



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**ESTUDIO GEOLÓGICO DISTRITAL (EGD)
COCINERA- INAGOTABLE:
CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y EVOLUCIÓN
DEL SISTEMA MINERALIZADO**

COMUNA DE OVALLE, PROVINCIA DE LIMARÍ, REGIÓN DE COQUIMBO

Felipe Alonso Trujillo Iriarte
Copiapó, Chile 2026



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

ESTUDIO GEOLÓGICO DISTRITAL (EGD)
COCINERA- INAGOTABLE:
CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y EVOLUCIÓN
DEL SISTEMA MINERALIZADO

COMUNA DE OVALLE, PROVINCIA DE LIMARÍ, REGIÓN DE COQUIMBO

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

Profesor guía: Dra. Paulina Fuente Molina
Profesional guía: Sr. Manquel Álvarez Bratti

Felipe Alonso Trujillo Iriarte
Copiapó, Chile 2026

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primer lugar, a la Empresa Nacional de Minería, ENAMI, por confiar en mis capacidades y brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo de titulación, y por haberme permitido conocer de cerca la importancia de la pequeña y mediana minería de nuestro país. Un reconocimiento especial a todo el equipo de la Subgerencia de exploración y abastecimiento, cuyo apoyo fue incondicional desde el primer día. Agradezco particularmente a los colegas D.M., D.T., M.A. y H.G., quienes con su experiencia y disposición hicieron de esta etapa un aprendizaje constante.

Mención aparte merece Carolina Cisterna, quien confió en mí desde el primer momento y siempre se preocupó de que tuviera todo lo necesario para sacar adelante este trabajo. Asimismo, agradezco a mi profesora guía, Paulina Fuente Molina, por su orientación y acompañamiento a lo largo de todo el proceso.

Este trabajo, y todo lo que soy al día de hoy, se lo agradeceré eternamente a mi círculo familiar. En especial a mi madre, Isabel Iriarte; a mi hermano, Cristhian Trujillo; a mi pareja, Macarena Robles; y a mi padre, Daniel Trujillo, por apoyarme desde hace mucho tiempo y permitirme ser la persona que orgullosamente soy. Una dedicatoria especial a mi abuela, Inocencia Peralta, quien siempre me cuidó y estuvo preocupada de que llegara bien a casa y de que no me faltara nada. Les dedico este trabajo con todo mi cariño: a ti, lela, y a mi abuelo Clemente Iriarte (Q.E.P.D.).

Cómo olvidar la mención especial a mis amigos Arturo, Victoria, Javiera, Danitza, Hernán y Matías, a quienes considero parte de mi familia. Juntos vivimos muchas aventuras a lo largo de la vida universitaria y acumulamos tantas anécdotas que la mayoría no nos creería. Sepan que siempre contarán con mi apoyo, en todo momento y para todo lo que necesiten.

A todas esas personas que contribuyeron con su granito de arena para formar a este humilde servidor, Felipe Trujillo... GRACIAS.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	9
ABSTRACT.....	10
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	11
1.1 Problema de investigación	12
1.2 Hipótesis	13
1.3 Objetivos	13
1.4 Ubicación y accesos	14
1.5 Metodologías	17
1.6 Trabajos anteriores.....	17
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	20
2.1 Principios de la geofísica aplicada a la exploración mineral	20
2.2 Yacimiento tipo estratoligado de Cu	23
CAPÍTULO III: MARCO GEOLÓGICO	26
3.1 Geología regional.....	26
3.2 Geología local – distrital.....	30
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA.....	32
4.1 Caracterización mineralógica.....	32
4.2 Caracterización y distribución geoquímica.....	34
4.3 Método Magnetotelúrico (MT)	37
4.4 Integración multidisciplinaria de datos	45
CAPÍTULO V: RESULTADOS.....	47
5.1 Paragénesis mineral	47
5.2. Geoquímica	52
5.3 Magnetotelúrica	64

CAPÍTULO VI: DISCUSIONES	80
6.1 Secuencia paragenética	80
6.2 Comportamiento Geoquímico y Distribución de las leyes	88
6.3 Marco Estructural y Controles del Sistema: Interpretación Magnetotelúrica (MT) ...	91
6.4 Modelo Conceptual evolutivo del sistema Cocinera- Inagotable	99
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES.....	103
CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES	106
REFERENCIAS.....	109
ANEXOS	115
Anexo A. Descripciones microscópicas de muestras.	115
Anexo B. Coordenadas de estaciones y tiempo de medición MT	125
Anexo C. Curvas de resistividad eléctrica aparente y fase.....	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación y accesos al área de Estudio	15
Figura 1.2 Polígono del área de estudio y concesiones mineras del Distrito Cocinera–Inagotable	16
Figura 2.1 Rangos de resistividad eléctrica para distintos tipos de rocas, minerales y fluidos	21
Figura 2.2 Curvas de resistividad aparente y fase.	23
Figura 2.3 Distribución espacial de los principales depósitos estratoligados Cu-(Ag) dentro de la Franja Jurásica y Franja Cretácica de Chile	24
Figura 3.1 Geología regional	27
Figura 3.2 Esquema simplificado con las principales fallas estudiadas del yacimiento Panulcillo	29
Figura 3.3 Muestra de afloramiento	30
Figura 3.4 Plano geológico del Distrito Cocinera–Inagotable	31
Figura 4.1 Diagrama de flujo de la secuencia metodológica aplicada	32
Figura 4.2 Ubicación de muestras para análisis petro-calcográfico	33
Figura 4.3 Mapa de ubicación de los puntos de muestreo geoquímico en el Distrito Cocinera–Inagotable	35
Figura 4.4 Sistema de adquisición ADU-08e GX.	37
Figura 4.5 Mapa de ubicación de los perfiles y estaciones magnetotelúricas (MT)	39
Figura 4.6 Series de tiempo registradas en la estación magnetotelúrica L2_800.....	41
Figura 4.7 Curvas de resistividad aparente y fase de la estación L2_800	42
Figura 4.8 Visualización ejemplificativa de las curvas de resistividad eléctrica aparente y fase de la estación L2_800 y modelo 2D preliminar del perfil L2	43
Figura 5.1 Microfotografías de minerales de mena.....	48
Figura 5.2 Microfotografías de minerales supérgenos	49
Figura 5.3 Microfotografías de minerales de ganga y alteración	50
Figura 5.4 Microfotografías de relación textual.....	51
Figura 5.5 Distribución espacial de Cu total (CuT) sobre el plano geológico–estructural del distrito Cocinera–Inagotable.....	53

Figura 5.6 Diagramas de caja y bigotes (<i>boxplots</i>) de CuS, CuI, CuT, Ag y Au correspondientes a las 270 muestras geoquímicas del distrito Cocinera–Inagotable	55
Figura 5.7 Distribución de frecuencia acumulada de los elementos geoquímicos analizados en el distrito Cocinera–Inagotable.....	57
Figura 5.8 Distribución espacial de Cu total (CuT, %) en el distrito Cocinera–Inagotable)	59
Figura 5.9 Distribución espacial de plata (Ag, ppm) en el distrito Cocinera–Inagotable ...	61
Figura 5.10 Distribución espacial de la razón CuS/CuT en el distrito Cocinera–Inagotable.	63
Figura 5.11 Pseudosección del perfil L1 y L2 (SO–NE) del sector Cocinera.....	65
Figura 5.12 Pseudosección del perfil L3 y L4 (SO–NE) del sector Cocinera.....	65
Figura 5.13 Diagramas de rosa del strike geoelectrico correspondientes a los perfiles L1, L2, L3 y L4.	67
Figura 5.14 Modelo de resistividad eléctrica del sector Cocinera correspondiente al perfil L1.....	71
Figura 5.15 Modelo de resistividad eléctrica del sector Cocinera correspondiente al perfil L2.....	72
Figura 5.16 Modelo de resistividad eléctrica del sector Cocinera correspondiente al perfil L3.....	73
Figura 5.17 Modelo de resistividad eléctrica del sector Cocinera correspondiente al perfil L4.....	74
Figura 5.18 Distribución de resistividad eléctrica en planta superficial y en planta a 350 m, sector Cocinera	76
Figura 5.19 Distribución de resistividad eléctrica en planta a 250 m y en planta a 150 m, sector Cocinera	76
Figura 5.20 Distribución de resistividad eléctrica en planta superficial, sector Cocinera, con ubicación de los nueve sondajes diamantinos	77
Figura 5.21 Distribución de resistividad eléctrica en planta a 350 m s.n.m., sector Cocinera, con ubicación de sondajes diamantinos.....	78
Figura 5.22 Distribución de resistividad eléctrica en planta a 250 m s.n.m., sector Cocinera, con ubicación de sondajes diamantinos.....	78
Figura 6.1 Microfotografías Fase I.....	82
Figura 6.2 Microfotografías Fase II.....	83

Figura 6.3 Microfotografías Fase III	84
Figura 6.4 Microfotografías Fase IV	85
Figura 6.5 Mapa de resistividad eléctrica a 350 m s.n.m. del distrito Cocinera–Inagotable.	96
Figura 6.6 Correlación litológica y resistividad eléctrica MT estimada para los sondeos EN-594-23, EN-595-23 y EN-598-23.....	97
Figura 6.7 Modelo conceptual evolutivo del sistema mineralizado Cocinera–Inagotable.	102
Figura 8.1 Propuesta de sondeo EN-700-26 sobre el mapa de resistividad eléctrica a 350 m s.n.m. del sector central del distrito Cocinera–Inagotable.....	106
Figura 8.2 Malla de muestreo geoquímico de superficie propuesta para el distrito Cocinera–Inagotable	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Esquema de adquisición de las estaciones de AMT	38
Tabla 4.2 Esquema de adquisición de las estaciones de banda ancha MT	38
Tabla 4.3 Coordenadas de perfiles de los sectores del Distrito Cocinera.....	40
Tabla 4.4 Resumen de sondeos diamantinos ejecutados en el sector Cocinera.....	45
Tabla 5.1 Descripción de las muestras para análisis petro-calcográfico.	47
Tabla 5.2 Síntesis estadística de la distribución espacial de Cu total (CuT) por dominio en el distrito Cocinera–Inagotable.....	58
Tabla 5.3 Síntesis estadística de la distribución espacial de plata (Ag) por dominio en el distrito Cocinera–Inagotable	60
Tabla 5.4 Síntesis estadística del índice de oxidación supérgena (razón CuS/CuT) por dominio en el distrito Cocinera–Inagotable	62
Tabla 5.5 Valores de error cuadrático medio (RMS) asociados a los modelos de resistividad eléctrica magnetotelúrica bidimensionales (2D) de los perfiles L1, L2, L3 y L4.	68
Tabla 5.6 Interpretación litológica de los dominios de resistividad eléctrica.....	69
Tabla 6.1 Secuencia paragenética relativa del sistema mineralizado del distrito Cocinera–Inagotable.	81

RESUMEN

El distrito minero Cocinera–Inagotable, ubicado en la comuna de Ovalle, región de Coquimbo, corresponde a un sistema mineralizado de Cu hospedado en secuencias volcánicas andesíticas del Cretácico Inferior (Estratos del Reloj, Grupo Ovalle), dentro de la Faja Cretácica de Cu del norte de Chile. A pesar de contar con antecedentes previos de exploración (campañas de muestreo geoquímico de superficie y sondajes diamantinos), el distrito carece de una integración sistemática entre variables mineralógicas, geoquímicas y geofísicas que permita comprender la evolución del sistema y los controles de la mineralización a escala distrital.

Para abordar esta brecha, se realizó un estudio integrado que combinó análisis petrográfico-calcoográfico, análisis estadístico, espacial de datos geoquímicos, interpretación geológica de cuatro perfiles magnetotelúricos y correlación con tres sondajes diamantinos.

La paragénesis definida comprende cuatro fases: Fase I (pirita–calcopirita–esfalerita), asociada a un primer pulso hidrotermal; Fase II (calcopirita–bornita), evento cuprífero principal; Fase III (atacamita–crisocola–hidróxidos de hierro), oxidación supérgena y Fase IV (arcillas–carbonatos–anhidrita), cierre evolutivo del sistema seguido por fallamiento post-mineral. La distribución geoquímica valida espacialmente esta evolución: los máximos de CuT se concentran en nodos de intersección estructural NS-NW y la asociación espacial confirma el carácter Cu–(Ag) del sistema.

La inversión 2D de los perfiles MT reveló un dominio conductor superficial ($<100 \Omega \cdot m$), sobreyaciendo a un basamento resistivo ($>2.000\text{--}3.000 \Omega \cdot m$). La correlación directa con sondajes diamantinos permitió calibrar esta interpretación, confirmando que los dominios de alta conductividad ($<50 \Omega \cdot m$) corresponden a alteración hidrotermal intensa, consistente con alteración argílica y porosidad secundaria (sondaje EN-598-23), los de resistividad intermedia ($200\text{--}500 \Omega \cdot m$) albergan mineralización hipógena significativa con leyes de hasta 1,52% CuT (sondaje EN-594-23), y los sulfuros diseminados de baja ley no generan anomalías conductivas detectables (sondaje EN-595-23).

La integración de estas evidencias sustenta un modelo genético preliminar coherente con los depósitos estratoligados de Cu–(Ag) de la Faja Cretácica, aunque con mayor protagonismo del componente vetiforme respecto a análogos regionales como Panulcillo.

PARAGÉNESIS – MAGNETOTELÚRICA– DEPÓSITO ESTRATOLIGADO – VETIFORME

ABSTRACT

The Cocinera–Inagotable mining district, located in the commune of Ovalle, Coquimbo Region, corresponds to a Cu-mineralized system hosted in Lower Cretaceous andesitic volcanic sequences (Estratos del Reloj, Ovalle Group), within the Cretaceous Cu Belt of northern Chile. Despite previous exploration background (surface geochemical sampling campaigns and diamond drilling), the district lacks a systematic integration of mineralogical, geochemical and geophysical variables that would allow understanding the evolution of the system and the mineralization controls at the district scale.

To address this gap, an integrated study was carried out combining petrographic–ore microscopy analysis, statistical and spatial analysis of geochemical data, geological interpretation of four magnetotelluric profiles, and correlation with three diamond drill holes. The defined paragenesis comprises four phases: Phase I (pyrite–chalcopyrite–sphalerite), associated with an initial hydrothermal pulse; Phase II (chalcopyrite–bornite), the main Cu-mineralizing event; Phase III (atacamite–chrysocolla–iron hydroxides), supergene oxidation; and Phase IV (clays–carbonates–anhydrite), the final evolutionary stage of the system followed by post-mineral faulting. The geochemical distribution spatially validates this evolution: the highest CuT values are concentrated at NS–NW structural intersection nodes, and the spatial association confirms the Cu–(Ag) character of the system.

The 2D inversion of the MT profiles revealed a shallow conductive domain ($<100 \Omega \cdot \text{m}$) overlying a resistive basement ($>2,000\text{--}3,000 \Omega \cdot \text{m}$). Direct correlation with diamond drill holes allowed calibrating this interpretation, confirming that high-conductivity domains ($<50 \Omega \cdot \text{m}$) correspond to intense hydrothermal alteration, consistent with argillic alteration and secondary porosity (drill hole EN-598-23); intermediate-resistivity domains host significant hypogene mineralization with grades up to 1.52% CuT (drill hole EN-594-23); and low-grade disseminated sulfides do not generate detectable conductive anomalies (drill hole EN-595-23).

The integration of these lines of evidence supports a preliminary genetic model consistent with the Cu–(Ag) stratabound deposits of the Cretaceous Belt, though with a more prominent vein-type component compared to regional analogues such as Panulcillo.

KEYWORDS: PARAGENESIS – MAGNETOTELLURICS – STRATABOUND
DEPOSIT – VEIN-TYPE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El distrito minero Cocinera–Inagotable se localiza en la comuna de Ovalle, región de Coquimbo, en el Norte Chico de Chile, en un área históricamente vinculada a la actividad minera de hierro y cobre. Geológicamente, se emplaza en una secuencia volcano-sedimentaria mesozoica intruida por cuerpos ígneos de composición intermedia a básica, configuración que ha favorecido el desarrollo de sistemas mineralizados de cobre característicos del norte chileno.

El distrito presenta labores mineras antiguas y abundantes evidencias superficiales de mineralización, además de antecedentes técnicos previos que documentan la presencia de estructuras mayores, mantos y eventos mineralizantes múltiples (Chávez, 1992; Parra, 1994; SAMSA, 2014). A escala regional, se ubica en la misma franja metalogenética del depósito de Panulcillo, donde se han documentado asociaciones mineralógicas y controles estructurales comparables (Hopper & Correa, 2000; Sugaki et al., 2000). No obstante, los antecedentes disponibles se concentran en estudios técnicos de alcance local, sin que exista una síntesis geológica integral que permita interpretar la evolución del sistema mineralizado a escala distrital.

Desde el punto de vista metalogenético, el distrito se ubica en la Faja Cretácica de Cu del norte de Chile, dominio regional caracterizado por la ocurrencia de depósitos estratoligados y vetiformes de Cu–(Ag) hospedados en secuencias volcánicas del Cretácico Inferior (Espinoza et al., 1996; Makshev & Zentilli, 2002). En este marco, Cocinera–Inagotable presenta condiciones favorables para el desarrollo de mineralizaciones de óxidos y sulfuros de cobre, con cantidades subordinadas de hierro y plata, similares a las reconocidas en otros distritos.

Sobre estas bases, el presente trabajo realiza un Estudio Geológico Distrital (EGD) del distrito Cocinera–Inagotable, integrando análisis petrográfico-mineralógico, caracterización geoquímica e interpretación de perfiles magnetotéluricos, con el fin de construir un modelo genético que articule el marco geológico, estructural y mineralógico del sistema. Esta aproximación busca generar una base sólida para la interpretación del sistema mineralizado, orientar futuras campañas de exploración y aportar información útil para la planificación minera del área.

1.1 Problema de investigación

El distrito Cocinera–Inagotable, emplazado en secuencias volcánicas andesíticas del Cretácico Inferior del Grupo Ovalle, cuenta con antecedentes geológicos derivados de estudios técnicos y labores de reconocimiento orientados principalmente a la pequeña y mediana minería. La información disponible se concentra en informes técnicos internos de ENAMI con fines de evaluación de recursos a escala de yacimiento (Chávez, 1992; Parra, 1994; SAMSA, 2014; ENAMI, 2025), de carácter mayoritariamente descriptivo, sin una integración sistemática a escala distrital que articule las variables mineralógicas, geoquímicas y geofísicas necesarias para reconstruir la evolución del sistema mineralizado. Esta situación contrasta con la del depósito de Panulcillo, ubicado a solo ~10 km al norte del distrito y emplazado en la misma franja metalogénica, donde la mineralización ha sido caracterizada tanto mineralógicamente como skarn de granate cretácico con paragénesis calcopirita–bornita–pirita asociada a un cuerpo diorítico; Sugaki et al., 2000) como estructuralmente, mediante la identificación de un control por fallas N-NE de cinemática dextral en régimen transtensional activo hasta ~125 Ma, posteriormente reactivado en sentido sinistral con el desarrollo del Sistema de Fallas de Atacama (Castellón, 2017). La existencia de este referente cercano y bien documentado, sumada a la ausencia de una síntesis equivalente para Cocinera–Inagotable, configura una brecha de conocimiento que el presente estudio busca abordar.

En particular, existe una limitada caracterización mineralógica microscópica que dificulta establecer relaciones temporales entre las distintas etapas de mineralización, alteración y enriquecimiento supergénico. Esta carencia impide la definición de una secuencia paragenética confiable y, en consecuencia, la construcción de un modelo genético robusto que explique el origen, evolución y zonación del sistema mineralizado del distrito.

Asimismo, la ausencia de una integración entre la información geológica de superficie, los estudios mineralógicos y geoquímicos, y los antecedentes geofísicos disponibles limita la capacidad de interpretar la continuidad en profundidad de las estructuras y cuerpos mineralizados, afectando la definición de blancos de exploración y la proyección del potencial del distrito.

En este contexto, el problema de investigación radica en la ausencia de un modelo integrado sobre la evolución geológica y metalogénica del distrito, así como de los controles que

determinan la distribución espacial y la continuidad en profundidad del sistema mineralizado. Abordar esta problemática requiere el desarrollo de un estudio geológico, mineralógico, geoquímico y geofísico que permita establecer relaciones entre los distintos procesos involucrados y sustentar un modelo genético consistente para el distrito.

A partir de lo anterior, se plantean las siguientes interrogantes específicas que orientan el problema de investigación:

- ¿Cómo se ha desarrollado la evolución geológica y metalogénica del distrito Cocinera–Inagotable y qué implicancias tiene para la continuidad y zonación del sistema mineralizado a escala distrital?
- ¿Existe una continuidad en profundidad del sistema mineralizado, no identificada previamente, que permita proyectar nuevos blancos de exploración a escala distrital?

1.2 Hipótesis

Considerando los antecedentes regionales (Espinoza et al., 1996; Maksaev & Zentilli, 2002; Kojima et al., 2003), distritales (Sugaki et al., 2000; Castellón, 2017) y los informes técnicos previos del distrito (Piracés, 1986; Chávez, 1992; SAMSA, 2014), se plantea la siguiente hipótesis:

El sistema mineralizado del distrito Cocinera–Inagotable corresponde a un depósito con componente estratoligado y vetiforme de Cu–(Ag), genéticamente vinculado a la Faja Cretácica del norte de Chile, desarrollado a partir de múltiples eventos hidrotermales sucesivos con una evolución desde fases tempranas dominadas por sulfuros de Fe-Zn hacia fases cupríferas tardías. Esta evolución habría configurado una zonación mineralógica vertical asociada a procesos hipógenos y supérgenos, donde la mineralización estaría controlada por las estructuras principales del distrito, cuyas intersecciones constituirían blancos exploratorios favorables.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Proponer un modelo genético preliminar del distrito Cocinera–Inagotable que permita explicar la evolución del sistema mineralizado a escala distrital.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar las asociaciones mineralógicas y su relación temporal dentro del sistema mineralizado.
2. Evaluar la continuidad del sistema mineralizado en profundidad, aportando la dimensión vertical necesaria para el modelo genético.
3. Determinar las concentraciones, distribución y variabilidad geoquímica de los elementos en el distrito Cocinera–Inagotable.
4. Integrar la información obtenida para sustentar la propuesta de un modelo genético preliminar del sistema mineralizado.

1.4 Ubicación y accesos

El distrito minero Cocinera–Inagotable se ubica aproximadamente a 14 km al norte de la ciudad de Ovalle, en la Provincia del Limarí, región de Coquimbo (Figura 1.1). El área de estudio se desarrolla en un sector de topografía suave y accesible, con una altitud promedio cercana a los 475 m s.n.m.

El acceso principal al distrito se realiza desde la ciudad de La Serena a través de la Ruta 43, que conecta con la ciudad de Ovalle. A la altura del sector de Estación Recoleta, aproximadamente 1,5 km al norte de dicha localidad, se toma un desvío hacia el oeste por un camino de tierra en regular estado, el cual se recorre por cerca de 3 km en dirección noroeste hasta alcanzar el área de las labores mineras.

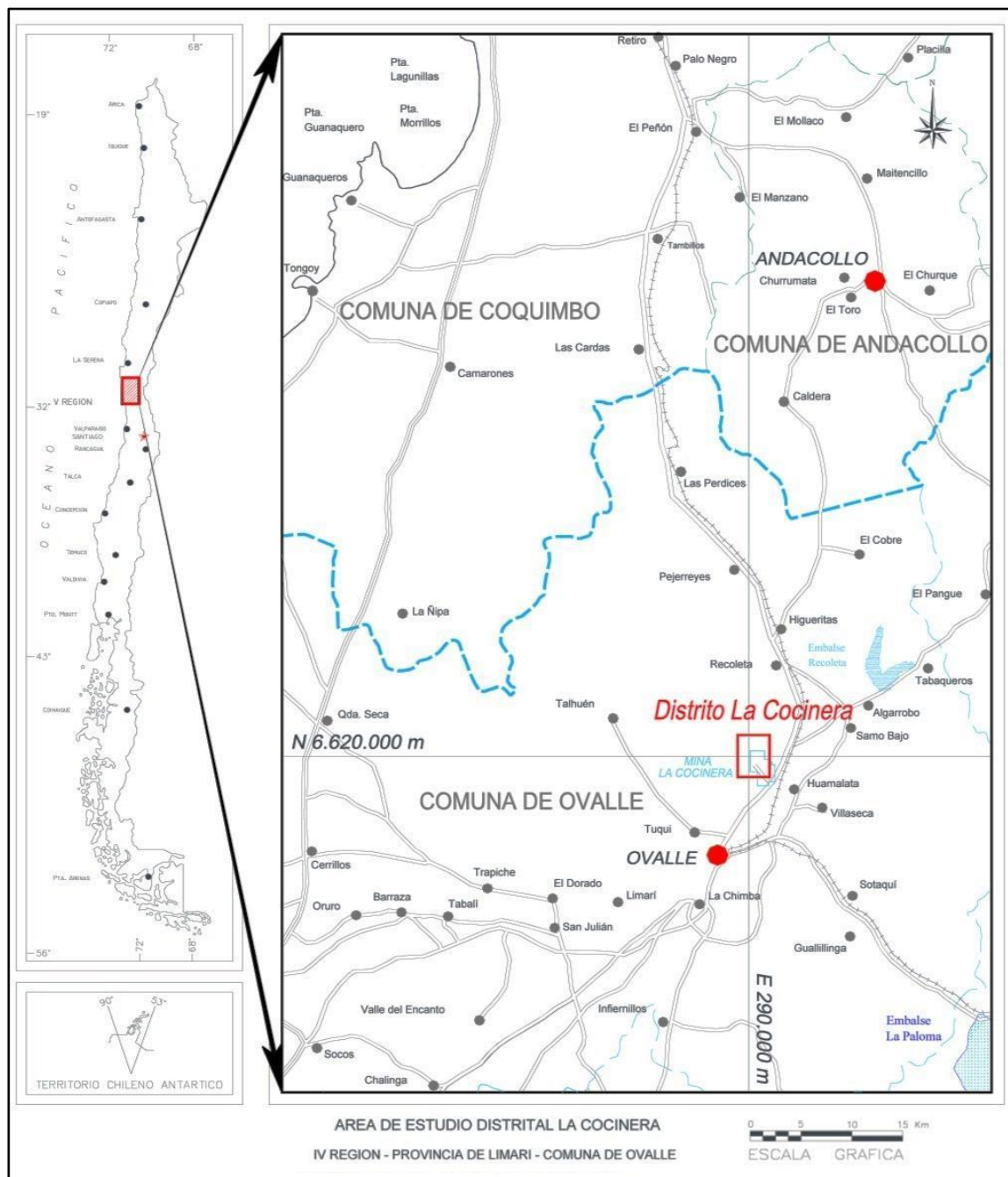


Figura 1.1 Ubicación y accesos al área de Estudio. (SAMSA, 2014).

El área de estudio perteneciente al distrito Cocinera es de 10,5 km² y corresponde a un cuadrángulo de 3 km por 3,5 km, cuyas coordenadas centrales corresponden a 6619707 N/ 290648 E (UTM, WGS84, Huso 19S).

largo del distrito Cocinera–Inagotable, conformando su división minera interna y representando parte del catastro histórico de concesiones existentes en la zona.

1.5 Metodologías

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados, la presente investigación se fundamenta en un enfoque multidisciplinario estructurado en tres etapas principales.

(i) La primera etapa consistió en la recopilación de antecedentes y el trabajo de campo, enfocado en el mapeo geológico-estructural y la recolección de muestras representativas del distrito.

(ii) La segunda etapa contempló el trabajo de gabinete y laboratorio, abarcando la caracterización petrográfica y calcográfica para definir la paragénesis mineral, el análisis espacial estadístico de datos geoquímicos, y la interpretación de cuatro perfiles magnetotelúricos (MT).

(iii) Finalmente, la tercera etapa radicó en la integración de todas las variables (geológicas, geoquímicas y geofísicas) para generar un modelo conceptual que explique el control y la distribución espacial de la mineralización de tipo estratoligado y vetiforme. El detalle de los procedimientos analíticos, software empleados y parámetros técnicos aplicados en cada etapa se expone en el Capítulo IV del presente documento.

1.6 Trabajos anteriores

El distrito Cocinera–Inagotable ha sido objeto de diversos estudios técnicos desde mediados de la década de 1980, enfocados principalmente en la estimación de recursos y la caracterización geológica local. A continuación, se presenta una síntesis cronológica de los principales antecedentes disponibles para el área de estudio.

- *Perspectivas y reservas en el distrito minero La Cocinera – Ovalle. Piracés, R. 1986.* Caracterizó la geología de la zona, incluyendo estratigrafía, fallas, estructuras y alteraciones hidrotermales. Establece una temporalidad entre los eventos geológicos que habrían formado la mineralización: 1) Fallamiento principal; 2) Fallamiento vertical de rumbo variable (N60°-70°E), contemporáneo o cercano al evento anterior; 3) Falla del Manto Solero y sistema de

fallas pseudoconcordantes que desplazan los sistemas anteriores; 4) Alteración hidrotermal con depositación de sulfuros primarios en las estructuras; y 5) Fuerte tectónica postmineral que genera la falla límite sur de la mineralización. Define los yacimientos del distrito con un origen tectónico e hidrotermal, constituidos por vetas de relleno y zonas de impregnación.

- *Estimación de recursos remanentes y recursos inferidos en Mina Inagotable y Veta Manto Solero. Chávez, L. 1992.*

Identificó tres sistemas de fracturamiento: Sistema Cocinera (Cizalle, N25°-44°W/50-80°W); Sistema Manto Solero (Cizalle, N54°W/40°W); y Sistema Carmen Segunda (Tensionales, N84°-94°E/64-80°S). En el rajo Inagotable identifica una estructura que denomina como “Inagotable”, perteneciente al sistema Carmen Segunda. Sistema Cocinera (paralelo a Falla Cocinera principal, posicionada en el rajo en cuestión), habría generado un desplazamiento vertical del Manto Solero. Estima 50.000 toneladas de reservas remanentes a la vista con ley de 1,5%CuS; 250.000 toneladas de reservas inferidas con ley 1,5%CuS y otras 250.000 toneladas de ley 1,5%CuI.

- *Informe de Resultados de sondaje realizado en Mina Inagotable Comuna de Ovalle. Parra, R. 1994.*

Presentó los resultados de un sondaje exploratorio realizado por ENAMI en mina Inagotable, según recomendaciones de estudios geológicos anteriores realizados por Chávez (1992) y Piracés (1986). El sondaje fue denominado 94003, posicionó al oeste del rajo Inagotable, y tuvo un azimuth e inclinación de 45°/-89°. Dicho sondaje atravesó una secuencia volcánica compuesta de principio a fin por traquitas, traquiandesitas, arenisca volcánica, brecha volcánica, andesitas porfídicas y dacitas porfídicas. La mineralización fue escasa, y estuvo asociada a hematita metálica esporádica y ocasionalmente pirita e indicios de calcopirita (ley media 0,41%CuT entre los 120 y 123 m del sondaje). Estos resultados reducen drásticamente la expectativa de recursos del Manto Solero indicada por Chávez. Concluyen que los recursos de Mina Inagotable se limitan a la zona de oxidación en sectores adyacentes al rajo y poca profundidad.

- *Estudio Geológico Distrital La Cocinera, Comuna de Ovalle – Provincia de Limarí, región de Coquimbo”. SAMSA. 2014.*

Programa financiado por ENAMI, que encomienda a la empresa contratista la tarea de realizar mapeo geológico y estructural tanto de superficie como de labores subterráneas, topografía, y muestreo geoquímico, a fin de realizar un cálculo de recursos en los distintos yacimientos del Distrito Minero Cocinera. Definen un yacimiento de tipo estratoligado y vetiforme ligado a fallas, que afectan secuencias volcánicas de composición andesítica del Cretácico Inferior, buzantes hacia el este. Esta formación correspondería a los denominados Estratos del Reloj, pertenecientes al Grupo Ovalle. Las vetas en profundidad poseen disseminación de bornita, calcopirita +/- calcosina en la roca caja. Estiman un total de 370.000 toneladas de recursos indicados, con ley de CuT de 0,8%.

- *Programa de Reconocimiento de Recursos – Panulsur 18 1-15, Comuna de Ovalle – Provincia de Limarí, región de Coquimbo. ENAMI. 2025.*

Programa ejecutado por ENAMI durante el año 2024 en el sector Panulsur 18 1-15, se realizaron nueve sondajes diamantinos, complementados con información de sondajes previos (campaña 2023), lo que permitió caracterizar geológica y estructuralmente los cuerpos mineralizados. La mineralización reconocida corresponde a óxidos y sulfuros de cobre (calcopirita y pirita), alojados en aglomerados volcánicos y brechas hidrotermales, con desarrollo de alteración potásica, fílica y argílica. La estimación de recursos mediante modelamiento de bloques e interpolación ID² arrojó un total de 198.585, 4 toneladas a 1,33 % CuS y 0,17 % CuIns para la estructura Cocinera, y 53.100 toneladas a 0,63 % CuS y 0,10 % CuIns para la estructura Carrasco.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Principios de la geofísica aplicada a la exploración mineral

De acuerdo con Dentith y Mudge (2014), los métodos geofísicos aplicados a la exploración mineral se basan en la detección de contrastes físicos que permiten investigar las propiedades del subsuelo de manera indirecta, continua y no invasiva. A través de la medición de respuestas físicas como variaciones en campos eléctricos, magnéticos o gravimétricos, o de la propagación de ondas sísmicas, es posible inferir la geometría, continuidad y características de cuerpos geológicos situados en profundidad.

En el contexto de la exploración minera, estos métodos permiten delimitar dominios litológicos, estructuras geológicas, zonas de alteración hidrotermal y cuerpos mineralizados, complementando la información obtenida a partir de la cartografía geológica, el muestreo superficial y los registros de sondajes. Su principal ventaja radica en la capacidad de cubrir grandes áreas a diferentes escalas y profundidades de investigación, optimizando la definición de blancos exploratorios y reduciendo la incertidumbre asociada a la interpretación geológica (Telford et al., 1990).

La integración de datos geofísicos con información geológica, geoquímica y estructural resulta fundamental para la construcción de modelos geológicos coherentes, especialmente en etapas tempranas de exploración, donde la información de superficie y los registros de sondajes son limitados. En este sentido, la geofísica aplicada se ha consolidado como una disciplina esencial en la exploración moderna de yacimientos minerales (Dentith & Mudge, 2014).

2.1.1 Fundamentos de resistividad eléctrica y método magnetotelúrico (MT)

El método magnetotelúrico (MT) es una técnica geofísica de fuente natural basada en el fenómeno de inducción electromagnética, que permite estimar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo en función de la profundidad (Cagniard, 1953; Chave & Jones, 2012).

La resistividad eléctrica es un parámetro físico altamente sensible a las propiedades del medio geológico, tales como la composición mineralógica, la porosidad, el grado de saturación, la naturaleza de los fluidos y las condiciones de presión y temperatura (Piña-Varas, 2014; Figura 2.1). Debido a esta sensibilidad, el método constituye una herramienta particularmente

adecuada para la caracterización de estructuras profundas y zonas de alteración asociadas a sistemas mineralizados.

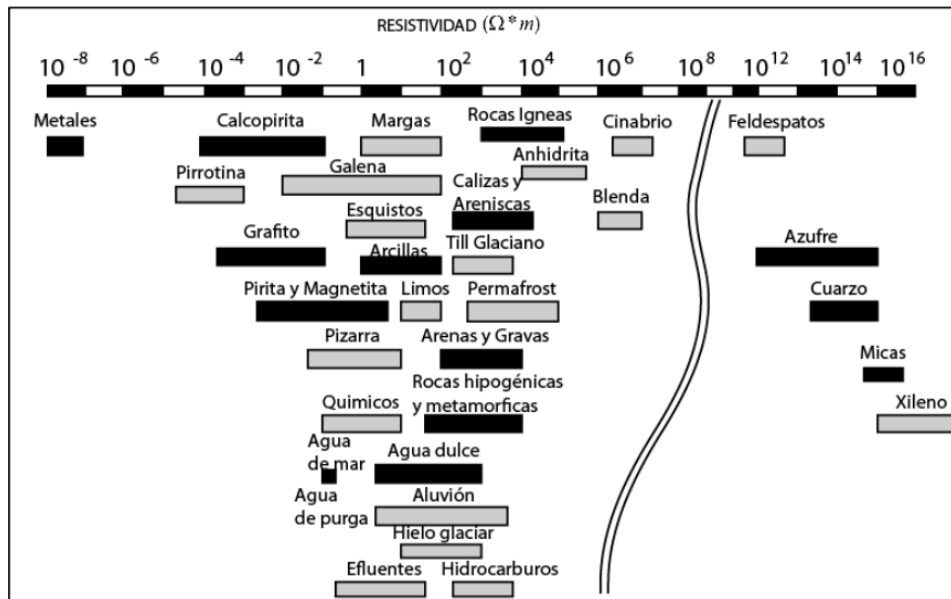


Figura 2.1 Rangos de resistividad eléctrica para distintos tipos de rocas, minerales y fluidos (Fuente: Modificado de Orellana, 1982; en Aguilef, 2012).

El método utiliza como fuente de energía las fluctuaciones naturales del campo electromagnético terrestre, generadas principalmente en la ionosfera por la actividad solar. Cuando este campo primario interactúa con la superficie terrestre, induce corrientes eléctricas en el subsuelo, generando un campo electromagnético secundario (Vozoff, 1972). La medición simultánea de las variaciones temporales de los campos eléctrico y magnético permite estimar la estructura geoelectrica del subsuelo.

En estudios MT se registran las dos componentes horizontales del campo eléctrico (E_x y E_y) y las tres componentes del campo magnético (H_x , H_y y H_z). A partir de estas mediciones se define el tensor de impedancias magnetotelúrico, el cual relaciona ambos campos y constituye la base para la obtención de modelos de resistividad en profundidad (Simpson & Bahr, 2005; Chave & Jones, 2012). Una de las principales fortalezas del método es su capacidad para investigar el subsuelo a profundidades de varios kilómetros, superando el alcance de otros métodos electromagnéticos. Por ello, ha sido ampliamente aplicado en la exploración de sistemas geotérmicos, acuíferos profundos y yacimientos minerales,

aportando información relevante sobre la geometría y propiedades físicas de las estructuras estudiadas (Piña-Varas, 2014).

2.1.2 Tensor de impedancias

En el método MT, la relación entre los campos eléctrico y magnético medidos en superficie se expresa mediante el tensor de impedancias magnetotelúrico, que describe la respuesta electromagnética del subsuelo y constituye la base para la estimación de la distribución de resistividades en profundidad (Vozoff, 1972; Simpson & Bahr, 2005; Chave & Jones, 2012). A partir del tensor de impedancias se derivan dos parámetros fundamentales: la resistividad aparente y la fase, los cuales entregan información complementaria sobre las propiedades eléctricas del subsuelo. La resistividad aparente refleja los contrastes eléctricos entre los materiales, mientras que la fase aporta información sobre la variación vertical de la resistividad y es menos sensible a efectos de distorsión galvánica producidos por heterogeneidades superficiales (Vozoff, 1972; Simpson & Bahr, 2005).

El análisis conjunto de ambos parámetros, en función del periodo o frecuencia de la señal, permite investigar diferentes profundidades y constituye la base para la interpretación preliminar de los datos magnetotelúricos y para los procesos posteriores de inversión geoelectrica (Chave & Jones, 2012).

La interpretación se realiza habitualmente mediante el análisis de curvas de resistividad aparente y fase en función del periodo, cuya forma y comportamiento dependen de la geometría y disposición de las estructuras geoelectricas en el subsuelo (Figura 2.2). La configuración espacial de dichas estructuras define la dimensionalidad geoelectrica, la cual puede corresponder a medios unidimensionales (1-D), bidimensionales (2-D) o tridimensionales (3-D).

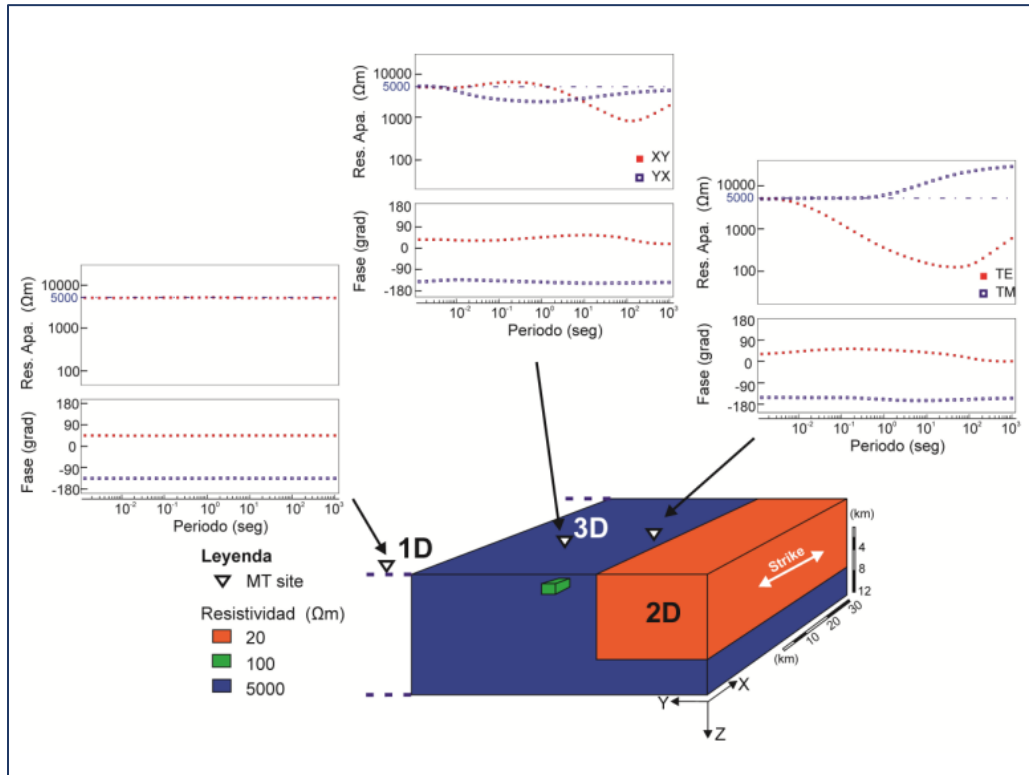


Figura 2.2 Curvas de resistividad aparente y fase para tres posibles casos. (Fuente: Piña-Varas, 2014)

2.2 Yacimiento tipo estratoligado de Cu

Los yacimientos estratoligados de cobre corresponden a concentraciones minerales cuya distribución y geometría se encuentran fuertemente controladas por la estratigrafía, desarrollándose de manera concordante con las unidades litológicas hospedantes. En Chile, este tipo de yacimientos se distribuye principalmente en dos franjas metalogénicas:

- Faja Jurásica de la Cordillera de la Costa de la región de Antofagasta
- Faja del Cretácico Inferior, que se extiende entre la III región y la región Metropolitana.



Figura 2.3 Distribución espacial de los principales depósitos estratoligados Cu-(Ag) dentro de la Franja Jurásica (color morado) y Franja Cretácica (color verde) de Chile. (Fuente: Modificado de Maureira *et al.*, 2022; Makshev & Zentilli, 2002; Kojima *et al.*, 2003; Brown *et al.*, 1993).

Una característica común de los depósitos estratoligados de cobre del norte de Chile es la presencia de una zonación vertical, compuesta por una zona superior de óxidos de cobre supergénicos y una zona inferior de sulfuros hipógenos, con un contacto generalmente gradual entre ambas. En algunos yacimientos se reconoce una zona mixta, donde coexisten minerales oxidados y sulfurados, mientras que en otros domina exclusivamente uno de estos estilos (Espinoza *et al.*, 1996; Sillitoe, 1990).

Estos depósitos representan la tercera fuente de cobre en Chile, después de los pórfidos cupríferos y los depósitos IOCG, y pueden contener concentraciones significativas de plata.

Si bien los depósitos estratoligados se definen por su concordancia con la estratigrafía hospedante, diversos autores han reconocido que en numerosos distritos de la Faja Cretácica coexiste un componente vetiforme significativo, donde la mineralización se emplaza en estructuras de tipo veta-falla que cortan las secuencias volcánicas (Espinoza *et al.*, 1996; Kojima *et al.*, 2003).

Entre los depósitos más estudiados de la Faja Cretácica se encuentran El Soldado, el de mayor volumen (>130 Mt con 1% Cu), hospedado en rocas volcánicas de la Formación Lo Prado, donde la mineralización se asocia a cuerpos irregulares controlados por fallas NS y NE, con una paragénesis de calcopirita–bornita–calcosina y alteración potásica en los núcleos de alta ley (Boric, Holmgren *et al.* 2002).

Un modelo genético común propuesto para estos depósitos vincula la mineralización con la evolución tardimagmática de cuerpos intrusivos del Cretácico Inferior, cuyos fluidos ascendieron a través de estructuras subverticales hasta niveles permeables donde precipitaron la mineralización (Maksaev & Zentilli, 2002; Hopper & Correa, 2000), aunque modelos alternativos proponen un origen asociado a fluidos cuencales movilizados durante el metamorfismo de bajo grado (Boric, Holmgren *et al.*, 2002)

Dentro de la Faja Cretácica, diversos distritos han sido estudiados con diferentes grados de detalle. Los depósitos de Panulcillo y Teresa de Colmo, ubicados a escala regional en la misma franja y hospedados en secuencias equivalentes del Grupo Ovalle (Hopper & Correa, 2000), constituyen referentes cercanos en cuanto a litología hospedante y contexto estructural, aunque su clasificación tipológica difiere: Panulcillo ha sido descrito como un yacimiento tipo skarn de Cu (Sugaki *et al.*, 2000), posteriormente reinterpretado como IOCG con componente de skarn asociado (Castellón, 2017). Asimismo, Espinoza *et al.* (1996) y Kojima *et al.* (2003) han documentado características paragenéticas recurrentes en estos depósitos, incluyendo la sucesión pirita–calcopirita–bornita y la zonación vertical óxidos-sulfuros, rasgos que sugieren procesos mineralizantes comparables a lo largo de la faja.

CAPÍTULO III: MARCO GEOLÓGICO

3.1 Geología regional

3.1.1 Evolución geológica desde el Cretácico

Durante el Jurásico Tardío y Cretácico Temprano, el margen andino estuvo dominado por un régimen extensional intra-arco, controlado por el retroceso de la trinchera (*trench roll-back*) y el movimiento absoluto hacia el este de la placa Sudamericana en relación al marco de *hotspots* del Pacífico (Ramos, 1999; Somoza & Zaffarana, 2008; Ramos, 2009). Este escenario favoreció la formación de cuencas intra-arco con sedimentación marina y continental controlada por fallas normales, acompañadas de un volcanismo de afinidad calcoalcalina poco diferenciado (Mpodozis & Ramos, 1990; Vergara *et al.*, 1995). La mayoría de las interpretaciones tectónicas previas asumieron que la etapa de la cuenca intra-arco estaba relacionada ya sea con una baja tasa de expansión de 5 cm/año en la dorsal del Pacífico en ese momento (Åberg *et al.*, 1984; Morata & Aguirre, 2003), o con una baja velocidad relativa de convergencia en la zona de subducción (Ramos, 1985). Sin embargo, estudios posteriores sugirieron que el factor que controlaba el régimen extensional estaba principalmente vinculado al importante movimiento absoluto hacia el este de Sudamérica respecto al marco de referencia de los puntos calientes del Pacífico (Somoza & Zaffarana, 2008), lo que produjo un retroceso de la trinchera ($V_t < 0$) y una extensión generalizada (Ramos, 1999; Mpodozis & Ramos, 2008).

Hacia el Aptiano–Albiano, estas condiciones extensionales habrían transitado hacia regímenes transtensionales y transcompresionales documentados en la Faja Cretácica a la latitud de Copiapó (Arévalo *et al.*, 2006; del Real *et al.*, 2023), antes de evolucionar hacia un escenario predominantemente compresivo durante el Cretácico Tardío, marcando el inicio de la construcción andina y el desarrollo de pliegues, cabalgaduras e intrusivos calcoalcalinos a lo largo del margen continental (Ramos & Alemán, 2000; Ramos, 2009).

3.1.2 Contexto estratigráfico y estructural regional

La geología regional en la Cordillera de la Costa, en el área del distrito Cocinera–Inagotable, consiste en una potente secuencia volcano-sedimentaria del Cretácico Inferior de edad

neocomiana (135–125 Ma), con las unidades más jóvenes hacia el este y buzando en esa misma dirección.

En el sector occidental, la base de la secuencia está representada por la Fm. Tamaya, compuesta por rocas volcánicas andesíticas de origen marino con intercalaciones menores de riolitas. Esta unidad subyace a la Unidad Reloj, una secuencia transicional marina a continental constituida principalmente por andesitas porfíricas. Sobre la Unidad Reloj se dispone la Fm. Arqueros, representada por secuencias volcano-sedimentarias de origen continental (SAMSA, 2014). Localmente, hacia el este de la columna, se reconoce también la Fm. Quebrada Marquesa, que completa la sucesión estratigráfica del Grupo Ovalle.

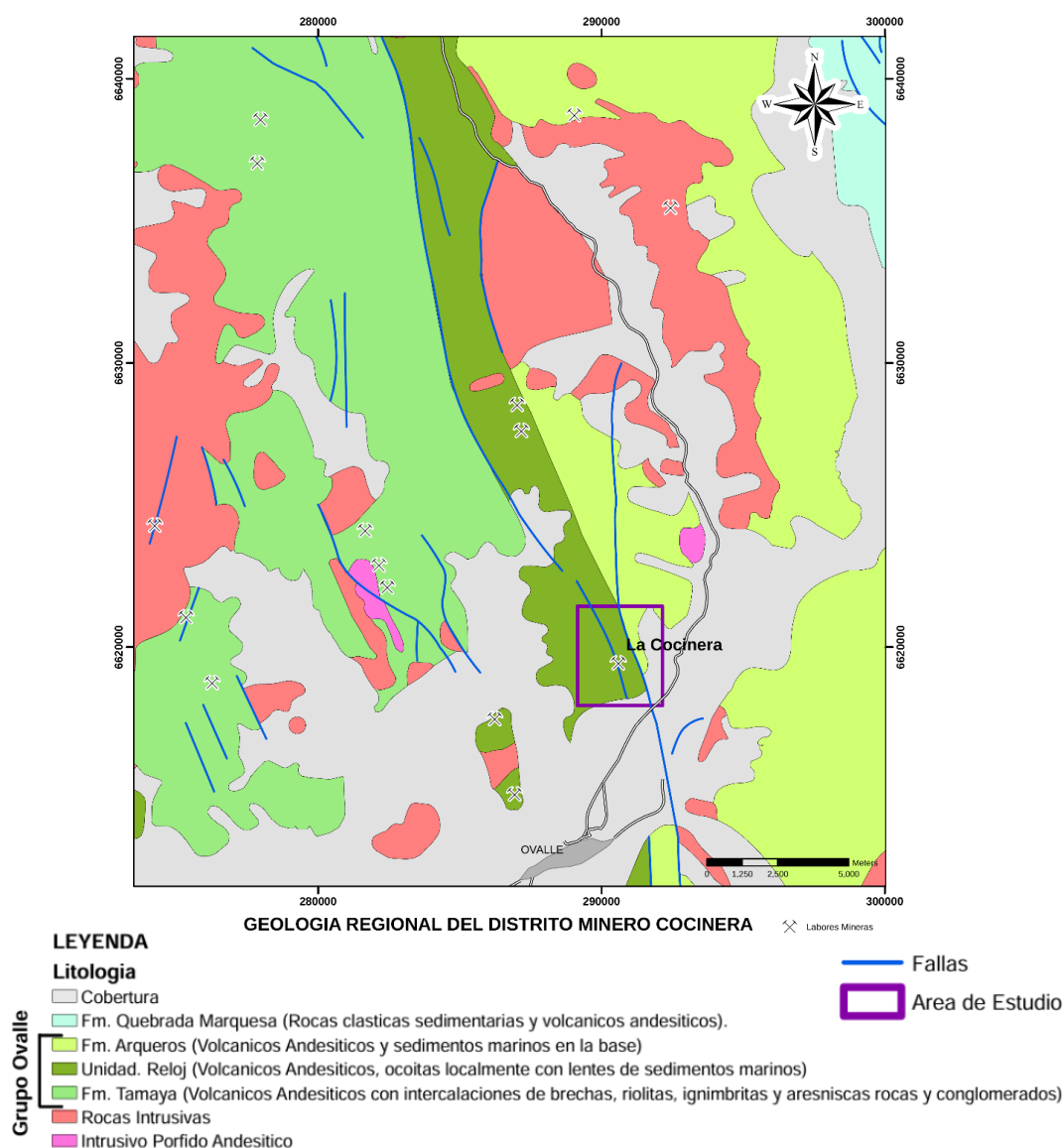


Figura 3.1 Geología regional. (Hopper & Correa, 2000, The Panulcillo and Teresa de Colmo Copper Deposits).

Desde el punto de vista estructural, el distrito se emplaza en la prolongación sur del Sistema de Fallas de Atacama (SFA), cuya influencia en el control de la mineralización ha sido documentada en depósitos cercanos como Panulcillo. Castellón (2017) describe en dicho yacimiento un control estructural ejercido por fallas de rumbo N-NE con cinemática dextral, activas bajo un régimen transtensional hasta ~125 Ma, que posteriormente migró a un régimen transpresivo sinistral asociado al desarrollo del SFA. La mineralización en Panulcillo se vincula espacialmente a estas estructuras, que habrían facilitado la circulación de fluidos hidrotermales y la precipitación de minerales de mena. Adicionalmente, el yacimiento se encuentra limitado al oeste por la Falla Panulcillo, correspondiente a la expresión local de la Falla Romeral (extremo sur del SFA), de rumbo NS y manto subvertical.

Este marco estructural resulta relevante para el distrito Cocinera–Inagotable, donde los sistemas de falla NS y NW–SE identificados podrían haber desempeñado un rol equivalente al observado en Panulcillo en la canalización de fluidos hidrotermales.

3.1.3 Contexto metalogénico y depósitos análogos: Panulcillo

El distrito Cocinera–Inagotable se emplaza en la Faja Cretácica de Cu del norte de Chile. A escala regional, el depósito de Panulcillo, ubicado ~15 km al norte de Ovalle (~10 km del área de estudio), constituye el referente más cercano y afín en términos de litología hospedante, contexto estructural y estilo de mineralización.

El depósito de Panulcillo se aloja en una secuencia volcano-sedimentaria de edad Valanginiana (Cretácico Inferior), intruida por un cuerpo de composición diorítica. La mineralización corresponde a un skarn de granate con impregnación de sulfuros, compuesto por granate tipo ugrandita y flogopita, con cantidades menores de diópsido, actinolita, clorita, cuarzo y calcita. Los minerales metálicos principales son pirrotina monoclinica, calcopirita, esfalerita, pirita y magnetita, dispuestos rellenando los intersticios del skarn (Sugaki et al., 2000). Castellón (2017) propuso posteriormente que el yacimiento corresponde a un depósito tipo IOCG con skarn asociado, cuya mineralización proviene de diques microdioríticos mineralizados con edad estimada entre 131 y 123 Ma.

Castellón (2017) identificó cinco estructuras principales a escala distrital: la Falla Panulcillo (FP), la Falla Asunción (FA), la Falla San Gregorio Norte (FSGN), la Falla San Gregorio Sur

(FSGS) y un conjunto de fallas subsidiarias a la FP. La FP, de rumbo N20W a N10E y manteo de 85°W, corresponde a la expresión local de la Falla Romeral (extremo sur del Sistema de Fallas de Atacama) y limita el yacimiento por el oeste. Las fallas Asunción y San Gregorio Norte presentan rumbos NW (N30W a N10W), manteos de 60° a 85°W y cinemática sinistral a sinistral-inversa. Las vetas mineralizadas, organizadas en tres asociaciones paragenéticas (calcopirita–pirita, calcopirita–pirita–magnetita y calcopirita–bornita), poseen rumbos NS a N25E con manteos subverticales, mientras que los diques microdioríticos mineralizados muestran rumbo N20E y manteos de 50° a 85°W.

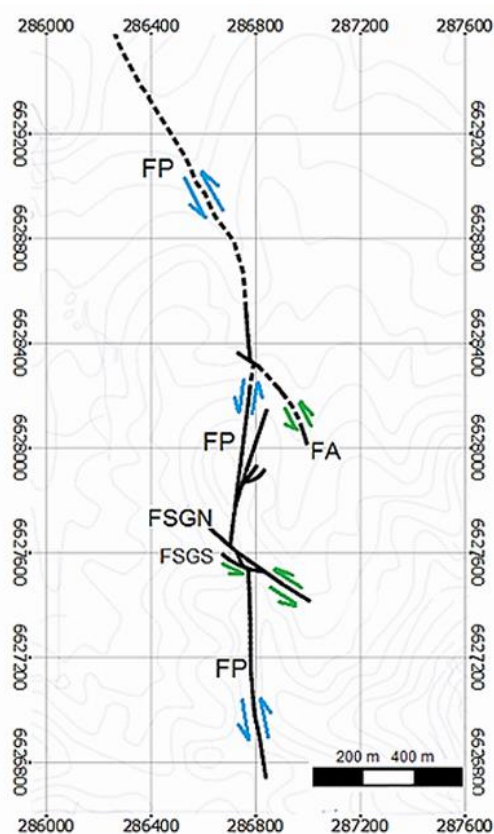


Figura 3.2 Esquema simplificado con las principales fallas estudiadas del yacimiento Panulcillo. FP: Falla Panulcillo. FA: Falla Asunción. FSGN: Falla San Gregorio Norte. FSGS: Falla San Gregorio Sur (Castellón, R. 2017).

En cuanto a la paragénesis, Castellón (2017) describe una secuencia que se inicia con alteración potásica temprana (feldespato potásico–biotita), seguida por una asociación de actinolita, clorita, epidota y sericita junto con la mineralización principal de calcopirita, bornita y pirita. Los sulfuros se habrían oxidado en niveles superficiales, formando zonas de óxidos de cobre y mixtos.

3.2 Geología local – distrital

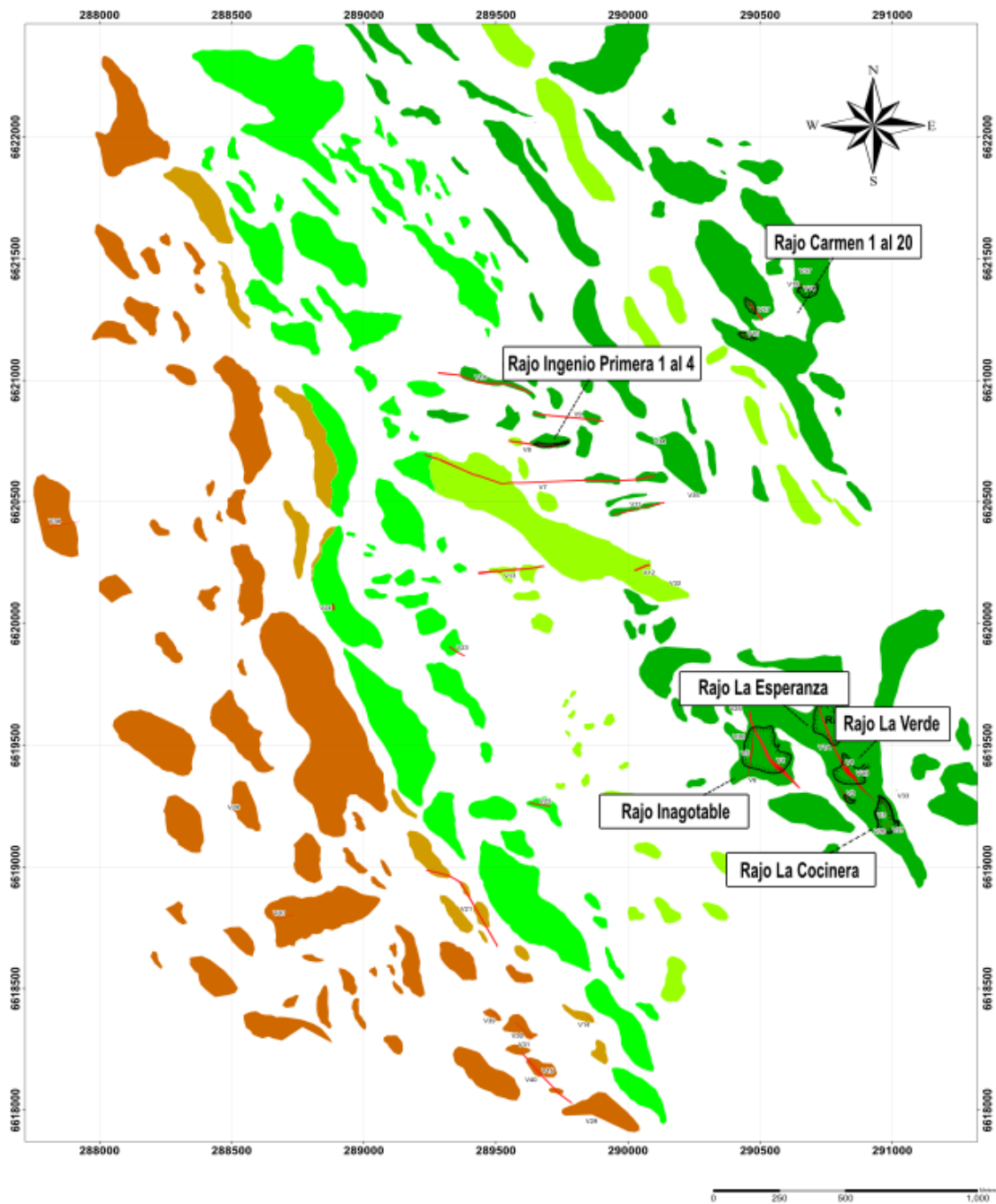
La geología distrital del área de estudio consiste en secuencias volcánicas de composición andesítica del Cretácico Inferior pertenecientes a la Unidad Reloj del Grupo Ovalle (Hopper & Correa, 2000).

En el presente estudio, la geología local fue dividida en cuatro unidades litológicas, ordenadas desde la más joven a la más antigua (Figura 3.3): (Unidad 1) lavas andesíticas de textura porfirítica media a gruesa, que constituyen la unidad superior de la secuencia; (Unidad 2) aglomerados volcánicos con líticos de composición andesítica; (Unidad 3) tobas líticas de composición andesítica; y (Unidad 4) lavas andesíticas de textura porfirítica fina a media, de color pardo, que representan la unidad más basal reconocida en el distrito.

Estudios técnicos previos (SAMSA, 2014) reconocen además en el distrito Cocinera–Inagotable la presencia de brechas y aglomerados volcánicos asociados, junto con cuerpos subvolcánicos de composición intermedia. Estas unidades están afectadas por un sistema de fallas principales de rumbo NW–SE y estructuras secundarias E–W a WNW. La mineralización se aloja en vetas y zonas de impregnación controladas estructuralmente, con diseminación de sulfuros de cobre (bornita, calcopirita y calcosina) asociada a alteraciones propilítica y argílica.



Figura 3.3 (A) Afloramiento rocas Andesítica de textura porfirítica. (B) Afloramiento de aglomerados volcánicos con líticos de composición andesítica. (C) Afloramiento de toba lítica de composición andesítica, con líticos subredondeados de hasta 25 cm inmersos en una matriz volcánica.



LEYENDA

LITOLOGIA

- Niveles lava Andesítica (Textura porf. media-gruesa)
- Niveles de tobas Andesíticas (Cineríticas, cristales, líticos)
- Aglomerados volcánicos composición Andesítica
- Niveles tobas líticas composición Andesítica (líticos <6cm)
- Niveles de lava Andesítica (textura fina-media)

ESTRUCTURAS

- Vetas OxCu

OTROS

- Rajo

Figura 3.4 Plano geológico Distrito Cocinera Inagotable (ENAMI).

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

En el presente capítulo se detallan las metodologías empleadas para el desarrollo de esta investigación. El trabajo se estructuró en distintas etapas sucesivas que permitieron avanzar de manera ordenada en la recopilación, análisis e integración de la información geológica.

Las variables de estudio consideradas en esta investigación incluyen: (1) asociaciones mineralógicas y relaciones texturales (paragénesis); (2) concentraciones geoquímicas de CuT, CuS, CuI, Ag y Au; (3) resistividad eléctrica del subsuelo obtenida mediante el método magnetotelúrico (MT); y (4) controles estructurales y litológicos de la mineralización. Estas variables fueron seleccionadas en función de su pertinencia para la caracterización del sistema mineralizado y la construcción del modelo genético propuesto.

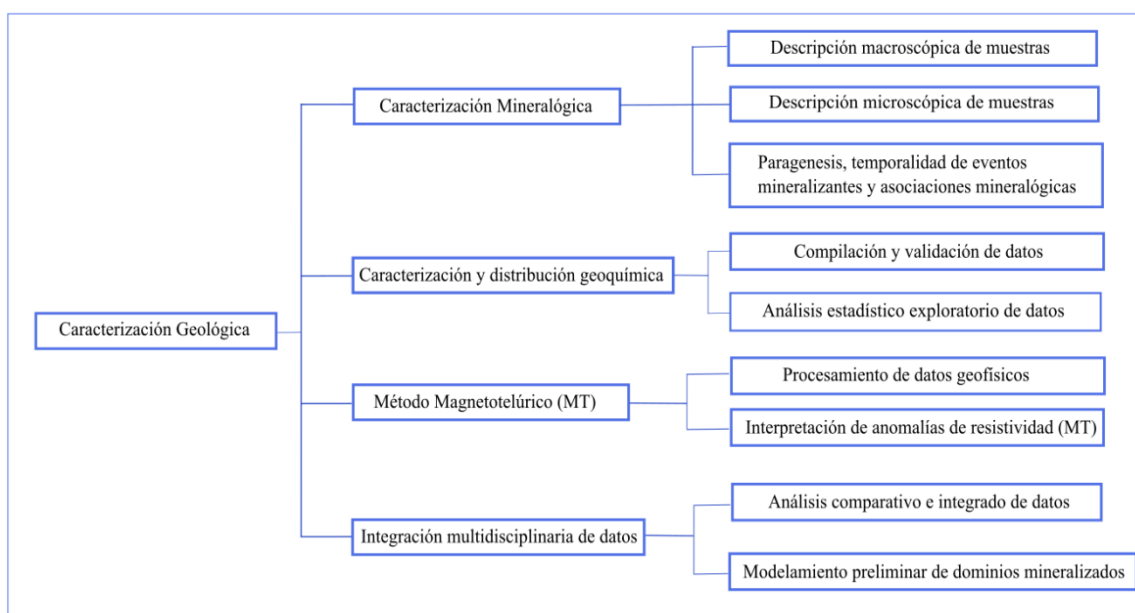


Figura 4.1. Diagrama de flujo de la secuencia metodológica aplicada para la caracterización geológica del distrito Cocinera–Inagotable (Elaboración propia).

4.1 Caracterización mineralógica

La caracterización mineralógica tuvo como objetivo identificar las asociaciones de minerales de mena, ganga y alteración presentes en el distrito Cocinera–Inagotable, así como establecer relaciones texturales que permitieran reconstruir la secuencia paragenética del sistema mineralizado. Para ello, se realizaron descripciones macroscópicas y microscópicas de muestras representativas, integrando la información obtenida en tablas de temporalidad paragenética.

La descripción macroscópica se realizó sobre 10 muestras representativas, recolectadas en distintos sectores del distrito Cocinera–Inagotable, con el fin de abarcar la variabilidad litológica y mineralógica del área de estudio. En cada muestra se registraron características como litología, color, textura, grado de alteración, presencia de vetas y mineralización visible.



4.1.2 Descripción microscópica de muestras

La caracterización microscópica se efectuó mediante el análisis de 10 secciones delgadas-pulidas, seleccionadas a partir de las muestras previamente descritas a nivel macroscópico. El estudio se realizó mediante microscopía óptica de luz transmitida y reflejada, utilizando un microscopio petrográfico, con aumentos de 50X, 100X, 200X y 500X. El objetivo fue identificar minerales de mena, ganga y alteración, así como las relaciones texturales entre ellos, incluyendo reemplazos, sobrecrecimientos, intercrecimiento y relaciones de corte.

4.1.3 Paragénesis, temporalidad de eventos mineralizantes y asociaciones mineralógicas

A partir de la integración de las observaciones macroscópicas y microscópicas, se elaboraron diagramas y tablas de secuencia paragenética en los cuales se representó la temporalidad relativa de los eventos mineralizantes, de alteración hidrotermal y de enriquecimiento supergénico. La definición de las fases paragenéticas se estableció en función de asociaciones minerales recurrentes y relaciones texturales, tales como reemplazos, sobrecrecimientos y relaciones de corte, permitiendo establecer una secuencia evolutiva relativa del sistema mineralizado.

4.2 Caracterización y distribución geoquímica

La caracterización geoquímica se orientó a determinar la distribución y variabilidad de los elementos metálicos presentes en el distrito Cocinera–Inagotable, con el propósito de identificar patrones composicionales y posibles asociaciones geoquímicas vinculadas al sistema mineralizado. Para ello, se trabajó con una base de datos geoquímica, las cuales fueron sometidas a un proceso de compilación, validación y análisis estadístico exploratorio.

4.2.1 Compilación y validación de datos

Los análisis químicos fueron realizados por la empresa SAMSA (2014) en el marco de un programa financiado por ENAMI. La base de datos geoquímica fue compilada a partir de 270 muestras recolectadas en distintos sectores del distrito Cocinera–Inagotable. Estas muestras fueron analizadas para los elementos Cu total (CuT), Cu soluble (CuS), Cu insoluble (CuI), Ag y Au, seleccionados en función de su relevancia para la caracterización del sistema mineralizado. La información fue organizada y estructurada en una base de datos

consolidada, la cual fue sometida a un proceso de revisión y validación previo al análisis estadístico, incluyendo la verificación de consistencia de datos.

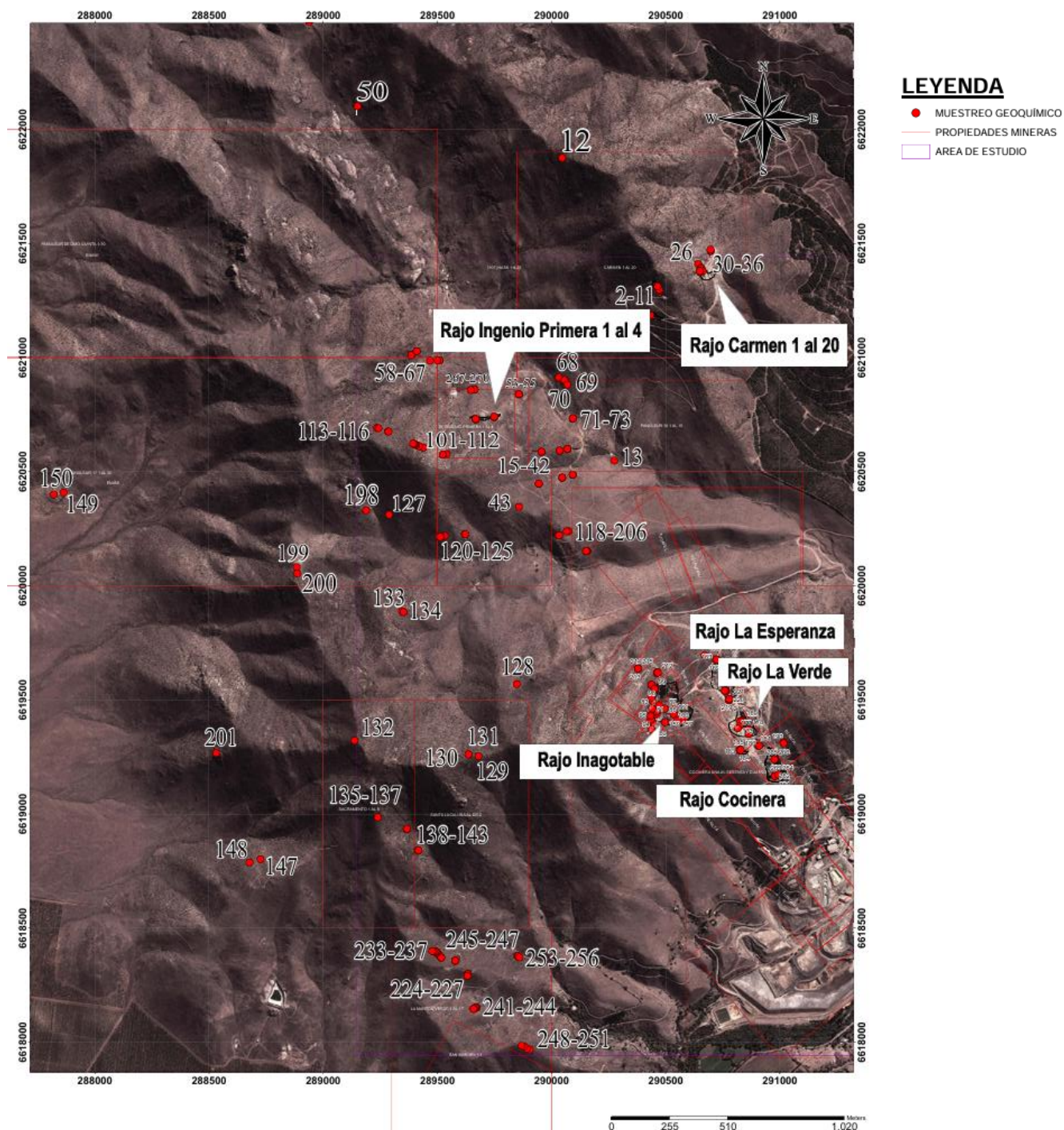


Figura 4.3 Mapa de ubicación de los puntos de muestreo geoquímico en el Distrito Cocinera–Inagotable (SAMSA, 2014).

4.2.2 Análisis estadístico exploratorio de datos

El análisis estadístico exploratorio tuvo como finalidad caracterizar la distribución de los elementos y evaluar su variabilidad dentro del distrito Cocinera–Inagotable. Para ello, se calcularon estadísticas descriptivas básicas, incluyendo media, mediana, percentiles (P25, P50, P75, P90, P95 y P99), valores mínimos y máximos, y medidas de dispersión para los elementos CuT, CuS, CuI, Ag y Au.

Con el propósito de evaluar el comportamiento de los datos y su posible asimetría, se utilizaron diagramas de caja (*boxplots*), los cuales permitieron comparar la dispersión y los valores extremos de cada elemento de forma simultánea, facilitando la identificación de patrones de variabilidad coherentes con la zonación mineralógica del sistema.

Adicionalmente, se construyeron curvas de frecuencia acumulada (curvas de Hazen) en escala semilogarítmica para los elementos CuT, CuS, CuI, Ag y Au, con el objeto de evaluar la distribución estadística de los datos y su comportamiento lognormal, característico de sistemas mineralizados con fuerte control estructural. Estas curvas permitieron comparar el comportamiento relativo de los distintos tipos de cobre y confirmar las asociaciones geoquímicas del sistema.

4.2.3 Distribución espacial de las leyes geoquímicas

A partir de las 270 muestras de la base de datos que contaban con coordenadas geográficas en sistema UTM WGS84 Huso 19S, se elaboraron mapas de distribución geoquímica mediante interpolación espacial para los elementos CuT, CuS, CuI, Ag y Au. La interpolación se realizó sobre una grilla regular utilizando el método de distancia inversa ponderada con suavizado espacial. Adicionalmente, se generaron mapas de isolíneas y representaciones de densidad mediante herramientas de interpolación y visualización espacial automatizada. Se restringió el área de representación a la envolvente convexa de las muestras más un buffer de 400 m para evitar extrapolaciones fuera del área de datos. Las isolíneas de concentración fueron trazadas sobre el campo interpolado, permitiendo visualizar la distribución espacial de las anomalías geoquímicas y evaluar su relación con el marco estructural del distrito. La escala de colores de cada mapa representa el rango entre los percentiles 2 y 98 de cada variable, de manera que los valores extremos queden representados en el color máximo sin distorsionar la variación del conjunto de datos.

4.3 Método Magnetotelúrico (MT)

La información magnetotelúrica (MT) utilizada en el presente estudio corresponde a un levantamiento geofísico previamente ejecutado por una empresa contratista para ENAMI en el distrito Cocinera–Inagotable. El método magnetotelúrico permite estimar la distribución de resistividad eléctrica en profundidad a partir del registro de campos electromagnéticos naturales, proporcionando información sobre la estructura del subsuelo. La adquisición de datos, el procesamiento y la modelación (estimación de funciones de transferencia, control de calidad de series de tiempo e inversión 2D) fueron realizados por la empresa GX Geoscience para ENAMI. En el presente estudio, el autor realizó la interpretación geológica de los modelos de resistividad resultantes, incluyendo la evaluación de la dimensionalidad geoelectrica, el análisis de los tensores de fase, vectores de inducción y strike geoelectrico, y su correlación con el marco geológico-estructural del distrito.

4.3.1 Instrumentación y equipos utilizados

Para la adquisición de datos magnetotelúricos se utilizó el equipo ADU08e de Metronix, una unidad de adquisición de datos diseñada para estudios MT de banda ancha. La medición de los campos magnéticos se realizó mediante bobinas de inducción modelo MFS07e de Metronix, mientras que los campos eléctricos fueron registrados a través de electrodos no polarizables modelo EFP06. Los largos de dipolo utilizados variaron entre 8 m y 20 m.



Figura 4.4 Sistema de Adquisición ADU-08e GX.

4.3.2 Parámetros de adquisición y tiempos de medición

En función de la separación entre estaciones planificadas y la profundidad objetivo, se aplicaron dos esquemas de adquisición:

- Estación audiomagnetotéluricas (AMT): con un tiempo total de registro promedio de aproximadamente 2 horas.

Frecuencia de muestreo (Hz)	Tiempo de medición (s)
65.536	120
16.384	180
4.096	360
512	4.740 – 6.540

Tabla 4.1 Esquema de adquisición de las estaciones de AMT. GX Geoscience (2026).

- Estación magnetotélurica de banda ancha (BBMT), con un tiempo total de registro superior a 12 horas.

Frecuencia de muestreo (Hz)	Tiempo de medición (s)
65.536	120
16.384	180
4.096	360
256 – 128	43.200 – 57.600

Tabla N 4.2 Esquema de adquisición de las estaciones de banda ancha MT. GX Geoscience (2026).

4.3.3 Adquisición de datos MT (perfiles L1- L4)

La campaña magnetotelúrica consideró la adquisición de datos a lo largo de cuatro perfiles principales en el sector Cocinera, denominados L1, L2, L3 y L4, cada uno con una longitud aproximada de 1.000 m y una separación promedio de 300 m entre perfiles.

Las líneas presentan un rumbo general N45°E y se distribuyen de manera paralela, cubriendo un total aproximado de 4 km lineales de adquisición. El detalle de las coordenadas UTM y los tiempos de medición de cada estación se presenta en el Anexo B.

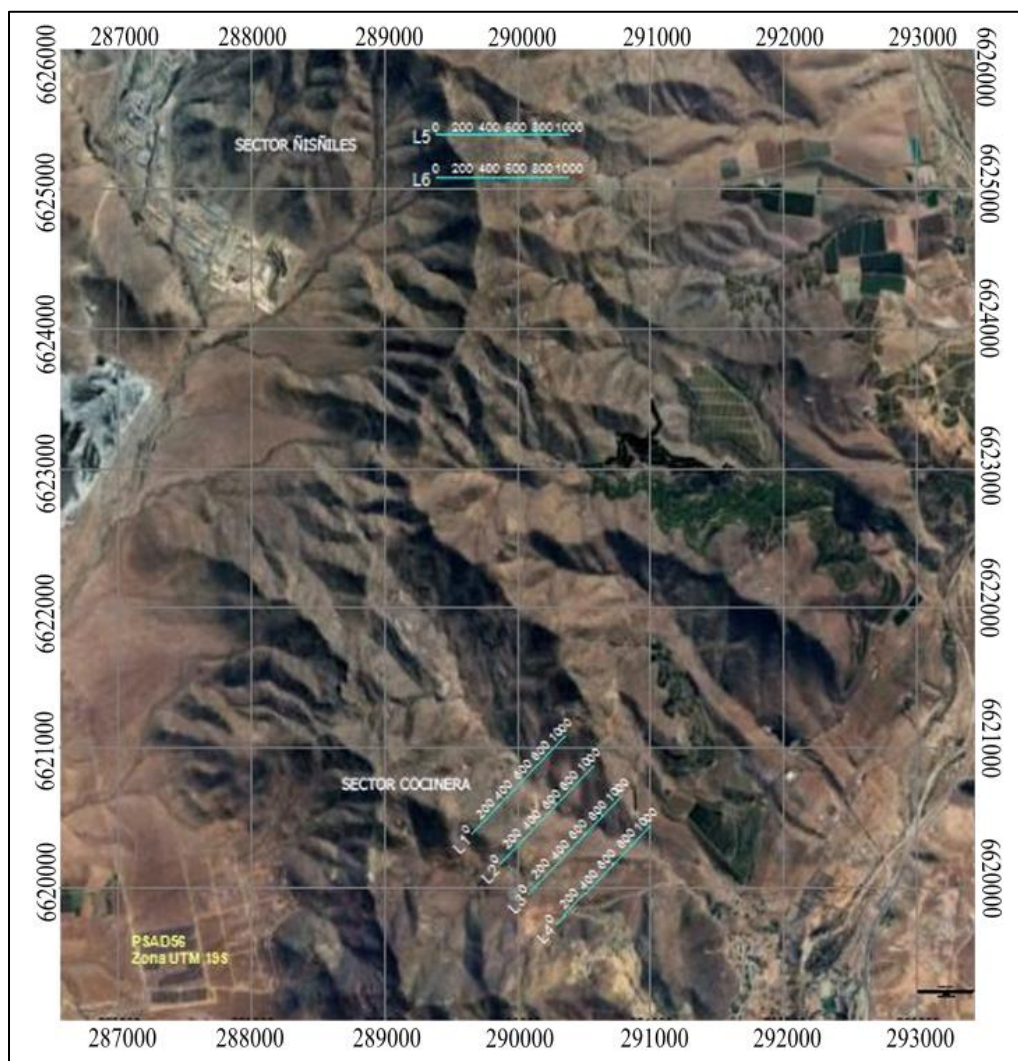


Figura 4.5 Mapa de ubicación de los perfiles y estaciones magnetotelúricas (MT). GX Geoscience (2026).

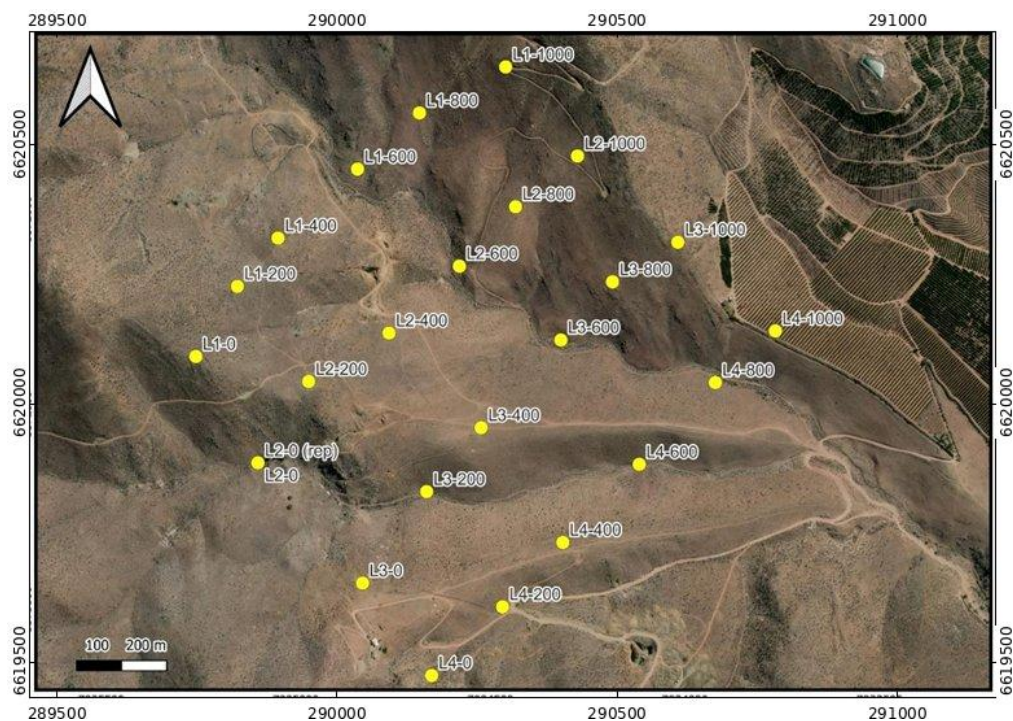


Figura 4,6 Ubicación de estaciones MT en sector Cocinera. GX Geoscience (2026).

Sector	LINEA	INICIO		FIN		Longitud (m)
		Este	Norte	Este	Norte	
Cocinera	L1	289664	6620390	290035	6621095	1.000
	L2	289857	6620177	290656	6620883	1.000
	L3	290069	6619965	290778	6620670	1.000
	L4	290281	6619752	290990	6620458	1.000
					TOTAL	4.000

Tabla N 4.3 Coordenadas de perfiles de los sectores del Distrito Cocinera (Elaboración propia).

4.3.4 Procesamiento de datos

- Control de calidad de series de tiempo

El procesamiento de datos comienza con la inspección visual de las series de tiempo registradas por los cinco sensores desplegados en terreno (Ex, Ey, Hx, Hy y Hz), como se ilustra en la Figura 4.7. En esta etapa es posible identificar ruido antrópico presente en las series de tiempo u otros problemas de medición, permitiendo excluir del procesamiento aquellos tramos que presentan una menor razón señal ruido en la serie de tiempo.

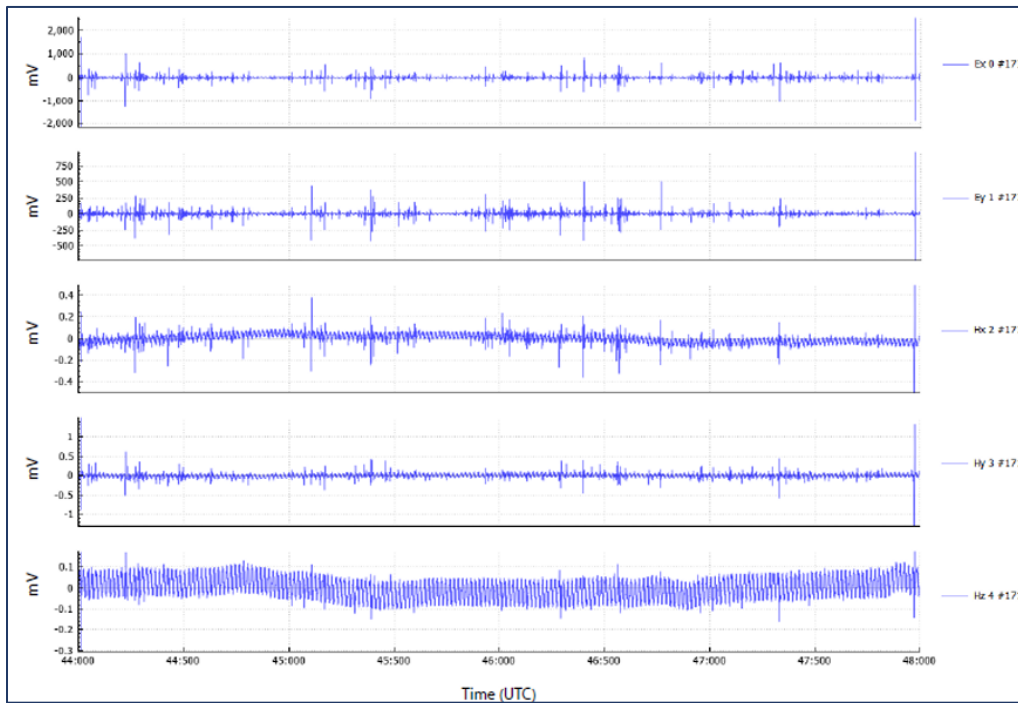


Figura 4.7 Series de tiempo registradas en la estación magnetotelúrica L2_800. GX Geoscience (2026).

- Estimación de funciones de transferencia y vectores de inducción

La estimación del tensor de impedancia y de los vectores de inducción se llevó a cabo a partir de dos algoritmos independientes: la primera se realizó mediante el software ProcMT (Metronix, 2002), que utiliza una regresión por mínimos cuadrados, y la segunda se efectuó con la librería SigMT (Ajithabh & Patro, 2023), que implementa una estimación robusta para la obtención de las funciones de transferencia.

- Obtención de curvas de resistividad aparente y fase

Las curvas de resistividad eléctrica aparente y de fase en función del período (en escala logarítmica), obtenidas mediante el método magnetotelúrico (MT), se presentan íntegramente en el ANEXO C. Estas curvas resultan fundamentales para identificar variaciones en la resistividad a distintas profundidades, permitiendo la detección de estructuras geoelectricas que pueden asociarse a variaciones de materiales geológicos, estructurales e hidrogeológicos. La interpretación de estas curvas se realiza de manera previa al modelamiento unidimensional y bidimensional (1D/2D) de la resistividad eléctrica, lo cual permite una caracterización más precisa del subsuelo. Asimismo, las diferencias en la pendiente de las curvas reflejan transiciones entre materiales más conductivos y más

resistivos, constituyendo un elemento clave para la posterior construcción del modelo geofísico.

A partir del tensor de impedancia es posible calcular las curvas de resistividad aparente y de fase en función de la frecuencia o del período. En la Figura 4.9 se presentan, a modo de ejemplo, las curvas de resistividad aparente y fase de la estación L2_800, cuya abscisa corresponde al período expresado en segundos. En la Figura 4.8 se presenta la visualización de estas curvas junto con el modelo 2D preliminar del perfil L2, cuya paleta de colores indica los valores de resistividad eléctrica.

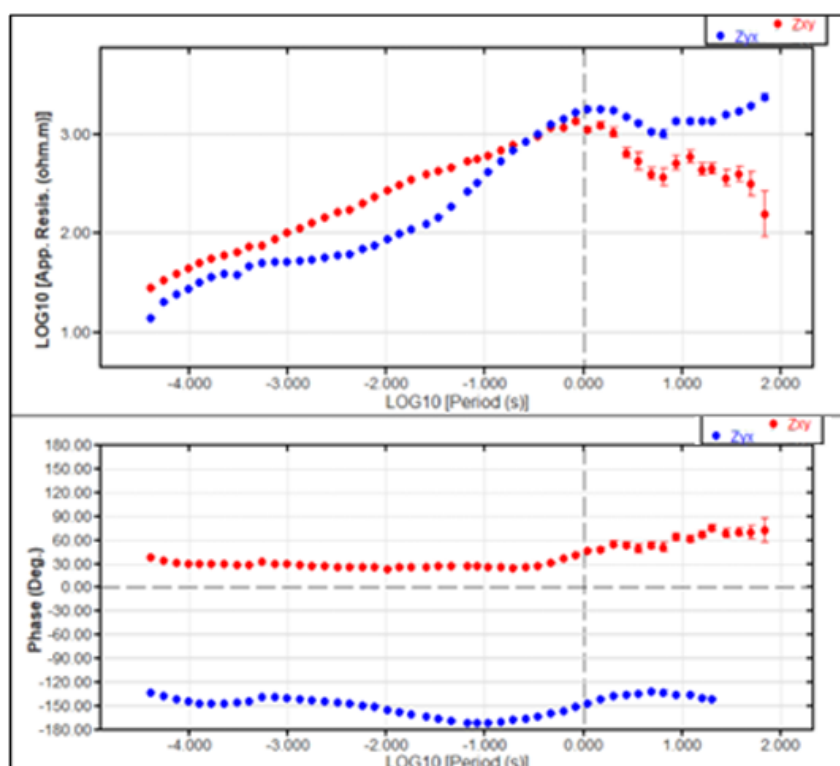


Figura 4.8 Curvas de resistividad aparente y fase de la estación L2_800. GX Geoscience (2026).

- Modelamiento de datos MT

Para la inversión de los datos se utilizó el software WinGLink, el cual permite realizar el control de calidad de los datos y posteriormente efectuar el modelamiento a través de inversiones bidimensionales.

Limpieza de datos: Se realizó un control de las funciones de transferencia previo a la ejecución del modelamiento, descartando valores ruidosos o fuera de tendencia esperada.

Además, se identificaron y corrigieron problemas de static shift, apoyándose en la información adquirida por otras estaciones MT cercanas que no fueron afectadas y presentan una buena calidad.

Inversión 2D: El algoritmo utilizado por WinGLink para la inversión bidimensional es el de gradientes conjugados no lineales (Rodi & Mackie, 2001). El proceso de inversión se lleva a cabo mediante iteraciones sucesivas, a partir de una grilla compuesta por celdas con resistividades eléctricas asignadas, con el objetivo de minimizar el desajuste entre los datos observados y la respuesta sintética del modelo RMS (Root Mean Square). En la Figura 4.9, se muestra, como ejemplo, la visualización de las curvas de resistividad aparente (arriba) y de la fase (abajo) de la estación L2_800, donde la abscisa de las figuras corresponde al período, expresado en segundos. A la derecha se presenta la visualización del modelo 2D preliminar del perfil L2, cuya paleta de colores indica los valores de resistividad.

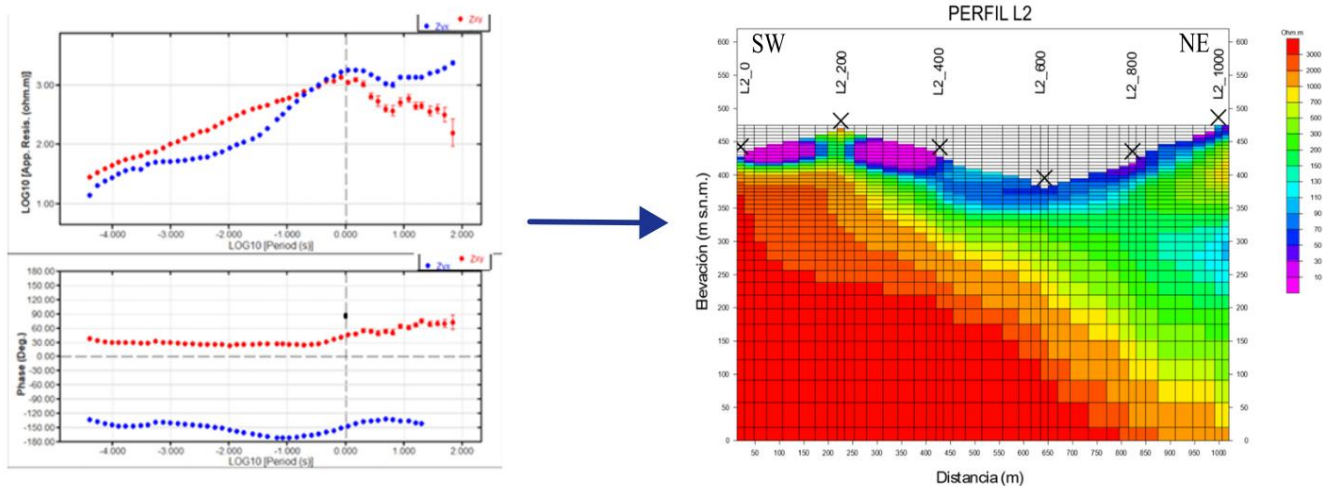


Figura 4.9 Visualización ejemplificativa de las curvas de resistividad eléctrica aparente y fase de la estación L2_800, en función del período. A la derecha se presenta su modelo 2D, cuya paleta de colores indica los valores de resistividad eléctrica. GX Geoscience (2026).

Para llevar a cabo las inversiones se consideraron los datos originales de cada estación, incorporando ambas componentes de resistividad eléctrica aparente y de fase (XY e YX), así como los datos de Hz obtenidos. Se definió un piso de error de 10% para la resistividad eléctrica aparente y de 5° para la fase. La grilla de inversión se construyó en función del rango de frecuencias registradas en cada sitio. Adicionalmente, los modelos de inversión 2D

incorporaron la topografía local del terreno, lo que permite una representación más precisa de la distribución de resistividades en profundidad.

4.3.5 Interpretación de anomalías de resistividad (MT)

La interpretación de las anomalías de resistividad se realizó a partir del análisis visual y comparativo de las secciones magnetoteléuricas invertidas, considerando la distribución espacial de los contrastes resistivos y conductivos en profundidad. Se evaluaron parámetros tales como la geometría, continuidad lateral y vertical de las anomalías.

El criterio interpretativo se basó en la premisa de que la estructura de resistividad eléctrica del subsuelo se asocia a la resistividad, abundancia e interconexión de los minerales y fluidos presentes en el medio, pudiendo diferenciarse distintas unidades cuando su mineralogía y/o fluidos intersticiales presentan rangos de resistividad significativamente contrastantes con su entorno. Debido a ello, variaciones significativas en la resistividad eléctrica pueden reflejar cambios litológicos, zonas de alteración hidrotermal o estructuras favorables para la circulación de fluidos. La integración de esta información permitió establecer hipótesis preliminares respecto a la configuración del sistema mineralizado en profundidad, las cuales se desarrollan en el capítulo de resultados y discusión.

La interpretación geológica de los modelos de resistividad fue complementada mediante la incorporación de registros de nueve sondajes diamantinos ejecutados por ENAMI durante la campaña 2023 en el sector Cocinera (EN-592 a EN-600, tabla 4.4). Los datos de collar, survey, litología y mineralización fueron proporcionados por ENAMI y se encuentran compilados en la base de datos del distrito. De los nueve sondajes disponibles, se seleccionaron tres (EN-594-23, EN-595-23 y EN-598-23) para el análisis detallado, en función de su ubicación dentro del área cubierta por los perfiles magnetoteléuricos y la representatividad de los distintos dominios de resistividad identificados.

Sondaje	Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	Az (°)	Dip (°)	Diám.	Prof. (m)
EN-592-23	290.063,7	6.620.723,4	409,7	60	−80	NQ	110,0
EN-593-23	290.104,3	6.620.626,9	425,7	60	−90	NQ	110,0
EN-594-23	290.115,3	6.620.548,7	414,1	30	−60	NQ	123,3
EN-595-23	290.403,2	6.620.274,5	405,2	60	−70	NQ	110,0
EN-596-23	289.846,3	6.620.528,5	480,6	30	−70	NQ	110,0
EN-597-23	289.940,9	6.620.355,9	469,4	60	−75	NQ	110,1
EN-598-23	290.089,5	6.620.213,7	436,4	45	−80	NQ	110,0
EN-599-23	290.112,9	6.620.547,1	413,9	115	−60	NQ	110,0
EN-600-23	290.115,6	6.620.547,8	414,0	60	−60	NQ	106,7

Tabla N 4.4 Resumen de sondajes diamantinos ejecutados en el sector Cocinera (ENAMI, 2023). Coordenadas UTM, Datum WGS84, Huso 19S.

4.4 Integración multidisciplinaria de datos

Esta etapa consistió en la triangulación de la información geológica, mineralógica, geoquímica y geofísica. El objetivo fue evaluar el comportamiento espacial, temporal y genético del depósito Cocinera–Inagotable. Al correlacionar estas líneas de evidencia, se establecieron los controles estructurales y litológicos de la mineralización, generando una base empírica sólida para el modelo conceptual.

4.4.1 Análisis comparativo e integrado de datos

A partir de los resultados individuales obtenidos en las etapas previas (mapeo, geoquímica, microscopía y geofísica), se procedió a cruzar y comparar la información en conjunto. El propósito de esta etapa fue buscar coincidencias y relaciones directas entre las distintas variables para fundamentar las conclusiones finales del estudio. Este cruce de datos se estructuró de la siguiente manera:

Correlación espacial geológico-geoquímica: Se contrastaron los mapas estructurales y litológicos con la distribución espacial de las leyes de cobre (CuT y CuS). Esto se hizo para

comprobar visual y espacialmente si las fallas mapeadas o ciertos estratos específicos actúan como controladores de la mineralización.

Vinculación mineralógica-geoquímica: Se comparó la secuencia de minerales observada al microscopio (paragénesis) con los datos químicos de solubilidad de la base de datos. Al cruzar ambos resultados, se pudo confirmar y delimitar con mayor certeza la transición entre la zona de óxidos y la zona de sulfuros primarios.

Integración geofísico-geológica: Se cotejaron los perfiles de resistividad eléctrica (MT) con la geología conocida en superficie. Se logró interpretar a qué características geológicas corresponden realmente las anomalías profundas (por ejemplo, asociando zonas conductoras con alteración/fallas y zonas resistivas con roca fresca).

4.4.2 Modelamiento preliminar de dominios mineralizados

Con base en el análisis integrado, se construyó un modelo evolutivo preliminar del distrito siguiendo estas etapas:

- Integración de anomalías geofísicas e intersecciones estructurales para definir vías de ascenso de fluidos y zonas de entrapamiento litológico (mantos estratoligados).
- Reconstrucción evolutiva: Uso de las fases paragenéticas como eje cronológico para esquematizar la historia del depósito en etapas discretas (pre-mineral, hipógena, supérgena y post-mineral).
- Modelo conceptual: Elaboración de diagramas esquemáticos 2D que sintetizan la configuración genética, la zonación vertical y la segmentación del yacimiento.

CAPÍTULO V: RESULTADOS

5.1 Paragénesis mineral

El estudio petro-calcográfico de 10 secciones delgadas-pulidas, recolectadas en sectores representativos del distrito Cocinera–Inagotable (Tabla 5.1, Figura 5.1), permitió identificar una mineralogía de mena compuesta por sulfuros hipógenos de Fe y Cu, junto con fases supergénicas de cobre y hierro, acompañadas por una mineralogía de ganga y alteración de intensidad variable. Las relaciones texturales observadas entre estas fases, tales como reemplazos, intercrecimientos y relaciones de corte, permitieron reconocer una secuencia paragenética de cuatro fases que se describe a continuación. Los criterios de selección de muestras y los procedimientos analíticos se detallan en la sección 4.1.

Código de muestra	Este	Norte	Cota	Descripción	Mineralogía de alteración	Mineralogía metálica
1	290522	6619431	445	Roca Andesita porfírica grano medio alt.	Ab, Car, Ser, Chl, Anh, Fk, Qz, Arc	Py, Bn, Cpy, Sph, Ru
2	290557	6619418	436	Zona de Veta, Andesita brechada	Ab, Anh, Car, Fk, Qz, Chl, Arc	Hm, HFe, Ru, Py
3	290483	6621245	653	Andesita textura brechosa (Toba Andesítica)	Ab, Fk, Qz, Chl, Ser, MB, Arc, Op	---
4	289820	6618380	402	Pórfido Andesítico de Grano medio-fino	Ab, Chl, Qz, Ser, Car, Arc, Op	---
5	289368	6621360	535	Aglomerado volcánico sin mineral.	Qz, Arc, Fk, Chl, Ep, Ja, Op	---
6	289663	6620860	425	Andesita porfírica grano medio	Chl, Ser, Car, Arc, Op	---
7	290866	6619416	445	Andesita porfírica grano medio	Arc, Ab, Fk	Hfe, At, Cri, Py
8	288349	6619199	460	Andesita Porfírica grano medio - fino color rojizo.	Arc, Qz, Car, Ser, Ja, Op	---
9	290635	6621455	577	Andesita porfírica grano medio - grueso.	Arc, Ab, Chl, Ser, Op	---
10	289459	6621428	507	Aglomerado Volcánico, subredondeado, comp. Andesítica, clastos < 10 cm	Arc, Ab, Fk, Chl, Qz, Op	---

Tabla N 5.1 Atacamita; Bn: Bornita; Car: Carbonato; Chl: Clorita; Cpy: Calcopirita; Cri: Crisocola; Ep: Epidota; Fk: Feldespato potásico; HFe: Hidróxidos de Hierro; Hm: Hematita; Ja: Jarosita; MB: Mica Blanca; Op: Opacos; Py: Pirita; Qz: Cuarzo; Ru: Rutilo; Ser: Sericita; Sph: Esfalerita. (Fuente: Elaboración propia).

5.1.1 Minerales identificados y relación textural

El análisis petrográfico y calcográfico de las 10 secciones delgadas-pulidas permitió identificar un conjunto de minerales de mena, minerales supergénicos, minerales de ganga y minerales de alteración, cuyas relaciones texturales constituyen la base para la reconstrucción de la secuencia paragenética del sistema.

- Minerales de mena hipógena

Los sulfuros primarios fueron identificados de manera restringida en el distrito, siendo reconocidos exclusivamente en la muestra 1 (andesita, sector Rajo Inagotable), donde los sulfuros hipógenos representan el 3% del volumen total de la muestra. La asociación reconocida está dominada por pirita (68% de los opacos) y bornita (30%), con esfalerita (1%), rutilo (1%) y calcopirita en trazas. La pirita se presenta como cristales subhedrales a anhedrales diseminados, localmente en contacto simple con bornita o siendo reemplazada por esta a través de pequeñas fracturas. La bornita ocurre como cristales anhedrales diseminados que reemplazan parcialmente a la pirita, y ocasionalmente contiene inclusiones irregulares de tipo *blebs* de calcopirita, lo que indica la posterioridad temporal de la bornita respecto a la calcopirita. La esfalerita se reconoce como cristales anhedrales aislados, localmente intercrecidos con rutilo. La calcopirita se presenta exclusivamente como finas inclusiones de tipo *blebs* dentro de bornita, sin ocurrencia independiente significativa.

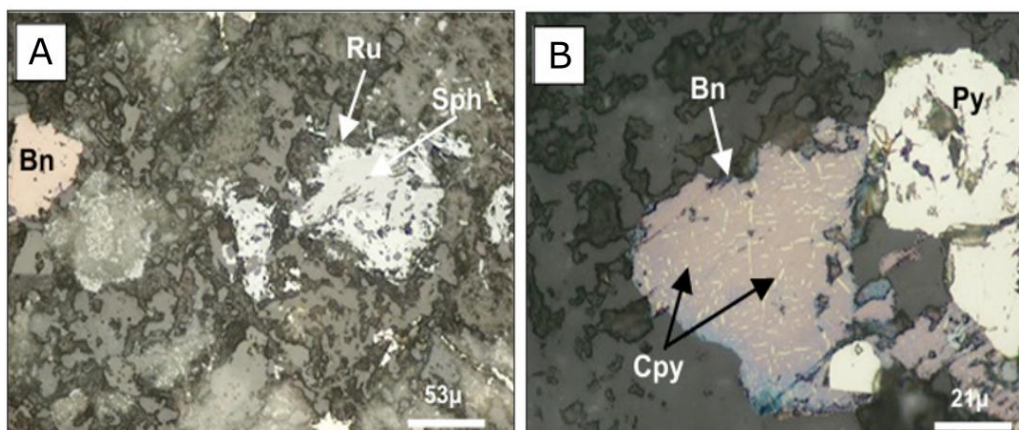


Figura 5.1 (A) Rutilo intercrecido con esfalerita. Cristal anedral de bornita, nicoles paralelos, 200X. (B) Bornita en contacto simple con pirita y con inclusiones, tipo *blebs* de calcopirita, nicoles paralelos, 500X. (Fuente: Elaboración propia).

- Minerales supérgenos de cobre

En los niveles superiores del sistema se identificó una mineralización supergénica que representa hasta un 10% del volumen total en la muestra 7 (andesita, sector Rajo La Verde). La atacamita constituye el mineral dominante, presentándose principalmente como relleno de fracturas y subordinadamente como parches anhedrales diseminados, a veces intercrecida con crisocola o desarrollando texturas de tipo corona. La crisocola ocurre como cristales de hábito fibroso intercrecidos con atacamita o formando texturas tipo corona en torno a esta, en proporciones subordinadas.

Asociados a esta mineralización supergénica, se reconocen abundantes hidróxidos de hierro como parches anhedrales relleno de espacios entre cristales y como pseudomorfos de probables piritas, evidenciando la destrucción de sulfuros primarios preexistentes. Se identificaron además relictos de pirita parcialmente reemplazados por hidróxidos de hierro, confirmando la sobreimposición del evento supergénico sobre la mineralización hipógena.

En la muestra 2 (andesita, zona de veta, sector Rajo Inagotable), donde el grado de oxidación más avanzado, la mineralización está dominada por hematita como finos cristales anhedrales diseminados, frecuentemente afectados por un proceso de reemplazo a hidróxidos de hierro, junto con rutilo como finas diseminaciones y pirita relíctica en trazas. Esta asociación representa un estadio donde los sulfuros originales han sido casi completamente destruidos, preservándose únicamente como relictos aislados.

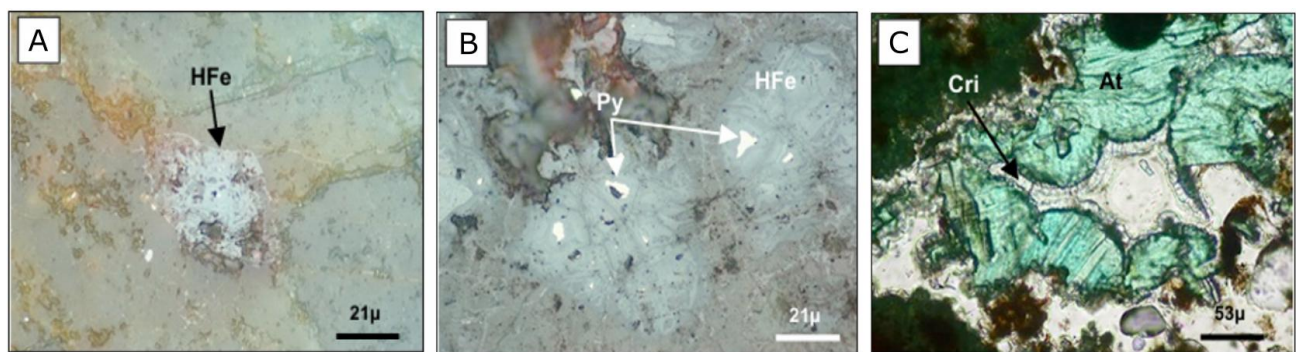


Figura 5.2 Muestra (A) Hidróxidos de hierro como pseudomorfos de pirita, nicols paralelos, 500X. (B) Relictos de pirita reemplazados por hidróxidos de hierro, nicols paralelos, 500X. (C) Crisocola en textura tipo corona con atacamita, nicols paralelos, 200X. (Fuente: Elaboración propia).

- Minerales de ganga y alteración

La mineralogía de ganga y alteración muestra una distribución heterogénea controlada por la proximidad a las estructuras mineralizadas y el grado de interacción fluido–roca. El cuarzo secundario constituye el mineral de alteración volumétricamente más significativo, presentándose como agregados policristalinos de grandes dimensiones en relleno de vetas (cristales de hasta 1 cm) y como agregados micro a policristalinos que reemplazan la masa fundamental de la roca de caja andesítica. El carbonato (calcita) es frecuente tanto como relleno de vetas y fracturas como en parches anhedrales impregnados sobre la masa fundamental y sobre fenocristales de plagioclasa (muestras 1, 2, 4, 6 y 8).

La clorita se presenta en tres modos de ocurrencia principales: como reemplazo pervasivo de ferromagnesianos primarios generando pseudomorfos, como parches anhedrales en la masa fundamental y como relleno de fracturas menores. La sericita ocurre como agregados finos diseminados sobre fenocristales de plagioclasa, generalmente asociada a arcillas y carbonato. Las arcillas se desarrollan tanto como producto de alteración de feldespatos como en diseminaciones dentro de la masa fundamental y en rellenos tardíos de fracturas, con proporciones variables según la intensidad de la alteración. El feldespato potásico secundario se reconoce en dos estilos: como parches anhedrales en relleno de vetas y fracturas, y como reemplazo metasomático incipiente de plagioclasas desde los bordes de los cristales, este último particularmente asociado a las zonas con mineralización de sulfuros en profundidad.

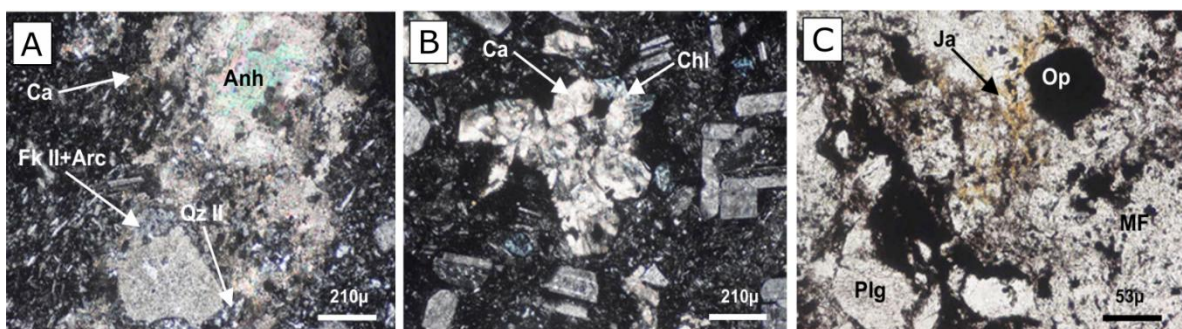


Figura 5.3 (A) Fractura rellena de anhidrita, parches anhedrales de carbonato, feldespato potásico secundario con arcillas y cuarzo secundario, nicoles cruzados, 50X. (B) Fenocristales de pseudomorfos de probables ferromagnesianos originados por un reemplazo pervasivo caracterizado por clorita y carbonato, con impregnaciones de opacos, nicoles cruzados, 100X. (C) Masa fundamental compuesta por plagioclasa, minerales opacos, cuarzo secundario y parche de jarosita. Nicles paralelos, 200X. (Fuente: Elaboración propia).

- Relación textural

Las principales relaciones de corte y reemplazo observadas permiten establecer una cronología relativa de los eventos mineralizantes. Entre los sulfuros hipógenos (muestra 1), la pirita es parcialmente reemplazada por bornita a través de pequeñas fracturas, y la bornita a su vez contiene inclusiones irregulares de tipo *blebs* de calcopirita, lo que indica la siguiente relación temporal: pirita → calcopirita → bornita. Esta relación de reemplazo progresivo constituye la evidencia textural más clara de la evolución del sistema desde una etapa temprana rica en hierro hacia el evento cuprífero principal.

La sobreimposición del evento supergénico sobre la mineralización hipógena se evidencia por el desarrollo de hidróxidos de hierro como pseudomorfos de pirita (muestra 7), indicando la destrucción oxidativa de los sulfuros primarios. La atacamita y crisocola rellenan fracturas y porosidad secundaria, desarrollando localmente texturas de tipo corona donde la crisocola bordea a la atacamita, lo que sugiere una precipitación secuencial dentro de la etapa supergénica.

Las fracturas tardías rellenas por arcillas, carbonatos y anhidrita cortan a todas las asociaciones anteriores, tanto hipógenas como supergénicas, indicando su carácter post-mineral. Particularmente, se observan fracturas rellenas de carbonato que cortan vetillas previas de minerales opacos (muestra 8), confirmando la posterioridad de los rellenos carbonáticos respecto a la mineralización. Estas relaciones texturales constituyen la base sobre la cual se construyó la secuencia paragenética presentada en la sección siguiente.

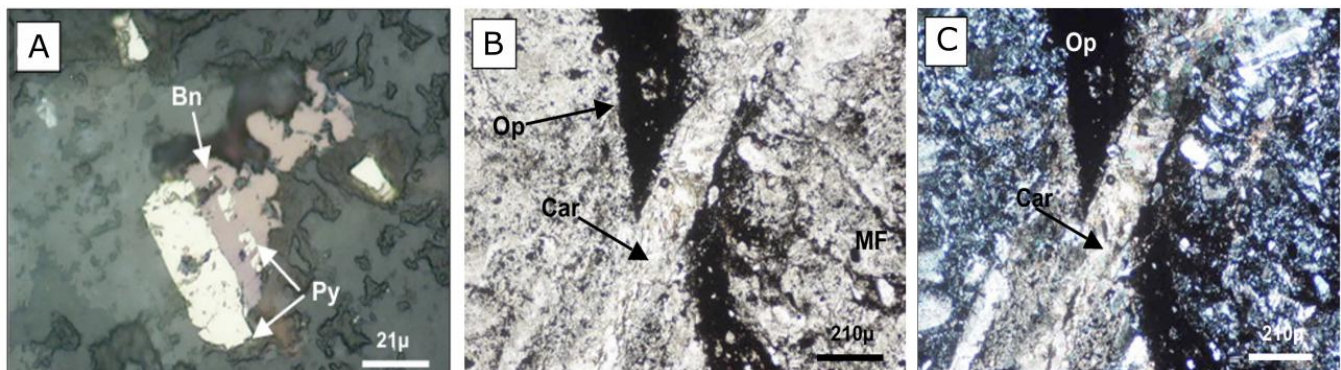


Figura 5.4 (A) Bornita en contacto simple y reemplazando a pirita, nicoles paralelos, 500X. (B), (C) Fractura fina rellena con carbonato, cortando a una vetilla fina de minerales opacos. Nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 50X. (Fuente: Elaboración propia).

5.2. Geoquímica

5.2.1 Relación espacial entre la distribución geoquímica y el control estructural

A escala distrital, los valores anómalos de CuT ($\geq 1,0\%$) muestran una distribución espacial preferentemente alineada en dirección NW–SE, coincidente con el rumbo estructural principal del distrito definido por el sistema de fallas NW–SE (Figura 5.10). Esta coincidencia vincula directamente la distribución de las concentraciones anómalas de cobre con la arquitectura estructural del distrito.

Los núcleos de mayor concentración (CuT $> 3,0\%$), identificados como Zonas A (Rajo Ingenio Primera 1 al 4) y B (sector Cocinera) en la Figura 5.10, se localizan en puntos donde se reconoce una mayor densidad de vetas y fallas del sistema NW–SE. Asimismo, se identifican valores elevados puntuales en sectores donde estructuras de orientación NS intersectan al sistema NW–SE.

El Rajo Ingenio Primera 1 al 4 (Zona A) concentra los valores más altos del distrito, con una media de 1,54% de CuT y un máximo de 9,98% CuT. El 43,8% de sus muestras se encuentra en el rango 1,0–3,0% y el 6,2% supera el 3,0%, siendo este último el valor más alto registrado en todo el distrito. Espacialmente, las muestras de mayor ley en este sector se asocian a estructuras de falla y vetas rellenas de óxidos de cobre (OxCu). La plata en este sector alcanza un máximo de 62,3 ppm, el valor más alto registrado en todo el distrito, asociado a las mismas estructuras.

Adicionalmente, se reconocen valores anómalos de CuT en una anomalía de rango intermedio (Zona C), correspondiente a los sectores Panulsur 15 y Panulsur 17, donde se identifican estructuras de orientación E–W con una mediana de 1,39% y un valor máximo de 5,40% de CuT. Estos valores se concentran puntualmente en zonas de intersección entre las estructuras E–W y el sistema NW–SE.

En contraste, los sectores periféricos del distrito (Zonas D, E y F) registran valores predominantemente correspondientes al background geoquímico (CuT $< 0,5\%$).

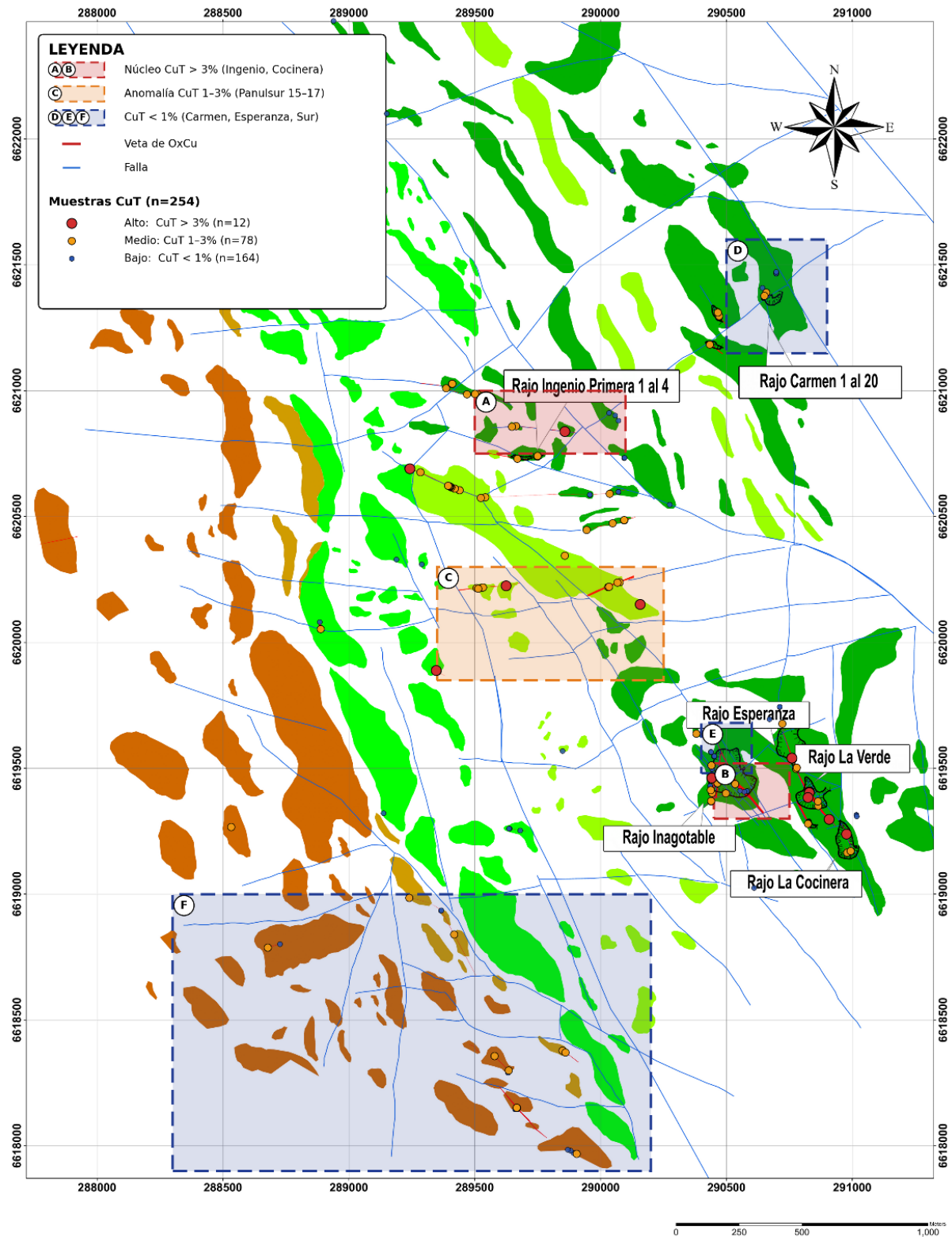


Figura 5.10 Distribución espacial de Cu total (CuT) sobre el plano geológico-estructural del distrito Cocinera-Inagotable
Elaboración propia a partir de la base ENAMI-SAMSA (2014).

5.2.2 Diagrama de caja - *boxplot*.

El análisis estadístico de las 270 muestras geoquímicas del distrito Cocinera–Inagotable mediante diagramas de caja permite caracterizar la distribución y variabilidad de los elementos CuT, CuS, CuI, Ag y Au, cuyos resultados se presentan a continuación (Figura 5.13).

En general, los resultados evidencian una marcada asimetría en la distribución de los valores, con la mayoría de las muestras concentradas en rangos bajos y un número reducido de valores altos asociados a zonas específicas del distrito.

La comparación de los diagramas de caja evidencia diferencias en la dispersión y rango de los elementos analizados. El CuT presenta una mediana de 0,61%, con valores que alcanzan 2,89% en el P95 y un máximo de 9,98%, reflejando la alta variabilidad del sistema. El CuS registra una mediana de 0,56% y un P95 de 2,77%, comportamiento coherente con el predominio de minerales oxidados en superficie. Por su parte, el CuI muestra valores notablemente más bajos, con una mediana de 0,12% y un P95 de 0,47%, con algunos *outliers* aislados que alcanzan hasta 3,79%. La plata (Ag) presenta una distribución altamente asimétrica, con mediana de 1,05 ppm y valores extremos que llegan a 62,3 ppm, restringidos a sectores puntuales. El oro (Au) exhibe valores muy bajos en la mayoría de las muestras, con una mediana de 0,01 ppm y un P95 de 0,05 ppm.

El análisis de la relación CuS/CuT permite caracterizar el grado de oxidación del conjunto de muestras. Un 52,5% de las muestras presenta una razón CuS/CuT superior a 0,7, mientras que solo un 9,0% registra valores inferiores a 0,3. En términos de contenidos, el 54,1% de las muestras supera el 0,5% de CuT, el 35,7% supera el 1,0%, y solo el 4,7% supera el 3,0%, correspondiendo este último grupo a 12 muestras con valores extremos de entre 3,5% y 9,98% de CuT. Respecto a los metales, la Ag muestra una correlación positiva moderada-alta con el CuT ($r = 0,69$), mientras que el Au presenta una correlación prácticamente nula ($r = 0,15$), lo que es consistente con la distribución observada en los diagramas de caja.

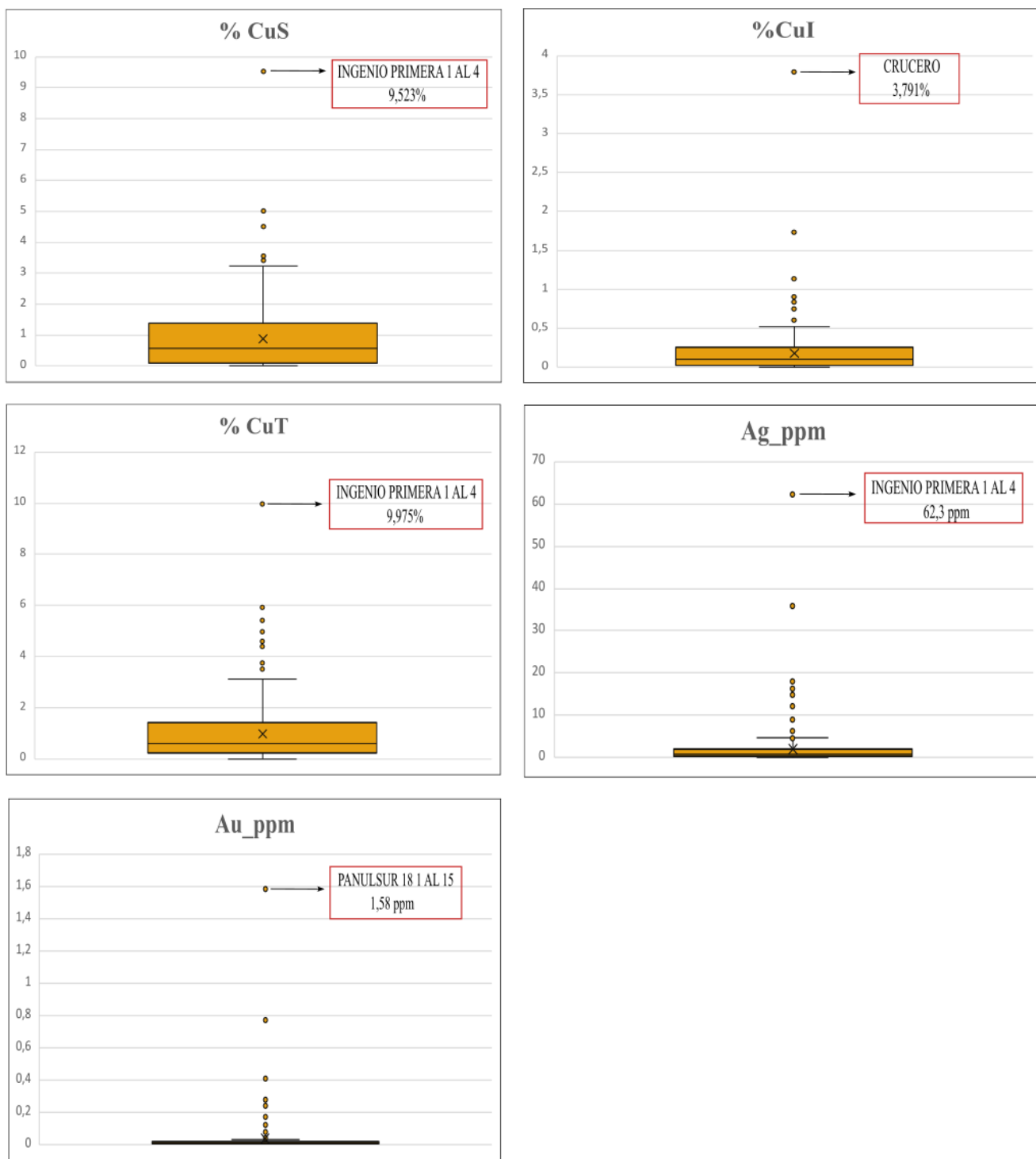


Figura 5.5 Diagramas de caja y bigotes (*boxplots*) de CuS, CuI, CuT, Ag y Au correspondientes a las 270 muestras geoquímicas del distrito Cocinera–Inagotable, mostrando la distribución de los valores, la mediana y la presencia de valores extremos asociados a estructuras mineralizadas (Fuente: Elaboración propia).

5.2.3 Distribución de frecuencia acumulada

Las curvas de frecuencia acumulada de CuT, CuS y CuI (Figura 5.14a) permiten reconocer la zonación geoquímica vertical del sistema. En los percentiles bajos e intermedios, la curva de CuS se posiciona sistemáticamente por encima de la de CuI, reflejando la dominancia de las fracciones oxidadas en el conjunto de muestras superficiales. Hacia los percentiles superiores ($>P75$), la contribución relativa del CuI aumenta progresivamente, indicando la preservación de sulfuros primarios en un subconjunto acotado de muestras.

Respecto a los metales preciosos, la curva de Ag (Figura 5.14b, $n = 240$) muestra valores detectables en la totalidad de las muestras analizadas, con un rango entre 0,1 y 62,3 ppm y una marcada asimetría positiva concentrada en el extremo superior de la distribución. El Au (Figura 5.14c, $n = 112$, considerando solo muestras sobre el límite de detección $>0,005$ ppm) presenta valores detectables en solo el 32,7% de las muestras, con un máximo de 1,58 ppm, manteniéndose bajo 0,1 ppm en más del 90% de los casos.

En síntesis, las curvas de frecuencia acumulada permiten distinguir tres comportamientos diferenciados dentro del conjunto de datos: (i) los elementos de cobre (CuT, CuS, CuI) presentan distribuciones fuertemente asimétricas donde la separación relativa entre las curvas de CuS y CuI varía según el rango de concentración, evidenciando una zonación geoquímica que no es capturada por las estadísticas univariantes de la Sección 5.2.1; (ii) la Ag acompaña consistentemente a las muestras de mayor ley de cobre, concentrando su variabilidad en el extremo superior de la distribución; y (iii) el Au se mantiene por debajo de los umbrales de interés económico en la gran mayoría de las muestras, con una proporción significativa de valores bajo el límite de detección.

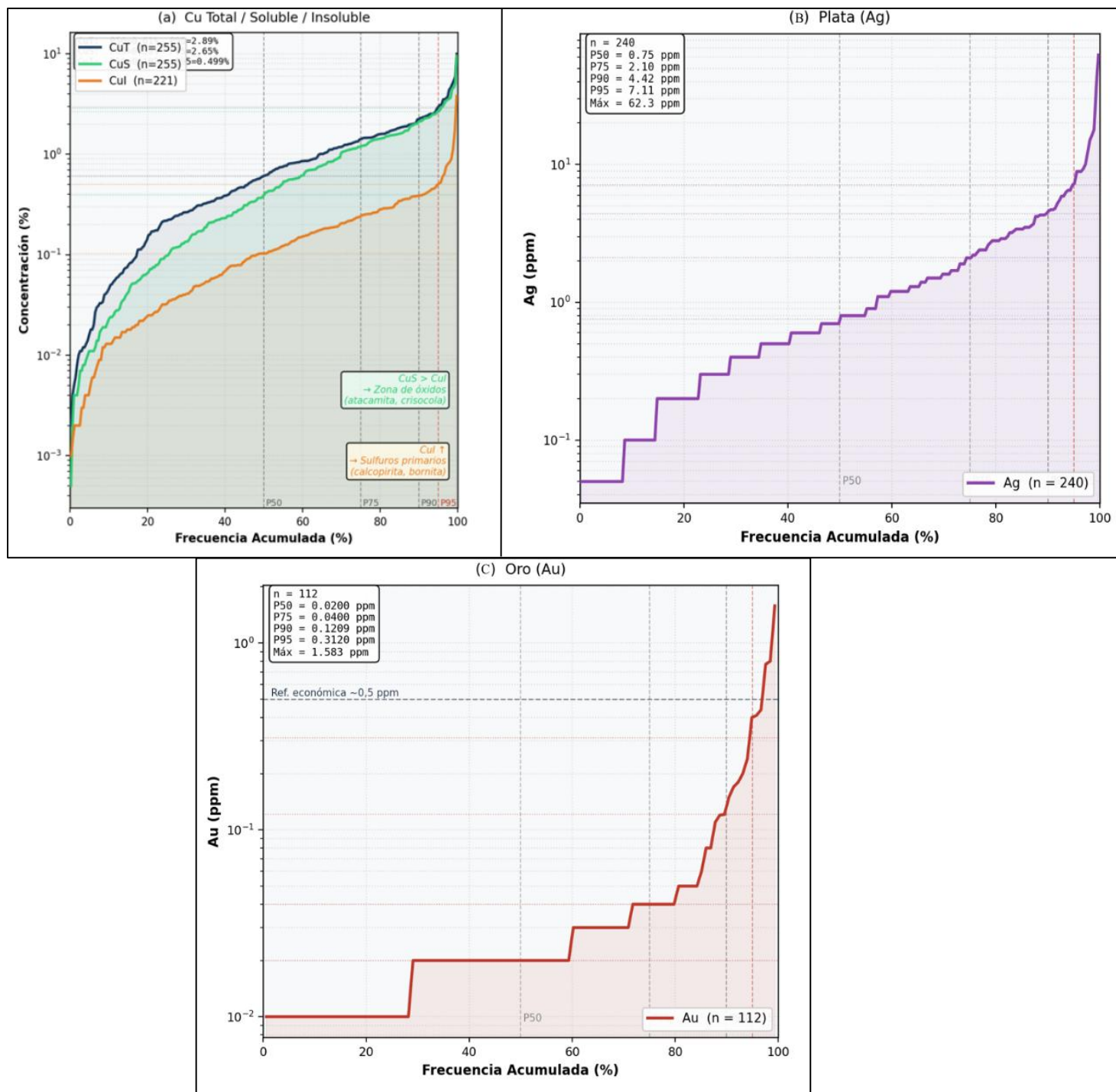


Figura 5.6 Distribución de frecuencia acumulada de los elementos geoquímicos analizados en el distrito Cocinera–Inagotable (a) Curvas de Cu total (CuT), Cu soluble (CuS) y Cu insoluble (CuI). (b) Distribución de Ag, con valores que alcanzan un máximo de 62,3 ppm y una marcada asimetría positiva hacia concentraciones altas. (c) Distribución de Au, considerando únicamente muestras sobre el límite de detección (> 0,005 ppm). Los valores de Au se mantienen por debajo de 0,1 ppm en el 90% de las muestras. En todos los paneles se indican los percentiles P50, P75, P90 y P95 (Fuente: Elaboración propia).

5.2.4 Mapas de distribución geoquímica

La distribución espacial de las concentraciones de Cu y Ag en el distrito Cocinera–Inagotable se evaluó mediante la interpolación de las muestras georreferenciadas. Las distribuciones se presentan a continuación para tres variables principales: Cu total (CuT), plata (Ag) y la razón CuS/CuT como índice de oxidación supérgena. El oro no se incluye en el análisis espacial por la elevada proporción de valores bajo el límite de detección (40,8% de las muestras, > 0,005 ppm).

- Distribución de Cu total

El mapa de CuT (Figura 5.7) muestra una distribución espacial heterogénea, con una mediana distrital de 0,61% y un máximo de 9,97%. Las concentraciones se concentran preferentemente en cinco zonas:

Dominio	n	CuT mediana	CuT máximo	% > 1% CuT	Rasgo espacial	Rajos contenidos
Cocinera NW	70	1,10%	9,97%	53%	Cuerpo alargado NW–SE; anomalía principal del distrito	Ingenio Primera 1 al 4
Cocinera SE	61	0,53%	5,92%	25%	Cluster compacto de baja-moderada ley sobre los rajos del SE	Esperanza, La Verde, Inagotable, La Cocinera
Sector Sur	36	0,44%	2,53%	31%	Anomalías acotadas, sin continuidad espacial	(sin rajo)
Carmen	22	0,22%	1,95%	23%	Valores predominantemente bajos	Rajo Carmen 1 al 20
Muestras periféricas	4	0,01%	0,55%	0%	Sitios aislados al N y W (muestras 12, 50, 149-150)	(sin rajo)

Tabla N 5.1 Síntesis estadística de la distribución espacial de Cu total (CuT) por dominio en el distrito Cocinera–Inagotable. Los dominios corresponden a los recuadros blancos discontinuos del mapa de la Figura 5.15. n: número de muestras con CuT válido (Fuente: Elaboración propia).

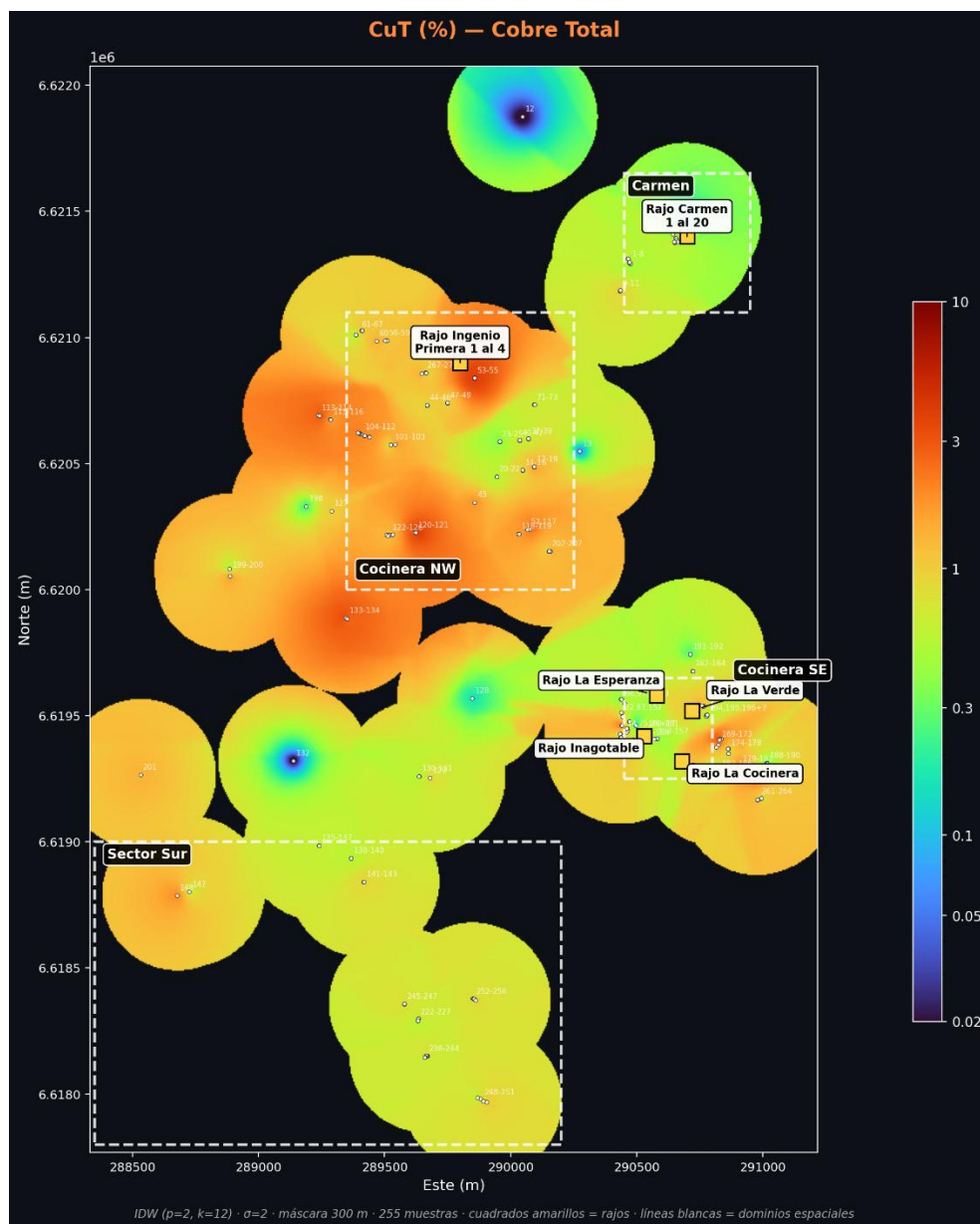


Figura 5.7 Distribución espacial de Cu total (CuT, %) en el distrito Cocinera–Inagotable. Elaboración propia a partir de la base ENAMI-SAMSA (2014).

- Distribución de Ag

El mapa de Ag (Figura 5.16) presenta una mediana distrital de 1,1 ppm y un máximo de 62,3 ppm, sobre 224 muestras con concentraciones superiores al límite de detección. Se distinguen los mismos cuatro dominios espaciales definidos para CuT, cuyas características estadísticas se sintetizan en la Tabla 5.2.

Dominio	n	Ag mediana (ppm)	Ag máximo (ppm)	n > 10 ppm Ag	Rasgo espacial	Rajos contenidos
Cocinera NW	65	1,00	62,3	2	Valor máximo concentrado en muestra puntual (m. 54), con valores moderados (0,4–4,2 ppm) en las muestras circundantes	Ingenio Primera 1 al 4
Cocinera SE	59	1,20	35,9	4	Mediana sectorial más alta del distrito; anomalía espacialmente continua entre muestras 79, 80, 90, 92 (10–36 ppm)	Esperanza, La Verde, Inagotable, La Cocinera
Sector Sur	33	0,90	4,20	0	Valores generalmente entre 0,5 y 2 ppm	(sin rajo)
Carmen	18	0,40	4,60	0	Valores generalmente bajo 2 ppm	Rajo Carmen 1 al 20
Muestras periféricas	3	0,30	0,30	0	Valores cercanos al límite de detección (muestras 12, 149-150)	(sin rajo)

Tabla N 5.2 Síntesis estadística de la distribución espacial de plata (Ag) por dominio en el distrito Cocinera–Inagotable. Los dominios corresponden a los recuadros blancos discontinuos del mapa de la Figura 5.16. n: número de muestras con Ag sobre el límite de detección (Fuente: Elaboración propia).

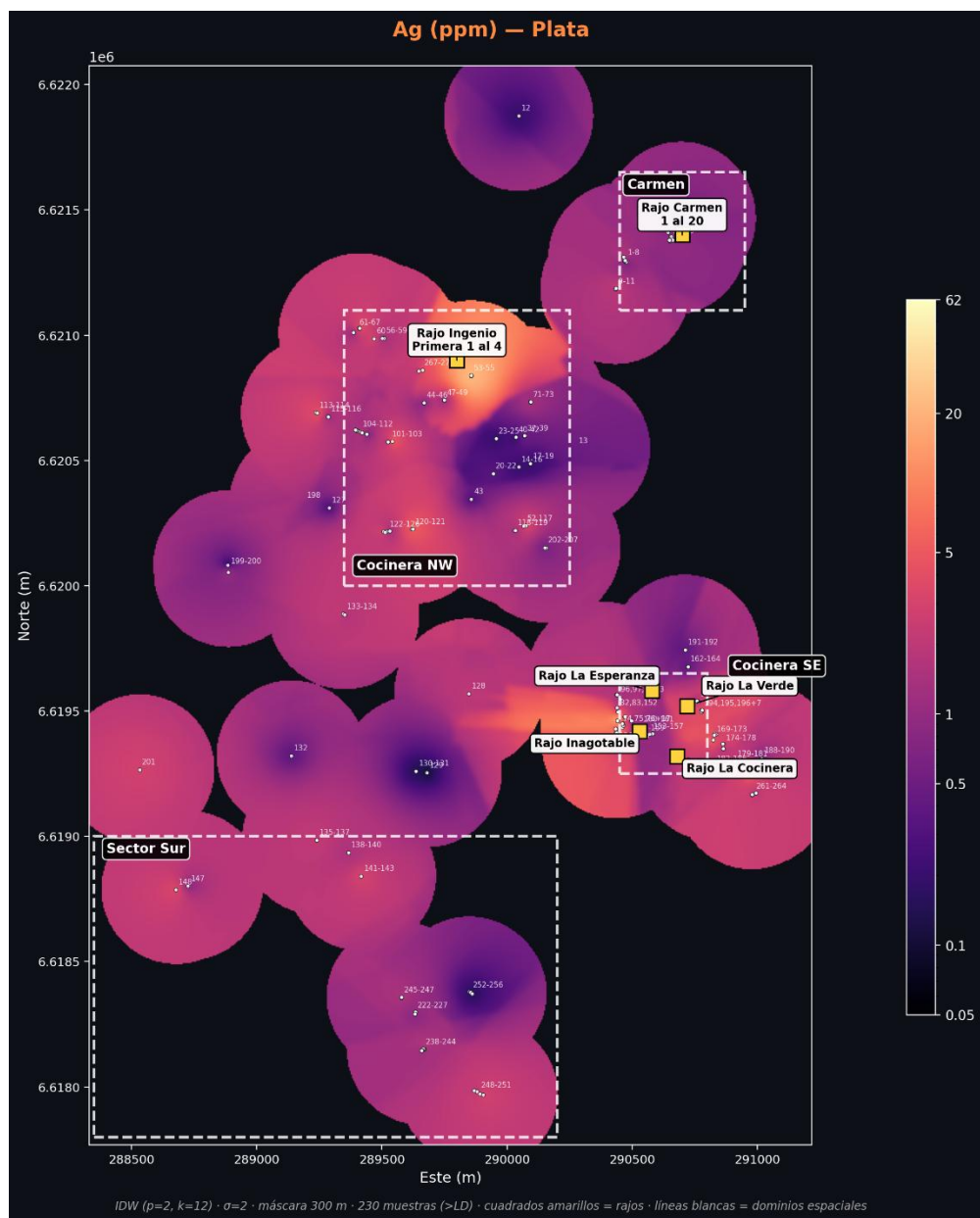


Figura 5.8 Distribución espacial de plata (Ag, ppm) en el distrito Cocinera–Inagotable. Elaboración propia a partir de la base ENAMI-SAMSA (2014).

- Distribución del índice de oxidación supérgena (CuS/CuT)

La razón CuS/CuT se utiliza como índice del grado de oxidación supérgena del cobre. Valores cercanos a 1 indican que prácticamente la totalidad del cobre presente se encuentra en fases solubles (típicamente atacamita, crisocola y otras fases supérgenas), mientras que valores bajos indican preservación de sulfuros de cobre. La razón se calculó para las muestras con CuT y CuS válidos ($n = 214$), excluyendo aquellas con razones físicamente imposibles ($\text{CuS} > \text{CuT}$). La mediana distrital es de 0,77, con un rango intercuartil de 0,50 a 0,94. Globalmente, el 45,3% de las muestras presentan razones superiores a 0,8 (dominancia de fases supérgenas) y el 8,4% presentan razones inferiores a 0,3 (preservación de sulfuros).

Dominio	n	CuS/CuT mediana	P25 – P75	% > 0,8	% < 0,5	Rasgo espacial	Rajos contenidos
Cocinera NW	71	0,88	0,55 – 0,97	56%	23%	Zona de máxima oxidación del distrito, con 17 muestras de CuS/CuT > 0,95 sobre CuT > 1,5%	Ingenio Primera 1 al 4
Cocinera SE	55	0,58	0,36 – 0,73	16%	42%	Dominio de transición; concentra las muestras de menor razón del distrito (m. 74, 78, 79, 195-197, 216, 218-219)	Esperanza, La Verde, Inagotable, La Cocinera
Sector Sur	17	0,87	0,80 – 0,90	76%	0%	Oxidación uniforme y elevada; n reducido por muestras con CuS cercano al límite de detección	(sin rajo)
Carmen	19	0,77	0,51 – 0,95	42%	21%	Razón variable, sin patrón espacial dominante	Rajo Carmen 1 al 20
Muestras periféricas	3	0,36	0,30 – 0,42	0%	100%	Valores anómalamente bajos (muestras 12 y 198)	(sin rajo)

Tabla N 5.3 Síntesis estadística del índice de oxidación supérgena (razón CuS/CuT) por dominio en el distrito Cocinera–Inagotable. Los dominios corresponden a los recuadros blancos discontinuos del mapa de la Figura 5.17. CuS/CuT $\approx$ 1 indica dominancia de cobre soluble (fases supérgenas); CuS/CuT < 0,3 indica preservación de sulfuros de cobre (Fuente: Elaboración propia).

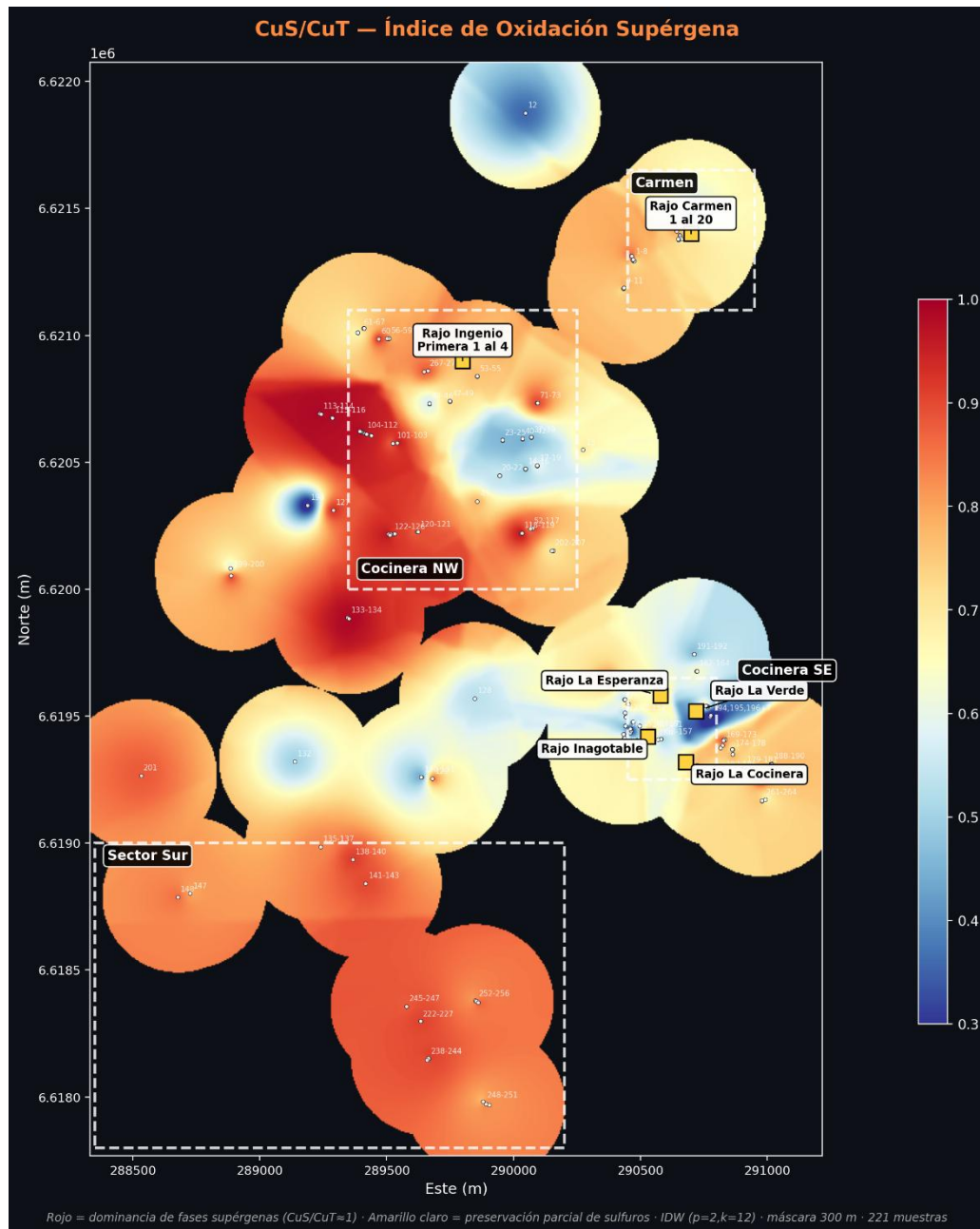


Figura 5.9 Distribución espacial de la razón CuS/CuT (índice de oxidación supérgena) en el distrito Cocinera–Inagotable. Elaboración propia a partir de la base ENAMI-SAMSA (2014).

5.3 Magnetotelúrica

5.3.1 Análisis dimensional y de sensibilidad

A partir del tensor de impedancias y las funciones de transferencia magnetotelúricas, se calcularon distintos parámetros que permiten evaluar la dimensionalidad de la estructura de resistividad eléctrica y, con ello, corroborar la validez de una modelación bidimensional. En este estudio se consideraron tres herramientas complementarias: los vectores de inducción (Parkinson, 1959), el rumbo geoeléctrico mediante el método Strike(Z) (Zhang et al., 1987) y las elipses del tensor de fase (Caldwell et al., 2004). Las curvas de resistividad eléctrica aparente y fase utilizadas como base de este análisis se presentan en el Anexo C para cada una de las estaciones.

Adicionalmente, el análisis de sensibilidad utilizado en este trabajo corresponde a un análisis determinista no lineal basado en la perturbación manual del modelo seleccionado, con el objetivo de examinar la variación en su ajuste tras dicha perturbación. En particular, en este estudio se realiza el análisis de sensibilidad para evaluar la profundidad de resolución de los modelos obtenidos.

5.3.2 Tensor de fase, skew y vector de inducción

Las pseudosecciones de los perfiles L1 a L4 se presentan en las Figuras 5.11 y 5.12, mostrando la distribución de las elipses del tensor de fase y los vectores de inducción en función de la frecuencia y la posición a lo largo de cada perfil. En este estudio se utiliza la convención de Parkinson (Parkinson, 1959), en la cual las flechas apuntan en dirección a las zonas de menor resistividad.

Las elipses de fase muestran un comportamiento similar en los cuatro perfiles: en altas frecuencias (rasgos someros) presentan formas próximas a circulares, mientras que en bajas frecuencias (mayores profundidades de investigación) se deforman progresivamente, adoptando formas elongadas y rotadas, con coloraciones azules que, en la escala empleada, corresponden a valores negativos del skew β .

Los vectores de inducción presentan una orientación preferente hacia el SE en los cuatro perfiles, reconocible en la mayoría de las estaciones a frecuencias intermedias y bajas. En los

perfiles L3 y L4 esta orientación se mantiene, aunque con mayor variabilidad lateral entre estaciones que en L1 y L2.

El análisis del parámetro skew β muestra valores cercanos a cero en la parte superficial de los cuatro perfiles, consistente con un comportamiento predominantemente bidimensional (Caldwell et al., 2004; Booker, 2014). Hacia frecuencias más bajas se registran valores que superan $\pm 3^\circ$, con mayor intensidad en los perfiles L1 y L2. Adicionalmente, se identifican dos anomalías locales: un valor puntual elevado en la estación L3_400 y una concentración de valores anómalos en el extremo NE del perfil L4 a bajas frecuencias.

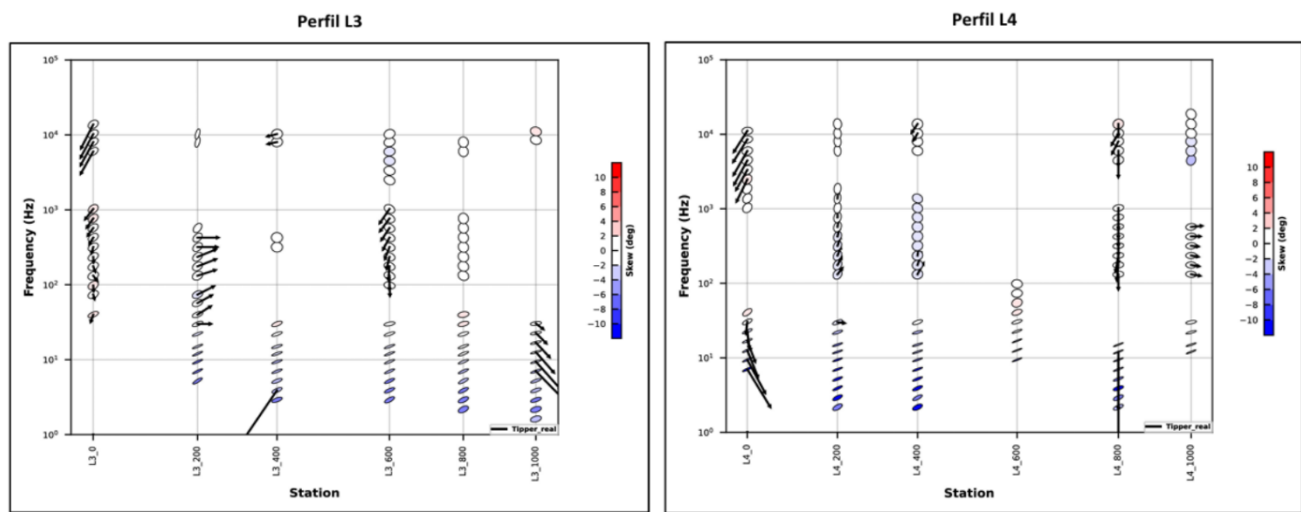


Figura 5.11 Pseudosección del perfil L1 y L2 (SO-NE) del sector Cocinera (GX Geoscience 2026).

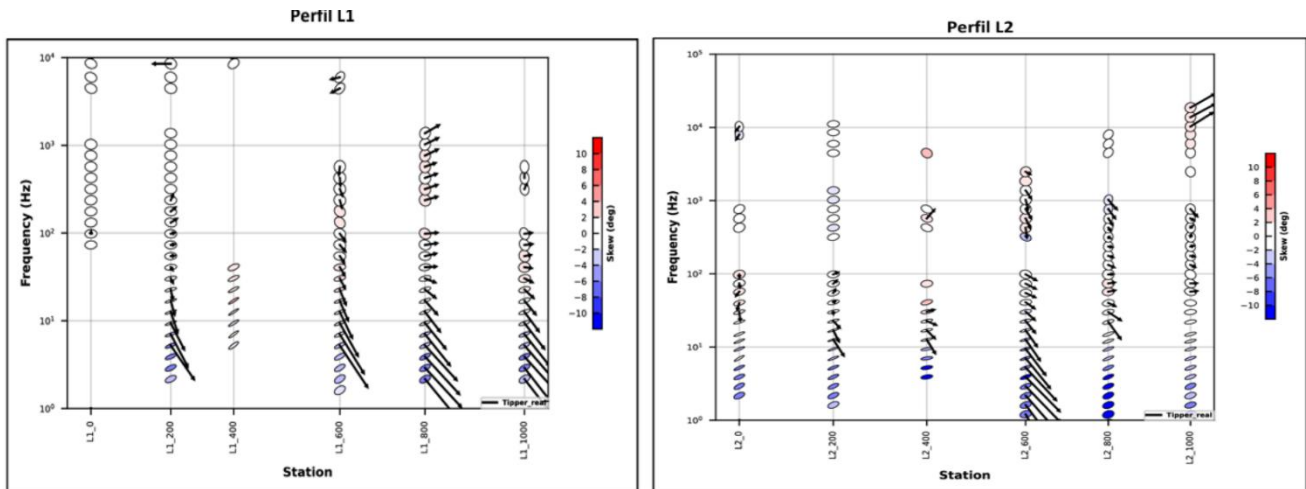


Figura 5.12 Pseudosección del perfil L3 y L4 (SO-NE) del sector Cocinera (GX Geoscience 2026).

5.3.3 Strike geoelectrical

A partir de las funciones de transferencia se estimó el rumbo geoelectrical (strike) para cada uno de los cuatro perfiles MT del distrito Cocinera, empleando dos metodologías complementarias: el método Strike(Z) (Zhang et al., 1987) y el PT Azimuth (Caldwell et al., 2004). Los diagramas de rosa (Figura 5.13) integran el rango completo de frecuencias registradas en cada estación, por lo que los valores reportados representan una tendencia promedio del strike geoelectrical; este parámetro puede variar con la frecuencia en respuesta a cambios en la dimensionalidad de la estructura a distintas profundidades (Caldwell et al., 2004; Booker, 2014).

Los resultados muestran un comportamiento contrastante entre los cuatro perfiles, sintetizado en la siguiente descripción:

Perfil L1. El Strike(Z) indica una orientación predominante en torno a $N90^{\circ}E$ (E–W), mientras que el PT Azimuth arroja un valor consistente cercano a $N85^{\circ}E$, confirmando la coherencia entre ambas metodologías. La dirección preferencial del strike geoelectrical se orienta principalmente E–W, o bien en su dirección complementaria N–S, debido a la ambigüedad de 90° inherente al método.

Perfil L2. El Strike(Z) presenta pétalos distribuidos en múltiples direcciones, con una leve tendencia en torno a $N60^{\circ}E$, mientras que el PT Azimuth exhibe una distribución aún más dispersa, con orientaciones variables cercanas a $N80^{\circ}E$ pero sin una concentración definida. La inconsistencia entre ambas metodologías y la alta dispersión angular observada indican que no es posible definir una dirección preferencial única para este perfil, sugiriendo un comportamiento geoelectrical tridimensional (3-D). Por esta razón, no se aplicó rotación del tensor de impedancias.

Perfil L3. Presenta características similares al perfil L2. El Strike(Z) muestra una leve concentración en torno a $N70^{\circ}E$, con pétalos distribuidos ampliamente, mientras que el PT Azimuth presenta una orientación cercana a $N55^{\circ}E$ con dispersión considerable. La inconsistencia entre ambas metodologías y la dispersión angular indican que la estructura

geoelectrica en este sector no responde a un modelo bidimensional simple, por lo que no se aplicó rotación del tensor de impedancias.

Perfil L4. El Strike(Z) indica una orientación predominante en torno a N75°E, mientras que el PT Azimuth presenta un valor consistente cercano a N75°E, mostrando una buena concordancia entre ambas metodologías. Aunque los diagramas de rosa exhiben pétalos secundarios subordinados, la dirección principal se encuentra bien resuelta. La dirección preferencial del strike geoelectrico se orienta principalmente en torno a N75°E, o bien en su dirección complementaria N15°W, debido a la ambigüedad de 90° del método.

Los perfiles L1 y L4 presentan un strike geoelectrico bien definido y consistente entre ambas metodologías, compatible con una aproximación bidimensional válida. En contraste, los perfiles L2 y L3 exhiben dispersión angular elevada e inconsistencia metodológica, indicando un comportamiento geoelectrico tridimensional que limita la aplicación del modelo 2D. Esta evaluación es retomada en la sección de Limitaciones del estudio.

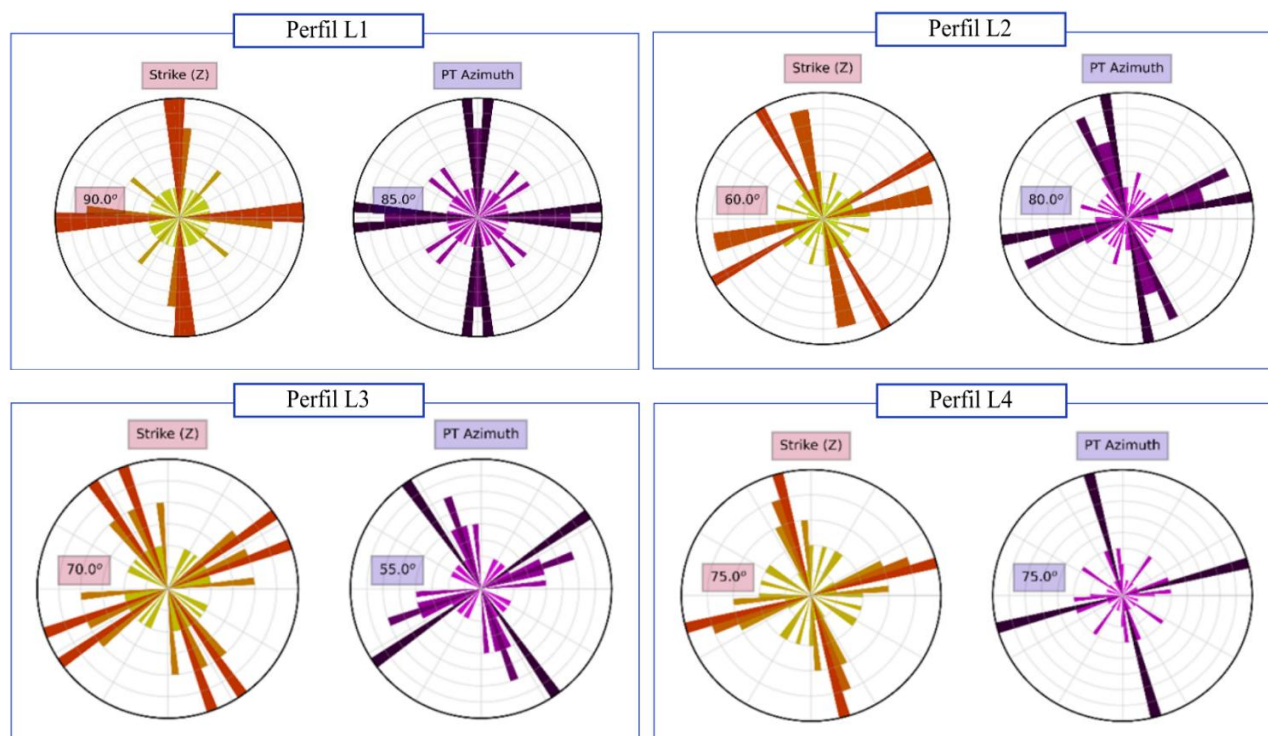


Figura 5.13 Diagramas de rosa del strike geoelectrico correspondientes a los perfiles L1, L2, L3 y L4 (GX Geoscience 2026).

5.3.4 Evaluación de la calidad de los modelos de resistividad

En esta subsección se presentan los parámetros de inversión utilizados, los valores de ajuste (RMS) de cada modelo, y los resultados del análisis de sensibilidad y dimensionalidad, con el objetivo de establecer el grado de confiabilidad de los modelos de resistividad previo a su descripción.

- Calidad del ajuste (RMS)

En la Tabla 5.4, se presentan los valores de error cuadrático medio (R.M.S.) asociados a los modelos de resistividad eléctrica magnetotelúricos (MT) bidimensionales (2D), los cuales permiten evaluar el nivel de ajuste entre los datos observados y la respuesta calculada de los modelos.

RMS < 1,5: ajuste excelente.
RMS 1,5 – 2,5: ajuste muy bueno.
RMS 2,5 – 3,5: ajuste aceptable.
RMS > 3,5: ajuste pobre.

Perfil	Ajuste (RMS)
L1	1,4275
L2	1,1315
L3	1,4186
L4	1,5266

Tabla N 5.4

Los perfiles L1, L2, L3 y L4 presentan valores de RMS inferiores a 1,5, correspondientes a un ajuste excelente. Las curvas de resistividad eléctrica aparente y fase de los datos medidos para cada estación se presentan en el Anexo C.

5.3.5 Modelos de resistividad

Previo a la descripción de las secciones de resistividad, la Tabla 5.5 presenta los rangos de resistividad observados en los modelos de inversión 2D y su interpretación litológica propuesta, basada en los rangos de referencia establecidos por Palacky (1987), Telford et al. (1990) y Aguilef (2012).

Rango observado (Ωm)	Color en modelos MT	Interpretación litológica / alteración	Rango de referencia (Ωm)	Fuente
> 2.000 – 3.000	Rojo	Andesita fresca, competente, baja porosidad, sin alteración significativa. Dominio geoquímicamente estéril	1.000 – 10.000 (rocas volcánicas frescas)	Modificado de Palacky (1987); Telford et al. (1990)
500 – 2.000	Naranja – amarillo	Andesita moderadamente competente, alteración propilítica marginal y/o silicificación parcial	500 – 5.000 (alt. incipiente)	Modificado de Palacky (1987)
200 – 500	Verde	Andesita con alteración clorítica a propilítica, fracturamiento menor. Zona de transición	100 – 1.000 (alt./fracturadas)	Modificado de Telford et al. (1990); Palacky (1987)
50 – 200	Cyan – celeste	Andesita con alteración argílica moderada, fracturamiento, parcialmente saturada	10 – 200 (arcillas / sat. parcial)	Modificado de Palacky (1987); Telford et al. (1990)
< 50	Azul – morado	Alteración argílica intensa, arcillas, alta porosidad secundaria, humedad meteórica. Fase III supérgena y/o zona de falla saturada	1 – 100 (arcillas / fallas saturadas)	Modificado de Palacky (1987); Telford et al. (1990)
5 – 100	—	Roca con sulfuros en vetillas interconectadas y/o stockwork (Py, Cpy, Bn). Solo detectable cuando forman una red conectada	Vetillas: 5–100 Diseminado: no reduce resistividad	Aguilef (2012); Palacky (1987)

Tabla 5.5 Interpretación litológica de los dominios de resistividad eléctrica del distrito Cocinera–Inagotable (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se presentan los modelos de resistividad desarrollados a partir de los perfiles, incluyendo la estimación de las profundidades de investigación y la validez de los modelos bajo cada estación, en concordancia con los resultados del proceso de inversión 2D descrito previamente.

En las Figuras 5.14 a 5.17, se presentan los modelos de resistividad eléctrica obtenidos a partir de la inversión bidimensional (2D) de los datos magnetoteléuticos correspondientes a los perfiles L1 a L4, adquiridos en el sector Ovalle, Distrito Cocinera. Los modelos muestran la distribución de resistividad en función de la distancia a lo largo de cada perfil y la elevación, incorporando la topografía local y la ubicación de las estaciones MT. La escala cromática utilizada representa los valores de resistividad eléctrica, permitiendo reconocer contrastes laterales y verticales significativos, asociados a variaciones en las propiedades físicas del subsuelo, que constituyen la base para la interpretación de estructuras geofísicas.

Perfil L1

El modelo de resistividad del perfil L1 (Figura 5.19) presenta un predominio de valores intermedios entre 150 y 500 Ωm (tonalidades verdes), que constituyen el dominio de fondo (*background*) del perfil y se distribuyen tanto en la zona superficial como en profundidad. Dentro de este dominio se distinguen dos tipos de anomalías:

Por una parte, se identifican zonas de baja resistividad (10–100 Ωm , tonalidades morado, azul oscuro y celeste), confinadas principalmente dentro de los primeros 50 m de profundidad. Estas anomalías conductivas se reconocen bajo las estaciones L1_200 y L1_400, donde alcanzan sus valores más bajos (<50 Ωm , morado), y presentan continuidad lateral parcial entre ambas estaciones. Bajo la estación L1_0, hacia el SW del perfil, se observa una anomalía conductiva adicional que se extiende a mayor profundidad respecto a las anteriores, entre los 350 a 400 m.s.n.m.

Por otra parte, se reconocen zonas de alta resistividad (700–2000 Ωm , tonalidades amarillas a naranja), localizadas en dos sectores del perfil: en la parte profunda del extremo suroccidental, bajo la estación L1_200 (350 m de profundidad), y bajo las estaciones L1_800 y L1_1000 (50 a 100 m de profundidad), en el sector nororiental. En ambos casos, el contacto

entre estas zonas resistivas y el dominio de fondo presenta una geometría irregular, con variaciones laterales a lo largo del perfil.

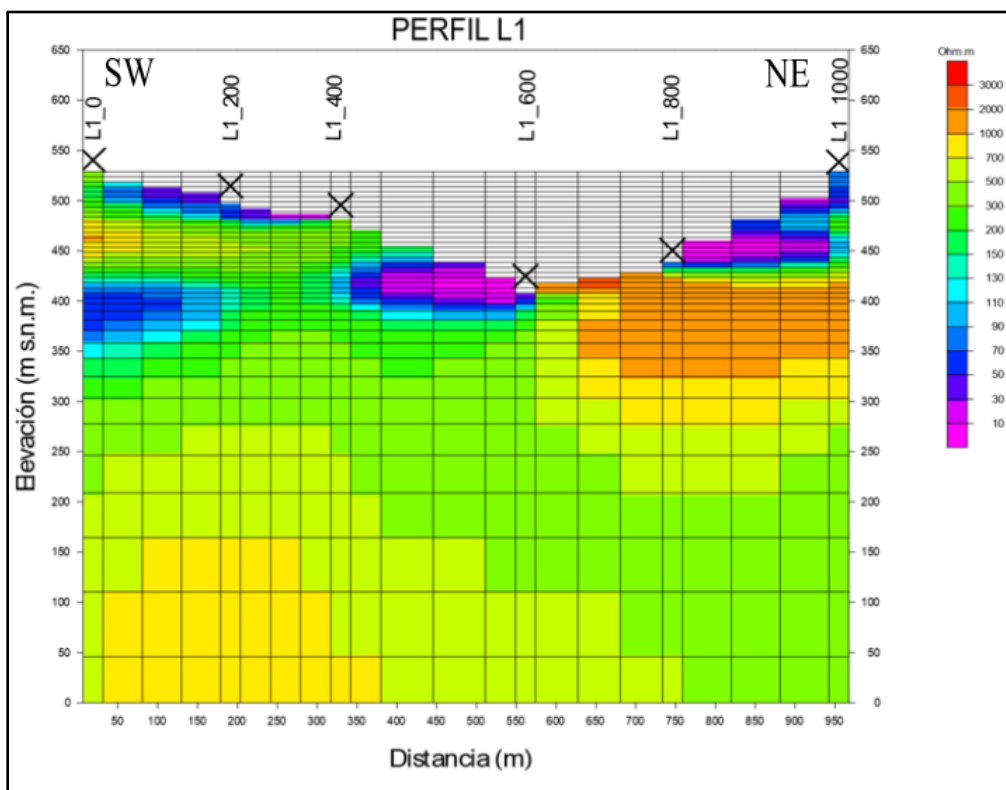


Figura 5.14 Modelo de resistividad eléctrica sector Cocinera, correspondientes al perfil L1

Perfil L2

El modelo del perfil L2 (Figura 5.20) presenta una zona resistiva profunda ($>3000 \Omega \cdot m$, tonalidades rojas) bien desarrollada, que asciende hacia el extremo SW del perfil y se ubica a profundidades mayores hacia el NE, donde su techo se sitúa bajo los 300 m s.n.m. en el extremo oriental.

Por encima de esta zona resistiva, se reconoce una zona somera de bajas resistividades ($10\text{--}100 \Omega \cdot m$, tonalidades moradas a azules) distribuida en dos sectores principales: bajo las estaciones L2_0 y L2_400 (entre 420 y 460 m s.n.m.), con un quiebre lateral bajo la estación intermedia L2_200 donde la anomalía no se prolonga; y en el extremo NE del perfil, bajo las estaciones L2_800 y L2_1000, donde alcanza los valores más conductivos de la sección ($<30 \Omega \cdot m$, tonalidades fucsia a morado oscuro) en posición muy somera (≈ 450 m s.n.m.).

Entre ambos dominios se reconoce una zona intermedia de transición (200–1000 $\Omega\cdot\text{m}$, tonalidades verdes a amarillas) con espesores variables, que separa las anomalías conductivas someras del basamento resistivo profundo.

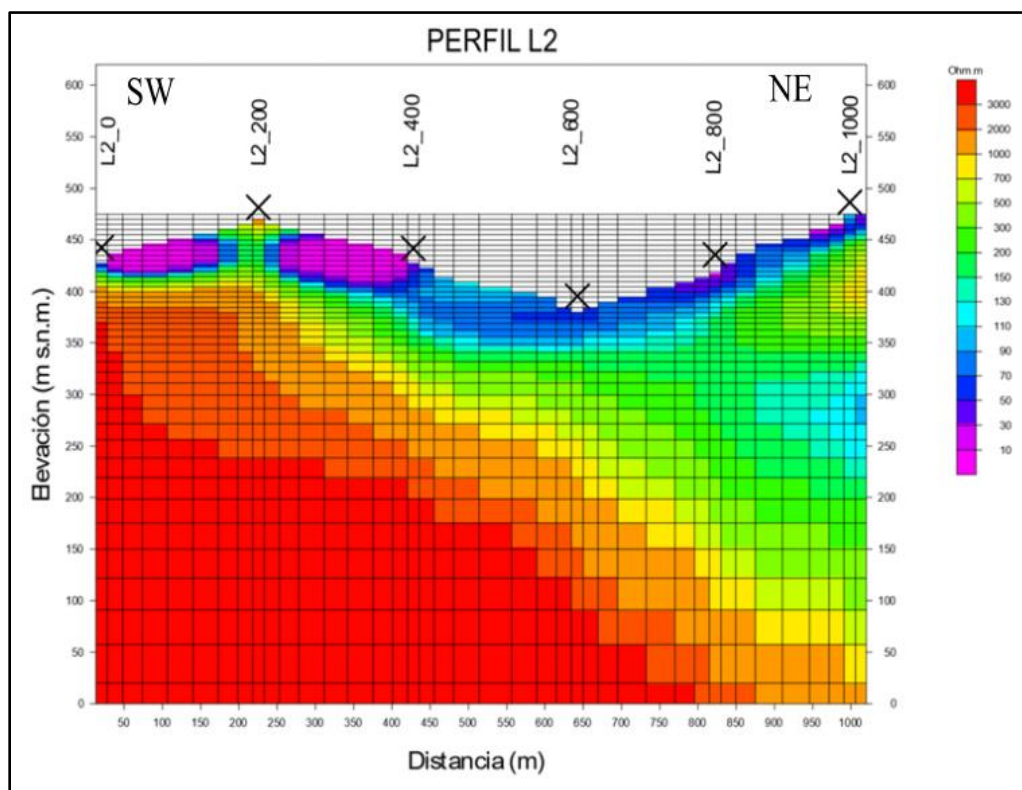


Figura 5.15 Modelo de resistividad eléctrica sector Cocinera, correspondientes al perfil L2

Perfil L3

El modelo del perfil L3 (Figura 5.21) presenta el dominio resistivo profundo más masivo del conjunto de perfiles, con valores superiores a 3000 $\Omega\cdot\text{m}$ (tonalidades rojas) que asciende fuertemente hacia el extremo SW, donde su techo alcanza los 250–300 m s.n.m. directamente bajo las estaciones L3_0 y L3_200.

El rasgo más distintivo de este perfil es una anomalía conductiva continua (10–70 $\Omega\cdot\text{m}$, tonalidades fucsias a azul oscuro) que se extiende lateralmente bajo las estaciones L3_400 a L3_600 y penetra hacia el interior del modelo. Esta anomalía muestra continuidad lateral entre las tres estaciones y una profundización progresiva hacia el NE, alcanzando aproximadamente los 250 m s.n.m. bajo la estación L3_600. En su posición más somera, bajo

L3_400, se reconocen los valores más bajos de resistividad del perfil ($<10 \Omega \cdot m$, tonalidad fucsia).

La zona intermedia de transición ($200\text{--}1000 \Omega \cdot m$, tonalidades verdes a amarillas) se reconoce como una franja delgada que separa la anomalía conductiva central del basamento resistivo profundo.

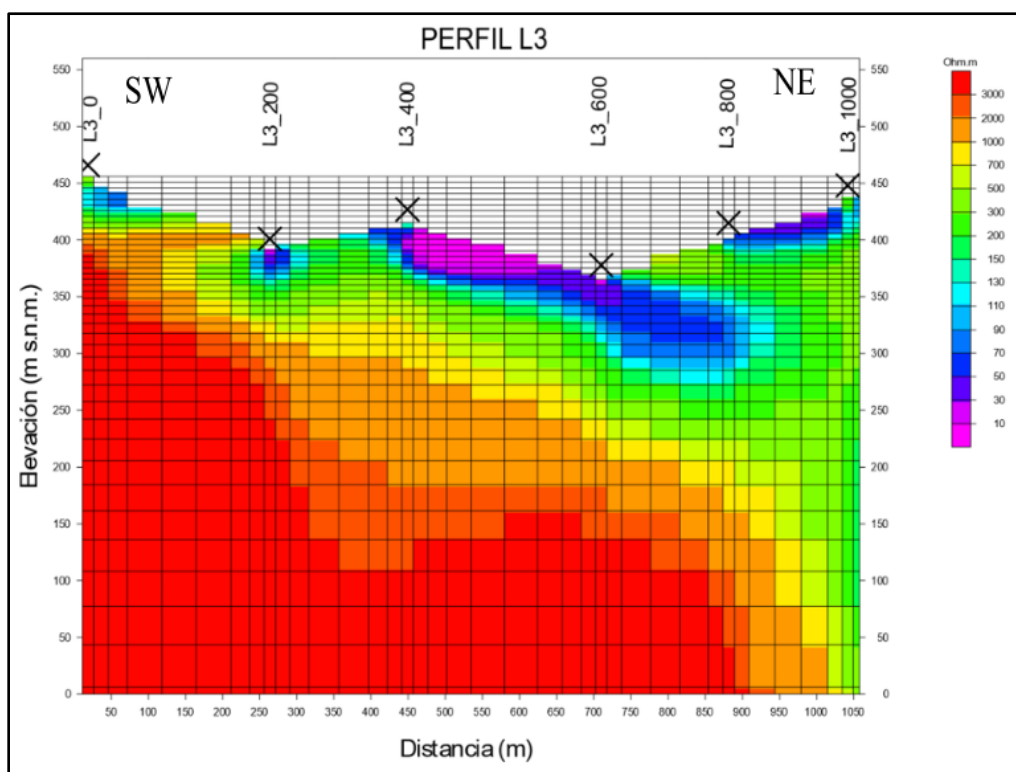


Figura 5.16 Modelo de resistividad eléctrica sector Cocinera, correspondientes al perfil L3.

Perfil L4

El modelo del perfil L4 (Figura 5.22) presenta el basamento resistivo profundo más extenso del conjunto ($>3000 \Omega \cdot m$, tonalidades rojas), que ocupa la parte inferior del perfil con techo relativamente regular en torno a los 280–320 m s.n.m.

El rasgo más distintivo de este perfil es una anomalía conductiva intensa ($10\text{--}70 \Omega \cdot m$, tonalidades fucsias a azul oscuro) localizada en el extremo NE, bajo las estaciones L4_800 y L4_1000. Esta anomalía es somera ($\approx 330\text{--}400$ m s.n.m.) y presenta los valores más bajos de resistividad del perfil ($<30 \Omega \cdot m$, fucsia). Hacia el extremo SW, bajo las estaciones L4_0 a L4_400, se reconoce una segunda zona conductiva, más delgada y de menor intensidad ($\approx 10\text{--}100 \Omega \cdot m$), restringida a los primeros metros bajo la superficie.

Entre ambas zonas conductivas, en el sector central del perfil bajo las estaciones L4_400 a L4_600, la zona intermedia de transición (200–1000 $\Omega\cdot\text{m}$, tonalidades verdes a amarillas) muestra un mayor desarrollo vertical, alcanzando ~ 300 m s.n.m. y conformando un sector relativamente menos conductivo entre las dos anomalías someras.

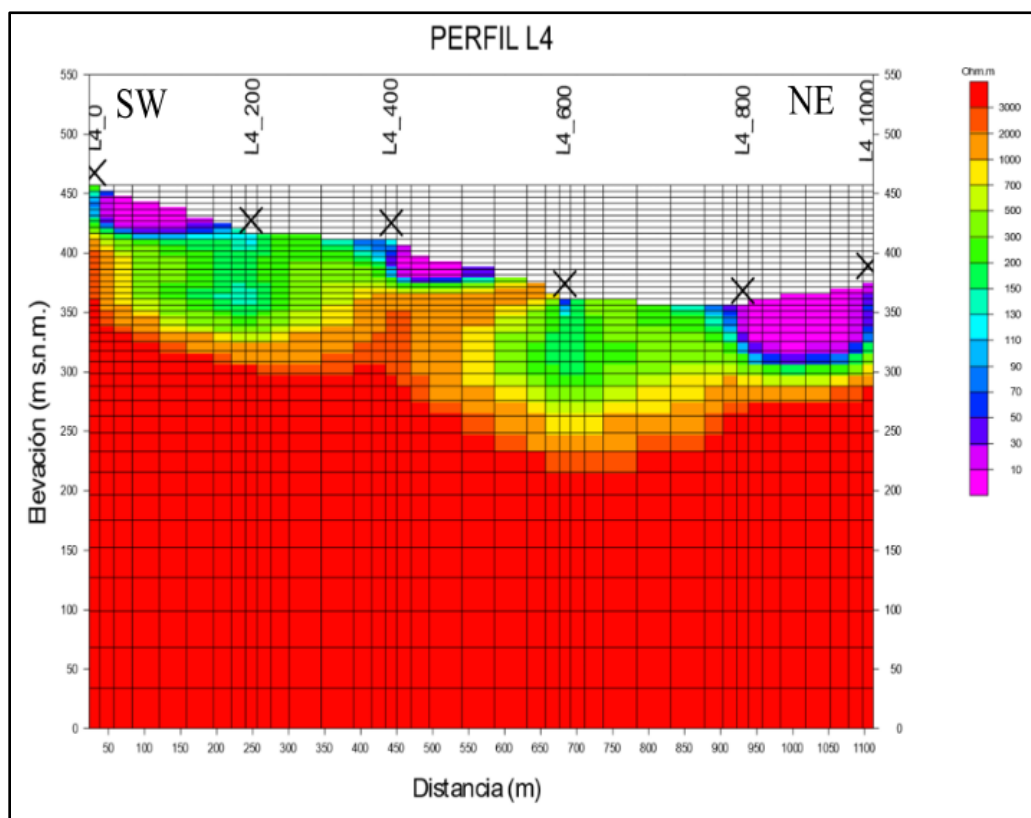


Figura 5.17 Modelo de resistividad eléctrica sector Cocinera, correspondientes al perfil L4.

5.3.4 Análisis en planta de la resistividad eléctrica

Para evaluar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo a distintas profundidades, se generaron cortes en plantas de los modelos de resistividad eléctrica a cuatro niveles de elevación: planta superficial, planta a 350 m.s.n.m, planta a 250 m.s.n.m y planta a 150 m.s.n.m.

En la planta superficial (Figura 5.18, izquierda), se observa una alta heterogeneidad en la distribución de resistividades. Múltiples dominios de baja resistividad ($< 50 \Omega\text{m}$) se

distribuyen a lo largo del área, alternando con sectores de resistividad intermedia (130–200 Ωm). Las anomalías conductivas más intensas presentan una tendencia preferencial en dirección NW- SE (L1-600/L2-600/L4-800) y EW (L2-200/L3-800), con valores puntuales inferiores a 30 Ωm . El sector de L1-800 presenta los valores más altos del nivel, superiores a 700 Ωm .

En la planta a 350 m s.n.m. (Figura 5.18, derecha), la distribución se simplifica respecto al nivel superficial. El sector SW (L2-0 a L3-0) presenta valores de alta resistividad (>2.000 Ωm), mientras que el sector NW (L1-0 a L1-600) mantiene valores intermedios (~200 Ωm). El sector NE del perfil L1 (L1-600 a L1-1000) presenta resistividades moderadas a altas (500–700 Ωm). El perfil L2 muestra una transición desde alta resistividad en el SW hacia valores intermedios (~200 Ωm) desde L2-400 en adelante. Se identifica una anomalía conductiva focalizada en el entorno de L3-600/L3-800 (<50 Ωm), la cual se conecta lateralmente con otra anomalía de baja resistividad en L4-800 a L4-1000 (<70 Ωm).

En la planta a 250 m s.n.m. (Figura 5.19, izquierda), el dominio de alta resistividad (>2.000 Ωm) se expande considerablemente, abarcando desde el SW (L2-0 a L4-0). El corredor del perfil L1 mantiene resistividades intermedias (~200 Ωm) a lo largo de toda su extensión. El sector NE del perfil L2 (L2-600 a L2-1000) presenta valores intermedios a bajos (130–200 Ωm), diferenciándose del basamento resistivo circundante.

En la planta a 150 m s.n.m. (Figura 5.19, derecha), los valores de alta resistividad (>2.000 Ωm) dominan la mayor parte del área de estudio, particularmente los sectores sur, sureste y suroeste. El corredor del perfil L1 mantiene resistividades intermedias (~200–500 Ωm), constituyendo el único sector que preserva valores por debajo de 1.000 Ωm a esta profundidad. El sector NE del perfil L2 (L2-600 a L2-1000) presenta valores intermedios (~200 Ωm).

En conjunto, la comparación entre los cuatro niveles muestra una progresiva homogeneización de las resistividades en profundidad, con expansión del dominio de alta resistividad y reducción de las anomalías conductivas, las cuales se restringen a sectores específicos del área de estudio.

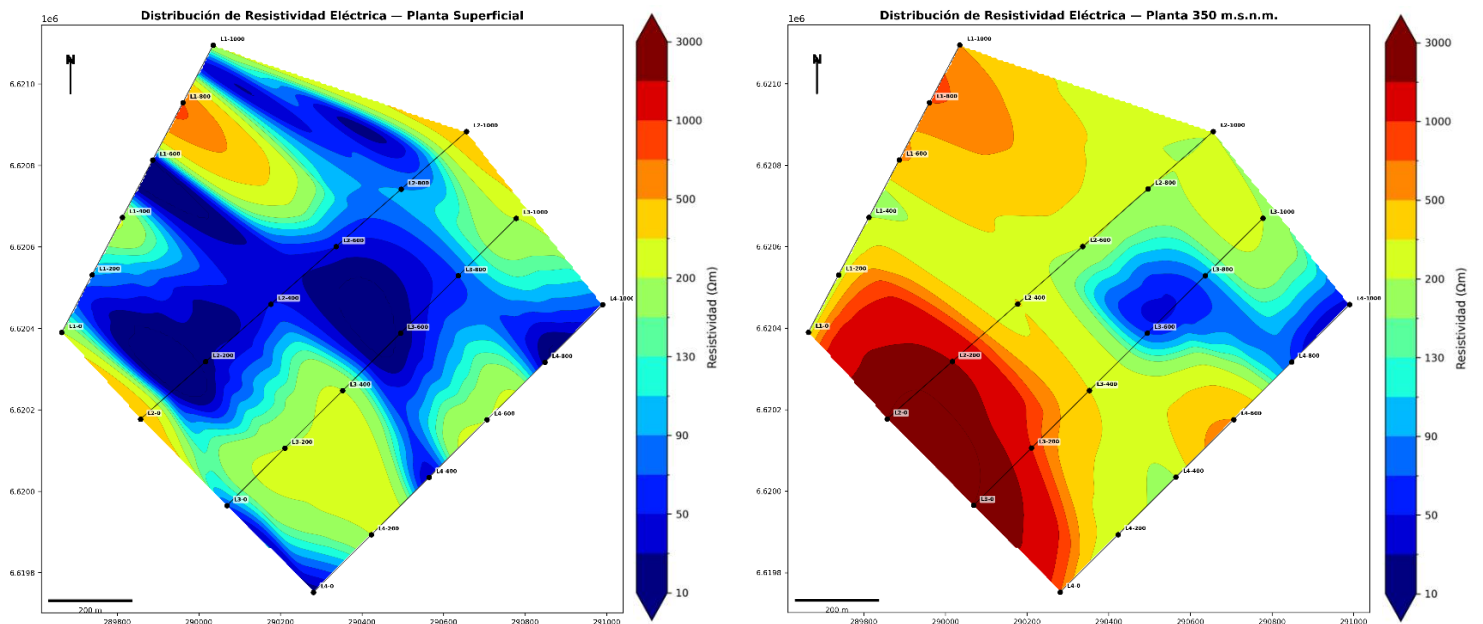


Figura 5.18 Distribución de resistividad eléctrica en planta superficial y en planta a 350 m, sector Cocinera (Fuente: Elaboración propia).

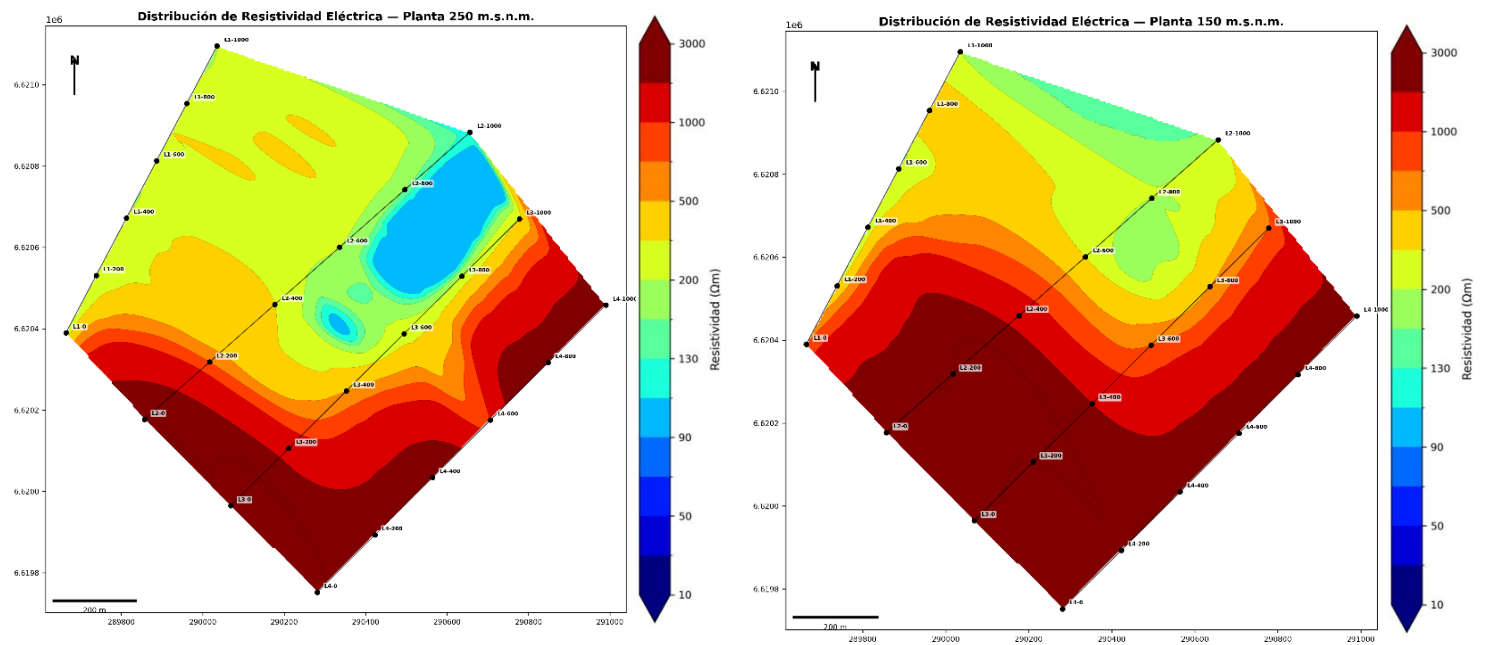


Figura 5.19 Distribución de resistividad eléctrica en planta 250 m y en planta a 150 m, sector Cocinera (Fuente: Elaboración propia).

5.3.5 Correlación entre modelos de resistividad y sondajes

La ubicación en planta de los nueve sondajes diamantinos ejecutados por ENAMI en el sector Cocinera se presenta en las Figuras 5.20 a 5.22 (plantas de resistividad a niveles superficial, 350 m s.n.m. y 250 m s.n.m., con sondajes superpuestos).

De los nueve sondajes, tres fueron seleccionados para describir en detalle la relación entre los dominios de resistividad y la información geológica en profundidad, EN-594-23, ubicado en un dominio de resistividad intermedia (200–500 Ωm ; tonalidades verdes); EN-595-23, en una zona de transición hacia resistividades altas (>700 Ωm ; tonalidades amarillas a naranja); EN-598-23, en un dominio de baja resistividad (<50 Ωm ; tonalidades azul oscuro).

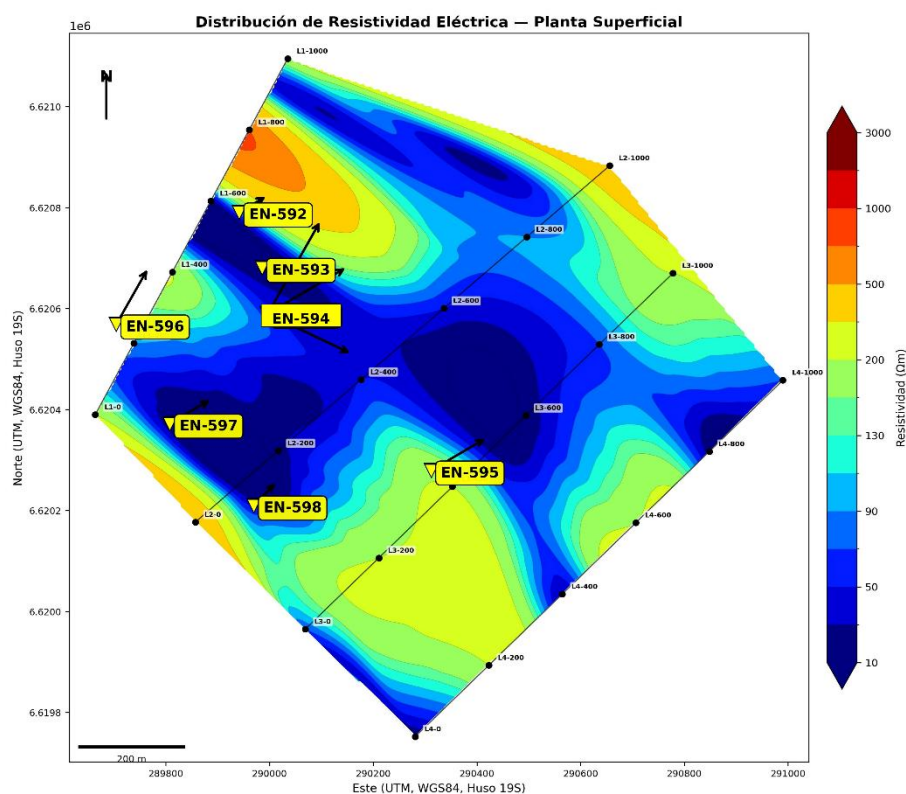


Figura 5.20 Distribución de resistividad eléctrica en planta superficial, sector Cocinera, con ubicación de los nueve sondajes diamantinos (ENAMI, 2023). Los triángulos indican la posición del collar y las flechas la dirección del azimut de perforación (Fuente: Elaboración propia).

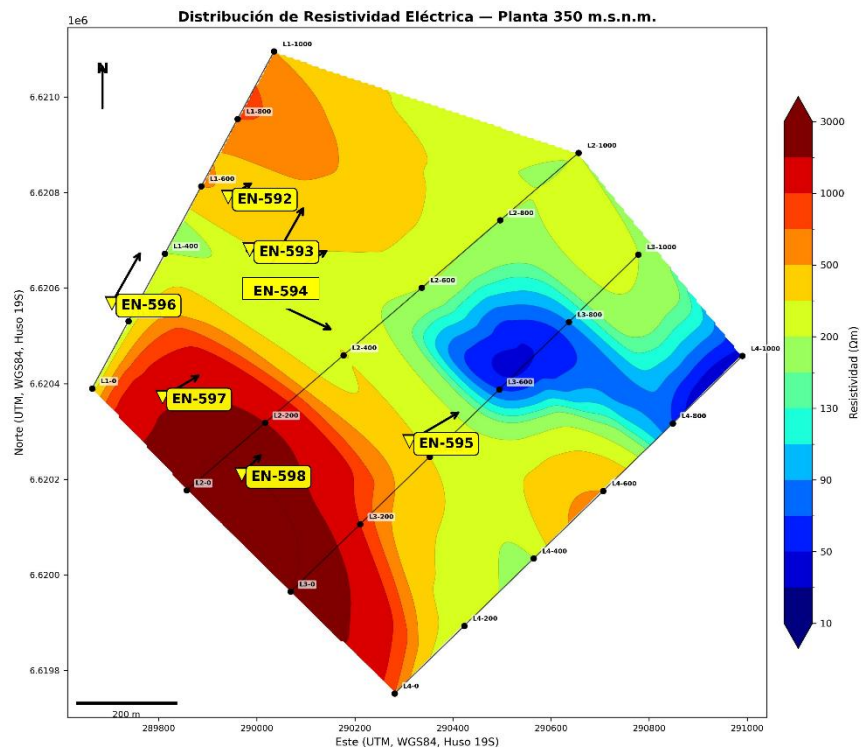


Figura 5.21 Distribución de resistividad eléctrica en planta a 350 m.s.n.m., sector Cocinera, con ubicación de sondajes diamantinos (Fuente: Elaboración propia).

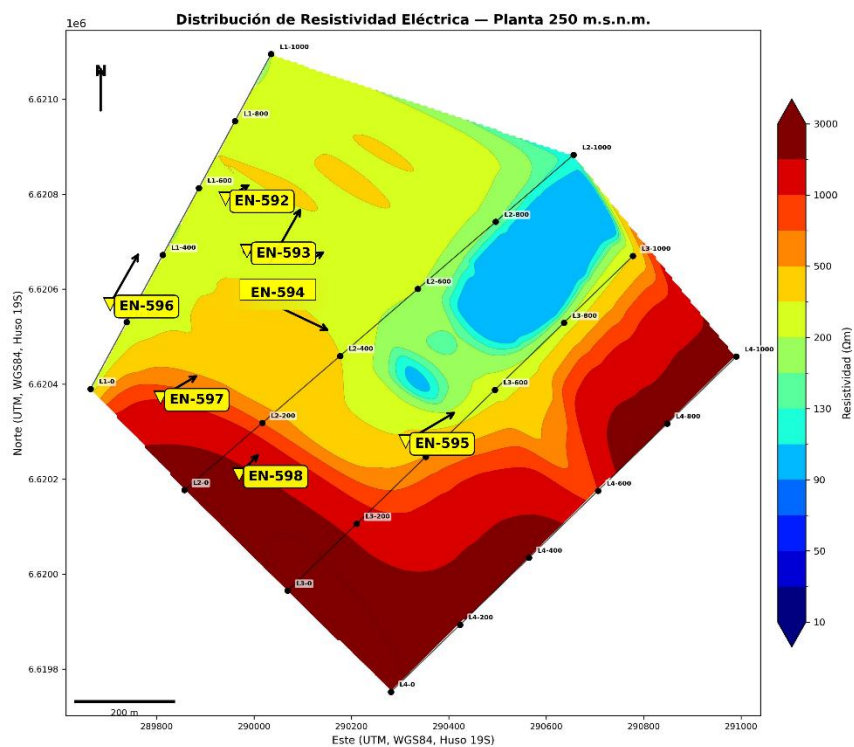


Figura 5.22 Distribución de resistividad eléctrica en planta a 250 m.s.n.m., sector Cocinera, con ubicación de sondajes diamantinos (Fuente: Elaboración propia).

Sondaje EN-594-23 (Az: 30°; Dip: -60°; Prof: 123,3 m). Ubicado en el sector centro-norte del área de estudio, próximo a la estación L2_400 del perfil L2 (~110 m). Este sondaje atravesó una secuencia de brechas volcánicas con alteración hidrotermal intensa desde los 76,45 m hasta el fondo del sondaje. En este tramo se interceptaron múltiples zonas con mineralización de sulfuros (pirita, calcopirita y bornita), con leyes que alcanzan un máximo de 1,52 % CuT a los 102,6–103,2 m de profundidad. Estas zonas mineralizadas se ubican a elevaciones entre 350 y 280 m s.n.m. En las plantas de resistividad a 350 y 250 m s.n.m. (Figuras 5.21 y 5.22), la posición del sondaje coincide con dominios de resistividad intermedia (200–500 Ω m). Los tramos de baja ley con sulfuros diseminados (76–83 m y 107–119 m) se ubican dentro del mismo rango de resistividad intermedia.

Sondaje EN-595-23 (Az: 60°; Dip: -70°; Prof: 110 m). Ubicado en el sector noreste del área de estudio, próximo a la estación L3_400 del perfil L3 (~60 m). Este sondaje interceptó un cuerpo subvolcánico con clorita y magnetita entre los 34,35 y 46,3 m, seguido por brechas volcánicas e hidrotermales con sulfuros diseminados de baja ley desde los 54 m hasta el fondo del sondaje. La ley máxima registrada fue de 0,34 % CuT. En las plantas de resistividad (Figuras 5.21 y 5.22), la posición del sondaje coincide con una zona de transición desde valores intermedios (200–500 Ω m) a altos (>1.000 Ω m; tonalidades naranja a rojo).

Sondaje EN-598-23 (Az: 45°; Dip: -80°; Prof: 110 m). Ubicado en el sector centro-norte del área de estudio, próximo a la estación L2_200 del perfil L2 (~130 m). Este sondaje atravesó andesitas brechosas con alteración hidrotermal intensa entre los 17,9 y 53,8 m de profundidad. En este intervalo se identificaron zonas de alteración con relictos de cobre y hierro (15,7–31,9 m y 36,4–42,8 m), una veta de óxidos de cobre (malaquita) a los 31,9–32,3 m, y estructuras mineralizadas con calcopirita diseminada (46,7–49,4 m). En la planta de resistividad superficial (Figura 5.20), la posición del sondaje coincide con uno de los dominios de menor resistividad del área de estudio (<50 Ω m; tonalidades azul oscuro a morado).

La planta de resistividad a 150 m s.n.m. no fue considerada en este análisis, dado que los sondajes seleccionados alcanzan profundidades máximas entre 110 y 123,3 m desde la superficie, lo que equivale a elevaciones mínimas del orden de 290–305 m s.n.m.

CAPÍTULO VI: DISCUSIONES

El distrito Cocinera–Inagotable se caracteriza por un sistema mineralizado situado en un contexto volcánico–intrusivo mesozoico. La configuración estructural y litológica de esta región condiciona la distribución espacial de la mineralización observada. A partir de los resultados mineralógicos, geoquímicos, estructurales y geofísicos obtenidos en este estudio, se llevó a cabo un análisis para interpretar los procesos que controlaron el emplazamiento de la mineralización y la evolución del sistema hidrotermal.

Este capítulo tiene como objetivo interpretar las asociaciones minerales identificadas, la distribución de los elementos y la geometría eléctrica del subsuelo, estableciendo relaciones entre estas evidencias y el marco estructural que rige en el distrito. La discusión se organizará a partir de la integración de los resultados obtenidos, permitiendo evaluar de manera conjunta los factores que influyeron en el desarrollo del sistema mineralizado.

6.1 Secuencia paragenética

La tabla de temporalidad mineral presentada a continuación se construyó a partir del análisis integrado de las relaciones texturales, asociaciones mineralógicas y proporciones volumétricas descritas en el estudio petrográfico–calcográfico.

La definición de esta secuencia se fundamentó en las relaciones de corte y reemplazo observadas en los cortes pulidos. Entre los criterios utilizados se encuentran: el reemplazo parcial de pirita por bornita a través de microfracturas, la presencia de inclusiones tipo *blebs* de calcopirita en bornita, el desarrollo de hidróxidos de hierro como pseudomorfos de pirita, y la existencia de fracturas tardías rellenas por carbonatos que cortan vetillas previas de minerales opacos. Estas relaciones texturales permitieron establecer la cronología relativa que se presenta en la Tabla 6.1.

Estas observaciones permitieron reconocer una secuencia paragenética compuesta por cuatro fases: una etapa hidrotermal temprana rica en hierro (Fase I), un pulso hidrotermal principal de mineralización cuprífera asociado al relleno de vetas y reemplazo de la roca de caja (Fase II), una etapa de oxidación y enriquecimiento supergénico (Fase III) y una etapa tardía de alteración supérgena residual (Fase IV).

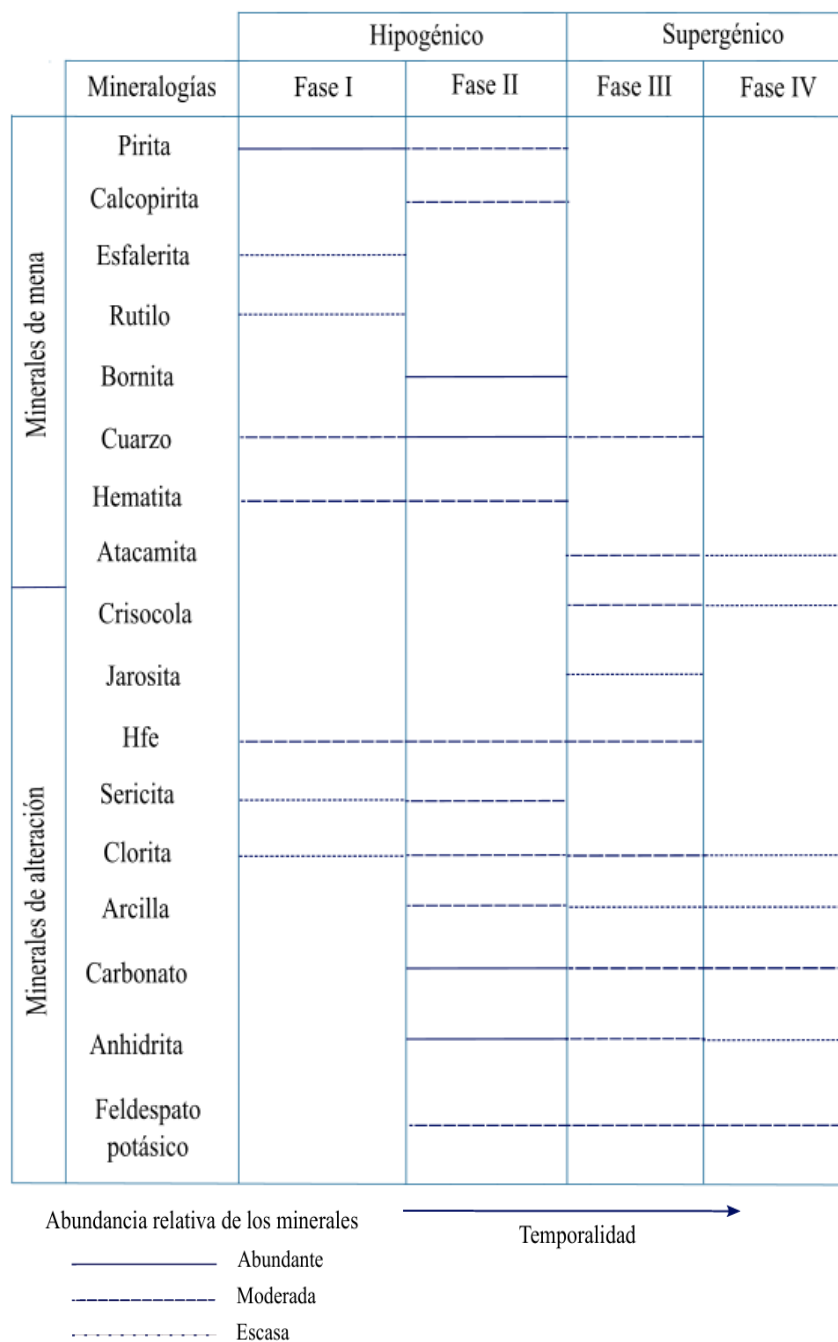


Tabla N 6.1 Secuencia paragenética relativa del sistema mineralizado del distrito Cocinera–Inagotable (Fuente: Elaboración propia).

- Evolución paragenética del sistema mineralizado

En base al análisis mineralógico de cortes pulidos, la identificación de relaciones texturales y a la integración con los antecedentes geológicos del distrito, se reconocieron cuatro fases paragenéticas principales que reflejan la evolución temporal del sistema mineralizado del

distrito Cocinera–Inagotable. Estas fases representan una sucesión de eventos hidrotermales y supérgenos, desde etapas tempranas de mineralización hipógena hasta procesos tardíos de oxidación y enriquecimiento secundario de cobre. La secuencia paragenética definida permite reconstruir la historia evolutiva del sistema y constituye la base para la interpretación genética propuesta para el distrito.

❖ Fase I - Etapa hidrotermal temprana rica en Fe

La Fase I corresponde a la etapa más temprana reconocida en la evolución paragenética del sistema mineralizado. Esta fase se caracteriza por la precipitación inicial de sulfuros de hierro, dominada por pirita, acompañada de calcopirita subordinada y trazas de esfalerita.

Desde el punto de vista mineralógico y textural, los sulfuros de esta fase se presentan generalmente como cristales euhedrales a subhedrales, localmente fracturados y parcialmente reemplazados por asociaciones posteriores, lo que indica su carácter temprano dentro de la secuencia paragenética. Asociados a esta etapa se reconocen minerales accesorios como rutilo, así como un desarrollo incipiente de alteración clorítica y sericítica, principalmente en la matriz de la roca de caja andesítica.

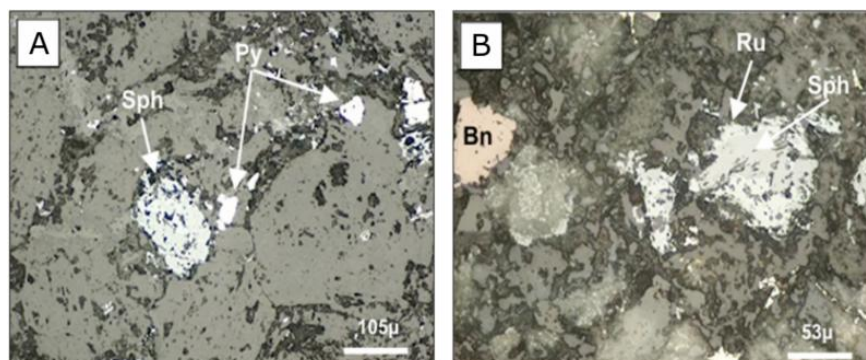


Figura 6.1 (A) Esfalerita y pirita diseminada, nicoles paralelos, 100X. (B) Rutilo intercrecido con esfalerita. Cristal anhedral de bornita, nicoles paralelos, 200X (Fuente: Elaboración propia).

❖ Fase II – Etapa principal de sulfuros de cobre

La Fase II corresponde a la etapa principal de mineralización cuprífera del sistema y se caracteriza por un aumento significativo en la abundancia de sulfuros de cobre, dominados por calcopirita y bornita, con presencia subordinada de pirita. Desde el punto de vista textural, los sulfuros de esta fase se presentan tanto en forma de vetillas como de diseminaciones en la roca de caja, mostrando relaciones de reemplazo parcial de pirita temprana por calcopirita y bornita, así como contactos irregulares y texturas de intercrecimiento. Estas relaciones texturales permiten establecer claramente la posterioridad de la Fase II respecto a la Fase I. Esta fase se asocia a un desarrollo más evidente de alteración hidrotermal. En algunas muestras se documenta la presencia de feldespatos potásicos (Figuras 5.4a), indicativo de condiciones de alteración potásica, mientras que de manera más generalizada se reconoce una alteración dominada por clorita, sericita y arcillas.

Adicionalmente, en esta fase se reconocen texturas de reemplazo de calcopirita por bornita, manifestadas como *blebs* irregulares de calcopirita. La presencia de *blebs* de calcopirita constituye una evidencia textural para establecer la posterioridad temporal de la bornita respecto a la calcopirita, reforzando la interpretación de la Fase II como el evento más enriquecido en cobre del sistema.

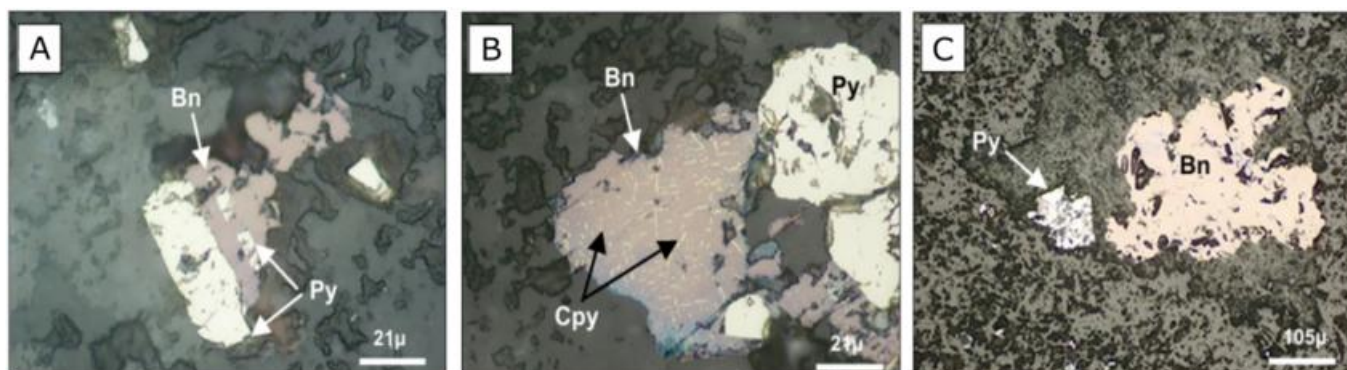


Figura 6.2 Bornita en contacto simple y reemplazando a pirita, nicoles paralelos, 500X. (B) Bornita en contacto simple con pirita y con inclusiones, tipo *blebs* de calcopirita, nicoles paralelos, 500X. (C) Pirita y bornita diseminada, nicoles paralelos, 100X (Fuente: Elaboración propia).

❖ Fase III – Etapa de oxidación y enriquecimiento secundario de cobre

La Fase III corresponde a una etapa supérgena, desarrollada bajo condiciones meteóricas, que sobreimprime a las asociaciones hipógenas previamente formadas. Esta fase se caracteriza por la oxidación y lixiviación de los sulfuros de cobre de las fases anteriores, dando origen a la formación de minerales secundarios de cobre, entre los que destacan atacamita y crisocola, junto con la precipitación de jarosita y óxidos e hidróxidos de hierro. Desde el punto de vista textural, los minerales supergénicos se presentan rellenando fracturas, cavidades y zonas de porosidad secundaria, así como reemplazando parcialmente a los sulfuros primarios, evidenciando un proceso de removilización y reconcentración de cobre en los niveles superiores del sistema. En este contexto, la Fase III representa el principal evento de enriquecimiento secundario de cobre del distrito, concentrando el metal en forma de minerales oxidados y supergénicos, y marcando una transición clara entre la mineralización hipógena profunda y los niveles superficiales del sistema.

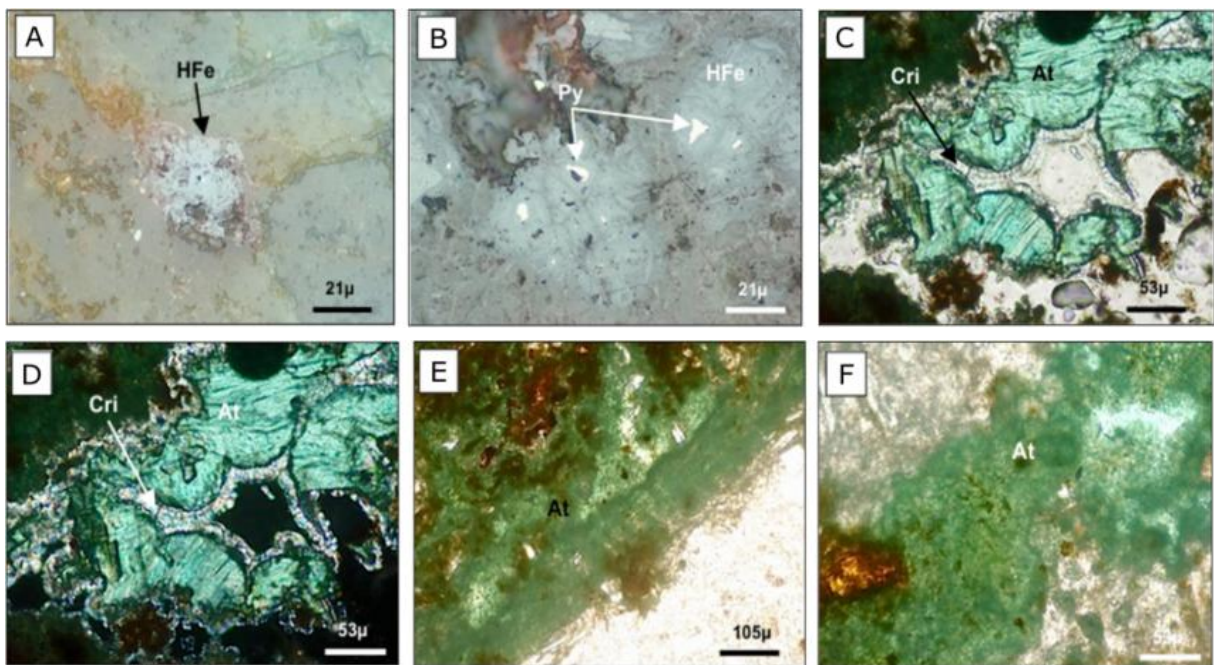


Figura 6.3 (A) Hidróxidos de hierro como pseudomorfos de pirita, nicoles paralelos, 500X. (B) Relictos de pirita reemplazados por hidróxidos de hierro, nicoles paralelos, 500X. (C), (D) Crisocola en textura tipo corona con atacamita, nicoles paralelos y cruzados respectivamente, 200X. (E), (F) Atacamita como relleno de fracturas, nicoles paralelos, 100X y 200X respectivamente (Fuente: Elaboración propia).

❖ Fase IV – Etapa tardía de alteración supérgena

La Fase IV corresponde a la etapa más tardía reconocida en la evolución paragenética del distrito Cocinera–Inagotable y está dominada por procesos de alteración supérgena residual, desarrollados bajo condiciones de baja temperatura y escasa actividad hidrotermal. Esta fase se caracteriza por la formación de minerales de ganga tardíos, tales como arcillas, carbonatos y, de manera subordinada, anhidrita, los cuales se desarrollan principalmente como relleno de fracturas tardías, cavidades y zonas de porosidad secundaria.

Desde el punto de vista mineralógico, esta etapa presenta una escasa o nula incorporación de metales, reflejando un estadio avanzado de evolución del sistema, en el cual los procesos de oxidación y enriquecimiento secundario han disminuido significativamente.

La Fase IV representa, por tanto, la etapa final de estabilización del sistema mineralizado, controlada principalmente por la interacción prolongada entre la roca y fluidos meteóricos de baja energía. Su reconocimiento es importante para comprender el grado de preservación de las fases hipógenas y supérgenas previas, así como para delimitar el cierre evolutivo del sistema mineralizado del distrito.

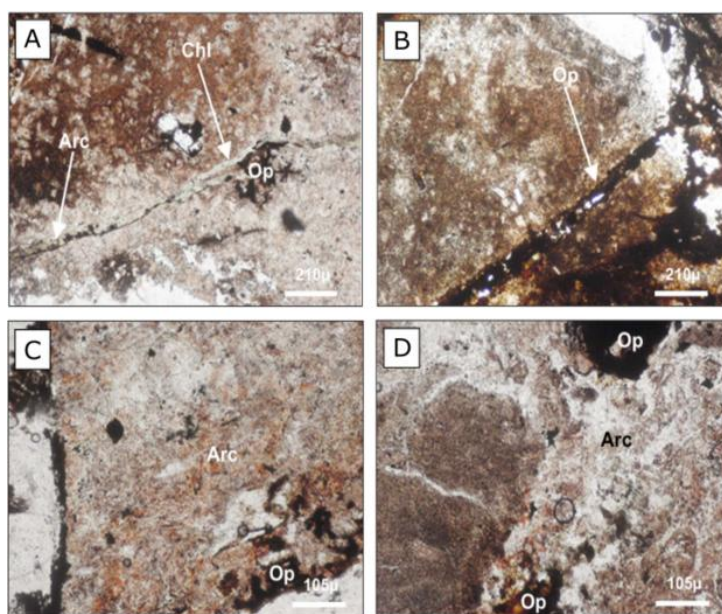


Figura 6.4 (A) Fractura rellena por clorita, arcillas y opacos, nicoles paralelos, 50X. (B) Fractura rellena por hidróxidos de hierro en agregados anhedrales, nicoles paralelos, 50X. (C) Aspecto general del reemplazo que afecta la masa fundamental de fragmentos líticos, caracterizado por agregados microcristalinos de cuarzo secundario, feldespato potásico secundario, nicoles paralelos, respectivamente, 100X. (D) Aspecto general de la alteración de la matriz, caracterizada por agregados de cristales anhedrales de feldespato potásico, arcillas, agregados microcristalinos de cuarzo secundario e impregnaciones de opacos, nicoles paralelos, 100X (Fuente: Elaboración propia).

- Interpretación evolutiva del sistema

El análisis integrado de las asociaciones minerales reconocidas en el distrito Cocinera–Inagotable evidencia la existencia de un sistema hidrotermal polifásico, cuya evolución quedó registrada en las relaciones texturales observadas en microscopía. La secuencia paragenética propuesta comprende dos etapas de mineralización hipógena (Fases I y II) seguidas por dos etapas de origen supergénico y meteórico (Fases III y IV). A continuación, se discuten los procesos geológicos que habrían controlado cada etapa, en comparación con el depósito de Panulcillo, referente regional más cercano y mejor documentado.

La Fase I representa el primer evento de interacción fluido–roca del sistema, dominado por la precipitación de pirita con esfalerita subordinada y trazas de calcopirita. La asociación pirita–esfalerita en esta etapa temprana sugiere condiciones de fugacidad de azufre moderada y temperaturas moderadas a altas, en las cuales el hierro y el zinc se movilizan preferencialmente respecto al cobre (Einaudi et al., 2003). Este comportamiento es consistente con un fluido hidrotermal de origen magmático en sus etapas iniciales de ascenso, donde la interacción con la roca caja andesítica aún no ha modificado sustancialmente la composición del fluido. La precipitación temprana de pirita habría agotado el Fe disponible en el fluido, dejando una solución residual con relación Cu/Fe elevada, lo que preparó las condiciones químicas para la posterior precipitación de calcopirita y bornita en la Fase II. Esta secuencia temporal, donde sulfuros de hierro preceden al evento cuprífero principal, ha sido documentada de manera recurrente en depósitos estratoligados de la Faja Cretácica de Cu del norte de Chile (Espinoza et al., 1996; Sillitoe, 1990).

En el depósito de Panulcillo, ubicado a solo ~10 km del distrito Cocinera–Inagotable y hospedado en secuencias equivalentes del Grupo Ovalle, Sugaki et al. (2000) describen una asociación metálica temprana compuesta por pirrotina monoclinica, calcopirita, esfalerita, pirita y magnetita, donde la esfalerita se presenta íntimamente asociada a la calcopirita, incluso como productos de exsolución. La predominancia de pirrotina monoclinica sobre pirita en Panulcillo indica condiciones de fS_2 considerablemente más bajas que las observadas en Cocinera–Inagotable durante su etapa temprana, posiblemente relacionadas con la influencia del ambiente de skarn y la interacción con los horizontes carbonatados de la Caliza Morenita (Hopper & Correa, 2000). A su vez, Castellón (2017) reconoce en

Panulcillo dos eventos mineralizantes principales: uno magmático asociado a diques microdioríticos (~131–123 Ma) y otro asociado a fallas N-NE en régimen transtensional dextral, cuya sucesión polifásica es consistente con el carácter observado en Cocinera–Inagotable.

La transición hacia la Fase II marca el evento cuprífero principal del sistema, caracterizado por la asociación calcopirita–bornita. El reemplazo progresivo de calcopirita por bornita, evidenciado por las texturas de tipo *blebs*, indica un incremento en la fugacidad de azufre respecto a la Fase I. Este cambio en las condiciones fisicoquímicas puede atribuirse a varios procesos no mutuamente excluyentes: (i) la mezcla de fluidos magmáticos profundos con fluidos meteóricos o connatos más oxidantes, que habría modificado el estado de oxidación y la actividad de azufre del sistema (Kojima et al., 2003); (ii) el enfriamiento progresivo del fluido durante su ascenso, favoreciendo la estabilidad de bornita sobre calcopirita en el campo fS_2 –temperatura (Einaudi et al., 2003); y/o (iii) una reactivación del sistema estructural NS-NW que habría permitido el ingreso de un segundo pulso de fluidos con mayor carga metálica de cobre. La concentración de las mayores leyes de CuT en los nodos de intersección estructural NS-NW (discutida en la Sección 6.2) apoya la interpretación de que esta fase estuvo fuertemente controlada por la permeabilidad estructural, donde las intersecciones de fallas actuaron como conductos preferenciales para la focalización de los fluidos mineralizantes (Corbett & Leach, 1998). En contraste, en Panulcillo la mineralización de calcopirita–bornita se asocia espacialmente a los bordes del skarn y a estructuras NS, lo que sugiere que ambos sistemas comparten una fase cuprífera principal de naturaleza hidrotermal-estructural, pero con litologías hospedantes contrastantes (volcánicas andesíticas en Cocinera vs. carbonatos con skarn en Panulcillo).

La posterior exhumación del sistema propició la Fase III de oxidación y enriquecimiento secundario. La neoformación de atacamita como mineral dominante de la zona de oxidación constituye un indicador paleoclimático relevante, ya que su estabilidad requiere condiciones áridas a hiperáridas con aguas meteóricas ricas en cloruros (Sillitoe, 2005). El aporte de cloruros podría estar relacionado con la lixiviación de niveles evaporíticos presentes en las intercalaciones sedimentarias marinas del Cretácico Inferior del Grupo Ovalle. La presencia

de atacamita en lugar de malaquita como mineral supergénico dominante es consistente con las condiciones climáticas del norte semiárido de Chile y ha sido descrita en numerosos depósitos cupríferos de la región (Sillitoe, 1990). La crisocola asociada, como silicato de cobre hidratado, refleja condiciones de pH moderado y disponibilidad de sílice en solución, probablemente derivada de la lixiviación de la masa fundamental de las andesitas hospedantes. Esta fase representa el principal evento de reconcentración de cobre en los niveles superiores del sistema, generando la zonación vertical óxidos–sulfuros que caracteriza al distrito. En Panulcillo, donde la mineralogía supergénica está mejor preservada en niveles superficiales (Hopper & Correa, 2000), se reconoce una zonación análoga, lo que refuerza la interpretación de que ambos sistemas estuvieron sometidos a condiciones climáticas y geoquímicas comparables durante la exhumación.

Finalmente, la Fase IV marca el cierre evolutivo del sistema. El reemplazo de feldespatos y plagioclasas por arcillas, junto con la precipitación de carbonatos y anhidrita en fracturas tardías y porosidad secundaria, refleja la neutralización progresiva de los fluidos meteóricos en su interacción con la roca, en condiciones de baja temperatura y escasa actividad química. La ausencia de metales en esta fase indica que los procesos de lixiviación y reconcentración supérgena habían cesado, posiblemente por el descenso del nivel freático o por el agotamiento de los sulfuros susceptibles de oxidación en los niveles superiores. Un evento de fallamiento post-mineral segmentó los cuerpos mineralizados, afectando la continuidad original de las estructuras y generando la configuración actual del distrito.

6.2 Comportamiento Geoquímico y Distribución de las leyes

El análisis de la base de datos geoquímica, enfocado en los valores de Cobre Total (CuT) y Cobre Soluble (CuS), permite evaluar espacial y cuantitativamente la evolución paragenética del sistema. La distribución de estas leyes es consistente con un control mixto (litológico y estructural) en la deposición del mineral en el distrito Cocinera–Inagotable.

- **Dispersión y control estructural**

La comparación estadística mediante diagramas de caja (*boxplot*) evidencia diferencias significativas en la dispersión y rango de los elementos analizados. El Cu total (CuT) y el Cu soluble (CuS) presentan una mayor dispersión y valores extremos (*outliers*) más marcados, lo que sugiere un control estructural significativo en la distribución de las leyes y una distribución heterogénea de la mineralización. Por su parte, el Cu insoluble (CuI) muestra valores generalmente bajos, con algunos *outliers* aislados, lo que indicaría una contribución subordinada de fases primarias no oxidadas en los niveles muestreados en superficie. En conjunto, estos patrones geoquímicos son coherentes con un sistema mineralizado de carácter vetiforme y estratoligado, donde los enriquecimientos metálicos se concentran en estructuras discretas y no de manera homogénea a escala distrital. La mayor dispersión de CuT y CuS en contraste con el CuI es coherente con un sistema donde la mineralización se concentra en estructuras discretas con zonación vertical. La asociación entre los valores anómalos de Ag y los máximos de CuT refuerza el vínculo paragenético entre ambos elementos, atribuido a la incorporación de plata en bornita (Fase II), mientras que el comportamiento desacoplado del Au es consistente con un carácter Cu–(Ag) del sistema.

- **Zonación Geoquímica y Razón de Solubilidad**

La relación entre CuS y CuT refleja directamente el perfil de meteorización del yacimiento. Los sectores someros, caracterizados geoquímicamente por una alta razón de solubilidad (CuS/CuT cercano a 1), son coherentes con la Fase III de oxidación supérgena (dominada por atacamita y crisocola descritas en microscopía). Por el contrario, la disminución abrupta del CuS en profundidad, manteniendo valores anómalos de CuT, marca geoquímicamente el techo de la zona de sulfuros primarios (Fase II), donde el cobre se encuentra atrapado en la red cristalina de la calcopirita y la bornita, siendo insoluble en ácido sulfúrico bajo condiciones estándar.

La interpretación de estas anomalías de muy alta ley sugiere que, si bien el fluido mineralizante permeó a través de la porosidad primaria de los estratos andesíticos (formando los "mantos"), los fluidos de mayor temperatura y concentración metálica se canalizaron a través de zonas de debilidad estructural, presumiblemente asociadas al sistema de fallas NW-

SE. Estas estructuras habrían actuado como feeders (conductos alimentadores) durante la fase hipógena y, posteriormente, como trampas estructurales para el enriquecimiento secundario durante la fase supérgena, generando clavos mineralizados. Este modelo de control estructural es consistente con los descritos por Corbett y Leach (1998) para sistemas hidrotermales vetiformes, donde las intersecciones de fallas generan zonas de alta permeabilidad que concentran los fluidos mineralizantes.

Si bien la correspondencia espacial entre estructuras principales y concentraciones de cobre se sustenta en los mapas de distribución geoquímica (Sección 5.2.4), un análisis cuantitativo de proximidad o modelamiento geoestadístico permitiría cuantificar esta relación de manera más robusta, constituyendo una línea de trabajo recomendable para futuras etapas de estudio. En contraste, el comportamiento del oro no evidencia un patrón espacial claramente definido respecto a las estructuras mayores, presentando valores bajos y distribución más dispersa en el distrito. Esto refuerza la interpretación de que el sistema presenta una marcada dominancia cuprífera, siendo el Au un elemento subordinado dentro del conjunto geoquímico analizado.

- Distribución de frecuencia acumulada

El análisis de las curvas de frecuencia acumulada es consistente con un comportamiento lognormal de los datos geoquímicos, patrón característico de sistemas mineralizados con control estructural (Pirajno, 2009). La separación observada entre las curvas de CuS y CuI en los percentiles bajos refleja la dominancia de minerales de cobre oxidados en los niveles muestreados, coherente con la extensa zona de oxidación supérgena descrita en la Fase III. Esta relación se invierte progresivamente hacia los percentiles superiores, donde CuI registra un incremento relativo que indica la preservación de sulfuros primarios en sectores específicos del distrito. La plata presenta una distribución fuertemente asimétrica, con valores anómalos concentrados en el extremo superior de la distribución, consistente con su incorporación en bornita como mineral portador principal. El oro, en cambio, se mantiene sistemáticamente bajo el umbral económico referencial de 0,5 ppm en más del 95% de las muestras, lo que es consistente con el carácter Cu-(Ag) del sistema.

- **Distribución espacial de las leyes**

Los mapas de distribución geoquímica (Figuras 5.7, 5.8 y 5.9) permiten visualizar en planta la expresión superficial de la zonación mineralógica inferida a partir de la paragénesis hipógena. La distribución de CuT evidencia núcleos de alta ley (>3 % CuT) con una disposición elongada en dirección NW–SE, coherente con el control estructural ejercido por el sistema de fallas principal del distrito (Sección 5.2.1) y reforzado por los modelos de inversión 2D de los perfiles MT (Sección 6.3). Los núcleos de mayor concentración se localizan en los sectores Ingenio (Zona A) y Cocinera (Zona B), en correspondencia con zonas de mayor densidad de vetas y fallas del sistema NW–SE, así como en las intersecciones de éste con estructuras NS subordinadas.

La superposición espacial entre las anomalías de Ag y los núcleos de mayor CuT (Figura 5.7 y 5.8) refuerza la asociación geoquímica Cu–Ag atribuida a la bornita, principal portadora de Ag en el sistema. Este patrón espacial constituye una expresión geoquímica directa de la Fase II hipógena, donde la bornita (precipitada en los nodos de intersección estructural) concentra simultáneamente Cu y Ag, dejando una firma reconocible en los mapas de planta.

En contraste, la correlación prácticamente nula entre Au y CuT ($r = 0,15$) y el alto porcentaje de muestras de Au bajo el límite de detección (40,8 %) indican que ambos metales responden a controles paragénicos distintos, sin evidencia de una asociación Au–Cu de carácter primario a escala distrital. Este comportamiento es consistente con el carácter no auroso típico de los depósitos estratoligados de Cu–(Ag) de la Faja Cretácica del norte de Chile (Espinoza et al., 1996; Makshev & Zentilli, 2002), y diferencia a Cocinera–Inagotable de los depósitos tipo IOCG vecinos, como Panulcillo, donde el Au constituye un metal subordinado pero presente en el sistema.

6.3 Marco Estructural y Controles del Sistema: Interpretación Magnetotelúrica (MT)

La integración de la inversión bidimensional (Perfiles L1 a L4), el análisis de dimensionalidad y el análisis en planta de la resistividad eléctrica a distintas elevaciones permite establecer una correlación entre la arquitectura eléctrica del subsuelo y las condiciones litológicas, de alteración y estructurales del distrito. A continuación, se discuten los principales rasgos identificados.

- Interpretación litológica de los dominios de resistividad

La resistividad eléctrica de un volumen rocoso responde a la contribución conjunta de varios factores (Palacky, 1987; Telford et al., 1990): (i) la composición litológica, particularmente el contenido y la conectividad de minerales metálicos opacos; (ii) la porosidad efectiva y el grado de fracturamiento; (iii) el contenido y composición de fluidos (aguas meteóricas, salmueras); y (iv) la intensidad y tipo de alteración hidrotermal, especialmente la formación de minerales arcillosos. En el contexto del distrito Cocinera–Inagotable, las anomalías de baja resistividad observadas en los niveles someros de los modelos MT responden a la contribución conjunta de estos factores.

Aguilef (2012), mediante la correlación directa entre datos de cargabilidad IP, resistividad y mapeo mineralógico de sondajes en depósitos tipo IOCG y pórfido cuprífero del norte de Chile, demostró que la resistividad presenta una relación inversa con la cargabilidad y, por extensión, con el contenido de sulfuros totales: tramos con resistividades de 10–30 Ωm se asocian a mayor contenido de sulfuros (>1 %), mientras que tramos más resistivos (300–1.000 Ωm) presentan contenidos inferiores a 1 %. Los rangos establecidos por Palacky (1987) y Telford et al. (1990) para rocas volcánicas son consistentes con esta calibración (Tabla 6.1). No obstante, en el distrito Cocinera–Inagotable no se dispone de datos de cargabilidad IP que permitan cuantificar la contribución relativa de cada factor.

La calibración mediante los tres sondajes seleccionados de la campaña ENAMI 2023 (Sección 5.3.5) permite asignar significado geológico a los dominios MT del distrito:

- El sondaje EN-598-23, emplazado en la zona de menor resistividad (<50 Ωm), atraviesa tramos con alteración hidrotermal intensa, presencia de humedad y sulfuros diseminados de baja ley.
- El sondaje EN-594-23, en una zona de resistividad intermedia (200–500 Ωm), intercepta mineralización hipógena significativa (hasta 1,52 % CuT).
- El sondaje EN-595-23, en la zona resistiva (>1.000 Ωm), presenta roca competente con escasa alteración y sulfuros diseminados aislados de baja ley.

Esta relación sugiere que, en los niveles someros del distrito, la alteración argílica y la saturación de fluidos serían los factores de primer orden que controlan las anomalías

conductivas, mientras que la presencia de sulfuros interconectados podría reforzar la respuesta conductiva en sectores específicos (zonas de mayor densidad estructural). Esta interpretación es coherente con la observación de que el dominio conductivo somero correlaciona espacialmente con la Fase III paragenética (oxidación y enriquecimiento supérgeno), donde la neoformación de arcillas, la lixiviación de sulfuros y la presencia de atacamita contribuyen a la alta conductividad observada.

Cabe destacar que la relación entre resistividad y mineralización no es lineal ni unívoca. En el estudio MT de la mina Carola (depósito de Cu hospedado en la secuencia volcánica cretácica de la Faja), Pérez (2024) determinó que no existe una correlación estadística directa entre la resistividad eléctrica y la ley de cobre total, y que las litologías mineralizadas presentan rangos de resistividad (90–350 Ωm) que se traslapan con los de las unidades no mineralizadas. Estos resultados implican que, en Cocinera–Inagotable, los dominios de alta resistividad no necesariamente indican esterilidad geoquímica, sino que podrían corresponder a sectores donde la mineralización, de existir, se encuentra en forma de disseminaciones aisladas (<5 % vol.) sin la interconexión necesaria para reducir significativamente la resistividad del volumen rocoso. Por el contrario, cuando los sulfuros se disponen en vetillas interconectadas o zonas de stockwork (>5 % vol.), generan dominios de baja resistividad (5–100 Ωm) detectables por métodos electromagnéticos (Palacký, 1987; Aguilef, 2012).

- Complejidad Estructural 3D y Controles de Permeabilidad

El análisis del tensor de fase revela una transición en profundidad del comportamiento eléctrico del subsuelo: en niveles someros, las elipses de fase presentan una geometría cuasi-circular con ejes similares, consistente con una respuesta predominantemente 1D; en profundidad, las elipses se tornan marcadamente elongadas y rotadas, con una separación creciente entre las fases principales (phase split). El ángulo de skew β , indicador de la dimensionalidad eléctrica del subsuelo (Caldwell et al., 2004), supera los $\pm 6^\circ$ en la estación L2_800, umbral sobre el cual el supuesto de bidimensionalidad (2D) deja de ser válido y se interpreta un comportamiento 3D (Caldwell et al., 2004; Booker, 2014).

Esta interpretación es respaldada por la alta variabilidad del rumbo geoelectrico (strike), con direcciones bien definidas en los perfiles periféricos (E–W en L1 y N75°E en L4) y dispersión

extrema en los perfiles centrales (L2 y L3), donde no es posible definir una dirección preferencial (Sección 5.3.3; Figura 5.13). El comportamiento conjunto de las elipses de fase y los vectores de inducción evidencia la existencia de fuertes gradientes laterales de conductividad, indicativos de que el subsuelo está dominado por la intersección de múltiples sistemas de fallas y fracturas en los perfiles centrales del distrito.

Desde el punto de vista geológico, esta complejidad eléctrica 3D se interpreta como la expresión de las zonas de daño asociadas a las intersecciones entre los sistemas estructurales NW–SE y NS descritos en el distrito. Estas zonas de fracturamiento secundario habrían generado los nodos de permeabilidad que actuaron como vías preferenciales de ascenso para los fluidos hidrotermales de las Fases I y II, y explican la concentración espacial de las mayores leyes de CuT en los mismos nodos (Sección 6.2).

- Zonación Vertical: Dominio Conductivo Somero vs. Basamento Resistivo

Los perfiles de resistividad evidencian una zonación vertical bipartita:

Dominio conductivo somero: Se identifican dominios superficiales de baja resistividad ($<100 \Omega\text{m}$, con sectores puntuales inferiores a $50 \Omega\text{m}$), con espesores del orden de 40 a 100 m en las zonas occidentales del distrito. De acuerdo con la Tabla 6.1 y los rangos establecidos por Palacky (1987), estas resistividades son consistentes con rocas volcánicas afectadas por alteración argílica, alta porosidad secundaria y presencia de humedad meteórica. Esta interpretación es coherente con la configuración geomorfológica y estructural del distrito, el cual se emplaza en quebradas controladas por fallas de orientación NS y NW (Figura 5.10), cuya traza coincide espacialmente con los dominios de menor resistividad. Estas estructuras generan zonas de daño con fracturamiento y brechización que incrementan la porosidad secundaria de la roca y, a su vez, actúan como conductos preferenciales para la infiltración y circulación de aguas meteóricas. Desde el punto de vista paragenético, este dominio se correlaciona con la Fase III de oxidación y enriquecimiento supérgeno, donde la neoformación de arcillas, la lixiviación de sulfuros y la presencia de atacamita contribuyen a la alta conductividad observada.

Basamento resistivo: Este dominio se interpreta como el protolito andesítico competente, con bajo grado de alteración y mineralización dispersa de baja interconexión. Como se discutió en la subsección anterior, los dominios de alta resistividad no implican necesariamente esterilidad geoquímica (Pérez, 2024), sino que reflejan condiciones donde los sulfuros, de existir, se encuentran en forma diseminada y aislada sin alcanzar la interconexión necesaria para reducir la resistividad del volumen rocoso.

La incorporación de los tres sondajes seleccionados de la campaña ENAMI 2023 permite calibrar de manera preliminar la interpretación litológica de los dominios geoeléctricos y reforzar el modelo de zonación vertical propuesto:

EN-598-23 — emplazado en uno de los dominios conductivos más intensos del distrito ($<50 \Omega\text{m}$), interceptó andesitas brechosas con alteración hidrotermal intensa entre los 17,9 y 53,8 m de profundidad. Las fallas asociadas presentan relleno de arcillas y limonitas (17,3 m; 46,9–48,0 m), consistente con una asociación argílica (arcillas, sericita, limonitas). Adicionalmente, se reconocieron relictos de cobre y hierro, vetas de malaquita y estructuras con calcopirita diseminada. Esta correspondencia confirma que las anomalías de alta conductividad del dominio somero responden a la combinación de alteración argílica, porosidad secundaria y mineralización oxidada (Palacky, 1987).

EN-594-23 — ubicado en un dominio de resistividad intermedia (200–500 Ωm), próximo al perfil L2, interceptó mineralización significativa de sulfuros (pirita, calcopirita y bornita) con leyes de hasta 1,52 % CuT entre los 83 y 119 m de profundidad. Este resultado es particularmente relevante porque demuestra que los dominios de resistividad intermedia, correspondientes a la transición entre el dominio conductor somero y el basamento resistivo, pueden albergar la mineralización hipógena de mayor ley del sistema. La alteración hidrotermal en estos sectores fue suficientemente intensa para modificar las propiedades eléctricas de la roca, sin alcanzar el grado de destrucción textural observado en las zonas más conductivas, lo que sugiere condiciones favorables de preservación de los sulfuros primarios.

EN-595-23 — ubicado en el sector noreste del distrito en una zona de transición hacia resistividades altas ($>1.000 \Omega\text{m}$), interceptó sulfuros diseminados de baja concentración

(máximo 0,34 % CuT) en brechas volcánicas e hidrotermales. La ausencia de una anomalía conductiva significativa en este sector es consistente con el hecho de que los sulfuros se presentan en forma diseminada y aislada, sin alcanzar la interconexión necesaria para reducir la resistividad del volumen rocoso (Palacky, 1987; Pridmore & Shuey, 1976). Este sondaje valida la interpretación del basamento resistivo como roca competente de menor grado de alteración, aunque no necesariamente estéril desde el punto de vista geoquímico.

La integración de los datos de sondaje con el modelo de zonación vertical refuerza la existencia de un blanco exploratorio en el sector noreste del distrito, donde la persistencia de anomalías conductivas focalizadas en las plantas de 350 y 250 m s.n.m., asociadas a la intersección de estructuras NW–SE y E–W, configura condiciones favorables para interceptar mineralización hipógena en la franja de resistividad intermedia.

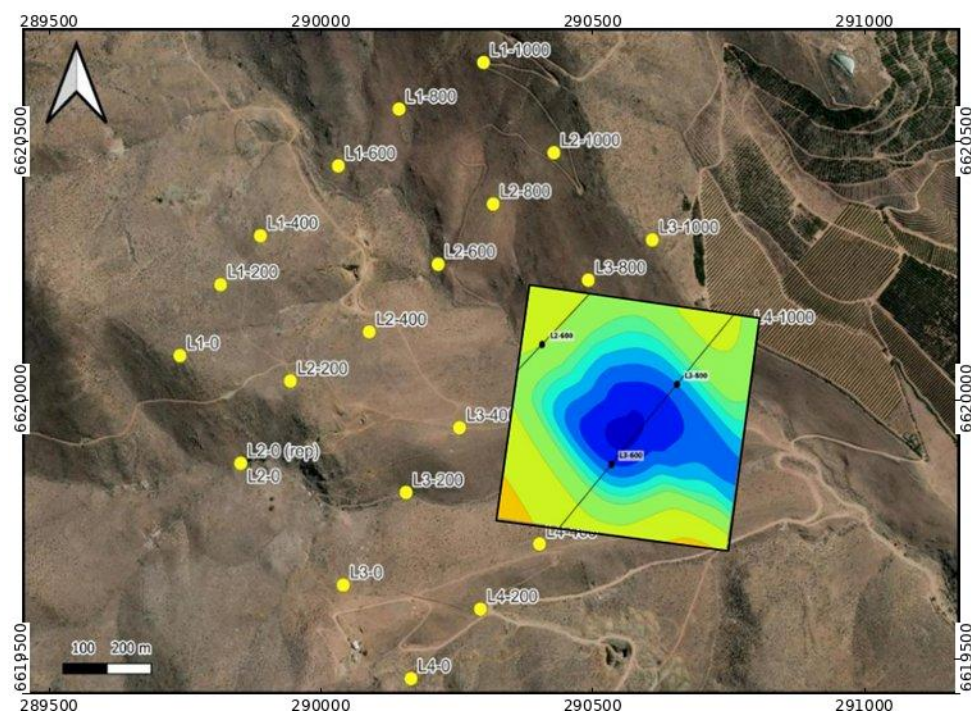


Figura 6.5 Mapa de resistividad eléctrica a 350 m s.n.m. del distrito Cocinera–Inagotable, con la posición de las estaciones magnetotéluricas L1 a L4. Coordenadas en UTM Zona 19 Sur (WGS 84). Elaboración propia a partir de los modelos de inversión 2D (GX Geoscience, 2026).

La Figura 6.6 sintetiza gráficamente la correlación entre la columna litológica, las zonas mineralizadas y la curva de resistividad eléctrica estimada a partir de los modelos de

inversión 2D para cada uno de los tres sondajes analizados. En ella se observa que el sondaje EN-598-23 presenta los valores más bajos de resistividad a lo largo de todo su trazado, consistentes con la alteración hidrotermal intensa interceptada en los testigos. El sondaje EN-594-23 muestra una transición progresiva desde valores conductivos superficiales hacia resistividades intermedias en profundidad, intervalo en el cual se concentra la mineralización hipógena de mayor ley. El sondaje EN-595-23, por su parte, exhibe un aumento sostenido de la resistividad con la profundidad, alcanzando valores superiores a $2.000 \Omega \cdot m$, coherente con la roca caja competente y la escasa mineralización interceptada. Esta representación permite visualizar de forma directa la correspondencia entre la firma geoelectrica del subsuelo y las características litológicas y mineralógicas observadas en los testigos, reforzando la utilidad del método magnetotelúrico como guía para la definición de blancos exploratorios en el distrito.

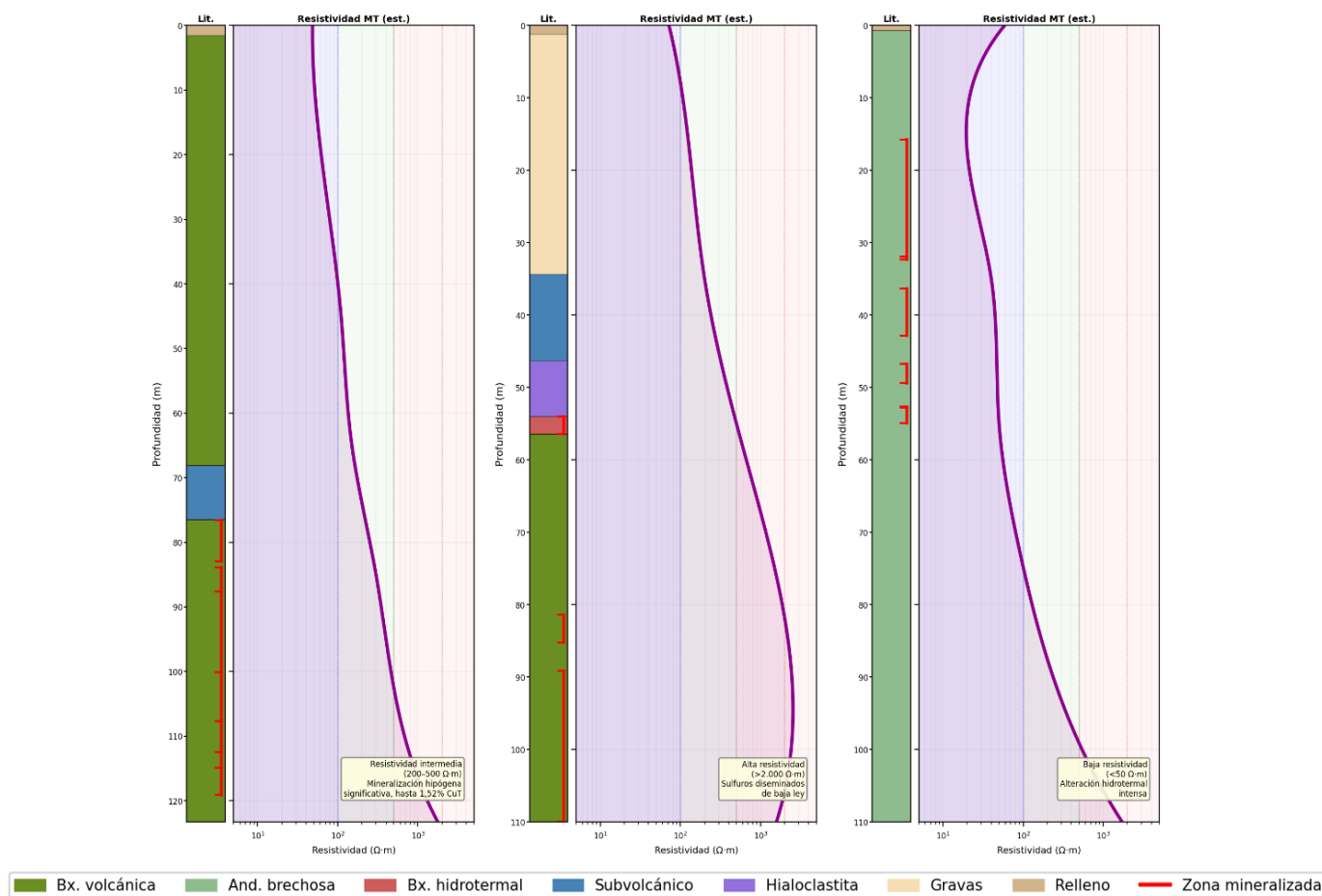


Figura 6.6 Correlación litológica y resistividad eléctrica MT estimada para los sondajes EN-594-23, EN-595-23 y EN-598-23. Valores de resistividad extraídos de los modelos de inversión 2D (Fuente: Elaboración propia).

- Evolución en profundidad: Análisis en planta de la resistividad

El análisis en planta de la resistividad a cuatro niveles de elevación (superficial, 350, 250 y 150 m s.n.m.) permite evaluar la evolución tridimensional de los dominios geoelectricos. En el nivel superficial se observa una alta heterogeneidad, con múltiples anomalías conductivas dispersas a lo largo de todo el distrito. A medida que se profundiza (350 m y 250 m s.n.m.), el dominio resistivo se expande progresivamente mientras las anomalías conductivas se reducen y focalizan en sectores específicos. En el nivel más profundo (150 m s.n.m.), el basamento resistivo domina la mayor parte del área, con anomalías conductivas restringidas al corredor del perfil L1 y al sector NE del perfil L2. Este patrón indica que la alteración y/o fracturamiento asociado a la circulación de fluidos no se distribuye de manera homogénea en profundidad, sino que se restringe a corredores estructurales discretos.

En la planta superficial, la distribución de las anomalías conductivas evidencia una tendencia dominante de orientación NW–SE, coherente con el sistema estructural principal del distrito y con la dirección preferencial de las vetas mineralizadas. Adicionalmente, se identifica un corredor conductivo de orientación aproximada E–W que conecta las anomalías de baja resistividad entre los perfiles L2 y L3 (sector centro-occidental). La posición de este corredor conductivo coincide espacialmente con estructuras de orientación E–W reconocidas en el mapeo geológico-estructural del distrito (Figura 3.10), las cuales cortan de forma transversal al sistema de fallas principal NW–SE. Esta correspondencia entre las anomalías de baja resistividad y las fallas cartografiadas refuerza la interpretación de estas estructuras como zonas de mayor permeabilidad secundaria, favorables para la circulación de fluidos tanto hidrotermales como meteóricos. Los valores de resistividad observados en este corredor ($<50 \Omega\text{m}$) son coherentes con los rangos reportados por Palacky (1987) para zonas de falla en rocas volcánicas fracturadas y parcialmente saturadas.

Dos anomalías conductivas destacan por su magnitud y persistencia en profundidad: (i) una anomalía localizada en el sector NE del área de estudio (entorno de L3-600/L3-800, conectada con L4-800/L4-1000), que persiste hasta el nivel de 350 m s.n.m., y (ii) el corredor del perfil L1, que mantiene resistividades intermedias ($\sim 200 \Omega\text{m}$) incluso a 150 m s.n.m. Ambas anomalías se encuentran espacialmente asociadas a intersecciones entre las tendencias estructurales NW–SE y E–W, configurando nodos de alta permeabilidad consistentes con el modelo de control estructural propuesto para el distrito (Sección 6.2;

Corbett & Leach, 1998). La persistencia de estas anomalías hacia niveles profundos refuerza su interpretación como zonas donde la circulación de fluidos hidrotermales fue más intensa y prolongada, constituyendo blancos prioritarios para futuras campañas de perforación.

- Interpretación de la posición del distrito en el sistema hidrotermal

La dominancia del basamento resistivo ($>2.000 \Omega\text{m}$) en profundidad, particularmente en los sectores SW y central del área de estudio, indica que la circulación de fluidos hidrotermales no penetró de manera significativa a profundidad en la mayor parte del distrito, sino que se restringió a las zonas de mayor permeabilidad estructural en niveles someros. Esta configuración es coherente con el modelo de yacimientos estratoligados de Cu-(Ag) del Cretácico Inferior de Chile central (Vivallo & Henríquez, 1998), donde la mineralización se distribuye lateral y verticalmente desde conductos estructurales profundos, generando zonas distales con mineralización confinada a los niveles más permeables.

No obstante, la persistencia de anomalías conductivas en el sector NW del área de estudio (L3-600/L3-800 y L4-800/L4-1000), que mantienen resistividades inferiores a $70 \Omega\text{m}$ hasta elevaciones de 350 m.s.n.m., constituye un rasgo que se diferencia del patrón general del distrito. Una hipótesis posible es que este corredor represente una vía de ascenso preferencial de los fluidos hidrotermales, lo que implicaría que el centro del sistema mineralizado podría encontrarse desplazado hacia el NW respecto al área cubierta por los perfiles MT actuales.

6.4 Modelo Conceptual evolutivo del sistema Cocinera- Inagotable

La integración de las observaciones discutidas en las secciones precedentes —evolución paragenética del sistema (6.1), comportamiento geoquímico y distribución de leyes (6.2), y marco estructural con su expresión magnetotélúrica (6.3)— permite proponer un modelo conceptual evolutivo que sintetiza la historia geológica del distrito en cuatro etapas principales (Figura 6.2).

El modelo reconoce la participación de al menos dos pulsos hidrotermales distintos, diferenciados tanto por su paragénesis mineral como por su expresión geoquímica. El primer pulso, de temperatura moderada a alta y baja fugacidad de azufre, se asocia a la paragénesis pirita–calcopirita–esfalerita subordinada (Fase I). El segundo pulso, de mayor concentración cuprífera y mayor fugacidad de azufre, se caracteriza por la asociación calcopirita–bornita

(Fase II) y se concentra en los nodos estructurales NS-NW, generando las zonas de mayor ley del distrito.

Esta secuencia paragenética presenta similitudes y diferencias con otros depósitos de la Faja Cretácica de Cu del norte de Chile. En los depósitos de Panulcillo y Teresa de Colmo, hospedados en secuencias equivalentes del Grupo Ovalle y ubicados a escala regional en la misma franja metalogenética, Hopper y Correa (2000) describen una mineralización vetiforme-estratoligada con una sucesión pirita-calcopirita-bornita comparable a la observada en Cocinera-Inagotable, así como un control estructural ejercido por fallas de orientación NW sobre el emplazamiento de los cuerpos mineralizados. De manera similar, Espinoza *et al.* (1996) y Kojima *et al.* (2003) documentan la recurrencia de esta secuencia paragenética en múltiples depósitos de la Faja Cretácica, interpretándola como el resultado de una evolución fisicoquímica común de los fluidos hidrotermales en estos sistemas: un primer evento rico en hierro seguido por un pulso cuprífero principal, asociado a la progresiva interacción fluido-roca y al aumento de la fugacidad de azufre.

Sin embargo, el distrito Cocinera-Inagotable presenta particularidades que lo distinguen de estos análogos regionales. En primer lugar, el componente vetiforme es claramente dominante sobre el estratoligado, lo que sugiere un mayor control estructural en la canalización de fluidos respecto a depósitos como Panulcillo, donde la componente de manto es más significativa. En segundo lugar, la presencia de esfalerita como fase subordinada en la etapa temprana (Fase I) no ha sido reportada de forma recurrente en otros depósitos de la faja, lo que podría indicar condiciones de temperatura o composición del fluido ligeramente distintas durante el inicio del sistema. Finalmente, la zonación geoquímica observada, donde las mayores leyes se concentran en nodos de intersección NS-NW y no de forma estratiforme, refuerza la interpretación de un sistema donde la arquitectura estructural ejerció un control preponderante sobre la distribución de la mineralización, en contraste con el modelo predominantemente litoestratigráfico descrito para otros depósitos de la faja (Espinoza *et al.*, 1996).

Etapas A — Configuración estructural pre-mineral:

La secuencia volcánica andesítica fue afectada por un régimen tectónico que generó dos sistemas de fallas principales (N-S y N-W), cuya intersección creó nodos de permeabilidad estructural que controlaron el posterior emplazamiento de la mineralización.

Etapa B — Mineralización hipógena (Fases I y II):

El ascenso de fluidos hidrotermales desde una cámara magmática en profundidad dio lugar a dos fases de mineralización. La Fase I, asociada al primer pulso hidrotermal de temperatura moderada a alta, depositó pirita con calcopirita y esfalerita subordinadas, conformando la etapa temprana rica en hierro. La Fase II, vinculada al pulso principal de mayor concentración cuprífera, depositó calcopirita y bornita en los nodos estructurales NS-NW, generando las zonas de mayor contenido de cobre del distrito (clavos), lo cual es fuertemente consistente con la correlación observada entre las anomalías geoquímicas y los cruces de fallas (discutida en la Sección 6.1).

Etapa C — Oxidación supergena (Fase III):

La exposición del sistema hipógeno a condiciones meteóricas transformó los sulfuros primarios en una paragénesis dominada por atacamita, consistente con las condiciones áridas imperantes en el área de estudio. Esta zona oxidada constituye la anomalía conductora detectada por los perfiles MT, caracterizada por resistividades inferiores a 100 Ωm , producto de la lixiviación, la retención de humedad y las arcillas de alteración supérgena. El contraste directo de esta unidad con el basamento resistivo ($>2.000 \Omega\text{m}$, correspondiente a la roca caja andesítica competente y geoquímicamente estéril) define la firma geofísica diagnóstica del sistema.

Etapa D — Cierre del sistema y evento post-mineral (Fase IV):

La Fase IV corresponde a la etapa tardía de alteración supérgena residual, dominada por arcillas, carbonatos y anhidrita, que marca el cierre evolutivo del sistema mineralizado. Posteriormente, un evento de fallamiento post-mineral segmentó los cuerpos mineralizados, generando desplazamientos que afectaron la continuidad original de las estructuras y mantos cupríferos.

A modo de síntesis, el distrito Cocinera–Inagotable corresponde a un sistema polifásico donde el control estructural ejerció un rol preponderante sobre la distribución y concentración de las leyes de cobre, complementado por un control litoestratigráfico subordinado. La secuencia paragenética, el comportamiento geoquímico y la firma magnetotelúrica convergen en un modelo genético coherente con los depósitos estratoligados de Cu-(Ag) de la Faja Cretácica.

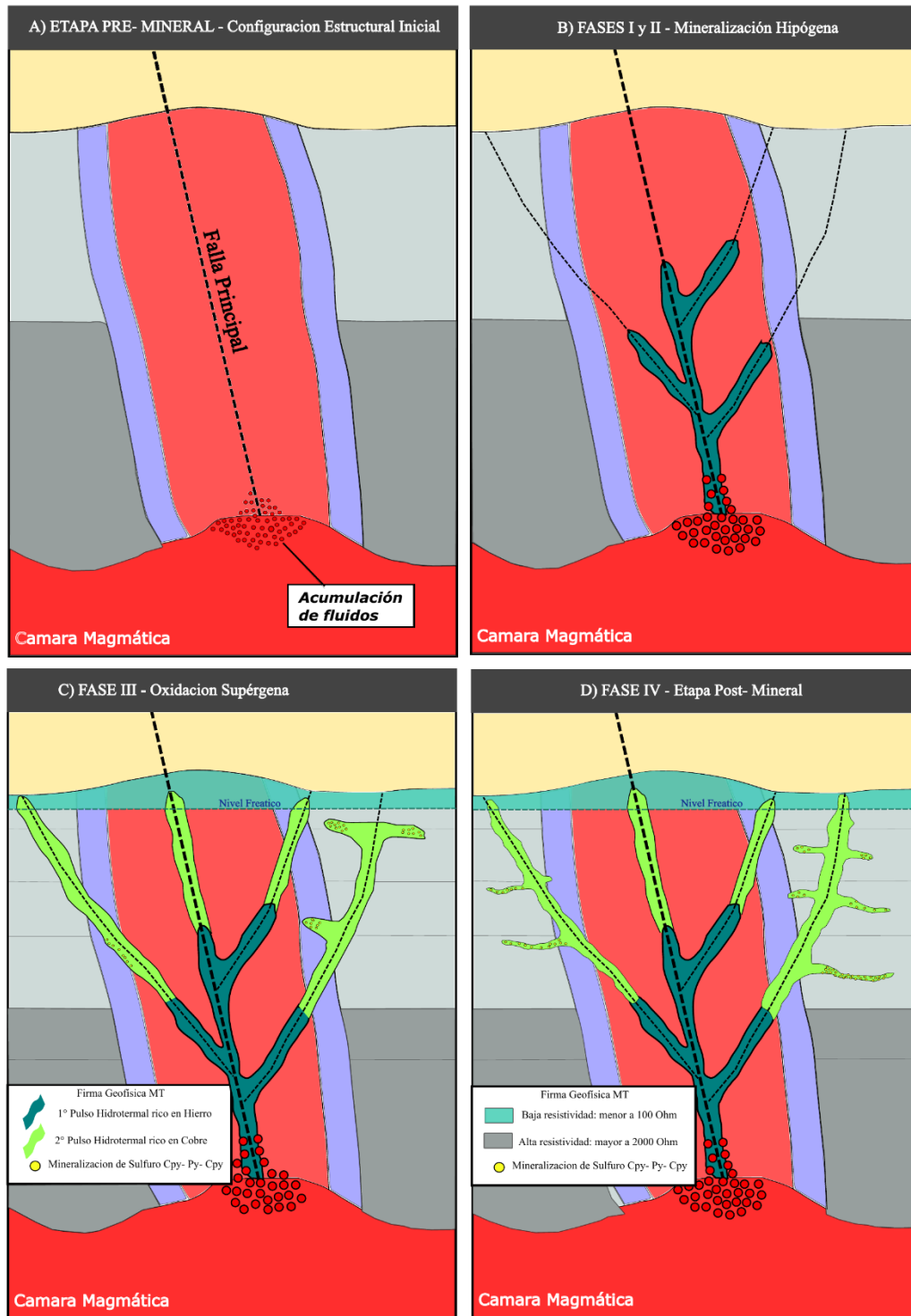


Figura 6.7 Modelo conceptual evolutivo del sistema mineralizado Cocinera–Inagotable. A) Configuración estructural pre-mineral con desarrollo de fallas NS y NW. B) Mineralización hipógena en dos pulsos: Fase I (Py-Cpy-Sph) temprana rica en Fe, y Fase II (Cpy-Bn) cuprífera principal, concentrada en nodos estructurales NS-NW. C) Oxidación supergéna con desarrollo de atacamita. D) Etapa post-mineral: alteración supérgena residual, fallamiento y segmentación de los cuerpos mineralizados (Fuente: Elaboración propia).

Limitaciones del estudio

El presente estudio presenta limitaciones inherentes a la escala y metodología aplicada. El muestreo geoquímico corresponde exclusivamente a afloramientos superficiales, por lo que la continuidad en profundidad de las zonas mineralizadas no puede ser confirmada sin información de sondajes. La interpolación espacial de las leyes está condicionada por la densidad y distribución irregular de las muestras, lo que puede introducir incertidumbre en los sectores con menor cobertura. Asimismo, la magnetotelúrica permite caracterizar la arquitectura eléctrica del subsuelo, pero no detecta directamente la mena, por lo que la correlación entre anomalías conductivas y mineralización primaria constituye una interpretación que requiere validación mediante perforación. A ello se suma que la inversión 2D aplicada asume bidimensionalidad de las estructuras eléctricas, condición que se cumple solo parcialmente: los perfiles L2 y L3 muestran indicios de comportamiento tridimensional (dispersión angular del strike geoeléctrico y valores de skew β superiores a $\pm 3^\circ$ a bajas frecuencias), lo que implica una mayor incertidumbre en la geometría profunda y en sectores puntuales con skew anómalo (estación L3_400 y extremo NE del perfil L4).

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar el comportamiento y continuidad del sistema mineralizado del distrito Cocinera–Inagotable mediante la integración de información geológica, mineralógica, geoquímica y geofísica. A partir de los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

- El sistema mineralizado registra una evolución paragenética compuesta por cuatro fases sucesivas, lo que permite especificar la hipótesis de múltiples eventos hidrotermales planteada. La Fase I (pirita–calcopirita–esfalerita subordinada) y la Fase II (calcopirita–bornita) corresponden a dos pulsos hidrotermales hipógenos diferenciados por temperatura, fugacidad de azufre y concentración cuprífera: el primero representa la etapa temprana rica en hierro, bajo condiciones de moderada fugacidad de azufre, mientras que el segundo constituye el evento principal de mineralización de cobre del sistema, asociado a un incremento en la fugacidad de

azufre y concentrado en los nodos estructurales NS–NW. La Fase III (dominada por atacamita) representa la oxidación supérgena del sistema bajo condiciones áridas, y la Fase IV corresponde a la etapa post-mineral, caracterizada por alteración supérgena residual (arcillas, carbonatos y anhidrita), seguida por un fallamiento que segmentó los cuerpos mineralizados.

- Respecto a la evaluación de la continuidad del sistema, los modelos de resistividad obtenidos a partir de la inversión 2D de los cuatro perfiles magnetotelúricos (L1 a L4) permitieron identificar una arquitectura geoeléctrica consistente a escala distrital. Esta se define por un dominio conductor superficial ($< 100 \Omega \cdot m$), correlacionado con la zona de alteración en superficie, sobreyaciendo a un basamento fuertemente resistivo ($> 2.000\text{--}3.000 \Omega \cdot m$) interpretado como roca caja andesítica competente y geoquímicamente estéril. El análisis en planta de la resistividad a distintas elevaciones evidenció una focalización progresiva de las anomalías conductivas en profundidad, particularmente en el sector NW del distrito, donde la persistencia de dominios conductivos asociados a intersecciones estructurales configura blancos exploratorios que requieren validación mediante perforación. El análisis de dimensionalidad confirmó una alta complejidad 3D en el núcleo del distrito, respondiendo a la densa red de intersecciones estructurales. La correspondencia entre el corredor conductivo E–W identificado entre los perfiles L2 y L3 y las fallas E–W cartografiadas en el mapeo geológico-estructural refuerza la interpretación de estas estructuras como zonas de mayor permeabilidad secundaria.
- La correlación directa entre los modelos de resistividad eléctrica y tres sondajes diamantinos (ENAMI, 2023) permitió calibrar preliminarmente la interpretación geofísica. Los dominios de alta conductividad ($< 50 \Omega \cdot m$) se asocian a zonas de alteración hidrotermal intensa (EN-598-23); los dominios de resistividad intermedia ($200\text{--}500 \Omega \cdot m$) pueden albergar mineralización significativa de sulfuros con leyes de hasta 1,52 % CuT (EN-594-23); y los sulfuros diseminados de baja concentración no generan anomalías conductivas detectables (EN-595-23). Esta validación refuerza la

utilidad del método magnetotelúrico como herramienta de vectorización exploratoria en el distrito.

- En cuanto a la distribución y variabilidad geoquímica del distrito, las leyes evidencian una marcada heterogeneidad a escala distrital, con núcleos de alta ley en los sectores Cocinera–La Verde e Ingenio–Carmen alineados con el trend estructural NW–SE, confirmando el control vetiforme de la mineralización. El análisis de frecuencia acumulada revela un comportamiento lognormal consistente con dicho control estructural, con una mediana global de 0,61 % CuT que asciende a 1,27 % CuT en las vetas. La separación entre las curvas de CuS y CuI confirma la zonación vertical del sistema, con dominancia de óxidos en superficie y preservación de sulfuros primarios en sectores específicos. La superposición espacial entre las anomalías de Ag y los núcleos de mayor CuT reafirma la asociación Cu–(Ag) atribuida a la bornita, mientras que el oro presenta valores bajos y distribución desacoplada respecto al cobre, reforzando la dominancia netamente cuprífera del sistema.
- En relación con la integración multidisciplinaria y el modelo genético del sistema, la información mineralógica, geoquímica y geofísica permitió sustentar un modelo genético preliminar, organizado en cuatro etapas evolutivas: configuración estructural pre-mineral, mineralización hipógena en dos pulsos, oxidación supérgena y etapa post-mineral. Este modelo es coherente con los depósitos estratoligados de Cu–(Ag) de la Faja Cretácica, aunque se distingue por un mayor protagonismo del componente vetiforme y del control estructural respecto a análogos regionales como Panulcillo y Teresa de Colmo. Los nodos estructurales NS–NW constituyen blancos de exploración prioritarios, y zonas con mineralización de Fase I (rica en pirita) en superficie pueden sobreyacer a cuerpos de mayor ley asociados a la Fase II (calcopirita–bornita) en profundidad.

CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES

Recomendación 1 — Campaña de sondajes diamantinos.

Se recomienda ejecutar una campaña de sondajes diamantinos orientada a interceptar la anomalía de baja resistividad definidos en este estudio (290.433 E, 6.620.066 N), como zonas de mayor concentración de cobre. La perforación permitiría validar el modelo geológico propuesto, verificar la presencia de mineralización de Fase II (calcopirita-bornita) en profundidad y calibrar la respuesta de resistividad de los perfiles magnetotelúricos con la litología y mineralización real interceptada en los testigos. En particular, se sugiere priorizar la perforación en sectores identificados a partir del análisis en planta de resistividad (Figura 8.1), donde la persistencia de anomalías conductivas en profundidad configura condiciones favorables para interceptar mineralización hipógena.

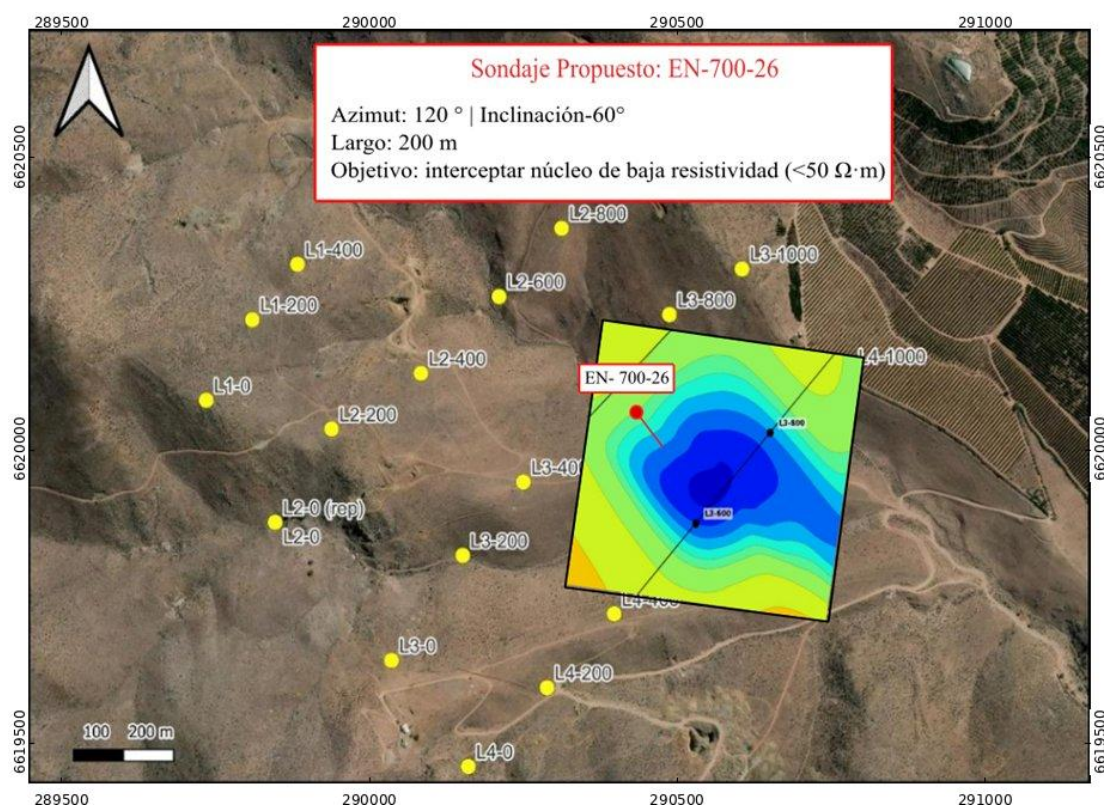


Figura 8.1 Propuesta de sondaje EN-700-26 sobre el mapa de resistividad eléctrica a 350 m s.n.m. del sector central del distrito Cocinera–Inagotable (Fuente: Elaboración propia).

Recomendación 2 — Muestreo geoquímico sistemático de superficie.

Se recomienda ejecutar una campaña de muestreo geoquímico de superficie estructurada bajo una malla regular, con un espaciamiento sugerido de 200 x 200 metros. Esta campaña debe enfocarse prioritariamente en cubrir los sectores que actualmente presentan baja densidad de datos, en particular los márgenes sur y sureste del distrito. La implementación de esta malla sistemática, y la consecuente densidad de datos obtenida, permitirá la elaboración de mapas de isoleyes representativos y de alta resolución con el objetivo de delimitar con precisión la extensión lateral de las anomalías geoquímicas y definir con mayor exactitud los bordes y tendencias del sistema mineralizado.

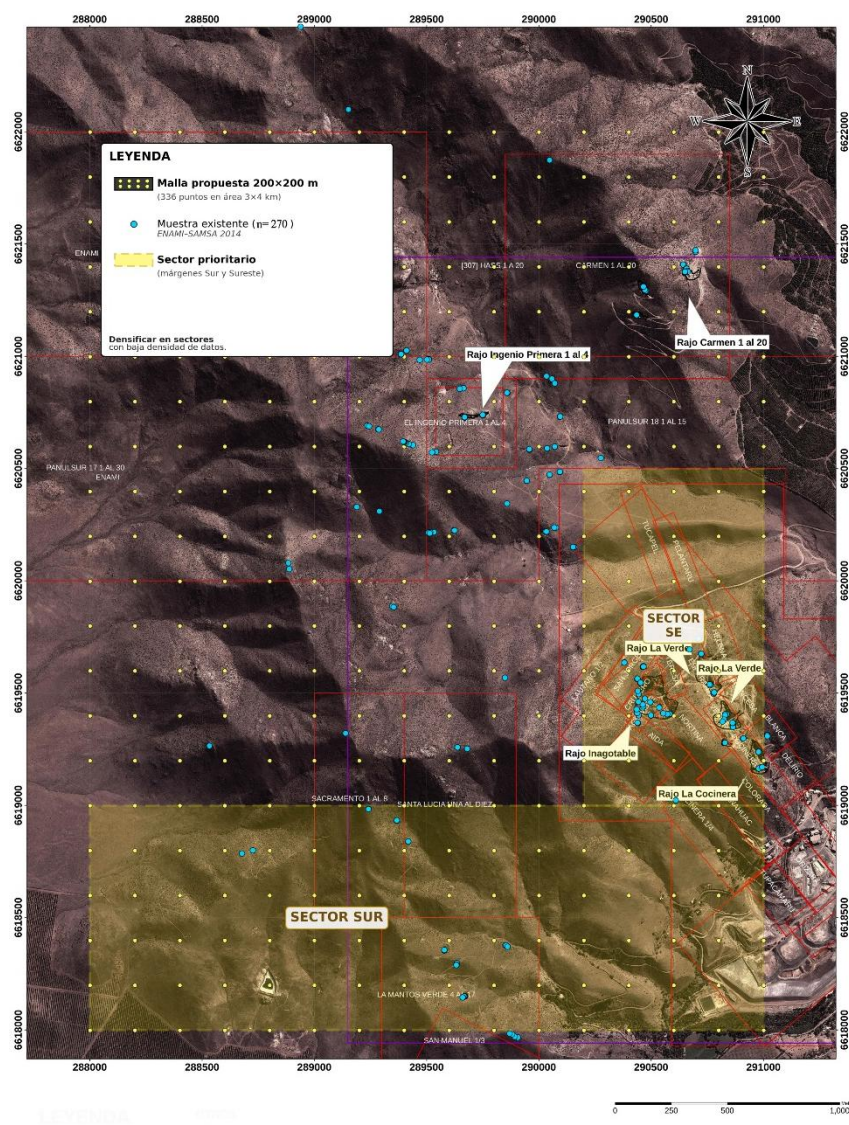


Figura 8.2 Malla de muestreo geoquímico de superficie propuesta para el distrito Cocinera–Inagotable, con espaciamiento regular de 200 × 200 m (Fuente: Elaboración propia).

Recomendación 3— Análisis multielemental de testigos de sondaje.

De manera complementaria al trabajo de superficie, se sugiere realizar un muestreo sistemático de los testigos de sondaje obtenidos en las futuras campañas de perforación. Todas las muestras (tanto de superficie como de profundidad) deberán ser sometidas a análisis geoquímicos multielementales mediante técnicas de ICP-OES o ICP-MS. El objetivo de este análisis es cuantificar no solo el cobre, sino también elementos trazadores propios del sistema hidrotermal (Mo, As, Zn, Pb, Au, Ag, Fe). Esta información será fundamental para caracterizar la distribución vertical de las leyes, establecer la relación química entre los dos pulsos hipógenos identificados, definir zonaciones geoquímicas y generar vectores de exploración que apunten hacia los sectores de mayor potencial económico en profundidad.

Recomendación 4 — Proyección MT hacia el NW del distrito

Se recomienda extender el levantamiento magnetotelúrico mediante la adquisición de perfiles adicionales hacia el sector NW del distrito, con el objetivo de evaluar la continuidad de las anomalías conductivas identificadas en los perfiles L3 y L4 y verificar la hipótesis de que el corredor conductor profundo del sector NW podría representar una vía de ascenso preferencial de fluidos hidrotermales. La ampliación de la cobertura permitiría además reducir la incertidumbre asociada a la complejidad tridimensional del sistema, mejorar la definición de los límites del dominio conductor y refinar la interpretación de la posición del distrito respecto al centro del sistema hidrotermal. Se sugiere un espaciamiento entre estaciones similar al utilizado en la campaña actual (200 m), con un mínimo de dos perfiles adicionales orientados en la misma dirección SO–NE.

REFERENCIAS

- Åberg, G., Aguirre, L., Levi, B., & Nystrom, J.O. (1984). Spreading-subsidence and generation of ensialic marginal basins: an example from the Early Cretaceous of Chile. *Geological Society Special Publication*, 16, 185–193.
- Aguilef, S. (2012). *Análisis geológico de estudios geofísicos de polarización inducida (IP) en sistemas IOCG y pórfido cuprífero del norte de Chile*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, 124 p.
- Ajithabh, K.S., & Patro, P.K. (2023). SigMT: An open source Python package for magnetotelluric data processing. *Computers & Geosciences*, 171, 105270.
- Arévalo, C., Mpodozis, C., Iriarte, S., & Rivera, O. (2006). *Carta Copiapó, Región de Atacama, escala 1:100.000*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica.
- Booker, J.R. (2014). The magnetotelluric phase tensor: A critical review. *Surveys in Geophysics*, 35(1), 7–40.
- Boric, R., Holmgren, C., Wilson, N.S.F., & Zentilli, M. (2002). The geology of the El Soldado manto type Cu (Ag) deposit, Central Chile. En T.M. Porter (Ed.), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective*, Vol. 2 (pp. 163–184).
- Cagniard, L. (1953). Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18(3), 605–635.
- Caldwell, T.G., Bibby, H.M., & Brown, C. (2004). The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal International*, 158(2), 457–469.
- Castellón Grime, R.M.T. (2017). *Geología del yacimiento Panulcillo, comuna de Ovalle, región de Coquimbo, Chile*. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Geociencias, Pontificia Universidad Católica de Chile, 173 p.

- Chave, A.D., & Jones, A.G. (Eds.) (2012). *The Magnetotelluric Method: Theory and Practice*. Cambridge University Press.
- Chávez, L. (1992). *Estimación de recursos remanentes y recursos inferidos en Mina Inagotable y Veta Manto Solero*. ENAMI [informe interno].
- Corbett, G.J., & Leach, T.M. (1998). *Southwest Pacific Rim Gold–Copper Systems: Structure, Alteration and Mineralisation*. Society of Economic Geologists, Special Publication No. 6.
- del Real, I., Reich, M., Simon, A.C., Deditius, A., Barra, F., Rodríguez-Mustafá, M.A., Thompson, J.F.H., & Roberts, M.P. (2023). Formation of giant iron oxide-copper-gold deposits by superimposed episodic hydrothermal pulses. *Scientific Reports*, 13, 12041.
- Dentith, M., & Mudge, S.T. (2014). *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge University Press.
- Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W., & Inan, E.E. (2003). Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 10, 285–313.
- ENAMI (2023). *Campaña de sondajes diamantinos, sector Cocinera, distrito Cocinera–Inagotable*. Empresa Nacional de Minería [informe interno].
- ENAMI (2025). *Programa de Reconocimiento de Recursos – Panulsur 18 1-15, Comuna de Ovalle, Provincia de Limarí, región de Coquimbo*. Empresa Nacional de Minería [informe interno].
- Espinoza, R.S., Véliz, G.H., Esquivel, L.J., Arias, F.J., Moraga, B.A. (1996). The cupriferous province of the Coastal Range, northern Chile. In: Camus, F., Sillitoe, R.H., Petersen, R. (Eds.), *Andean Copper Deposits: New Discoveries, Mineralization Styles and Metallogeny*. Society of Economic Geologist 5, p. 19–32.

- GX Geoscience (s.f.). *GX-INF, 2026: Informe técnico magnetotelúrico distrito Cocinera–Inagotable* [informe técnico].
- Hopper, D., & Correa, A. (2000). *The Panulcillo and Teresa de Colmo Copper Deposits*. Informe técnico.
- Kojima, S., Astudillo, J., Rojo, J., Tristá, D., Hayashi, K. 2003. Ore mineralogy, fluid inclusion, and stable isotopic characteristics of stratiform copper deposits in the Coastal Cordillera of northern Chile. *Mineralium Deposita*, 38, 208–216.
- Maksaev V., Zentilli M. (2002) Chilean stratabound Cu – (Ag) deposits: An overview. In: Porter TM (ed.) *Hydrothermal iron oxide copper – gold and related deposits: A global perspective*, 2. PCG Publishing, p 185 – 205.
- Metronix Geophysics (2002). *ProcMT: Software de procesamiento magnetotelúrico* [manual de usuario].
- Morata, D., & Aguirre, L. (2003). Extensional Lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29°20'–30°S), Chile: geochemistry and petrogenesis. *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 459–476.
- Mpodozis, C., & Ramos, V.A. (1990). The Andes of Chile and Argentina. En G.E. Ericksen, M.T. Cañas, & J.A. Reinemund (Eds.), *Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources* (pp. 59–90). Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources.
- Mpodozis, C., & Ramos, V.A. (2008). Tectónica jurásica en Argentina y Chile: extensión, subducción oblicua, rifting, deriva y colisiones *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63(4), 481–497.
- Orellana, E. (1982). *Prospección geoeléctrica en corriente continua* (2ª ed.). Paraninfo, Madrid, 578 p.

- Palacky, G.J. (1987). Resistivity characteristics of geologic targets. En M.N. Nabighian (Ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol. 1: Theory* (pp. 53–129). Society of Exploration Geophysicists.
- Parkinson, W.D. (1959). Directions of rapid geomagnetic fluctuations. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2(1), 1–14.
- Parra, R. (1994). *Resultados del sondaje 94003, Mina Inagotable*. ENAMI [informe interno].
- Pérez Contreras, D. (2024). *Modelo de exploración magnetotelúrico de SCM Carola, Región de Atacama, Chile*. Trabajo de Titulación para optar al título de Geólogo, Universidad de Atacama, Facultad de Ingeniería, Departamento de Geología, Copiapó, Chile.
- Piña-Varas, P. (2014). *Aplicación del método magnetotelúrico a la caracterización de reservorios: Anticlinal de El Hito (Cuenca) y Sistema Geotérmico de Tenerife*.
- Piracés, R. (1986). *Geología del distrito La Cocinera–Inagotable*. Informe interno, ENAMI.
- Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer.
- Pridmore, D.F., & Shuey, R.T. (1976). The electrical resistivity of galena, pyrite, and chalcopyrite. *American Mineralogist*, 61, 248–259.
- Ramos, V.A. (1985). El mesozoico de la alta cordillera mendocina-sanjuanina: Geocronología y evolución tectónica. *Actas del IV Congreso Geológico Chileno*, 27–41.
- Ramos, V.A. (1999). Plate tectonic setting of the Andean Cordillera. *Episodes*, 22(3), 183–190.
- Ramos, V.A. (2009). Anatomy and global context of the Andes: main geologic features and the Andean orogenic cycle. *Geological Society of America Memoirs*, 204, 31–65.
- Ramos, V.A., & Alemán, A. (2000). Tectonic evolution of the Andes. En U.G. Cordani et al. (Eds.), *Tectonic Evolution of South America* (pp. 635–685). 31st International Geological Congress.

- Rodi, W., & Mackie, R.L. (2001). Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66(1), 174–187.
- SAMSA (2014). *Estudio geológico y estimación de recursos, distrito Cocinera–Inagotable*. Informe técnico.
- Sillitoe, R.H. (1990). Copper-rich porphyry systems: implications for metallogeny. En H. Green (Ed.), *Geology and Ore Deposits of the American Cordillera* (pp. 1–6). Geological Society of Nevada.
- Sillitoe, R.H. (2005). Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 723–768.
- Simpson, F., & Bahr, K. (2005). *Practical Magnetotellurics*. Cambridge University Press, 254 p.
- Somoza, R., & Zaffarana, C.B. (2008). Mid-Cretaceous polar standstill of South America, motion of the Atlantic hotspots and the birth of the Andean cordillera. *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1–4), 267–277.
- Sugaki, A., Campos, E., & Kojima, S. (2000). Mineralogy and mineralization of the Panulcillo skarn deposit, northern Chile. *Resource Geology*, 50(3), 161–172.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., & Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Vergara, M., Levi, B., Nystrom, J.O., & Cancino, A. (1995). Jurassic and Early Cretaceous island arc volcanism, extension, and subsidence in the Coast Range of central Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 107(12), 1427–1440.
- Vivallo, W., & Henríquez, F. (1998). Génesis común de los yacimientos estratoligados y vetiformes de cobre del Jurásico medio a Cretácico inferior en la Cordillera de la Costa, región de Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 25(2), 199–228.

- Vozoff, K. (1972). The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. *Geophysics*, 37(1), 98–141.
- Zhang, P., Roberts, R.G., & Pedersen, L.B. (1987). Magnetotelluric strike rules. *Geophysics*, 52(3), 267–278.

ANEXOS

Anexo A. Descripciones microscópicas de muestras.

❖ Muestra 1 (N:6619431; E:290522; Z:445)

		MINERAL	% VOLUMEN	MODO DE OCURRENCIA
MINERALOGÍA PRIMARIA (18%)	FENOCRISTALES (5%)	Plagioclasa	5	Ocurren como cristales euhedrales de hábito tabular y tamaño variable entre 0,2 y 2 mm, afectados por una albitización débil, que les confiere un aspecto turbio, asociada a la presencia de sericita, parches de carbonato y diseminaciones finas de arcillas.
	MASA FUNDAMENTAL (13%)	Plagioclasa	11	Microlitos subtabulares de tamaño medio <0,2 mm, como constituyentes principales de la masa fundamental.
		Vidrio	2	Ocurre como un material criptocristalino de difícil determinación, distribuido entre los microlitos de plagioclasa en una proporción subordinada.
		Carbonato	1	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Clorita	< 1	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Cuarzo secundario	< 1	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Arcilla	< 1	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Opacos	1	Ver mineralogía de alteración y opacos.
MINERALOGÍA DE ALTERACIÓN Y OPACOS (82%)		Albita	D	Se interpreta como producto de una alteración moderada de plagioclasas en un porcentaje difícil de determinar, dado que se trata de un reemplazo metasomático. Se indica como débil (D).
		Carbonato	19	Ocurre como: a) Relleno dentro de la veta principal y en fracturas irregulares, en ambos casos ligado a la presencia de anhidrita, cuarzo y feldespatos potásicos secundarios, arcillas y opacos. b) Parches anhedrales impregnados sobre la masa fundamental de la muestra, como parte de un reemplazo leve que se completa con la presencia de clorita, cuarzo secundario y arcillas, además de impregnaciones de opacos.
		Sericita	< 1	Agregados finos diseminados sobre la superficie de los fenocristales de plagioclasa, como parte de un leve reemplazo asociado a albita, carbonato y arcillas.
		Clorita	< 1	Se presenta, en un volumen subordinado, como parches anhedrales de tamaño variable, impregnados sobre la masa fundamental de la muestra, como parte de una leve alteración que se completa con la presencia de carbonato, cuarzo secundario y arcillas, además de impregnaciones de opacos.
		Anhidrita	14	Cristales euhedrales de tamaño medio 0,4 mm, que ocurren como relleno dentro de la veta principal y en fracturas menores, asociados, en ambos casos, a carbonato, feldespatos potásicos y cuarzo secundarios, arcillas y opacos.
		Feldespatos potásicos	4	Parches anhedrales de tamaño medio 0,4 mm, como relleno de fracturas y dentro de la veta principal, asociado a cuarzo secundario, anhidrita, carbonato, arcillas y opacos.
		Cuarzo secundario	39	a) Cristales de grandes dimensiones, de hasta 1 cm, como parte de agregados policristalinos bien desarrollados que ocurren junto con anhidrita, feldespatos potásicos secundarios, carbonato, arcillas e impregnaciones de opacos. b) Como relleno de fracturas, en agregados de pequeños cristales anhedrales a policristalinos, junto con carbonato, arcillas e impregnaciones de opacos. c) Parches anhedrales o en agregados policristalinos sobre la masa fundamental, como parte de una leve alteración que se completa con la presencia de carbonato, clorita y arcillas, además de impregnaciones de opacos.
		Arcilla	3	Material criptocristalino que ocurre como: a) Producto de una alteración leve de los fenocristales de plagioclasa, asociado a sericita, carbonato y albita. b) Diseminaciones finas dentro de la masa fundamental, como producto de una leve alteración que se completa con la presencia de carbonato, clorita y cuarzo secundario, además de impregnaciones de opacos. c) En relleno de veta y fracturas, junto con cuarzo secundario, anhidrita, feldespatos potásicos secundarios, carbonato e impregnaciones de opacos.
		Opacos	3	a) Cristales euhedrales y parches anhedrales de hasta 0,4 mm, impregnados sobre la masa fundamental de la muestra. b) Agregados cumulares y parches anhedrales como relleno dentro de la veta y en fracturas, asociados a carbonato, anhidrita, feldespatos potásicos secundarios, arcillas y cuarzo secundario.

La mineralización metálica representa el 3% del volumen total de la muestra		
MINERAL	% TOTAL DE LA MUESTRA	MODO DE OCURRENCIA
Pirita	68	Se presentan como cristales subhedrales a anhedrales diseminados. A veces en contacto simple con bornita o siendo reemplazada por esta. Ocasionalmente rellenando espacios en bornita.
Bornita	30	Cristales anhedrales diseminados. A menudo en contacto simple con pirita o reemplazándola a través de pequeñas fracturas. La menor de las veces con inclusiones, tipo "blebs" de calcopirita.
Esfalerita	1	Ocurre como cristales anhedrales aislados. La menor de las veces intercrecida con rutilo.
Rutilo	1	Diseminaciones anhedrales sobre ganga no metálica. A veces intercrecido con esfalerita.
Calcopirita	Trazas	Se presenta como finas inclusiones, tipo "blebs" en bornita.

Figura A.1 Descripciones microscópicas de muestra M1 (Fuente: Elaboración propia).

❖ Muestra 2 (N:6619418; E:290557; Z:436)

		MINERAL	% VOLUMEN	MODO DE OCURRENCIA
MINERALOGÍA PRIMARIA (58%)	FENOCRISTALES (21%)	Plagioclasa	21	Ocurren como cristales euhedrales a subhedrales de tamaño variable entre 0,2 y 2 mm. Presentan un grado de alteración heterogéneo, caracterizado por el predominio de una albitización débil con parches de clorita en algunas, y en otras por la presencia de abundantes parches anhedrales de carbonato y anhidrita, en ambos casos asociado a la presencia de arcillas.
	MASA FUNDAMENTAL (37%)	Plagioclasa	27	Microlitos subtabulares de tamaño medio <0,2 mm, como constituyentes principales de la masa fundamental.
		Vidrio	10	Ocurre como un material criptocristalino de difícil determinación, distribuido entre los microlitos de plagioclasa en una proporción subordinada.
		Carbonato	8	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Anhidrita	6	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Clorita	1	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Feldespatos potásico	6	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Cuarzo secundario	3	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Arcilla	4	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Opacos	8	Ver mineralogía de alteración y opacos.
MINERALOGÍA DE ALTERACIÓN Y OPACOS (42%)		Albita	D	Se interpreta como producto de una alteración moderada de plagioclasas en un porcentaje difícil de determinar, dado que se trata de un reemplazo metasomático. Se indica como débil (D).
		Anhidrita	7	Se presenta: a) En parches anhedrales impregnados sobre fenocristales de plagioclasa, como producto de una fuerte alteración asociada a carbonatos y arcillas. b) Parches anhedrales y locales cristales euhedrales impregnados sobre la masa fundamental, como producto de una alteración que se completa con la presencia de carbonato, feldespato potásico y cuarzo secundarios, clorita, arcillas e hidróxidos de hierro.
		Carbonato	10	Ocurre como: a) Sobre fenocristales de plagioclasa, como parches anhedrales producto de una fuerte alteración asociada a anhidrita y arcillas. b) Parches anhedrales impregnados sobre la masa fundamental, como producto de una alteración caracterizada por la presencia conjunta de carbonato, anhidrita, feldespato potásico y cuarzo secundarios, clorita, arcillas e hidróxidos de hierro.
		Feldespato potásico	6	Ocurre como parches anhedrales impregnados sobre la masa fundamental, como componente subordinado de una alteración caracterizada por anhidrita y carbonato
		Cuarzo secundario	3	a) Cristales de grandes dimensiones, de hasta 1 cm, como parte de agregados policristalinos bien desarrollados que ocurren junto con anhidrita, feldespato potásico secundario, carbonato, arcillas e impregnaciones de opacos. b) Como relleno de fracturas, en agregados de pequeños cristales anhedrales a policristalinos, junto con carbonato, arcillas e impregnaciones de opacos. c) Parches anhedrales o en agregados policristalinos sobre la masa fundamental, como parte de una leve alteración que se completa con la presencia de carbonato, clorita y arcillas, además de impregnaciones de opacos.
		Clorita	2	a) Parches anhedrales de tamaño medio 0,2 mm, posiblemente como producto de un reemplazo perversivo de ferromagnesianos de la masa fundamental, asociado a anhidrita, carbonato, cuarzo y feldespato potásico secundarios, arcilla e hidróxidos de hierro. b) En relleno de fracturas, restringidamente, asociada a hidróxidos de hierro. c) Parches anhedrales locales, impregnados sobre fenocristales de plagioclasa levemente albitizados, asociados a arcillas.
		Arcilla	5	Material criptocristalino que ocurre como: a) Producto de un reemplazo incipiente de plagioclasas, como diseminaciones finas sobre la superficie de los cristales. b) Agregados finos o compactos diseminados dentro de la masa fundamental, como parte de una mineralogía de alteración que se completa con la presencia de anhidrita, carbonato, clorita, feldespato potásico y
		Opacos	9	Principalmente, ocurren como impregnaciones anhedrales de hidróxidos de hierro sobre la masa fundamental y en relleno de pequeñas fracturas. Además, se observan como pequeños parches subredondeados restringidos, de tamaño medio 0,1 mm, diseminados dentro de la masa fundamental.

La mineralización metálica representa el 9% del volumen total de la muestra		
MINERAL	% TOTAL DE LA MUESTRA	MODO DE OCURRENCIA
Hematita	37	Ocurren como finos cristales anhedrales diseminados como impregnaciones en cristales de plagioclasas constituyente fundamental. y como de la masa Frecuentemente afectados por una proceso de reemplazo a hidróxidos de hierro.
Hidróxidos de hierro	60	Parches anhedrales diseminados o como relleno de fracturas y oquedades.
Rutilo	3	Finas diseminaciones en la masa fundamental de la muestra.
Pirita	Trazas	Pequeño cristal anedral aislado.

Figura A.2 Descripciones microscópicas de muestra M2(Fuente: Elaboración propia).

❖ Muestra 3 (N:6621245; E:290483; Z:653)

	LÍTICO/ MINERAL	% VOLUMEN	MODO DE OCURRENCIA
FRAGMENTOS (74%)	Líticos	69	Los fragmentos líticos son de morfología angulosa y tamaño variable entre 1 y 6 mm. Predominan los de composición andesítica con textura porfídica a glomeroporfídica, caracterizados por la presencia de fenocristales de plagioclasa débil a moderadamente albitizados, argilizados y con una leve alteración a sericita y feldespato potásico; pseudomorfos de probables ferromagnesianos reemplazados por clorita, micas blancas e hidróxidos de hierro; y, restringidamente, pseudomorfos de probables plagioclasas generados por una total alteración por micas blancas, incluidos dentro de una masa fundamental microcristalina. Esta última está constituida por microlitos de plagioclasa y una abundante mineralogía de alteración: cuarzo y feldespato potásico secundarios, en agregados microcristalinos, diseminaciones y agregados compactos de arcillas e hidróxidos de hierro. Algunos fragmentos subordinados se encuentran pervasivamente reemplazados por cuarzo secundario y/o feldespato potásico secundario asociado a arcillas.
	Cristales	5	Plagioclasa (5%): Fragmentos euhedrales de tamaño variable entre 0,2 y 1 mm, débil a moderadamente albitizados, argilizados y con un leve reemplazo por sericita y feldespato potásico. Algunos cristales, en un porcentaje muy subordinado, se encuentran pervasivamente alterados a micas blancas y han sido interpretados como pseudomorfos de probables plagioclasas. Pseudomorfos de probables ferromagnesianos (<1%): Cristales subredondeados de tamaño medio 0,2 mm, pervasivamente reemplazados por clorita, micas blancas y con impregnaciones de opacos, principalmente hidróxidos de hierro.
MATRIZ O CEMENTO (26%)	Plagioclasa	6	Microlitos subtabulares de tamaño medio <0,2 mm, afectados por una alteración análoga a la observada en los fragmentos.
	Albita	< 1	Se interpreta como producto de una alteración moderada de plagioclasas en un porcentaje difícil de determinar, dado que se trata de un reemplazo metasomático. Se indica como débil a moderado (D-M)
	Sericita	< 1	Agregados finos y diseminaciones sobre plagioclasas de fragmentos líticos, fragmentos de cristales y microlitos de la masa fundamental, asociados a albita de alteración, feldespato potásico secundario y arcillas.
	Feldespato potásico	2	Se presenta como: a) Parches anhedralmente impregnados sobre la matriz de la brecha y dentro de la masa fundamental de fragmentos líticos, asociados a arcillas, cuarzo secundario e impregnaciones de opacos, principalmente hidróxidos de hierro. b) Agregados de pequeños parches anhedralmente asociados a arcillas, como producto de un reemplazo pervasivo de algunos fragmentos líticos. c) Como alteración leve a moderada de plagioclasas (en fragmentos líticos, fragmentos de cristales y microlitos de la matriz)
	Cuarzo secundario	13	a) Agregados micro a policristalinos de cuarzo secundario, desarrollados como producto de un reemplazo moderado de la matriz de la brecha y de la masa fundamental de fragmentos líticos, asociados a feldespato potásico secundario, arcillas e impregnaciones de opacos
	Arcilla	1	Material criptocristalino que ocurre como: a) Producto del reemplazo leve a moderado de plagioclasas (fragmentos líticos, fragmentos de cristales y microlitos de la matriz), asociado a albita de alteración, feldespato potásico secundario y diseminaciones de arcillas. b) Agregados finos y compactos que ocurren dentro de la matriz de la brecha y dentro de la masa fundamental de fragmentos líticos, asociados a cuarzo y feldespato potásico secundario e impregnaciones de opacos, principalmente hidróxidos de hierro. c) En relleno de fracturas irregulares menores, asociado a clorita y opacos, principalmente hidróxidos de hierro.
	Opacos	2	a) Cristales subhedrales de opacos y parches anhedralmente de hidróxidos de hierro impregnados sobre la matriz de la brecha y dentro de la masa fundamental. b) Como impregnaciones anhedralmente, en parte de hidróxidos de hierro, sobre probables ferromagnesianos pseudomorfizados, afectados por un reemplazo intenso por clorita y micas blancas. c) En relleno de fracturas menores irregulares, principalmente como hidróxidos de hierro asociados a clorita y arcillas.
	Clorita	1	Ocurre como: a) Producto de la alteración pervasiva de probables ferromagnesianos que da origen a pseudomorfos, asociados a impregnaciones de opacos (hidróxidos de hierro). b) Relleno de fracturas menores, asociada a arcillas y opacos, principalmente hidróxidos de hierro.

Figura A.3 Descripciones microscópicas de muestra M3 (Fuente: Elaboración propia).

❖ Muestra 4 (N:6618380; E:289820; Z:402)

		MINERAL	% VOLUMEN	MODO DE OCURRENCIA
MINERALOGIA PRIMARIA (55%)	FENOCRISTALES (3%)	Plagioclasa	3	Ocurren como cristales euhedrales a subhedrales de hábito tabular y tamaño medio 1 mm, afectados por una posible albitización moderada que oblitera el maclado polisintético y origina un aspecto turbio, además de una leve sericitización acompañada de parches de carbonato, clorita y diseminaciones de arcillas.
	MASA FUNDAMENTAL (52%)	Plagioclasa	50	Cristales euhedrales a subhedrales de hábito tabular y tamaño medio 0,2 mm, afectados por un reemplazo leve por carbonato, clorita, sericita y arcillas.
		Cuarzo	2	Ocurren como cristales anhedralmente subredondeados, de tamaño medio 0,1 mm, diseminados restringidamente dentro de la masa fundamental.
		Cuarzo secundario	2	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Sericita	2	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Clorita	8	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Carbonato	26	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Arcilla	2	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Opacos	4	Ver mineralogía de alteración y opacos.
MINERALOGÍA DE ALTERACIÓN Y OPACOS (45%)	Albita	M		Se interpreta como producto de una alteración moderada de plagioclasas en un porcentaje difícil de determinar, dado que se trata de un reemplazo metasomático. Se indica como moderada (M).
	Clorita	8		Se presenta como: a) Mayoritariamente, como parches anhedralmente impregnados sobre la masa fundamental, asociados a carbonato, arcillas e impregnaciones de opacos. Localmente, se observan dentro de armazones de plagioclasa, dando origen a la textura intersertal. b) Junto con carbonato y arcillas, como parches anhedralmente subredondeados en cuyos bordes se desarrollan pequeños cristales de minerales metálicos. c) En los bordes de oquedades rellenas de cuarzo secundario y carbonato, como agregados anhedralmente de disposición radial.
	Cuarzo secundario	2		Como parches anhedralmente de tamaño medio 1 mm, en relleno de oquedades asociados a carbonato y clorita.
	Sericita	2		Agregados finos diseminados sobre fenocristales y cristales de la masa fundamental de plagioclasa, como producto de una alteración asociada a clorita, carbonato y arcillas, además de albita en los primeros.
	Carbonato	27		Ocurre como: a) Parches anhedralmente y diseminaciones sobre fenocristales y cristales de la masa fundamental de plagioclasa, que ocurren ligados a la presencia de clorita, sericita y arcillas, además de albita en las primeras. b) Parches anhedralmente y agregados finos diseminados dentro de la masa fundamental de la muestra.
	Arcilla	2		Material criptocristalino que ocurre como: a) Diseminaciones sobre fenocristales y cristales de la masa fundamental de plagioclasa, como producto de una alteración asociada a clorita, carbonato y arcillas, además de albita en los primeros. b) Agregados finos diseminados dentro de la masa fundamental, como producto de la alteración de sus componentes, asociados a clorita, carbonato e impregnaciones de opacos.
	Opacos	4		Cristales subredondeados de tamaño medio 0,02 mm, diseminados dentro de la masa fundamental y en los bordes de parches subredondeados de clorita y carbonato.

Figura A.4 Descripciones microscópicas de muestra M4 (Fuente: Elaboración propia).

❖ Muestra 5 (N:6621360; E:289368; Z:535)

	LÍTICO/ MINERAL	% VOLUMEN	MODO DE OCURRENCIA
FRAGMENTOS (38%)	Líticos	38	Se presentan como fragmentos subangulosos a angulosos de origen volcánico y textura porfídica seriada, caracterizados por la presencia de fenocristales de plagioclasa moderadamente argilizados, con un incipiente metasomatismo potásico e impregnaciones de minerales opacos, incluidos en una masa fundamental compuesta de microlitos de plagioclasa, agregados de cuarzo secundario, arcilla, hidróxidos de hierro y diseminaciones de minerales opacos. La relación entre los fenocristales y la masa fundamental es 30/70.
MATRIZ O CEMENTO (62%)	Plagioclasa	19	Se presentan como cristales subhedrales de hábito tabular y tamaño variable entre 0,1 (microlitos) y 2 mm (fenocristales). Exhiben una moderada argilización y un metasomatismo potásico incipiente, acompañado de impregnaciones locales de minerales opacos e hidróxidos de hierro.
	Cuarzo secundario	31	Agregado micro a policristalino que ocurre como reemplazo de la masa fundamental volcánica de los fragmentos líticos y de la matriz; junto a jarosita, arcilla, hidróxidos de hierro, microlitos de plagioclasa y minerales opacos.
	Feldespato potásico	1	Se presenta como reemplazo metasomático incipiente de fenocristales de plagioclasa pertenecientes tanto a la masa fundamental como a los fragmentos líticos.
	Clorita	1	Agregado cristalino fino que ocurre como: a) Reemplazo total de posibles ferromagnesianos, generando pseudomorfos prismáticos de tamaño medio 1 mm, asociados a impregnaciones de minerales opacos. b) Parches anhedral distribuidos de forma heterogénea dentro de los fragmentos líticos.
	Arcilla	5	Material criptocristalino que ocurre como: a) Alteración moderada de cristales de plagioclasa, asociada a impregnaciones de minerales opacos. b) Diseminaciones heterogéneas dentro de la masa fundamental de la matriz y de los fragmentos líticos.
	Jarosita	1	Agregado cristalino fino que se presenta como parches implantados dentro de la masa fundamental, en ocasiones asociado a minerales opacos.
	Opacos	4	Cristales anhedral de tamaño medio 0,2 mm, que ocurren como: a) Diseminaciones heterogéneas dentro de la masa fundamental tanto de la matriz como de los fragmentos líticos. b) Impregnaciones locales sobre fenocristales de plagioclasa, asociados a arcilla y también sobre pseudomorfos cloritizados de posibles ferromagnesianos.
	Epidota	Tr	Cristales anhedral de tamaño medio inferior a 0,1 mm, que ocurren como diseminaciones ocasionales dentro de los fragmentos líticos.

Figura A.5 Descripciones microscópicas de muestra M5 (Fuente: Elaboración propia).

❖ Muestra 6 (N:6620860; E:289663; Z: 425)

		MINERAL	% VOLUMEN	MODO DE OCURRENCIA
MINERALOGIA PRIMARIA (83%)	FENOCRISTALES (50%)	Plagioclasa	50	Ocurren como cristales euhedrales de hábito tabular y tamaño variable entre 0,2 y 2 mm, afectados por una albitización débil, que les confiere un aspecto turbio, asociada a la presencia de sericita, parches de carbonato y diseminaciones finas de arcillas.
	MASA FUNDAMENTAL (33%)	Plagioclasa	33	Microlitos subtabulares de tamaño medio <0,2 mm, como constituyentes principales de la masa fundamental.
		Clorita	4	Ocurre como un material criptocristalino de difícil determinación, distribuido entre los microlitos de plagioclasa en una proporción subordinada.
		Carbonato	1	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Arcilla	< 1	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Opacos	3	Ver mineralogía de alteración y opacos.
MINERALOGÍA DE ALTERACIÓN Y OPACOS (17%)		Clorita	6	Se presenta: a) Como producto de la alteración leve de fenocristales de plagioclasa, como parches anhedralmente asociados a sericita, carbonato y arcillas. b) En un reemplazo pervasivo de probables ferromagnesianos, dando origen a fenocristales pseudomorfizados, junto con carbonato e impregnaciones de opacos. c) Como parches anhedralmente de aspecto fibroso y hábito radial, impregnados sobre la masa fundamental, y localmente desarrollados como un halo de alteración de fracturas rellenas de carbonato.
		Sericita	2	Ocurre como producto de una alteración leve de fenocristales de plagioclasa, en pequeños cristales fibrosos diseminados sobre la superficie de los cristales y asociados a carbonato, parches de clorita y diseminaciones de arcillas.
		Carbonato	4	Ocurre: a) Pequeños parches de anhedralmente impregnados sobre fenocristales de plagioclasa, asociados a sericita, clorita y arcillas. b) Como producto de la pervasiva alteración que afecta fenocristales de probables ferromagnesianos y que da origen a pseudomorfos, junto con clorita e impregnaciones de opacos. c) Parches anhedralmente de hasta 0,4 mm impregnados sobre la masa fundamental, asociados a clorita, arcillas e impregnaciones de opacos. d) Agregados finos que se desarrollan como relleno de pequeñas fracturas irregulares que cortan la masa fundamental.
		Arcilla	1	Material criptocristalino que ocurre como: a) Agregados finos diseminados sobre fenocristales de plagioclasa, como producto de una leve alteración que se completa con la presencia de sericita, clorita y carbonato. b) Diseminaciones dentro de la masa fundamental de la muestra como producto de su alteración, asociadas a clorita, carbonato e impregnaciones de opacos.
		Opacos	4	a) Parches subredondeados que alcanzan tamaños de hasta 0,4 mm, impregnados sobre fenocristales de probables ferromagnesianos pseudomorfizados por clorita y carbonato. b) Pequeños parches anhedralmente de tamaño medio <0,2 mm, impregnados sobre la masa fundamental de la muestra y asociados a la alteración caracterizada por clorita, carbonato y arcillas.

Figura A.6 Descripciones microscópicas de muestra M6 (Fuente: Elaboración propia).

❖ Muestra 7 (N:6619416; E:290866; Z:445)

		MINERAL	% VOLUMEN	MODO DE OCURRENCIA
MINERALOGIA PRIMARIA (83%)	FENOCRISTALES (19%)	Plagioclasa	19	Cristales subhedrales de hábito tabular y tamaño variable entre 0,6 y 4 mm, exhibiendo un metasomatismo potásico incipiente desde los bordes, una argilización en grado moderado y posiblemente una débil albitización. Presenta además impregnaciones locales de minerales opacos y maclas polisintéticas poco conservadas.
	MASA FUNDAMENTAL (64%)	Plagioclasa	56	Ocurren como microlitos subhedrales de hábito tabular y tamaño medio 0,1 mm, formando parte de la masa fundamental, como componente principal, acompañado de diseminaciones de arcilla, hidróxidos de hierro, oxidados de cobre y minerales opacos.
		Arcilla	5	Ver mineralogía de alteración, opacos y oxidados de cobre.
		Oxidados de cobre	1	Ver mineralogía de alteración, opacos y oxidados de cobre.
		Opacos	2	Ver mineralogía de alteración, opacos y oxidados de cobre.
MINERALOGÍA DE ALTERACIÓN Y OPACOS (17%)		Arcilla	7	Material criptocristalino que se presenta como: a) Diseminaciones heterogéneas dentro de la masa fundamental, acompañada de microlitos de plagioclasa, minerales opacos y oxidados de cobre. b) Alteración moderada de fenocristales de plagioclasa, junto a impregnaciones de minerales opacos.
		Albita	D	de plagioclasas, en un porcentaje difícil de determinar, dado que se trata de un reemplazo metasomático. Se indica como débil (D), debido al aspecto levemente turbio de los cristales, que conservan bordes definidos, y la no generación de estructura tipo tablero de ajedrez, típica de albita secundaria.
		Feldespatos potásico	< 1	Ocurre como reemplazo incipiente de fenocristales de plagioclasa desde los bordes.
		Oxidados de cobre	6	Agregado cristalino fino que ocurre como: a) Relleno de fracturas finas, junto a hidróxidos de hierro y minerales opacos. b) Parches implantados dentro de la masa fundamental.
		Opacos	4	Cristales anhedral a subhedrales, que ocurren como: a) Diseminaciones heterogéneas dentro de la masa fundamental, junto a microlitos de plagioclasa, oxidados de cobre y arcilla. b) Impregnaciones locales sobre fenocristales de plagioclasa, asociado a arcilla. c) Hidróxidos de hierro (3%), que se presentan como parches diseminados dentro de la masa fundamental y también como relleno de fracturas, asociado a oxidados de cobre.

La mineralización metálica representa el 10% del volumen total de la muestra		
MINERAL	% TOTAL DE LA MUESTRA	MODO DE OCURRENCIA
Hidróxidos de hierro	35	Ocurren como: a) Parches anhedral relleno de espacios entre cristales b) Seudomorfos de probables piratas, en cuyo caso ocurren como cristales subhedrales a euhedrales.
Atacamita	63	Se presenta como relleno de fracturas o parches anhedral implantados. A veces intercrecidos con crisocola o formando texturas tipo corona.
Crisocola	2	Ocurre como cristales de hábito fibroso intercrecido con atacamita o formando textura tipo corona
Pirita	Tr	Relictos de cristales reemplazados por hidróxidos de hierro.

Figura A.7 Descripciones microscópicas de muestra M7 (Fuente: Elaboración propia).

❖ Muestra 8 (N:6619199; E:288349; Z:460)

		MINERAL	% VOLUMEN	MODO DE OCURRENCIA
MINERALOGIA PRIMARIA (64%)	FENOCRISTALES (21%)	Plagioclasa	21	Se presentan como cristales subhedrales de hábito tabular y tamaño variable entre 0,2 y 3 mm. Están afectados por una moderada argilización, leve sericitización, impregnaciones de minerales opacos y un frecuente fracturamiento que en algunos casos se encuentra relleno con carbonato. Las maclas polisintéticas son a veces reconocibles.
	MASA FUNDAMENTAL (43%)	Plagioclasa	16	Ocurren como microlitos subhedrales a anhedrales de hábito tabular y tamaño medio 0,1 mm, como componente principal de la masa fundamental, junto con cuarzo secundario, arcilla, jarosita, carbonato y minerales opacos.
		Arcilla	4	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Cuarzo secundario	6	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Jarosita	2	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Carbonato	4	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Opacos	11	Ver mineralogía de alteración y opacos.
MINERALOGÍA DE ALTERACIÓN Y OPACOS (36%)	Arcilla	6	Material criptocristalino que ocurre como: a) Alteración moderada de fenocristales y microlitos de plagioclasa, acompañada de sericita, impregnaciones de minerales opacos y carbonato como relleno de microfracturas. b) Diseminaciones heterogéneas dentro de la masa fundamental.	
	Cuarzo secundario	7	Agregado micro a policristalino que ocurre como: a) Componente de la masa fundamental, acompañado de arcilla, microlitos de plagioclasa, carbonato, jarosita y minerales opacos. b) Relleno de fracturas menores, asociado en algunos casos a carbonato.	
	Carbonato	6	Cristales anhedrales de tamaño medio inferior a 0,1 mm, que se presentan como: a) Relleno de fracturas y microfracturas (fenocristales de plagioclasa), asociado en algunos casos a cuarzo secundario. b) Parches implantados dentro de la masa fundamental. c) Reemplazo total de posibles ferromagnesianos, generando pseudomorfos prismáticos de tamaño medio 1 mm, acompañados de minerales opacos en bordes y microfracturas.	
	Sericita	2	Agregado fino a fibroso que ocurre como alteración leve de cristales de plagioclasa, acompañada principalmente por arcilla.	
	Jarosita	2	Agregado microcristalino que se presentan como parches locales dentro de la masa fundamental.	
	Opacos	13	Cristales anhedrales de tamaño variable entre 0,1 y 0,4 mm, que ocurren como: a) Relleno de fracturas finas presentes en la muestra. b) Impregnaciones sobre fenocristales de plagioclasa y también sobre pseudomorfos de posibles ferromagnesianos, reemplazados por carbonato. c) Diseminaciones heterogéneas dentro de la masa fundamental. d) Hidróxidos de hierro (11%) que se presentan como diseminaciones abundantes dentro de la masa fundamental en forma de agregados microcristalinos.	

Figura A.8 Descripciones microscópicas de muestra M8 (Fuente: Elaboración propia).

❖ Muestra 9 (N:6621455; E:290635; Z:577)

		MINERAL	% VOLUMEN	MODO DE OCURRENCIA
MINERALOGIA PRIMARIA (82%)	FENOCRISTALES (22%)	Plagioclasa	22	Se presentan como cristales subhedrales a anhedral de hábito tabular y tamaño variable entre 0,3 y 3 mm. Se encuentran moderadamente conservadas, con bordes irregulares y maclas polisintéticas poco reconocibles. Exhiben una argilización y sericitización moderada y una posible débil albitización, acompañadas de parches de clorita e impregnaciones locales de minerales opacos.
	MASA FUNDAMENTAL (60%)	Plagioclasa	49	Ocurre como microlitos subhedrales de hábito tabular y tamaño medio 0,1 mm. Se encuentran moderadamente alterados a arcilla, formando parte de la masa fundamental como componente principal, asociado a abundantes disseminaciones de arcilla e impregnaciones de minerales opacos.
		Arcilla	7	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Clorita	< 1	Ver mineralogía de alteración y opacos.
		Opacos	3	Ver mineralogía de alteración y opacos.
MINERALOGÍA DE ALTERACIÓN Y OPACOS (18%)		Arcilla	9	Material criptocristalino que ocurre como: a) Alteración de cristales de plagioclasa (fenocristales y microlitos) asociado a sericita, clorita y minerales opacos. b) Disseminaciones heterogéneas dentro de la masa fundamental junto a microlitos de plagioclasa y minerales opacos.
		Albita	D	Se interpreta como producto de una alteración incipiente de plagioclasas, en un porcentaje difícil de determinar, dado que se trata de un reemplazo metasomático. Se indica como débil (D), debido al aspecto levemente turbio de los cristales, que conservan bordes definidos
		Clorita	2	Agregado cristalino fino que se presenta como: a) Reemplazo total de posibles ferromagnesianos, generando pseudomorfos prismáticos a tabulares de tamaño medio 1 mm, asociados a abundantes impregnaciones de minerales opacos. b) Parches anhedral sobre fenocristales de plagioclasa, asociadas a arcilla y minerales opacos. c) Agregados cumulares dentro de la masa fundamental, junto a minerales opacos.
		Sericita	3	Agregado cristalino fino que ocurre como alteración moderada de fenocristales de plagioclasa, asociados a arcilla, clorita y minerales opacos.
		Opacos	4	Cristales anhedral de tamaño variable entre 0,1 y 0,4 mm, que se presentan como: a) Disseminaciones heterogéneas dentro de la masa fundamental. b) Impregnaciones sobre fenocristales de plagioclasa, junto a clorita, arcilla y sericita. c) Impregnaciones sobre pseudomorfos cloritizados de posibles ferromagnesianos. d) Agregados cumulares dentro de la masa fundamental, asociado a clorita.

Figura A.9 Descripciones microscópicas de muestra M9 (Fuente: Elaboración propia).

❖ Muestra 10 (N:6621428; E:289459; Z:507)

	LÍTICOS/ MINERAL	% VOLUMEN	MODO DE OCURRENCIA
FRAGMENTOS (26%)	Líticos	21	Se presentan como fragmentos angulosos a subangulosos de textura porfídica, caracterizados por la presencia de fenocristales de plagioclasa leve a moderadamente argilizados, débilmente albitizados y con un reemplazo metasomático incipiente por feldespatos potásicos. Los fenocristales se encuentran inmersos en una masa fundamental compuesta por microlitos de plagioclasa, disseminaciones de minerales opacos y arcilla. La relación entre los fenocristales y la masa fundamental es 35/65.
	Cristales	5	Plagioclasa: Cristales subhedrales de hábito tabular y tamaño medio 3,5 mm, que se encuentran leve a moderadamente argilizados, con un metasomatismo potásico incipiente y una posible débil albitización. Se presentan en general fracturados, incluidos dentro de la matriz volcánica.
MATRIZ O CEMENTO (74%)	Plagioclasa	57	Ocurren como cristales subhedrales de hábito tabular y tamaño variable entre 0,1 (microlitos) y 1,8 mm (fenocristales), que se encuentran en general leve a moderadamente argilizados, siendo afectados además por un reemplazo metasomático incipiente y una posible débil albitización.
	Arcilla	7	Material criptocristalino que ocurre como: a) Alteración en grado leve a moderado de cristales de plagioclasa (fenocristales y microlitos), asociado a feldespatos potásicos y posiblemente albita. b) Disseminaciones heterogéneas dentro de la masa fundamental de los fragmentos líticos y de la matriz.
	Cuarzo secundario	2	Agregados micro a policristalinos que se presentan como parches ocasionales dentro de la masa fundamental de la matriz y de los fragmentos líticos.
	Clorita	2	Agregados cristalinos finos que ocurren como parches implantados dentro de la masa fundamental de la matriz, asociados localmente a impregnaciones de minerales opacos e hidróxidos de hierro.
	Opacos	5	Cristales anhedrales de tamaño medio 0,2 mm, que se presentan como: a) Disseminaciones heterogéneas dentro de la masa fundamental, tanto de la matriz como de los fragmentos líticos.
	Albita	D	Se interpreta como producto de una alteración incipiente de plagioclasas, en un porcentaje difícil de determinar, dado que se trata de un reemplazo metasomático. Se indica como débil (D), debido al aspecto levemente turbio de los cristales, que conservan bordes definidos.
	Feldespatos potásicos	1	Ocurre como reemplazo metasomático incipiente de fenocristales de plagioclasa pertenecientes tanto a los fragmentos líticos como a la matriz.

Figura A.10 Descripciones microscópicas de muestra M10 (Fuente: Elaboración propia).

Anexo B. Coordenadas de estaciones y tiempo de medición MT

Perfil	Estación	UTMX*	UTMY*	ZDEM	Tiempo de medición aproximado
L1	L1_0	289735	6620349	529	16h 11min
	L1_200	289824	6620505	503	1h 11min
	L1_400	289912	6620613	484	1h 41min
	L1_600	290085	6620768	413	1h 41min
	L1_800	290220	6620894	439	13h 41min
	L1_1000	290409	6620999	527	1h 41min
L2	L2_0	289877	6620118	431	1h 41min
	L2_200	289986	6620299	470	1h 21min
	L2_400	290162	6620409	430	2h
	L2_600	290315	6620559	384	12h 21min
	L2_800	290437	6620692	424	14h 11min
	L2_1000	290572	6620806	475	2h
L3	L3_0	290114	6619858	456	1h 41min
	L3_200	290252	6620062	391	2h 13min
	L3_400	290371	6620206	417	2h
	L3_600	290544	6620401	368	2h
	L3_800	290655	6620532	405	13h 11min
	L3_1000	290798	6620621	438	2h
L4	L4_0	290271	6619658	457	1h 41min
	L4_200	290425	6619812	417	1h 21min
	L4_400	290556	6619956	415	1h 41min
	L4_600	290722	6620131	364	1h 41min
	L4_800	290887	6620314	358	1h 41min
	L4_1000	291018	6620430	379	1h 41min

Figura B.1 Coordenadas y tiempo de medición para las estaciones L1, L2, L3 Y L4.

Anexo C. Curvas de resistividad eléctrica aparente y fase

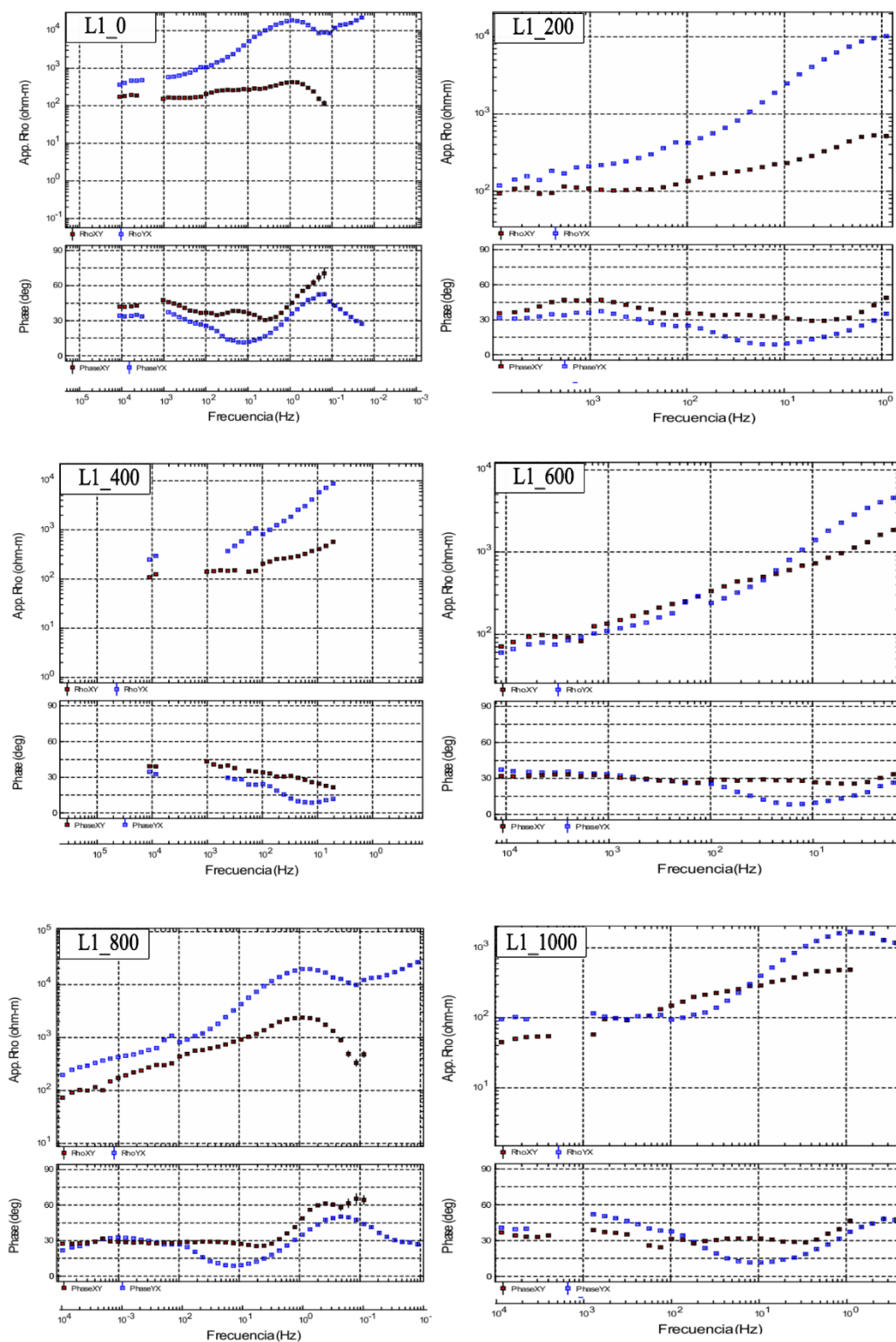


Figura C.1 Curvas de resistividad eléctrica aparente y fase, estación L1.

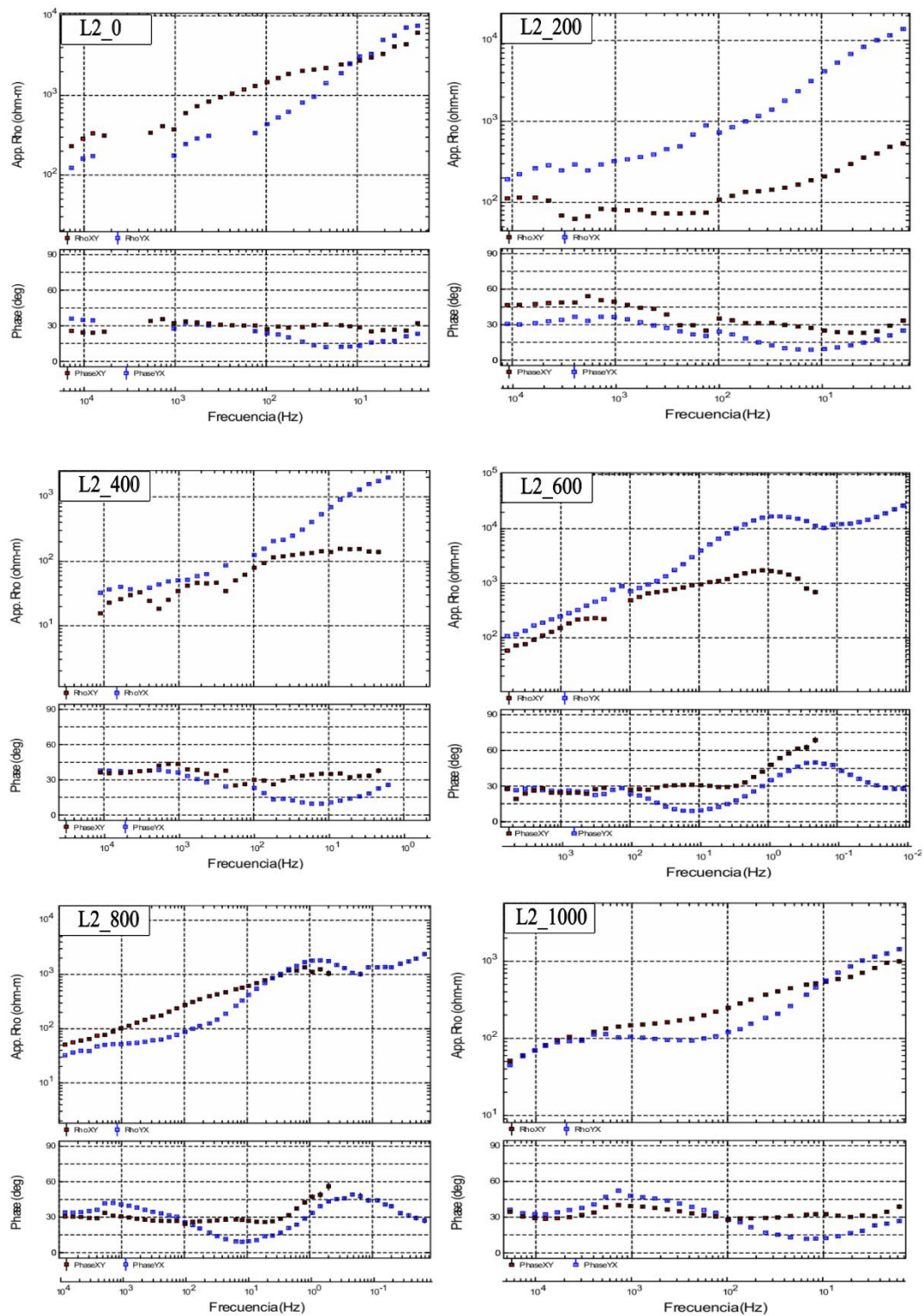


Figura C.2 Curvas de resistividad eléctrica aparente y fase, estación L2.

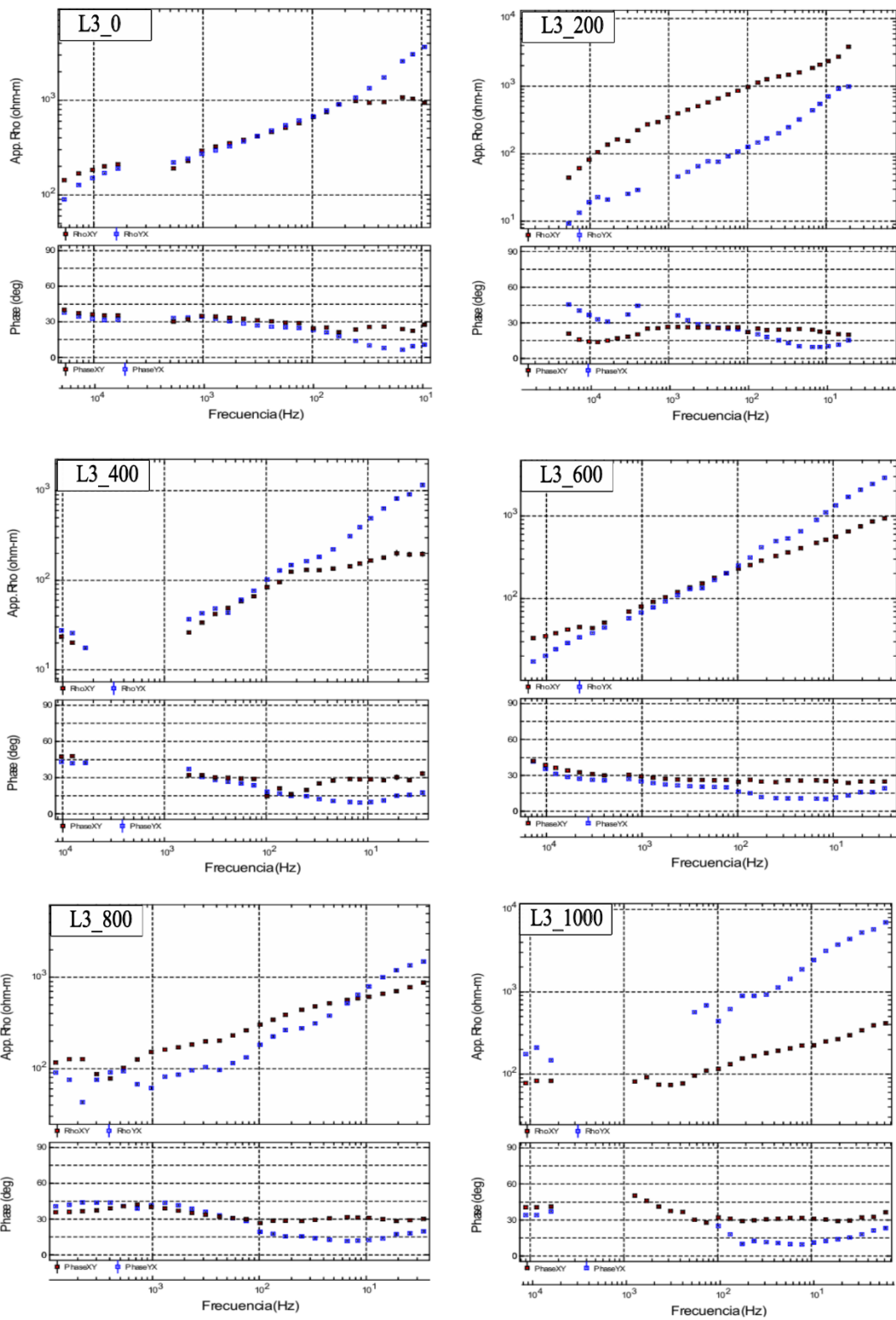


Figura C.3 Curvas de resistividad eléctrica aparente y fase, estación L3.

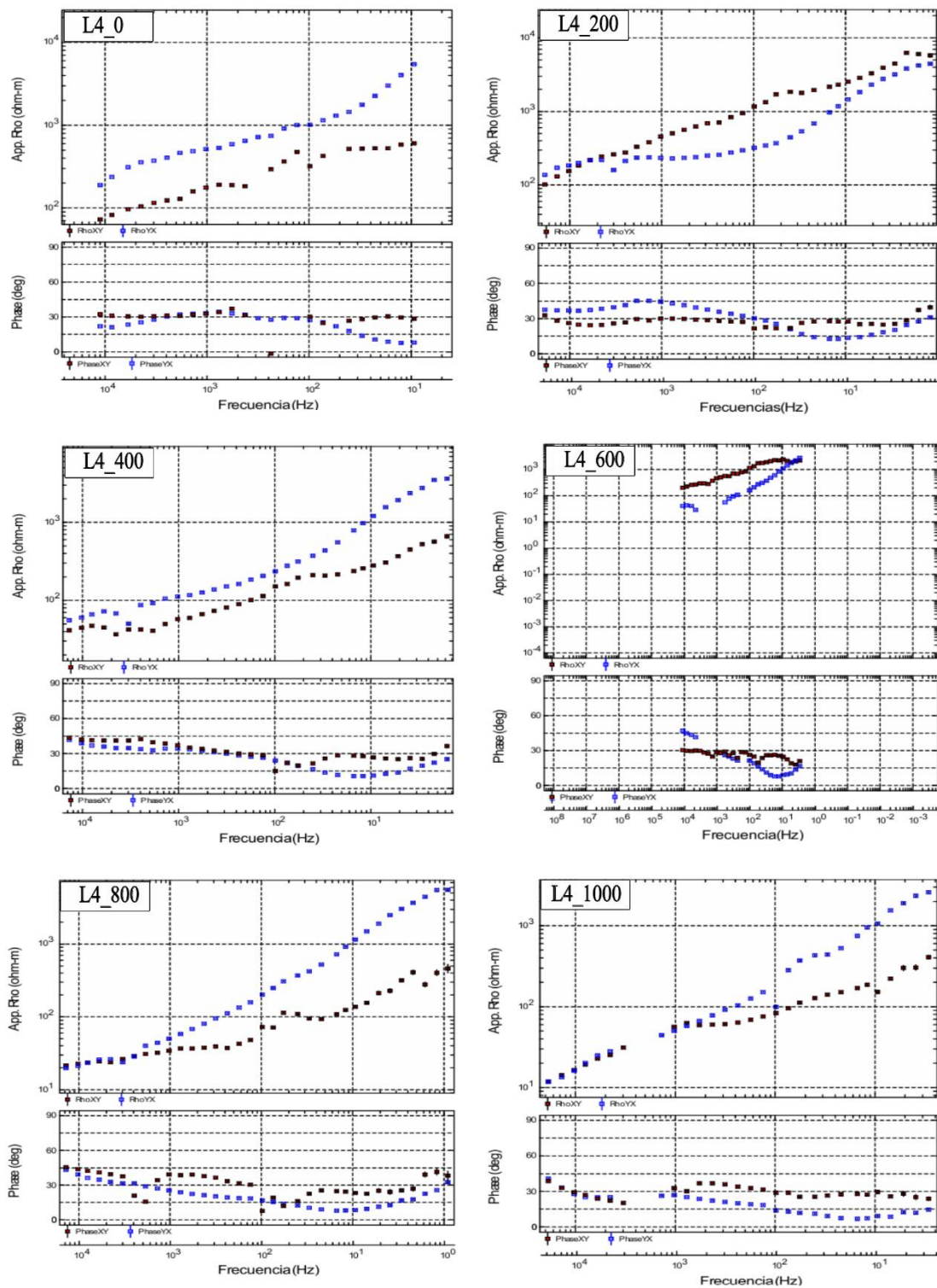


Figura C.4 Curvas de resistividad eléctrica aparente y fase, estación L4.