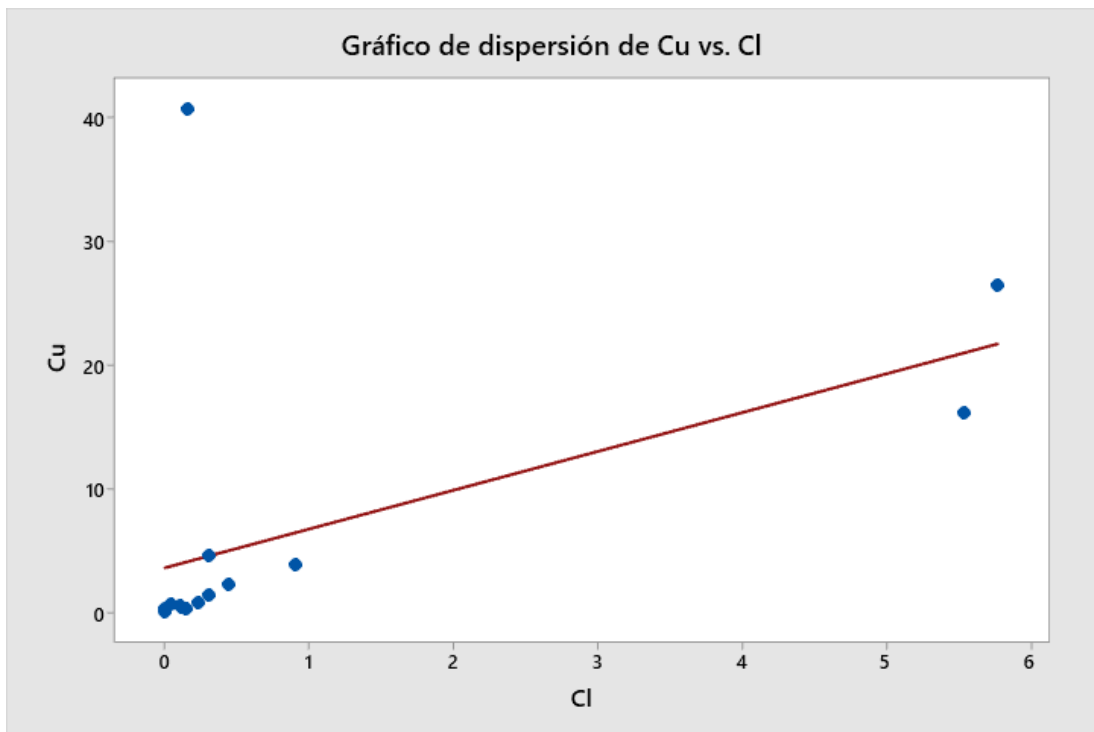


Figura 23: Gráfico de dispersión de las concentraciones globales de Cu versus Cl.

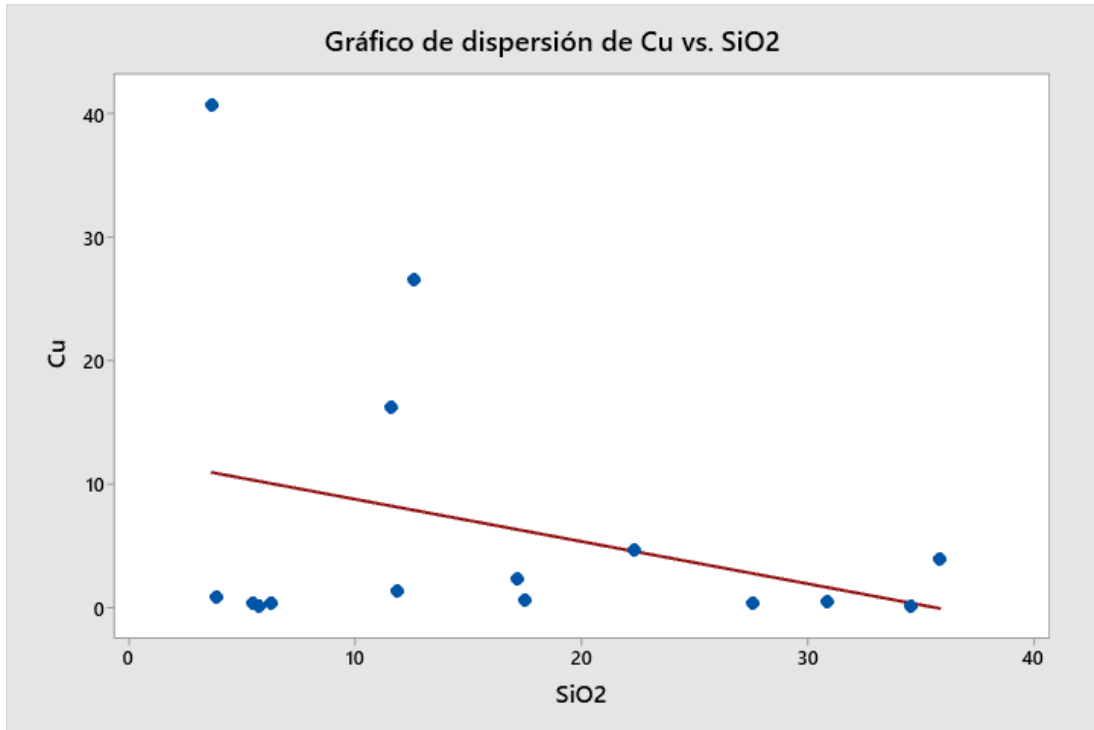


Figura 24: Gráfico de dispersión de las concentraciones globales de Cu versus SiO₂.

El gráfico de la Figura 23 muestra una correlación positiva entre las concentraciones de Cu y Cl. Esta relación se vincularía con la presencia de atacamita, un cloruro de cobre hidratado, identificado en la mayoría de las muestras de mano descritas. Por otro lado, en el gráfico de la Figura 24 se observa una correlación negativa entre las concentraciones de Cu y SiO₂, lo que podría estar relacionada con la presencia de clastos de la roca de caja (andesita), provocando una disminución de las leyes de cobre y un aumento de las concentraciones de sílice, en las muestras con alto contenido de clastos de la roca de caja.

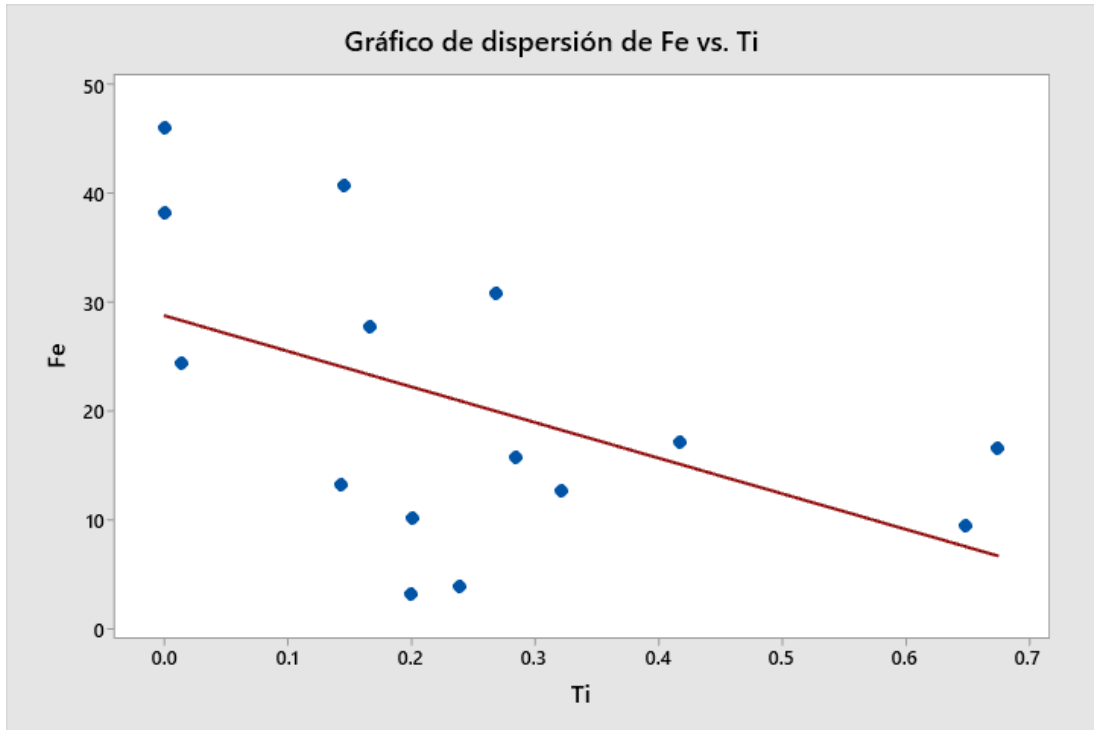


Figura 25: Gráfico de dispersión del Fe versus el Ti, considerando todos los niveles de la mina.

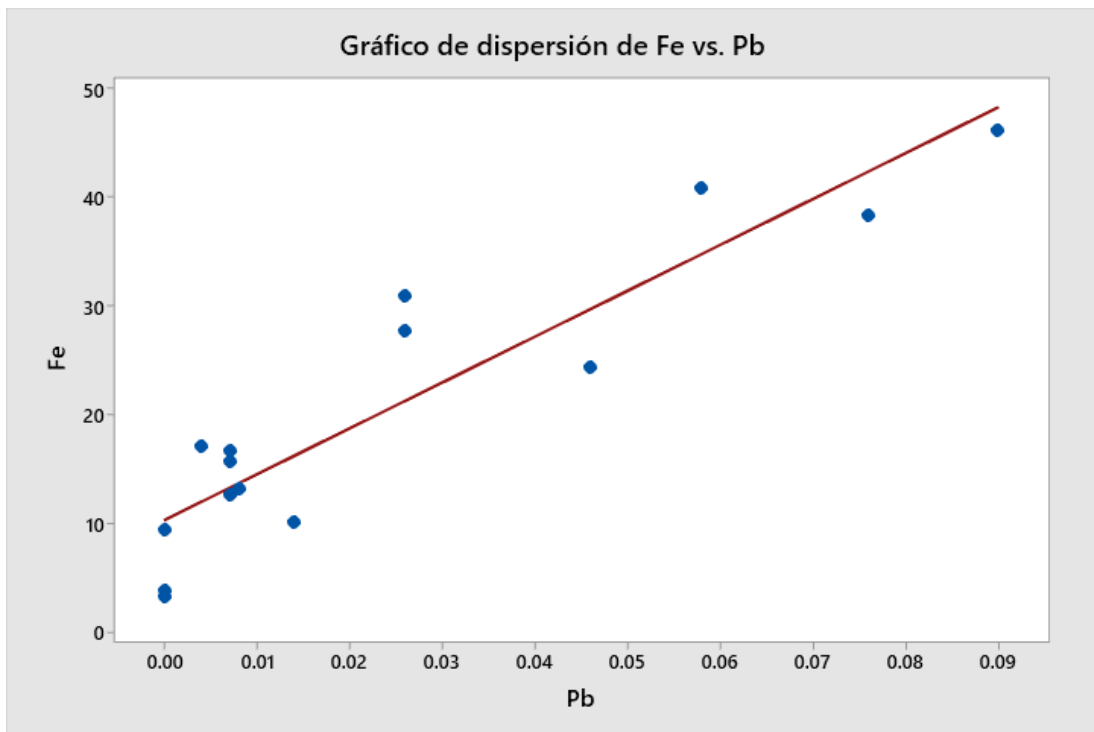


Figura 26: Gráfico de dispersión del Fe versus el Pb, considerando todos los niveles de la mina.

En la Figura 25, se aprecia una relación negativa entre las concentraciones de Fe y Ti. Esta disminución marcada en las concentraciones de Ti, conforme aumenta el Fe, concuerda con un depósito tipo IOCG debido a la predominancia de minerales de óxido de Fe bajos en Ti, como la magnetita y hematita (Hitzman, 1992; Ridley, 2013; Knipping, 2015, Yang, 2018). Por otro lado, las concentraciones de Pb presentan una línea de tendencia positiva con respecto al Fe esto podría significar una introducción del Pb dentro de la estructura cristalina de los óxidos de Fe (Figura 26).

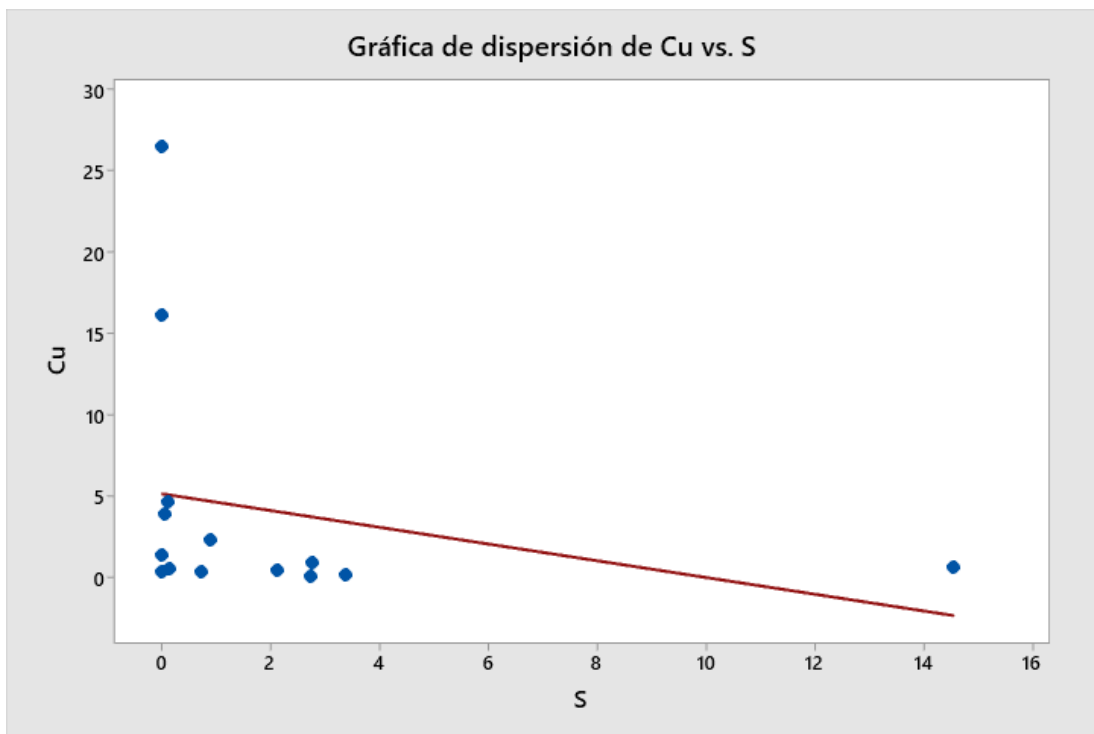


Figura 27: Gráfico de dispersión del Cu versus el S, considerando todos los niveles de la mina.

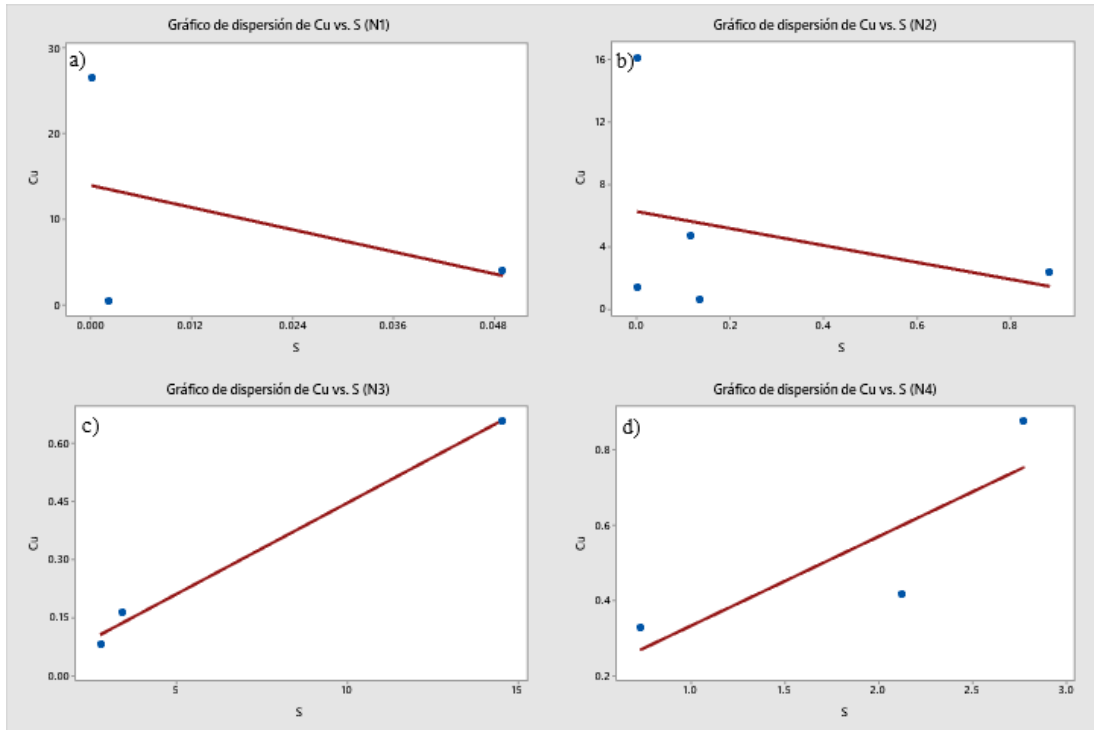


Figura 28: Los siguientes gráficos muestran las concentraciones de Cu versus S, separando las muestras por sus respectivos niveles.

El análisis de la asociación entre el Cu y el S, considerando todas las muestras analizadas de mina La Negrita no presentan una clara correlación, como se ve en la Figura 27. Sin embargo, al examinar las mismas muestras agrupadas por niveles, se observan patrones diferentes. En los gráficos a) y b) de la Figura 28, correspondiente a los niveles 1 y 2 respectivamente, no se aprecia una correlación entre los elementos, lo que sugiere que la mineralización de cobre en estos no está asociada a sulfuros ni sulfatos, consistente con una mineralización de silicatos y cloruros de Cu. En cambio, en los gráficos c) y d) de la Figura 28, correspondiente a los niveles 3 y 4 respectivamente, se identifica una correlación positiva entre los elementos, consistente con la presencia de calcopirita.

6.3 Modelo de yacimiento

Los resultados geológicos y químicos-mineralógicos obtenidos en mina La Negrita reflejan una mineralogía que varía notoriamente en profundidad, generando una zonación vertical del depósito con respecto a la litología, mineralización y alteración (Tabla 3). En

los niveles superiores (N1 y N2), los minerales de cobre son únicamente oxidados, representados por atacamita, crisocola y trazas de brochantita. En los niveles inferiores (N3 y N4), la mineralización de Cu cambia a atacamita, brochantita y trazas de calcopirita.

La roca hospedante de la mineralización corresponde a una brecha hidrotermal con clastos angulosos de andesita (roca de caja), hematita y magnetita, dentro de una matriz de hematita acompañada en algunos casos con pequeñas cantidades de magnetita. Esta brecha, al igual que la mineralogía, presenta una zonación vertical. Con respecto a la matriz, en los primeros niveles (N1 y N2) se observa solo hematita, intensamente alterada a limonitas ricas en jarosita. En los niveles inferiores (N3 y N4) se detecta un leve magnetismo dentro de la matriz, evidenciando la presencia de magnetita, y también se observa especularita. La limonitización disminuye su intensidad a leve y predomina la hematita por sobre la jarosita.

Con respecto a los clastos en la brecha hidrotermal, llama particularmente la atención la presencia de clastos de hematita y magnetita dentro de una matriz de la misma composición. Esto sugiere la ocurrencia de al menos tres eventos de mineralización en el yacimiento. El primer evento corresponde a la precipitación inicial de magnetita y hematita. Un segundo evento, más tardío, donde ocurre la brechización de los minerales previamente precipitados, dando como resultado una brecha hidrotermal compuesta por clastos de magnetita, hematita y roca de caja, inmersos en una matriz de hematita y magnetita. Finalmente, la mineralización supérgena en donde se forman los minerales de cobre oxidados.

La mineralización supérgena en el yacimiento está compuesta principalmente por atacamita y en menor cantidad por crisocola y brochantita, que se encuentran tanto en vetillas como diseminadas en la matriz. Este tipo de mineralización se desarrolla cuando los sulfuros primarios, en este caso la calcopirita y pirita, son expuestos a procesos de oxidación por la acción de aguas meteóricas (Pohl, 2011). La formación de atacamita refleja condiciones climáticas hiperáridas, ya que estas, junto con la interacción de las salmueras de cuenca, permiten la precipitación como la preservación de este mineral de

cobre (Reich, 2008). Estas condiciones son esenciales, ya que la atacamita es altamente soluble en presencia de aguas meteóricas más abundantes, lo que limita su formación a ambientes extremadamente secos.

Los estudios realizados en el yacimiento Cerro Negro concuerdan con la mineralogía observada en este trabajo. En Vivallo et al. (2018), se reconoce un depósito tipo brechiforme enriquecido principalmente en óxidos Cu y, en menor medida, de Fe y Au. En un estudio realizado por Gelcich et al. (1998), se menciona que los minerales de la zona hipógena corresponden a hematita, magnetita, calcopirita y bornita, asociados a una alteración de clorita y sericita. Aunque no se encontró bornita en las muestras analizadas, no se descarta su presencia en zonas de mayor profundidad.

Tabla 3: Ley media de Fe, mineralización presente y observaciones litológicas de cada nivel de la mina.

Nivel	% media Fe	Mineralización	Observaciones litológicas
N1	9,498	Crisocola + atacamita	Matriz de hematita, intensamente alterada a limonitas.
N2	13,227	Atacamita + crisocola	Matriz de hematita, moderadamente alterada a limonita.
N3	17,181	Atacamita + trazas brochantita	Matriz de especularita y hematita, con leve alteración a limonitas.
N4	38,346	Atacamita + brochantita + trazas calcopirita	Rocas masivas de hematita con especularita y cristales de pirita.

En cuanto a la clasificación del yacimiento, según Chen (2013), este correspondería a un IOCG del sub clan hematita. Esta clasificación plantea que los elementos económicamente rentables en estos yacimientos son Cu ± Ag ± Au ± Co ± Zn (U - REE). En el caso de mina La Negrita, el elemento explotado es el Cu; sin embargo, en este estudio se han encontrado cantidades considerables de Au y Co que podrían llegar a ser económicamente rentables como subproductos (Tabla 2). En el caso del Zn solo se identificó en 7 de las 15 muestras analizadas, con una mediana de 20 ppm, lo cual es

inferior al promedio cortical de 70 ppm. Por último, concentraciones de Ag, U y RRE no fueron detectadas.

La asociación mineral para los yacimientos IOCG del subclan hematita incluye hematita + calcopirita + pirita y/o hematita + calcopirita + bornita + calcosina (Chen, 2013). En este estudio, se identificó la asociación hematita + calcopirita + pirita. Además, en profundidad se encontró magnetita. Esto es consistente con Gelcich (1998), que plantea que los minerales hipógenos del yacimiento Cerro Negro son hematita, magnetita, calcopirita y bornita.

La presencia de magnetita en profundidad dentro de un yacimiento IOCG del subclan hematita podría relacionarse con el modelo de Barra et al. (2017) (Figura 4), señalando una migración hacia un yacimiento IOCG del subclan magnetita (IOCG rico en magnetita). Esto implicaría un cambio en mineralización de calcopirita y pirita en una brecha hidrotermal con clastos de la roca de caja en matriz de hematita especular, a una mineralización tipo manto de calcopirita ± bornita - pirita diseminados y/o vetillas en cuerpos masivos de magnetita.

En mina La Negrita, se identificó clorita y epidota, además de limonitas como productos de alteración. Estas alteraciones se forman típicamente en condiciones de pH neutro a ligeramente alcalino, a temperaturas que varían entre 250°C a 400°C, debido a la interacción del fluido con la roca de caja, en este caso, andesita (Pirajno, 2009). Estas alteraciones no concuerdan en su totalidad con lo descrito por Gelcich et al. (1998), quienes documentaron que en el yacimiento Cerro Negro solo se reconocen sericita y clorita como alteración.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

Las conclusiones obtenidas mediante este estudio son las siguientes:

- 1) El estilo de mineralización del yacimiento es brechiforme, controlado estructuralmente por una falla normal NW genéticamente asociada al Sistema de Fallas de Atacama.
- 2) La mineralización en mina La Negrita se encuentra hospedada por una brecha hidrotermal con clastos de la roca de caja (andesitas de la Formación La Negra), hematita y magnetita inmersos en una matriz que varía de hematita a specularita, los minerales de interés económico corresponden principalmente a óxidos de cobre específicamente atacamita, crisocola y brocantita, además de trazas de calcopirita en los niveles inferiores.
- 3) Las leyes de cobre presentaron una disminución a medida que aumentaba la profundidad; sin embargo, no se consideró como un empobrecimiento de este elemento debido a que el muestreo se realizó en niveles ya explotados, afectando así los resultados en las concentraciones.
- 4) El Au y el Co presentaron factores de enriquecimiento elevados, considerándose como elementos con potencial económico.
- 5) El yacimiento se ve afectado por clorita y epidota, además de limonitas relacionadas a oxidación supérgena, que varían su composición conforme se profundiza en el yacimiento. Se observa una transición desde una alteración intensa con predominio de jarosita en los niveles próximos a la superficie (N1 y N2), hasta una alteración leve con predominancia de hematita en los niveles inferiores (N3 y N4).

- 6) El yacimiento corresponde a un IOCG del subclan hematita, que debido a la presencia de magnetita tanto en los clastos como en la matriz de la brecha se sugiere que en profundidad podría variar a un yacimiento IOCG del subclan magnetita.

Recomendaciones para estudios futuros:

- 1) Las concentraciones de Au y Co presentan valores potencialmente atractivos a pesar de que el equipo utilizado para el estudio de las muestras (S1 TITAN) no es el óptimo, se sugiere un estudio de espectroscopia de absorción atómica para la detección de estos elementos y realizar una estimación de estos recursos.
- 2) La zonación vertical del yacimiento sugiere un cambio en la mineralización de una zona supérgena a una zona hipógena, la utilización de sondajes podría ayudar a estimar las reservas de sulfuros de cobre en profundidad y evaluar el potencial de la magnetita como fuente de Fe. Además, podría esclarecer la posible conexión con un IOCG rico en magnetita.
- 3) Realizar un análisis calcográfico ayudaría a detallar con exactitud los minerales de mena, observar relaciones paragenéticas y geocronología del yacimiento.

Referencias

Barton, M. D., Johnson, D. A., & Porter, T. M. (2000). Alternative brine sources for Fe-oxide (-Cu-Au) systems: Implications for hydrothermal alteration and metals. *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*, 1, 43-60.

Barton, M.D., Johnson, D.A., Kreiner, D.C., Jensen, E.P. (2013). Vertical zoning and continuity in Fe oxide(-Cu-Au-Ag-Co-U-P-REE) (or IOCG) systems: Cordilleran insights. 12th SGA Biennial Meeting. Proceedings, vol. 3.

Barton, M. D. (2014). Iron oxide (-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) systems. *Treatise on Geochemistry* (second edition, volume 13): Amsterdam, Elsevier: 515-541.

Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., Palma, G. (2017). Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach. *Ore Geology Reviews* 81, pp. 62-78.

Benedetto, J. (2019). El continente Gondwana a través del tiempo: una introducción a la geología histórica (Tercera edición, capítulo 8): Academia nacional de las ciencias, Córdoba, Argentina, 349-363 p.

Cembrano, J., et al. (2005). Fault zone development and strain partitioning in an extensional strike-slip duplex: A case study from the Mesozoic Atacama fault system, Northern Chile. *Tectonophysics* 400(1): 105-125.

Charrier, R., Pinto, L. y Rodriguez, M. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Origen in Chile en *The Geology of Chile*. The Geological Society, London, 21-114 p.

Chen, H. (2013). External sulphur in IOCG mineralization: Implications on definition and classification of the IOCG clan. *Ore Geology Reviews*, 51, 74-78.

Díaz, A.; Lledó, H.; Gelcich, S.; Espinoza, C.; Portigliati, C.; Vivallo, W.; Vogel, S.; Carrasco, R. (1999). Atlas de Yacimientos metalíferos de la III Región de Atacama, entre los 26° y 28° S. Servicio Nacional de Geología Minería, Informe Registrado IR 99-18, 18 mapas escala 1:150.000.

Espinoza, S. (1990). The Atacama-Coquimbo Ferriferous Belt, Northern Chile. En *Stratabound ore deposits in the Andes*. Springer Berlin Heidelberg: 353-364.

Espinoza, R. S., Véliz, G. H., Esquivel, L. J., Arias, F. J., & Moraga, B. A. (1996). The cupriferous province of the Coastal Range, northern Chile: Society of Economic Geologists Special Publication 5.

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

Gelcich E. S, Espinoza P. C, Vivallo S. W (1998) Yacimientos metalíferos de las Hojas Chañaral y Diego de Almagro, Región de Atacama. *Mapa Recursos Minerales Chile* 3:17.

Godoy, E y Lara, L (2005). Hoja El Salvador Occidental, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica, No.90, 72 p., 1 mapa escala 1:250000, Santiago.

Godoy, E., & Lara, L. (1998). Hojas Chañaral y Diego de Almagro, Región de Atacama. Servicio nacional de geología y minería.

Godoy, E., Lara, L., Ugalde, H. (1997). La Falla Chivato: Borde oriental plutonismo asociado al sistema de Falla Atacama. In: *Proceedings of VIII Congreso Geológico Chileno*, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile, 1, 70-74.

Grocott J, Taylor GK (2002) Magmatic arc fault systems, deformation partitioning and emplacement of granitic complexes in the Coastal Cordillera, northern Chilean Andes (25°30' S to 27°00'S). *J Geol Soc Lond* 159:425–442

Hitzman, M.W., Oreskes, N., and Einaudi, M.T., (1992). Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-AuREE) deposits: *Precambrian Research* 58, 241-287

Hitzman, M.W. (2000) Iron Oxide-Cu-Au Deposits: What, Where, When and Why. In: Porter, T.M., Ed., *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective*, Vol. 1, PGC Publishing, Adelaide, 9-25

Jorquera, R. (2005). Yacimientos metalíferos del área La Serena-La Higuera, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería- E.B.H. Geología y Minería Ltda-. 1 mapa escala 1:100.000.

Knipping, J. L., Bilenker L. D., Simon A. C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A. P., Lundstrom, C., Bindeman, I., Munizaga, R. (2015a) Giant Kiruna-type deposits form by efficient flotation of magmatic magnetite suspensions. *Geology* 43, 655–656.

Masoch, S., Gomila, R., Fondriest, M., Jensen, E., Mitchell, T., Pennacchioni, G., Di Toro, G. (2021). Structural Evolution of a Crustal-Scale Seismogenic Fault in a Magmatic Arc: The Bolfin Fault Zone (Atacama Fault System). *Tectonics*, 40(8), e2021TC006818.

Maksaev V, Zentilli M (2002) Chilean strata-bound Cu- (Ag) deposits: An overview. In: Porter TM (ed) *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*, vol 2. PGC Publishing, Adelaide, pp 185–205.

Mpodozis, C., Ramos, V., (1990). The Andes of Chile and Argentina. In: Ericksen, E., Cañas Pinochet, T., Reinemund, A. (Eds.), *Geology of the Andes and its Relation to*

Hydrocarbon and Mineral Resources. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series 11, pp. 59–90

Pirajno, F. (2009). Hydrothermal processes and mineral systems. Springer Science & Business Media, 12453pp. East Perth, Australia.

Pollard, Peter J. (2001). Sodic (–calcic) alteration in Fe-oxide–Cu–Au districts: an origin via unmixing of magmatic $H_2O-CO_2-NaCl\pm CaCl_2-KCl$ fluids. *Mineralium Deposita* 36(1): 93- 100.

Pollard, P. J., (2006). An intrusion-related origin for Cu\Au mineralization in iron oxidecopper–gold (IOCG) provinces. *Miner. Deposita* 41, 179–187.

Reich M, Palacios C, Parada MA, Fehn U, Cameron EM, Leybourne MI, 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 ^{36}Cl data. *Miner Deposita* 43, 663–675.

Ridley, J. (2013). Hydrothermal ore deposits I: Magmatic and orogenic environments. In *Ore Deposit Geology* (pp. 92-240). Cambridge: Cambridge University Press.

Scheuber, Ekkehard; Gonzalez, Gabriel. 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(5): 895-910.

Scheuber, Ekkehard; Andriessen, Paul AM. (1990). The kinematic and geodynamic significance of the Atacama fault zone, northern Chile. *Journal of Structural Geology* 12(2): 243- 257.

Sillitoe, Richard H. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7):787-812.

Tornos Arroyo, F., Casquet, C., & Relvas, J. (2005). Transpressional tectonics, lower crust decoupling and intrusion of deep mafic sills: A model for the unusual metallogenesis of SW Iberia. *Ore Geology Reviews* 27: 133-163.

Tornos, F., Wiedenbeck, M., Velasco, F. (2011). The boron isotope geochemistry of tourmaline-rich alteration in the IOCG systems of northern Chile: implications for a magmatic-hydrothermal origin. *Miner. Deposita*.

Vivallo, W.; Henríquez, F. N. (1977). Relación genética entre los yacimientos estratoligados de Cu ('Tipo Manto'), de Cu-Fe±Au y de hierro del tipo Kiruna. En *Congreso Geológico Chileno*. 1189-1193.

Vivallo, W., Díaz, A., & Jorquera, R. (2009). Provincias metalogénicas en la Región de Atacama, Chile. In *Congreso Geológico Chileno* (No. 12).

Williams, P. J., Barton, M. D., Johnson, D. A., Fontboté, L., De Hallar, A., Geordie, M., Oliver, N.H.S., Marschik, R. (2005). Iron oxide copper–gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin. *Econ. Geol.* 100th Anniv. vol. pp. 371–405.

Yang, C. L. (2018). Process Constraints on the Giant IOCG Mineral System of the Eastern Gawler Craton [PhD Thesis, The University of Adelaide]. Faculty of Sciences, The University of Adelaide.

Anexos

Tabla 4: Datos geoquímicos de las muestras LN-N2-01(1)(2), LN-N2-02, LN-N2-03, LN-N2-04, LN-RC-05, LN-N4-07.

Elemento	LN-N2-01(1)	LN-N2-01(2)	LN-N2-02	LN-N2-03	LN-N2-04	LN-RC-05	LN-N4-07	LN-N4-08
MgO	1.865	1.719	0	1.431	1.967	0.253	1.912	1.701
Al ₂ O ₃	2.735	5.127	6.338	4.158	6.833	16.716	0.949	2.154
SiO ₂	11.594	22.326	17.176	11.855	30.877	39.693	3.892	5.463
P ₂ O ₅	0.038	0.002	0.559	0.155	0.161	0.107	0	0
S	0	0.113	0.883	0	0.132	0.001	2.774	2.124
Cl	5.537	0.306	0.443	0.31	0.103	0.041	0.238	0.12
K ₂ O	1.202	3.012	1.757	1.092	2.034	6.46	0.804	0.358
CaO	0.013	0.247	0.276	0.076	0.161	0.303	0.073	0.532
Ti	0.199	0.322	0.269	0.143	0.166	0.628	0.201	0
V	0	0.003	0	0	0.02	0	0	0.01
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0
Mn	0	1.732	0.082	0.018	0.069	0	0.016	0.074
Fe	3.233	12.644	30.934	13.227	27.74	4.019	10.128	38.346
Co	0	0.73	0.099	0	0.185	0	0	0
Ni	0.086	0.11	0.04	0.029	0.026	0.003	0.018	0.027
Cu	16.197	4.684	2.324	1.39	0.536	0.035	0.879	0.416
Zn	0	0	0	0.002	0.003	0.001	0	0.002
As	0	0	0	0	0	0.001	0	0
Se	0	0	0	0	0	0	0	0
Rb	0.005	0.009	0.012	0.007	0.012	0.011	0.003	0.019
Sr	0.012	0.009	0	0.007	0	0.023	0	0
Y	0.001	0	0	0.002	0	0.001	0	0
Zr	0.006	0.006	0.005	0.005	0.002	0.011	0.006	0
Nb	0	0	0	0	0	0	0	0
Mo	0	0.005	0.007	0.009	0.003	0.001	0.004	0.004
Rh	0	0	0	0	0	0	0	0
Pd	0	0	0	0	0	0	0	0
Ag	0	0	0	0	0	0	0	0
Cd	0	0.001	0	0	0	0	0	0.003

Sn	0.013	0.005	0	0	0	0	0	0
Sb	0	0	0	0	0	0	0	0
Ba	0.372	0.203	0.233	0.309	0.059	0.408	0	0
La	0	0	0	0	0	0	0	0
Ce	0	0	0	0	0	0	0	0
Hf	0	0	0	0	0	0	0	0
Ta	0	0	0	0	0	0.002	0	0
W	0	0	0	0	0	0	0	0.004
Pt	0	0	0	0	0	0	0	0
Au	0	0	0	0.001	0	0.002	0	0.001
Hg	0	0	0	0	0	0	0	0
Tl	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	0	0.007	0.026	0.008	0.026	0	0.014	0.076
Bi	0	0	0.017	0	0.018	0	0	0.055
Th	0.034	0	0	0	0	0	0	0
U	0	0	0.002	0	0	0	0	0

Tabla 5: Datos geoquímicos de las muestras LN-N4-09, LN-N1-10, LN-N1-11(1)(2), LN-N3-12(1)(2), LN-N3-13, LN-N4-14.

Elemento	LN-N4-09	LN-N1-10	LN-N1-11(1)	LN-N1-11(2)	LN-N3-12(1)	LN-N3-12(2)	LN-N3-13	LN-N4-14
MgO	1.538	0	1.43	0.656	0	2.033	0	0
Al ₂ O ₃	4.534	10.387	3.572	8.589	20.118	4.43	4.043	2.429
SiO ₂	18.851	35.88	12.585	27.591	17.488	5.729	34.59	6.313
P ₂ O ₅	0.198	0.166	0.044	0.018	4.644	0.032	0.031	0
S	1.156	0.049	0	0.002	14.553	3.363	2.744	0.724
Cl	0.924	0.911	5.774	0.153	0.044	0	0.003	0.005
K ₂ O	2.219	6.126	1.723	3.803	5.838	1.073	1.654	0.327
CaO	0.1515	0.244	0.033	0.174	0.556	0.031	0.119	0.049
Ti	0.262	0.675	0.239	0.649	0.417	0.146	0.284	0
V	0.011	0.011	0	0	0.012	0.034	0	0.041
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0
Mn	0.055	0.398	0.089	0.123	0.011	0.071	0.023	0.098
Fe	30.058	16.637	3.843	9.498	17.181	40.81	15.716	46.148
Co	0.132	0.131	0.001	0	0	0	0	0.107

Ni	0.029	0.017	0.085	0.007	0.002	0.034	0.004	0.036
Cu	7.319	3.916	26.551	0.318	0.659	0.161	0.079	0.325
Zn	0	0	0	0.001	0	0.002	0.001	0
As	0	0	0.002	0	0	0	0	0
Se	0	0	0	0	0	0	0	0.003
Rb	0.017	0.012	0.006	0.011	0.003	0.019	0.004	0.028
Sr	0	0.013	0.011	0.012	0.039	0	0	0
Y	0	0.002	0	0.001	0.001	0	0.001	0
Zr	0.005	0.01	0.007	0.009	0.013	0.003	0.007	0
Nb	0	0	0	0	0	0	0	0
Mo	0.004	0	0	0	0.001	0.005	0	0.007
Rh	0	0	0	0	0	0	0	0
Pd	0	0	0	0	0	0	0	0
Ag	0	0	0	0	0	0	0	0
Cd	0	0	0	0	0	0	0	0.001
Sn	0	0	0.003	0	0	0.002	0	0
Sb	0	0	0	0	0	0	0	0
Ba	0.066	0.346	0.332	0.229	0.14	0	0	0
La	0	0	0	0	0	0	0	0
Ce	0	0	0	0	0.003	0	0	0
Hf	0.007	0	0	0.003	0.006	0	0.001	0
Ta	0	0	0	0.001	0	0.002	0	0
W	0	0	0	0	0.001	0.005	0	0.005
Pt	0	0	0	0	0	0	0	0
Au	0	0	0	0	0	0	0.003	0.002
Hg	0	0	0	0	0	0	0	0.003
Tl	0	0	0	0	0.005	0	0	0
Pb	0.035	0.007	0	0	0.004	0.058	0.007	0.09
Bi	0.022	0	0	0	0	0.04	0	0.076
Th	0	0	0.064	0	0	0	0	0
U	0	0	0	0	0	0	0	0