FACULTAD TECNOLÓGICA
ÁREA DE GEOMINERÍA

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE PROYECTO LICANTAY, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el Título de Asistente de Geología

Profesor Guía: Felipe Pizarro Barraza

Nicole Stephanie Barraza Osandón

Vallenar, Chile 2024

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a las personas que han sido fundamentales en la realización de este trabajo y en mi desarrollo personal a lo largo de este proceso.

En primer lugar, a mi Profesor Guía, Felipe Pizarro, quien ha sido de apoyo fundamental durante todo este trayecto. Muchas gracias por sus valiosos consejos y por siempre estar dispuesto a guiarme en cada paso cuando más lo necesitaba. Su orientación ha sido clave para que pudiera alcanzar este logro.

A mi Mamá, por ser uno de mis pilares más fundamentales. Agradezco tu apoyo incondicional, por siempre estar para mí y por darme la motivación para continuar avanzando, incluso en las situaciones más adversas. No existen palabras adecuadas para expresar mi gratitud por todo lo que has realizado por mí.

A mi hermana Pili, por siempre darme motivación. Gracias por tu energía, por tus palabras de aliento, por aguantarme, y por darme ese empuje cuando lo necesitaba. Tu apoyo ha sido esencial para que pudiera superar los retos que se me presentaron.

Y, finalmente, a mi Yacira, quien ha estado apoyándome en todo momento, brindándome su apoyo incondicional. Gracias por tu energía y paciencia, por tus palabras reconfortantes y por ser esa persona en quien siempre pude confiar y que me impulso a seguir adelante.



Tabla de Contenido

1. Capítulo I: Introducción....8
1.1. Ubicación y accesos....9
1.2. Planteamiento del Problema....10
1.3. Justificación....10
1.4. Objetivos....10
1.4.1. Objetivo General....10
1.4.2. Objetivos Específicos....10
2. Capítulo II: Marco Teórico....11
2.1. Geología Regional....11
2.1.1. Formación Pabellón....11
2.1.1.1. Litología....12
2.1.1.2. Interpretación Paleogeográfica....12
2.1.1.3. Estudios Previos....12
2.2.2. Formación Totoralillo....13
2.2.2.1. Definición y relaciones de contacto....13
2.2.2.2. Litología....13
2.2.2.3. Edad....14
2.2.2.4. Interpretación....14
2.3.3. Unidad intrusiva Monzodiorita Pirpiques....14
2.3.3.1. Definición y relaciones de contacto....14
2.3.3.2. Litología....15
2.3.3.3. Edad....15
2.3.3.4. Cretácico Superior....15
2.2. Geología Local....17
2.2.1. Formación Cerrillos....17
2.2.1.1. Definición y Relaciones de Contacto....18
2.2.1.2. Litología....18
2.2.1.3. Interpretación Deposicional....18
2.2.1.4. Tectónica y Evolución de la Cuenca....19
2.3. Geología Estructural....20
2.3.1. Deformación de la Cuenca de Chañarcillo....20
3. Capítulo III: Metodología....23
3.1. Área de Estudio....23
3.2. Fase de Preparación....23
3.2.1. Revisión de Información Previa....23
3.2.2. Planificación y Delimitación del Área....23
3.3. Equipos y Herramientas....23
3.4. Trabajo de Campo....24
3.4.1. Procedimiento de Mapeo Geológico....24

3.4.2. Toma de Muestras....24
3.5. Análisis de Muestras y Datos....24
4. Capítulo IV: Resultados....25
4.1. Descripción de las Unidades Geológicas....25
4.2. Recursos Minerales Identificados....36
4.3. Distribución de Afloramiento....42
4.4. Mapa Representativo De Proyecto Licantay....49
5. Capítulo V: Discusión....50
5.1. Interacción entre las Unidades Geológicas y la Tectónica Regional....50
5.2. Control Tectónico de la Cuenca....50
5.3. Interacción de Litología y Control de Estructura....50
5.4. Comparación con Estudios Previos....51
6. Capítulo VI: Conclusiones....52
6.1. Conclusiones Principales....52
6.2. Resumen de los Hallazgos....53
6.3. Recomendaciones para Estudios Geofísicos en el Proyecto Licantay....54
7. Capítulo VII: Bibliografía....55
8. Capítulo VIII: Anexos....57
8.1. Anexo N°1 Carta Gantt....57
8.2. Anexo N°2 Equipos de Campo....58
8.3. Anexo N°3 Datos de campo....59

Índice de figura

Figura N° 1: Acceso desde Vallenar hacia el Proyecto, por Ruta C-485, que conecta con las localidades de Alto del Carmen. A una altura de 27 kilómetros. Coordenadas: N-6.827.450 – N-6.826.700 y las E-343.200 y E- 344.000, a una cota aproximada de 770 m.....9

Figura N°2: Polígono marcado de Proyecto Licantay, ubicada a la mitad de Embalse Santa Juana. (Mapa creado mediante Google Earth)..... 9

Figura N° 3: Marco geológico regional. Geología 1:100.000 del Sernageomin del Área Vallenar-Domeyko, Región de Atacama de Emparán y Pineda, Arévalo C., Mourges F., y Chávez R., de la Carta Geológica de Chile – Sernageomin 2009.....16

Figura N°4: Esquema Estructural del Área Vallenar-Domeyko. Origen: Arévalo, C., Mourgues, F. A., & Chávez, R. (2009). Geología del área Vallenar- Domeyko, Región de Atacama. Carta Geológica de Chile.....21

Figura N°5: Perfil Esquemático de Falla Agua de los Burros. Fuente: Arévalo, C., Mourgues, F. A., & Chávez, R. (2009). Geología del área Vallenar-Domeyko, Región de Atacama. Carta geológica de Chile..... 22

Figura N°6: Labor minera correspondiente a Dique andesítico, en coordenadas E-034360030 y N-6.827.614, con una elevación de 730 m. Este dique muestra una orientación N80°O y está asociado a condiciones de metamorfismo regional..... 25

Figura N°7: Techo de Labor minera, correspondiente a Dique andesítico, (Figura N°6). Con presencia de Crisocola, mineral secundario perteneciente al grupo de Silicato de Cobre..... 26

Figura N°8: Techo de Labor minero, (Figura N°6), con mineralización de Crisocola.26

Figura N°9: Pared de Labor minero (Figura N°6), con Mineralización de Crisocola y presencia de Fracturas..... 27

Figura N°10: Muestra de Dique, (Figura N°6), presenta Óxido de Manganeso en un contexto de alteración superficial, lo que podría estar asociado a procesos de lixiviación o precipitación de manganeso en ambientes oxidantes.....28

Figura N°11: Roca Andesítica Muestras representativa, correspondiente a (Figura N°6). Dique Andesítico, en el cual se obversa Plagioclasa con Alteración de Clorita..28

Figura N°12: Correspondiente a Roca Andesítica, (Figura N°10), con presencia de Plagioclasa color blanquecino. (Imagen tomada mediante Cámara Microscópica).....28

Figura N°13: Muestra representativa de Dique Andesítico correspondiente a (Figura N°6)..... 29

Figura N°14: Se observar una Alteración de Epidota con un ancho de 4 metros aproximado. En coordenadas E-0343596 y N-6.827.503 y una elevación de 745 m. La alteración sugiere una influencia hidrotermal en las fracturas que podrían actuar como camino para fluidos mineralizantes.....29

Figura N°15: Falla de caliza ubicada en coordenadas E-0343588 y N-6.827.602, con un manteo de 40° y una elevación de 734 m. La caliza muestra fracturas abiertas que pueden actuar como caminos para fluidos mineralizantes.....30

Figura N°16: Correspondiente a Labor minera fortificada, en coordenadas E-0343619 y N-6.827.280. Hallazgo de Arenisca gris pardo con mineralización de Crisocola. Con una elevación de 779 m.....31

Figura N°17: Interior de Labor minera fortificada, (Figura N°16), con mineralización de Óxido de Cobre, predomina la Crisocola en Techo y paredes.....32

Figura N°18: Correspondiente a Labor minera de (Figura N°16), se observar Arenisca gris pardo con Mineralización de Crisocola y Chenevixita..... 33

Figura N°19: Correspondiente a Labor minera (Figura N°16), presencia de Arenisca gris pardo con Mineralización de Óxido de Cobre, con predominio de Crisocola..... 33

Figura N°20: Labor minera, a 5 metros del Laboreo anterior en coordenadas E-0343625 y N-6.827.95. (Norte 45° Oeste dirección al Túnel). Con una elevación de 772 m.....34

Figura N°21: Presencia de Arenisca Fina, con dolor verdoso en coordenadas E-0343621 y N-6.827.136, con una elevación de 790 m.....35

Figura N°22: Techo de manto mineralizado en coordenadas E-0343740 y N-6.827.278, con una elevación de 813 m. Este manto está desarrollado en el contacto entre andesitas impermeables y un manto oxidado-lixiviado, rico en jarosita, y arcillas con algo de crisocola.....36

Figura N°23: Presencia de Arenisca con mineralización de Crisocola y Chenevixita, en coordenadas E-0343625 y N-6.827.290 con una elevación de 800 m. La mineralización de crisocola en la arenisca indica una fuerte relación estructural, ya que se encuentra principalmente en fracturas y contactos litológicos permeables.....37

Figura N°24: Labor minera, Manto mineralizado con predominio de Crisocola sobre arcillas ricas en Cu, en coordenadas E-0343763 y N-6.827.248 (Norte 15° Oeste). Con una elevación de 805 m. Disposición según un manteo N30W/20- 25 SE y desarrollado en el contacto litológico con un nivel superior de andesitas rojas impermeables estériles.....

Figura N°25: Pared de Labor minera de (Figura 24). correspondiente a Crisocola con presencia de Oxido de Manganeso.....38

Figura N°26: Pared de Labor minera de (Figura 24). correspondiente a Crisocola y presencia de fracturamiento..... 39

Figura N°27: Muestras representativa de (Figura N°24). Correspondiente a Crisocola..

Figura N°28: Muestra representativa de Conglomerado, de Techo de Labor minera (Figura N° 24), compuesto por clastos angulares a subredondeados.....40

Figura N°29: Presencia de Conglomerado en el Techo de la labor minera (Figura N° 24), compuesto por clastos angulares a subredondeados.....41

Figura N°30: Presencia de conglomerado en el techo de la Labor minera, mostrado en la (Figura N°24), con clastos angulares a subredondeados.....41

Figura N°31: Afloramiento de Arenisca Calcárea, con Veta de Cuarzo y Epidota. En coordenadas E-0343691 y N-6.827.271, con una elevación de 812 m. Este afloramiento destaca por sus características de alteración hidrotermal y su potencial para albergar mineralización secundaria.....42

Figura N°32: Muestra representativa de Afloramiento de Arenisca Calcárea (Figura N°31), correspondiente a Veta de Cuarzo y Epidota.....43

Figura N°33: Muestra representativa de Afloramiento de Arenisca Calcárea (Figura N°31), correspondiente a Veta de Cuarzo y Epidota.....43

Figura N°34: Afloramiento de Microdiorita identificada como Roca hipabisal con leve magnetismo, localizada en las coordenadas E-0343630 y N-6.827.328, a una elevación de 763 m.....44

Figura N°35: Muestra representativa de Microdiorita, con presencia de granos finos. (Figura N°34).....44

Figura N°36: Afloramiento de Arenisca calcárea en coordenadas E-0343706 y N-6.827.263, con una elevación de 817 m. La arenisca calcárea muestra una textura masiva y fracturas rellenas con cuarzo, indicando un contexto geológico favorable para la acumulación de minerales.....

Figura N°37: Afloramiento de Lutita Negra, de grano fino, impermeable, de origen Sedimenta-rio, en coordenadas E-0343781 y N-6.827.313, con una elevación de 826 m.46

Figura N°38: Afloramiento de Arenisca de color pardo con diaclasamientos, en coordenadas E-0343651 y N-6.827.368, con una elevación de 760 m. Presenta un manteo de 45°. Las diaclasas observadas en esta arenisca indican deformación frágil, lo que aumenta la permeabilidad en estas unidades.....47

Figura N°39: Muestra representativa de (Figura N°38). Correspondiente a Arenisca Color Pardo Rojiza con Diaclasamiento.....48

Figura N°40: Mapa de la zona de estudio, mostrando los puntos representativos donde se tomaron los datos (mapa elaborado mediante ArcGIS).....40

Resumen

Este estudio se realizó en el Proyecto Licantay, ubicado en Alto del Carmen, Provincia de Vallenar, Chile, una zona con gran potencial minero debido a sus mineralizaciones de cobre. El método aplicado permitió caracterizar las unidades geológicas del área y evaluar su relación con las alteraciones hidrotermales presentes. La metodología se organizó en diversas etapas. En primer lugar, se definió el área de estudio y se revisaron estudios previos, así como cartas geológicas, lo que permitió obtener una visión inicial que facilitó la planificación del trabajo. Posteriormente, se prepararon las herramientas necesarias para el trabajo de campo, como mapas de la zona, brújulas, martillos, GPS y bolsas para el almacenamiento de muestras. Por lo siguiente, en el trabajo de campo, se identificaron rocas y estructuras geológicas, tomando notas detalladas y recolectando muestras representativas, las cuales fueron etiquetadas para su análisis en el taller de procesamiento de muestras. En este taller, se realizó un análisis petrográfico, reconociendo unidades geológicas tales como rocas ígneas y sedimentarias. Entre las unidades geológicas destacadas, el dique andesítico presenta mineralización de crisocola en fracturas y contactos. Las areniscas y conglomerados muestran óxidos de cobre, como crisocola y chenevixita. Además, las calizas fracturadas y microdioritas evidencian condiciones favorables para el flujo de fluidos mineralizantes. Afloramientos de areniscas calcáreas, lutitas negras y microdioritas muestran signos de deformación frágil, lo que favorece la acumulación de minerales.

En conclusión, la Falla Agua de los Burros fue un factor clave en la formación de la Cuenca Chañarcillo, ya que facilitó la acumulación de sedimentos y fluidos mineralizantes. Los contactos entre las unidades sedimentarias y las andesitas actuaron como vías para el flujo de fluidos, promoviendo la mineralización de óxidos de cobre. Los resultados obtenidos contribuyen al desarrollo de un modelo geológico preliminar que puede servir como base para futuras exploraciones mineras.

Palabras claves: Mineralización de cobre, alteraciones, rocas ígneas, rocas sedimentarias, cuenca Chañarcillo, falla agua de los burros.

Abstract

This study was carried out at the Licantay Project, located in Alto del Carmen, Vallenar Province, Chile, an area with great mining potential due to its copper mineralizations. The method applied allowed to characterize the geological units of the area and evaluate their relationship with the hydrothermal alterations present. The methodology was organized in several stages. First, the study area was defined and previous studies were reviewed, as well as geological maps, which allowed to obtain an initial vision that facilitated the planning of the work. Subsequently, the necessary tools for the field work were prepared, such as maps of the area, compasses, hammers, GPS, and bags for sample storage. Therefore, in the field work, rocks and geological structures were identified, taking detailed notes, and collecting representative samples, which were labeled for analysis in the sample processing workshop. In this workshop, a petrographic analysis was carried out, recognizing geological units such as igneous and sedimentary rocks. Among the outstanding geological units, the andesitic dike presents chrysocolla mineralization in fractures and contacts. Sandstones and conglomerates show copper oxides, such as chrysocolla and chenevixite. In addition, fractured limestones and microdiorites show favorable conditions for the flow of mineralizing fluids. Outcrops of calcareous sandstones, black shales and microdiorites show signs of brittle deformation, which favors the accumulation of minerals.

In conclusion, the Agua de los Burros Fault was a key factor in the formation of the Chañarcillo Basin, as it facilitated the accumulation of sediments and mineralizing fluids. The contacts between the sedimentary units and the Andesites acted as pathways for fluid flow, promoting copper oxide mineralization. The results obtained contribute to the development of a preliminary geological model that can serve as a basis for future mineral explorations.

Keywords: Copper mineralization, alterations, igneous rocks, sedimentary rocks, Chañarcillo basin, Donkeys water failure.

1. Capítulo I: Introducción

La exploración y caracterización de yacimientos minerales es una actividad fundamental para la pequeña y gran minería, dado que permite entender la distribución de los recursos y optimizar su explotación. En este contexto, la identificación de alteraciones y mineralizaciones asociadas a depósitos de cobre es crucial, ya que el cobre es uno de los minerales más demandados a nivel mundial debido a sus múltiples aplicaciones industriales y tecnológicas.

La región de Atacama, destacada por su relevancia minera, alberga alteraciones hidrotermales clave para la exploración de recursos minerales. La comprensión de la litología y los procesos de alteración presentes es esencial para evaluar el potencial minero del área.

La presente tesis tiene como objetivo principal realizar un levantamiento geológico, para caracterizar la mineralización y litología del área de estudio, enfocándose en la identificación de alteraciones y mineralizaciones de cobre. Los resultados obtenidos serán de gran utilidad para el sector y podrá proporcionar una base más sólida sobre la geología de esta zona específica.

1.1. Ubicación y accesos

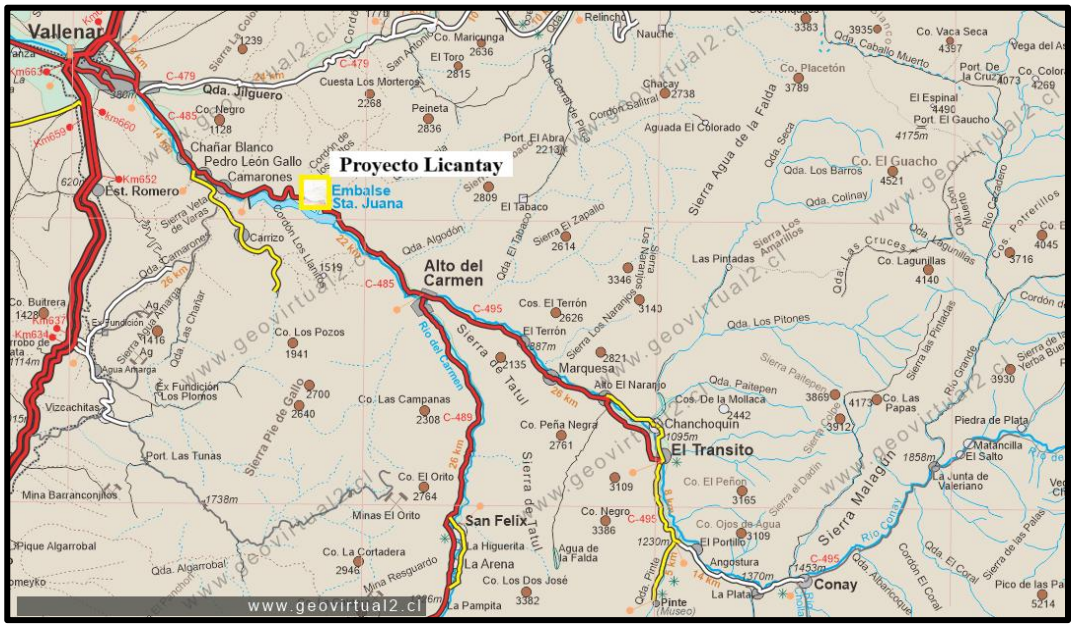


Figura N° 5: Acceso desde Vallenar hacia el Proyecto, por Ruta C-485, que conecta con las localidades de Alto del Carmen. A una altura de 27 kilómetros. Coordenadas: N-6.827.450 – N-6.826.700 y las E-343.200 y E- 344.000, a una cota aproximada de 770 m.

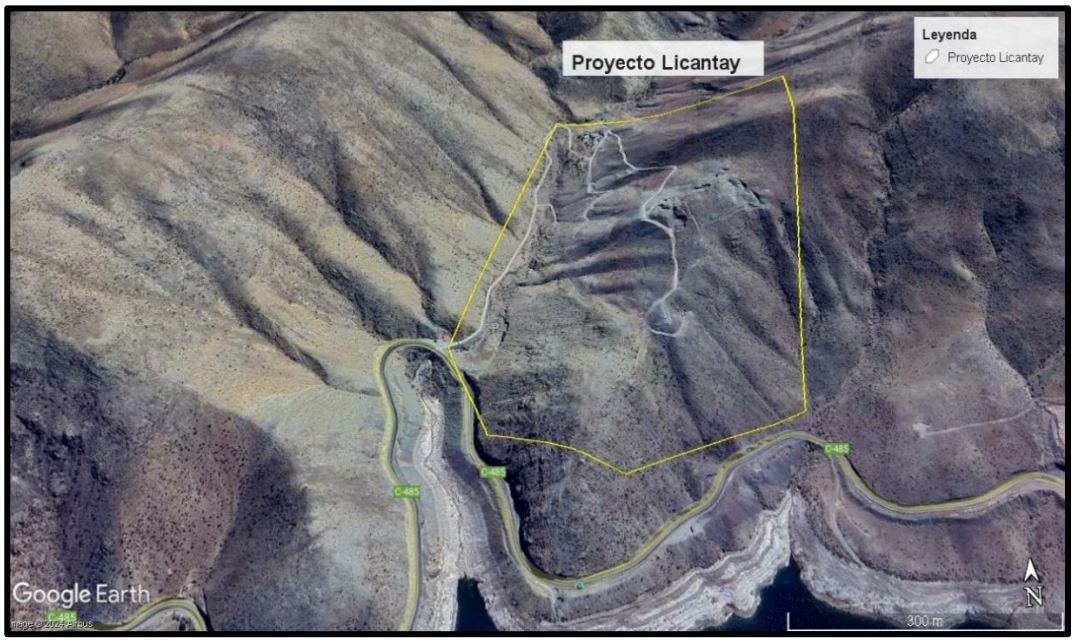


Figura N°6: Polígono marcado de Proyecto Licantay, ubicada a la mitad de Embalse Santa Juana (Mapa creado mediante Google Earth).

1.2. Planteamiento del Problema

El problema central se enfoca en la necesidad de caracterizar la mineralización y distribución de alteraciones, así como su relación con los eventos geológicos de la región. La comprensión detallada de la litología y de los procesos de alteración es esencial para evaluar el potencial minero del área y para diseñar estrategias de exploración más efectivas.

1.3. Justificación

El conocimiento detallado de la geología del área nos permite optimizar la exploración de recursos. Además, desde una perspectiva académica, este conocimiento nos ayuda a entender la evolución tectónica y la geología de la zona, proporcionando datos relevantes para futuros estudios.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General:

El objetivo general de esta tesis es caracterizar las alteraciones hidrotermales en la zona, mediante análisis petrográfico, con el fin de establecer su relación con los procesos de mineralización.

1.4.2. Objetivos Específicos:

1. Caracterizar litológicamente el área de estudio, describiendo las principales unidades litológicas y su distribución espacial.
2. Caracterizar mineralógicamente las unidades geológicas, identificando los minerales principales.
3. Identificar y clasificar las alteraciones presentes, determinando sus características mineralógicas y su relación con las unidades geológicas del área de estudio.

2. Capítulo II: Marco Teórico

2.2. Geología Regional

La geología del Proyecto Licantay se fundamenta en el trabajo Geología del Área Vallenar-Domeyko, realizado por Emparán, Pineda, Arévalo, Mourges y Chávez, que forma parte de la Carta Geológica de Chile elaborada por Sernageomin en 2009 (FIGURA N°3).

Las diversas unidades litológicas del Proyecto Licantay pertenecen al Cretácico Inferior, y al Cretácico superior, un período crucial en la evolución metalogénica de Chile. Esta región alberga una amplia gama de depósitos minerales asociados a distintos modelos geológicos, incluyendo Pórfidos cupríferos, Estratoligados, Skarn, IOCG y brechas hidrotermales (Emparán et al., 2009).

Se reconocen tres formaciones, volcánicas y volcánico-sedimentarias, ordenadas desde la más antigua a la nueva: Formaciones Totoralillo, Pabellón, pertenecientes al Grupo Chañarcillo y por otra parte Formación Cerrillos, las cuales han sido intruidas por la Monzodiorita Pirpiques, datada en 82 Ma (Corvalán, 1974).

2.2.1. Definición y Relaciones de Contacto Formación Pabellón

(Biese-Nickel in Hoffstetter et al., 1957)

Siendo la más joven de las Formaciones, en la que presenta características sedimentarias que indican un ambiente deposicional de plataforma carbonatada inestable, con aportes significativos de material volcánico y detrítico. La secuencia completa muestra una tendencia regresiva, desde facies distales en la base hacia facies proximales en la parte superior, sugiriendo una progresiva emersión de la cuenca. La presencia de diversas especies fósiles marinas respalda la idea de que este depósito se originó en un entorno con alto grado de circulación de agua, en contacto con el mar abierto (Corvalán, 1974; Hoffstetter et al., 1957).

2.2.1.1. Litología

La Formación Pabellón muestra una litología variada, comenzando en su parte inferior con calcilutitas de tonalidades marrón amarillentas a negras, que presentan un aspecto nodular debido a la alta proporción de montmorillonita, un mineral resultado de la desvitrificación de material cinerítico (Corvalán, 1974). En la parte media, predominan las calcarenitas bioclásticas de color marrón anaranjado, con fósiles de bivalvos y trazas fósiles como Thalassinoides sp. (Corvalán, 1974). La porción superior incluye bancos masivos de calcilutitas bioclásticas y volcarenitas de grano medio a grueso, que presentan evidencias de actividad biológica, como moldes de disolución de conchillas y abundantes restos fósiles (Corvalán, 1974; Aguirre, 2001).

2.2.1.2. Interpretación Paleogeográfica

Las características sedimentarias de la Formación Pabellón sugieren un ambiente deposicional de plataforma carbonatada inestable, con aportes significativos de material volcánico y detrítico. La secuencia completa indica una tendencia regresiva, desde facies distales en la base hacia facies proximales en el techo, lo que sugiere una progresiva emersión de la cuenca. La presencia de diversas especies fósiles marinas apoya la idea de que este depósito se originó en un ambiente de alto grado de circulación de agua, en contacto con el mar abierto. (Corvalán, 1974; Hoffstetter et al., 1957).

2.2.1.3. Estudios Previos

Investigaciones como las de Aguirre (2001) han proporcionado información clave sobre el espesor y la distribución de la formación en la región de Vallenar-Domeyko, donde se han registrado espesores de hasta 500 metros. Por su parte, Corvalán (1974) midió espesores que varían entre 433 metros y más de 2.000 metros, dependiendo de la zona estudiada. Estos estudios han sido fundamentales para definir las características litológicas y estratigráficas de la formación, así como para interpretar su ambiente deposicional (Aguirre, 2001; Corvalán, 1974).

2.2.2. Formación Totoralillo

(Biese-Nickel in Hoffstetter et al., 1957)

2.2.2.1. Definición y relaciones de contacto.

Fue definida en el valle del río Copiapó como una serie homogénea de margas de color amarillo a rosado pálido, que contienen abundantes amonitas del Barremiano inferior. En el área circundante, su base se encuentra definida por las primeras calizas limosas sobre las brechas calcáreas del Miembro Superior de la Formación Nantoco, y su techo subyace a las capas de chert de la Formación Pabellón (Biese en Hoffstetter et al., 1957). Las rocas de esta unidad presentan un mayor contenido en líticos y en intercalaciones volcandetríticas en comparación con las del sector del valle del río Copiapó. Sus afloramientos se distribuyen a lo largo de una franja irregular orientada aproximadamente NNE, desde la sierra El Pingo al norte hasta la sierra Agua de los Burros al sur. Al sur de la sierra Agua Amarga, la formación se superpone a las brechas calcáreas del Miembro Superior de la Formación Nantoco, al igual que en su localidad tipo. Al norte de esta sierra, la formación se encuentra sobre lavas de la sección superior de la Formación Punta del Cobre (JKpc3) y calizas del Miembro Inferior de la Formación Nantoco (Kin1). Su techo está definido por el contacto entre las calcarenitas ricas en líticos subyacentes y los cherts de la base de la Formación Pabellón (Biese en Hoffstetter et al., 1957). La sucesión presenta un espesor que varía entre aproximadamente 100 y 300 m (Corvalán, 1974).

2.2.2.2. Litología

La Formación Totoralillo está compuesta por calcarenitas y calcilutitas limosas bioclásticas, ricas en líticos volcánicos, en estratos delgados a horribles, con intercalaciones significativas de rocas volcándetríticas, que son más notables hacia el sur del embalse Santa Juana. La facies dominante de la formación corresponde a margas amarillas, bien estratificadas, alternadas con calcarenitas rojizas, brechas y menores cantidades de volcarenitas verdosas, con niveles bioclásticos (Corvalán,

1974). Desde el embalse Santa Juana hacia el sur, se intercalan rocas volcánicas y volcánicas en la parte media y superior de la secuencia, que se destacan por su color marrón rojizo a verdoso. Estas están compuestas por brechas, conglomerados y volcarenitas, así como por andesitas brechosas y andesitas porfídicas con abundante limonita y hematita.

2.2.2.3. Edad

Es la segunda en antigüedad del grupo Chañarcillo, la fauna de amonites y bivalvos con significado cronoestratigráfico, recolectada en capas de la formación, ha sido descrita por Jurgan (1977) y Covacevich (1978), quienes asignan a este material edades que oscilan entre el Hauteriviano y el Barremiano. Nuevas recolecciones durante este estudio permitieron a Mourgues identificar amonites de los géneros Shasticrioceras y Emericiceras, lo que permite una mejor precisión de la edad de la formación en un rango de Barremiano inferior (Mourgues et al., 2009).

2.2.2.4. Interpretación

Las rocas que conforman la Formación Totoralillo se habrían depositado en un ambiente marino de plataforma carbonatada distal y hemipelágico, considerando la abundante fauna nectónica presente (amonitas). Esta plataforma habría recibido reiterados e importantes aportes volcánicos, como lo documentan las Múltiples intercalaciones de flujos de detritos subacuáticos. La composición monolitológica dacítica y vítrea de los clastos en esta área indica que los flujos provienen de la erosión de aparatos volcánicos felsíticos contemporáneos a la deposición marina (Covacevich, 1978; Mourgues et al., 2009).

2.3.3. Unidad intrusiva Monzodiorita Pirpiques

(Nueva unidad)

2.3.3.1. Definición y relaciones de contacto

Consiste en una unidad intrusiva que aflora en el cordón del mismo nombre. Se encuentra representada por dos cuerpos geológicos: un filón manto emplazado en

la Formación Pabellón, y un cuerpo blanquecino de forma lenticular con orientación NS que intruye las calizas de dicha formación. Este cuerpo se yuxtapone a los conglomerados de la Formación Cerrillos a través de la traza principal de la Falla Agua de Los Burros, indicando una interacción tectónica importante entre las unidades (Corvalán, 1974; Mourges et al., 2009).

2.3.3.2. Litología

Desde un punto de vista litológico, la Monzodiorita Pirpiques está compuesta por Monzodiorita de anfíbola y piroxeno, mostrando una intensa albitización en las plagioclasas que le confiere su característico color blanquecino. La anfíbola se presenta tanto en su estado fresco como en diversos grados de alteración a clorita, mientras que el piroxeno es reemplazado por clorita y epidota. Además, la biotita, cuando está presente, es completamente reemplazada por clorita, lo que indica una alteración hidrotermal considerable en la unidad (Aguirre, 2001; Covacevich, 1978).

2.3.3.3. Edad

La datación mediante el método 40Ar/39Ar en anfíbola arrojó una edad de 81.5 ± 1.1 Ma, sugiriendo que la cristalización de la Monzodiorita Pirpiques ocurrió durante el Cretácico Superior. Esta edad es coherente con otros intrusivos de la misma época en la región, situando a esta unidad dentro del marco geológico de actividad magmática vinculada al arco volcánico cretácico (Mourgues et al., 2009).

2.3.3.4. Cretácico Superior

El Cretácico Superior en la región se caracteriza por la presencia de varios cuerpos intrusivos que representan la actividad magmática asociada al arco volcánico de esa época. Estos cuerpos incluyen tanto intrusivos menores, como los de composición diorítica de la Quebrada Vizcachitas (Kshqv), como intrusivos plutónicos mayores, entre los que se encuentran el Complejo

Plutónico Camarones (Ksc), la Granodiorita Jilguero (Ksgdj), la Monzodiorita El Carrizo (Ksmdc) y la Monzodiorita Pirpiques (Ksmdp) (Emparan & Pineda, 2009).

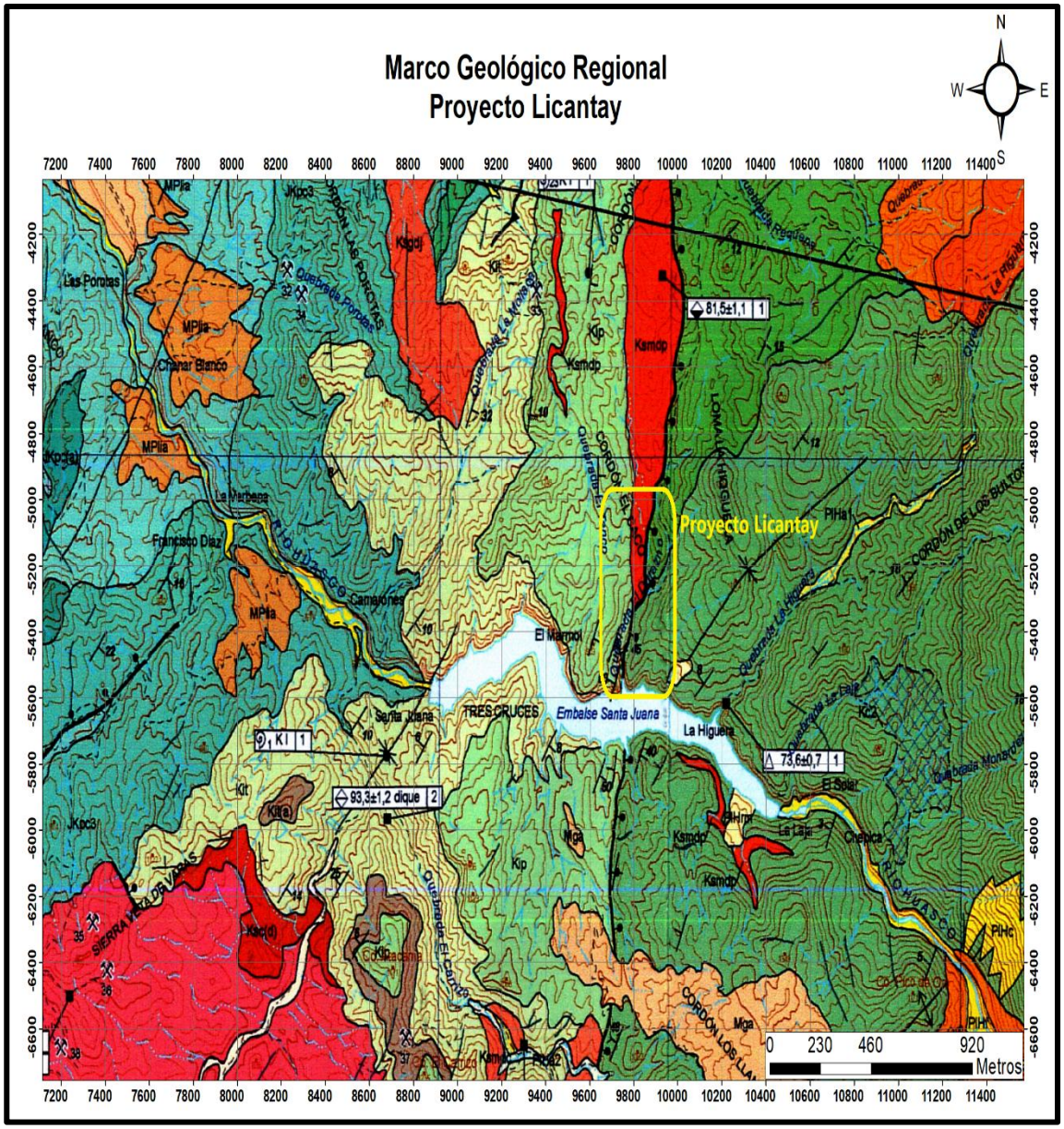


Figura N° 7: Marco geológico regional. Geología 1:100.000 del Sernageomin del Área Vallenar-Domeyko, Región de Atacama de Emparán y Pineda, Arévalo C., Mourges F., y Chávez R., de la Carta Geológica de Chile – Sernageomin 2009.

2.4. Geología Local

La geología en el Proyecto Licantay, está caracterizada en su parte central por un predominio de rocas volcánicas de la Formación Cerrillo y, en la parte occidental al W de la Quebrada el Durazno, por unidades volcánicas-sedimentarias, en parte metamorfoseadas, por la Formación Pabellón. La interfaz entre ambas formaciones se establece a través de una falla normal Agua de Los Burros, que pasa exactamente por la Quebrada el Durazno, localizada en medio de la propiedad. Esta área está afectada por múltiples fallas y lineamientos, predominantemente orientados de Norte a Sur y en dirección N10°W, que forman parte de un sistema regional y determinan la disposición de la mineralización de cobre.

En el centro del Proyecto, se expone una secuencia de andesitas de tonalidades verdes amarillentas, ligeramente porfídicas. Estas rocas presentan una alteración moderada de clorita-epidota, la cual es de carácter regional y no se asocia directamente con la mineralización, aunque tiende a ser más evidente en las áreas mineralizadas debido a su mayor fracturamiento. También se observa silicificación, aunque en una intensidad baja. La composición de las andesitas, junto con la silicificación, las convierte en rocas duras, competentes, impermeables y poco propicias para la formación de cuerpos de gran tonelaje. Las fallas en esta área tienden a ser rectas y están alineadas con esfuerzos en un entorno frágil.

2.4.1. Formación Cerrillos

La Formación Cerrillos, definida por Segestsrtrom y Parker (1959), que se remonta al período Cretácico (Albiano-Campaniano), es una de las unidades geológicas más significativas del norte de Chile, especialmente en la región del valle del río Copiapó. Desde su caracterización por Segerstrom y Parker en 1959, ha sido objeto de numerosos estudios,

quienes la catalogaron como una secuencia heterogénea compuesta por rocas clásicas y volcánicas.

2.4.1.1. Definición y Relaciones de Contacto

Se describe como una secuencia de apariencia heterogénea, con tonalidades que oscilan entre el verdoso y el rojizo, formada por diversos depósitos clásticos y volcánicos. Esta formación se encuentra principalmente en el tercio oriental de la Carta Vallenar-Domeyko, a detrás desde el Cordón El Cinchado al norte hasta la quebrada Algarrobal al sur. Se estima que su espesor mínimo es de 3.000 metros y se asienta de manera concordante sobre la Formación Pabellón. La parte superior de la formación no es evidente en los afloramientos, lo que dificulta la precisión en la estimación de su espesor total (Mpodozis & Allmendinger, 1993; Arévalo, 2005).

2.4.1.2. Litología

La sección inferior de la Formación Cerrillos está compuesta mayoritariamente por paraconglomerados bien estratificados, con clastos redondeados de origen andesítico (30-40%) y dacíticos (10-20%). Estos conglomerados se intercalan con capas de areniscas de 0,5 a 1 metro de espesor y están organizados en bancos de entre 2 y 5 metros de grosor. En las zonas inferiores de la sección basal se observan también dos horizontes delgados de calizas y areniscas volcánicas, uno al norte y otro al sur del río Huasco, que indican la presencia de un ambiente transicional entre la sedimentación marina y continental. (Mpodozis & Allmendinger, 1993; Arévalo, 2005).

La sección superior (Kc2) está formada por una serie de coladas volcánicas compuestas por andesitas y andesitas basálticas de color gris oscuro, con texturas afaníticas a porfídicas finas. Estas coladas, que varían entre 3 y 8 metros de espesor, son continuas lateralmente y muestran un aspecto homogéneo. En las proximidades del embalse Santa Juana, se han identificado tobas rosadas sin estratificación visible, que se intercalan con las coladas andesíticas, aportando variaciones litológicas dentro de la formación.

2.4.1.3. Interpretación Deposicional

Formación Cerrillos refleja una transición en la historia geológica del área, pasando de un ambiente marino restringido a un ambiente predominantemente continental. La presencia de horizontes calcáreos en la base de la sección basal (Kc1) indica que la sedimentación comenzó en un ambiente transicional, con episodios breves de incursión marina en cuencas cerradas. Esto se refleja en la escasa fauna presente en estas capas, lo que refuerza la hipótesis de una circulación limitada de agua marina.

Los paraconglomerados de la sección basal sugieren depósitos de flujos de detritos, posiblemente asociados a eventos torrenciales en abanicos aluviales o deltaicos. Por su parte, las areniscas habrían sido depositadas por flujos arenosos densos, en llanuras de inundación relacionadas con los cuerpos sedimentarios más gruesos.

La sección superior (Kc2), dominada por coladas volcánicas, sugiere que, tras la depositación clástica, la cuenca experimentó un episodio de actividad volcánica significativa. Este episodio volcánico refleja un cambio en las condiciones tectónicas, vinculado a la extensión que afectó la región durante el Cretácico Inferior alto.

2.4.1.4. Tectónica y Evolución de la Cuenca

El comportamiento tectónico de la cuenca en la que se depositó la Formación Cerrillos parece estar controlado por una subsidencia diferencial, característica de cuencas de tipo hemigraben. En este tipo de cuencas, la subsidencia asimétrica está controlada por la actividad de fallas normales, que generan un hundimiento progresivo del bloque colgante durante la sedimentación. En el caso de la Formación Cerrillos, la Falla de Los Burros pudo haber actuado como el principal control estructural, creando un relieve pronunciado desde el cual se movilizaron los detritos que forman los conglomerados observados en la base de la formación.

Esta hipótesis se apoya en la fuerte polaridad sedimentaria observada, con conglomerados gruesos hacia el oeste y areniscas más finas hacia el este, lo que

indica una fuente de sedimentos en dirección hacia el oeste y una mayor subsidencia en ese borde de la cuenca. Estudios previos de Mpodozis y Allmendinger (1993) y Arévalo (2005) la han descrito como una fase extensional del Cretácico Inferior alto, que contribuyó al desarrollo de esta cuenca y a la acumulación de los sedimentos que componen la Formación Cerrillos.

2.5. Geología Estructural

2.5.1. Deformación de la Cuenca de Chañarcillo

La estructura en el área de estudio está principalmente dominada por la Falla Agua De los Burros. Definido por primera vez por Segerstrom (1960), el Anticlinorio de Tierra Amarilla es un anticlinal de inversión (Martínez et al., 2013; Martínez et al., 2015) de gran longitud de onda con vergencia oriental. Esta afecta principalmente a la Formación Punta del Cobre, el Grupo Chañarcillo y Formación Cerrillos.

Esta Falla cruza por la Quebrada El Durazno donde originalmente, Moscoso y Mpodozis (1988) la definieron como una falla normal con vergencia hacia el este, pero estudios posteriores la reinterpretaron como una falla normal con vergencia hacia el oeste, que fue reactivada como falla inversa de vergencia al este, por (Salazar, 2012). Esta falla tiene una orientación N-S y un largo de traza superior a 100 km. Se la considera la continuación sur de la Falla Elisa de Bordos (Martínez et al., 2013; 2015), aunque otros autores, como Arévalo et al. (2009) y Salazar et al. (2013; 2021), sugieren que son estructuras independientes.

La Falla Agua de los Burros controló la formación del Anticlinorio de Tierra Amarilla y actuó como el límite oriental de la Cuenca de Chañarcillo durante su fase de extensión en el Ciclo Andino. Posteriormente, con el cambio de régimen tectónico (Cornejo et al., 2003), experimentó una inversión positiva. Las Gravas de Atacama, que cubren la traza de la falla, indican que la inversión tectónica ocurrió entre el Maastrichtiano y el Mioceno Inferior (Arévalo et al., 2009). Sin embargo, Moscoso

(1979) señaló que ni las características ni la estratigrafía permiten restringir más este rango temporal.

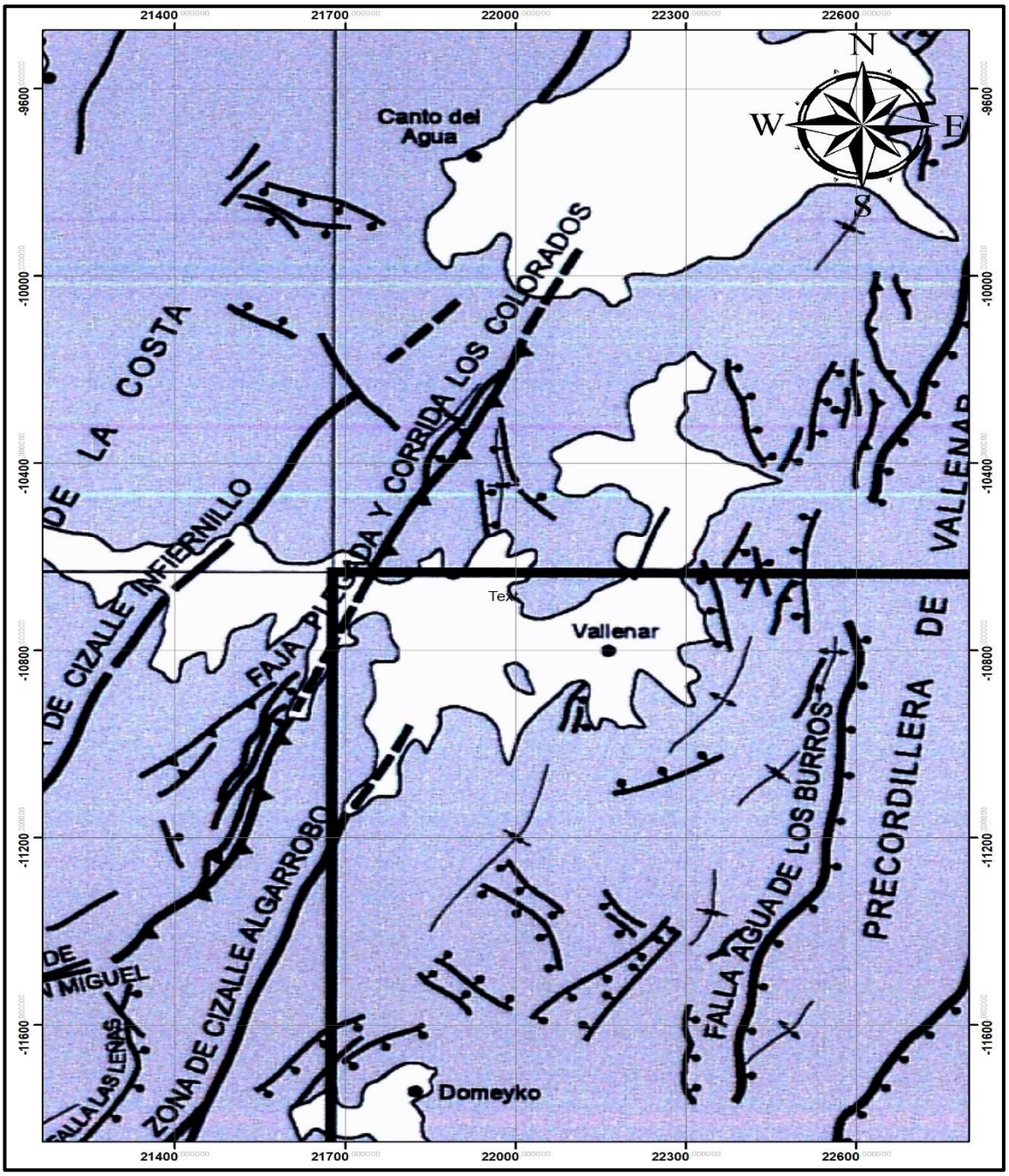


Figura N° 8: Esquema Estructural del Área Vallenar-Domeyko. Origen: Arévalo, C., Mourgues, F. A., & Chávez, R. (2009). Geología del área Vallenar- Domeyko, Región de Atacama. Carta Geológica de Chile.

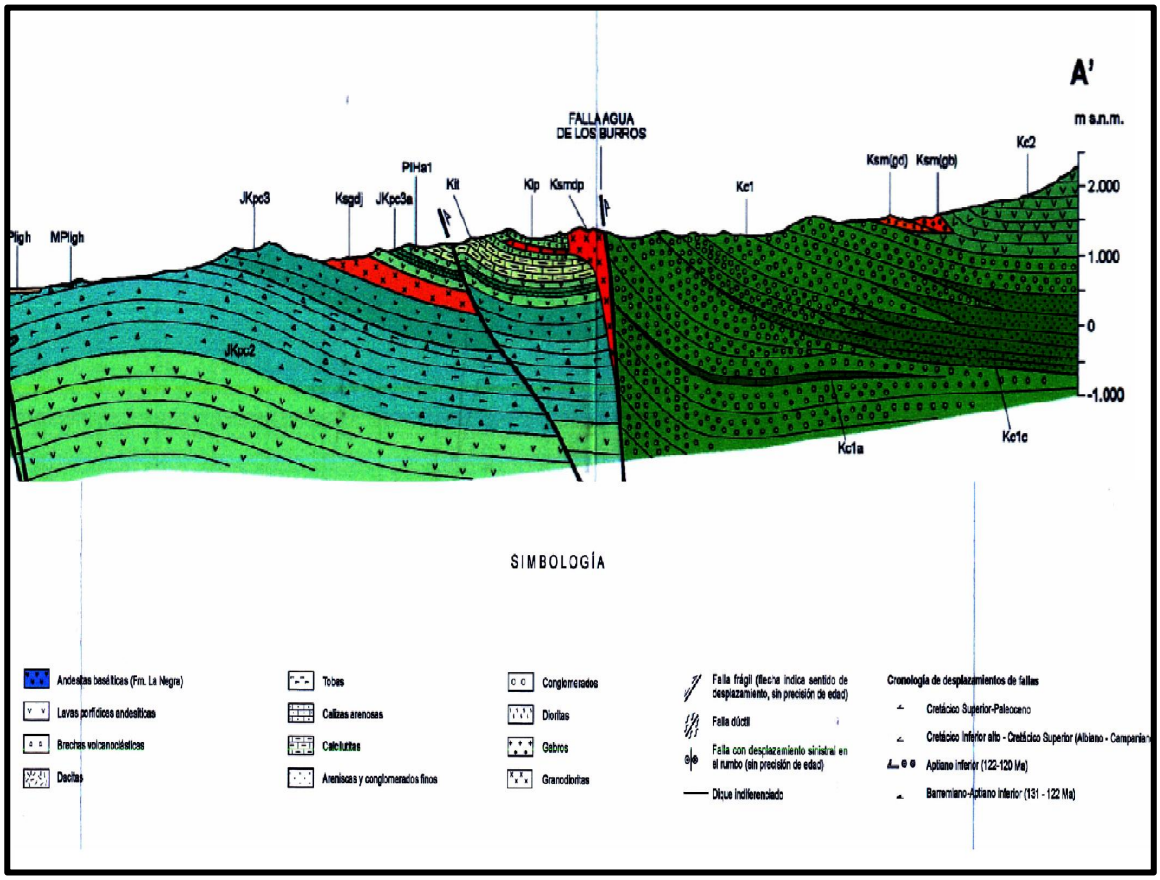


Figura N°5: Perfil Esquemático de Falla Agua de los Burros. Fuente: Arévalo, C., Mourgues, F. A., & Chávez, R. (2009). Geología del área Vallenar-Domeyko, Región de Atacama. Carta geológica de Chile.

3. Capítulo III: Metodología

3.1. Área de Estudio

La zona de estudio se ubicó en la comuna Alto del Carmen, Provincia de Vallenar, III Región de Atacama, Chile. Este sector fue de especial interés debido a su potencial para depósitos de cobre y su contexto tectónico complejo. La región incluyó formaciones geológicas claves, como Formación Totoralillo, Formación Cerrillos, Formación Pabellón, que son intruidas por una unidad intrusiva Monzodiorita Pirpiques, que proporcionaron una rica información sobre la evolución geológica del Cretácico.

3.2. Fase de Preparación

3.2.1. Revisión de Información Previa

Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura, así como revisión de Cartas Geológicas de la zona, con énfasis en los estudios sobre las Formaciones Cerrillo, Formación Totoralillo, Formación Pabellón y la unidad intrusiva Monzodiorita Pirpiques.

3.2.2. Planificación y Delimitación del Área

Con base en la revisión previa, se establecieron los límites específicos de la zona de estudio, garantizando una mejor cobertura de la zona. Esta delimitación facilitó la planificación logística del trabajo de campo y la distribución de áreas de muestreo y mapeo geológico. Además, se creó una Carta Gantt en la que se detalló con las fechas de las salidas a terreno, así como el tiempo estimado para la preparación de cada capítulo, revisar (Anexo N°1):

3.3. Equipos y Herramientas

El trabajo de campo y el estudio posterior se llevaron a cabo utilizando equipos que incluyeron (Anexo N°2):

- GPS: Para la georreferenciación precisa de los puntos de muestreo.
- Cámara fotográfica: Para la documentación visual de los afloramientos y características geológicas.
- Equipos de campo: Martillo geológico, brújula, lupas, ácido clorhídrico, y bolsas para el almacenamiento de muestras, cámara microscópica.
- Software: Programas como SAS Planet, ArcGIS, para análisis de imágenes satelitales y mapeo.

3.4. Trabajo de Campo

3.4.1. Procedimiento de Mapeo Geológico

Se realizó un mapeo geológico detallado para caracterizar las unidades y estructuras relevantes. Las observaciones de campo incluyeron la caracterización litológica, mineralógica y la identificación de alteraciones presentes. Estos puntos fuero integrados en un mapa, con ayuda de los software SAS Planet y ArcGIS.

3.4.2. Toma de Muestras

Se recolectaron muestras representativas de las diferentes unidades geológicas y zonas de alteración. Cada muestra fue documentada, registrando observaciones sobre la mineralogía visible y las alteraciones. Este procedimiento permitió obtener una comprensión más detallada de la geología del Proyecto Licantay y su relación con los procesos de mineralización de cobre.

3.5. Análisis de Muestras y Datos

Se realizo análisis petrográfico con las muestras recolectadas considerando sus características visibles. Estos datos se complementaron con las observaciones de campo, y una cámara microscópica, así logrando entender los procesos geológicos y su relación con la evolución tectónica y mineralización de la zona.

4. Capítulo IV: Resultados

4.1. Descripción de las Unidades Geológicas

En el Proyecto Licantay se identificaron diversas unidades geológicas que incluyen rocas ígneas, rocas sedimentarias. Estas unidades presentan una variedad de estructuras y características litológicas que determinan los controles de mineralización en la zona.



Figura N° 6: Labor minera correspondiente a Dique andesítico, en coordenadas E-034360030 y N-6.827.614, con una elevación de 730 m. Este dique muestra una orientación N80°O y está asociado a condiciones de metamorfismo regional. La estructura sugiere un contexto de intrusión magmática que ha generado contactos litológicos favorables para la mineralización.



Figura N°7: Techo de Labor minera, correspondiente a Dique andesítico, (Figura N°6). Con presencia de Crisocola, mineral secundario perteneciente al grupo de Silicato de Cobre.

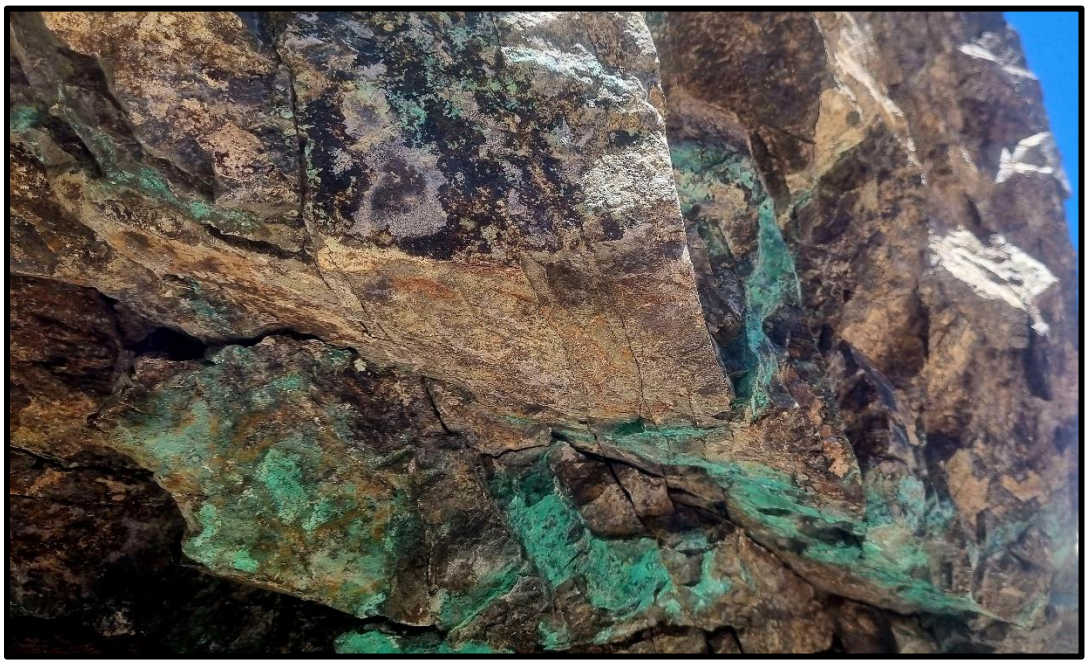


Figura N°8: Techo de Labor minero, (Figura N°6), con mineralización de Crisocola.



Figura N°9: Pared de Labor minero (Figura N°6), con Mineralización de Crisocola y presencia de Fracturas.



Figura N°10: Muestra de Dique, (Figura N°6), presenta Óxido de Manganeso en un contexto de alteración superficial, lo que podría estar asociado a procesos de lixiviación o precipitación de manganeso en ambientes oxidantes.

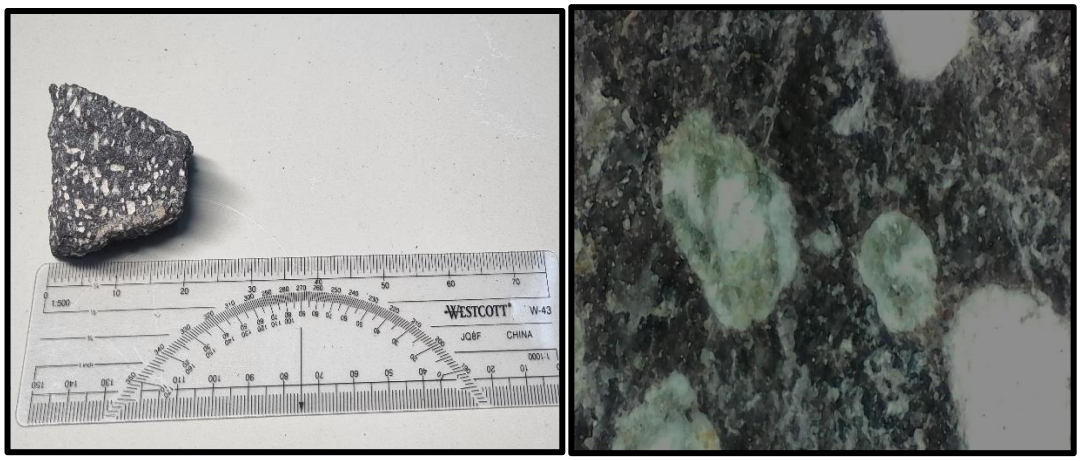


Figura N°11: Roca Andesítica, Muestras representativa, correspondiente a (Figura N°6). Dique Andesítico, en el cual se obversa Plagioclasa con Alteración de Clorita.

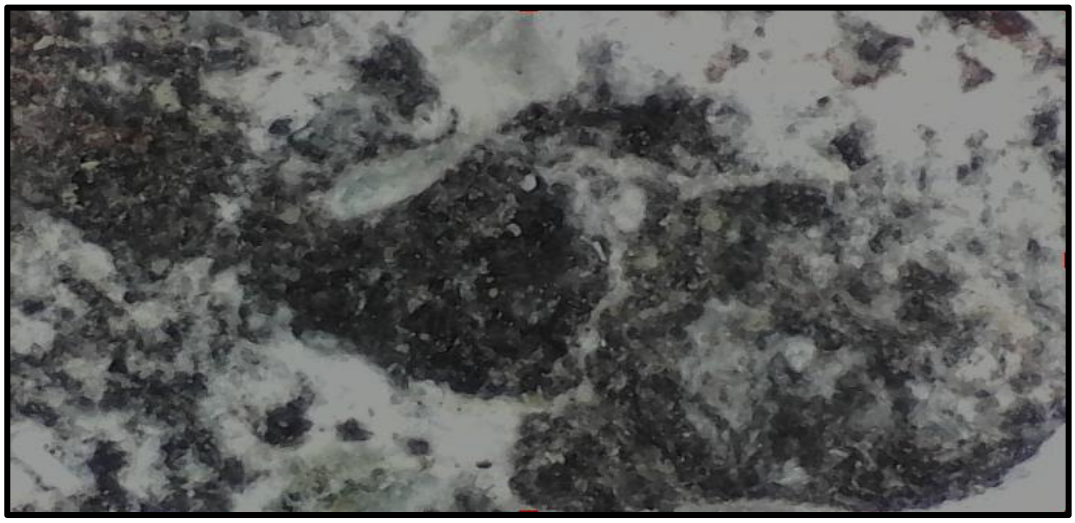


Figura N°12: Correspondiente a Roca Andesítica, (Figura N°10), con presencia de Plagioclasa color blanquecino. (Imagen tomada mediante Cámara Microscópica).

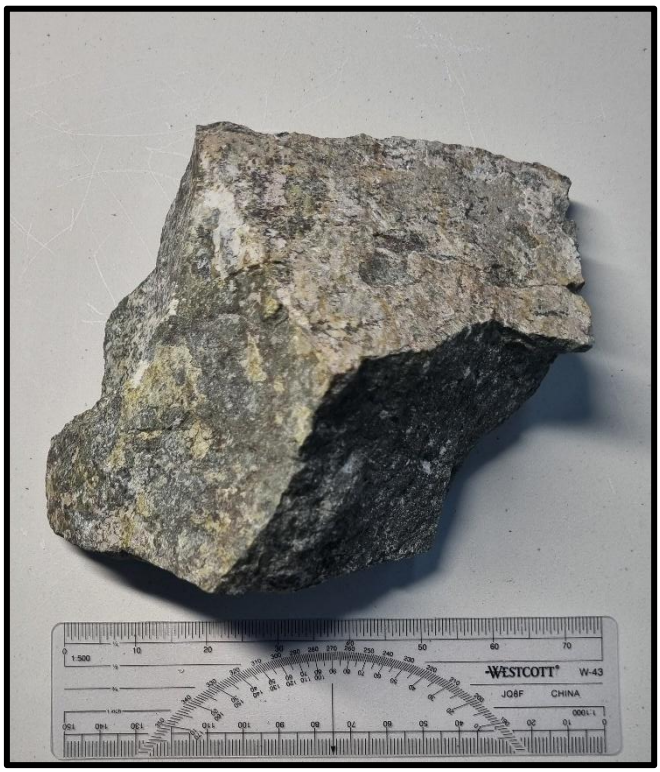


Figura N°13: Muestra representativa de Dique Andesítico correspondiente a (Figura N°6).

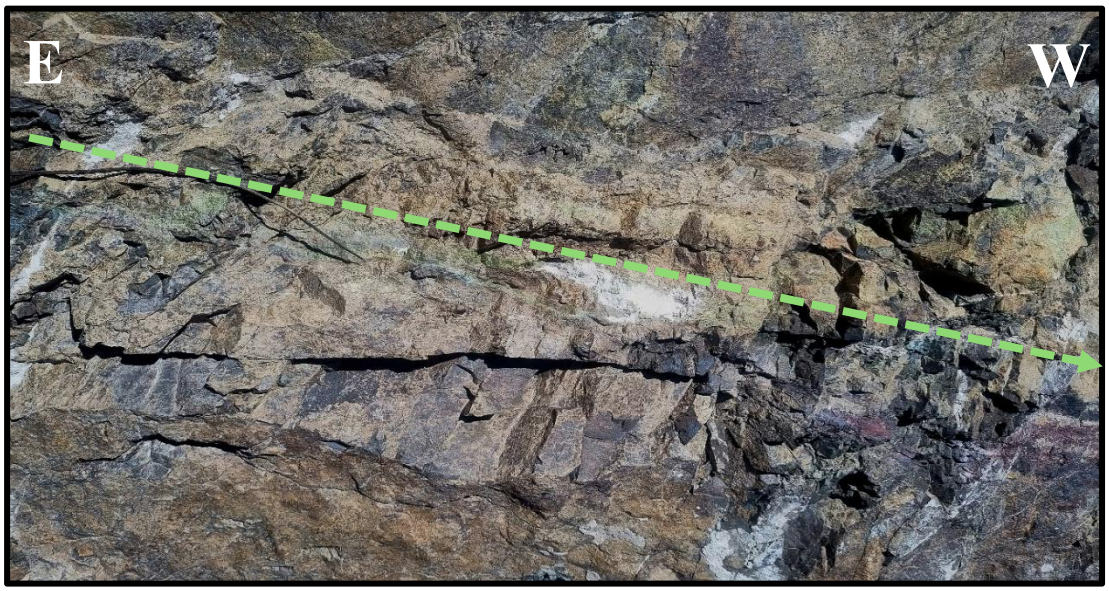


Figura N°14: Se observar una Alteración de Epidota con un ancho de 4 metros aproximado. En coordenadas E-0343596 y N-6.827.503 y una elevación de 745 m. La alteración sugiere una influencia hidrotermal en las fracturas que podrían actuar como camino para fluidos mineralizantes.



Figura N°15: Falla de caliza ubicada en coordenadas E-0343588 y N-6.827.602, con un manteo de 40° y un rumbo de N 85°E, con una elevación de 734 m. La caliza muestra fracturas abiertas que pueden actuar como caminos para fluidos mineralizantes.



Figura N°16: Correspondiente a Labor minera fortificada, en coordenadas E-0343619 y N-6.827.280. Hallazgo de Arenisca gris pardo con mineralización de Crisocola. Con una elevación de 779 m.



Figura N°17: Interior de Labor minera fortificada, (Figura N°16), con mineralización de Óxido de Cobre, predomina la Crisocola en Techo y paredes.



Figura N°18: Correspondiente a Labor minera de (Figura N°16), se observar Arenisca gris pardo con Mineralización de Crisocola y Chenevixita.



Figura N°19: Correspondiente a Labor minera (Figura N°16), presencia de Arenisca gris pardo con Mineralización de Óxido de Cobre, con predominio de Crisocola.

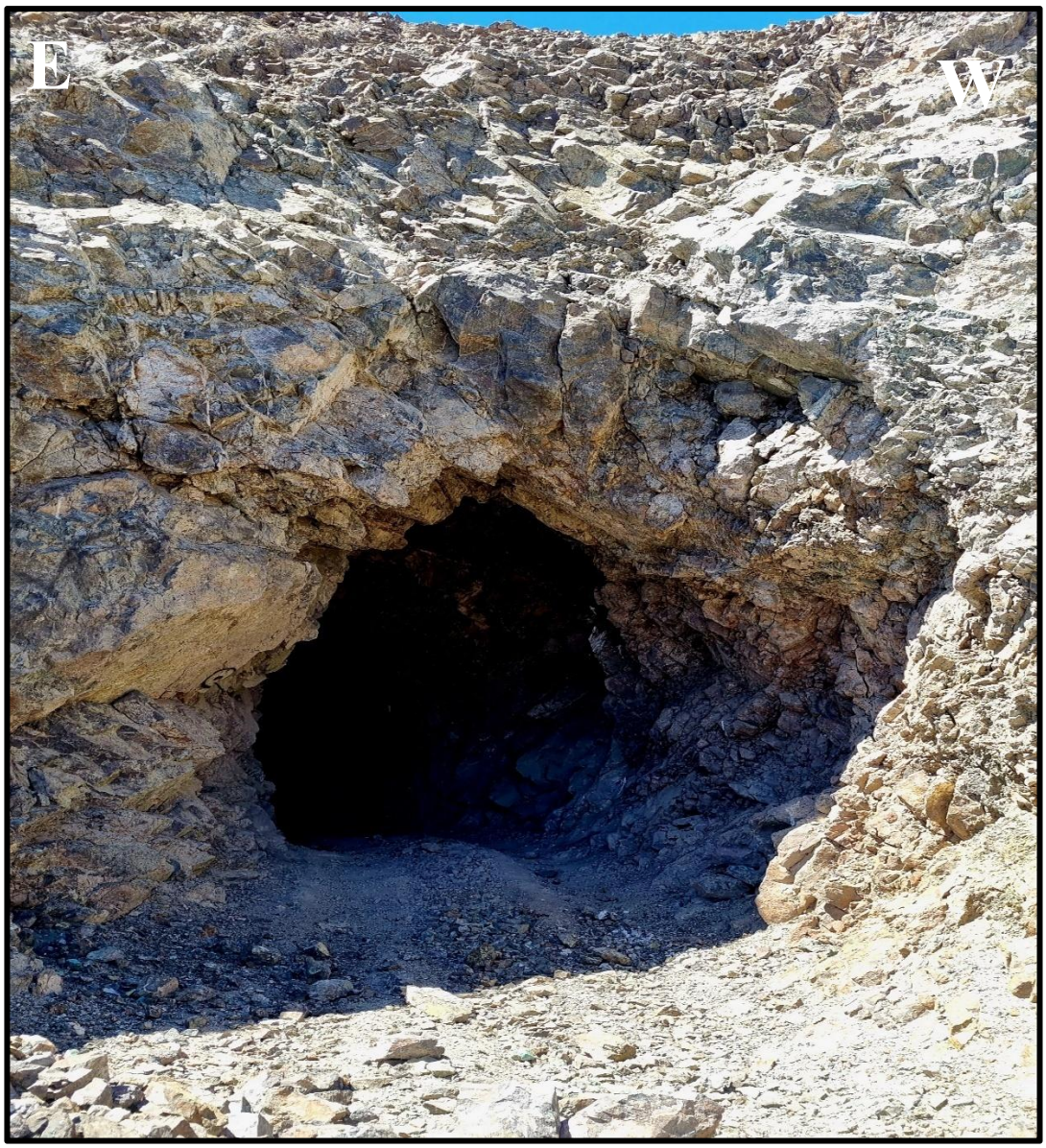


Figura N°20: Labor minera, a 5 metros del Laboreo anterior en coordenadas E-0343625 y N-6.827.95. (Norte 45° Oeste dirección al Túnel). Con una elevación de 772 m.

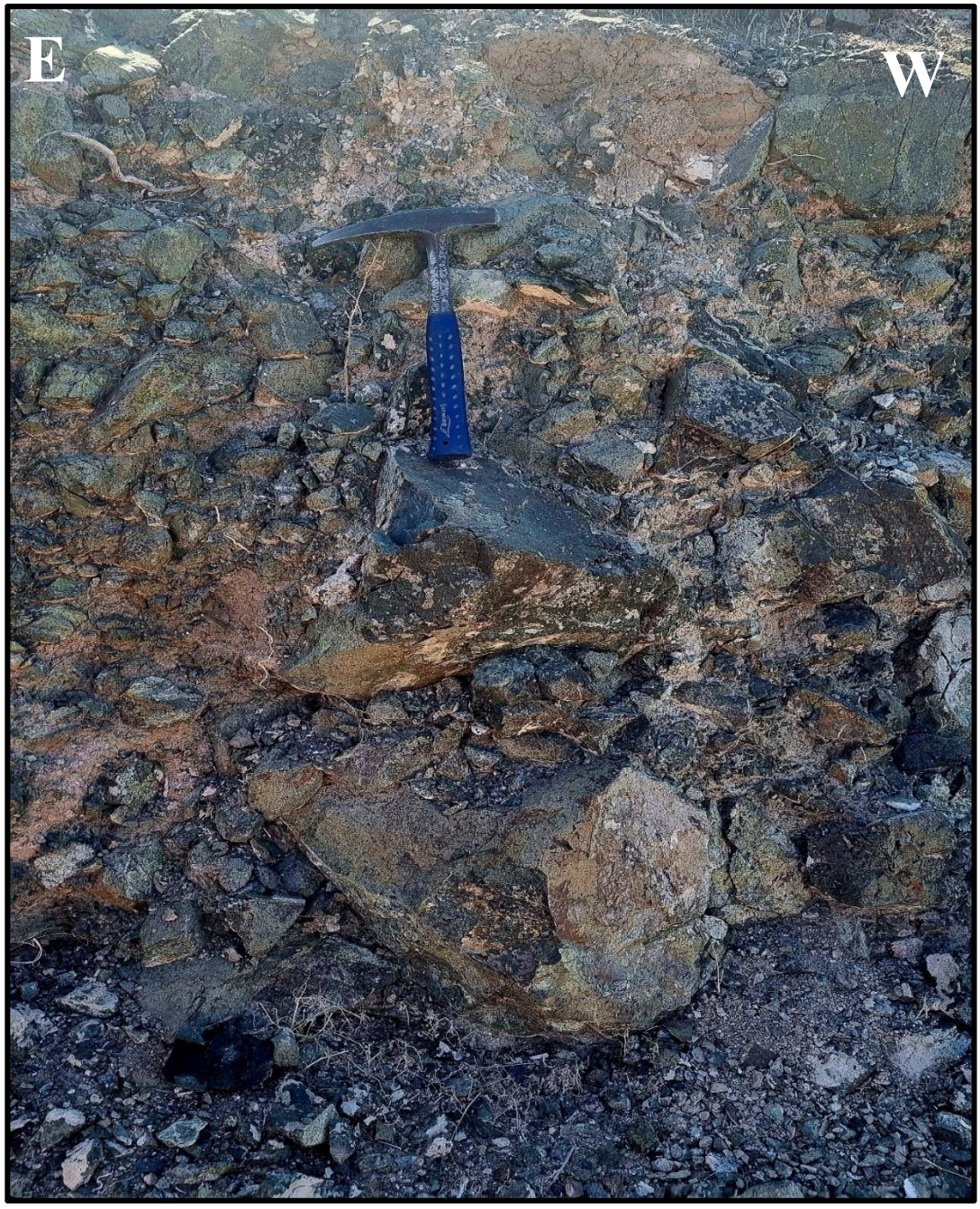


Figura N°21: Presencia de Arenisca Fina, con dolor verdoso en coordenadas E-0343621 y N-6.827.136, con una elevación de 790 m.

4.2. Recursos Minerales Identificados

La mineralización identificada en el área de estudio se compone principalmente de óxidos de cobre, asociados a estructuras geológicas como fracturas y contactos litológicos.



Figura N°22: Techo de manto mineralizado en coordenadas E-0343740 y N-6.827.278, con una elevación de 813 m. Este manto está desarrollado en el contacto entre andesitas impermeables y un manto oxidado-lixiviado, rico en jarosita, y arcillas con algo de crisocola.



Figura N°23: Presencia de Arenisca con mineralización de Crisocola y Chenevixita, en coordenadas E-0343625 y N-6.827.290 con una elevación de 800 m. La mineralización de crisocola en arenisca indica una fuerte relación estructural, ya que se encuentra principalmente en fracturas y contactos litológicos permeables**.**



Figura N°24: Labor minera, Manto mineralizado con predominio de Crisocola sobre arcillas ricas en Cu, en coordenadas E-0343763 y N-6.827.248 (Norte 15° Oeste). Con una elevación de 805 m. Disposición según un manteo N30W/20- 25 SE y desarrollado en el contacto litológico con un nivel superior de andesitas rojas impermeables estériles.



Figura N°25: Pared de Labor minera de (Figura 24). correspondiente a Crisocola con presencia de Oxido de Manganeso.



Figura N°26: Pared de Labor minera de (Figura 24). correspondiente a Crisocola y presencia de fracturamiento.

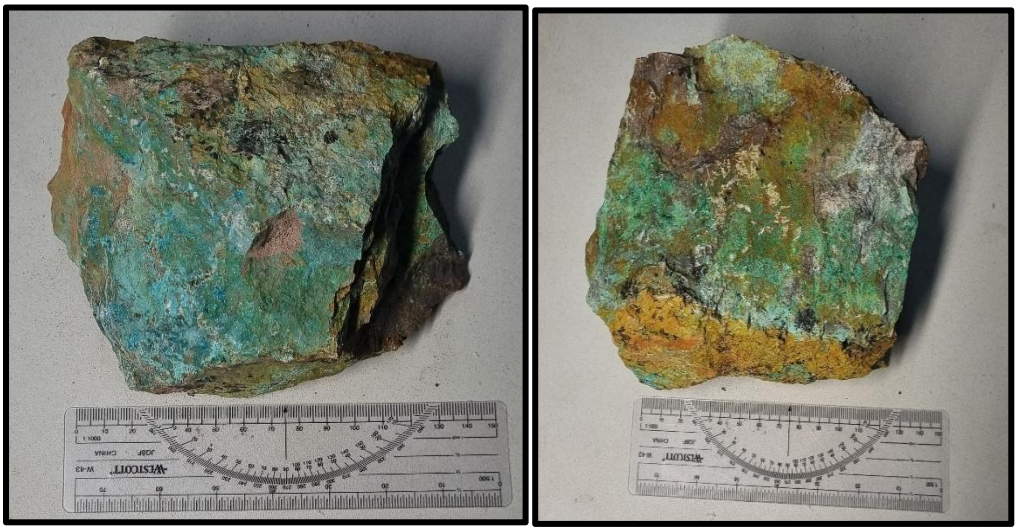


Figura N°27: Muestras representativa de (Figura N°24). Correspondiente a Crisocola.



Figura N°28: Muestra representativa de Conglomerado, de Techo de Labor minera (Figura N° 24), compuesto por clastos angulares a subredondeados



Figura N°29: Presencia de Conglomerado en el Techo de la labor minera (Figura N° 24), compuesto por clastos angulares a subredondeados.



Figura N°30: Presencia de conglomerado en el techo de la Labor minera, mostrado en la (Figura N°24), con clastos angulares a subredondeados.

4.3. Distribución de Afloramiento

En el área de estudio se lograron ver afloramientos de diferentes tipos de rocas, lo que permite observar las interacciones litológicas.



Figura N°31: Afloramiento de Arenisca Calcárea, con Veta de Cuarzo y Epidota. En coordenadas E-0343691 y N-6.827.271, con una elevación de 812 m. Este afloramiento destaca por sus características de alteración hidrotermal y su potencial para albergar mineralización secundaria.



Figura N°32*: Muestra representativa de Afloramiento de Arenisca Calcárea (Figura N°31), correspondiente a Veta de Cuarzo y Epidota*



Figura N°33: Muestra representativa de Afloramiento de Arenisca Calcárea (Figura N°31), correspondiente a Veta de Cuarzo y Epidota.



Figura N°34: Afloramiento de Microdiorita identificada como Roca hipabisal con leve magnetismo, localizada en las coordenadas E-0343630 y N-6.827.328, a una elevación de 763 m.



Figura N°35: Muestra representativa de Microdiorita, con presencia de granos finos. (Figura N°34).



Figura N°36: Afloramiento de Arenisca calcárea en coordenadas E-0343706 y N-6.827.263, con una elevación de 817 m. La arenisca calcárea muestra una textura masiva y fracturas rellenas con cuarzo, indicando un contexto geológico favorable para la acumulación de minerales.



Figura N°37: Afloramiento de Lutita Negra, de grano fino, impermeable, de origen Sedimentario, en coordenadas E-0343781 y N-6.827.313, con una elevación de 826 m.

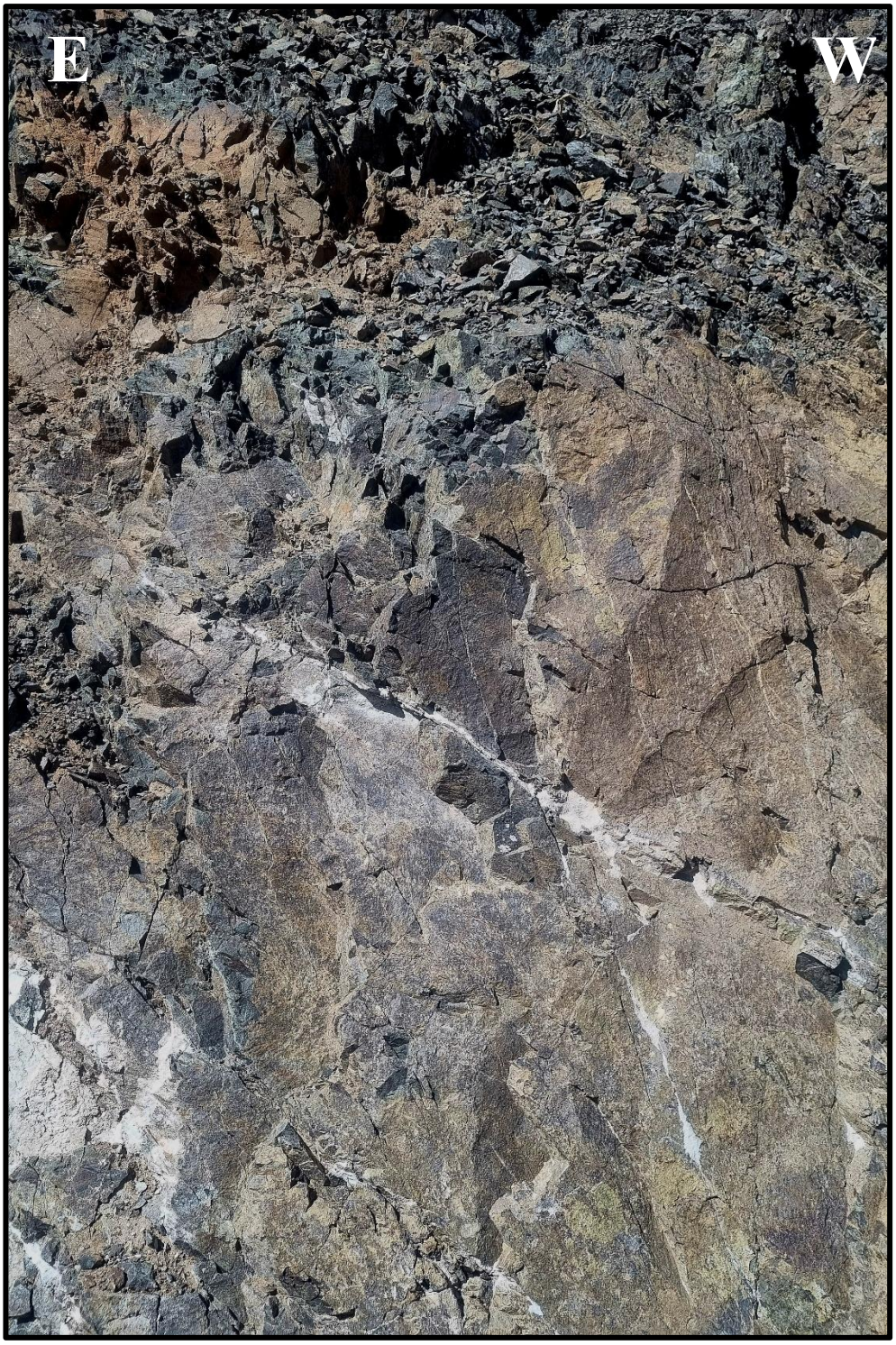


Figura N°38: Afloramiento de Arenisca de color pardo con diaclasamientos, en coordenadas E-0343651 y N-6.827.368, con una elevación de 760 m. Presenta un manteo de 45° y Rumbo N 25° E. Las diaclasas observadas en esta arenisca indican deformación frágil, lo que aumenta la permeabilidad en estas unidades.



Figura N°39: Muestra representativa de (Figura N°38). Correspondiente a Arenisca Color Pardo Rojiza con Diaclasamiento.

4.4. Mapa Representativo De Proyecto Licantay

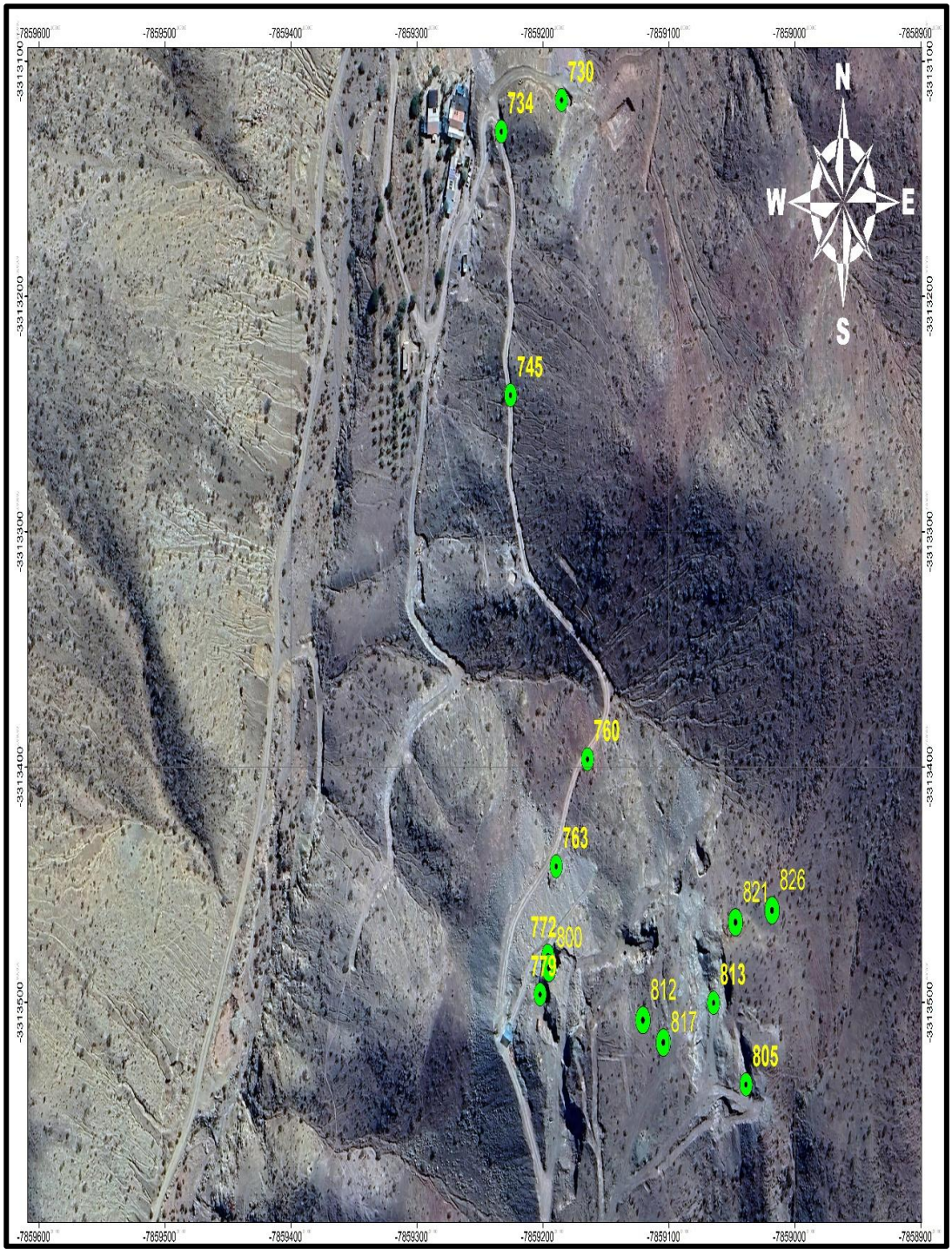


Figura N°40: Mapa de la zona de estudio, mostrando los puntos representativos donde se tomaron los datos (mapa elaborado mediante ArcGIS)

5. Capítulo V: Discusión

5.1. Interacción entre las Unidades Geológicas y la Tectónica Regional

Están caracterizadas por rocas ígneas, sedimentarias, que estaban limitadas por las características estructurales y litológicas de las rocas recolectadas durante las observaciones del Proyecto Licantay. En particular, las unidades sedimentarias como las areniscas calcáreas o las lutitas negras significan una sedimentación influenciada por eventos tectónicos extensionales (Mpodozis y Allmendinger, 1993). Las formaciones sedimentarias registraron una subsidencia diferencial significativa hacia el oeste, indicativa de un control de la cuenca por fallas normales de alto ángulo, típico del régimen extensional del Cretácico Inferior Tardío. Esto sugiere además una intrusión magmática relacionada con un marco tectónico extensional, evidenciado por los diques andesíticos y los afloramientos de microdiorita en las áreas accesibles, (Mpodozis y Allmendinger, 1993).

5.2. Control Tectónico de la Cuenca

La subsidencia diferencial, un rasgo distintivo de las cuencas Hemigraben, tuvo un papel fundamental en la conformación de la Cuenca de Chañarcillo. La actividad de la Falla Agua de los Burros desarrolló un control estructural que facilitó el hundimiento del bloque colgante, lo que propició la acumulación de sedimentos clásticos y la posterior intrusión de cuerpos magmáticos (Mpodozis y Allmendinger, 1993).

La reactivación de esta falla como inversa durante el cambio tectónico del Ciclo Andino dio origen a formaciones como el Anticlinorio de Tierra Amarilla. Este fenómeno tectónico ayuda a explicar las deformaciones observadas en las formaciones Punta del Cobre, Chañarcillo y Cerrillos. (Martínez et al., 2013; Martínez et al., 2015)

5.3 Interacción de Litología y Control de Estructura

Las estructuras geológicas, como fallas y diaclasamientos vistos en la zona de estudio, son fundamentales en la disposición de los recursos minerales. Por ejemplo,

la falla de caliza en E-0343588 y N-6.827.602, con una inclinación de 40°, y con fisuras abiertas que probablemente sirvieron como canales para fluidos mineralizantes. Lo mismo ocurre con la fracturación en la arenisca pardo rojizo en E-0343651 y N-6.827.368, lo que sugiere que la deformación frágil aumentó la permeabilidad del conjunto de estas unidades.

Los contactos litológicos entre rocas sedimentarias y andesitas también forman vías importantes para la generación de zonas mineralizadas. Más específicamente, el manto mineralizado en E-0343763 / N-6.8207.248, orientado a N30°W/20-25° SE, indica la acreción de mineralización en lugares con andesitas impermeables que proporcionarán un agente bloqueador para fluidos móviles hacia arriba, promoviendo así la deposición de crisocola en elevaciones superiores.

La mineralización secundaria más común, que se caracteriza por la presencia de óxidos de cobre como la crisocola, se relaciona con fracturas y límites litológicos que han sido favorecidos por procesos de alteraciones hidrotermales. La identificación de jarosita y arcillas ricas en cobre en los mantos mineralizados sugiere un entorno de lixiviación oxidante (Arévalo, 2005).

Finalmente, las estructuras geológicas, tales como los diques andesíticos y las fracturas abiertas en las calizas, funcionaron como canales para los fluidos mineralizantes. Estos elementos estructurales resaltan la relevancia del control tectónico en la dispersión de la mineralización.

5.4. Comparación con Estudios Previos

Los resultados obtenidos están en consonancia con interpretaciones previas de Mpodozis y Allmendinger (1993) y Arévalo (2005), quienes subrayaron la extensión tectónica del Cretácico Inferior como un proceso principal de la evolución de la cuenca. Por el contrario, los nuevos datos de mineralización aportan una adición a estos estudios, destacando la importancia de la prospección hidrotermal posterior vinculada a eventos magmáticos y trabajos tectónicos tardíos.

6. Capítulo VI: Conclusiones

6.1. Conclusiones principales

Los estudios geológicos realizados en el área del Proyecto Licantay han permitido un entendimiento profundo de los procesos geotectónicos, las unidades litológicas y la mineralización asociada en la zona de estudio. Esta investigación descubrió interacciones clave entre estructuras geológicas, alteraciones y elementos tectónicos que han dirigido la ubicación y rendimiento de los recursos minerales. Aquí están los puntos clave:

Control Estructural Regional: La Falla Agua de los Burros ha sido uno de los factores clave en la estructura geológica de la Cuenca Chañarcillo. Esta falla marcó el límite oriental de la cuenca durante su fase de extensión del Cretácico Temprano. Posteriormente, fue invertida a lo largo del Ciclo Andino, resultando en la formación del Anticlinorio Tierra Amarilla, destacando el papel que los procesos tectónicos han tenido en el desarrollo de esta región. Tal reactivación de un ambiente tectónico regional actuó para crear y distribuir depósitos minerales en la zona de estudio.

Las unidades de geología regional, tales como diques andesíticos, calizas fracturadas, areniscas y conglomerados, son cruciales para la mineralización. Ciertas fracturas y contactos litológicos entre las rocas sedimentarias y las andesitas pueden haber formado vías preferenciales para la migración hacia arriba de fluidos mineralizantes, principalmente de mineralización de óxidos de cobre como la crisocola. Este proceso está asociado con las alteraciones hidrotermales y la lixiviación en ambientes oxidativos.

El descubrimiento de mantos mineralizados, especialmente en los contactos entre andesitas impermeables y mantos lixiviados oxidados, ha indicado un ambiente favorable para la acumulación de minerales secundarios de cobre, como la crisocola, chenevixita. La jarosita y las arcillas ricas en cobre presentes en estos mantos indican que los procesos de alteraciones (y por lo tanto hidrotermales) fueron favorecidos en los mantos, creando un área de interés para futuras exploraciones mineras.

Los resultados obtenidos proporcionan una base más sólida, determinando las ubicaciones de mineralización y los elementos geológicos que predominan. El conocimiento obtenido sobre la geología y mineralización del área permite delimitar áreas de alto potencial de recursos.

6.2. Resumen de Hallazgos

Falla Agua de los Burros: Esta falla ha jugado un papel fundamental en el desarrollo geológico de la Cuenca Chañarcillo, sirviendo como su margen oriental en la etapa de extensión, y experimentando una inversión tectónica que resultaría en la formación del Anticlinorio Tierra Amarilla, un proceso atribuible a la reactivación de la falla en el Ciclo Andino.

La región fue caracterizada simultáneamente con rocas ígneas, sedimentarias y alteraciones, indicando que este arreglo es la base para la mineralización. Esto estará acompañado por la presencia de diques andesíticos, calizas fracturadas y areniscas, que representan los controles geológicos primarios para la mineralización secundaria de cobre.

Se registró la mineralización secundaria de crisocola, chenevixita, en las zonas de contacto de las rocas andesíticas y sedimentarias, principalmente en las fracturas y los mantos mineralizados. Depósitos amplios y superficiales son productos de alteraciones hidrotermal y lixiviación, donde las condiciones son propicias para que el cobre se reúna.

Se observaron varios afloramientos de rocas sedimentarias, destacadas, areniscas calcáreas y lutitas negras asociadas con modificaciones hidrotermales. Los afloramientos de alteraciones y las fracturas observadas en las calizas representan un ambiente geológico favorable para la mineralización secundaria.

Los resultados del estudio del Proyecto Licantay aclaran algunos de los procesos tectónicos, mineralizantes que controlan la distribución de recursos minerales en la región, contribuyendo así con datos importantes para futuras investigaciones y exploraciones mineras.

6.3. Recomendaciones para Estudios Geofísicos en el Proyecto Licantay

Para complementar los análisis realizados en el Proyecto Licantay y optimizar la caracterización de las mineralizaciones de cobre, se recomienda utilizar el método Resistividad Eléctrica.

El cual es una técnica geofísica eficiente y económica que se utiliza para estudiar las propiedades eléctricas del subsuelo. Se basa en medir la resistencia de un terreno al paso de una corriente eléctrica, lo que permite identificar variaciones en la composición y estructura geológica del área de estudio. A través de electrodos colocados en la superficie, se inyecta corriente eléctrica y se mide la diferencia de potencial, obteniendo así la resistividad del terreno.

Este método es particularmente útil en aplicaciones como la exploración de acuíferos, la evaluación geotécnica del suelo, la detección de contaminantes y la exploración minera. La resistividad varía según la composición del subsuelo, lo que permite distinguir entre diferentes materiales y condiciones geológicas.

Una de las principales ventajas de este método es que es no invasivo, rápido y de bajo costo, lo que lo convierte en una opción ideal para estudios preliminares. Sin embargo, la interpretación de los datos puede verse afectada por factores como la salinidad del agua y la heterogeneidad del terreno.

Se recomienda utilizar el método de resistividad eléctrica para obtener un perfil detallado de las características del subsuelo, complementando otras técnicas geofísicas para una interpretación más precisa y completa.

7. Capítulo VII: Bibliografía

Arévalo, C., Mourgues, F. A., & Chávez, R. (2009). Geología del área Vallenar-Domeyko, Región de Atacama. Carta geológica de Chile.

Moscoso, R. D., Nasi, C. P., & Salinas, P. Z. (1982). Hoja Vallenar y parte norte de La Serena. Regiones de Atacama y Coquimbo. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 55.

Mpodozis, C. (1991). Tectónica del Grupo Chañarcillo: Una franja de cabalgamientos con vergencia al oeste en el valle del Río Copiapó, Región de Atacama, Chile. En Congreso Geológico Chileno (Viña del Mar), Actas, 6, 81–83.

Arévalo, C. V. (2005). Carta Los Loros. Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 92. Escala 1:100,000.

Arévalo, C. V., & Welkner, D. B. (2008). Geología del área Carrizal Bajo-Chacritas, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 111. Escala 1:100.000.

Creixell, C., Fuentes, J., Bierma, H., & Salazar, E. (2015). Tectónica regional y metalogénesis asociada al emplazamiento de la franja de pórfidos cupríferos cretácicos del norte de Chile (28°-30° S). En Actas del Congreso Geológico Chileno, 14, La Serena, Chile, 4 - 8 octubre 2015. Congreso Geológico Chileno.

Moscoso, R. & Mpodozis, C., 1988. Estilos estructurales en el Norte chico de Chile (28◦–31 ◦ S), regiones de Atacama y Coquimbo. Revista Geológica de Chile, 152–154.

Martínez, F., Arriagada, C., Peña, M., Del Real, I., y Deckart, K. 2013. "The Structure of the Chañarcillo Basin: An Example of Tectonic Inversion in the Atacama Region, Northern Chile." Journal of South American Earth Sciences 42: 1–16.

Díaz-Alvarado, J., Rodríguez, N., Fuentes, P., Rodríguez, C., Fernández, C., & Ángel, C. (s.f.). Evolución del magmatismo en el Batolito de la Costa en la región de Atacama (26º-26º30´S): Trazas geoquímicas de la transición entre el ciclo pre-Andino y la Primera Etapa del ciclo Andino. Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile.

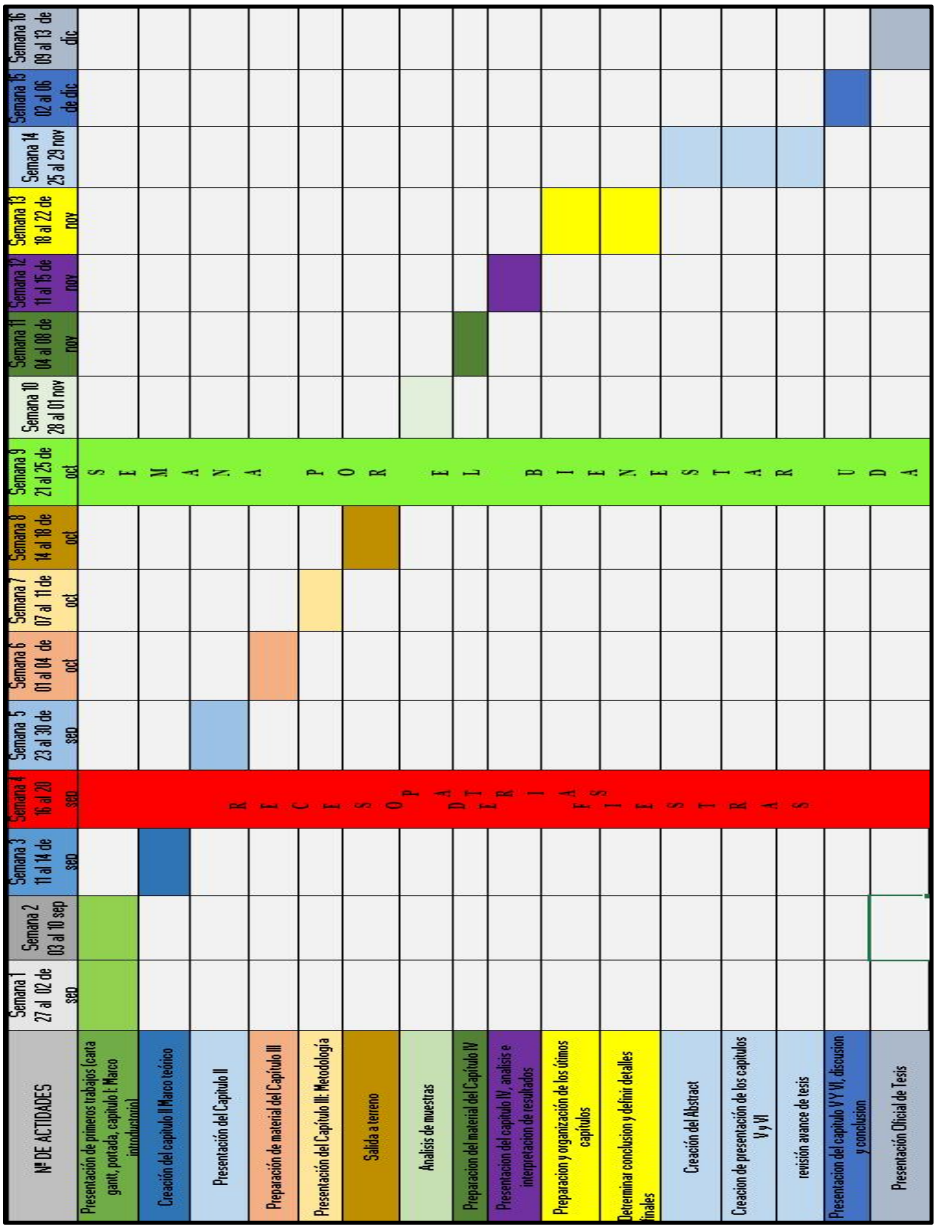
Segerstrom, K., & Parker, R. L. (1959). Carta geológica de Chile: Cuadrángulo Cerrillos, provincia de Atacama (Escala 1:50.000, Vol. 1, N° 2). Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile.

MP, P., Reutter, K.-J., Höfer, S., Hartmann, G., Klotz, J., Gonzalez, G., & Woelbern, I. (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.

Quantum Pacific Exploration (QPX). (s.f.). Estudio de alteración hidrotermal y mineralización en el área de Chivato. Proyecto de exploración de cobre en formaciones volcánicas del Cretácico inferior. Repositorio Universidad de Chile

8. Capítulo VIII: Anexos

8.1. Anexo N°1 Carta Gantt



8.2. Anexo N°2 Equipos de Campo



8. 3 Anexo N°3 Tabla de Datos

Punto	Este	Norte	Elevación (m)	Manteo	Rumbo	Litología	Tipo
1	34360030	6.827.614	730	40°	N 80° O	Dique Andesítico con Plagioclasa y Clorita	Ígnea
2	3433588	6.827.602	734		N 85° E	Falla de Caliza	
3	343356	6.827.503	745			Alteración de Epidota de 4 metros de ancho	
4	343651	6.827.368	760	45°	N 25° E	Arenisca con Diaclasamiento, color pardo rojizo	Roca Sedimentaria
5	343630	6.827.238	763			Microdiorita con leve magnetismo	Roca Hipabisal
6	343626	6.827.795	772		N 45° O	Labor minero-fortificada	
7	343619	6.827.280	779			Arenisca gris parda con mineralización de Crisocola	Roca Sedimentaria
8	343621	6.827.136	790			Arenisca fina, color verdosa	Roca Sedimentaria
9	343625	6.827.290	800			Arenisca	Roca Sedimentaria
10	343763	6.827.248	805			Manto mineralizado con predominio de Crisocola	Mineral Secundario de Cobre
11	343271	6.827.271	812			Arenisca Calcárea	Roca Sedimentaria
12	343740	6.827.278	813			Techo de Manto Mineralizado con presencia de Crisocola	
13	343706	6.827.263	817			Arenisca Calcárea	Roca Sedimentaria
14	343755	6.827.755	821			Conglomerado Monomíctico	Roca Sedimentaria
15	343781	6.827.313	826			Lutita Negra	Roca Sedimentaria