



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



**DESARROLLO DE UN MODELO INTEGRADO PARA LA  
PREDICCIÓN DE YACIMIENTOS MINERALES: ANÁLISIS DE  
EXPLORACIONES HISTÓRICAS Y CORRELACIÓN  
GEOLÓGICA EN YACIMIENTOS DE PÓRFIDOS CUPRÍFEROS  
EN LA FRANJA DEL MIOCENO-PLIOCENO EN CHILE.**

**Memoria para optar al Título de Geólogo**

**Benjamín Alejandro Peralta Norambuena**

**Profesor Guía** : MSc. Abraham Elias González Martínez  
**Profesores Comisión:** Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra  
MSc. Liubow Nikolaiivna González Martínez

**Concepción, 2024**

*Para mi madre, padre y hermano.  
Las personas más importantes de mi vida.*

## ÍNDICE

	Página
RESUMEN .....	
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
1.2.1. Objetivo general .....	2
1.2.2. Objetivos específicos .....	2
<b>1.3. UBICACIÓN DEL ESTUDIO .....</b>	<b>2</b>
<b>1.4. TRABAJOS ANTERIORES .....</b>	<b>2</b>
<b>1.5. AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>3</b>
<b>2. MARCO GEOLÓGICO .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. GENERALIDADES .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. CONTEXTO TECTÓNICO .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3. MODELO DE FRANJAS METALOGÉNICAS .....</b>	<b>6</b>
2.3.1. Franja metalogénica del Mioceno Medio – Plioceno Inferior .....	6
<b>2.4. GEOLOGÍA REGIONAL .....</b>	<b>7</b>
<b>2.4.1. Unidades estratificadas .....</b>	<b>10</b>
2.4.1.1. “Formación” Los Pelambres .....	10
2.4.1.2. <u>Formación El Pachón</u> .....	10
2.4.1.3. <u>Formación Abanico</u> .....	11
2.4.1.4. <u>Formación Coya-Machalí</u> .....	12
2.4.1.5. <u>Formación Farellones</u> .....	12
<b>2.4.2. Unidades intrusivas .....</b>	<b>13</b>
2.4.2.1. <u>Complejo plutónico Río blanco-San Francisco</u> .....	13
2.4.2.2. <u>Stock Los Pelambres</u> .....	14
2.4.2.3. <u>Cluster de intrusivos hipabisales</u> .....	14
2.4.2.4. <u>Complejo plutónico El Teniente</u> .....	15
<b>2.5. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL .....</b>	<b>16</b>
<b>2.6. YACIMIENTOS DE COBRE PRESENTES EN LA ZONA .....</b>	<b>18</b>
<b>2.5. MODELO DE PÓRFIDOS CUPRÍFEROS .....</b>	<b>22</b>
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1. EXPLORACIÓN GEOLÓGICA .....</b>	<b>23</b>
3.1.1. Exploración Greenfield .....	24
<b>3.2. ANÁLISIS DE DATOS GEOLÓGICOS .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3. IDENTIFICACIÓN DE PATRONES GEOLÓGICOS RELEVANTES .....</b>	<b>26</b>
<b>3.4. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE EXPLORACIONES .....</b>	<b>28</b>
<b>3.5. MAPA PROSPECTIVO .....</b>	<b>29</b>
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1. COMPARACIÓN DE PATRONES GEOLÓGICOS RELEVANTES ...</b>	<b>31</b>
<b>4.2. EXPLORACIÓN DE LOS YACIMIENTOS IMPORTANTES .....</b>	<b>39</b>
<b>4.3. VARIABLES MAPEABLES PARA UN MAPA PROSPECTIVO .....</b>	<b>41</b>
<b>5. DISCUSIÓN .....</b>	<b>42</b>
<b>5.1. MODELO INTEGRADO .....</b>	<b>42</b>
5.1.1. Geología local y geografía .....	42
5.1.2. Control estructural .....	43

5.1.3. Selección de criterios para un mapa prospectivo .....	44
5.2. ASPECTOS POR CONSIDERAR .....	45
5.3. RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO ....	46
6. CONCLUSIÓN .....	47
6.1. IMPORTANCIA DE LA FRANJA DEL MIOCENO-PLIOCENO .....	47
REFERENCIAS .....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Ubicación de la franja Mioceno-Plioceno .....	3
2. 1. Mapa de yacimientos junto a su escala de tiempo .....	7
2. 2. Modelo de evolución tectonomagmático .....	9
2. 3. Geología del margen andino a la latitud de Los Pelambres .....	19
2. 4. Mapa geológico del distrito Río Blanco-Los Bronces .....	20
2. 5. Mapa geológico regional de la cordillera de la costa a la latitud de El Teniente ..	21
2. 6. Modelo generalizado de zonificación de alteración-mineralización para un sistema de pórfido cuprífero.....	22
3. 1. Creación de mapa prospectivo .....	29

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
4. 1. Comparación de profundidad de yacimientos .....	31
4. 2. Comparación de la altura a la que se encuentran las minas .....	32
4. 3. Comparación de litologías presentes en las minas .....	32
4. 4. Comparación de formaciones presentes .....	33
4. 5. Comparación alteración hidrotermal presente en los yacimientos .....	33
4. 6. Comparación de estructuras presentes .....	34
4. 7. Comparación de la textura de la mena .....	35
4. 8. Comparación del tamaño (en megatoneladas) .....	35
4. 9. Comparación de la morfología .....	36
4. 10. Comparación de la forma en la que se presentan los yacimientos .....	36
4. 11. Comparación de la geocronología de los eventos hidrotermales .....	37
4. 12. Comparación de la composición principal de los intrusivos .....	37
4. 13. Comparación de asociaciones minerales .....	38
4. 14. Comparación de los minerales de enriquecimiento secundario .....	38
4. 15. Comparación de minerales de mena .....	39
4. 16. Comparación de minerales de ganga .....	39

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal desarrollar un modelo integrado para la predicción de yacimientos de pórfidos cupríferos en la franja del Mioceno-Plioceno en Chile, una de las regiones más prolíficas del mundo en términos de recursos minerales. Este trabajo aborda la necesidad de optimizar los procesos de exploración minera mediante el análisis de datos históricos de exploraciones y la correlación de características geológicas presentes en minas operativas.

Se busca generar una guía metodológica que permita a futuros proyectos de exploración abordar de manera más eficiente la identificación de zonas de interés prospectivo, integrando criterios geológicos clave. Además, el modelo propuesto podría complementarse con trabajos específicos, como estudios geofísicos, para elaborar mapas prospectivos que identifiquen zonas con mayor potencial exploratorio.

A través de la comparación de yacimientos clave en la franja del Mioceno-Plioceno, como Los Pelambres, El Teniente y Río Blanco-Los Bronces, se identifican patrones comunes en la génesis de depósitos cupríferos. Estos patrones son fundamentales para construir un modelo conceptual que pueda ser aplicado a proyectos de exploración en etapa temprana.

Este modelo busca no solo reducir la incertidumbre asociada a la exploración, sino también proporcionar una herramienta para la toma de decisiones estratégicas en la búsqueda de nuevos recursos minerales, contribuyendo al desarrollo sostenible de la industria minera en Chile.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cobre es un metal de vital importancia en la industria global debido a sus múltiples aplicaciones en sectores clave como la construcción, la electrónica, la tecnología y la energía. Chile, conocido como uno de los principales exportadores de cobre a nivel mundial, desempeña un papel crucial en el suministro global de este metal precioso.

Los pórfidos cupríferos son la fuente principal de cobre, contribuyendo con más de la mitad de todo el cobre de mina del mundo, además de ser una fuente importante de molibdeno, oro y otros subproductos. Son depósitos de gran tonelaje y baja ley, la cual es el parámetro fundamental para delimitar sus dimensiones. De acuerdo con su tonelaje por lo general cuerpos que cuentan con 50 a 500 millones de toneladas de mineral presentan leyes promedio de 1% de Cu y 0,02% de Mo, pero también existen casos como en Chile donde algunos depósitos presentan más de 1.000 millones de toneladas con leyes mayores a 1% de Cu, lo cual corresponde a una ley bastante importante.

Chile posee numerosos yacimientos de pórfidos de cobre, especialmente en la Cordillera de los Andes, que han sido explotados durante décadas. La exploración de estos depósitos es esencial para descubrir nuevas reservas y optimizar la explotación de las ya existentes. Sin embargo, la exploración de pórfidos de cobre enfrenta varios desafíos, como la complejidad geológica que incluye la variabilidad en la mineralización y la presencia de estructuras geológicas que afectan la distribución de los minerales (Richards, 2003). Para identificar estos depósitos se utilizan múltiples métodos geológicos, geofísicos y geoquímicos, cuya integración es crucial para obtener una visión completa y precisa de los depósitos (Lowell & Guilbert, 1970). Además, la exploración y explotación de pórfidos de cobre deben considerar el impacto ambiental, buscando métodos que minimicen el daño al entorno (Mudd, 2010).

La investigación propuesta tiene como objetivo, ante la creciente necesidad de explorar nuevas zonas de interés prospectivo, crear un modelo integrado para la búsqueda de nuevos yacimientos a partir del análisis de antecedentes de exploraciones realizadas y la correlación entre características

geológicas de los yacimientos en operación. Este modelo busca proporcionar una herramienta predictiva que mejore la eficiencia y efectividad de la búsqueda de nuevos yacimientos minerales en el contexto geológico de Chile.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo general**

Desarrollar un modelo integrado que combine y analice datos históricos de exploraciones y correlaciones entre características geológicas de yacimientos en operación, con el fin de mejorar la precisión y eficiencia en la identificación de nuevos yacimientos minerales en Chile.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

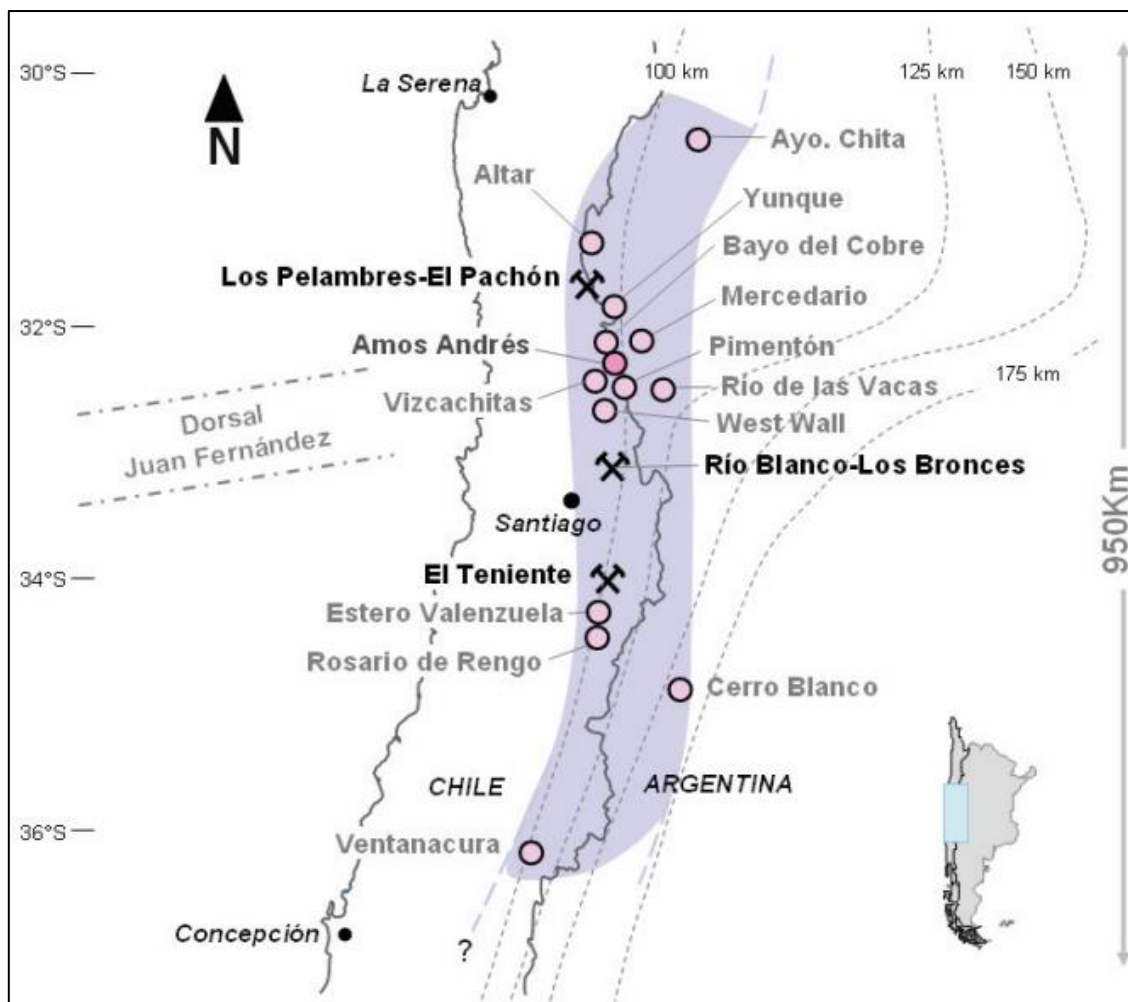
- Recolectar y analizar datos de exploraciones realizadas.
- Identificar y caracterizar patrones geológicos en yacimientos en operación.
- Desarrollar una base de datos de características geológicas de los yacimientos en cuestión.
- Integrar los resultados en un modelo predictivo.
- Proponer recomendaciones para la aplicación del modelo en futuras exploraciones.

## **1.3. UBICACIÓN DEL ESTUDIO**

La franja de pórfidos del Mioceno Superior-Plioceno se sitúa en la Cordillera Principal de Chile central, abarcando las latitudes entre los 32° y 36° S (Fig. 1.1). Esta región se encuentra en la zona de transición entre el segmento de subducción horizontal de los Andes Chileno-Argentinos y la zona de subducción inclinada de los Andes del sur. Es en esta franja donde se ubican algunos de los sistemas de pórfidos de Cu-Mo más grandes y prominentes del mundo, como El Teniente, Río Blanco-Los Bronces, y el complejo Los Pelambres-El Pachón, además de varios prospectos menores con potencial económico significativo.

## **1.4. TRABAJOS ANTERIORES**

Camus (2003) describe la geología de la franja del Mioceno medio – Plioceno y de los principales sistemas porfíricos asociados a ésta.



**Figura 1.1:** Ubicación de la franja Mioceno-Plioceno (color gris). Se muestra también la localización de minas y prospecciones. Extraído de Ramírez Mellado, 2018.

Ramírez Mellado (2018) describe la importancia de explorar la franja del Mioceno medio – Plioceno en términos económicos y geológicos, indicando técnicas utilizadas con buenos resultados.

Villela (2016) expone resultados de exploraciones mineras en Chile entre los años 2000 y 2015, en donde describe los hallazgos por franja y por tipos de exploración.

## 1.5. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi más profundo agradecimiento al profesor Abraham González por brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo de memoria en un tema de gran relevancia,

así como por su constante apoyo y guía durante este proceso. Su respaldo fue esencial para llevar a cabo esta investigación.

A la Universidad de Concepción, extendiendo mi sincera gratitud, especialmente al Departamento de Ciencias de la Tierra, por su excelencia académica y el valioso aporte de sus recursos. A mi profesor guía y a cada académico que compartió su conocimiento durante estos seis años de carrera, a los auxiliares que aportaron con un saludo cada mañana y con un almuerzo durante cada terreno, y a las secretarías, cuya disposición y amabilidad siempre marcaron la diferencia, les agradezco profundamente por su impacto en mi formación. Sus enseñanzas, apoyo y palabras de aliento han sido invaluable a lo largo de este camino.

Agradezco también a todas las personas que conocí en este recorrido, cuya mención individual sería imposible debido a su número, pero cuyo impacto en mi vida guardo con cariño. También quiero destacar a quienes conocí durante mi práctica profesional, quienes no solo contribuyeron a mi formación, sino que se volvieron personas significativas para mí. A mis amigos Nicolás, Sebastián, Carlitos, Ángel, Cristóbal, Emilio, Javier y "Administrador", compañeros de estudio y vivencias, gracias por su compañía, apoyo y por hacer este trayecto más llevadero y enriquecedor.

Mi agradecimiento infinito va a mis abuelos y a mi tío Adolfo, quienes me recibieron durante mi primer año de carrera, brindándome un espacio lleno de comodidad y tranquilidad. A Paolo, Angélica y Antonio, gracias por recibirme de la mejor manera en Santiago durante mi práctica profesional.

Finalmente, a mi madre Carolina, por ser siempre mi apoyo en momentos difíciles, mi hombro para llorar y mi consejera. A mi padre Jorge, por ser siempre un ejemplo de esfuerzo, de persona y de profesional. A mi hermano Agustín, por ser el primer oído que me escucha, mi alumno y maestro al mismo tiempo, el más importante pilar en mi vida, a quien le debo ser quien soy hoy en día. A las tres personas más importantes en mi vida, gracias totales.

## 2. MARCO GEOLÓGICO

### 2.1. GENERALIDADES

La geología de Chile está profundamente influenciada por su ubicación en una zona de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana. Este proceso tectónico ha dado lugar a la formación de la Cordillera de los Andes y a la generación de magmas alineados en dirección nortesur (Villela *et al.*, 2016). Estos magmas han creado importantes yacimientos minerales, especialmente en el centro-norte del país, donde se concentran grandes depósitos de pórfidos cupríferos. A lo largo del tiempo geológico, los arcos magmáticos se han desplazado, formando distintas franjas metalogénicas, cada una con características y edades específicas, que hacen de Chile un líder mundial en producción de cobre y otros metales.

### 2.2. CONTEXTO TECTÓNICO

Chile, ubicado en el margen occidental de Sudamérica, es reconocido mundialmente por su abundancia en pórfidos cupríferos, los cuales representan una de las principales fuentes de cobre a nivel global. La formación de estos depósitos está intrínsecamente ligada al contexto tectónico del país, el cual ha estado activo durante millones de años y que ha jugado un papel crucial en la configuración geológica de la región.

La subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana ha sido el motor principal detrás de la actividad tectónica y magmática en la región de los Andes, especialmente en Chile. Este proceso tectónico ha resultado en la formación de numerosos arcos magmáticos que se extienden a lo largo de la cordillera andina, donde se encuentran la mayoría de los depósitos de pórfidos cupríferos de Chile (Sillitoe, 2010). La continua convergencia de estas placas ha inducido la fusión parcial del manto superior, lo que ha generado magmas de composición variada, principalmente de tipo granítico y tonalítico. Estos magmas, ricos en volátiles y metales, han ascendido a través de la corteza, formando intrusiones que son el núcleo de los sistemas de pórfidos cupríferos. A lo largo del tiempo geológico, diversas fases de actividad magmática y tectónica han contribuido a la evolución de estos complejos volcánico-plutónicos, desde el Paleozoico tardío hasta el Cenozoico (Camus, 2003). Durante estos periodos, las condiciones tectónicas variaron desde compresionales a extensionales, facilitando la intrusión de grandes cuerpos magmáticos en distintas franjas

temporales, como el Paleoceno-Eoceno, el Cretácico y especialmente el Mioceno, que es conocido por ser el más prolífico en términos de depósitos cupríferos. La interacción de estos procesos tectónicos y magmáticos no solo ha influido en la formación de los depósitos, sino también en la alteración hidrotermal asociada y en la distribución de la mineralización, creando un entorno geológico complejo y altamente favorable para la concentración de grandes volúmenes de cobre.

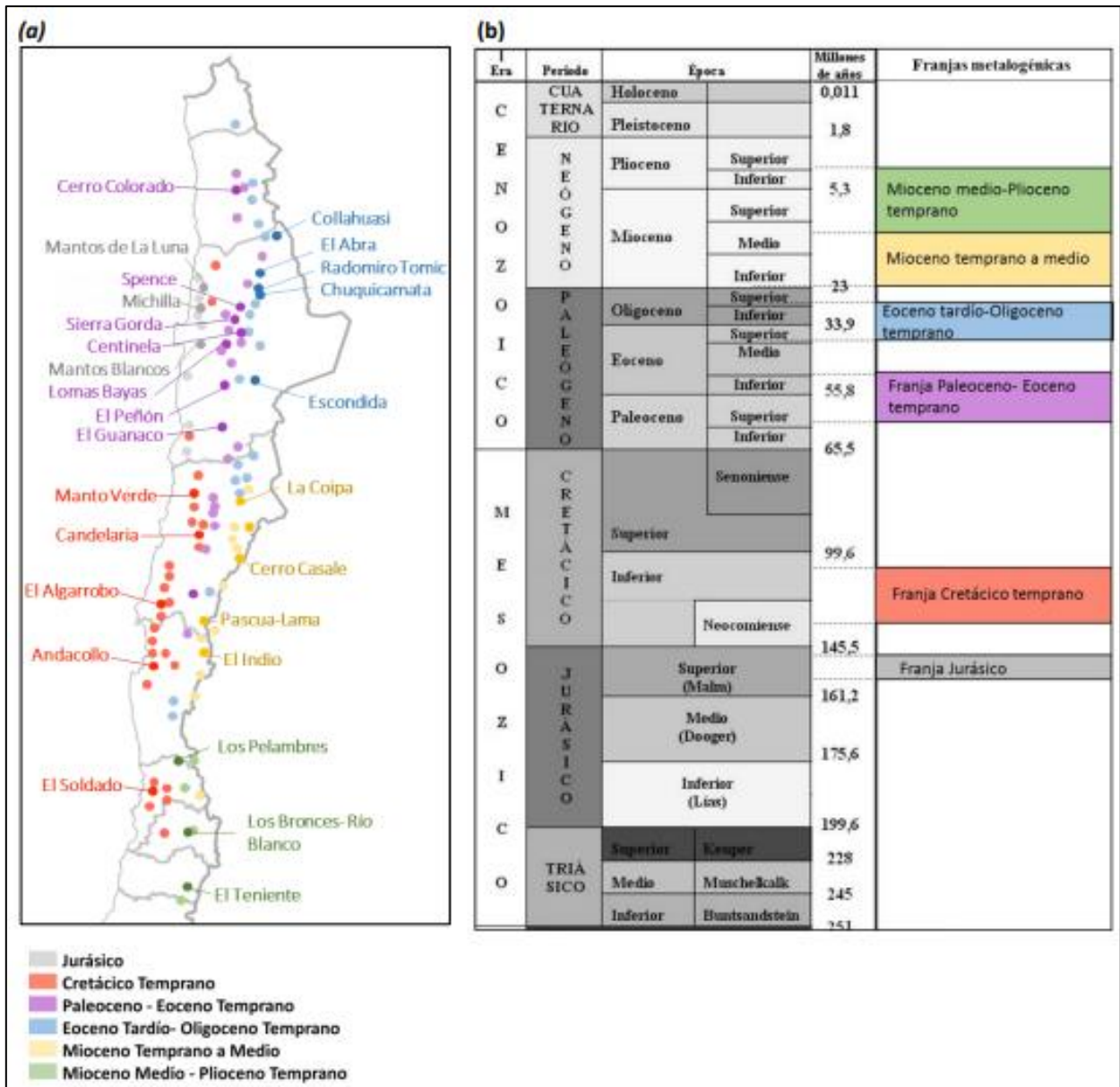
### **2.3. MODELO DE FRANJAS METALOGÉNICAS**

La actividad tectónica convergente entre las placas Sudamericana y de Nazca ha moldeado la disposición actual en dirección Norte-Sur del centro y norte de Chile. Durante el Jurásico, esta actividad originó un arco volcánico y magmático en la actual Cordillera de la Costa, que ha migrado hacia el este desde el Cretácico hasta tiempos recientes (Camus, 2003). A lo largo de este arco se han formado diversas franjas de yacimientos metalíferos de cobre, oro y plata, siguiendo un patrón paralelo de Norte a Sur a lo largo del territorio chileno (Fig. 2.1). En los Andes centrales, se identifican seis franjas metalogénicas de pórfidos de Cu-Mo y pórfidos de Au, distribuidas en Chile, Argentina y el sur de Perú, con edades que van desde el Carbonífero hasta el Plioceno. Aunque estas franjas presentan diferencias en su arquitectura estructural, composición petrológica, morfología, alteración-mineralización y tamaño, comparten características geológicas que sugieren procesos evolutivos similares.

Después de más de 50 años de exploraciones e investigación asociada a la Metalogénesis Andina se llegó a la siguiente delineación de franjas metalogénicas de mayor importancia económica en el centro-norte de Chile (Villela *et al.*, 2016): Franja Jurásico, Franja Cretácico Inferior, Franja Paleoceno-Eoceno inferior, Franja Eoceno superior-Oligoceno inferior, Franja Mioceno Inferior a Medio, Franja Mioceno-Plioceno (Maksaev *et al.*, 2007).

#### **2.3.1. Franja metalogénica del Mioceno Medio-Plioceno inferior**

La franja metalogénica del Mioceno medio – Plioceno inferior se ubica en la zona más oriental del territorio chileno, próximo a la frontera con Argentina, entre las latitudes 32° y 36° sur. En esta franja se descubrieron tres de los más importantes pórfidos cupríferos de Chile y del mundo como los son El Teniente, Río Blanco-Los Bronces y Los Pelambres (y el Pachón en Argentina).



**Figura 2.1: Mapa de yacimientos junto a su escala de tiempo.** (a) Mapa del centro-norte de Chile mostrando los yacimientos asociados a cada franja metalogénica y (b) Escala de tiempo geológica mostrando el periodo de generación los yacimientos asociados a cada franja. Extraído de Villela, 2016.

## 2.4. GEOLOGÍA REGIONAL

“El basamento de los yacimientos de esta franja metalogénica corresponde a una potente secuencia volcanosedimentaria del Oligoceno-Mioceno que se acumuló en una cuenca volcanotectónica elongada en dirección NS, limitada por las fallas normales NS de magnitud regional Pucuro y El Fierro. Estos depósitos incluyen las formaciones Coya-Machalí y Abanico, las cuales están compuestas por rocas volcanoclásticas, lavas y sedimentos lacustres intercalados de composición

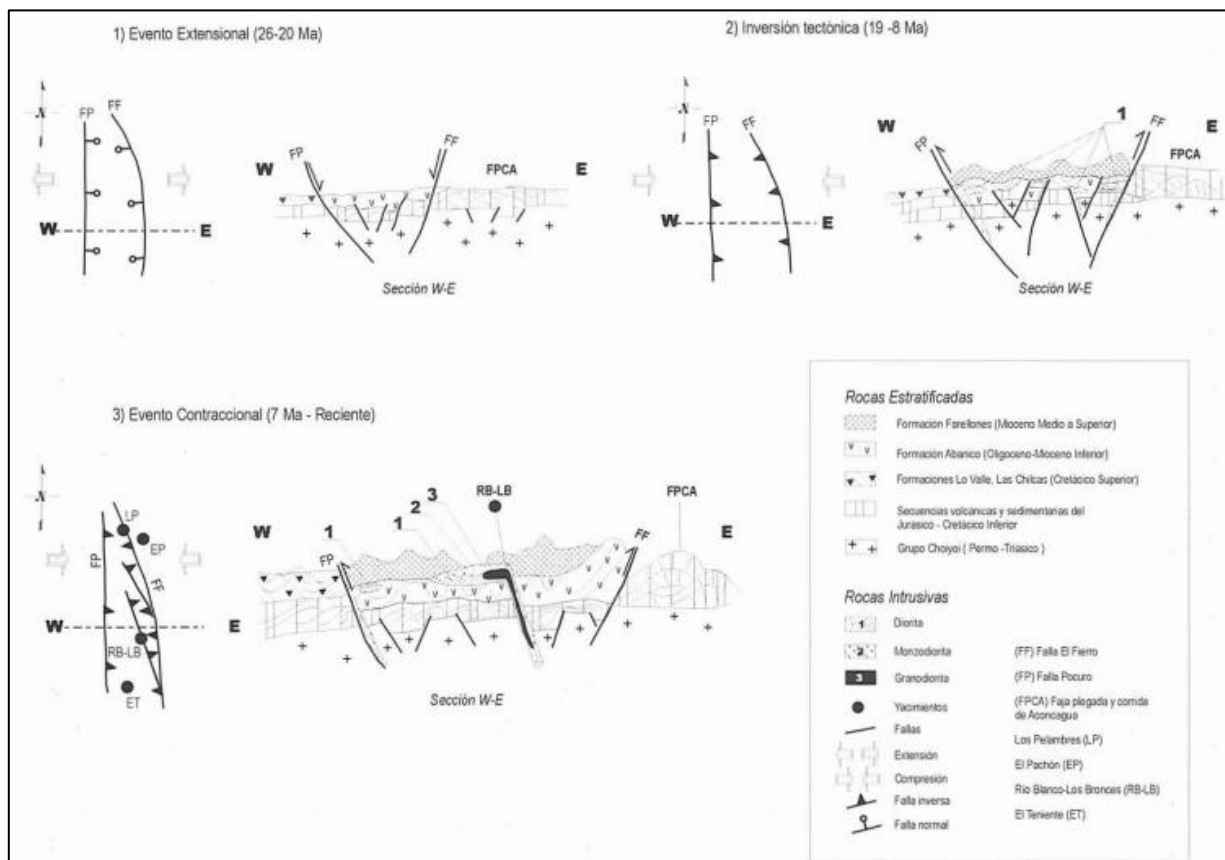
variable entre basaltos y dacitas. Los contenidos de  $K_2O$ ,  $SiO_2$  y los patrones de elementos de REE en las rocas sugieren una mineralogía residual rica en olivino, ortopiroxeno y plagioclasa, indicando que los magmas se generaron en condiciones anhidras de baja presión. El espesor de la corteza continental estimado para el período habría fluctuado entre 30 y 35 km y el ángulo de subducción habría sido  $>25^\circ$  aproximadamente” (Camus, 2003).

“Durante el intervalo comprendido entre los 20 y 16 Ma, las formaciones Coya-Machalí y Abanico fueron afectadas por un proceso gradual de deformación contraccional que produjo la inversión de la cuenca volcánotectónica y un consiguiente alzamiento y engrosamiento cortical. Hacia el inicio del período de inversión tectónica comienza un ciclo plutónico, con la intrusión del plutón La Obra y las fases iniciales del Complejo Plutónico de Rio Blanco-San Francisco” (Camus, 2003).

“Una vez que este periodo de deformación terminó, el volcanismo se reanudó con la depositación, entre las latitudes  $31^\circ30'S$  y  $34^\circ45'S$ , de la formación Farellones. Durante esta etapa de volcanismo se depositaron 2.000-2.400 m de lavas andesíticas a riódacíticas y depósitos piroclásticos. Estas rocas se disponen en forma subhorizontal y en discordancia angular sobre las formaciones Coya-Machalí y Abanico, las cuales están fuertemente deformadas. La formación Farellones incluye numerosos diques y filones mantos de composiciones andesítica, dacítica y gabróica. La geoquímica de las rocas de esta formación indica cambios temporales en la mineralogía residual. En su base, domina una mineralogía consistente en clinopiroxeno, anfíbola, plagioclasa y titanita, mientras que hacia el techo predominan la anfíbola, clinopiroxeno y plagioclasa. Estos datos sugieren cambios hacia condiciones de mayor presión y hacia márgenes más hidratados en el techo de la unidad. Al fin del volcanismo de la formación Farellones se produjo el emplazamiento de una serie de intrusivos, incluyendo las fases finales del Complejo Plutónico Rio Blanco-San Francisco e iniciales del Complejo Plutónico El Teniente” (Camus, 2003).

“En la zona de El Teniente, la última etapa en la evolución tectonomagmática de la región corresponde al emplazamiento de los pórfidos de cobre durante el Mioceno Superior y Plioceno (Fig. 2.2). Esta etapa coincide con un aumento en la velocidad de convergencia de las placas de Nazca y Sudamérica junto con la disminución del ángulo de subducción. Como resultado, un incremento en la compresión produce, nuevamente, un importante acortamiento tectónico,

engrosamiento cortical, alzamiento regional y rápida erosión. Esta última habría alcanzado valores del orden de los 3 km/Ma para el plutón ubicado en el Nacimiento Río Cortaderal. Como resultado de estos eventos tectónicos, la corteza continental alcanzó un espesor superior a los 50 km. La deformación compresiva estuvo acompañada por el magmatismo sintectónico que dio origen a los sistemas porfíricos de Cu-Mo. Los intrusivos asociados con la mineralización de cobre varían en composición desde dioritas cuarcíferas a dacitas porfídicas. Son rocas con alto  $\text{SiO}_2$  y altas razones La/Yb, valores concordantes con una mineralogía residual rica en granate en la fuente del magma, indicativos de condiciones de alta presión. El hecho de que los intrusivos asociados con la mineralización de Cu-Mo (Mioceno Superior-Plioceno) muestren una mineralogía con granate, sugiere que la anfibola se habría descompuesto, liberado agua, y favorecido los procesos de alteración y mineralización asociados, que dieron lugar a los sistemas porfíricos” (Camus, 2003).



**Figura 2.2: Modelo de evolución tectonomagmático.** Corresponde a la zona comprendida entre los yacimientos de El Teniente y Los Pelambres-EI Pachón en Chile Central, e indica tres etapas de la evolución de la zona a partir del evento extensional que originó la Cuenca Coya Machalí- Abanico (26-20 Ma). Extraído de Camus, 2003.

### 2.4.1. Unidades estratificadas

#### 2.4.1.1. “Formación” Los Pelambres (Rivano y Sepúlveda, 1991)

Edad Oligoceno inferior y el Mioceno Inferior, presente en el yacimiento Los Pelambres.

Unidad definida originalmente por Rivano y Sepúlveda (1991), quienes emplearon este nombre para referirse a una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias intensamente deformadas que afloran tanto en el Estero Pelambres como en el valle del río Totoral, en donde incluye niveles calcáreos. Sin embargo, Mpodozis (2016) indica que esta formación sin base ni techo conocidos corresponde en realidad a una unidad tectónica que forma parte de una estrecha banda de rumbo NNW, de no más de 3 km de ancho, constituida por estratos muy deformados, limitados al oeste y este por las Fallas Tototal y Los Pelambres, las cuales las ponen en contacto con rocas mucho menos deformadas tanto al oriente (Formación Pachón) como al poniente (Estratos de Almendrillo). Entre ambas fallas, las rocas de la “Formación” Los Pelambres presentan manteos muy elevados, generalmente hacia el oeste y están plegadas de manera compleja, incluyendo pliegues sub-isoclinales y láminas internas de corrimiento que definen una zona de cizalle de alto strain que probablemente correspondería a una zona de sutura ente los bloques rígidos de la Cordillera de la Costa y la Cordillera Frontal. Litológicamente la unidad es variada, incluyendo andesitas basálticas de olivino y piroxeno, lavas andesíticas y traquíticas de piroxeno, brechas volcanoclásticas, tobas daciandesíticas a riolíticas soldadas, sills andesíticos a riolíticos, volcarenitas y niveles de calizas lacustres con ostrácodos. Generalmente las rocas están alteradas (clorita, epidota, calcita,  $\pm$  cuarzo,  $\pm$  albita) y en algunos sectores transformadas a hornfels de biotita y magnetita. Dataciones U-Pb en circones indican, en general, edades comprendidas entre el Oligoceno inferior y el Mioceno inferior. Aun así, una edad U-Pb en circones detríticos de una muestra proveniente del Estero Las Hualtatas, al oeste de Los Pelambres, que muestran un peak muy bien definido del Paleoceno ( $60,5 \pm 1,2$  Ma) deja abierta la posibilidad de que la “Formación” Los Pelambres incluya componentes detríticos derivados de la erosión de la Formación Estero Cenicero o bien, que rocas de esta última hayan sido incorporadas como lentes tectónicas dentro la zona deformada (Saavedra, 2019).

#### 2.4.1.2. Formación El Pachón (Fernández *et al.*, 1974)

Edad Mioceno Inferior, presente en el yacimiento Los Pelambres.

La formación El Pachón, que aflora hacia el oeste entre la falla Mondaquita y el límite Chileno-Argentino, corresponde a una potente secuencia volcánica que conforma una faja continua de afloramientos de rumbo NNW-SSE y de 5 a 10 km de ancho formada por estratos inclinados suavemente hacia el oeste. Entre los ríos Carnicería y Mondaca, la Formación Pachón cubre en discordancia angular a las formaciones La Manga y Tordillo (jurásicas) mientras que más al sur, en las nacientes del río Totoral y Teatinos, aflora en contacto por falla inversa (Falla Mondaquita) con los Estratos de Mondaca. La Formación Pachón está constituida por una alternancia de delgadas coladas de andesitas basálticas de olivino y piroxeno y, en menor proporción, intercalaciones de tobas riódacíticas cristalopumíceas soldadas, con cuarzo, sanidina y menor biotita, junto a areniscas y conglomerados rojos que conforman un nivel continuo cerca de la base de la sucesión, entre los ríos Totoral y Teatinos. La formación incluye, al norte del río La Pantanosa, un domo riolítico (Domo El Altar) cuyas facies intrusivas corresponden a pórfidos riolíticos de biotita. Las relaciones estratigráficas permiten asignarle una edad miocena inferior, la que es respaldada por dataciones U-Pb reportadas por Perelló *et al.* (2012) y Mpodozis (2016) que indican una edad comprendida entre los 23 y los 21 Ma (Saavedra, 2019).

#### 2.4.1.3. Formación Abanico (Aguirre, 1960)

Edad Eoceno superior-Mioceno Inferior, presente en los yacimientos El Teniente y Río blanco-Los Bronces.

Definida por Aguirre (1960) en la provincia de Aconcagua. Corresponde a una unidad occidental formada por alternancias de tobas, brechas volcánicas andesíticas con intercalaciones de lavas andesíticas y rocas volcanoclásticas, y otra unidad oriental constituida por una serie de rocas volcanoclásticas, tobas líticas, tufitas, areniscas tobáceas, niveles de ignimbritas y brechas volcánicas con una secuencia de rocas sedimentarias lacustres compuestas por lutitas, areniscas y conglomerados (Moreno *et al.*, 1991). El espesor del conjunto se estima en 3.000 m considerando intrusiones de filones manto andesíticos (Thiele, 1980).

La Formación Abanico aflora entre los 33° y 34°S en la Cordillera de los Andes Centrales como dos franjas paralelas orientadas de N-S y separadas entre sí por depósitos volcánicos de la Fm. Farellones que la sobreyace (Charrier *et al.*, 2002). Su límite inferior se encuentra en contacto por

falla con la formación Colimapu (Charrier *et al.*, 2002; Muñoz *et al.*, 2006) y su límite superior por discordancia angular con la formación Farellones (Thiele, 1980; Charrier *et al.*, 2002). Dataciones y estudios de fauna fósil de mamíferos contenidos en rocas sedimentarias le asigna una edad Eoceno medio-superior – Mioceno Medio (Charrier *et al.*, 2002; Fuentes *et al.*, 2002). Otras dataciones radiométricas  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en plagioclasa de flujos de lava entregaron edades entre el Oligoceno-Mioceno Inferior con una edad máxima de  $34,3 \pm 0,4$  Ma para la porción inferior y una edad de  $21,4 \pm 1,0$  Ma en la porción media de la serie (Muñoz *et al.*, 2006).

#### 2.4.1.4. Formación Coya-Machalí (Giehm, 1960)

Edad Eoceno superior-Mioceno Inferior, presente en los yacimientos El Teniente y Río Blanco-Los Bronces.

Esta Formación fue delimitada por Giehm en el año 1960 y corresponde a una serie de intercalaciones de rocas volcánicas entre las cuales se encuentran coladas, brechas volcánicas, tobas y riolitas, con rocas sedimentarias que van desde brechas y conglomerados hasta areniscas y limonitas. Se destaca el hecho que toda la secuencia de rocas es de un ambiente continental de arco toleítico (Kay *et al.*, 1999). Mediante dataciones de K-Ar se determinaron edades de los estratos entre los 20,5-23,1 Ma (Charrier & Munizaga, 1979). Su contacto inferior es discordante con la Formación Baños del Flaco, Leñas-Espinoza, Río Damas y Nacientes del Teno, ésta se debería a la orogénesis a la que se vio expuesta. En cambio, presenta una discordancia angular en su techo con la Formación Farellones. Charrier *et al.*, (2002) plantean que la formación se relaciona a una extensión cortical.

#### 2.4.1.5. Formación Farellones (Rivano, 1990)

Edad Mioceno, presente en los yacimientos El Teniente, Los Pelambres y Río Blanco-Los Bronces.

La Formación Farellones, definida inicialmente por Klohn (1960) y revisada por Rivano (1990), es una unidad geológica de origen volcánico que aflora entre los  $32^{\circ}\text{S}$  y  $35^{\circ}\text{S}$  en una franja elongada continua con orientación NS. Esta formación se subdivide en dos miembros principales: el miembro inferior, compuesto por tobas e ignimbritas riolíticas, y el miembro superior, que está

constituido por lavas andesítico-basálticas con intercalaciones de tobas andesíticas y riolíticas (Rivano *et al.*, 1990). El espesor total de ambos miembros se estima en 2.500 m (Thiele, 1980).

Geológicamente, la Formación Farellones está compuesta por lavas andesítico-riolíticas, tobas, ignimbritas y brechas, que se depositaron en un ambiente continental volcánico. Su secuencia incluye en la base grandes depósitos de flujos piroclásticos con intercalaciones de sedimentos lacustres, mientras que en la parte superior se observan lavas intermedias a básicas y domos riolíticos (Thiele *et al.*, 1991). La formación se interpreta como el resultado de la actividad volcánica de un centro eruptivo ubicado a lo largo de la zona de afloramientos actuales.

Thiele (1980) postuló que la Formación Farellones se habría acumulado en un graben volcánico-tectónico, formado por una serie de colapsos de calderas, apoyado por la presencia de fallas normales que delimitan la formación, el gran volumen de magma ácido extruido y un alto gradiente paleotermal asociado a un campo geotérmico. Dataciones K/Ar asignan a la formación una edad entre 4,13 y 14,3 Ma (Charrier, 1983), ubicándola dentro del Mioceno Medio-Superior.

La Formación sobreyace a la Formación Abanico, pero el contacto entre ambas ha sido objeto de debate, ya que se han reportado tanto contactos discordantes como pseudo-discordantes, además de evidencia de un contacto transicional (Charrier *et al.*, 2002). El límite superior de la formación corresponde a la superficie actual de erosión (Thiele, 1980; Rivano *et al.*, 1990; Charrier *et al.*, 2002).

## **2.4.2. Unidades intrusivas**

### **2.4.2.1. Complejo plutónico Río blanco-San Francisco**

Edad Mioceno, presente en el yacimiento Los Bronces-Río Blanco.

Definida por Thiele (1980) como “Unidad Intrusiva I” y posteriormente por Stambuk *et al.* (1982) como Plutón Río Blanco-San Francisco. Corresponden a un conjunto cuerpos intrusivos asociados al Batolito San Francisco y se compone por granodioritas, monzonitas cuarcíferas, monzogranitos, diorita cuarcífera y en menor grado granitos y sienitas con texturas variables de porfídica a fanerítica (Thiele, 1980; Serrano *et al.* 1996). Las primeras dataciones radiométricas de K/Ar en

biotitas indican una edad de 24 Ma a 10,6 Ma (Vergara y Drake, 1979). Otras dataciones K-Ar en roca total estima un rango entre 20,1 a 7,4 Ma (Serrano *et al.* 1996), sin embargo, estudios posteriores a través del método U/Pb se obtienen valores de  $8,4 \pm 0,23$  y  $11,96 \pm 0,4$  Ma. en la granodiorita Cascada y Río Blanco respectivamente, y  $8,16 \pm 0,45$  Ma en la Diorita (Deckart *et al.*, 2005) Considerando las evidencias de edades y la relación de contacto acotada por la formación Farellones, permiten asignar una edad Miocena a estos cuerpos intrusivos (Rojas, 2022).

#### 2.4.2.2. Stock Los Pelambres

Edad Mioceno medio, presente en el yacimiento Los Pelambres.

El Stock Los Pelambres constituye la principal roca huésped de la mineralización del yacimiento Los Pelambres y ha sido interpretado como parte de los cuerpos precursores de la mineralización en el distrito (Perelló *et al.* 2012). Conformar un cuerpo intrusivo de 4,5 x 2,5 km, elongado en la dirección NS, emplazado a lo largo de la traza de la Falla Los Pelambres, la que pone en contacto riolitas del Cretácico superior y lavas y rocas sedimentarias de la formación Los Pelambres, al oeste, con la formación Pachón, al este. Este intrusivo está compuesto de dioritas cuarcíferas de hornblenda y biotita de grano fino a medio en las que el cuarzo y feldespato potásico aparecen de forma intersticial. Dos edades U-Pb en circones reportadas por Perelló *et al.* (2012) y dos edades U-Pb, también en circones, reportadas Bertens *et al.* (2003, 2006) restringen la edad de este cuerpo entre los 13 y los 14 Ma. El stock Los Pelambres puede ser considerado como un cuerpo satélite del Complejo Intrusivo Chalinga cuya fase más joven de actividad magmática incluye cuerpos intrusivos del Mioceno medio que forman los extremos norte y sur del Complejo (Saavedra, 2019).

#### 2.4.2.3. Cluster de intrusivos hipabisales

Edad Mioceno Superior, presente en el yacimiento Los Pelambres.

El último registro geológico de actividad magmática en el área de Los Pelambres lo constituye un cluster de intrusivos hipabisales emplazados dentro del Stock-Pelambres y las lavas andesíticas de la adyacente Formación Pachón (yacimiento Frontera) y que, en Los Pelambres, están asociados a brechas magmáticas e hidrotermales. En Los Pelambres, las diferentes fases que conforman estos cuerpos intrusivos pueden agruparse en una primera familia de pórfidos dacíticos de hornblenda,

biotita y cuarzo, y una segunda familia que la constituyen pórfidos andesíticos de biotita ( $\pm$  cuarzo). Ambas se encuentran acompañadas de diques microdioríticos tardíos y se encuentran, en parte, fuertemente afectadas por procesos de alteración hidrotermal (Perelló *et al.* 2012). Quince edades U-Pb en circón reportadas por Perelló *et al.* (2012) se ubican entre los  $12,30 \pm 0,30$  y  $10,53 \pm 0,14$  Ma, consistentes con doce dataciones Re-Os en molibdenita comprendidas entre los  $11,81 \pm 0,06$  y  $10,14 \pm 0,04$  Ma. Estas edades son más antiguas que las edades Re-Os en molibdenita reportadas por Bertens *et al.* (2006) para el yacimiento El Pachón (10 km al SE de Los Pelambres), las que se encuentran comprendidas entre los 9,16 y 8,43 Ma (Bergoeing, 2016).

#### 2.4.2.4. Complejo plutónico El Teniente

Edad 12-7 Ma. (Mioceno Superior), presente en el yacimiento El Teniente.

“El CPT (complejo plutónico El Teniente) corresponde a una serie de intrusivos calcoalcalinos, félsicos a intermedios datados entre 12 y 7 Ma. El rango de litologías varía desde diorita cuarcífera, a dacita porfírica, pórfido latítico y, finalmente, a diques lamprofíricos. Localmente, se encuentran diques andesíticos a microdioríticos de composiciones muy similares a las andesitas” (Camus, 2003).

“La diorita cuarcífera, llamada también Diorita Sewell, forma un complejo intrusivo de aproximadamente 8 km de extensión en sentido ENE y 3-4 km de ancho, junto con el yacimiento El Teniente ubicado en su extremo NE. Corresponde a una roca de textura fanerítica, compuesta por plagioclasa, hornblenda, biotita y menores cantidades de cuarzo. En el depósito, la diorita cuarcífera se ubica en la parte sur y se caracteriza por tener textura porfírica y contactos transicionales o brechosos. En la superficie y, en el área del yacimiento, sus afloramientos están fuertemente afectados por alteración fílica y ocupan un área del orden de  $0,5 \text{ km}^2$ , que en profundidad aumenta progresivamente de tamaño. Al norte del cuerpo principal de diorita cuarcífera, se encuentran una serie de apófisis de esta roca localizadas, al este y noreste, de la formación Braden (Howell y Molloy, 1960) y de la dacita porfírica. Corresponden a cuerpos subverticales, compuestos por fenocristales de plagioclasa en una masa fundamentalmente aplitica. Localmente, se observan ojos de cuarzo y remanentes de biotita. Los fenocristales de anfibola aparecen alterados a clorita y la presencia de feldespatos-K es muy ocasional” (Camus, 2003).

“La dacita porfirica, conocida también como el Pórfido Teniente, forma un dique tabular NNW de aproximadamente 200 m de ancho, que se extiende por alrededor de 1.500 m. Su límite sur es la formación Braden que aparece truncándola y debido a ello, la zona de contacto presenta abundantes fragmentos de dacita porfirica. Los contactos con las andesitas son muy nítidos, aunque algo irregulares. Este pórfido es una roca de color blanco a verde claro, compuesta por fenocristales de plagioclasa, biotita, cuarzo y escasa hornblenda, en una masa fundamental aplitica de feldespatos K, biotita y cuarzo. Presenta dos variedades texturales: la primera se ubica en la parte norte y se caracteriza por una textura porfirica doble y color gris verdoso oscuro; la segunda se localiza en la parte sur y se presenta como un pórfido hipidiomórfico de color gris blanco, con micropertitas como constituyente principal” (Camus, 2003).

“El pórfido latítico corresponde a una serie de diques anulares, de potencias rara vez mayores de 5 m, que rodean la formación Braden. Se localizan preferentemente en el sector sur del yacimiento, y clastos autobrechizados de estos diques forman parte de la chimenea de brecha de la formación Braden. El tamaño de estos clastos varía desde centímetros hasta decenas de metros. En la parte profunda de la chimenea de brecha, se ha reconocido esta roca, indicando una posible relación genética entre ella y la brecha. Este pórfido tiene fenocristales de plagioclasa y biotita alterados a sericita, clorita y calcita” (Camus, 2003).

“El evento magmático más tardío reconocido en el yacimiento son los diques de lamprófito, de alrededor de 2 metros de potencia y extensiones de cientos de metros. Cortan todas las rocas presentes, incluyendo la mineralización y los distintos tipos de alteración del yacimiento. Son rocas de grano fino, de color verde oscuro, compuestas por hornblenda, piroxeno, plagioclasa de composición labradorítica y fenocristales de olivino” (Camus, 2003).

## **2.5. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

“Una relación tan estrecha con estructuras superficiales no es tan evidente para los sistemas porfídicos del Mioceno Superior-Plioceno de Chile central. Sin embargo, estudios estructurales regionales indican que, probablemente, estos sistemas se emplazaron a lo largo de estructuras, poco desarrolladas, de rumbo NS a NNW-SSE y NE-SW. Estas representarían antiguas fallas normales

que limitaron bloques o compartimentos tectónicos de segundo orden, al interior de la cuenca extensional Coya Machalí-Abanico y fueron reactivadas durante la deformación compresiva miocena” (Camus, 2003).

“A nivel regional en Los Pelambres se distinguen tres paneles estructurales principales, delimitados por fallas inversas con orientación norte-sur: el panel occidental, el panel central y el panel oriental. El yacimiento Los Pelambres se localiza en el panel central, en contacto con la falla del mismo nombre. El panel occidental está acotado por las fallas Pocuro al oeste y Hualtatas al este, mientras que el panel central se extiende entre las fallas Hualtatas y Los Pelambres. Finalmente, el panel oriental está delimitado por las fallas Los Pelambres al oeste y El Fierro al este. En cuanto a las fallas en la zona, todas son de tipo inverso de alto ángulo que se interpretan como reactivaciones de fallas normales antiguas, que habrían controlado el desarrollo de cuencas cretácicas y terciarias. La relación entre la falla Los Pelambres y el pórfido homónimo, indican una estrecha relación genética entre ambos, en la que el sistema porfídico se interpreta como relleno y canalizado de la falla, en un ambiente de emplazamiento sintectónico” (Saavedra, 2019).

“La evolución tectónica del distrito Rio Blanco-Los Bronces indica que se encuentra ligada a la herencia estructural pre-Mesozoica, posterior extensión durante el Oligoceno-Mioceno, subsiguiente compresión del margen andino del Mioceno-Plioceno Superior, con el acortamiento orogénico y la respectiva inversión tectónica en el Mioceno-Plioceno asociada al alzamiento de la cordillera central de Los Andes (Charrier *et al.*, 2002; Carrizo *et al.*, 2012). La tectónica del área sugiere que está fuertemente controlada por un sistema de fallas oblicuas de dirección NW-SE a NNW-SSE y un sistema de fallas pre-mineral de dirección NE-SW originado como fallas normales. (Piquer y Skarmeta, 2012). Sin embargo, estudios posteriores sugiere que la tectónica del lugar está controlada por un sistema de fallas pre-mineral oblicuas de direcciones NW-SE, NNW-SSE y NE-SW con respecto al eje del orógeno andino orientado NS a escala regional. Dichas fallas oblicuas se comportaron como normales durante el Eoceno tardío-Oligoceno. Posteriormente las fallas se reactivaron selectivamente durante el Mioceno-Plioceno por la compresión E-W. En consecuencia, las fallas de dirección NW-SW y NNW-SSE expresan un movimiento inverso-sinistral, mientras que el sistema de dirección NE-SW expresa un movimiento dextral” (Rojas, 2022).

“En el área alrededor del yacimiento El Teniente, los patrones estructurales habrían sido el resultado de movimientos laterales a lo largo de una zona de cizalla sinistral con rumbo N50°W, lo que generó fracturas sintéticas sinestrales (tipo R), de orientación N60°W y antitéticas dextrales (tipo R’), de orientación N50°E (Falcón & Rivera, 1998;). El Teniente se localiza en una compleja zona de cizalla de características distritales y con un rumbo promedio aproximado de N65° E denominada Zona de Falla El Teniente (ZFT). Ésta se caracteriza por presentar tres dominios estructurales particulares: un dominio N60°E, otro dominio N50°W y finalmente un dominio N20°E dispuesto en forma de echelón con respecto a los dos anteriores. Los dominios estructurales corresponden a zonas de mayor frecuencia relativa de fallas, constituidos en su mayoría por fallas de rumbo con manteos subverticales” (Zúñiga, 2018).

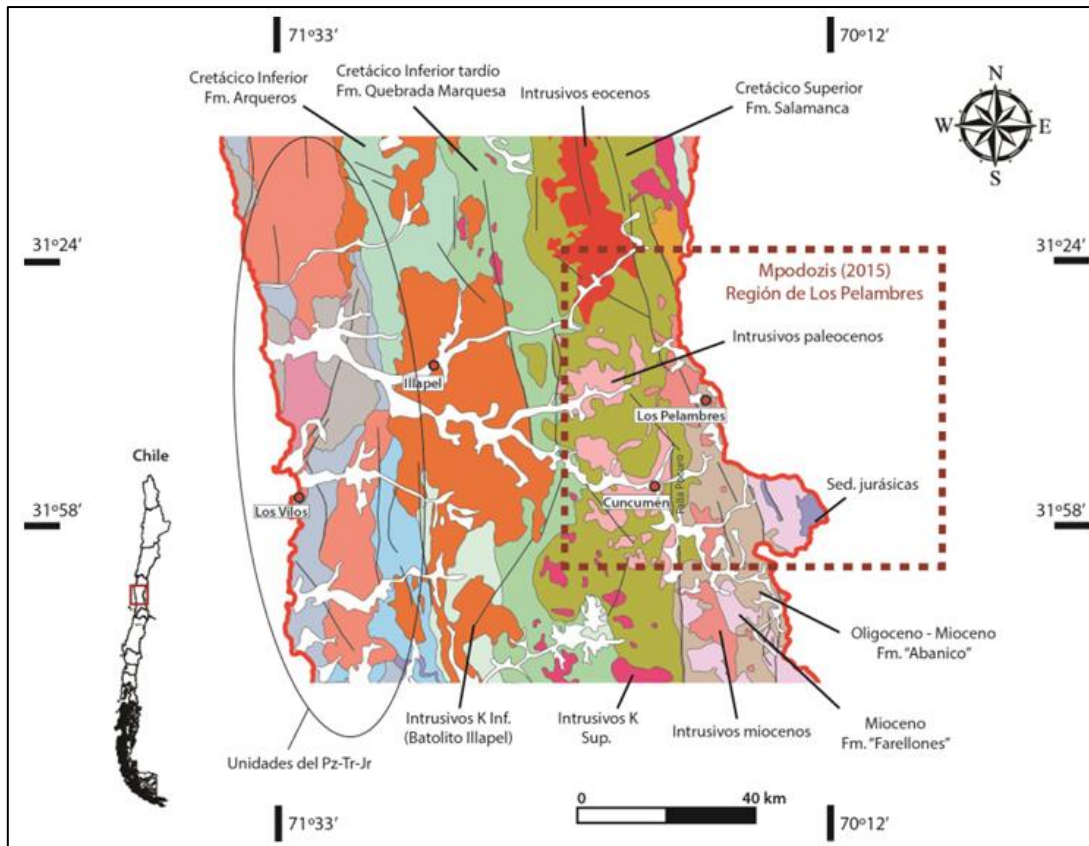
El yacimiento está emplazado en una zona de deformación de forma tabular de orientación preferencial NE, de aproximadamente 10km de longitud. En su interior se reconoce un sistema de fallas, vetas de cuarzo, vetas fallas y diques basálticos que presentan geometrías o arreglos espaciales que son observados a diferentes escalas (distrital y Mina) y que aparentemente estarían indicando varios episodios de deformación. Trabajos anteriores, (Howell y Molloy, 1960), evidencian procesos de deformación relativamente continuos en el tiempo, pudiendo diferenciar deformaciones pre, sin y post mineralización. A escala distrital en el área aledaña a la Mina y en afloramientos de superficie, predominan fallas mayores subverticales de orientación NE-SW con geometrías tipo dúplex (Seguel *et al.*, 2007).

## **2.6. YACIMIENTOS DE COBRE PRESENTES EN LA ZONA**

En la franja del Mioceno-Plioceno, los yacimientos de Los Pelambres, Río Blanco-Los Bronces y El Teniente destacan por compartir importantes características geológicas, además de ser tres de los pórfidos cupríferos más relevantes de Chile. A estos gigantes de la minería se suman prospectos emergentes como Escalones, que exhiben un gran potencial exploratorio, reafirmando la importancia de esta región para el desarrollo de futuros proyectos mineros.

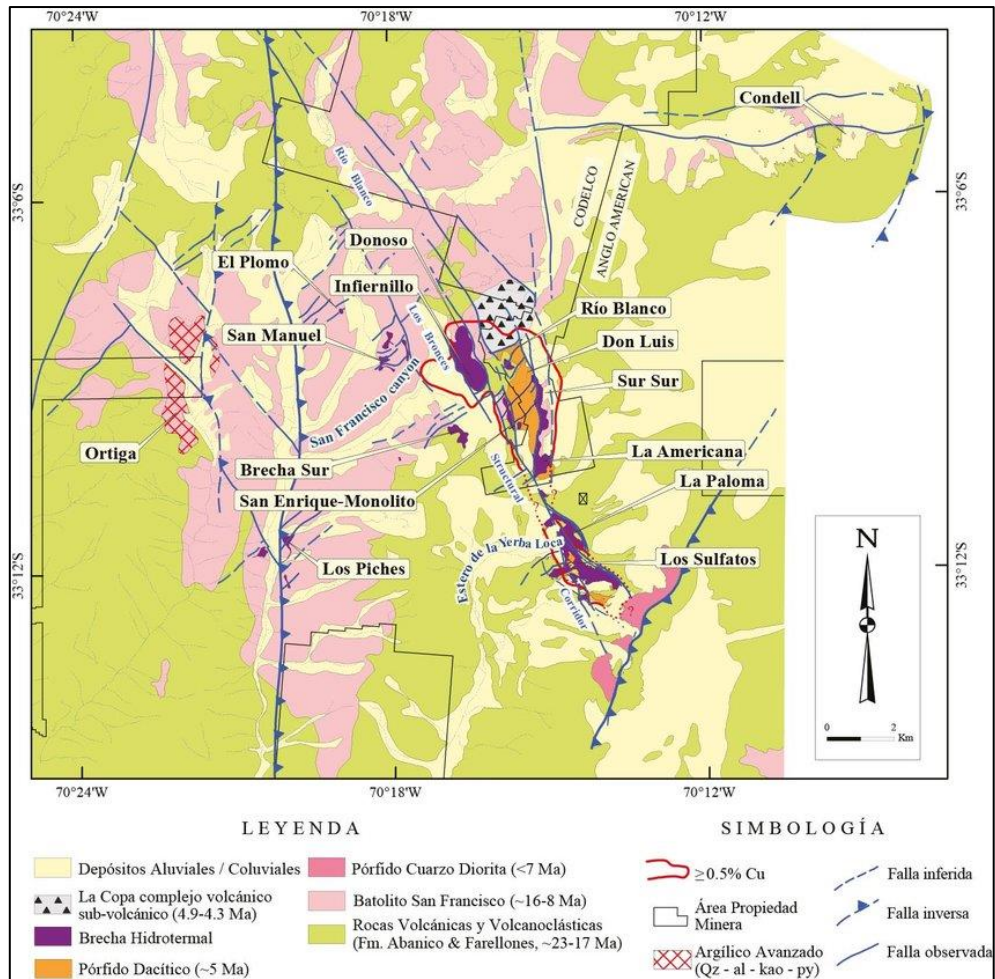
“Los Pelambres se localiza en el extremo norte de la faja, en un extenso valle glacial ubicado en la cordillera andina, inmediatamente al oeste del límite con la República Argentina y a altitudes variables entre 3.000 y 3.500 m s.n.m. (Fig. 2.3). El yacimiento está cubierto por escombros de

falda y aflora sólo en un 10%, en las paredes del valle glacial que lo cubija. Las ciudades más cercanas son Salamanca e Illapel y lo conectan con el puerto de Los Vilos, distante 68 km al este del yacimiento. La ciudad de Santiago se ubica, en línea recta, a 190 km de la mina” (Camus, 2003).



**Figura 2.3: Geología del margen andino a la latitud de Los Pelambres (Mapa punteado).**  
Extraído de Bergoeing, 2016.

“Río Blanco-Los Bronces se localiza en la parte central de la faja, a 60 km al NE de la ciudad de Santiago (Fig. 2.4). El yacimiento, con sus dos sectores, Los Bronces y Río Blanco, aflora a altitudes variables entre 2.700 y 4.100 m s.n.m., a lo largo de un cordón montañoso de dirección NS que conforma una línea divisoria de aguas que separa los cursos que drenan en dirección este, hacia el río Blanco, de aquellos que drenan al oeste, formando el río San Francisco. Este cordón divisorio, además, está cubierto por extensos glaciares y morrenas que enmascaran parcialmente los cuerpos mineralizados” (Camus, 2003).



**Figura 2.4:** Mapa geológico del distrito Río Blanco-Los Bronces. Se ilustran las unidades litológicas, estructuras principales y la ubicación de los prospectos. Extraído de Rojas, 2022.

“El Teniente se ubica en la parte sur de la faja, a 67 km de la ciudad de Rancagua, VI región y a una altitud entre 2.000 y 3.200 metros sobre el nivel del mar (Fig. 2.5). El depósito aflora en el faldeo suroeste de la quebrada del río El Teniente, uno de los tributarios del río Pangal, el cual es considerado uno de los afluentes más importantes del río Cachapoal. El yacimiento se localiza en medio de una topografía extremadamente abrupta, modelada por la erosión fluvioglacial que ha afectado a esta parte de la cordillera de los Andes” (Camus, 2003).

Además de estos yacimientos mundialmente conocidos, existen proyectos (la mayoría en etapa de sondajes) de exploración en la faja tales como Escalones y West Wall (ambos *greenfield*).

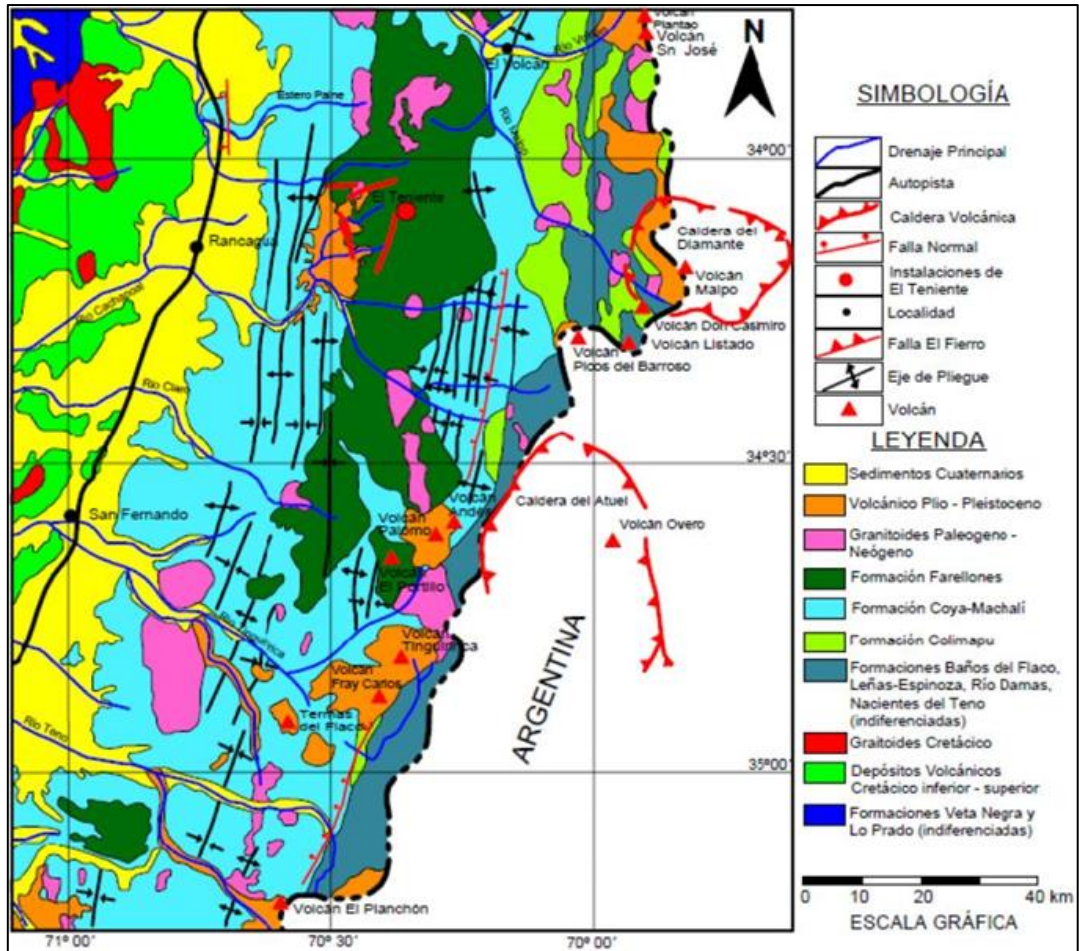
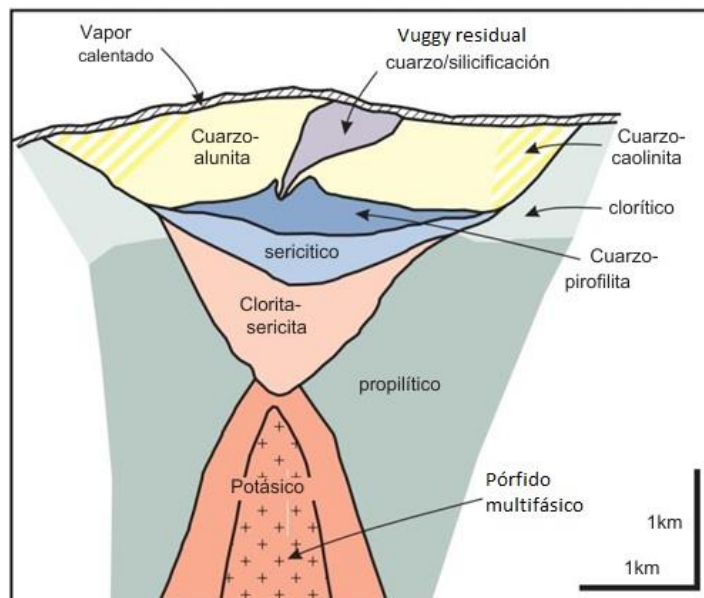


Figura 2.5: Mapa geológico regional de la cordillera de la costa a la latitud de El Teniente. Extraído de Zúñiga, 2018.

“La Propiedad Escalones está ubicada dentro de la Región Metropolitana de Santiago, en el centro de Chile, aproximadamente a 97 km al sureste de Santiago y nueve km al oeste de la frontera entre Chile y Argentina. Trabajos previos en Escalones han demostrado que la mineralización de cobre ocurre en dos formas, como skarn y mineralización controlada estructuralmente alojada por sedimentos alterados y diques y umbrales intrusivos, y como mineralización diseminada y de stockwork de estilo pórfido alojada por un stock de granodiorita intrusiva subyacente. La geoquímica de rocas de muestras de superficie y de pozos de perforación muestra niveles anómalos de oro, plata y molibdeno que están asociados espacialmente con la mineralización de cobre. Esta relación espacial también puede deberse a pulsos separados de mineralización o zonificación dentro de un sistema de pórfido mucho más grande” (Armitage, 2012).

## 2.7. MODELO DE PÓRFIDOS CUPRÍFEROS

Un pórfido cuprífero es un tipo de depósito mineral que se forma en sistemas magmáticos asociados a márgenes convergentes de placas tectónicas, donde magmas de origen profundo ascienden y se intruyen en la corteza terrestre. Estos depósitos son característicos por su gran tonelaje y baja ley, y se encuentran típicamente relacionados con intrusiones de rocas ígneas de composición intermedia a félsica, como dioritas, tonalitas o granodioritas. La formación de los pórfidos cupríferos involucra la cristalización de un magma en profundidad y la liberación de fluidos hidrotermales ricos en metales, principalmente cobre, molibdeno y, en menor medida, oro y plata (Seedorff *et al.*, 2005). Estos fluidos se canalizan a través de fracturas y otros planos de debilidad en la roca huésped, generando una zonificación de alteración hidrotermal que va desde una zona central potásica, dominada por la presencia de minerales como biotita y feldespatos potásicos, hasta zonas más externas, como las de alteración filítica y propilítica (Fig. 2.6) (Sillitoe, 2010). El actual modelo genético sugiere que estos sistemas se desarrollan en etapas múltiples, comenzando con la intrusión del magma, seguido por la inyección de fluidos ricos en volátiles y metales, y culminando con la mineralización, que se distribuye a lo largo de vetillas y diseminaciones dentro del stock porfídico y sus rocas adyacentes (Richards, 2011).



**Figura 2.6: Modelo generalizado de zonificación de alteración-mineralización para un sistema de pórfido cuprífero.** Extraído de Sillitoe, 2010.

### **3. METODOLOGÍA**

La metodología de esta memoria comenzará con una revisión exhaustiva de la literatura sobre exploraciones geológicas y modelos predictivos de yacimientos, seguida de la recopilación de datos históricos, incluyendo mapas geológicos y estudios geofísicos y geoquímicos, con un enfoque en los pórfidos de cobre en la franja metalogénica del Mioceno Medio-Plioceno Inferior en Chile. Posteriormente, se realizará un análisis detallado de las características geológicas de yacimientos en operación, identificando patrones comunes entre estos yacimientos y sus áreas circundantes mediante herramientas estadísticas. Además, se seleccionarán estudios de casos específicos para evaluar la eficacia del modelo en la predicción de nuevos yacimientos, ajustándolo según los resultados obtenidos. Finalmente, se interpretarán los resultados, elaborando conclusiones sobre la eficacia del modelo para su aplicación en futuras exploraciones. Todo el proceso será documentado en detalle, con revisiones para asegurar la claridad y precisión del contenido antes de la presentación final de la memoria.

#### **3.1. EXPLORACIÓN GEOLÓGICA**

La exploración geológica es esencial para identificar, caracterizar y evaluar yacimientos minerales, y adquiere particular relevancia en la franja metalogénica del Mioceno-Plioceno en Chile, una región conocida por la presencia de pórfidos cupríferos importantes tanto a nivel nacional como mundial. Este proceso se basa en una serie de etapas que combinan diversas técnicas para maximizar el éxito en la identificación de nuevas áreas mineralizadas. En primer lugar, los estudios geológicos regionales, que incluyen la cartografía y análisis estructural, proporcionan una visión inicial de los controles tectónicos y magmáticos que favorecen la mineralización. Las estructuras geológicas como fallas y pliegues en zonas de subducción activa, características de la Cordillera de los Andes, son clave para la formación de pórfidos cupríferos, un tipo de depósito predominante en esta franja.

A medida que se avanza en la exploración, se incorporan métodos geofísicos y geoquímicos para delimitar áreas con potencial. Las técnicas geofísicas, como la magnetometría y la gravimetría, son herramientas útiles para identificar intrusiones y zonas de alteración hidrotermal relacionadas con los sistemas pórfidos. Estas herramientas son fundamentales para refinar los modelos geológicos,

ya que permiten correlacionar las anomalías geofísicas con las observaciones de campo. De manera complementaria, el muestreo geoquímico de suelos y rocas permite identificar concentraciones anómalas de elementos indicativos, como el cobre y el molibdeno, asociados a estos sistemas.

Una vez delimitadas las zonas de interés, se llevan a cabo campañas de sondajes para confirmar la presencia de cuerpos mineralizados. Los sondajes proporcionan datos directos sobre la textura, composición y distribución de los minerales en profundidad, información que es clave para validar los modelos geológicos propuestos. Además, estos sondajes permiten interpretar no solo la extensión y geometría del depósito, sino también las condiciones hidrotermales que dieron origen a la mineralización. En yacimientos como Los Pelambres, Río Blanco-Los Bronces y El Teniente, el análisis detallado de los núcleos ha sido clave para comprender los sistemas de alteración y las fases de mineralización que contribuyen a su tamaño y riqueza.

En la franja del Mioceno-Plioceno, esta metodología ha sido exitosa en el descubrimiento de grandes yacimientos. Los trabajos de exploración sistemática han llevado a la definición de nuevos prospectos como Escalones o West Wall, que continúan expandiendo el potencial minero de la región. Además, las nuevas tecnologías de análisis geológico y la incorporación de datos geocronológicos han permitido una mejor comprensión de la relación temporal entre la actividad magmática y la mineralización, lo que a su vez optimiza la selección de áreas prospectivas. La aplicación rigurosa de estas metodologías no solo ha permitido el descubrimiento de grandes depósitos en operación, sino que también ha reducido los riesgos y costos asociados a la exploración, consolidando a la franja del Mioceno-Plioceno como una de las más productivas del mundo en términos de minería cuprífera.

### **3.1.1. Exploración Greenfield**

La exploración geológica *greenfield* es un proceso clave para el descubrimiento de nuevos yacimientos en áreas no exploradas previamente, y en regiones con alto potencial minero, como la franja metalogénica del Mioceno-Plioceno en Chile, su importancia es aún mayor. La exploración *greenfield* implica una metodología más incierta y de mayor riesgo en comparación con la exploración *brownfield*, ya que se trabaja en terrenos no conocidos y sin antecedentes mineros cercanos. No obstante, en zonas prolíficas como la cordillera de los Andes, que ha dado lugar a

gigantes como Los Pelambres, Río Blanco-Los Bronces y El Teniente, los estudios geológicos han proporcionado valiosa información para guiar estas campañas exploratorias. Según Sillitoe (2010), las franjas magmáticas y tectónicas del Mioceno-Plioceno representan un marco excepcional para la búsqueda de depósitos tipo pórfido cuprífero, ya que la geología regional y los controles estructurales ya conocidos pueden aplicarse a áreas nuevas y potencialmente ricas en mineralización.

El enfoque *greenfield* se basa en una serie de etapas metodológicas, comenzando por la integración de datos geológicos regionales, geofísicos y geoquímicos. Las investigaciones iniciales se centran en identificar áreas con un contexto geológico favorable, caracterizado por la presencia de estructuras tectónicas y magmáticas asociadas a la formación de depósitos minerales. Es importante el uso de imágenes satelitales, junto con la magnetometría y la gravimetría, para detectar anomalías en la corteza terrestre que podrían corresponder a cuerpos intrusivos en profundidad, un elemento fundamental en la formación de pórfidos cupríferos. Este enfoque se complementa con el mapeo geológico de superficie y el muestreo sistemático de suelos, que permiten identificar zonas con alteraciones hidrotermales superficiales, las cuales suelen ser indicadoras de mineralización oculta en profundidad.

Un aspecto clave de la exploración *greenfield* es la identificación de patrones geológicos que se hayan demostrado exitosos en yacimientos cercanos o en depósitos similares. Los modelos geológicos generados a partir de los grandes yacimientos del Mioceno-Plioceno, como Los Pelambres y El Teniente, sirven como guías predictivas para la localización de nuevos depósitos, ya que proporcionan información sobre las estructuras de control, la alteración hidrotermal y las características geoquímicas de los sistemas porfídicos. A medida que se identifican áreas prospectivas, las campañas de sondajes se convierten en la herramienta definitiva para confirmar la presencia de mineralización.

Aunque la exploración *greenfield* conlleva mayores riesgos económicos, la recompensa potencial es considerable, ya que permite descubrir yacimientos de gran escala que no han sido explotados anteriormente. La clave del éxito en la exploración *greenfield* radica en la capacidad de integrar múltiples métodos de exploración, desde estudios geológicos regionales hasta técnicas avanzadas

de geofísica y geoquímica, lo que reduce el riesgo y aumenta las probabilidades de identificar un yacimiento significativo. El prospecto Escalones, descubierto gracias a campañas de exploración *greenfield* en esta franja, es un claro ejemplo del éxito de estos métodos en Chile.

### **3.2. ANÁLISIS DE DATOS GEOLÓGICOS**

El análisis de las características geológicas de los yacimientos en operación, como Los Pelambres, Río Blanco-Los Bronces y El Teniente, resulta clave no solo para la explotación eficiente de los recursos, sino también para la definición de zonas de interés prospectivo en proyectos *greenfield*. Estos yacimientos, situados en la prolífica franja metalogénica del Mioceno-Plioceno de los Andes chilenos, proporcionan modelos geológicos fundamentales que permiten identificar patrones y controles que guían la formación de depósitos minerales. La comprensión detallada de las estructuras de control, tales como fallas y fracturas, la distribución de las alteraciones hidrotermales, y la relación entre intrusiones magmáticas y la mineralización cuprífera, son aspectos críticos para proyectar áreas con potencial mineral aún no exploradas. En este contexto, los pórfidos cupríferos de gran envergadura, como los mencionados, sirven como referencia directa para delinear zonas con condiciones geológicas similares en terrenos no explorados.

### **3.3. IDENTIFICACIÓN DE PATRONES GEOLÓGICOS RELEVANTES**

En el caso de yacimientos como Los Pelambres, Río Blanco-Los Bronces y El Teniente, se pueden definir y analizar una serie de características clave que permiten identificar similitudes y diferencias, proporcionando información valiosa para la exploración y el desarrollo de nuevos proyectos mineros. Entre los patrones geológicos más relevantes a comparar se encuentra la profundidad del yacimiento, un factor crítico que influye en la accesibilidad y la distribución de la mineralización, además de la altura a la que se encuentra la mina, importante para encontrar patrones superficiales al momento de definir blancos de exploración. Los estudios detallados de la litología y las formaciones geológicas presentes son esenciales para entender el ambiente tectónico y magmático en el que se formaron estos pórfidos cupríferos, ya que las rocas anfitrionas y las unidades intrusivas desempeñan un papel fundamental en la ubicación y concentración del mineral, por lo que también fue elegido para ser comparado.

Otro factor clave es la alteración hidrotermal, la cual refleja los procesos de circulación de fluidos que precipitan minerales económicamente valiosos. En estos yacimientos, alteraciones como la potásica, fílica, argílica y propilítica son comunes y marcan zonas favorables para la mineralización. Asimismo, las estructuras geológicas, como fallas y fracturas, actúan como canales de transporte de fluidos mineralizantes, condicionando la forma y distribución de los cuerpos mineralizados. Las texturas de los minerales de mena también proporcionan información sobre el ambiente de deposición, siendo las texturas masivas, diseminadas y stockwork algunas de las más comunes en los yacimientos tipo pórfido.

El tamaño en toneladas de estos yacimientos es otro factor crucial, pues indica la magnitud del sistema mineralizado. Yacimientos como El Teniente o Los Pelambres poseen una enorme cantidad de recursos, lo que refleja la eficiencia del sistema hidrotermal que los originó. La morfología general del yacimiento y la forma de emplazamiento del yacimiento también permiten entender los controles estructurales que influyen en su disposición tridimensional, siendo común en estos casos una forma irregular o de tipo stockwork.

La geocronología de eventos de mineralización permite definir las fases de intrusión y mineralización, ofreciendo una visión cronológica de cómo se desarrollaron los procesos magmáticos e hidrotermales. La composición principal de los intrusivos es fundamental para establecer el tipo de magma involucrado en el proceso de mineralización. En términos de asociaciones minerales, es común encontrar asociaciones de cuarzo, calcopirita, molibdenita, y en algunos casos oro.

Los minerales de enriquecimiento secundario, como la calcosina y la covelina, juegan un rol clave en aumentar las leyes de cobre en la parte superficial de los yacimientos, mientras que los minerales de mena principales, como la calcopirita y la bornita, son los portadores del metal valioso en profundidad. Finalmente, la ganga presente, generalmente compuesta de minerales como el cuarzo, feldespato y sericita, proporciona información adicional sobre los procesos de alteración y mineralización. Analizar estos patrones geológicos de manera integrada es fundamental para entender los mecanismos de formación y la continuidad de la mineralización en los sistemas tipo pórfido en esta zona.

En resumen, los aspectos a comparar cada yacimiento son:

- Profundidad del yacimiento
- Altura a la que se encuentra la mina
- Litología presente
- Formaciones geológicas presentes
- Alteración hidrotermal
- Estructuras geológicas
- Texturas de los minerales de mena
- Tamaño en toneladas del yacimiento
- Morfología general del yacimiento
- Forma de emplazamiento del yacimiento
- Geocronología de eventos de mineralización
- Composición principal de los intrusivos
- Asociaciones minerales
- Minerales de enriquecimiento secundario presentes
- Minerales de mena principales
- Ganga presente

#### **3.4. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE EXPLORACIONES**

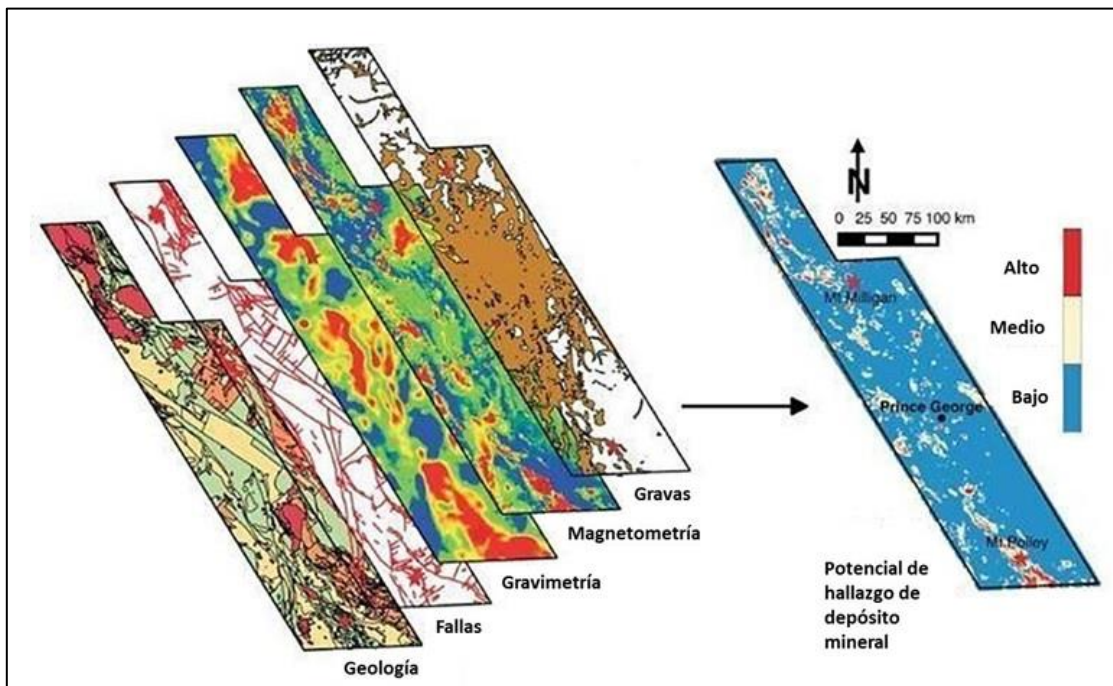
Para definir blancos de exploración en la búsqueda de nuevos yacimientos, la recopilación y análisis de información proveniente de exploraciones previas es muy útil. Este proceso permite construir una base de datos sólida que incluye aspectos como antecedentes geológicos, geoquímicos, geofísicos, y estructurales de las áreas exploradas, lo que facilita la identificación de patrones o características que pueden asociarse a la mineralización buscada.

El análisis de exploraciones pasadas permite determinar las características comunes de los yacimientos en operación, como su relación con estructuras regionales, alteraciones hidrotermales, anomalías geofísicas y geoquímicas. Este enfoque ayuda a identificar elementos clave que puedan indicar la presencia de mineralización, mejorando así la eficiencia y precisión en la delimitación de blancos de exploración.

### 3.5. MAPA PROSPECTIVO

La importancia de los mapas en geología es innegable, ya que proporcionan una gran ayuda para la representación espacial detallada de las características del subsuelo, lo cual es esencial para tomar decisiones informadas en la búsqueda de nuevos yacimientos. El mapa prospectivo es una herramienta geológicamente fundamental en el contexto de exploración minera, ya que permite representar visualmente y analizar la interacción de distintos factores geológicos que influyen en la formación de yacimientos minerales. Estos mapas ayudan a enfocar los esfuerzos en áreas con un alto potencial, maximizando la eficiencia y minimizando costos y riesgos.

El mapa prospectivo se puede construir a partir de la integración de múltiples capas de información geológica y geofísica, cada una de las cuales aporta datos específicos que reflejan distintos criterios geológicos presentes en la zona de estudio (Fig. 3.1).



**Figura 3.1: Creación de mapa prospectivo.** Se crea a partir de distintos mapas predictivos de diferentes variables.

Las capas utilizadas pueden incluir datos de fallas y estructuras, anomalías magnéticas, variaciones gravimétricas y litología, entre otros factores relevantes en el contexto de yacimientos de pórfidos cupríferos, en este caso, en la franja del Mioceno-Plioceno. La selección de estas capas responde a

los factores de control mineralógicos y estructurales que caracterizan la mineralización en esta región. La versatilidad del mapa prospectivo radica en su capacidad para adaptarse a los distintos criterios geológicos presentes en la zona de estudio. Dependiendo de las características específicas del área y de la disponibilidad de datos, el mapa prospectivo puede personalizarse al dar mayor peso a ciertas capas.

En este caso, no es posible desarrollar un mapa prospectivo debido a la gran extensión del área de estudio y a la limitada disponibilidad de datos. Por lo tanto, se priorizará la selección de las variables mapeables más relevantes, enfocándose en aquellas que mejor representen las características generales de la franja.

## 4. RESULTADOS

En esta investigación, se realizó un análisis comparativo exhaustivo y meticuloso que capture y compare las características geológicas clave de los yacimientos de pórfidos cupríferos localizados en la franja del Mioceno-Plioceno en Chile. Esta franja geológica se ha consolidado como una de las más importantes a nivel mundial para la minería del cobre debido a su abundancia en yacimientos de esta naturaleza, cuya formación y características son el resultado de eventos tectónicos, magmáticos e hidrotermales específicos de la región.

La predicción de nuevos yacimientos requiere no solo la identificación de patrones estructurales y mineralógicos presentes en los depósitos conocidos, sino también la comprensión de las variables geológicas que intervienen en la formación y preservación de estos depósitos. En este sentido, el presente capítulo se enfoca en la presentación y comparación de múltiples aspectos de yacimientos consolidados en Chile, como son El Teniente, Río Blanco-Los Bronces y Los Pelambres. Estos yacimientos fueron seleccionados por su representatividad en la franja del Mioceno-Plioceno y por poseer un volumen de información histórica significativa, lo cual permite establecer un marco comparativo robusto para el desarrollo de un modelo predictivo.

### 4.1. COMPARACIÓN DE PATRONES GEOLÓGICOS RELEVANTES

**Tabla 4.1: Comparación de profundidad de yacimientos.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Profundidad del yacimiento	500 metros. Alteración Supérgena de 10 a 200 metros.	600 metros, pudiendo alcanzar los 1.000 metros localmente	400 metros, con proyectos para profundizar hasta 1.880 metros

La profundidad de los yacimientos en Chile varía considerablemente según el depósito. En el yacimiento de Los Pelambres, la mineralización se encuentra a una profundidad aproximada de 500 metros, con una zona de enriquecimiento supérgeno que tiene un espesor variable entre 10 y 200 metros. En el caso del yacimiento El Teniente, la profundidad es de 400 metros en promedio,

aunque existen proyectos para ampliar la explotación hasta alcanzar una profundidad máxima de 1.880 metros. El sistema Río Blanco Los Bronces presenta mineralización a unos 600 metros de profundidad en promedio, aunque en ciertas áreas puede llegar a los 1.000 metros.

**Tabla 4.2: Comparación de la altura a la que se encuentran las minas.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Altura	3.600 m s.n.m.	3.500 m s.n.m.	Entre los 2.200 y 3.200 m s.n.m.

La altura a la que se encuentran los yacimientos en Chile también presenta variaciones entre distintos depósitos. El yacimiento de Los Pelambres está ubicado a una altitud de aproximadamente 3.600 m s.n.m. El yacimiento de El Teniente se encuentra a una altura que varía entre los 2.200 y los 3.200 m s.n.m. El sistema de Río Blanco-Los Bronces está situado a una altitud promedio de 3.500 m s.n.m.

Esta información podría ser importante para determinar alturas promedio en las cuales es más probable definir blancos de exploración.

**Tabla 4.3: Comparación de litologías presentes en las minas.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Litología presente	Flujos de lavas, brechas y rocas volcano-sedimentarias	Rocas volcánicas andesíticas, andesítica-basálticas, traquiandesítica y dacita	Lavas andesíticas y depósitos volcanoclasticos

La litología presente en los distintos yacimientos chilenos muestra variaciones en los tipos de rocas. En el yacimiento de Los Pelambres, se encuentran flujos de lavas, brechas y rocas volcano-sedimentarias. En El Teniente, la litología está compuesta por lavas andesíticas y depósitos volcanoclásticos. En el sistema de Río Blanco-Los Bronces, las rocas son volcánicas andesíticas, andesítico-basálticas, traquiandesíticas y dacíticas.

**Tabla 4.4: Comparación de formaciones presentes.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Fm. Presentes	Fm. Los Pelambres, Fm. El Pachón, Fm. Abanico, Fm. Farellones	Fm. Abanico, Fm. Farellones, Fm. Coya Machalí	Fm. Farellones, Fm. Abanico, Fm. Coya Machalí

Las formaciones geológicas presentes en el yacimiento de Los Pelambres forman parte de las formaciones Los Pelambres, El Pachón, Abanico y Farellones. En El Teniente, están las formaciones Farellones, Abanico y Coya Machalí. En el sistema Río Blanco-Los Bronces, se observan las formaciones Abanico, Farellones y Coya Machalí. Evidentemente, se aprecia como las formaciones Abanico y Farellones se encuentran presentes en todos los yacimientos.

**Tabla 4.5: Comparación alteración hidrotermal presente en los yacimientos.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Alteración Hidrotermal	Potásica, silícica, argílica, sericítica, propilítica, turmalínica, supérgena, todas fuertes	Potásica, fílica, propilítica	Potásica, propilítica, fílica

Las alteraciones hidrotermales presentes en los yacimientos chilenos incluyen distintos tipos y grados de intensidad. En el yacimiento de Los Pelambres, se observan alteraciones potásica, silícica, argílica, sericítica, propilítica, turmalínica y supergena, todas con alta intensidad.

En El Teniente, las alteraciones presentes son potásica, propilítica y fílica, al igual que en Río Blanco Los Bronces.

**Tabla 4.6: Comparación de estructuras presentes.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Estructuras	La estructura principal es la falla El Fierro, de primer orden, con rumbo NNW-SSE y vergencia al este, que controló el emplazamiento del complejo intrusivo y del pórfido cuarzo-feldespático premineral. Dentro del yacimiento, predominan fallas NE-SW, con una estructura secundaria NW-SE. El control estructural principal es NS.	La tendencia estructural principal es NNW-SSE, reflejada en las orientaciones de los cuerpos de brechas, diques y pórfidos tardíos, con direcciones entre N100°-30°W. Un segundo alineamiento estructural importante es NE-SW, definido por fracturas, fallas, diques de guijarros, vetas y la falla Escondida, una falla mayor con rumbo NE-SW. El control estructural principal es NS.	El área presenta un predominio de estructuras NE-SW sobre NW-SE, con un corredor estructural N65°E de 14 km de largo y 3 km de ancho, que abarca el yacimiento El Teniente, la diorita cuarcífera y Agua Amarga, y contiene fracturas y fallas anastomosadas. También hay vetas de cuarzo NE-SW con minerales de Pb y Zn. El control estructural principal es NE-SW.

Las estructuras presentes en los yacimientos chilenos incluyen fallas y alineamientos estructurales que han influido en la localización y desarrollo de los cuerpos mineralizados. En Los Pelambres, la principal estructura es la falla El Fierro, una falla de primer orden con rumbo NNW-SSE y vergencia hacia el este, que probablemente controló el emplazamiento del complejo intrusivo y la ubicación del pórfido cuarzo-feldespático premineral. Dentro del yacimiento, el fallamiento predominante es NE-SW, con una estructura secundaria en dirección NW-SE. El control estructural principal en Los Pelambres es de orientación NS.

En El Teniente, predominan las estructuras NE-SW sobre las NW-SE, con un corredor estructural con rumbo N65°E de 14 km de largo y 3 km de ancho, que incluye fracturas y fallas anastomosadas y abarca el yacimiento de El Teniente, la diorita cuarcífera y Agua Amarga. También se observan vetas de cuarzo con orientación NE-SW, algunas de las cuales contienen minerales de plomo y zinc. El control estructural principal en El Teniente es de orientación NE-SW.

En el sistema Río Blanco-Los Bronces, la tendencia estructural principal es NNW-SSE, reflejada en las orientaciones de los cuerpos de brechas, diques y pórfidos tardíos, con direcciones entre N100° y 30°W. Un segundo alineamiento estructural destacado es NE-SW, definido por fracturamiento, fallamiento, diques de guijarros, vetas y la falla Escondida, una falla mayor con orientación NE-SW. El control estructural principal en Río Blanco-Los Bronces es de orientación NS.

**Tabla 4.7: Comparación de la textura de la mena.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Textura de la mena	Diseminada, vetilla	Diseminado, masivo, relleno de brecha, vetilla	Diseminada, vetilla

Tanto en Los Pelambres como en El Teniente, la mena tiene una textura diseminada y en vetillas. En el sistema Río Blanco-Los Bronces, la textura de la mena es variada, incluyendo diseminado, masivo, relleno de brecha y vetillas.

**Tabla 4.8: Comparación del tamaño (en megatoneladas).**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Tamaño (Mt)	3.311	6.691	12.482

El yacimiento de Los Pelambres cuenta con un tamaño aproximado de 3.311 megatoneladas. En El Teniente, el tamaño es considerablemente mayor, alcanzando las 12.482 megatoneladas. El sistema Río Blanco-Los Bronces tiene un tamaño estimado de 6.691 megatoneladas.

En Los Pelambres, la forma del yacimiento es arriñonada y se orienta en dirección norte-sur, con un desvío hacia el sureste en su extremo sur. El yacimiento se extiende horizontalmente por más de 2 km, con un ancho promedio de 1 km y una profundidad aproximada de 500 m.

En El Teniente, la morfología en planta es triangular, con una altura orientada hacia el noroeste. Este yacimiento se extiende horizontalmente por 2.500 m, con una base de 1.200 m en dirección este-noreste. La extensión vertical conocida es de aproximadamente 2 km, y el yacimiento continúa abierto en profundidad.

**Tabla 4.9: Comparación de la morfología.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Morfología	Forma arriñonada, orientada norte-sur y sureste en su extremo sur. El yacimiento se extiende horizontalmente por más de 2 km con un ancho medio de 1 km, y alcanza una profundidad de aproximadamente 500 m.	Los Bronces tiene una forma arriñonada de 2 km de largo y 0,5 km de ancho, con mineralización entre 400 y 1.100 m de profundidad. Río Blanco se extiende 4 km, con anchos de 0,7 km a 0,1 km y mineralización hasta 1.500 m de profundidad.	Forma triangular en planta, con una altura orientada al noroeste. Se extiende horizontalmente por 2.500 m y su base alcanza 1.200 m en dirección este-noreste. La extensión vertical conocida es de aproximadamente 2 km, y el yacimiento sigue abierto en profundidad.

En el sistema Río Blanco-Los Bronces, se observan diferencias entre ambos sectores. Los Bronces tiene una forma arriñonada y es cóncavo hacia el este. El cuerpo se extiende por 2 km de largo y 0,5 km de ancho, con columnas mineralizadas que varían en profundidad entre 400 y 1.100 m. En Río Blanco, el yacimiento se extiende a lo largo de 4 km desde la mina subterránea (sector Andina) hasta la Brecha La Americana, con anchos que oscilan entre 0,7 km en el norte y 0,1 km en el sur. La columna mineralizada conocida alcanza una profundidad de aproximadamente 1.500 m.

**Tabla 4.10: Comparación de la forma en la que se presentan los yacimientos.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Forma en la que se presenta	Chimenea de brecha, stockwork	Chimenea de brecha, stockwork	Bolsón

En Los Pelambres, la mineralización se presenta en forma de chimenea de brecha y stockwork. En El Teniente, la forma de presentación es en bolsón, es decir, un cuerpo mineralizado con una morfología ensanchada en una zona específica, generalmente de aspecto más voluminoso o redondeado en el centro. En el sistema Río Blanco-Los Bronces, la mineralización también se encuentra en forma de chimenea de brecha y stockwork.

**Tabla 4.11: Comparación de la geocronología de los eventos hidrotermales.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Geocronología	11,6 - 8,4 Ma	6,3 - 4,3 Ma	6,5 - 4,3 Ma

En Los Pelambres, el rango de edad de los eventos hidrotermales se encuentra entre 11,6 y 8,4 Ma (millones de años). En el yacimiento de El Teniente, la formación ocurrió entre 6,5 y 4,3 Ma. Por su parte, el sistema Río Blanco-Los Bronces tiene una geocronología que varía entre 6,3 y 4,3 Ma.

**Tabla 4.12: Comparación de la composición principal de los intrusivos.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Composición principal intrusivos	Diorita cuarcífera	Granodiorita, dacita, monzonita cuarcífera	Diorita cuarcífera, dacita

La composición principal de los intrusivos en los yacimientos de pórfidos cupríferos de Chile incluye diferentes tipos de rocas ígneas. En Los Pelambres, la composición principal son dioritas cuarcíferas. En El Teniente, los intrusivos están compuestos por diorita cuarcífera y dacita. En el sistema Río Blanco-Los Bronces, los intrusivos principales incluyen granodiorita, dacita y monzonita cuarcífera.

**Tabla 4.13: Comparación de asociaciones minerales.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Asociaciones minerales	Sus principales minerales de mena son calcosina, calcopirita y bornita asociados a cantidades significativas de molibdeno y menor oro y plata	La mineralización de cobre y molibdeno encuentra como sulfuros en stockworks de vetillas en rocas intrusivas y porfíricas y también en la matriz de brechas hidrotermales	Su principal mineral de cobre es la calcopirita, que se aloja en un enrejado de vetillas polidireccionales (stockwork)

En Los Pelambres, los principales minerales de mena son la calcosina, la calcopirita y la bornita, asociados a cantidades significativas de molibdeno, y en menor proporción, oro y plata. En El Teniente, el mineral principal de cobre es la calcopirita, que se encuentra alojada en un enrejado de vetillas polidireccionales. En el sistema Río Blanco-Los Bronces, la mineralización de cobre y molibdeno se presenta en forma de sulfuros en stockworks de vetillas, tanto en rocas intrusivas y porfíricas, como en la matriz de brechas hidrotermales.

**Tabla 4.14: Comparación de los minerales de enriquecimiento secundario.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Enriquecimiento secundario	Calcosina, covelina	Calcosina	Calcosina

En Los Pelambres, los minerales secundarios de enriquecimiento son la calcosina y la covelina, mientras que en El Teniente y en Río Blanco-Los Bronces el mineral presente de enriquecimiento secundario es la calcosina.

**Tabla 4.15: Comparación de minerales de mena.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río Blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Mena	Calcopirita, bornita, calcosina, pirita, brochantita, atacamita, malaquita	Calcopirita, bornita, molibdenita	Calcopirita, bornita, covelina, calcosina, molibdenita, crisocola, curpita, malaquita, tennantita, antlerita, brochantita

**Tabla 4.16: Comparación de minerales de ganga.**

<b>Mina</b>	<b>Los Pelambres</b>	<b>Río blanco Los Bronces</b>	<b>El Teniente</b>
Ganga	Calcita, cuarzo, epidota, limonita, muscovita, sericita, sílice, turmalina	Anhidrita, turmalina, yeso	Anhidrita, cuarzo, biotita, yeso, turmalina, baritina

#### **4.2. EXPLORACIÓN DE LOS YACIMIENTOS IMPORTANTES**

Los tres principales yacimientos de la franja del Mioceno-Plioceno fueron descubiertos, al menos para su etapa inicial como zona de interés prospectivo, de una manera similar.

El descubrimiento de Los Pelambres se remonta a la década de 1920, cuando se identificaron las primeras manifestaciones de mineralización en la región expresadas, principalmente, mediante el pH inusual del río Pelambres, el cual bajaba desde el área mineralizada y causaba que las canillas de los animales se dañaban y descueraban cuando cruzaban dicho río. En esos años, se llevaron a cabo exploraciones iniciales que indicaban la existencia de cobre en el área, aunque con tecnologías y conocimientos limitados para realizar una caracterización detallada. Sin embargo, no fue hasta las décadas de 1960 y 1970 que la exploración sistemática, impulsada por empresas extranjeras y nacionales, permitió delinear mejor el yacimiento.

Durante esta segunda etapa de exploración, se aplicaron técnicas geofísicas y geoquímicas más avanzadas para la época, lo que facilitó la identificación de cuerpos de mineralización asociados a pórfidos cupríferos. Estos estudios revelaron la presencia de grandes concentraciones de sulfuros de cobre y molibdeno en profundidad, características típicas de los depósitos de pórfidos cupríferos.

El descubrimiento y desarrollo del yacimiento Río Blanco-Los Bronces, uno de los yacimientos de pórfido cuprífero más importantes en la región central de Chile, tuvo un proceso de exploración extenso que comenzó en el siglo XIX y se consolidó en la primera mitad del siglo XX. La historia de este depósito está marcada por la presencia de mineralización de cobre que fue inicialmente explotada de manera rudimentaria por mineros artesanales, quienes descubrieron afloramientos ricos en cobre en la zona de alta montaña cerca de Santiago.

Los estudios de exploración comenzaron de manera más sistemática en la década de 1900, cuando empresas chilenas y extranjeras notaron el potencial económico de las mineralizaciones de cobre en la región. A partir de entonces, se realizaron campañas de exploración que incluyeron mapeos geológicos, estudios estructurales y muestreos geoquímicos. Estos trabajos permitieron identificar los cuerpos de mineralización en profundidad y sugerir que el área contenía un gran sistema de pórfido cuprífero.

La historia del descubrimiento del yacimiento El Teniente se remonta al siglo XIX, cuando el área fue explorada y trabajada de forma artesanal por mineros chilenos y extranjeros que encontraron vetas de cobre aflorando en la superficie. Las características geológicas del yacimiento fueron estudiadas y modeladas a medida que se avanzaba en el desarrollo de túneles subterráneos y nuevas galerías, lo cual facilitó una comprensión más precisa de la estructura y extensión del sistema de pórfido cuprífero de El Teniente. La tecnología empleada en el desarrollo del yacimiento incluyó métodos de perforación, mapeo geológico detallado y análisis de las zonas de alteración. Esto permitió no solo la expansión de las operaciones mineras, sino también una comprensión más profunda de la estructura geológica y del sistema de vetas de cobre.

### **4.3. VARIABLES MAPEABLES PARA UN MAPA PROSPECTIVO**

Desde un punto de vista geológico, es esencial mapear la distribución de las unidades litológicas asociadas al Mioceno-Plioceno, ya que estas rocas frecuentemente albergan los sistemas de pórfidos cupríferos. En particular, se deben identificar intrusivos de composición dacítica, granodiorítica y diorítica, que suelen estar asociados a mineralización de cobre y molibdeno en el área. Además, es crucial caracterizar las zonas de alteración hidrotermal, como las alteraciones potásica, fílica y propílica, que están espacialmente relacionadas con los sistemas de pórfido.

Desde el ámbito estructural, y a pesar de que no se ha podido demostrar una directa relación en la mayoría de los yacimientos (excepto en El Teniente) entre éstos y estructuras, las fallas y fracturas desempeñan un papel clave como conductos de fluidos mineralizantes. Es importante mapear las principales fallas regionales y su relación con sistemas de fallamiento secundarios, ya que suelen controlar la ubicación y orientación de los cuerpos mineralizados. Particularmente, se debe analizar la disposición de zonas de intersección de fallas y corredores estructurales favorables, que a menudo representan zonas de mayor permeabilidad y acumulación de mineralización.

En el aspecto geoquímico, el análisis de anomalías superficiales de elementos clave como cobre, molibdeno, oro, arsénico y azufre es fundamental. Estas anomalías suelen reflejar halos de dispersión geoquímica asociados al sistema mineralizado. Además, las proporciones de elementos traza como los lantánidos o el contenido de ciertos isótopos pueden proporcionar pistas adicionales sobre la proximidad a la fuente de mineralización.

## 5. DISCUSIÓN

La franja del Mioceno-Plioceno se presenta como una zona altamente prometedora para la exploración minera por varias razones. En primer lugar, alberga tres de los yacimientos de pórfido cuprífero más importantes a nivel mundial, además de descubrimientos recientes de gran relevancia, como el depósito Frontera, ubicado dentro del clúster explorado en las cercanías de la mina Los Pelambres.

Además, los yacimientos tipo pórfido en esta franja suelen estar mejor preservados en comparación con otras regiones. Esto se debe a la edad de formación de los sistemas hidrotermales, lo que ha permitido que muchos de ellos se mantengan más completos, con mayores volúmenes de mineralización y un potencial significativo en recursos de cobre.

Finalmente, la franja ofrece un entorno favorable para la exploración debido a la disponibilidad de espacios con propiedad minera libre entre los yacimientos conocidos. Asimismo, su extensión hacia el sur carece de un límite definido, lo que abre la posibilidad de investigar áreas aún inexploradas en esa dirección, ampliando las oportunidades de nuevos hallazgos.

### 5.1. MODELO INTEGRADO

#### 5.1.1. Geología local y geografía

Al definir una zona de interés prospectivo, resulta fundamental realizar un mapeo geológico detallado del área de interés. En este contexto, las litologías esperadas incluyen principalmente rocas volcánicas, volcanoclásticas y brechas, que son indicativas de ambientes favorables para la formación de yacimientos. En cuanto a las formaciones geológicas, la Formación Farellones, la Formación Abanico y la Formación Coya-Machalí son particularmente relevantes, ya que su presencia es un factor clave para orientar la búsqueda de depósitos en la franja del Mioceno-Plioceno. También es importante fijarse en las rocas intrusivas como dioritas y granodioritas que intruyan a estas litologías.

Es igualmente relevante enfocar geográficamente la atención en la zona de la cordillera principal, ya que los yacimientos conocidos se encuentran exclusivamente a altitudes superiores a los 3.000

metros sobre el nivel del mar. Además, resulta crucial observar las características de coloración del terreno, como tonalidades blancas, rojizas, cafés y amarillas, las cuales suelen estar vinculadas a la lixiviación superficial de minerales sulfurados, principalmente pirita y, en menor medida, calcopirita. La oxidación de estos minerales genera ácido sulfúrico, lo que facilita la hidratación y transformación de los silicatos en las rocas. Este proceso conduce al desarrollo de alteración argílica, así como a la formación de óxidos e hidróxidos de hierro y óxidos de cobre, estos últimos reconocibles por sus distintivos colores verdes y azules.

### **5.1.2. Control estructural**

A pesar de que no parece tan evidente en la mayoría de las minas de la franja del Mioceno-Plioceno, en el contexto de yacimientos de pórfidos cupríferos, el control estructural y las estructuras geológicas son factores críticos en la formación y disposición de cuerpos mineralizados. Las estructuras geológicas, como fallas, fracturas y diques, actúan como conductos para los fluidos hidrotermales y determinan los sitios de deposición de minerales. El control estructural se refiere a la influencia que ciertas orientaciones estructurales tienen en la localización y tamaño de los yacimientos, debido a que facilitan la circulación de fluidos mineralizantes y, por ende, la precipitación de minerales.

Cada yacimiento posee un patrón estructural particular que refleja la historia tectónica y los eventos magmáticos de la región. Las fallas de primer orden, como las de orientación NNW y NE, suelen ser determinantes en la localización de intrusiones y cuerpos mineralizados. En yacimientos como Los Pelambres, El Teniente y Río Blanco-Los Bronces, el control estructural principal a menudo está asociado con direcciones NNW o NE, lo que indica que estas orientaciones estructurales crean corredores o zonas de mayor permeabilidad donde la mineralización puede concentrarse.

Las fallas y fracturas en orientaciones específicas también generan zonas de debilidad que permiten el ascenso y emplazamiento de intrusiones y fluidos hidrotermales. Estos elementos son fundamentales en la exploración minera, ya que permiten delimitar áreas con potencial de mineralización en función de la estructura geológica regional y local.

### **5.1.3. Selección de criterios para un mapa prospectivo**

La generación de un mapa prospectivo para esta área requiere integrar múltiples criterios que permitan identificar zonas con mayor potencial de mineralización. Entre estos criterios destacan la geología, la proximidad a fallas y estructuras locales, la información geofísica (aunque no disponible actualmente), las unidades intrusivas del Mioceno-Plioceno y la presencia de minerales asociados a procesos supérgenos.

En cuanto al criterio geológico, la comprensión detallada de las litologías y alteraciones es esencial. Las rocas hospedantes más favorables suelen ser intrusivos de composición intermedia a félsica, típicos de arcos magmáticos activos durante el Mioceno y Plioceno. Además, la identificación de zonas de alteración hidrotermal, como halos propilíticos, potásicos y fílicos, es fundamental para delinear áreas de interacción entre fluidos hidrotermales y las rocas. Por último, los contactos intrusivos y las zonas donde se superponen diferentes eventos magmáticos también son indicativos de potencial mineralización debido a los contrastes de competencia y a la mayor permeabilidad de las rocas.

La cercanía a fallas y estructuras locales es otro criterio crucial, ya que estas actúan como canales de transporte para los fluidos mineralizantes. Las fallas mayores, particularmente aquellas con actividad durante el Mioceno y Plioceno, suelen estar asociadas a la formación de depósitos minerales. Además, las fracturas secundarias conectadas a estas fallas principales pueden representar trampas donde los minerales se depositan. La orientación y el régimen tectónico asociado a estas estructuras también influye significativamente en la concentración de fluidos y, por ende, en la formación de mineralización. A pesar de que no está demostrado un control estructural a escala regional en la zona (como el caso del sistema de fallas de Atacama, por ejemplo), es igualmente importante generar un mapa de estructuras locales.

Aunque en esta etapa no se dispone de estudios geofísicos detallados, su importancia es innegable. Métodos como la magnetometría y la gravimetría son herramientas valiosas para identificar anomalías subsuperficiales asociadas a intrusivos y zonas de alteración. Por ejemplo, la magnetometría puede revelar la presencia de cuerpos intrusivos o áreas afectadas por alteración hidrotermal, mientras que la gravimetría ayuda a detectar contrastes de densidad vinculados a

intrusivos o estructuras geológicas relevantes. La incorporación de datos geofísicos en el futuro permitiría integrar información en profundidad, mejorando la precisión del modelo prospectivo.

Las unidades intrusivas del Mioceno-Plioceno son objetivos prioritarios debido a su relación genética y temporal con los sistemas de pórfidos cupríferos. Estas unidades suelen ser el resultado de pulsos magmáticos asociados a arcos activos, generando condiciones ideales para la mineralización. Entre las características de interés se incluyen la composición química y textural de los intrusivos, la presencia de intrusivos multipulsos y las edades, que pueden correlacionarse con eventos magmáticos regionales previamente documentados.

Por otro lado, la presencia de minerales asociados a procesos supérgenos es un indicador indirecto pero valioso de la existencia de mineralización primaria en la zona. Minerales como la caolinita y los óxidos de hierro son indicadores comunes de zonas de alteración argílica avanzada o de procesos de oxidación en climas áridos. La formación de yeso y otros sulfatos en estas áreas también puede señalar zonas de oxidación que merecen mayor atención.

Finalmente, también se podría considerar el análisis de patrones de drenaje e hidrogeología superficial. Estos pueden proporcionar pistas sobre la existencia de mineralización a través de elementos traza transportados por aguas superficiales que drenan zonas mineralizadas. Este enfoque geoquímico podría combinarse con los demás criterios para delimitar mejor las áreas prioritarias.

## **5.2. ASPECTOS POR CONSIDERAR**

Es importante, al momento de definir zonas de interés prospectivo, prestar atención y tener cierto criterio geológico. Principalmente, a medida que pasa el tiempo los estudios geofísicos se hacen más importantes, ya que la mayoría de los pórfidos medianamente exhumados ya han sido encontrados, por lo que hay que considerar que, para la minería del futuro, se optará más por minería subterránea.

Otro aspecto importante para considerar es la geología estructural en la zona. A pesar de que no se ha logrado una clara relación con la mineralización en la mayor parte de las minas, es algo imprescindible al momento de explorar un yacimiento.

### **5.3. RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO**

El modelo integrado desarrollado en este trabajo tiene un gran potencial para optimizar la exploración de pórfidos cupríferos en la franja del Mioceno-Plioceno en Chile, siempre que se aplique de manera sistemática y adaptativa. En primer lugar, es fundamental delimitar las áreas de estudio en función de un contexto geológico favorable, priorizando aquellas con indicios preliminares obtenidos a partir de estudios regionales, como análisis estructurales y geoquímicos, además de revisiones bibliográficas. La calidad de los datos de entrada es esencial para el éxito del modelo, por lo que se recomienda integrar información multivariada, como mapas geológicos detallados, estudios de magnetometría y gravimetría, y datos geoquímicos actualizados.

El modelo debe ser retroalimentado constantemente con datos nuevos provenientes de exploraciones, asegurando su actualización y refinamiento. Una vez validado en zonas específicas, puede ampliarse su aplicación a áreas más extensas, adaptando sus parámetros según las particularidades geológicas de cada región. La implementación de este modelo también requiere un enfoque multidisciplinario que integre la experiencia de geólogos, geofísicos y modeladores, maximizando así la calidad de la interpretación de resultados. Estas recomendaciones buscan asegurar que el modelo sea una herramienta efectiva para identificar nuevos depósitos y optimizar los recursos en las fases tempranas de exploración minera.

## 6. CONCLUSIÓN

El modelo integrado desarrollado en este trabajo resulta ser una herramienta efectiva para correlacionar y analizar los principales controles geológicos y estructurales que caracterizan los yacimientos presentes en la franja del Mioceno-Plioceno, además de servir de base para comenzar con el análisis inicial al momento de definir una zona de interés prospectivo. Al combinar múltiples variables predictivas, como litología, estructuras geológicas y alteración hidrotermal, se logró construir un enfoque coherente para priorizar estas áreas de exploración. Este modelo no solo facilita la identificación de patrones recurrentes asociados a la mineralización, sino que también refuerza la importancia de integrar datos provenientes de diversas fuentes para generar un análisis más completo y confiable. Su capacidad para sintetizar información compleja y traducirla en áreas prospectivas con potencial económico representa una contribución significativa al desarrollo de metodologías de exploración modernas y adaptables a diferentes contextos geológicos.

### 6.1. IMPORTANCIA DE LA FRANJA DEL MIOCENO-PLIOCENO

La franja del Mioceno-Plioceno se posiciona como una de las regiones más estratégicas para la exploración de yacimientos de pórfidos cupríferos a nivel mundial. Este cinturón geológico no solo alberga yacimientos de clase mundial, como Los Pelambres, El Teniente y Río Blanco-Los Bronces, sino que también presenta un alto grado de preservación geológica que favorece la conservación de sistemas hidrotermales completos. Estas características, junto con recientes descubrimientos como el depósito Frontera o Escalones, subrayan el potencial aún no completamente explorado de esta franja. Además, la existencia de áreas con propiedad minera disponible y la extensión indeterminada hacia el sur refuerzan su atractivo para futuras investigaciones. Este contexto geológico excepcional convierte a la franja en un foco prioritario para el desarrollo de nuevos proyectos de exploración y minería, especialmente en un escenario global donde la demanda de cobre sigue en aumento.

## REFERENCIAS

- Aguirre, L. 1960. Geología de los Andes de Chile central: provincia de Aconcagua. Editorial Universitaria, SA.: 70 pp. Santiago.
- Armitage, A. & Davis, C. 2012. Resource Estimate on the Escalones Porphyry Copper Project. GeoVector Management Inc., South American Silver Corp.: 44 pp. Vancouver.
- Bergoeing Rubilar, J. P. 2016. Evolución geoquímica del magmatismo de la Región de Los Pelambres (31°S) entre el Cretácico Superior y el Mioceno Superior: implicancias para la evolución tectónica y metalogénica de los Andes de Chile Central. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (inédito): 131 pp. Santiago.
- Bertens, A. 2003. Geocronología U-Pb, Re-Os y 40Ar/39Ar del pórfido de Cu-Mo Los Pelambres, Chile Central. Congreso Geológico Chileno N°10. Actas, Concepción.
- Bertens, A.; Clark, A.; Barra, F. & Deckart, K. 2006. Evolution of the Los Pelambres-El Pachón porphyry copper-molybdenum district, Chile/Argentina. Congreso Geológico Chileno N°11. Short Papers: 179-181. Antofagasta.
- Camus, F. 2003. Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Carrizo, D.; Barros, C. & Gallardo, S. 2013. Modelo Estructural 3D de la Mina Los Bronces, Anglo American Sur SA (Chile). Reporte para Anglo American Chile. 85 pp. Santiago.
- Charrier, R. 1983. Carta geológica de Chile, Escala 1:250.000, Hoja El Teniente. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Charrier, R.; Baeza, O.; Elgueta, S.; Flynn, J. J.; Gans, P.; Kay, S. M.; Muñoz, N.; Wyss, A.R. & Zurita, E. 2002. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33–36°S). *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **15**, (1): 117-139.
- Charrier, R. & Munizaga, F. E. 1979. Edades K-Ar de volcanitas Cenozoicas del sector cordillerano del río Cachapoal, Chile (34°15' de Latitud Sur). *Revista Geológica de Chile*. (7): 41-51.
- Cortés Yáñez, J. E. 2011. Evolución geológica de los sistemas porfídicos de Cu-Mo Amos y Andrés, Andes Centrales de Chile y Argentina. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (inédito): 104 pp. Santiago.
- Deckart, K., Clark, A. H., Celso, A. A., Ricardo, V. R., Bertens, A. N., Mortensen, J. K., & Fanning, M. 2005. Magmatic and hydrothermal chronology of the giant Río Blanco porphyry copper deposit, central Chile: Implications of an integrated U-Pb and 40Ar/39Ar database. *Economic Geology*. Vol. **100**, (5): 905-934.

- Fuentes, F.; Vergara, M.; Aguirre, L. & Féraud, G. 2002. Relaciones de contacto de unidades volcánicas terciarias de los Andes de Chile central (33°S): una reinterpretación sobre la base de dataciones  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . *Revista Geológica de Chile*. Vol. **29**, (2): 207-225.
- Howell, F. H. & Molloy, J. S. 1960. Geology of the Braden orebody, Chile, South America. *Economic Geology*. Vol. **55**, (5): 863-905.
- Kay, S.M.; Mpodozis, C. & Coira, B. 1999. Neogene magmatism, tectonics, and mineral deposits of the Central Andes (22° to 33°S Latitude). In *Geology and ore deposits of the Central Andes* (Skinner, B.J., editor). Society of Economic Geologists. (7): 27-59.
- Giehm, C. K. (1960). Geología de la Cordillera de los Andes de Chile central: provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Kock, M. T. 2018. Metodología para la generación de blancos de exploración: Caso de estudio en los Yacimientos Queen Elizabeth y Cerro Colorado, Región de Tarapacá, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (inédito): 90 pp. Santiago.
- Lowell, J. D. & Guilbert, J. M. 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*. Vol. **65**, (4): 373-408.
- Maksaev, V.; Townley, B.; Palacios, C. & Camus, F. 2007. Metallic ore deposits. The Geology of Chile (Moreno, T. editor). Geological Society of London: 179-200. London.
- Moreno, H.; Thiele, R. & Varela, J. 1991. Estudio geológico y de riesgos volcánicos y de remoción en masa del Proyecto Hidroeléctrico Alfalfal II y Las Lajas. Departamento de Geología y Física, Universidad de Chile.: 85 pp. Santiago.
- Mpodozis, C. 2016. Mapa geológico regional del Área de Los Pelambres (escala 1:75.000). Informe Interno, Antofagasta Minerals, Santiago, Chile.
- Mudd, G. M. 2010. The environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints. *Resources Policy*. Vol. **35**, (2): 98-115.
- Muñoz, M. et al. 2006. Abanico East Formation: petrology and geochemistry of volcanic rocks behind the Cenozoic arc front in the Andean Cordillera, central Chile (33°50'S). *Revista Geológica de Chile*. Vol. **33**, (1): 109-140.
- Perelló, J.; Sillitoe, R. H.; Mpodozis, C.; Brockway, H. & Posso, H. 2012. Geologic setting and evolution of the porphyry copper-molybdenum and copper-gold deposits at Los Pelambres, central Chile. Society of Economic Geologists. (16): 79-104.
- Piquer, J. & Skarmeta, J. 2012. Structural controls on stratigraphy, magmatism and mineralization in the Rio Blanco-Los Bronces district, Central Chile. Congreso Geológico Chileno N°13.

- Ramírez Mellado, M. O. 2018. Estrategias de exploración minera en Chile y estimación de costos. Tesis para optar al grado de magíster en gestión y dirección de empresas. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Industrial (inédito): 61 pp. Santiago.
- Richards, J. P. 2011. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins. *Ore Geology Reviews*. Vol. **40**, (1): 1-26.
- Richards, J. P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology*. Vol. **98**, (8): 1515-1533.
- Rivano, S.; Godoy, E.; Vergara, M. & Villarroel, R. 1990. Redefinición de la Formación Farellones en la Cordillera de los Andes de Chile Central (32-34°S). *Andean Geology*. Vol. **17**, (2): 205-214.
- Rivano, S. & Sepulveda, P. 1991. Carta Geológica de Chile 69: Hoja Illapel. Región de Coquimbo.
- Rojas Verasay, F. E. 2022. Análisis estructural de vetillas mediante mediciones de televiwer para su uso en la geología de exploración en la Mina Los Bronces. Memoria entregada a la Universidad Mayor en cumplimiento de los requisitos para optar al Título de Geólogo. Universidad Mayor, Escuela de Geología (inédito): 89 pp. Santiago.
- Saavedra Schmidt, F. A. 2019. Modelamiento implícito de resistencia de roca en Minera Los Pelambres mediante estimación por inverso a la distancia y Kriging ordinario. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (inédito): 136 pp. Concepción.
- Seedorff, E.; Dilles, J. H.; Proffett, J. M.; Einaudi, M. T.; Zurcher, L.; Stavast, W. J.; Johnson, D. A. & Barton, M. D. 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Economic Geology*. Vol. **100**, 251-298.
- Seguel, J.; Arriagada, C.; Becerra, J.; Martínez, F.; Carrizo, D. & Floody, R. 2007. Estilos estructurales en el Yacimiento El Teniente. Informe interno.: 7 pp. Santiago.
- Serrano, L.; Vargas, R.; Stambuck, V.; Aguilar, C.; Galeb, M.; Holmgren, C.; Contreras, A.; Godoy, S.; Vela, I.; Skewes, M. & Stern, C. 1996. The Late Miocene Early Pliocene Río Blanco - Los Bronces Copper Deposit, Central Chilean Andes. In *Andean Copper Deposits: New Discoveries, Mineralization, Styles and Metallogeny*. Society of Economic Geologists. (5): 119-130.
- Sillitoe, R. H. 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*. Vol. **105**, (1): 3-41.
- Stambuk, V.; Blondel, J. & Serrano, L. 1982. Geología del Yacimiento Río Blanco. Actas II Congreso Geológico Chileno N° 2. Actas, Antofagasta.
- Thiele, R. 1980. Carta geológica de Chile. Hoja Santiago. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Thiele, R.; Beccar, I.; Levi, B.; Nyström, J. O. & Vergara, M. 1991. Tertiary Andean volcanism in a caldera-graben setting. *Geologische Rundschau*. (80): 179-186.

Vergara, M. & Drake, R. 1979. Edades K/Ar en secuencias volcánicas continentales post neocomianas de Chile Central; su depositación en cuencas intermontanas restringidas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. Vol. **34**, (1): 42-52.

Villela, D. & Cantallopts, J. 2016. Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera. Informe Comisión Chilena del Cobre (Chile), Dirección de Estudios y Políticas Públicas.: 55 pp. Santiago.

Zúñiga Navarrete, G. A. 2018. Caracterización de la distribución y ocurrencia de la molibdenita y su influencia en la recuperación de molibdeno en el yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (inédito): 178 pp. Santiago.