FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

MODELO DE EXPLORACIÓN MAGNETOTELÚRICO DE SCM CAROLA, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE

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

Profesor Guía: Dr. Jaime Araya Vargas

Tutor: María Montserrat Corvalán Sekul

Douglas Pérez Contreras.

Copiapó, Chile 2024

Dedicatoria

A todos aquellos que me apoyaron…

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Jacqueline y Claudio, por ser el pilar fundamental en cada paso de mi camino. Gracias por su amor incondicional, sus sacrificios, y por enseñarme con su ejemplo que el esfuerzo y la dedicación son las claves del éxito. Esta tesis es el fruto de todos los valores que me inculcaron y su fe constante en mis capacidades.

A mis hermanas y hermanos, Polette, Myka, Lucian, Seba, por su apoyo, compañía y palabras de ánimo en los momentos difíciles. Su motivación y sus consejos siempre fueron una fuente de energía que me impulsó a seguir adelante.

A mi novia, Coni, por ser mi compañera, mi apoyo emocional y mi fuente de inspiración. Gracias por tus palabras de aliento, por la paciencia infinita, y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Tu amor y tu comprensión hicieron que este camino fuera mucho más llevadero, y este logro no sería el mismo sin ti a mi lado.

A mis tíos, quienes siempre han estado presentes en mi vida. Gracias por su cariño, sus enseñanzas y su confianza en mis sueños. Su apoyo fue fundamental para superar los desafíos que encontré durante este proceso.

A mis amigos y compañeros del voleibol, quienes compartieron conmigo innumerables horas de trabajo y aprendizaje. Su compañía y su camaradería fueron esenciales para hacer de esta experiencia un viaje enriquecedor y gratificante.

Finalmente, extiendo mi más sincero agradecimiento a mis profesores y mentores, quienes contribuyeron a mi desarrollo académico con su conocimiento, dedicación y valiosa guía. Gracias por confiar en mí y por inspirarme a ser siempre mejor. A todos ustedes, mi eterno agradecimiento.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....14

1.1 Problema de investigación. 14

1.2 Hipótesis. 14

1.3 Objetivos. 15

1.3.1 Objetivo general. 15

1.4 Metodología. 15

1.4.1 Búsqueda bibliográfica. 15

1.4.2 Trabajo de recopilación de datos. 16

1.4.3 Trabajo comparativo. 16

1.5 Ubicación.....16

1.6 Trabajos anteriores. 18

II. MARCO TEÓRICO 21

2.1 Resistividad eléctrica.....21

2.1.1 Resistividad eléctrica de minerales y rocas. 21

2.1.2 Resistividades en volúmenes de roca. 24

2.2 El método magnetotelúrico. 25

2.2.1 Procesamiento de datos. 26

2.2.2 Ecuaciones de Maxwell. 26

2.2.3 Exploración de minerales metálicos y magnetotelúrica. 28

III. MARCO GEOLÓGICO.....30

3.1 Geología distrital. 30

3.1.1 Formación Punta del Cobre. 32

3.1.2 Grupo Chañarcillo. 33

3.1.3 Formación Bandurrias. 34

3.1.4 Formación Cerrillos. 34

3.1.5 Cuerpos Intrusivos. 35
3.1.6 Gravas de Atacama. 35
3.1.7 Depósitos Aluviales Cuaternarios. 35
3.1.8 Geología Estructural. 35

3.2 Geología del yacimiento Carola. 38
3.2.1 Unidades litológicas. 40
3.2.1.1 Andesitas Inferiores. 41
3.2.1.2 Albitófiro. 42
3.2.1.3 Sedimentos Rojos Brechizados. 42
3.2.1.4 Tobas de Agustina. 43
3.2.1.5 Sedimentos de Flujo Laminados. 44
3.2.1.6 Andesitas Superiores. 44
3.2.1.7 Brecha Volcanosedimentaria. 44
3.2.1.8 Calizas Margosas. 44
3.2.2 Estructura 45
3.2.3 Mineralización 45

IV. METODOLOGÍA 48

4.1 Etapas de la investigación. 48

4.2 Adquisición de datos. 48
4.2.1 Datos geológicos y geoquímicos obtenidos en sondajes. 48
4.2.2 Resistividad eléctrica obtenida de estudio magnetotelúrico. 50
4.4.2.1 Generalidades. 50
4.4.2.2 Procesamiento y modelación inversa. 51

4.3 Confección de base de datos. 52
4.3.1 Proyección de sondajes. 53
4.3.2 Importación de modelo de resistividad. 53
4.3.3 Interpolación de datos de resistividad. 54
4.3.4 Selección de datos y control de calidad. 55
4.3.4.1 Validación de intercepción de datos. 55
4.3.4.2 Selección de datos. 55

4.4 Análisis de correlación entre geología, geofísica y petrofísica. 58
4.4.1 Análisis estadístico. 58
4.4.1.1 Estadística general. 58

4.4.1.2 Gráficos de dispersión. 58
4.4.1.3 Histogramas. 58
4.4.1.4 Boxplots. 59
4.4.1.5 Matriz de correlación de Pearson. 59
4.4.2 Secciones transversales de modelos 3D. 59
4.4.3 Análisis de cortes transparentes en lámina delgada. 59

V. RESULTADOS 61

5.1 Resistividad eléctrica de litologías más abundantes. 61
5.1.1 Estadística general. 61
5.1.2 Rangos de resistividad por litología. 61
5.1.3 Distribución estadística de la resistividad eléctrica. 63
5.1.3.1 Distribución estadística por litología. 63
5.1.3.2 Distribución estadística por leyes de cobre. 65
5.1.3.3 Distribución estadística por valor de RQD. 66
5.1.3.4 Distribución estadística por ley de oro. 68
5.1.3.5 Distribución estadística por ley de plata. 68
5.1.3.6 Distribución estadística por susceptibilidad magnética. 69
5.1.4 Correlación de la resistividad con otros parámetros. 70

5.2 Resistividad eléctrica de litologías de menor abundancia. 74
5.2.1 Estadística general. 74
5.2.2 Rangos de resistividad por litología. 75

5.3 Variabilidad espacial de la resistividad eléctrica en litologías de interés. 76
5.3.1 Rangos de resistividad por zona. 76
5.3.2 Correlación de la resistividad por zona. 78

VI. DISCUSIÓN 81

6.1 Limitaciones metodológicas. 81

6.2 Correlación entre parámetros geológicos y la resistividad eléctrica. 82
6.2.1 Correlación para el grupo litológico mayor. 82
6.2.2 Correlación por litología. 83
6.2.3 Correlación por zonas de la mina. 84

6.3 Interpretación geológica del modelo de resistividad eléctrica. 84
6.3.1 Distribución respecto a las variables. 84
6.3.2 Distribución respecto a litologías. 85
6.3.2.1 Andesitas Inferiores. 85
6.3.2.2 Lamprofíricos. 86
6.3.2.3 Andesitas Superiores. 86
6.3.2.4 Brechas Volcanosedimentarias. 86
6.3.2.5 Calizas Margosas. 86
6.3.2.6 Microdioritas Cuarcíferas. 87
6.3.2.7 Albitófiro. 87
6.3.2.8 Otras litologías. 87
6.3.3 Interpretación de distribución espacial de unidades geológicas. 88
6.3.3.1 Cuerpo de interés 1 (C1). 91
6.3.3.2 Cuerpo de interés 2 (C2). 92
6.3.3.3 Cuerpo de interés 3 (C3). 93
6.3.3.4 Cuerpo de interés 4 (C4). 94

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 104

Referencias 107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1 *Localización de la mina Carola a escala regional.* *17*
Figura I.2 *Mapa de ubicación y acceso al área de estudio. Las líneas blancas indican el perímetro de las concesiones mineras de la SCM Carola.* *18*
Figura II.1 *Gráfico con rangos típicos de resistividad eléctrica observados en algunas rocas y minerales (modificada de Orellana, 1972).* *23*
Figura III.1 *Evolución tectónica durante el Jurásico tardío-Cretácico temprano hasta el Cretácico "medio" (Hauteriviano-Campaniano) en latitudes 21-27°S. (A) La primera etapa es caracterizada por magmatismo de cuenca de trasarco, y el emplazamiento de la Formación La Negra la cual es la caja de varios depósitos de Cu tipo manto. (B) El Cretácico medio es caracterizado por la extensiva deformación y alzamiento de la cuenca Tarapacá para formar la proto-Cordillera de Domeyko y desarrollar el Sistema de Fallas de Atacama. (Extraído de Barra et al., 2017; modificado de Mpodozis y Ramos, 1990).* *31*
Figura III.2 *Columna estratigráfica del distrito Punta del Cobre con las principales edades geocronológicas y paleontológicas. Edades de la Formación Cerrillos son de Maksaev et al. (2009), edades de la formación Punta del Cobre expuesta en del Real et al. (2018). La columna es modificada de Arévalo (1999). Extraída de del Real et al. (2018).* *32*
Figura III.3 *Mapa geológico del área Punta del Cobre-Candelaria, las rocas intrusivas pertenecen al batolito Copiapó; entre otros el plutón San Gregorio, La Brea y Los Lirios. Extraída de Marschik y Fontboté, 2001.* *37*
Figura III.4 *Sección transversal a través del Anticlinorio de Tierra Amarilla, desde la unidad San Gregorio (SSW) hasta el distrito Punta del Cobre. Se indica la posición aproximada de la mina Carola. Modificada de Marschik y Fontboté (2001).* *38*
Figura III.5 *Columna estratigráfica tipo de la Mina Carola, con intensidad relativa de minerales metálicos comunes y su estilo de mineralización según su profundidad (modificada de informe local de Superintendencia de Geología de SCM Carola, 2019).* *39*
Figura III.6 *Mapa litológico superficial del área de estudio. Las líneas negras son las concesiones de SCM Carola. La línea azul es la traza de la sección transversal (ver leyenda en Fig. III.7).* *40*
Figura III.7 *Sección SW-NE del modelo litológico 3D de SCM Carola que contiene algunas de las unidades geológicas más representativas realizado a través del software Leapfrog Los colores son representativos de las unidades litológicas antes vistas (ver Fig. III.5).* *40*
Figura IV.1 *Mapa de ubicación de las 122 estaciones magnetotelúricas medidas, sobre imagen satelital en proyecto Carola. Coordenadas UTM Zona 19S, Datum PSAD56 (tomada de SouthernRocks Geophysics, 2023).* *51*
Figura IV.2 *Puntos ubicados en la trayectoria de los sondajes, los cuales fueron generados por la función "Desurvey" a través del software Geoscience Analyst Pro.* *53*
Figura IV.3 *Resultado visual de la importación del archivo XYZ de resistividades eléctricas, se genera una malla de puntos con valores de resistividad. Realizado en el software Geoscience Analyst Pro ®.* *54*
Figura IV.4 *Vista en perspectiva de los valores de resistividad eléctrica obtenidos para cada muestra de sondaje analizados, utilizando el software Geoscience Analyst Pro ®.* *55*
Figura IV.5 *Mapa que muestra la proyección en planta de los tramos de sondajes compilados originalmente (líneas de colores fuertes) y el volumen ocupado por el modelo de resistividad eléctrica (representado por imagen de fondo en colores tenues). Las líneas de color negro representan muestras de sondajes que no cortan el modelo de resistividad eléctrica, y por lo tanto no fueron considerados en el análisis.* *56*
Figura V.1 *Boxplots de las 10 litologías representativas del grupo de mayor abundancia. Entre corchetes se indica la cantidad de datos por cada litología. Las líneas negras verticales en los extremos representan los valores máximos y mínimos. Las cajas representan los valores de tendencia central (ubicados entre el primer y tercer cuartil). Las líneas negras verticales dentro de la caja representan a la mediana. Los puntos rojos representan la media aritmética.* *62*
Figura V.2 *Histogramas de frecuencia porcentual para la resistividad eléctrica en cada litología del grupo de mayor abundancia* *64*
Figura V.3 *Histogramas de distribución porcentual para la resistividad eléctrica en base a la ley de cobre. En color gris, se presentan la cantidad de datos por cada rango de ley de cobre total.* *66*

Figura V.4 *Histogramas de distribución porcentual para la resistividad eléctrica en base a la calidad de la roca. En color gris, se presentan la cantidad de datos por cada clase de calidad. 67*
Figura V.5 *Histogramas de distribución porcentual para la resistividad eléctrica en base a la ley de oro. En color gris, se presentan la cantidad de datos por cada rango de ley de oro en ppm. 68*
Figura V.6 *Histogramas de distribución porcentual para la resistividad eléctrica en base a la ley de plata. En la parte superior derecha de cada histograma, se exhibe la cantidad de datos por rango de ley de plata. 69*
Figura V.7 *Histogramas de distribución porcentual para la resistividad eléctrica en base a la susceptibilidad magnética. En color gris, se presentan la cantidad de datos por histograma. 70*
Figura V.8 *Diagramas de dispersión entre la resistividad eléctrica en escala logarítmica y las variables disponibles relacionadas a la ley de Cu porcentual (naranjo), la calidad de roca (verde), ley de Ag en ppm (gris), ley de Au en ppm (Amarillo), susceptibilidad magnética en unidades del sistema internacional (Café). 71*
Figura V.9 *Boxplots de las litologías con al menos 1% de representatividad dentro del grupo de litologías menores. Entre corchetes se indica la cantidad de datos por cada litología. Las líneas negras verticales en los extremos representan los valores máximos y mínimos. Las cajas representan los valores de tendencia central (ubicados entre el primer y tercer cuartil). Las líneas negras verticales dentro de la caja representan a la mediana. Los puntos rojos representan la media aritmética. 75*
Figura V.10 *Vista superficial en planta del modelo de resistividad, donde se indica la delimitación por zona. 76*
Figura V.11 *Boxplots correspondientes a las litologías de interés del área de estudio separadas por zonas. Entre corchetes se indica la cantidad de datos por cada litología. Las líneas negras verticales en los extremos representan los valores máximos y mínimos. Las cajas representan los valores de tendencia central (ubicados entre el primer y tercer cuartil). Las líneas negras verticales dentro de la caja representan a la mediana. Los puntos rojos representan la media aritmética. 77*
Figura V.12 *Diagramas de dispersión de resistividad eléctrica (log 10) y la ley de cobre porcentual, graficadas por zonas para litologías de interés del área de estudio. 79*
Figura VI.1 *(a) Modelo de resistividad eléctrica usado para generar datos sintéticos para un test magnetotelúrico 3D. (b) Modelo obtenido luego de invertir los datos calculados a partir del modelo de la izquierda. Extraído de Egbert y Kelbert (2012). Se puede observar que el tamaño vertical de las zonas de baja resistividad (zonas rojas) en el modelo de inversión (b) es sobreestimado en comparación al tamaño real (a). 81*
Figura VI.2 *Vista en planta del modelo de inversión 3D y sondajes en la zona de estudio. Las líneas negras gruesas, representan las secciones transversales realizadas para esta investigación. Las líneas coloridas son los sondajes del área de estudio. 89*
Figura VI.3 *Vista en planta del modelo de resistividad y cuerpos de resistividades eléctricas menores a 200 Ωm. En la figura izquierda las líneas de colores trazan las fallas superficiales y en la figura derecha se muestran solo los cuerpos de bajas resistividades. 90*
Figura VI.4 *Vista en profundidad apuntando hacia el norte del modelo de inversión 3D y los cuerpos de resistividades eléctricas menores a 200 Ωm. 90*
Figura VI.5 *Sección N-S E376900 a través del modelo geológico (panel superior), modelo de resistividad eléctrica (panel intermedio), y superposición de ambos modelos (panel inferior). 96*
Figura VI.6 *Igual que Figura VI.5, pero para sección transversal E377500. Las líneas grises con un punto negro representan la traza de los sondajes y su punto de inicio, respectivamente. El rombo amarillo representa la ubicación del corte en lámina delgada mencionado en el texto. 97*
Figura VI.7 *Igual que figura VI.5, pero para sección transversal E378800. Las líneas grises con un punto negro representan la traza de los sondajes y su punto de inicio, respectivamente. El rombo amarillo representa la ubicación del corte en lámina delgada mencionado en el texto. 98*
Figura VI.8 *Igual que figura VI.5, pero para sección transversal E379700. Las líneas grises con un punto negro representan la traza de los sondajes y su punto de inicio, respectivamente. El rombo amarillo representa la ubicación del corte en lámina delgada mencionado en el texto. 99*
Figura VI.9 *Sección E-W N6956200 a través del modelo geológico (panel superior), modelo de resistividad eléctrica (panel intermedio) y superposición de ambos modelos (panel inferior). Las líneas grises con un punto negro representan la traza de los sondajes y su punto de inicio, respectivamente. El rombo amarillo representa la ubicación del corte en lámina delgada. 100*

Figura VI.10 *Igual que figura VI.9, pero sección transversal N6957800. Las líneas grises con un punto negro representan la traza de los sondajes y su punto de inicio, respectivamente. El rombo amarillo representa la ubicación del corte en lámina delgada.* *101*
Figura VI.11 *Igual que figura VI.9, pero sección transversal N6960300. Las líneas grises con un punto negro representan la traza de los sondajes y su punto de inicio, respectivamente. El rombo amarillo representa la ubicación del corte en lámina delgada.* *102*
Figura VI.12 *Igual que la figura VI.9, pero sección transversal N6961100. Las líneas grises con un punto negro representan la traza de los sondajes y su punto de inicio, respectivamente. El rombo amarillo representa la ubicación del corte en lámina delgada.* *103*

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II.1 *Rangos típicos de conductividad y resistividad eléctrica observados en algunas rocas y minerales comunes en condiciones superficiales (Modificada de Palacky, 1987 extraída de Glover, 2015).* *23*
Tabla IV.1 *Datos relacionados a los collares de los sondajes (Collar) donde se muestran los parámetros: HoleID, Este, Norte, Profundidad (RL) y el largo (Length).* *50*
Tabla IV.2 *Datos relacionados al "Survey" con el ángulo de inclinación (DIP) y el azimut del sondaje.* *50*
Tabla IV.3 *Datos de los análisis correspondientes realizados en la mina Carola (Assays).* *50*
Tabla IV.4 *Extracto de archivo tipo XYZ en el que se muestran las columnas de coordenadas (XYZ) y resistividad eléctrica (Data) para cuatro celdas.* *52*
Tabla IV.5 *Extracto de tabla con coordenadas X, Y, Z relacionadas con las variables disponibles en la base de datos.* *52*
Tabla IV.6 *Recuento del total de datos y metraje por cada litología del grupo de mayor abundancia.* *57*
Tabla IV.7.7 *Recuento del total de datos y metraje por cada litología del grupo de menor abundancia.* *57*
Tabla V.1 *Estadística general de las litologías de mayor abundancia.* *61*
Tabla V.2 *Tipo de correlación y su valor numérico.* *71*
Tabla V.3 *Correlaciones de Pearson entre las variables asociadas a la resistividad eléctrica.* *72*
Tabla V.4 *Correlación de Pearson por cada variable asociada a resistividad eléctrica y por cada litología perteneciente al grupo de litologías mayores.* *73*
Tabla V.5 *Estadística general de las litologías de menor abundancia.* *74*
Tabla VII.1 *Recomendaciones por cuerpo de resistividades bajas.* *105*
Tabla VII.2 *Detalles de los sondajes superficiales recomendados hacia el cuerpo C3.* *106*

RESUMEN

En esta tesis se utilizaron los resultados de un estudio geofísico magnetotelúrico preexistente para identificar los factores geológicos que controlan las variaciones en la resistividad eléctrica del sistema mineralizado en SCM Carola (comuna de Tierra Amarilla, región de Atacama). El análisis se basó en la comparación estadística y espacial de resultados de sondajes con el modelo 3-D de resistividad eléctrica obtenidos en el estudio magnetotelúrico, enfocándose en la caracterización de unidades geológicas de interés económico y los efectos que tienen la alteración, mineralización y estructuras en la resistividad eléctrica. Los resultados indican que las unidades geológicas mineralizadas definidas en la mina, el *Albitófiro* y las *Andesitas Inferiores*, se caracterizan principalmente por resistividades bajas (<150 Ωm). No obstante, se observa que siete unidades geológicas que tienden a no estar mineralizadas también pueden exhibir valores similares de resistividad eléctrica. En contraste, las resistividades altas (>500 Ωm) corresponden generalmente a la unidad de *Calizas Margosas*, las cuales no presentan mineralización. No se identificaron patrones claros de correlación estadística entre la resistividad eléctrica y el contenido de metales (cobre, oro, plata), así como tampoco con el RQD ni la susceptibilidad magnética. Sin embargo, el análisis de la distribución espacial de la resistividad eléctrica muestra una buena correlación entre el techo de las unidades mineralizadas con el techo de un dominio con resistividad eléctrica <200 Ωm. Análisis de cortes transparentes revelan la presencia promedio de un 7% de minerales opacos diseminados en las litologías de interés (Andesitas Inferiores, Albitófiro), lo que debatiría las resistividades relativamente bajas, ante la escasa diseminación de sulfuros. Estos hallazgos sugieren que la distribución espacial de la resistividad eléctrica en el depósito está determinada por una combinación de variables, incluidas la composición litológica, las estructuras y la mineralización. El modelo de resistividad genera cuatro cuerpos de interés basados en sus bajas resistividades (<200 Ωm) y en su cercanía a fallas que controlarían la distribución de los cuerpos. Como conclusión, se proponen sondajes exploratorios y recomendaciones para avances de interior mina, considerando los targets de baja resistividad, lo que refuerza la importancia de considerar estos resultados en futuros estudios geofísicos y de exploración.

ABSTRACT

This thesis utilized the results of a pre-existing magnetotelluric geophysical study to identify the geological factors that control variations in electrical resistivity within the mineralized system at SCM Carola (Tierra Amarilla, Atacama region, Chile). The statistical and spatial analysis of drilling results and the 3D electrical resistivity model derived from the magnetotelluric study, was focused on the characterization of mineralized geological units and the effects of alteration, mineralization, and structures on electrical resistivity. The findings indicate that the mineralized geological units defined at the mine, specifically the *Albitófiro* and *Andesitas Inferiores*, are primarily characterized by low resistivities (<150 Ωm). However, it was observed that seven barren geological units can also exhibit similar electrical resistivity values. In contrast, high resistivities (>500 Ωm) are generally associated with the *Calizas Margosas* unit, which does not show evidence of mineralization. No clear statistical correlation patterns were identified between electrical resistivity and metal content (copper, gold, silver), nor with RQD or magnetic susceptibility. Nonetheless, the spatial distribution analysis of electrical resistivity demonstrates a strong correlation between the roof of the mineralized units and the roof of a domain with electrical resistivity <200 Ωm. Petrographical description of thin-sections revealed an average presence of 7% disseminated opaque minerals in the lithologies of interest (Albitófiro and Andesitas Inferiores), which challenges the relatively low resistivity values given the limited dissemination of sulfides. These findings suggest that the spatial distribution of electrical resistivity within the deposit is determined by a combination of factors, including lithological composition, structures, and mineralization. The resistivity model identifies four bodies of interest based on their low resistivities (<200 Ωm) and proximity to faults, which appear to control their distribution. Exploratory drilling and recommendations for underground mine development are proposed, focusing on low-resistivity targets. These results highlight the importance of incorporating such findings into future geophysical and exploration studies.

I.Introducción

1.1 Problema de investigación.

En el área de la mina Carola, ubicada en la comuna de Tierra Amarilla, se efectuó a fines del año 2023 un estudio geofísico magnetotelúrico con el propósito de ubicar el techo de la unidad geológica conocida como Andesitas Inferiores. Esta unidad fue definida originalmente por Marschik & Fontboté (2001). La localización se debe a que el techo de esta unidad tiende a presentar la mineralización de cobre que refleja un interés económico para la empresa. Este estudio cubrió todo el Proyecto Carola, perteneciente a la Sociedad Contractual Minera (SCM) Carola, debido a que el área este y sur de la propiedad minera no se encuentra totalmente explorada. Actualmente el área suroeste del Proyecto Carola es donde se encuentra el cuerpo principal y donde se centra la mayoría de operaciones mineras.

El estudio magnetotelúrico, ejecutado por la empresa Southernrock Geophysics, tuvo como resultado un modelo de inversión 3-D con la distribución de resistividad eléctrica del subsuelo bajo el Proyecto Carola. Para poder interpretar de manera adecuada el modelo de resistividad eléctrica como herramienta de exploración dentro del área de estudio, es necesario conocer la resistividad eléctrica de las unidades geológicas relevantes para la mineralización.

En este trabajo se analizó la resistividad eléctrica de las unidades geológicas de la mina, para identificar de qué manera se pueden interpretar los resultados del estudio magnetotelúrico como herramienta para la exploración de nuevos recursos en la propiedad. Se buscó que los resultados de este trabajo sirvan de apoyo para futuros estudios geofísicos que se realicen en la zona y de guía para sondajes exploratorios, en particular hacia el lado oriental de la propiedad.

1.2 Hipótesis.

Como hipótesis se planteó que, en el Proyecto Carola, las unidades geológicas mineralizadas presentarían baja resistividad, debido a la presencia de sulfuros (calcopirita y pirita), lo que las distinguirían de zonas estériles caracterizadas posiblemente por una mayor resistividad. A su vez, se planteó que las variaciones litológicas en profundidad también podrían ser determinadas en base a cambios en la resistividad eléctrica.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general.

El presente trabajo tuvo como objetivo principal identificar cuáles son las características geológicas que determinan la distribución de la resistividad eléctrica en las pertenencias de SCM Carola, obtenida por un estudio magnetotelúrico.

Para lograr el objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

I. Caracterizar los rangos de valores de resistividad eléctrica de las unidades geológicas definidas en la mina Carola.

II. Identificar si las unidades geológicas del distrito minero presentan un patrón distintivo en los resultados del estudio magnetotelúrico.

III. Interpretar la distribución de unidades geológicas y zonas mineralizadas en base a la información del estudio magnetotelúrico disponible.

1.4 Metodología.

Con el fin de cumplir los objetivos propuestos, en esta tesis se aplicaron las siguientes metodologías:

1.4.1 Búsqueda bibliográfica.

Con el fin de conocer el contexto geológico de la zona y los conceptos metodológicos principales, en esta etapa se realizó la búsqueda de información en artículos científicos, informes técnicos de la mina, libros, cartas geológicas, y tesis. Antes de empezar con el trabajo de recopilación de datos, se identificaron las unidades geológicas de interés en la

Mina Carola de acuerdo con la bibliografía, el modelo geológico de la mina y otros factores como la cantidad de datos obtuvieron por unidad geológica.

1.4.2 Trabajo de recopilación de datos.

Se obtuvo una tabla de datos con información extraída de la base de datos de sondajes y el modelo de resistividad eléctrica, para luego elaborar un análisis estadístico y caracterizar los rangos de variación de la resistividad eléctrica para cada unidad geológica.

1.4.3 Trabajo comparativo.

Finalmente, se analizó la correlación espacial entre la distribución de la resistividad eléctrica con la información geológica, para interpretar la geología de subsuperficie en sectores sin sondajes.

1.5 Ubicación.

El área de estudio comprende a la propiedad minera Mina Carola, perteneciente a la Sociedad Contractual Minera Carola (SCM Carola), que se encuentra ubicada en la zona sureste del distrito minero Punta del Cobre. Este yacimiento minero se ubica en la zona sureste de la comuna de Tierra Amarilla, región de Atacama, Chile (ver Figura I.1).

Para llegar a la zona de interés desde la ciudad de Copiapó (capital regional), se debe tomar la ruta C-35 (Avenida Copayapu) hacia el sureste durante 15 kilómetros hasta llegar a la comuna de Tierra Amarilla, en donde se continua por la ruta pavimentada C-35 (Avenida Miguel Lemeur) durante 5 kilómetros (ver Figura I.2). Luego de pasar una rotonda existen señaléticas que indican cuando virar hacia el este en dirección al acceso Planta Pedro Aguirre Cerda, siguiendo el camino pavimentado de 0.5 kilómetros hacia las instalaciones.

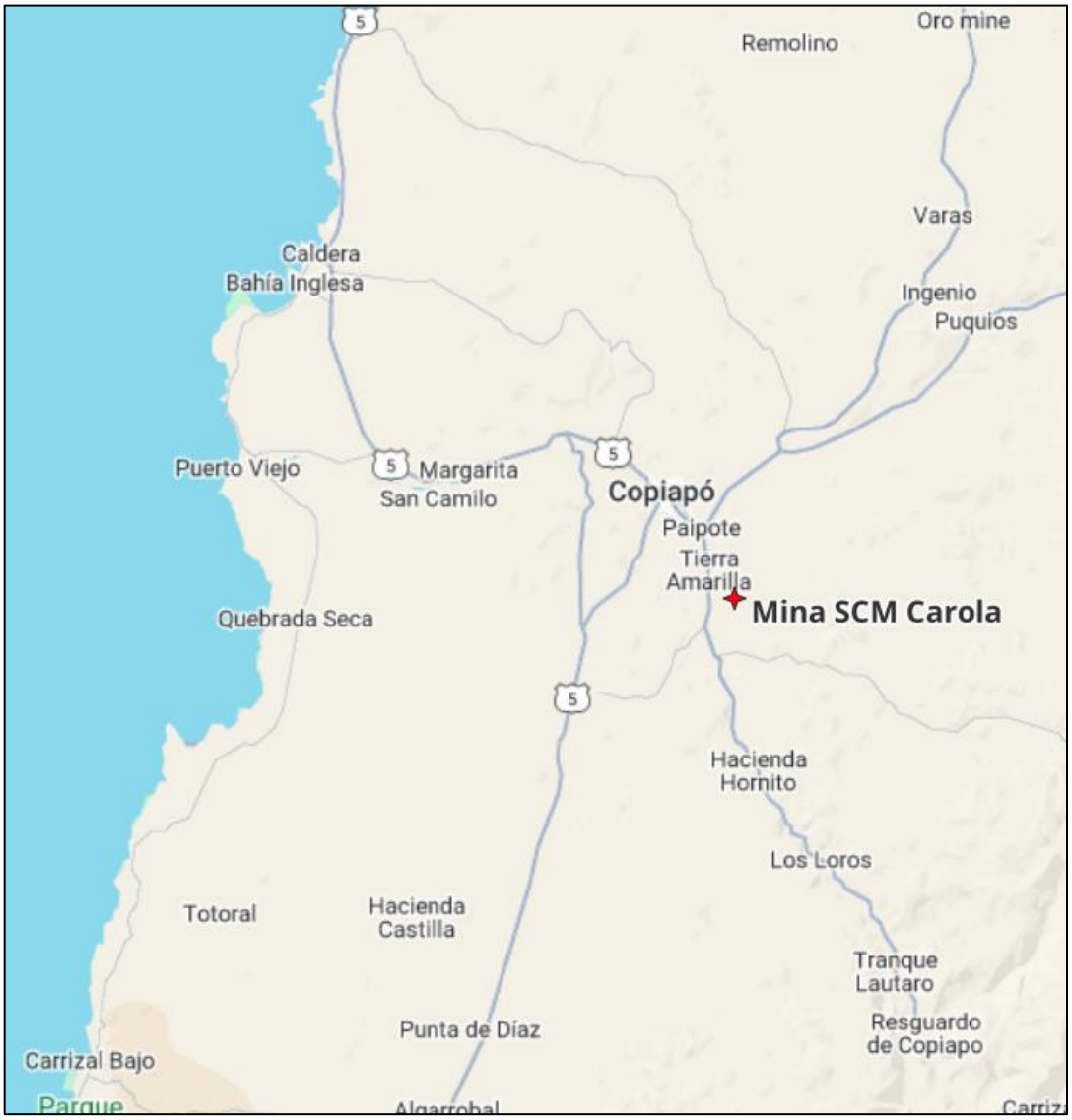

Figura I.1 *Localización de la mina Carola a escala regional.*

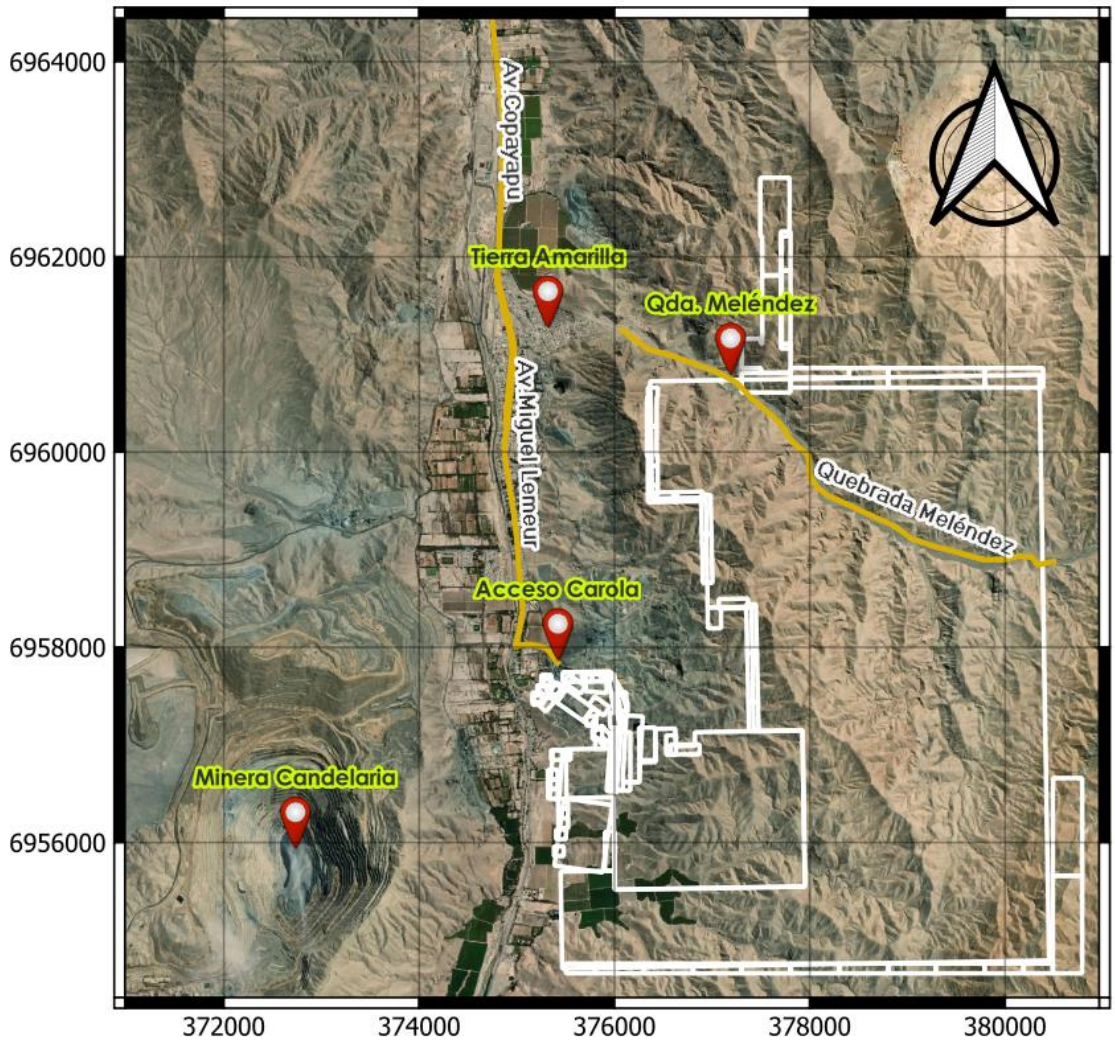

Figura I.2 *Mapa de ubicación y acceso al área de estudio. Las líneas blancas indican el perímetro de las concesiones mineras de la SCM Carola.*

1.6 Trabajos anteriores.

El distrito minero Punta del Cobre se destaca por una gran cantidad de estudios geológicos y geofísicos. Los trabajos que tienen mayor relación con el yacimiento Carola y la problemática de esta tesis son mencionados a continuación:

Biese (1942).	Primera descripción geológica del Grupo Chañarcillo, definiendo las formaciones que se encuentran dentro del grupo.
Ortiz y Silva (1967).	Estudio geológico y geofísico del distrito basado en un levantamiento magnético del área Quebrada Meléndez.
Lino (1984).	Trabajo de titulación sobre la geología de la mina Agustina (mina Carola actualmente), aportando relevante información geológica y estructural.
Geodatos (1990).	Estudio de resistividad eléctrica y polarización inducida para la mina Carola, por medio de 10 perfiles E-W, de los cuales 3 perfiles atraviesan el área del proyecto Cobriza (Informe incompleto).
Cominor Ing. Y Pro (1996).	Estudio geofísico CSAMT dentro del proyecto Cobriza, realizado mediante 3 perfiles con orientación ENE-WSW (Informe extraviado).
Marschik y Fontboté (2001).	Redefinen la Formación Punta del Cobre, subdividiéndola en dos miembros; Geraldo-Negro y Algarrobo.
Arévalo (2005).	Las cartas geológicas de Copiapó y Los Loros contienen los mapas geológicos a escala 1:100.000 que cubren las unidades del distrito minero Punta del Cobre.
Pop *et al.* (2008).	Estudio sobre la geología del área de Adriana Norte, sector ubicado en la zona norte del área de estudio de esta tesis.

Southernrock Geophysics (2023).	Estudio geofísico magnetotelúrico que cubre gran parte de la propiedad relacionada a la mina Carola.
Fernández (2023).	Tesis donde se propuso una actualización al modelo geológico de Adriana Norte (Sector norte del área de estudio), a través del remapeo de sondajes.

II.Marco teórico

2.1 Resistividad eléctrica.

La resistividad eléctrica es un parámetro físico que ha sido ampliamente utilizado en el reconocimiento del subsuelo a través de métodos geofísicos. Existe una diferencia entre resistividad y resistencia, esta última es la propiedad del material de dificultar el flujo de corriente eléctrica y es media en ohmios (Ω). La resistencia (R) depende del tamaño y forma del material y también de ciertas propiedades intrínsecas del cuerpo por el cual fluye la corriente eléctrica.

Podemos definir a la resistividad eléctrica (ρ) como la capacidad que presenta un material de oponerse al flujo de corriente eléctrica, siendo netamente limitada a la propiedad intrínseca del material, es decir, no se ve afectada por la morfología del cuerpo. Esta propiedad física se mide en unidad de resistencia por unidad de longitud, en este caso, ohmios por metros (Ωm). El parámetro físico inverso a la resistividad eléctrica es conocido como conductividad eléctrica (σ), el cual representa la habilidad del material para permitir el flujo libre de cargas eléctricas a través de él. La conductividad eléctrica se mide en unidad de conductancia eléctrica por unidad de longitud, es decir, siemens por metro ($S\ m^{-1}$).

2.1.1 Resistividad eléctrica de minerales y rocas.

Los materiales terrestres son separados según su resistividad eléctrica en los siguientes grupos: metales, semiconductores, dieléctricos y electrolitos. El grupo de los metales, representado por minerales nativos (oro, plata, cobre y estaño), conducen la electricidad por medio de la conducción electrónica, lo que resulta en una alta conductividad eléctrica debido a la facilidad de movimiento de sus electrones (Orellana, 1972).

Los semiconductores también presentan conducción electrónica, pero con una menor efectividad que la de los metales, ya que los semiconductores necesitan un campo eléctrico mayor para generar una corriente eléctrica, debido a que sus electrones tienen menos

espacio para movilizarse (Orellana, 1972). Este grupo es representado por minerales tales como: calcopirita, pirita, cuprita, hematita, magnetita, bornita, galena.

La conducción iónica ocurre en materiales dieléctricos y/o que contengan electrolitos, en el caso de materiales dieléctricos existen fuertes enlaces iónicos y covalentes que no permiten el movimiento de electrones, lo cual disminuye su conductividad eléctrica, los minerales formadores de roca son un claro ejemplo de este tipo de material. Los electrolitos son representados por materiales como las soluciones salinas, las cuales presentan enlaces iónicos que generan una alta conductividad eléctrica.

Los minerales formadores de roca más comunes (cuarzo, feldespatos, micas, calcita) suelen presentar altas resistividades ($>10^8$ Ωm), las cuales contrastan con los bajos valores que se esperarían para cuerpos mineralizados enriquecidos en metales (Fig. II.1; Orellana, 1972). Por esta razón, la caracterización de la resistividad eléctrica del subsuelo se puede utilizar para identificar cuerpos con mineralización de sulfuros como zonas de baja resistividad, las cuales son contrastantes con las altas resistividades que suelen tener las rocas no mineralizadas (Tabla II.1; Glover, 2015). A su vez, la presencia de unidades litológicas que varíen en su composición podría ser evidenciada por esta variación de resistividad.

Figura II.1 *Gráfico con rangos típicos de resistividad eléctrica observados en algunas rocas y minerales (modificada de Orellana, 1972).*

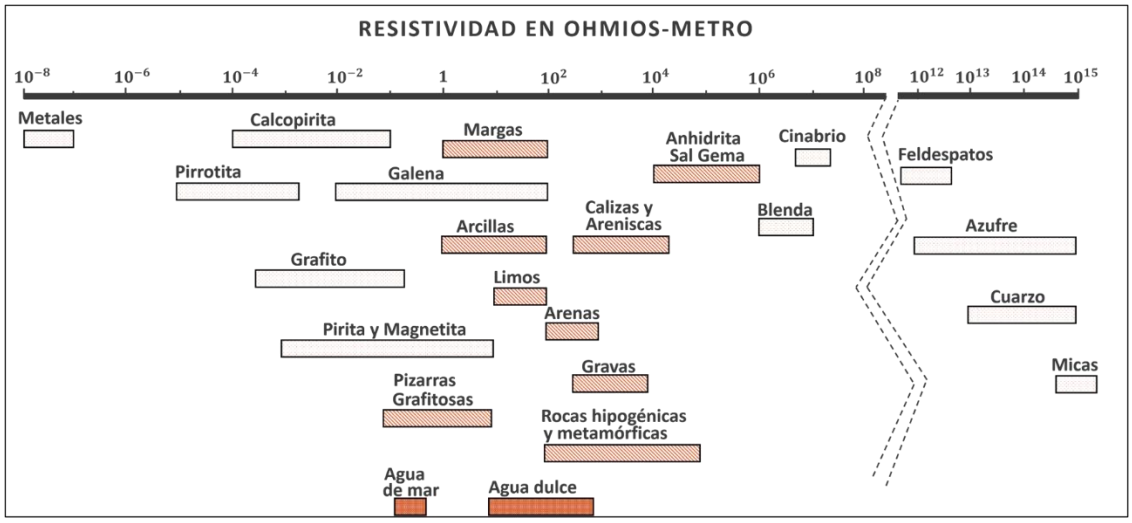

Tabla II.1 *Rangos típicos de conductividad y resistividad eléctrica observados en algunas rocas y minerales comunes en condiciones superficiales (Modificada de Palacky, 1987 extraída de Glover, 2015).*

Rock	***Conductivity (S m^{-1})***	***Resistivity (Ωm)***
Granite	0.001–0.00001	1000–100 000
Gabbro	0.001–0.00001	1000–100 000
Basalt	0.1–0.0001	10–100 000
Andesite	0.001–0.00001	1000–100 000
Sand and gravel	0.05–0.002	20–5000
Sandstone	0.1–0.001	50–1000
Limestone	0.002–0.00001	5000–100 000
Dolomite	0.001–0.0002	1000–50 000
Conglomerate	0.01–0.0001	100–10 000
Coal	0.1–0.001	10–1000
Shales	0.001–1	50–1000
Clays	0.05–0.01	20–100
Graphite	100–0.01	0.01–100
Massive sulfides	1000–1	0.001–1
Salt water	10–1	0.1–1
Brackish water	1–0.1	1–10
Freshwater	0.1–0.01	10–100
Permafrost	0.02–0.00001	500–100 000
Sea ice	0.05–0.001	20–1000

Es importante recalcar que existen otros materiales comunes que también se caracterizan por bajos valores de resistividad eléctrica (arcillas, 1 a 10^2 Ωm), y por lo tanto pueden ser confundidos con cuerpos metálicos. La resistividad de los fluidos corticales (electrolitos) depende de la cantidad de iones que se encuentren en el fluido. El agua dulce o destilada tiende a tener una resistividad superior a los 100 Ωm, mientras que aguas con la presencia de sales pueden llegar hasta los 0.03 Ωm (Orellana, 1972).

2.1.2 Resistividades en volúmenes de roca.

La resistividad eléctrica de un volumen rocoso está controlada por diversos parámetros, como el contenido, resistividad e interconexión de fluidos intersticiales (que rellenan fracturas y/o poros); el contenido de minerales conductores en la roca (p.ej. metales y arcillas); la temperatura y presión de la roca, que se asocia generalmente a la profundidad en la que se encuentra el cuerpo; la porosidad; silicificación; entre algunos de los más importantes.

Para analizar y estimar la resistividad eléctrica de un volumen compuesto por varias fases, se han propuesto varios modelos de mezcla realizados por distintos autores y para distintas situaciones, los cuales tienen como función principal calcular la resistividad eléctrica en materiales heterogéneos (e.g., Jeffrey, 1973; Shankland y Waff, 1977). Para el caso de rocas, se consideran ciertos factores tomando en cuenta la composición de la roca, porcentaje de minerales conductivos, porosidad, interconexión entre los poros, cantidad de fases, estado de agregación de las fases, entre otros.

Según Glover (2015), las leyes de Archie son la versión simple de una ley de mezcla, a partir de las cuales derivan modificaciones para distintos contextos. Las relaciones empíricas descritas por Archie (1942), fueron propuestas para calcular la resistividad de arenas saturadas en un fluido conductor, con el fin de estimar reservas de hidrocarburos. Estas leyes son aplicables a materiales con ciertas restricciones, en particular que el volumen solo puede tener una fase conductora.

El modelo de mezcla de Glover (2000), modifica la ley de Archie para adaptarla a un contexto donde cualquier fase (sólida o líquida) puede presentar cualquier valor de conductividad. El modelo de Glover puede ser escrito de la siguiente manera para estas condiciones:

$$\sigma_{eff} = \sigma_1 \mathcal{X}_1^p + \sigma_2 \mathcal{X}_2^m \quad [2.1]$$

Donde la conductividad efectiva de un volumen (σ_{eff}) es representada por la sumatoria entre la conductividad de las fases (σ_1, σ_2) y las fracciones de cada fase ($\mathcal{X}_1 + \mathcal{X}_2 = 1$). Adicionalmente presentan un exponente *m* o *p* que representa la conectividad entre los poros para cada fase también conocido como factor de cementación.

2.2 El método magnetotelúrico.

El método magnetotelúrico (MT) es una técnica electromagnética (EM) de exploración geofísica que permite estimar la resistividad eléctrica del subsuelo mediante la medición de las variaciones naturales y temporales del campo electromagnético en la superficie. La fuente de la señal electromagnética es generada por campos EM naturales asociados a rayos, y el movimiento de cargas en la magnetósfera e ionosfera. Estas fuentes inducen corrientes eléctricas las cuales causan un campo magnético, este campo al interactuar con el interior de la Tierra (conductora) genera corrientes eléctricas en el subsuelo que son conocidas como "corrientes telúricas".

En estudios MT, se miden las variaciones temporales que experimentan los campos eléctricos y magnéticos, obteniéndose como resultado series de tiempo tanto para el campo magnético como para el campo eléctrico.

Las mediciones realizadas en una estación MT se traducen en el registro de la variación temporal de cinco componentes. Los registros pertenecientes al campo eléctrico son separados en una componente eléctrica horizontal norte-sur (E_x) y una componente eléctrica horizontal este-oeste (E_y). Por el lado del campo magnético, son tres direcciones: dos componentes magnéticas horizontales (B_x, B_y) y una componente vertical (B_z).

2.2.1 Procesamiento de datos.

Según la teoría MT, las variaciones temporales de los campos EM que se obtienen en las estaciones MT se relacionan con la conductividad eléctrica del subsuelo a diferentes profundidades. Estas relaciones se representan con unos parámetros calculados en el dominio de las frecuencias llamados funciones de transferencia.

Para calcular las funciones de transferencias MT, las series de tiempo con las variaciones temporales del campo magnético y eléctrico son transformadas al dominio de las frecuencias. Luego, se calculan las funciones de transferencia asumiendo las siguientes relaciones (Vozoff, 1991):

$$E_h = Z\, B_x\,, \qquad B_z = T\, B_h \tag{2.2}$$

Donde $\boldsymbol{E}$ $(\frac{V}{m})$ es el campo eléctrico; $\boldsymbol{B}$ $(Teslas)$ es el campo magnético; $\boldsymbol{Z}$ es un tensor que define la función de transferencia que se suele llamar impedancia, la que relaciona el campo eléctrico y el campo magnético; $\boldsymbol{T}$ es la función de transferencia que se suele llamar función magnética vertical o tipper, y relaciona el campo magnético horizontal con el campo magnético vertical.

Para estimar la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo, se busca un modelo numérico cuya respuesta genere funciones de transferencia similares a las funciones de transferencia calculadas a partir de las mediciones. A este procedimiento se le llama modelación. Los datos medidos suelen ser modelados en 3-D a través del método inverso, en el cual se comienza asumiendo un modelo del subsuelo, a partir del cual se calcula una respuesta que es comparada con los datos observados. Este proceso se repite iterativamente para varios modelos, hasta que la diferencia entre las respuestas del modelo y los datos medidos sea menor a un valor predefinido (Naidu, 2012).

2.2.2 Ecuaciones de Maxwell.

El método magnetotelúrico se basa en cuatro ecuaciones que explican cómo se relaciona el campo eléctrico y magnético. Las ecuaciones están relacionadas a leyes físicas expuestas a continuación:

Ley de Faraday.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad [2.3]$$

Ley de Ampère.

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad [2.4]$$

Ley de Gauss para campos eléctricos.

$$\nabla \cdot D = \rho_v \quad [2.5]$$

Ley de Gauss para campos magnéticos.

$$\nabla \cdot B = 0 \quad [2.6]$$

Donde $\boldsymbol{H}$ ($\frac{A}{m}$) representa a la intensidad magnética. $\boldsymbol{J}$ ($\frac{A}{m^2}$) es la densidad de corriente, $\boldsymbol{D}$ ($\frac{C}{m^2}$) es el desplazamiento eléctrico y $\boldsymbol{\rho_v}$ ($\frac{C}{m^3}$) es la densidad de carga eléctrica.

En términos simples, las ecuaciones de Maxwell declaran lo siguiente:

- *[2.3] Ley de Faraday*: La variación temporal de un campo magnético genera campos eléctricos.
- *[2.4] Ley de Ampère:* La circulación de corrientes eléctricas genera campos magnéticos.
- *[2.5] Ley de Gauss C.E.:* El desplazamiento eléctrico depende de la densidad de carga que se tenga en un cuerpo.
- *[2.6] Ley de Gauss C.M.:* No existen monopolos magnéticos.

Además de las ecuaciones de Maxwell, para la teoría de los métodos electromagnéticos es fundamental la ley de Ohm, que describe la relación entre la corriente eléctrica (*I*) que fluye por un material y la diferencia de potencial (*V*) asociada:

$$R = \frac{V}{I} \quad [2.7]$$

Donde R es la resistencia del material al flujo de corriente eléctrica. En un medio continuo, la ley de Ohm puede ser definida como:

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \qquad [2.8]$$

Un factor importante del método magnetotelúrico es la profundidad de penetración o *skin depth (δ). E*ste parámetro define, en un medio de resistividad eléctrica constante y homogénea, la profundidad a la cual la amplitud de los campos electromagnéticos se reduce en un factor *e* de su valor *en* la superficie de la Tierra (Pous & Marcuello, 2003).

$$\delta = 0.5\sqrt{(\rho T)} \qquad [2.9]$$

Donde $\boldsymbol{\delta}$ tiene unidades de longitud (km), la resistividad eléctrica $\boldsymbol{\rho}$ se mide en (Ωm) y finalmente el periodo $\boldsymbol{T}$ en unidad de tiempo (s).

En base a la ecuación 2.9 se puede deducir que, a una mayor resistividad de la roca y un periodo más largo, será mayor la capacidad que tendrán las ondas de penetrar en profundidad.

2.2.3 Exploración de minerales metálicos y magnetotelúrica.

El método MT ha sido aplicado en la exploración de una amplia gama de depósitos minerales. Por ejemplo, en la zona sur del Perú, se realizó un estudio magnetotelúrico 2D (Quispe et al., 2021) a lo largo de un perfil SE-NO de 360 km de largo. En base a la correlación del modelo de resistividad con información geológica y tectónica, Quispe et al. (2021), interpretaron que zonas de baja resistividad ubicadas en discontinuidades de altas resistividades se asociarían con cuerpos con potencial de mineralización de Fe-Cu-Au.

La combinación de estudios MT con otros métodos geofísicos permite una mejor interpretación de la estructura del subsuelo geológico. En el depósito Santa Cecilia (pórfido enriquecido en oro, ubicado en Chile en el cinturón de Maricunga), se realizó un estudio MT 3D y de resistividad DC (Bournas & Thomson, 2013, citados en Jansen & Cristall, 2017). Al combinar los resultados de ambos estudios, interpretaron que el sistema mineralizado se asociaba a zonas de baja resistividad que se extiende en profundidad, permitiendo aclarar la traza de exploración del sistema mineralizado.

III.Marco geológico

3.1 Geología distrital.

Los yacimientos mineros del distrito Punta del Cobre se encuentran distribuidos dentro de un contexto geológico relacionado a una cuenca volcano-sedimentaria, que se elonga en dirección nor-noreste (Camus, 1980) y su edad máxima es asociada al Jurásico tardío (Arévalo, 2005). En este periodo de tiempo, el arco volcánico y una cuenca marina de trasarco se habrían desarrollado en un basamento compuesto de rocas volcánicas, sedimentarias e intrusivas del Jurásico (Marschik et al., 2003). Del volcanismo de arco generado durante el Jurásico tardío al Cretácico temprano (Fig. III.1) se preserva en la cordillera de la Costa una secuencia de aprox. 3000 m de rocas volcánicas basalto-andesíticas, andesíticas y dacíticas (Sillitoe, 2003).

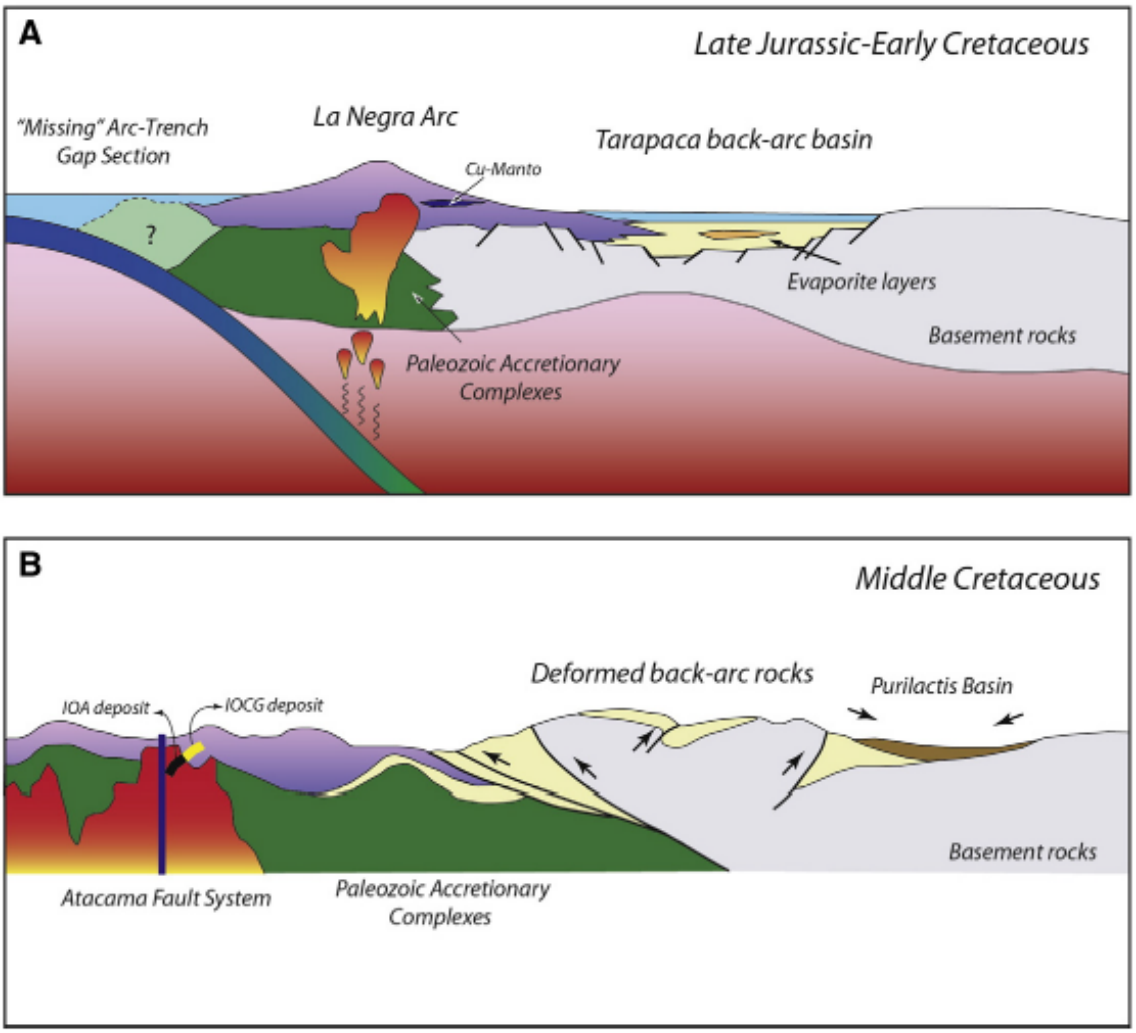

Figura III.1 *Evolución tectónica durante el Jurásico tardío-Cretácico temprano hasta el Cretácico "medio" (Hauteriviano-Campaniano) en latitudes 21-27°S. (A) La primera etapa es caracterizada por magmatismo de cuenca de trasarco, y el emplazamiento de la Formación La Negra la cual es la caja de varios depósitos de Cu tipo manto. (B) El Cretácico medio es caracterizado por la extensiva deformación y alzamiento de la cuenca Tarapacá para formar la proto-Cordillera de Domeyko y desarrollar el Sistema de Fallas de Atacama. (Extraído de Barra et al., 2017; modificado de Mpodozis y Ramos, 1990).*

Los principales yacimientos del distrito Punta del Cobre se encuentran alojados en rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Punta del Cobre, en las que se sobreponen rocas sedimentarias pertenecientes al Grupo Chañarcillo (Fig. III.2; del Real *et al.*, 2018), siendo ambas instruidas por el batolito Copiapó.

El distrito minero Punta del Cobre es parte de la franja IOA-IOCG que en territorio chileno se extiende desde el norte de Santiago hasta Arica (Sillitoe, 2003). Este cinturón metalogénico alberga mineralización de Cu(-Fe)-Au y se caracterizan por abundante

presencia de magnetita con calcopirita y bornita en menores cantidades, con una cantidad relevante de oro y plata (Barra *et al*., 2017). La magnetita que es el principal mineral de hierro de la zona, coexiste junto con calcopirita y también como cuerpos masivos irregulares y vetas (Lino, 1984; Hopf, 1990; Ryan *et al*., 1995; citados en Marschik *et al*., 1997).

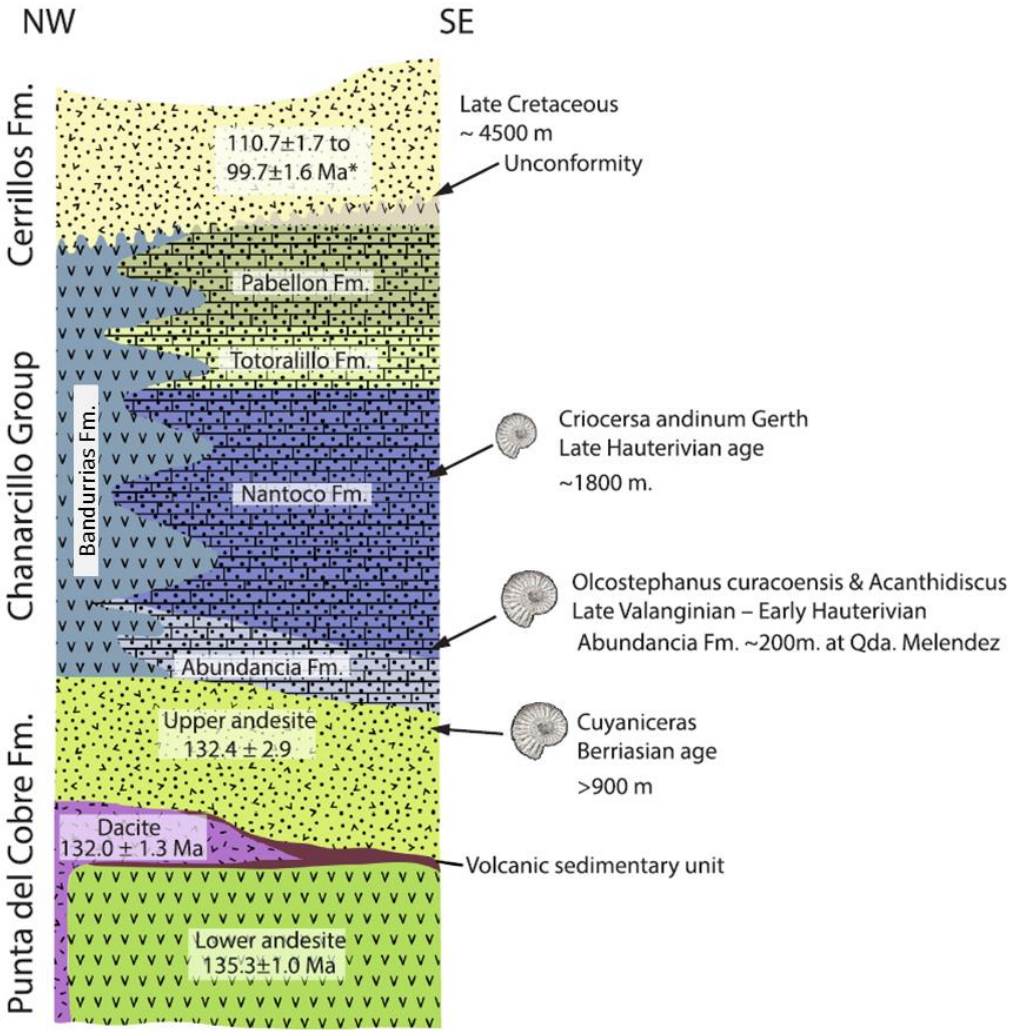

Figura III.2 *Columna estratigráfica del distrito Punta del Cobre con las principales edades geocronológicas y paleontológicas. Edades de la Formación Cerrillos son de Maksaev et al. (2009), edades de la formación Punta del Cobre expuesta en del Real et al. (2018). La columna es modificada de Arévalo (1999). Extraída de del Real et al. (2018).*

3.1.1 Formación Punta del Cobre.

Fue definida por Segerstrom y Ruiz (1962), quienes a grandes rasgos describieron una secuencia de rocas principalmente volcánicas. Marschik y Fontboté (2001), subdividieron a esta formación en dos miembros, que de base a techo son: (1) Geraldo-Negro y (2) Algarrobo. A su vez, ambos miembros se dividen en dos sub-miembros, para el caso del miembro Geraldo-Negro (Marschik y Fontboté, 2001):

a. *Miembro Andesitas Inferiores*: está compuesto por rocas masivas volcánicas de composición andesítica que se encuentran alteradas, y se intercalan con pequeños lentes de sedimentos clásticos. Se les ha reportado un espesor mayor a 800 metros (del Real *et al*., 2018).
b. *Miembro Dacitas de Meléndez*: Este miembro se sobrepone en concordancia a las Andesitas Inferiores, y está compuesto de rocas dacíticas que sufrieron una intensa albitización, y a su vez alteración potásica en algunos lugares. La potencia de este miembro varía de algunos pocos metros hasta más de 200 m (del Real *et al*., 2018). El ensamblaje de albita-cuarzo-clorita en quebrada Meléndez hace que Ruiz (1942) denomine estas dacitas como "*Albitófiro*".

Continuando con el orden de base a techo, el miembro Algarrobo se subdivide en (Marschik y Fontboté, 2001):

a. *Miembro de Brechas Volcanosedimentarias*: La sucesión sedimentaria que cubre parte del miembro Geraldo-Negro con un contacto erosivo, empieza con una brecha sedimentaria rojiza, conocida como "Brecha Basal". Esta brecha está compuesta de rocas volcánicas, cherts y lutitas. Esta unidad se sobrepone a las Dacitas de Meléndez cuando se encuentran presentes.
b. *Miembro Andesita Superior*: El miembro perteneciente al techo de la Formación Punta del Cobre se compone de discontinuos lentes de facies andesíticas y basálticas porfídicas con cristales de plagioclasa. Su espesor es variable, desde 600 metros hacia el sur de Candelaria, y hasta 10-50 m hacia el norte y el este (del Real *et al*., 2018).

3.1.2 Grupo Chañarcillo.

Este grupo sobreyace en concordancia a la Formación Punta del Cobre, y está compuesto por 4 km de depósitos calcáreos y siliciclásticos pertenecientes al ciclo marino Valanginiano-Aptiano (Segerstrom y Parker, 1959; Segerstrom, 1960; Segerstrom y Ruiz, 1962). Estas formaciones fueron primariamente descritas por Biese-Nickel (1942), y se ordenan de base a techo de la siguiente manera:

a. *Formación Abundancia*: se encuentra constituida por 200 m de una alternación de areniscas tobáceas, calizas compactas, intercalaciones de lutitas generalmente silicificadas (Corvalán, 1973).
b. *Formación Nantoco*: esta formación sobreyace concordantemente a la Formación Abundancia (Segerstrom y Ruiz, 1962). Está constituida principalmente por calizas, intercalaciones de lutitas calcáreas y calizas bituminosas, en su mayoría con tonalidades grises (Corvalán, 1973) presentando un espesor cercano a unos 1200 m (Martínez *et al*, 2013).
c. *Formación Totoralillo*: gran parte de esta formación se encuentra representada por limolitas calcáreas de grano fino que se sobreponen en concordancia a la Formación Nantoco (Segerstrom y Ruiz, 1968). Según Corvalán (1973), se encuentra compuesta de intercalaciones de lutitas calcáreas y calizas margosas grises, cuyo espesor total es de 226 m.
d. *Formación Pabellón*: se sitúa en concordancia sobre la Formación Totoralillo. Presenta entre 140 y 290 m de espesor, y está compuesta por una secuencia de calcilutitas y calcarenitas, donde en su base se encuentran cherts (Biese-Nickel *en* Hoffstetter *et al.*, 1957; Arévalo, 2005).

3.1.3 Formación Bandurrias.

Esta unidad contiene rocas basalto-andesíticas, andesitas y traquiandesitas, mezcladas con sedimentos continentales volcanoclásticos y tobas con intercalaciones de calizas y areniscas superficiales de origen marino (Segerstrom, 1960, 1967, *citado en* del Real *et al*., 2018). Además, se entrelaza hacia el este con el Grupo Chañarcillo, indicando que estas unidades son equivalentes temporalmente. La Formación Bandurrias presenta un espesor de 2500 – 3000 m (del Real *et al*., 2018).

3.1.4 Formación Cerrillos.

Yace en discordancia erosiva sobre la Formación Pabellón y se sobrepone de manera discordante sobre la Formación Bandurrias, con un espesor de 2500 a 3500 m. Se compone de conglomerados con intercalaciones de areniscas, coladas de lava, brechas volcánicas (Segerstrom, 1960). El rango de edades para la Formación Cerrillos, a través del método U-Pb en circón, es determinado en 80-65 Ma, es decir, entre el Campaniano-Maastrichtiano (Maksaev *et al*., 2009).

3.1.5 Cuerpos Intrusivos.

En el distrito Punta del Cobre afloran rocas intrusivas hacia el oeste, que corresponderían a distintas fases del llamado batolito Copiapó. Las principales unidades intrusivas son: dioritas La Brea, monzodioritas San Gregorio y granodioritas a tonalitas Los Lirios (Tilling, 1976; Arévalo, 1999; Marschik y Söllner, 2006; citados en del Real, 2018).

a. *La Brea*: esta fase es la más grande y dominante del batolito, varía gradacionalmente desde dioritas con piroxenos de grano grueso con texturas equigranular a porfírica hasta dioritas de hornblenda con grano medio a grueso de textura equigranular (del Real *et al*., 2018).
b. *San Gregorio*: es una fase de monzodioritas de grano medio a grueso, típicamente con textura equigranular (del Real *et al*., 2018). El contacto sur con la Formación Punta del Cobre y el Grupo Chañarcillo es caracterizado por una zona de deformación con una pronunciada foliación que define a la zona de cizalle Ojancos (Arévalo *et al*., 2006 *citado en* del Real *et al*., 2018).
c. *Los Lirios*: para esta fase existe una variación desde granodiorita a tonalita. Tiene un rumbo elongado en dirección norte-noreste (Arévalo, 1999; Tilling, 1976; *citados en* del Real *et al*., 2018).

3.1.6 Gravas de Atacama.

Unidad perteneciente al Mioceno medio, ubicadas entre la Franja de Maricunga y la Cordillera de la Costa. Se componen de gravas polimícticas mal consolidadas, con matriz de arena, limo o arcilla. Su génesis se debe al producto de la interacción mixta entre procesos fluviales, aluviales y coluviales asociado a redes hidrográficas antiguas (Arévalo, 2005).

3.1.7 Depósitos Aluviales Cuaternarios.

Estos depósitos se componen de material no consolidado asociado a ripios, gravas y arenas mal clasificadas transportados como flujos gravitacionales que rellenan quebradas (Arévalo, 2005).

3.1.8 Geología Estructural.

El distrito Punta del Cobre se sitúa en el anticlinal de Tierra Amarilla representado por una cantidad importante de pliegues. Las principales estructuras del distrito según Marschik *y* Fontboté (2001) son:

i. Gran anticlinal de rumbo norte-noreste, conocido como el Anticlinorio de Tierra Amarilla, acompañado de fallas lístricas normales (Arévalo *et al*., 2006).
ii. Sistema de fallas de rumbo con sentido de vergencia hacia el sureste, denominado como El Bronce.
iii. Un denso set de fallas de rumbo sinestrales de alto ángulo con orientación N-NW a NW.
iv. Fallas con una orientación NE y E-W.

Este último grupo es representado por la zona de cizalle de Ojancos de orientación NNE a NE (ver Fig. III.3) y que se ubica en la zona oeste del distrito. La traza de esta zona de cizalle de alto ángulo, sigue el contacto entre la unidad intrusiva San Gregorio y las rocas sedimentarias del Grupo Chañarcillo (del Real *et al*., 2018).

El sector oeste del distrito es ampliamente incluido dentro del cinturón de cizalle Candelaria (Fig. III.4), el cual tiene un rumbo hacia el NE-SW de bajo ángulo (Arévalo *et al*., 2006). Esto ocurre paralelamente entre los contactos litológicos incluidos en la zona de cizalle (e.g., las Andesitas Inferiores y miembros volcano-sedimentarios) (del Real *et al*., 2018).

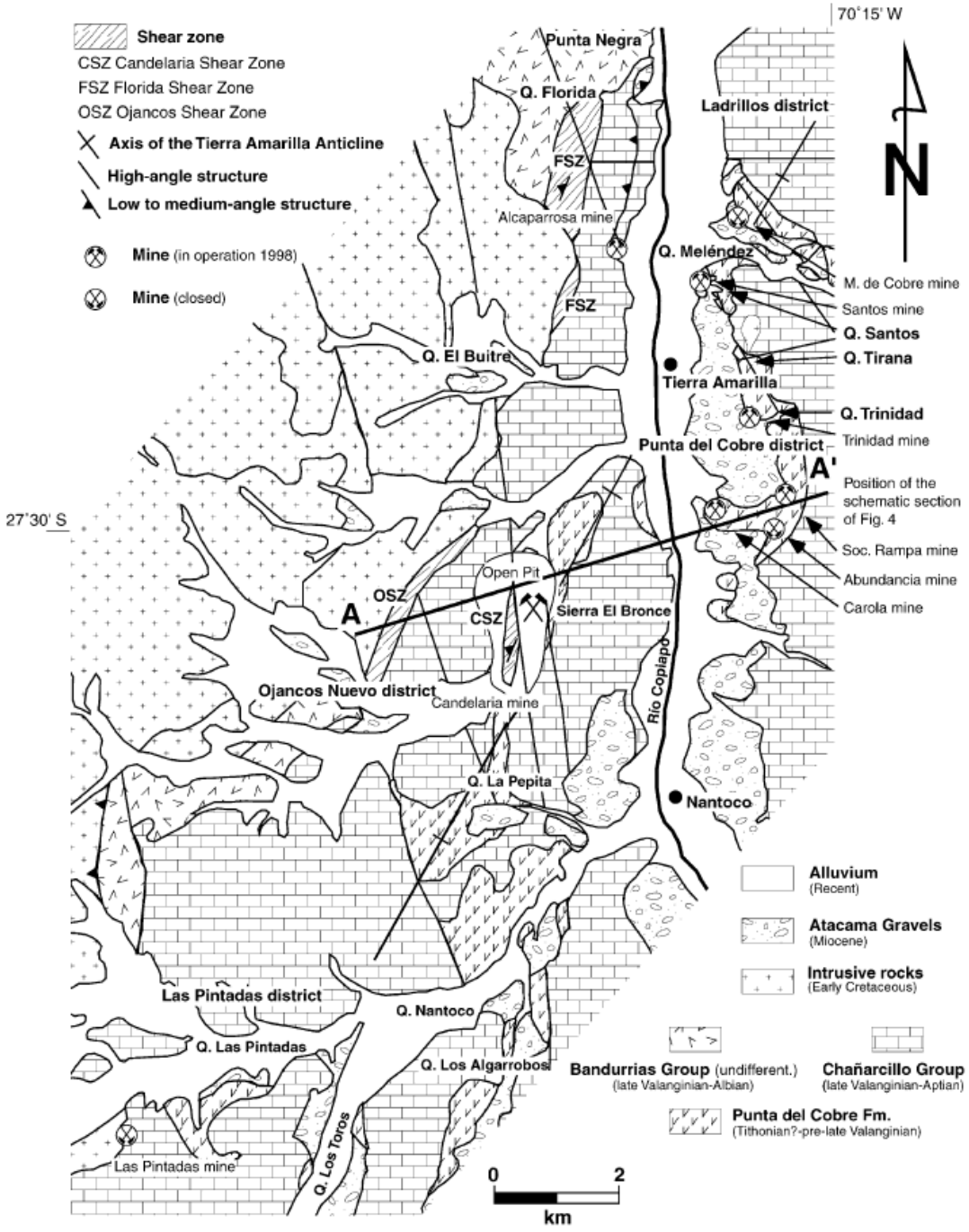

Figura III.3 *Mapa geológico del área Punta del Cobre-Candelaria, las rocas intrusivas pertenecen al batolito Copiapó; entre otros el plutón San Gregorio, La Brea y Los Lirios. Extraída de Marschik y Fontboté, 2001.*

El desarrollo de fallas controla parte de la mineralización y disloca los cuerpos mineralizados del distrito (Camus, 1980).

Según Osten (1969), existen fallas mineralizadas y fallas sin mineralización, donde las que son mineralizadas solo afectan a las unidades de Andesitas Inferiores y Albitófiro, sin embargo, no atraviesan a las rocas suprayacentes. Existen excepciones como el caso de la veta Buena Esperanza, en la que la mineralización se extiende hacia los sedimentos de unidades superiores. Por otro lado, las fallas no mineralizadas atraviesan absolutamente todas las unidades de rocas presentes (Camus, 1980). En la figura III.4, se muestra una sección transversal del distrito Punta del Cobre, en donde se observan algunas fallas y la ubicación de algunos depósitos.

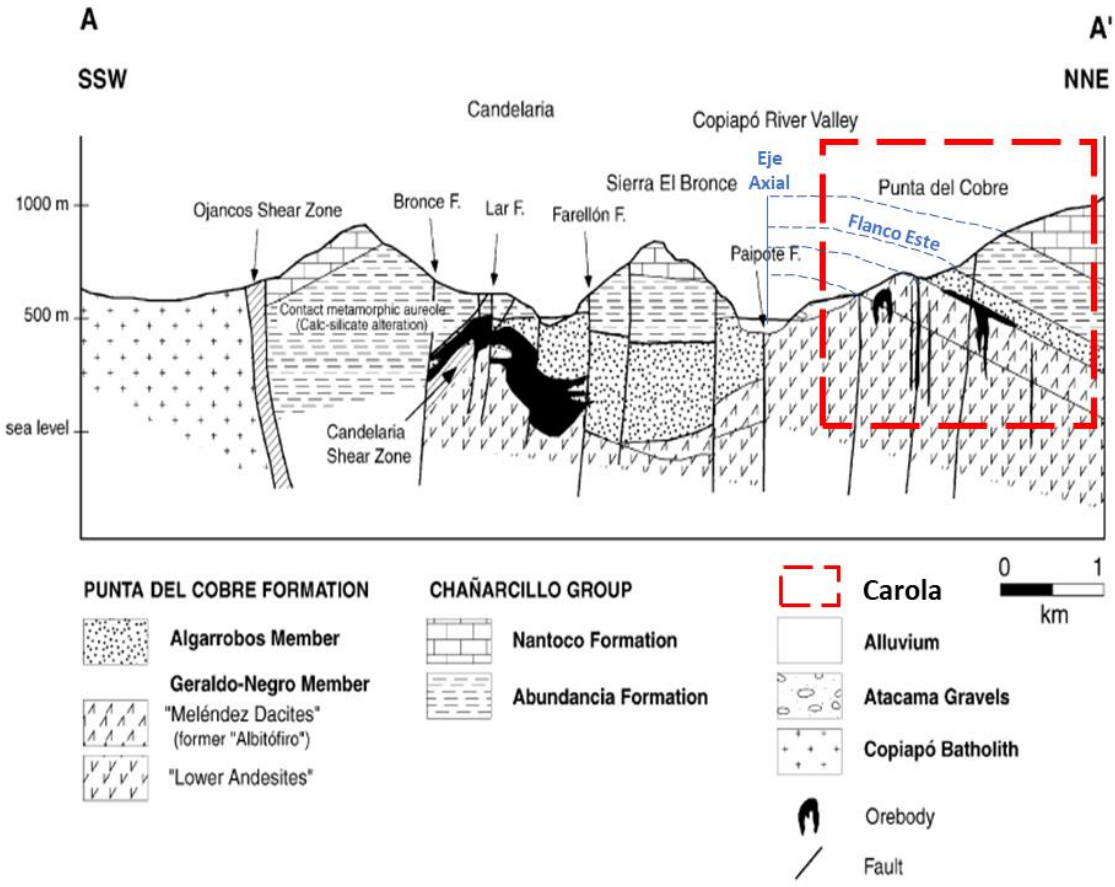

Figura III.4 *Sección transversal a través del Anticlinorio de Tierra Amarilla, desde la unidad San Gregorio (SSW) hasta el distrito Punta del Cobre. Se indica la posición aproximada de la mina Carola. Modificada de Marschik y Fontboté (2001).*

3.2 Geología del yacimiento Carola.

El yacimiento minero Carola presenta rocas de origen volcánico y sedimentario (ver Fig. III.5), las cuales son parte de las formaciones Punta del Cobre, Abundancia y Nantoco.

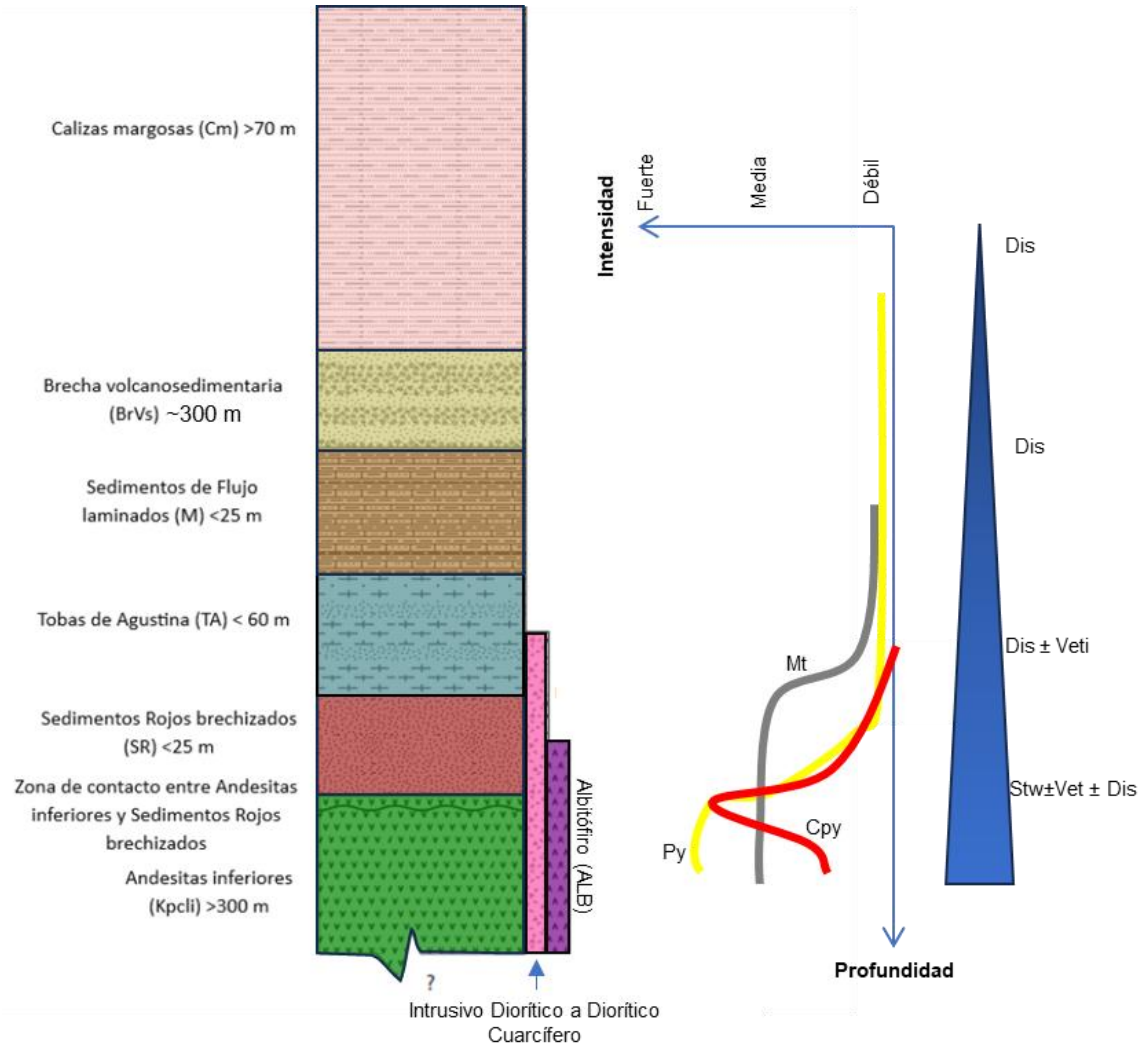

Figura III.5 *Columna estratigráfica tipo de la Mina Carola, con intensidad relativa de minerales metálicos comunes y su estilo de mineralización según su profundidad (modificada de informe local de Superintendencia de Geología de SCM Carola, 2019).*

Para comprender la disposición y características de las unidades geológicas en el área de estudio, se presenta un mapa y una sección geológica (Fig. III.6; III.7). Este mapa ilustra la distribución espacial de las distintas litologías en superficie, por otro lado, la sección geológica ofrece una representación transversal de la estratigrafía de la zona.

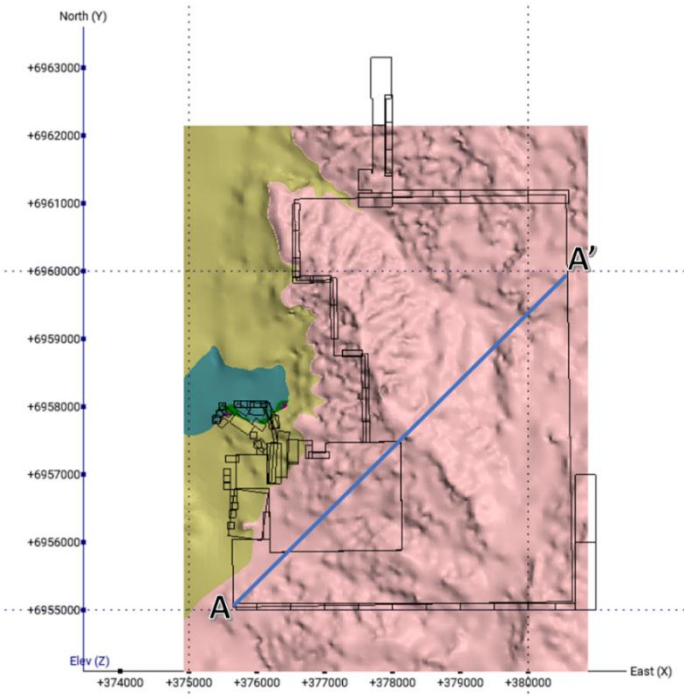

Figura III.6 *Mapa litológico superficial del área de estudio. Las líneas negras son las concesiones de SCM Carola. La línea azul es la traza de la sección transversal (ver leyenda en Fig. III.7).*

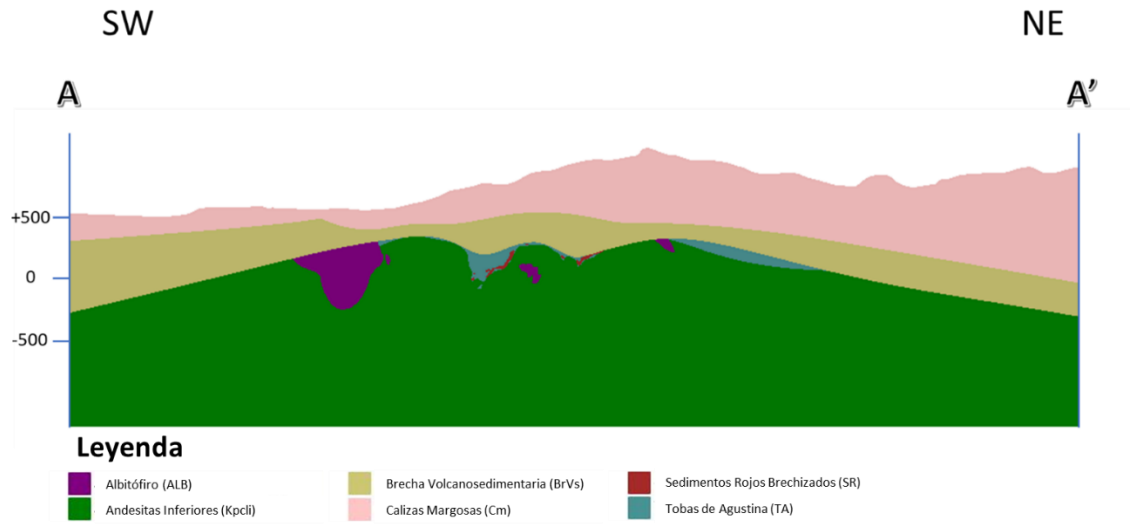

Figura III.7 *Sección SW-NE del modelo litológico 3D de SCM Carola que contiene algunas de las unidades geológicas más representativas realizado a través del software Leapfrog Los colores son representativos de las unidades litológicas antes vistas (ver Fig. III.5).*

3.2.1 Unidades litológicas.

La Superintendencia de Geología de SCM Carola utiliza una terminología propia para las unidades geológicas que se encuentran en sus pertenencias (Fig. III.5). Las unidades geológicas en la convención utilizada se les conoce como “unidades litológicas”, sin embargo, corresponden a unidades geológicas informales, las cuales a su vez se dividen en “litologías”. Las mencionadas a continuación son las más representativas del sector y se describen en base al trabajo recopilatorio de Fernández (2023). En orden de base a techo se definen a continuación:

3.2.1.1 Andesitas Inferiores.

Esta unidad litológica es la base de la Formación Punta del Cobre, correspondiente a uno de los sub-miembros del miembro Geraldo-Negro. Dentro de esta unidad se definen al menos tres “litologías”: Andesitas Inferiores, Brecha de techo y Brecha hidrotermal. El contacto inferior de la unidad es desconocido, sin embargo, se estima un espesor mayor a 400 metros.

La litología de Andesitas Inferiores es representada por rocas volcánicas de color gris oscuro que varían en tonalidades verdosas, presentan textura porfídica con fenocristales de plagioclasa euhedrales a subhedrales que pueden ser afectados por alteración potásica leve a intermedia. Posee una masa fundamental afanítica que se encuentra ocasionalmente cloritizada. Estas rocas pueden verse afectadas por la ausencia de alteración como una variada intensidad de alteración como la silicificación, magnetización y/o epidotización. Esta litología es la más importante en términos económicos dentro de la mina Carola, debido a la presencia de calcopirita en vetillas, diseminada, cúmulos o incluso masiva. Algunos de los minerales que aparecen como alteración son: hematita, especularita, magnetita, mushketovita, calcita, actinolita, cuarzo y pirita. Este último sulfuro de hierro se encuentra presente en al menos tres tipos de mineralización: diseminada, cúmulos y/o vetillas.

La Brecha de techo se ubica en el contacto entre las Andesitas Inferiores y la unidad suprayacente conocida como Sedimentos Rojos Brechizados (SR) o la unidad de Tobas de Agustina (TA) (ver Fig. III.5). La Brecha de techo corresponde a una brecha cuya matriz es de composición andesítica. Los clastos de la brecha son de origen sedimentario,

similares a las unidades superiores. Esta se encuentra generalmente alterada a clorita, y a su vez puntualmente presenta alteración potásica intermedia a fuerte representada por feldespato potásico. En cuanto a mineralización, esta litología también presenta calcopirita en vetillas, cúmulos y diseminada. Presenta además vetillas de calcita, cuarzo y algunos cúmulos de estos minerales, acompañada de la diseminación de pirita.

3.2.1.2 Albitófiro.

El Albitófiro en la mina Carola es asociado al miembro Dacitas de Meléndez. Esta unidad varía su composición entre dacítica y andesítica. El Albitófiro andesítico presenta textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa subhedrales y/o anhedrales. Está compuesta de masa fundamental de color gris verdoso claro a oscuro, presentando alteración potásica (K-Feldespato) intermedia a fuerte, y cloritización en algunos casos. El Albitófiro dacítico presenta una textura porfídica, donde sus fenocristales de plagioclasa se encuentran en una masa fundamental que comúnmente presenta diseminación de pirita. El Albitófiro en general es importante en términos económicos, ya que hospeda calcopirita que ocurre en vetillas, diseminado y en cúmulos. Presenta también vetillas de calcita, hematita y magnetita.

3.2.1.3 Sedimentos Rojos Brechizados.

En el yacimiento se define esta unidad a partir de tres litologías que destacan por su tonalidad rojiza: Sedimentos Rojos Brechizados, Sedimentos Rojos Laminados y Brecha de Contacto. Estas litologías se ubicarían dentro del sub-miembro de Brechas Volcanosedimentarias (Marschik y Fontboté, 2001), precisamente la “Brecha Basal” que se incluye en el miembro Algarrobo. La unidad se ubica entre las Andesitas Inferiores y las Tobas de Agustina (ver Fig. III.5).

La litología de los Sedimentos Rojos Brechizados corresponden a una brecha volcanosedimentaria polimíctica. En cuanto a su matriz, presenta un tamaño de grano que varía en un rango de arenas hasta limos. Los clastos presentes son de mala selección, y varían de angulosos a subredondeados. Esta litología generalmente presenta alteración clorítica e incluso alteración potásica leve (K-Feldespato). A diferencia de las unidades antes descritas, los Sedimentos Rojos Brechizados presentan débil mineralización de

calcopirita, la cual se encuentra de manera diseminada. Esta litología tiene presencia débil de pirita en ocurrencia diseminada.

Los Sedimentos Rojos Laminados presentan estructuras laminares con la tonalidad rojiza característica de la unidad. Esta litología no contiene calcopirita, sin embargo, presenta pirita diseminada con porcentajes que van entre 10 y 35%.

La Brecha de contacto corresponde a una brecha volcanosedimentaria ubicada en el contacto entre la unidad Albitófiro (ALB) y la unidad Sedimentos Rojos Brechizados (SR). Esta brecha presenta una matriz sedimentaria de tamaño arena, con clastos volcánicos atribuibles al Albitófiro. Los clastos tienden a ser angulosos a subredondeados, y presentan alteración potásica (K-Feldespato) y cloritización de intensidad leve a intermedia. Esta litología presenta leve mineralización de calcopirita y pirita, en cúmulos o diseminada.

3.2.1.4 Tobas de Agustina.

La unidad Tobas de Agustina pertenece a la Formación Punta del Cobre, específicamente al Miembro Algarrobo. El espesor de esta unidad varía de 55 a 60 metros, en la que se incluyen cuatro litologías informales mencionadas de base a techo: Brecha de Contacto, Tobas de Agustina y Sedimentos Rojos, Tobas de Agustina, Lutitas Margosas.

La Brecha de Contacto presenta matriz de toba y clastos pertenecientes al Albitófiro cloritizado. La diseminación de pirita se hace presente en toda la roca con intensidades muy débiles a débiles.

La litología de Tobas de Agustina y Sedimentos Rojos corresponde a una transición entre las litologías TA y SR, está compuesta de brechas volcanosedimentarias rojizas con una matriz de tamaño arena con tonalidades rojizas, en las que se presentan vetillas de calcita, hematita y especularita. Por otro lado, la pirita se encuentra en un modo de ocurrencia diseminado de intensidad generalmente débil. Las Tobas de Agustina corresponden a una toba lítica en donde su tonalidad grisácea y su textura brechosa es de fácil reconocimiento, en la mayoría de los casos se presenta con carbonatación. Sus piroclastos volcánicos y sedimentarios presentan diferentes composiciones, su tamaño suele ser menor a 4 cm, y son angulosos a subredondeados y de mala selección. Generalmente, presentan vesículas

y amígdalas de calcita y especularita, vetillas de magnetita con diseminación leve de pirita y magnetita. Las Lutitas Margosas son de color verde claro con un tamaño de grano muy fino.

3.2.1.5 Sedimentos de Flujo Laminados.

Esta unidad es suprayacente a las Tobas de Agustina (TA) y se encuentra representada principalmente por Sedimentos de Flujo Laminados. Los sedimentos de flujos laminados se reconocen por ser una roca sedimentaria laminada de color gris claro a oscuro donde estas bandas son de calizas, lutitas, areniscas, hematita, jaspe y cuarzo. Generalmente presenta silicificación con mineralización de pirita débil y finamente diseminada.

3.2.1.6 Andesitas Superiores.

Esta unidad se encuentra representada por rocas andesíticas-basálticas que se distribuyen en mayor cantidad en el sector norte. Estas rocas presentan un color que varía de verde oscuro a gris oscuro. Poseen texturas afanítica y porfídica, y además presentan vesículas o amígdalas rellenas con calcita. En cuanto a su mineralización, presentan diseminación de pirita de intensidad variable con vetillas de cuarzo y calcita. Generalmente se encuentra cloritizada en su totalidad acompañada de silicificación intermedia a fuerte.

3.2.1.7 Brecha Volcanosedimentaria.

En esta unidad las litologías son interdigitadas y en su mayoría presentan estructuras de laminación. Las Brechas Volcanosedimentarias están compuestas de clastos polimícticos de composición andesítica con areniscas y lutitas. El color general de estas rocas varía entre verde oscuro y café. La matriz es arenosa de tamaño de grano medio. Estas rocas se encuentran usualmente silicificadas, con una diseminación intersticial de pirita en su matriz y a su vez diseminación de magnetita en clastos, donde ambas son de intensidad muy débil.

3.2.1.8 Calizas Margosas.

En esta unidad se presentan dos litologías, la principal son calizas margosas y la secundaria es litoarenitas. Las calizas margosas se componen de mudstone de color gris

claro a oscuro. Las litoarenitas están compuestas de arena de tamaño media a gruesa, de color verde claro. Ambas litologías presentan pirita intersticial fina con intensidades muy débiles, y en el caso de las calizas margosas también presentan arcillas.

3.2.2 Estructura.

En el yacimiento Carola se han descrito varios sistemas de fallas. Se interpretan como estructuras mayores las que tienen una relación directa con la distribución de la mineralización, en particular con la distribución de los cuerpos mineralizados establecidos en la faena minera. A grandes rasgos se definen cuatro sistemas de fallas:

i. Fallas N20-40W/65-90°SW
ii. Fallas N40-60W/30-50°SW
iii. Fallas NS-N20W/subverticales
iv. Fallas N70E-EW/subverticales

Los sistemas NW-SE (i, ii), permiten la orientación preferente de la mineralización por medio de fallas, generando cuerpos de gran importancia económica, a su vez, la permeabilidad entre el techo de las Andesitas Inferiores y la unidad suprayacente en ciertas zonas permite una mejor mineralización tipo manto. En el caso de las fallas subverticales (iii, iv), algunas permiten el emplazamiento de cuerpos ígneos hipabisales como diques.

Dentro del yacimiento se observan rocas pertenecientes al Grupo Chañarcillo cortadas por falla de orientación NNW, NE y ENE, e intruidas por cuerpos irregulares, sills y diques de composición gabroica a granodiorítica (Pop *et al.*, 2000).

3.2.3 Mineralización

La descripción de la mineralización en el yacimiento Carola se basa en el trabajo realizado por Fernández (2023). Los modelos geológicos de la empresa indican que la calcopirita se presenta en cuerpos globulares y alargados, y se observa principalmente en las unidades de Andesitas Inferiores (Kpcli) y Albitófiro (ALB), con una menor presencia en la Brecha de Techo (Kpcli) y la unidad de Sedimentos Rojos Brechizados (BR). Sin embargo, su modo de ocurrencia se distribuye de manera diseminada, en vetillas y vetas que pueden ser distribuidas por fallas. La pirita se encuentra en todas las unidades geológicas del

distrito en distintos modos de ocurrencia e intensidades variables (mayor intensidad a mayor profundidad). El contenido de oro y plata se concentra predominantemente en la estructura interna de la calcopirita, con una menor proporción presente en la pirita.

A medida que aumenta la profundidad, la magnetita se vuelve más frecuente. Además, existen dos tipos de magnetita:

a. *Magnetita I*: generalmente ocurre como granos monominerales o mostrando contactos nítidos con calcopirita, pirita y en menor proporción con esfalerita. En ciertos lugares presenta textura de reemplazo por hematita (martitización).
b. *Magnetita II:* representada por la mushketovita, que es el reemplazo de hematita por magnetita a causa de una reacción de reducción (Mücke *et al*., 2005) debido al reemplazo hipógeno de los cristales en donde se conserva la forma de los cristales de hematita.

Los estilos de mineralización que generan un mayor interés en Carola son ordenados de mayor a menor importancia:

a. *Vetas y Vetillas: e*s el principal modo de ocurrencia de la mineralización del yacimiento siendo representado por calcopirita, pirita, magnetita, especularita, actinolita, cuarzo, calcita, entre algunos de los más abundantes. La potencia varía de 0,1 a 30 milímetros para las vetillas y de 30 milímetros a 1 metro para las vetas, con excepción de vetas que llegan hasta más de 5 metros. Generalmente se encuentran en el sector sur, asociadas a la unidad de Andesitas Inferiores, Albitófiro y Brecha de Techo (Sepúlveda, 2017 *citado en* Fernández, 2023).
b. *Stockwork:* vetillas y fracturas polidireccionales e impregnaciones de minerales de cobre en Andesitas Inferiores y Albitófiro.
c. *Brecha:* esta mineralización es generada en cercanía a las estructuras mayores. Los principales minerales de interés económico se emplazan en la matriz y cemento en las unidades Andesitas Inferiores y/o Albitófiro.
d. *Manto*: este modo ocurre sobre el techo de la unidad de Andesitas Inferiores y/o Albitófiro, con una extensión de 200 metros de largo y ancho con 20 metros de alto, con contenido de sulfuros macizos, en mantos o bandeados.
e. *Diseminación*: la diseminación se ve representada principalmente por la calcopirita y pirita a través de la unidad de Andesitas Inferiores y en la matriz de la Brecha de Techo.

IV.Metodología

4.1 Etapas de la investigación.

Para cumplir los objetivos planteados, en esta tesis se realizó lo siguiente:

En primer lugar, se revisó la literatura existente sobre la geología regional y local, así como estudios geofísicos y material teórico geofísico. Con esta información, se seleccionaron todos los sondajes de la propiedad minera, que en su mayoría se ubican en la zona oeste del yacimiento.

Luego, se compilaron los datos geológicos, geoquímicos y geofísicos utilizados en esta investigación. Los datos geológicos se obtuvieron de la información preexistente capturada por geólogos de S.C.M. Carola y almacenados en la base de datos de esta empresa. Los datos geofísicos corresponden al modelo de resistividad eléctrica obtenido de la inversión de los resultados del estudio magnetotelúrico del año 2023. Con este conjunto de datos, se obtuvo mediante compilación e interpolación una base de datos que integra la información geológica, geoquímica y geofísica disponible. Esta base de datos se utilizó para el análisis estadístico y de correlación de los datos recopilados, así como para obtener secciones transversales de los modelos geológico y geofísico, las cuales se utilizaron para identificar patrones de correlación espacial entre estos datos.

4.2 Adquisición de datos.

4.2.1 Datos geológicos y geoquímicos obtenidos en sondajes.

De los sondeos diamantinos de diámetro NQ se extrajeron los resultados preexistentes del logueo geológico, logueo geotécnico, análisis de laboratorio y valores de susceptibilidad magnética medidos en testigos mediante el uso de un susceptibilímetro. Los datos de sondajes que fueron utilizados en este estudio y que fueron extraídos de la base de datos de S.C.M. Carola son:

- Unidades (UG).

- Litología.
- Ley de cobre total.
- Rock Quality Designation (RQD).
- Susceptibilidad magnética (SM).
- Ley de oro.
- Ley de plata.

Cabe destacar que los datos que se encuentran en la base de datos para el caso de la susceptibilidad magnética, ley de Au y ley de Ag no abarcan la totalidad de sondajes. Para los valores de Au, Ag y SM no existe un muestreo sistemático para el respectivo análisis, por lo que, los resultados podrían estar sujetos a un sesgo.

El logueo geológico consiste en identificar la litología, mineralización, alteración y estructuras observadas en testigos. No obstante, debido a la manera como ha sido registrada la mineralización en las bases de datos, se vuelve incompatible la incorporación de estos datos en esta tesis.

En el caso del RQD, este es un valor porcentual que se consiguió a partir del logueo geotécnico, el cual es ejecutado por longitud de maniobra, la cual generalmente es de tres metros. Los datos de susceptibilidad magnética fueron medidos en sondajes con un susceptibilímetro de la marca *TerraPlus* ® y modelo KT-20. Las mediciones de susceptibilidad fueron tomadas con una iteración de 5 mediciones por metro, de las cuales se realizó un promedio. Los datos de susceptibilidad se encuentran registrados en unidades del sistema internacional (10^{-3} SI).

Las leyes minerales (cobre, plata y oro) se determinaron mediante análisis geoquímicos realizados por Geolaquim Ltda. La ley de cobre se obtuvo en tramos de metro a metro, obteniendo el cobre total. Para el caso de la plata y el oro, el muestreo no fue sistemático y debido a la antigüedad de los datos se desconoce el motivo de toma de muestras.

Por medio del software *Leapfrog* ®, se logró ubicar espacialmente los 2330 sondajes para posteriormente asociar los parámetros geológicos respectivos de cada sondaje, a través de tres tablas de datos en formato .csv (Tablas IV.1; IV.2; IV.3). Estos datos de sondajes son los siguientes y son esenciales para la modelación geológica:

- Collar (HoleID, Easting, Northing, Depth, Length).
- Survey (HoleID, Azimuth, Dip, Depth).

- Assays (HoleID, From, To, Cu, Au, Ag, RQD, SM, UG, Litología, Mineralización).

Tabla IV.1 *Datos relacionados a los collares de los sondajes (Collar) donde se muestran los parámetros: HoleID, Este, Norte, Profundidad (RL) y el largo (Length).*

HOLEID	EAST	NORTH	RL	LENGTH
DDH-3296	377608.55	6957564.11	230.57	120.2
DDH-3297	377608.12	6957563.93	229.88	120
DDH-3298	377607.09	6957563.52	229.85	43.45

Tabla IV.2 *Datos relacionados al "Survey" con el ángulo de inclinación (DIP) y el azimut del sondaje.*

HOLEID	DEPTH	DIP	AZIMUTH
DDH-3327	0	51.199	250.467
DDH-3327	180	51.199	250.467
DDH-3325A	0	-70.229	249.987

Tabla IV.3 *Datos de los análisis correspondientes realizados en la mina Carola (Assays).*

holeid	from	to	Lito	UG	Resistividad	CUT_PCT	RQD_m	AG_PPM	AU_PPM	SM_SI
AN-0355	216	216.3	Sed. Rojos brechizados (SR)	SR	672.3	0.01	0	1.3	0.005	0.5
AN-0355	216.3	216.9	Sed. Rojos brechizados (SR)	SR	672.3	0.01	0.17	1.3	0.005	0.5
AN-0355	216.9	217	Sed. Rojos brechizados (SR)	SR	672.3	0.01	0.14	1.3	0.005	0.5

4.2.2 Resistividad eléctrica obtenida de estudio magnetotelúrico.

4.4.2.1 Generalidades.

En el área de estudio la empresa Southernrock Geophysics realizó un estudio magnetotelúrico el año 2023, con el objetivo de caracterizar la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo hasta una profundidad de hasta 3 km. Para esto, se instalaron 122 estaciones magnetotelúricas dispuestas en una malla nominal de 500x500 m^2 (Fig. IV.1), abarcando un área total de 25 km^2 (Southernrock Geophysics, 2023).

En cuanto a las especificaciones del estudio, la adquisición de datos en cada estación se realizó con la unidad $gDAS^{32}$, la cual registra las variaciones en el tiempo de campos eléctricos y magnéticos con frecuencias de muestreo de 128 Hz, 2 kHz y 32 kHz, de las cuales se almacenaron 2^{22} muestras para cada frecuencia de muestreo. La calidad de los datos medidos se considera buena, ya que la resistividad aparente y la fase de impedancia

calculadas con los datos mostraron una mediana de error del 1.6% y 0.30, respectivamente, con una mediana de coherencia de 0.89 (SouthernRock Geophysics, 2023).

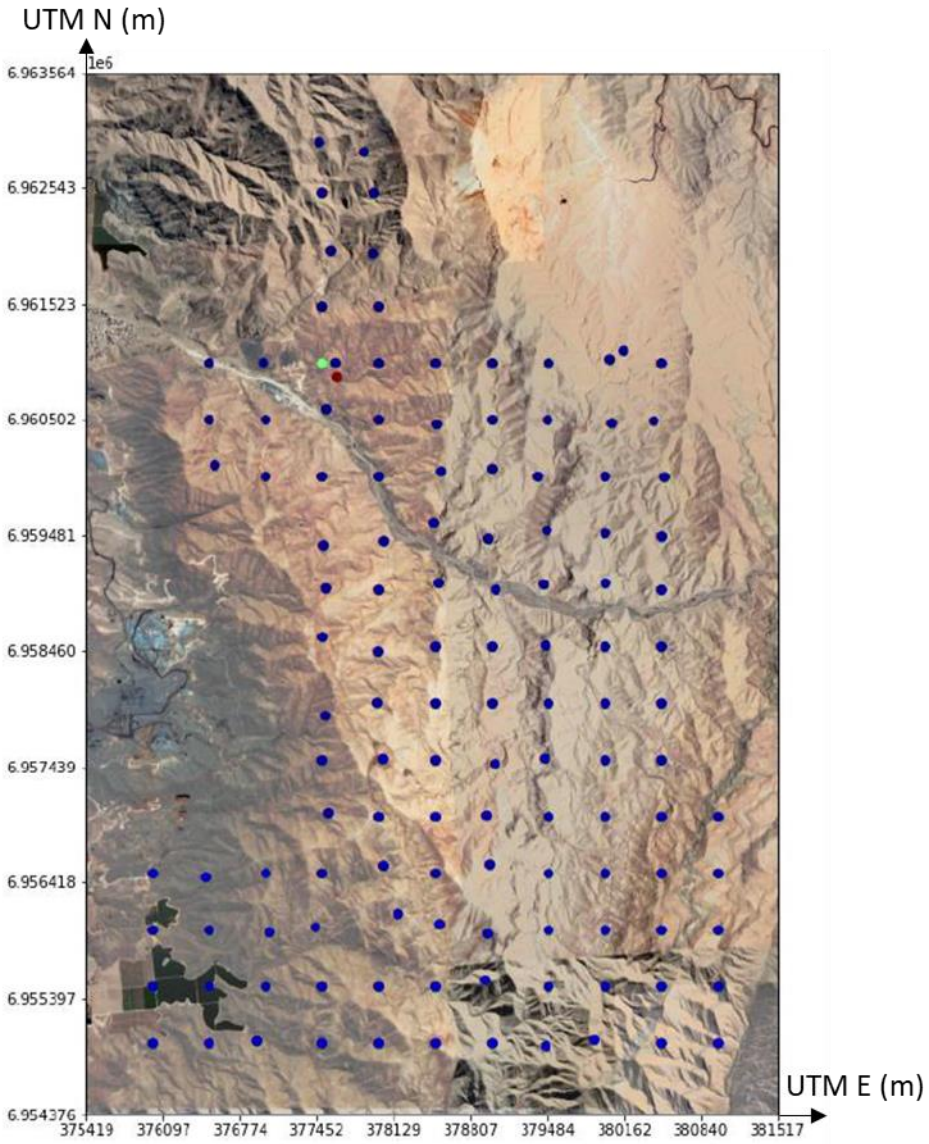

Figura IV.1 *Mapa de ubicación de las 122 estaciones magnetotelúricas medidas, sobre imagen satelital en proyecto Carola. Coordenadas UTM Zona 19S, Datum PSAD56 (tomada de SouthernRocks Geophysics, 2023).*

4.4.2.2 Procesamiento y modelación inversa.

Southernrock Geophysics (2023) obtuvo un modelo 3D de resistividad eléctrica mediante la inversión de las cuatro componentes del tensor de impedancia utilizando el software

Geotools v.3.0 ®. El ajuste de los datos es bueno y presenta una distribución de la resistividad modelada geológicamente razonable (Southernrock Geophysics, 2023). El modelo comprende celdas que tienen aristas de 100 m en la horizontal y 50 m en la vertical. En esta tesis se obtuvo la posición y resistividad de cada celda a partir de un archivo tipo XYZ de 4 columnas (Tabla IV.4). El sistema de coordenadas es PSAD56, UTM Zona 19S.

Tabla IV.4 *Extracto de archivo tipo XYZ en el que se muestran las columnas de coordenadas (XYZ) y resistividad eléctrica (Data) para cuatro celdas.*

```
X Y Z Data
375700 6954900 -2700 5536.43994140625
375700 6954900 -2650 5448.63623046875
375700 6954900 -2600 5326.25341796875
375700 6954900 -2550 5183.47265625
```

Entre la superficie y los 3000 m de profundidad (volumen donde se concentra el análisis de esta tesis), el modelo de resistividad presenta un rango de resistividad entre 11 y 11200 Ωm, con una mediana de 900 Ωm.

4.3 Confección de base de datos.

Para obtener el valor que presenta el modelo de resistividad en la posición de cada muestra de sondaje, se utilizó el software *Geoscience Analyst Pro* ®. Este software permite interpolar el valor de un modelo de bloques en un sondaje. Esto permitió obtener una sola base de datos que compila los datos geológicos, geoquímicos y de resistividad eléctrica para cada muestra de sondaje (Tabla IV.5).

Tabla IV.5 *Extracto de tabla con coordenadas X, Y, Z relacionadas con las variables disponibles en la base de datos.*

Hole_ID	X	Y	Z	FROM	TO	UG	CUT_PCT	RQD_m	SM_SI	AG_PPM	AU_PPM
AN-0001	377058.15	6960127.34	469.51	0	1	Albitofiro	0.005	0.68	No Aplica	No Aplica	No Aplica
AN-0001	377057.22	6960127.01	469.37	1	2	Albitofiro	0.005	0.68	No Aplica	No Aplica	No Aplica
AN-0001	377056.5	6960126.75	469.27	2	2.5	Albitofiro	0.005	0.68	No Aplica	No Aplica	No Aplica
AN-0001	377056.03	6960126.59	469.2	2.5	3	Albitofiro	0.005	0.79	No Aplica	No Aplica	No Aplica

4.3.1 Proyección de sondajes.

Con el fin de crear una única base de datos, se importaron los datos adquiridos de sondajes (Collar, Survey, Assays) al programa *Geoscience Analyst Pro* ®. Una vez importada la base de datos de sondajes, se utilizó una función del programa denominada *Desurvey*. La función obtuvo las coordenadas de puntos de cada sondaje (Fig. IV.2) basándose en tramos relacionados a la ley de cobre total, debido a que es el parámetro que cuenta con mayor cantidad de datos. Estos puntos fueron generados en la mitad de cada tramo (generalmente metro a metro), los cuales son georreferenciados a través de coordenadas Norte, Este y su respectiva profundidad.

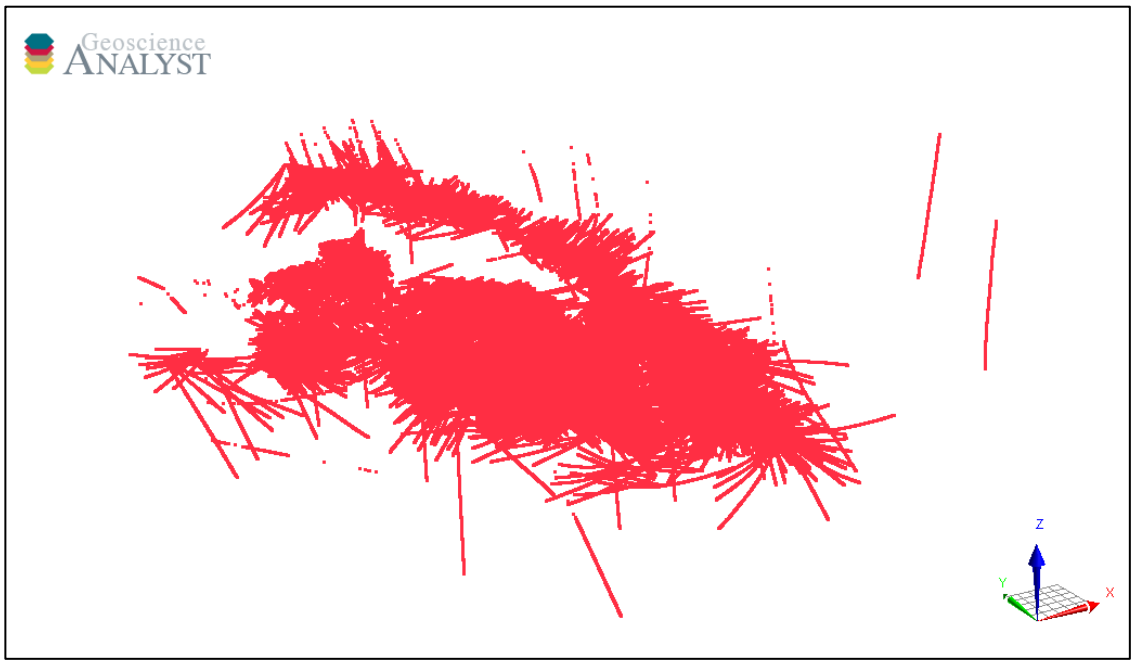

Figura IV.2 *Puntos ubicados en la trayectoria de los sondajes, los cuales fueron generados por la función "Desurvey" a través del software Geoscience Analyst Pro.*

4.3.2 Importación de modelo de resistividad.

A continuación, se importó la base de datos de resistividad eléctrica en formato XYZ generando una malla en tres dimensiones como lo muestra la figura IV.3. Esta malla es la que se correlacionó con los puntos generados mediante la función *Desurvey*.

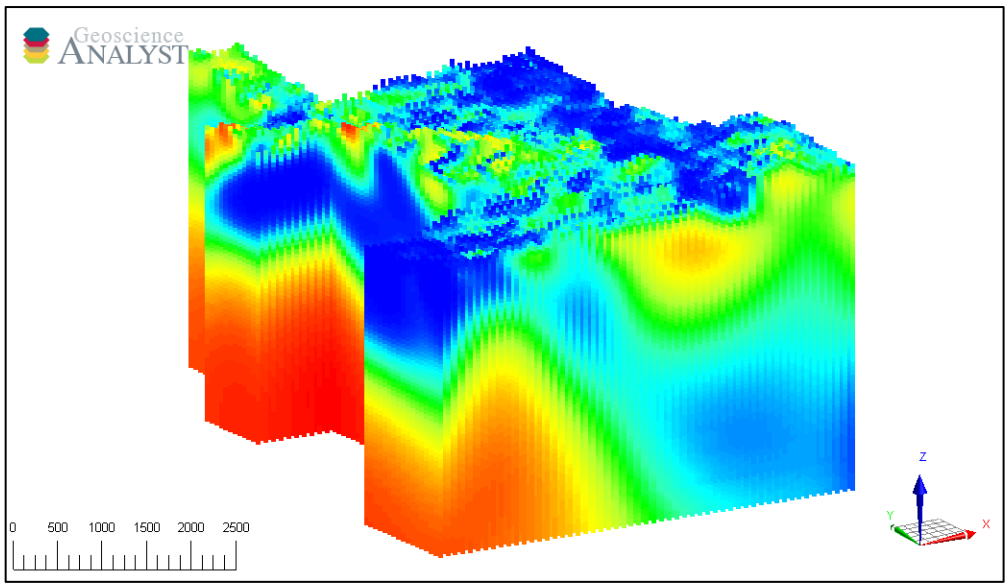

Figura IV.3 *Resultado visual de la importación del archivo XYZ de resistividades eléctricas, se genera una malla de puntos con valores de resistividad. Realizado en el software Geoscience Analyst Pro ®.*

4.3.3 Interpolación de datos de resistividad.

Luego se empleó la función *Utilities* ⟶ *Transfer Data* para transferir los datos de un objeto a otro, siendo aplicable a puntos, curvas, nodos de superficies, modelo de bloques y además para celdas o grillas. Para este caso se seleccionaron los siguientes parámetros:

- En *Source* ⟶ *Object* se seleccionó el archivo XYZ.
- En *Source* ⟶ *Properties* se seleccionaron los datos de resistividad eléctrica del archivo XYZ.
- Para *Destination* ⟶ *Object* se seleccionó la tabla de datos obtenida con la función *Desurvey*.
- Para *Destination* ⟶ *Association* se eligieron los nodos o puntos.

Luego, para transferir los datos (*Transfer Method*), se utilizó el método *Nearest neighbour* con un radio de búsqueda que fuese adecuado al tamaño de la grilla (100 m x 100 m x 50 m). Para esto se aplicó un radio de búsqueda similar a la diagonal (D) que se extrae del bloque:

$$D = \sqrt{100\ m^2 + 100\ m^2 + 50\ m^2} = 150\ m$$

Con el radio de búsqueda de 150 metros, se obtuvo la intercepción de los datos de resistividad eléctrica con la base de datos de los sondajes. Con este último paso se obtuvo una base de datos en formato .csv que compila los valores de resistividad eléctrica para cada muestra de sondaje cuya representación gráfica se muestra en la figura IV.4.

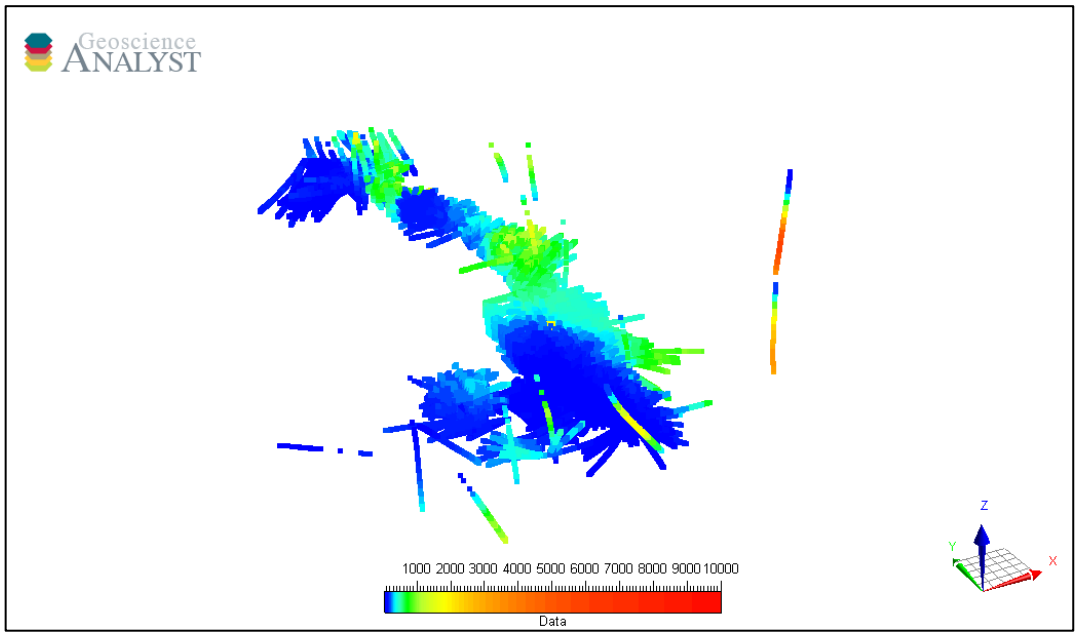

Figura IV.4 *Vista en perspectiva de los valores de resistividad eléctrica obtenidos para cada muestra de sondaje analizados, utilizando el software Geoscience Analyst Pro ®.*

4.3.4 Selección de datos y control de calidad.

4.3.4.1 Validación de intercepción de datos.

A fin de verificar que la proyección de datos de resistividad en las muestras de sondajes se hizo de manera correcta, se comparó visualmente los valores de resistividad eléctrica proyectados en los sondajes con los valores de resistividad que presentaba el modelo en esa posición de manera aleatoria en 10 sondajes. Considerando el método del vecino más cercano, los valores de resistividad eléctrica que se determinaron en sondajes se correlacionaban con el mismo valor del punto más cercano del modelo de inversión 3D (Ver Anexo, Figs. A10; A11; A12).

4.3.4.2 Selección de datos.

La base de datos generada con los procedimientos antes descritos presentaba un total de 1.119.466 muestras (filas de datos). El primer criterio de selección que se utilizó fue eliminar sondajes que no cortaran el modelo de resistividad eléctrica (Fig.IV.5).

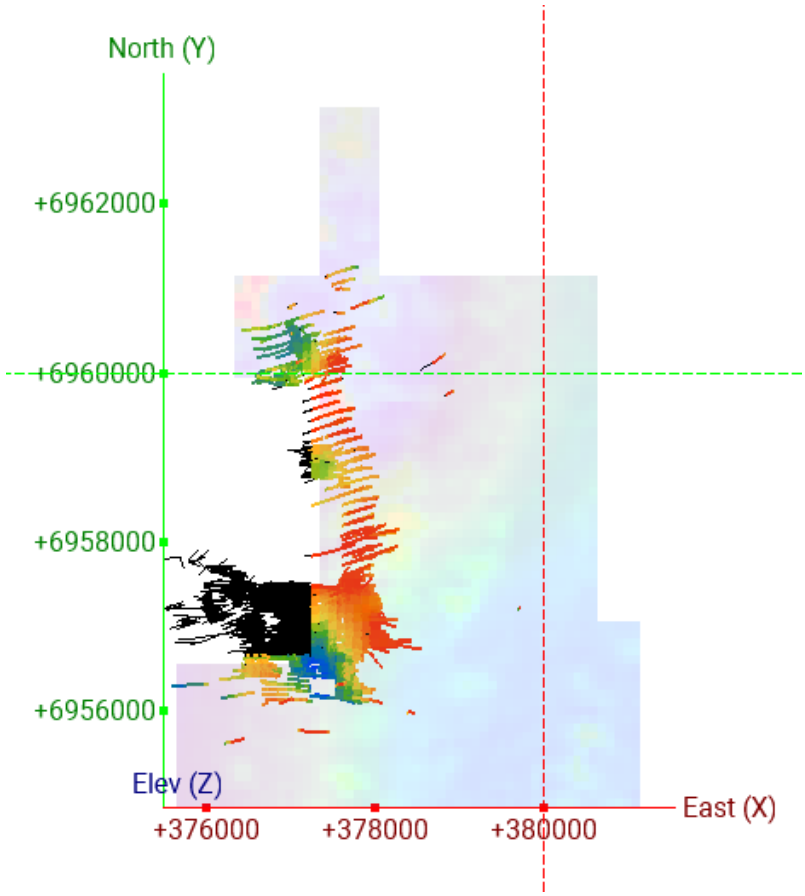

Figura IV.5 *Mapa que muestra la proyección en planta de los tramos de sondajes compilados originalmente (líneas de colores fuertes) y el volumen ocupado por el modelo de resistividad eléctrica (representado por imagen de fondo en colores tenues). Las líneas de color negro representan muestras de sondajes que no cortan el modelo de resistividad eléctrica, y por lo tanto no fueron considerados en el análisis.*

Luego de eliminar datos sin valores de resistividad eléctrica, la base de datos quedó compuesta con 585.310 filas. Se eliminaron también filas en las cuales los campos de litología o unidad geológica local estaban vacíos o tenían los valores "Sin recuperación" y/o "Desconocida". En base a la cantidad de muestras se delimitó un umbral de un 0.5% para agrupar litologías, esto generó un grupo de litologías mayores (10 categorías que superaban el umbral) y otro de litologías menores (30 categorías inferiores al umbral). Finalmente, luego de todo el proceso de selección de datos antes mencionado, la base de datos analizada quedó compuesta por 584.375 filas o muestras, que a su vez fueron

separadas en un grupo de mayor abundancia (Tabla IV.6) y un grupo de menor abundancia (Tabla IV.7).

Tabla IV.6 *Recuento del total de datos y metraje por cada litología del grupo de mayor abundancia.*

Litologías Mayores	Total de datos	Porcentaje (d)	Total de metros	Porcentaje (m)
Albitófiro	92936	*15.90%*	71626.99	*15.20%*
Andesitas inferiores (Kpcli)	402292	*68.84%*	297211.06	*63.07%*
Andesitas superiores (Kpcls)	4519	*0.77%*	7501.78	*1.59%*
Brecha volcanosedimentaria (BrVs)	1666	*0.29%*	3099.25	*0.66%*
Calizas margosas (Cm)	1024	*0.18%*	5383.06	*1.14%*
Lamprofiricos	5006	*0.86%*	2007.57	*0.43%*
Microdioritas cuarciferas	2943	*0.50%*	3474.31	*0.74%*
Sed. Rojos brechizados (SR)	14608	*2.50%*	11288.21	*2.40%*
Tobas de Agustina (TA)	38441	*6.58%*	48133.72	*10.21%*
Tobas de Agustina y Sed. Rojos (TA)	7988	*1.37%*	8392.39	*1.78%*
SUMA	**571423**	**97.78%**	**458118.34**	**97.21%**

Tabla IV.7.7 *Recuento del total de datos y metraje por cada litología del grupo de menor abundancia.*

Litologías Menores	Total de datos	Porcentaje (d)	Total de metros	Porcentaje (m)
Areniscas margosas (BrVs)	513	*0.088%*	1270.88	*0.270%*
Autobrecha (Albitofiro)	144	*0.025%*	119.12	*0.025%*
Brecha de contacto (M)	246	*0.042%*	453.94	*0.096%*
Brecha de contacto (SR)	295	*0.050%*	218.92	*0.046%*
Brecha de contacto (TA)	9	*0.002%*	11.14	*0.002%*
Brecha de techo (Kpcli)	1220	*0.209%*	626.86	*0.133%*
Calizas margosas (BrVs)	391	*0.067%*	1348.04	*0.286%*
Chert (BrVs)	42	*0.007%*	35.01	*0.007%*
Coluvios y/o derrubios (CD)	5	*0.001%*	231.25	*0.049%*
Dacitas	124	*0.021%*	79.45	*0.017%*
Dioritas	1785	*0.305%*	1362.09	*0.289%*
Granodioritas	82	*0.014%*	78.07	*0.017%*
Litoarenitas (BrVs)	424	*0.073%*	620.05	*0.132%*
Litoarenitas (Cm)	102	*0.017%*	159.31	*0.034%*
Litoarenitas (M)	43	*0.007%*	29.92	*0.006%*
Lutitas (Cm)	287	*0.049%*	483.18	*0.103%*
Lutitas margosas (BrVs)	31	*0.005%*	77.22	*0.016%*
Lutitas margosas (M)	92	*0.016%*	120.57	*0.026%*
Lutitas margosas (TA)	248	*0.042%*	185.41	*0.039%*
Lutitas siliceas (BrVs)	492	*0.084%*	965.65	*0.205%*
Lutitas siliceas (M)	36	*0.006%*	36.24	*0.008%*
Lutitas siliceas (TA)	13	*0.002%*	19.96	*0.004%*
Margas (M)	10	*0.002%*	11.48	*0.002%*
Microdioritas	2634	*0.451%*	1850.58	*0.393%*
Microgabros	23	*0.004%*	13.16	*0.003%*
Microgranodioritas	2382	*0.408%*	1759.24	*0.373%*
Riodacitas	34	*0.006%*	72.34	*0.015%*
Sed. Flujo laminados (M)	487	*0.083%*	455.3	*0.097%*
Sed. Rojos laminados (SR)	673	*0.115%*	413.59	*0.088%*
Tobas (lapilli - Kpcli)	85	*0.015%*	50.4	*0.011%*
SUMA	**12952**	***2.22%***	**13158.37**	***2.79%***

4.4 Análisis de correlación entre geología, geofísica y petrofísica.

4.4.1 Análisis estadístico.

Dada la gran cantidad de datos, el análisis estadístico se focalizó en el grupo de litologías con mayor cantidad de datos (Tabla IV.6). No obstante, también se analizó la estadística general para las litologías del grupo litológico de menor población. La estadística general, gráficos de dispersión, histogramas y matrices de correlación de Pearson fueron calculados utilizando el software Excel. Para analizar el rango de variabilidad de los datos, se realizaron diagramas de caja (*boxplots*) con el software Leapfrog ®.

4.4.1.1 Estadística general.

Para ambos grupos litológicos y cada parámetro geológico, geofísico y geoquímico, se calcularon medidas de tendencia central (media, mediana, moda) y se evaluó la estadística básica (mínimo, máximo, porcentaje del total de datos, cantidad de datos, desviación estándar, primer cuartil y tercer cuartil). A continuación, para el grupo de litologías mayores, se repitió el proceso anterior con el fin de evaluar las medidas de tendencia central de cada parámetro en cada una de las litologías del grupo (10).

4.4.1.2 Gráficos de dispersión.

Con el objetivo de identificar posibles correlaciones lineales entre los diferentes parámetros estudiados, se comparó la resistividad eléctrica con los datos geoquímicos y/o geológicos en gráficos de dispersión, para los datos del grupo litológico mayor.

4.4.1.3 Histogramas.

Se realizaron histogramas de frecuencia con el propósito de evaluar cómo se distribuyen los valores de resistividad eléctrica para las litologías del grupo mayor y otras variables pertenecientes a la base de datos. Los intervalos de resistividad eléctrica fueron creados

en función de valores típicos que se encuentran en la corteza terrestre y además por cómo se distribuyen los valores según el estudio magnetotelúrico.

4.4.1.4 Boxplots.

Se realizaron diagramas de caja (*boxplots*) para ambos grupos litológicos, con el fin de analizar la distribución de la población de valores de resistividad eléctrica para cada litología. Los *boxplots* permitieron identificar valores atípicos, facilitando así la caracterización del rango de variación de la resistividad eléctrica en las litologías. En el caso del grupo de menor abundancia, se descartaron ciertas litologías que presentaban un total de datos menor al 1% dentro del grupo.

4.4.1.5 Matriz de correlación de Pearson.

Se obtuvo la matriz de correlación de Pearson para medir y evaluar la correlación entre dos variables. Se realizó esta correlación para cada parámetro de la base de datos y con cada una de las litologías correspondientes al grupo litológico mayor.

4.4.2 Secciones transversales de modelos 3D.

Se analizó la correlación espacial de la geología con la resistividad eléctrica mediante la comparación de secciones del modelo geológico y el modelo de inversión 3D de resistividad eléctrica, obtenidas utilizando el software Leapfrog ®. Este análisis se realizó en ocho secciones, cuatro de orientación norte-sur y cuatro de orientación oeste-este.

4.4.3 Análisis de cortes transparentes en lámina delgada.

Se revisaron 11 cortes transparentes en lámina delgada a través de un microscopio de luz transmitida polarizada y reflejada. Estos cortes son parte del registro histórico de SCM Carola, y provienen de sondajes que, aproximadamente, cortan de forma paralela las secciones transversales.

El objetivo de este análisis fue identificar y caracterizar los minerales completamente opacos presentes en las láminas. Dentro de los parámetros caracterizados, se encuentran el porcentaje total por muestra, su estilo de mineralización y, en casos donde los minerales

se distribuían de forma diseminada, se calculó el tamaño y la distancia de separación entre sus partículas diseminadas.

V.Resultados

En este trabajo de investigación, los valores de resistividad eléctrica han sido categorizados en tres rangos principales para facilitar su análisis e interpretación. Los valores de resistividad baja se establecen como aquellos menores a 150 Ωm, asociados típicamente a rocas con presencia de minerales conductores como arcillas o minerales metálicos. Los valores de resistividad intermedios se definen entre 150 y 500 Ωm. Finalmente, los valores superiores a 500 Ωm serán clasificados como resistividad alta.

5.1 Resistividad eléctrica de litologías más abundantes.

5.1.1 Estadística general.

La Tabla V.1 resume la estadística general de los parámetros analizados para las 10 litologías que representan 97.78% de la población de datos.

Tabla V.1 *Estadística general de las litologías de mayor abundancia.*

LITOLOGÍAS MAYORES						
	Resistividad Eléctrica	%Cu	RQD	Ag PPM	Au PPM	SM
Cantidad de datos	571423	571423	552997	24093	27642	104583
% del total de datos	97.78%	97.78%	97.83%	98.01%	97.56%	96.59%
Min	16.50	0.01	0.00	0.10	0.01	0.00
Max	5767.70	28.06	1.00	2240.00	9.54	2216.90
Promedio	253.46	0.27	0.72	6.89	0.30	90.83
Mediana	201.20	0.05	0.81	3.70	0.12	29.80
Desv estándar	209.62	0.83	0.26	24.04	0.51	151.10
Primer cuartil	79.20	0.01	0.60	2.00	0.04	5.10
Tercer cuartil	402.70	0.20	0.93	7.00	0.33	103.70

La resistividad eléctrica para estas litologías presenta un valor promedio cercano a 250 Ωm y un amplio rango (16.5 – 5767.7 Ωm).

5.1.2 Rangos de resistividad por litología.

La figura V.1 muestra el diagrama de cajas de las 10 litologías pertenecientes al grupo litológico mayor.

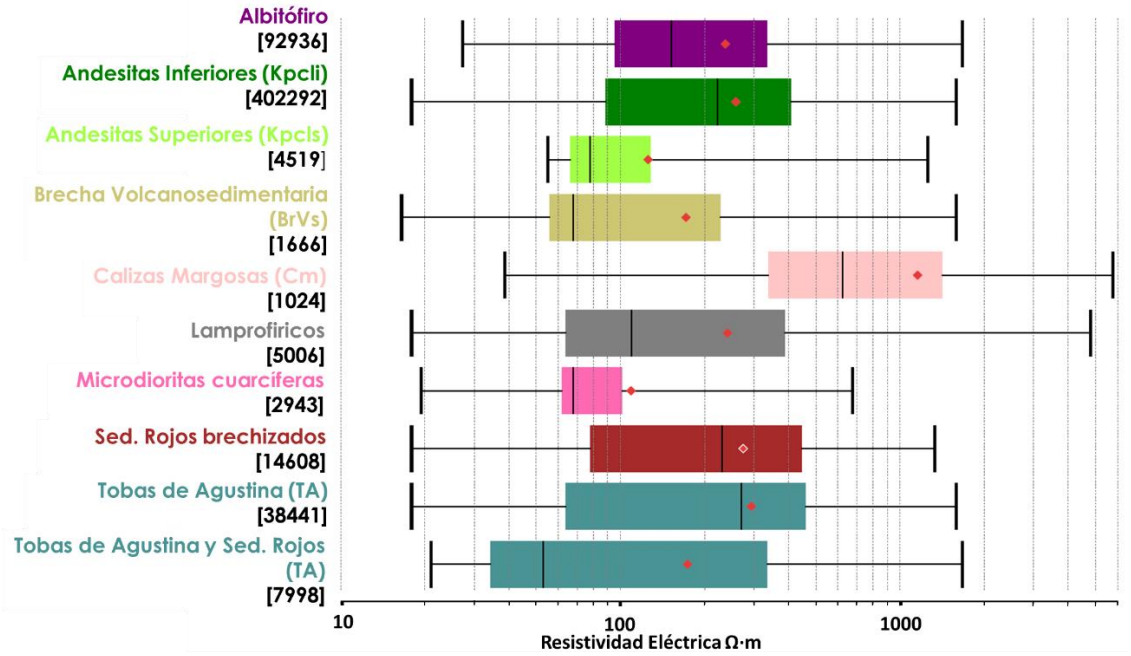

Figura V.1 *Boxplots de las 10 litologías representativas del grupo de mayor abundancia. Entre corchetes se indica la cantidad de datos por cada litología. Las líneas negras verticales en los extremos representan los valores máximos y mínimos. Las cajas representan los valores de tendencia central (ubicados entre el primer y tercer cuartil). Las líneas negras verticales dentro de la caja representan a la mediana. Los puntos rojos representan la media aritmética.*

En general, los datos centrales de cada litología se distribuyen en rangos de resistividad eléctrica entre los 50-400 Ωm, exceptuando a las Calizas Margosas que varía en rangos entre los 400-1000 Ωm. Gran parte de las litologías poseen cajas con una extensión similar que demuestran una variabilidad significativa en sus rangos de resistividad, sin embargo, las litologías de Andesitas Superiores y Microdioritas Cuarcíferas demuestran una variabilidad acotada a intervalos entre 60-120 Ωm.

Las litologías que tienden a encontrarse mineralizadas (Albitófiro, Andesitas Inferiores) se encuentran en los rangos de resistividad entre 90-350 Ωm y presentan un promedio similar de 250 Ωm aproximadamente. Al comparar estos valores de litologías mineralizadas con litologías que tienden a ser estériles (Brecha Volcanosedimentaria, Tobas de Agustina, Lamprofíricos), los valores de resistividad son propensos a solaparse. Las Calizas Margosas es la única litología que es distinguible de acuerdo con sus valores de resistividad eléctrica de las litologías mineralizadas.

5.1.3 Distribución estadística de la resistividad eléctrica.

En esta sección se presentan y analizan los histogramas con la distribución de los valores de resistividad eléctrica para diferentes tipos de litología y rangos de otros parámetros, para muestras correspondientes del grupo de litologías de mayor abundancia.

5.1.3.1 Distribución estadística por litología.

La figura V.2 muestra los histogramas con la distribución de valores de la resistividad eléctrica por cada litología presente en el grupo de mayor abundancia. A partir de los resultados, se identifican cuatro tipos de distribuciones: multimodal, representada por el Albitófiro, las Calizas Margosas, las Tobas de Agustina, los Sedimentos Rojos Brechizados y las Tobas de Agustina y Sed. Rojos; bimodal, correspondiente a las Andesitas Inferiores; unimodal, observada en las Andesitas Superiores, la Brecha Volcanosedimentaria y las Microdioritas Cuarcíferas; y simétrica, perteneciente a los Lamprofíricos. Las litologías del grupo unimodal muestran poblaciones dominantes que coinciden en un rango similar de resistividad eléctrica (50-100 Ωm).

Las litologías mineralizadas como el Albitófiro y Andesitas Inferiores no presentan una población claramente dominante. No obstante, en el caso del Albitófiro la población se ubica fundamentalmente en el rango entre 50 a 500 Ωm. Por otro lado, las Andesitas Inferiores presentan mayor cantidad de muestras hacia valores de baja-media resistividad y que se acumulan en los rangos de 100 a 300 Ωm y 300 a 500 Ωm. Al comparar estos valores de litologías mineralizadas con la distribución de litologías consideradas estériles, no se observa una diferencia notoria a excepción de las Calizas Margosas que presenta un sesgo hacia los valores altos de resistividad (300-6000 Ωm).

La distribución unimodal observada en las litologías mencionadas anteriormente, y adicionalmente el rango de 50-100 Ωm para un subconjunto de valores de las Calizas Margosas, refleja que todas las litologías muestran una población significativa con resistividades en el rango de 50-100 Ωm.

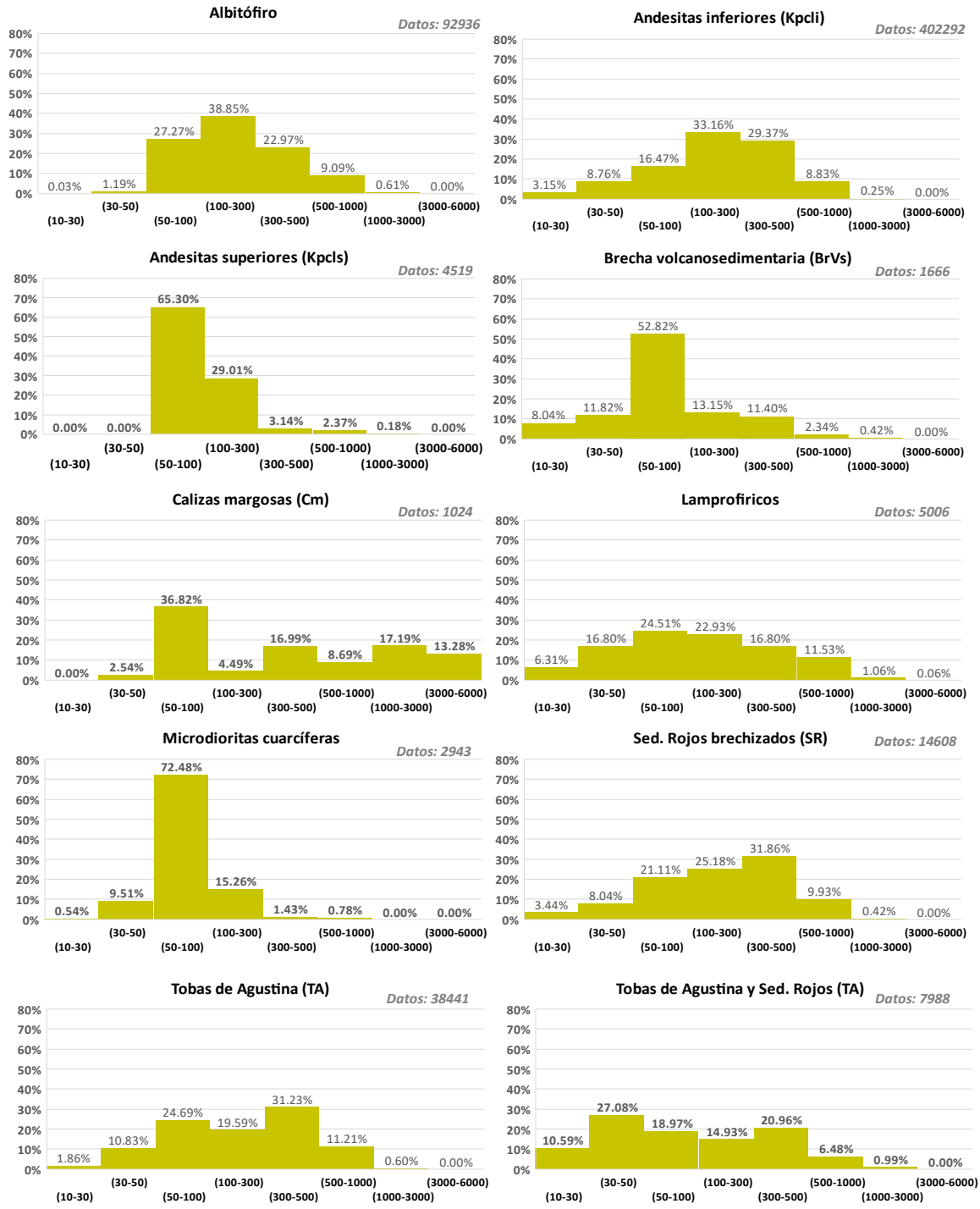

Figura V.2 *Histogramas de frecuencia porcentual para la resistividad eléctrica en cada litología del grupo de mayor abundancia*

5.1.3.2 Distribución estadística por leyes de cobre.

La figura V.3 muestra los histogramas con los valores de resistividad eléctrica para diferentes rangos de leyes de cobre. Los intervalos de leyes de cobre utilizados son los que se suelen utilizar en minera Carola para clasificar las concentraciones de este metal. Los resultados de los histogramas revelan una notable similitud en la distribución de la resistividad eléctrica, independiente del rango de ley de cobre. Si bien existe una leve diferencia de los primeros histogramas correspondientes a las leyes de cobre de <0.3% y 0.3%-0.5% con respecto al resto de histogramas, esta variación no es lo suficientemente significativa como para ser relevante.

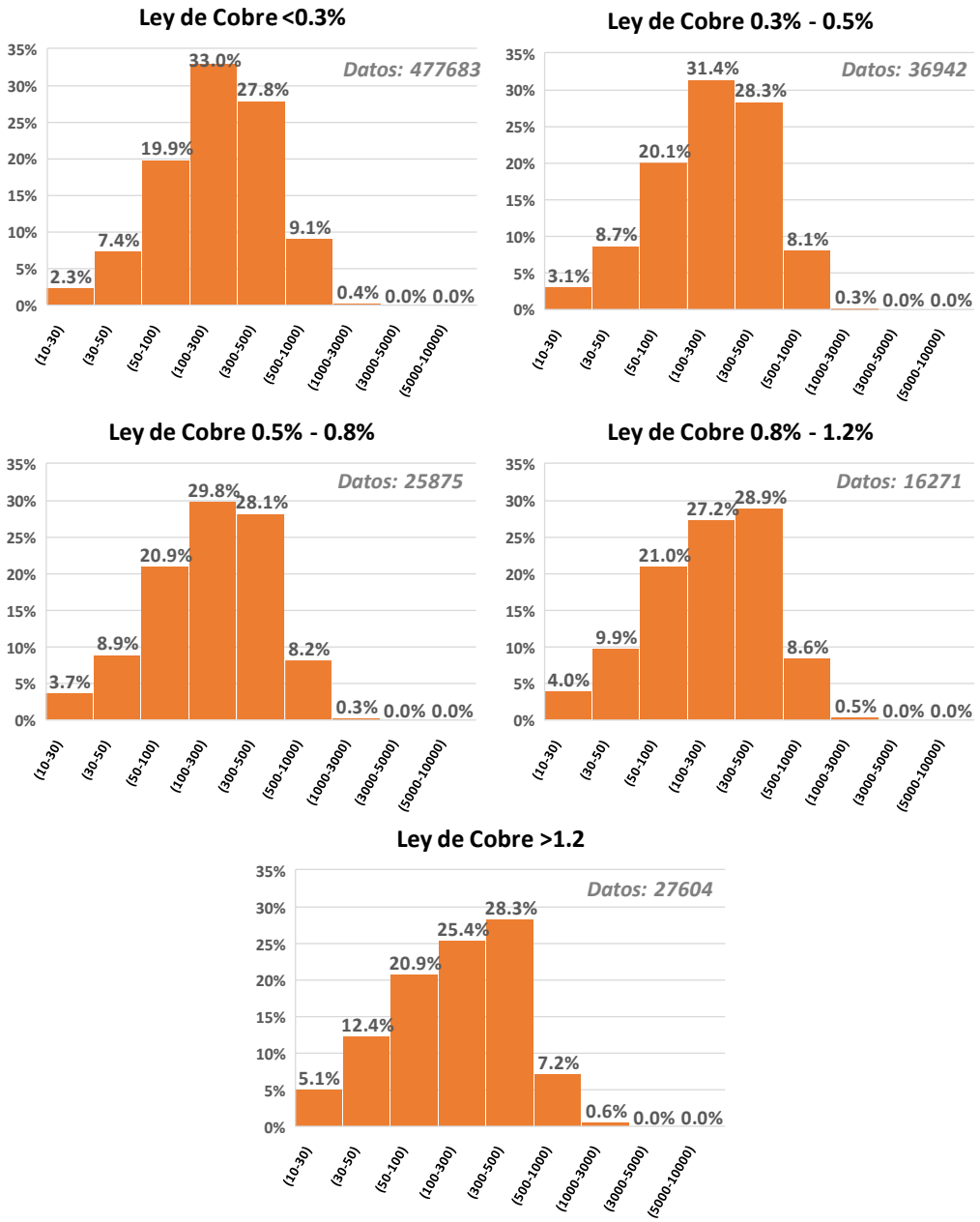

Figura V.3 *Histogramas de distribución porcentual para la resistividad eléctrica en base a la ley de cobre. En color gris, se presentan la cantidad de datos por cada rango de ley de cobre total.*

5.1.3.3 Distribución estadística por valor de RQD.

La figura V.4 muestra los histogramas con los valores de resistividad eléctrica para diferentes valores de RQD. En todos los casos, el rango donde se concentran mayor cantidad de datos es entre 100 y 300 Ωm.

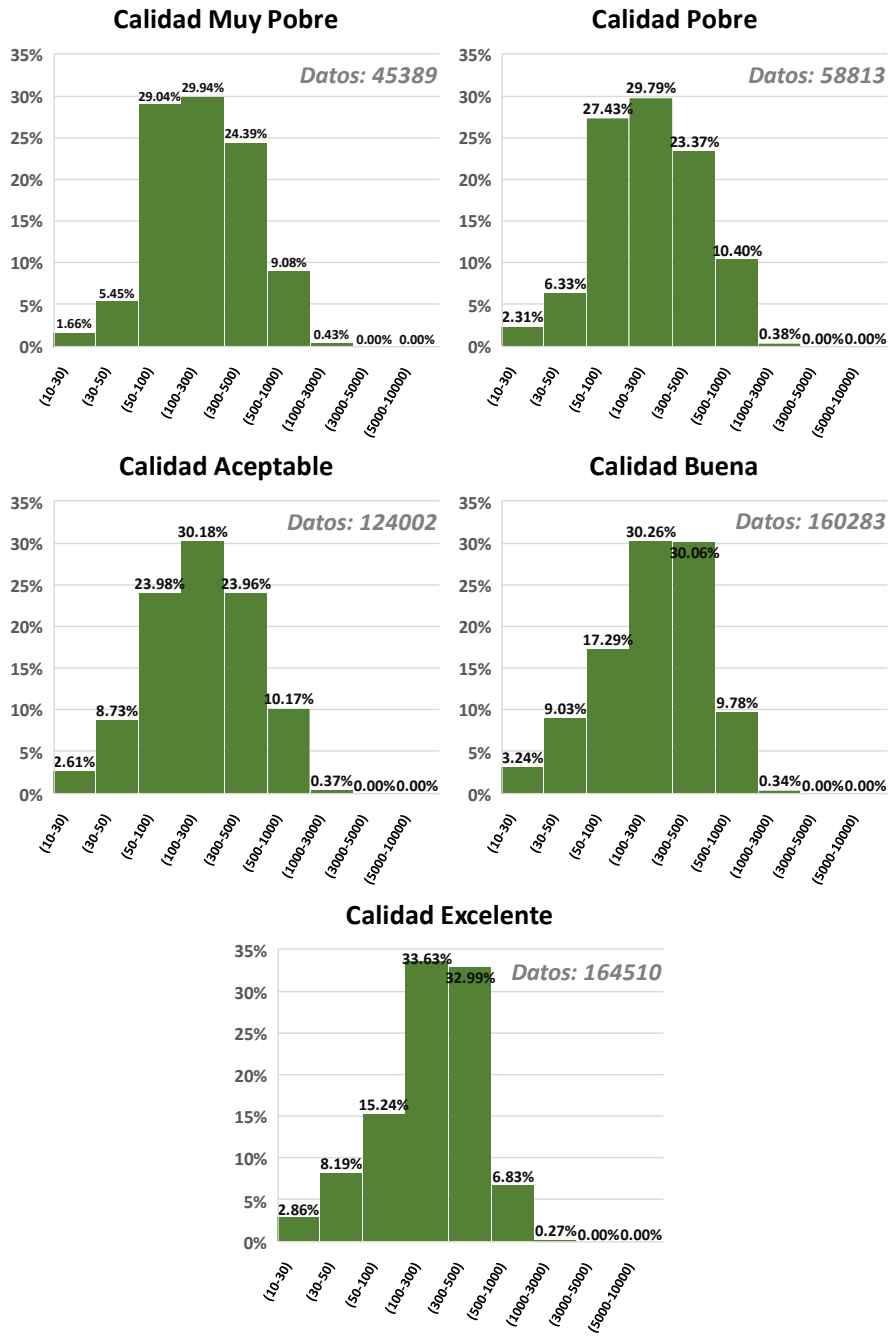

Figura V.4 *Histogramas de distribución porcentual para la resistividad eléctrica en base a la calidad de la roca. En color gris, se presentan la cantidad de datos por cada clase de calidad.*

Cuando la calidad de la roca es Muy Pobre, Pobre o Aceptable, el tipo de distribución es multimodal, definida para los rangos 50-100, 100-300 y 300-500 Ωm respectivamente. Por otro lado, cuando la roca es de calidad Buena y Excelente, la distribución es bimodal, concentrándose en los rangos 100-300 y 300-500 Ωm respectivamente.

5.1.3.4 Distribución estadística por ley de oro.

La figura V.5 muestra los histogramas con los valores de resistividad eléctrica para diferentes rangos de leyes de oro. Estos resultados muestran que, para las leyes de oro inferiores a 2 ppm, la distribución de la resistividad es casi uniforme para rangos entre 10 a 500 Ωm. En contraste, para las leyes de oro superiores a 2 ppm, la distribución esta sesgada hacia la izquierda con una acumulación de datos en el rango de 30-50 Ωm.

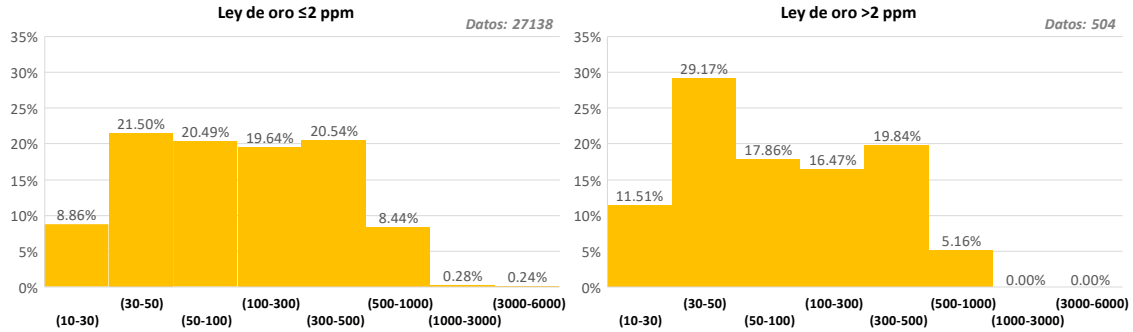

Figura V.5 *Histogramas de distribución porcentual para la resistividad eléctrica en base a la ley de oro. En color gris, se presentan la cantidad de datos por cada rango de ley de oro en ppm.*

5.1.3.5 Distribución estadística por ley de plata.

La figura V.6 muestra los histogramas con los valores de resistividad eléctrica para diferentes tangos de leyes de plata. Las leyes de plata menores a 10 ppm no muestran una tendencia clara debido a su distribución casi uniforme entre valores de resistividad de 30 a 500 Ωm. Sin embargo, en base a los dos histogramas faltantes (10-20 ppm y >20 ppm), se observa una distribución bimodal, en donde los rangos 30-50 y 300-500 Ωm son los que destacan por su alta frecuencia de datos.

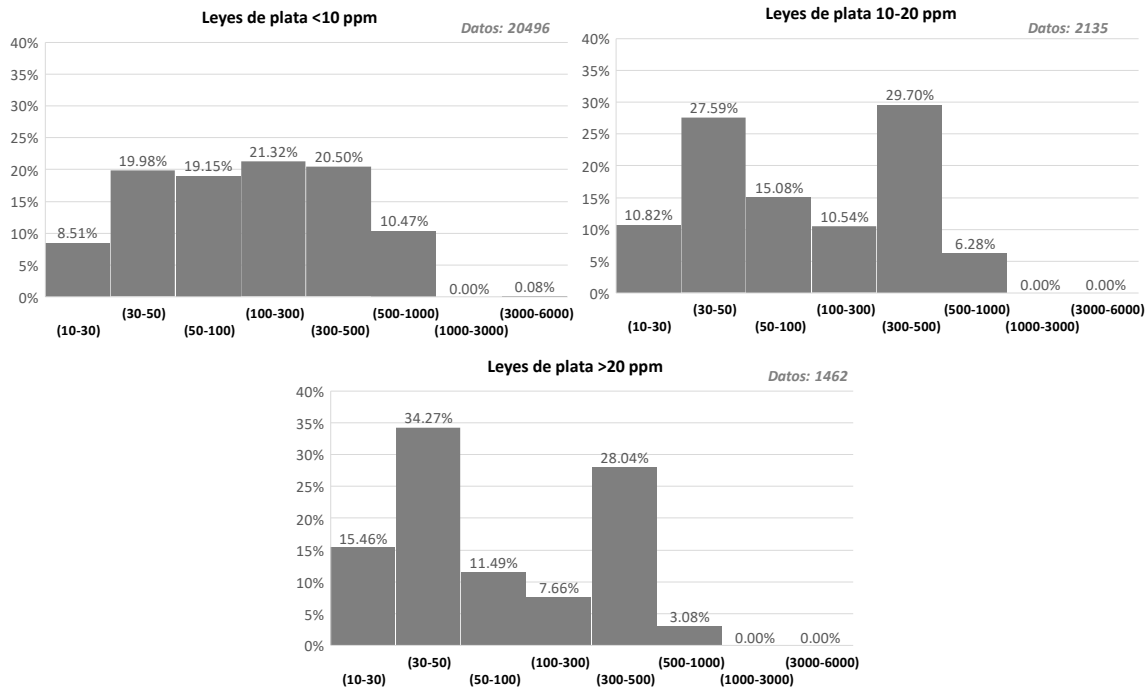

Figura V.6 *Histogramas de distribución porcentual para la resistividad eléctrica en base a la ley de plata. En la parte superior derecha de cada histograma, se exhibe la cantidad de datos por rango de ley de plata.*

5.1.3.6 Distribución estadística por susceptibilidad magnética.

La figura V.7 muestra los histogramas con los valores de resistividad eléctrica para diferentes rangos de susceptibilidad magnética. Los histogramas resultantes de este análisis permiten observar una distribución similar entre cada histograma, en donde sus datos se encuentran sesgados hacia la izquierda con una baja dispersión hacia los valores extremos. La concentración de datos, cuyo rango es de 300-500 Ωm, es constante en los diferentes histogramas.

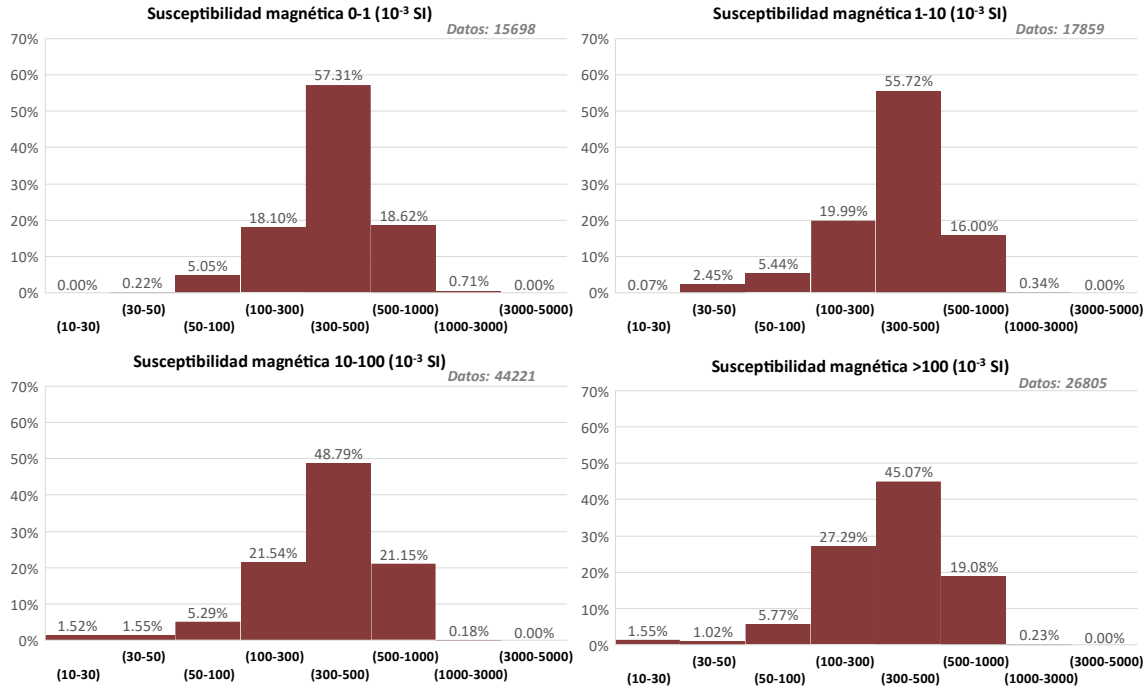

Figura V.7 *Histogramas de distribución porcentual para la resistividad eléctrica en base a la susceptibilidad magnética. En color gris, se presentan la cantidad de datos por histograma.*

5.1.4 Correlación de la resistividad con otros parámetros.

El análisis estadístico presentado en esta sección se realizó para evaluar la posible correlación de la resistividad eléctrica con otras variables disponibles de la base de datos. Primero se analizó gráficamente el grado de correlación mediante diagramas de dispersión, y luego cuantitativamente mediante el cálculo de la matriz de correlación de Pearson.

La figura V.8 muestra los diagramas de dispersión entre la resistividad eléctrica y cada uno de los otros parámetros numéricos disponibles en la base de datos. Se eliminaron los valores extremos para mejorar la claridad en la visualización. Los límites definidos fueron: ley de Cu hasta el 1.8%, ley de Ag hasta 100 ppm, ley de Au hasta 6 ppm, y susceptibilidad magnética hasta 1000 [10^{-3} SI]. De acuerdo con los gráficos expuestos en la figura, se observa una nula correlación entre la resistividad eléctrica y las variables estudiadas. La posible existencia de una correlación lineal es inexistente para el grupo litológico mayor.

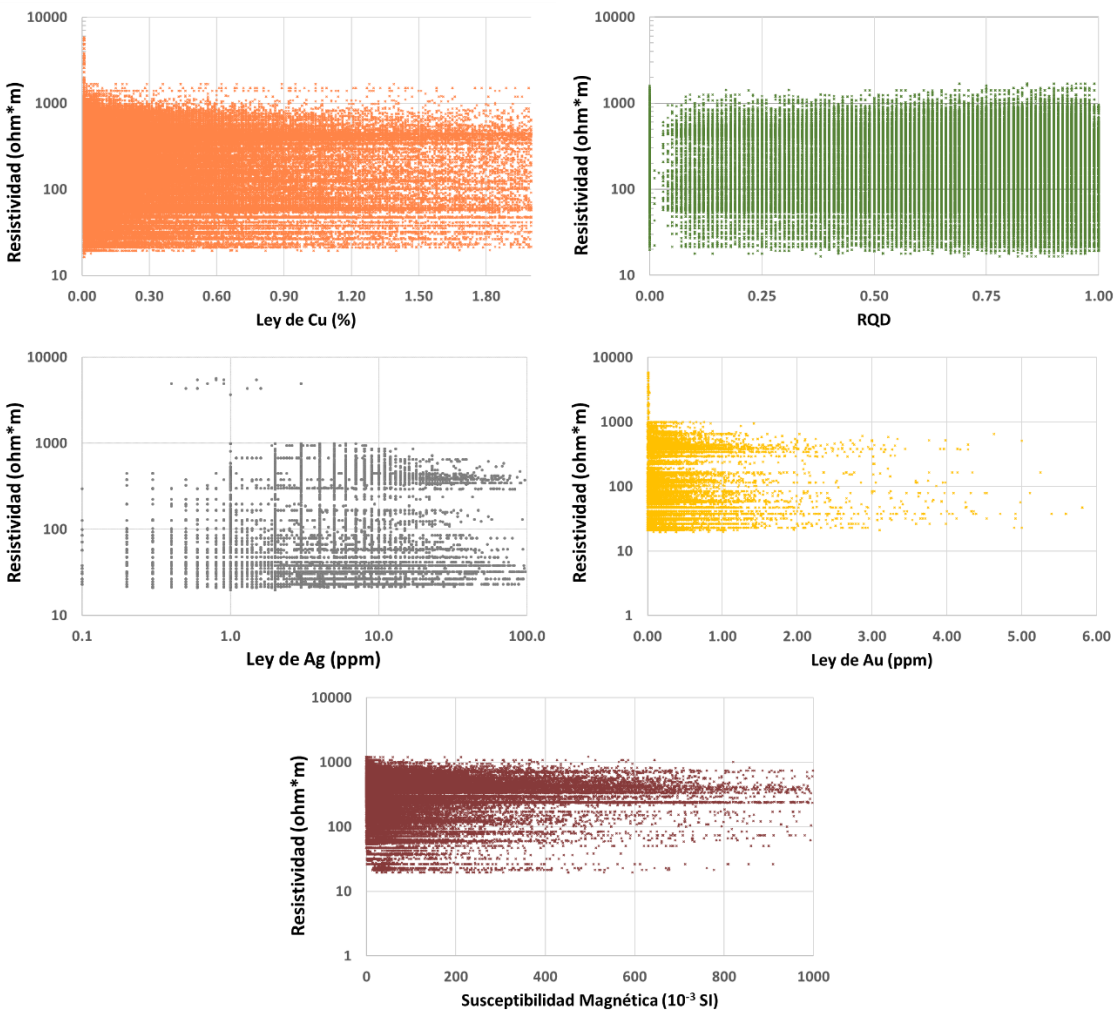

Figura V.8 *Diagramas de dispersión entre la resistividad eléctrica en escala logarítmica y las variables disponibles relacionadas a la ley de Cu porcentual (naranjo), la calidad de roca (verde), ley de Ag en ppm (gris), ley de Au en ppm (Amarillo), susceptibilidad magnética en unidades del sistema internacional (Café).*

Para los resultados de la matriz de correlación de Pearson, se asumió la clasificación de la fuerza de correlación indicada en la Tabla V.2.

Tabla V.2 *Tipo de correlación y su valor numérico.*

Valor	Fuerza de la correlación
0.0 < ±0.1	Nula
±0.1 < ±0.3	Baja
±0.3 < ±0.5	Media
±0.5 < ±0.7	Alta
±0.7 ⩽ ±1	Muy Alta

La Tabla V.3, exhibe los resultados de la correlación de Pearson para el conjunto de litologías mayores. En todos los pares, la fuerza de correlación entre la resistividad eléctrica y los otros parámetros es nula, lo que reafirma lo observado en las gráficas de dispersión de la figura V.8.

Tabla V.3 *Correlaciones de Pearson entre las variables asociadas a la resistividad eléctrica.*

Correlaciones en parejas de Pearson			
Muestra 1	**Muestra 2**	**N° Pares**	**Correlación**
Cu	***Resistividad***	571423	-0.029
RQD	***Resistividad***	552997	0.036
Ag	***Resistividad***	24093	-0.020
Au	***Resistividad***	27642	-0.063
SM	***Resistividad***	104583	-0.067

La Tabla V.4 muestra la correlación de Pearson entre la resistividad eléctrica y los otros parámetros para cada litología del grupo de mayor abundancia. Los valores “n/a” indican que para esas litologías la variable de comparación no tenía valores en la base de datos. Esta tabla reafirma la falta de correlación del análisis general y por litología entre los parámetros expuestos. Existe dos correlaciones destacables dentro del análisis y ambas son relacionada con las Calizas Margosas, la primera correlaciona la resistividad eléctrica y el RQD, donde se destaca una fuerza de correlación alta y negativa (-0.621), esta correlación es la más significativa del análisis. La siguiente correlación sucede entre la susceptibilidad magnética y la resistividad, donde se exhibe una fuerza de correlación media y de carácter negativo (-0.468).

Tabla V.4 *Correlación de Pearson por cada variable asociada a resistividad eléctrica y por cada litología perteneciente al grupo de litologías mayores.*

Litología	Res-Cu	Res-RQD	Res-Ag	Res-Au	Res-SM
Albitófiro	-0.035	0.146	0.004	0.008	-0.107
Andesitas Inferiores	-0.037	-0.009	-0.025	-0.053	-0.088
Andesitas Superiores	-0.041	0.021	***n/a***	***n/a***	-0.120
Brecha Volcanosedimentaria	0.024	-0.093	***n/a***	***n/a***	-0.141
Calizas Margosas	-0.107	**-0.621**	***n/a***	***n/a***	**-0.468**
Lamprofiricos	-0.089	-0.016	-0.042	-0.056	-0.044
Microdioritas Cuarcíferas	-0.053	0.052	***n/a***	***n/a***	***n/a***
Sedimentos Rojos Brechizados	-0.022	0.120	0.055	-0.013	-0.073
Tobas de Agustina	0.035	0.123	-0.155	-0.346	0.046
Tobas de Agustina y Sed. Rojos	**0.165**	0.026	**0.212**	-0.121	-0.001

5.2 Resistividad eléctrica de litologías de menor abundancia.

5.2.1 Estadística general.

La Tabla V.5 resume la estadística general de los parámetros analizados para 30 litologías que representan el 2.22% de la población de datos.

Tabla V.5 *Estadística general de las litologías de menor abundancia.*

LITOLOGÍAS MENORES						
	Resistividad Eléctrica	%Cu	RQD	Ag PPM	Au PPM	SM
Cantidad de datos	12952	12952	12284	488	692	3691
% del total de datos	2.22%	2.22%	2.17%	1.99%	2.44%	3.41%
Min	17.90	0.01	0.00	0.20	0.01	0.00
Max	5767.70	18.21	1.00	165.00	2.51	2001.50
Promedio	265.15	0.19	0.68	10.37	0.22	102.27
Mediana	201.20	0.01	0.76	4.00	0.11	26.80
Desv estándar	272.62	0.66	0.29	18.43	0.31	191.80
Primer cuartil	78.40	0.01	0.50	2.00	0.03	2.40
Tercer cuartil	416.60	0.08	0.92	9.00	0.31	99.90

En esta tabla se aprecia que los contenidos de plata y oro, así como también la susceptibilidad magnética, presentan una cantidad de datos significativamente menor a las disponibles para resistividad, cobre total y RQD. En cuanto a la resistividad eléctrica, al menos el 75% de datos se encuentran en rangos de resistividades bajos y medios (<500 Ωm), en donde la variabilidad del parámetro es considerada alta. En general, las variables presentan una alta variabilidad en los datos, lo que genera una amplia diversidad en las muestras.

5.2.2 Rangos de resistividad por litología.

La figura V.9 presenta un diagrama de cajas para la resistividad eléctrica.

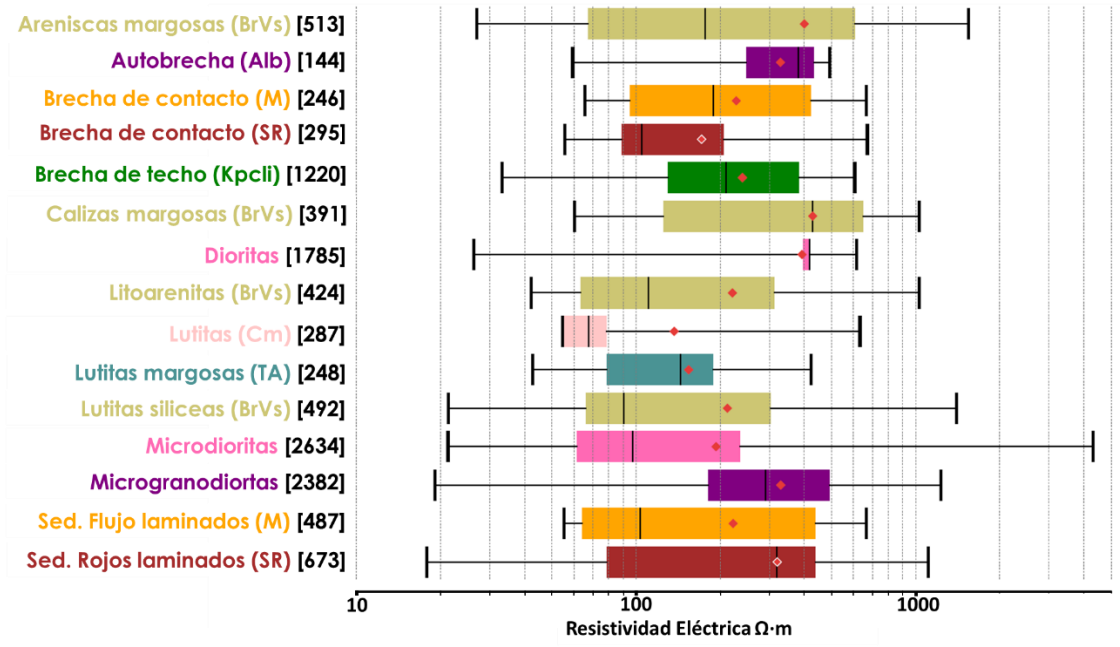

Figura V.9 *Boxplots de las litologías con al menos 1% de representatividad dentro del grupo de litologías menores. Entre corchetes se indica la cantidad de datos por cada litología. Las líneas negras verticales en los extremos representan los valores máximos y mínimos. Las cajas representan los valores de tendencia central (ubicados entre el primer y tercer cuartil). Las líneas negras verticales dentro de la caja representan a la mediana. Los puntos rojos representan la media aritmética.*

En esta figura, se observan distintos rangos para los valores de tendencia central asociados a la resistividad eléctrica de cada litología, dificultando la delimitación de un rango general preciso para este grupo (70-400 Ωm). Sin embargo, el promedio de cada litología indicado por el punto rojo, suele acercarse a los 200 Ωm aproximadamente. Por otro lado, los promedios de las litologías que tienden a encontrarse mineralizadas (Brecha de Techo, Autobrecha) no se distinguen significativamente del resto de litologías estériles.

Dentro del grupo de menor abundancia existen litologías con rangos de variación acotados (p.ej., Dioritas y Lutitas), estas litologías tienden a no presentar mineralización y su tendencia central se aleja de la tendencia general, para el caso de Lutitas se obtienen valores bajos de resistividad (55-70 Ωm) y para las Dioritas valores medios (400-420 Ωm).

5.3 Variabilidad espacial de la resistividad eléctrica en litologías de interés.

En este subcapítulo se presentan los resultados del análisis estadístico de los valores de resistividad eléctrica para las litologías de mayor relevancia en base a las tres zonas en que se puede dividir el área de estudio (norte, centro y sur; ver Fig. V.10). Estas litologías fueron seleccionadas por su significancia económica, la cantidad de datos que presentan y su impacto en la interpretación general del área de estudio. Para este grupo, se analizó la dispersión de los datos y la visualización en diagramas de caja por cada zona. Estos análisis buscaron la identificación de un posible patrón estadístico que dependiera según la ubicación espacial dentro de la propiedad.

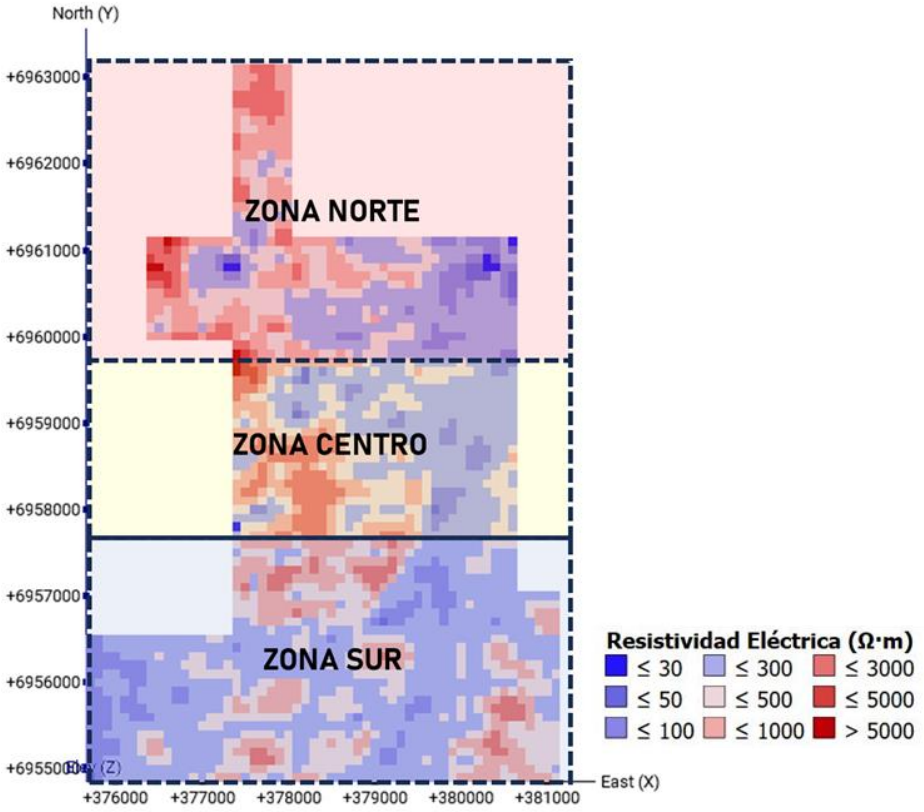

Figura V.10 *Vista superficial en planta del modelo de resistividad, donde se indica la delimitación por zona.*

5.3.1 Rangos de resistividad por zona.

A continuación, la figura V.11 muestra el diagrama de cajas realizado para las litologías de interés de cada zona determinada en la figura V.10.

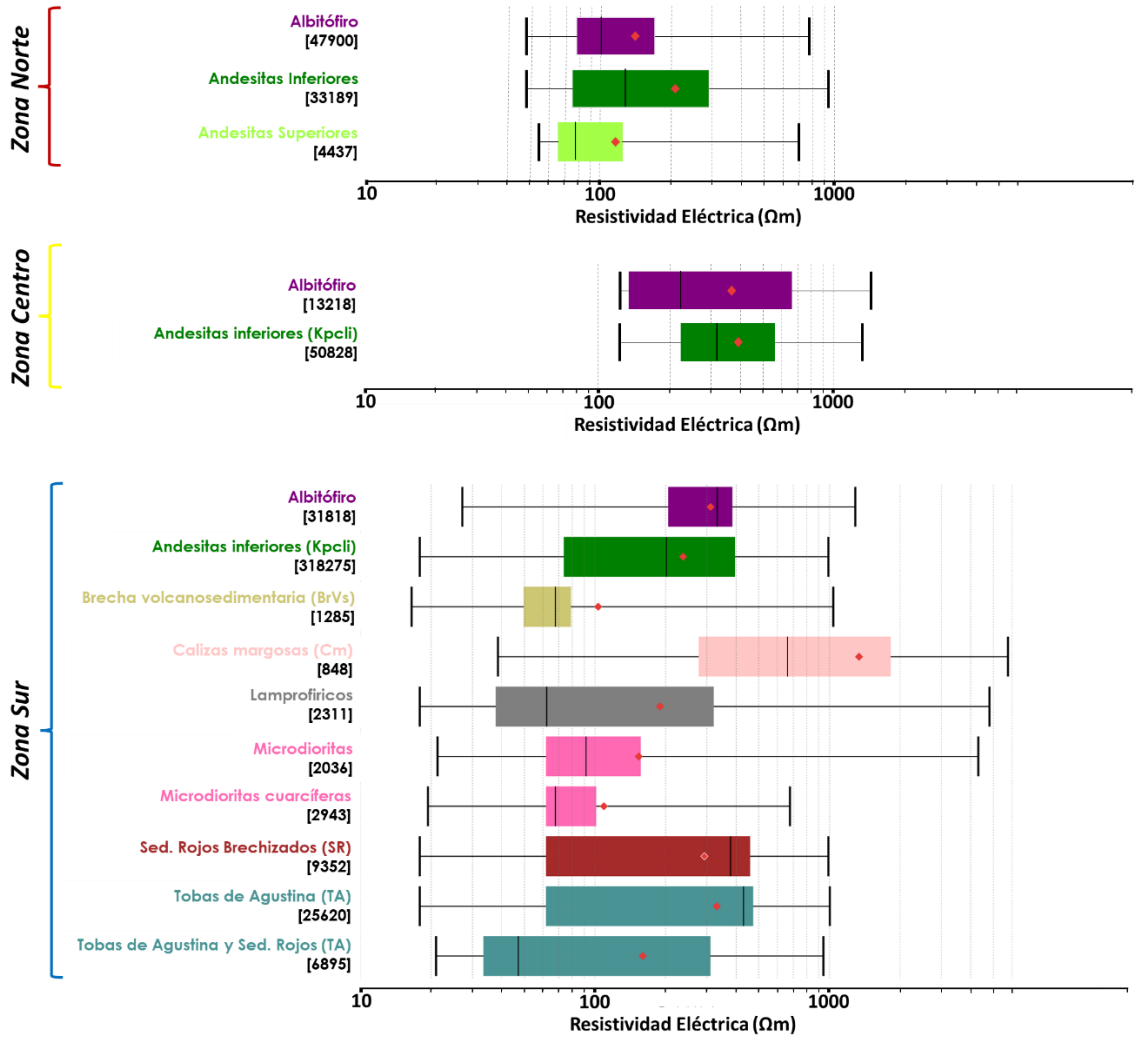

Figura V.11 *Boxplots correspondientes a las litologías de interés del área de estudio separadas por zonas. Entre corchetes se indica la cantidad de datos por cada litología. Las líneas negras verticales en los extremos representan los valores máximos y mínimos. Las cajas representan los valores de tendencia central (ubicados entre el primer y tercer cuartil). Las líneas negras verticales dentro de la caja representan a la mediana. Los puntos rojos representan la media aritmética.*

Las litologías que tienden a estar mineralizadas (Albitófiro y Andesitas Inferiores) afloran en las tres zonas, y muestran patrones distintos según la ubicación. El Albitófiro en la zona norte presenta valores de resistividad entre 80 y 150 Ωm, lo que es contrastante con la variabilidad de la litología para la zona centro y sur, donde presenta valores de 130-600 Ωm y 200-400 Ωm, respectivamente. En el caso de las Andesitas Inferiores, los valores de

resistividad para la zona norte y sur son semejantes (80 a 300 Ωm la zona norte y 80 a 400 Ωm en la zona sur), mientras que la zona centro presenta valores entre 220 y 500 Ωm.

El resto de las litologías muestra un comportamiento similar al análisis de las figuras V.1 y V.9. Por otro lado, las Andesitas Superiores afloran en su totalidad en la zona norte de la propiedad, al igual que las Microdioritas Cuarcíferas para la zona sur.

5.3.2 Correlación de la resistividad por zona.

La correlación de la resistividad eléctrica con la ley de cobre aplicado a cada zona para las litologías de interés es representada en la figura V.12.

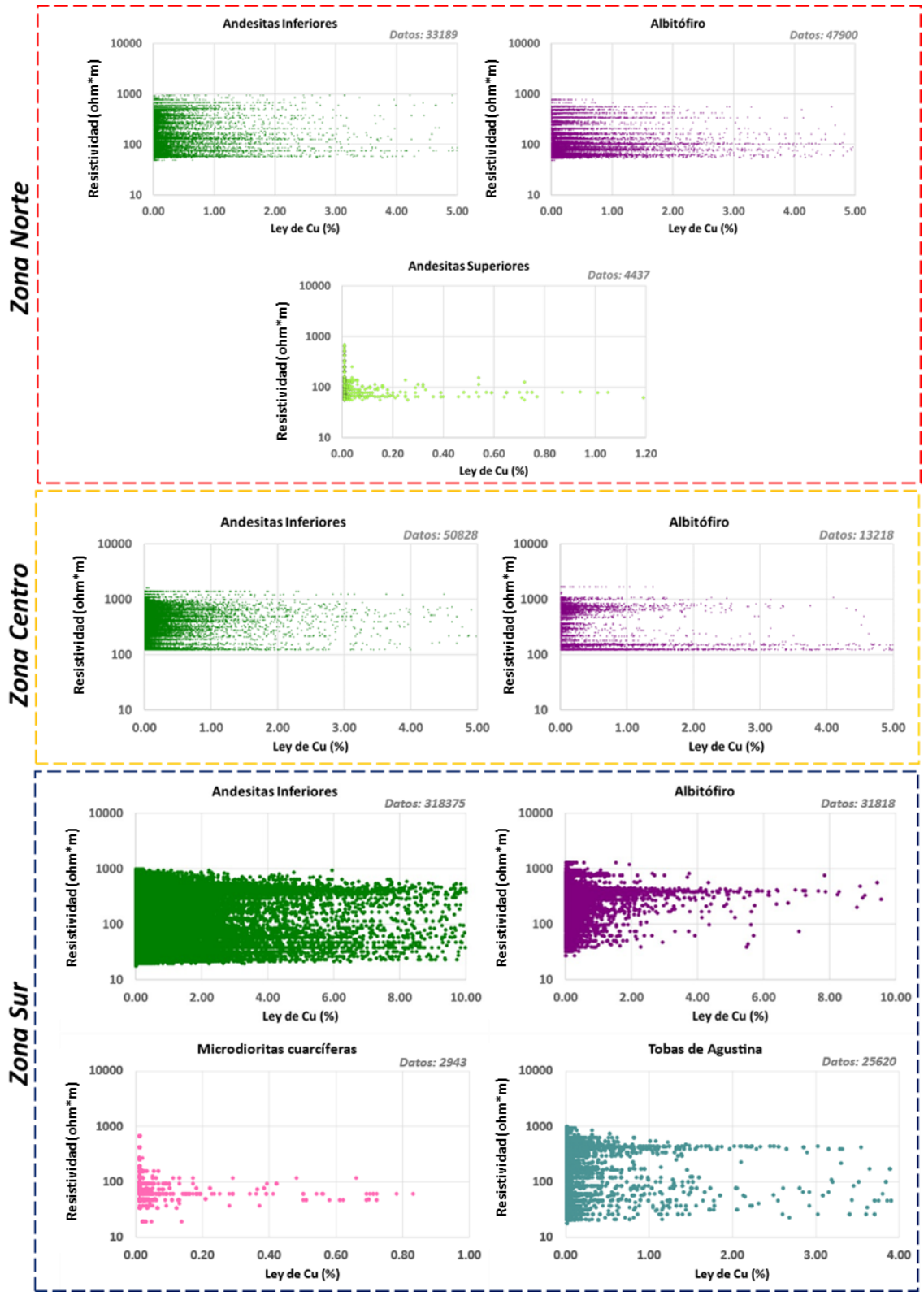

Figura V.12 *Diagramas de dispersión de resistividad eléctrica (log 10) y la ley de cobre porcentual, graficadas por zonas para litologías de interés del área de estudio.*

Los patrones observados en los diagramas de dispersión varían entre litologías y zonas. En las Andesitas Inferiores, la relación entre el cobre y la resistividad es consistente en todas las zonas, mientras que en el Albitófiro los patrones son diferentes según la zona, sin una tendencia correlativa clara. En cuanto a las leyes de cobre mayores al 1%, los rangos de resistividad del Albitófiro muestran comportamientos distintivos: en la zona norte, los valores se concentran alrededor de 100 Ωm; en la zona centro, se identifican dos grupos, uno con resistividades entre los 100 a 200 Ωm y otro con resistividades alrededor de 800 Ωm; finalmente, en la zona sur, este último patrón se repite, con leyes de cobre mayores al 1% asociadas a resistividades cercanas a 800 Ωm.

Las litologías que están limitadas a zonas específicas (Andesitas Superiores, Microdioritas Cuarcíferas), muestran que las leyes de cobres menores al 1% corresponden a los valores de resistividad cercanos a 100 Ωm.

VI.Discusión

6.1 Limitaciones metodológicas.

Al momento de modelar los datos de resistividad eléctrica en 2D o 3D, es común que el producto resultante sea limitado a condiciones físicas y matemáticas que se establecen antes de generar la imagen. Un problema que se genera en los modelos MT es la sobreestimación del tamaño de un cuerpo de baja resistividad, especialmente en su extensión vertical, lo que hace probable que enmascare la definición y precisión de otros cuerpos en profundidad (Fig. VI.1) (e.g., Egbert y Kelbert, 2012).

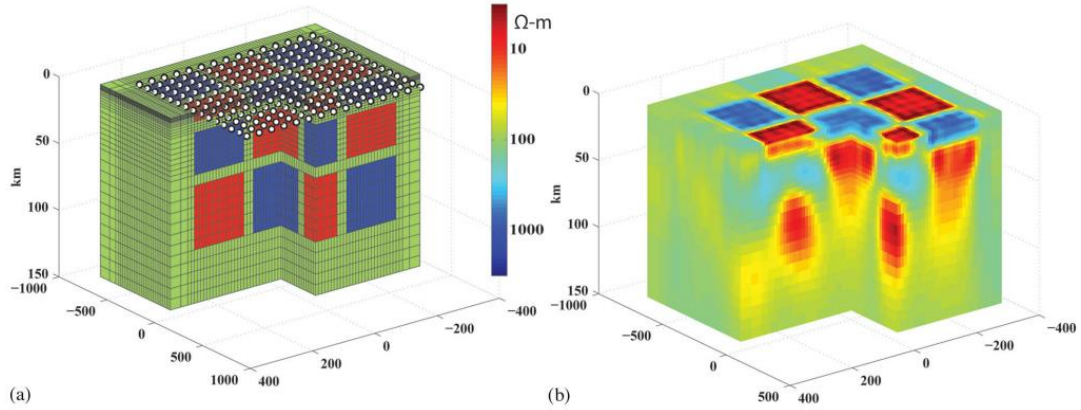

Figura VI.1 *(a) Modelo de resistividad eléctrica usado para generar datos sintéticos para un test magnetotelúrico 3D. (b) Modelo obtenido luego de invertir los datos calculados a partir del modelo de la izquierda. Extraído de Egbert y Kelbert (2012). Se puede observar que el tamaño vertical de las zonas de baja resistividad (zonas rojas) en el modelo de inversión (b) es sobreestimado en comparación al tamaño real (a).*

Esta sobreestimación del cuerpo se puede dar en los bordes horizontales como verticales. Cuerpos o litologías de pequeña escala, pero baja resistividad (p.ej. las Lutitas, ver Fig. V.11) podrían llegar a enmascarar cuerpos de considerable mayor tamaño y de alta resistividad

La ausencia de un procedimiento estandarizado para los análisis de oro y plata en muestras limita la precisión en la interpretación de posibles correlaciones entre la resistividad y

estas variables. Implementar un método uniforme de muestreo de estos metales permitiría obtener resultados más confiables y consistentes.

Otro aspecto limitante es el sobremuestreo de la resistividad, el cual ocurre al comparar datos obtenidos de muestras pequeñas, con las celdas del modelo de resistividad eléctrica, que representan volúmenes significativamente mayores. Esta diferencia de escala puede generar discrepancias en la interpretación, ya que las celdas del modelo promedian propiedades físicas de un volumen amplio, mientras que las muestras pequeñas de sondajes o incluso de litologías modeladas reflejan condiciones puntuales. Como resultado, las variaciones de resistividad detectadas en las muestras pequeñas pueden diluirse o incluso desaparecer al ser comparadas con las celdas, afectando la precisión al asociar valores de resistividad con litologías.

Al trabajar con datos generados de manera indirecta, como los de un modelo de inversión 3D, es importante considerar las limitaciones asociadas a la estimación, ya que pueden generar valores de resistividad inadecuados para ciertas litologías. En este caso, al interceptar el modelo con los sondajes, surgen restricciones relacionadas con características geofísicas, geológicas y estructurales del subsuelo que pueden llevar a una mala asignación de las resistividades eléctricas de ciertas litologías. Factores como la intensidad de la señal, la homogeneidad del cuerpo geológico, la ubicación relativa del cuerpo dentro del modelo y la presencia de estructuras intraformacionales o que afecten varios cuerpos litológicos pueden influir significativamente en la interpretación de los resultados.

6.2 Correlación entre parámetros geológicos y la resistividad eléctrica.

6.2.1 Correlación para el grupo litológico mayor.

El análisis de dispersión entre los grupos litológicos de mayor abundancia y cada uno de los parámetros geológicos disponibles (Fig. V.8), así como el análisis de correlación en parejas de Pearson (Tabla V.3), indican que no existe una correlación lineal clara a gran

escala de la resistividad eléctrica con los parámetros evaluados. Esto sugiere que la presencia de minerales de cobre, el contenido de oro o plata, la calidad de la roca y la susceptibilidad magnética, no logran explicar por sí solas las variaciones observadas en la resistividad eléctrica.

6.2.2 Correlación por litología.

Un análisis de correlación con mayor detalle es presentado en la tabla V.4, donde cada litología del grupo de mayor abundancia es analizada con respecto a la resistividad y las variables. Sin embargo, en la mayoría de litologías no hay una relación entre minerales de cobre y la propiedad de resistividad eléctrica.

Las Calizas Margosas, de acuerdo con la correlación de Pearson (Tabla V.4), presentan una fuerza de correlación alta y negativa con el RQD. Esto indica que los valores de resistividad aumentan con la disminución del RQD, es decir, cuando la calidad de la roca tiende a empeorar. Este comportamiento podría explicarse por un aumento de la fracturación en las Calizas Margosas lo que disminuye la calidad de la roca y permite que incremente la resistividad eléctrica debido a los espacios que se generan en la roca.

Del mismo modo, las Calizas Margosas presentan un valor de correlación intermedio y negativo con la susceptibilidad magnética, sugiriendo una relación inversa. Sin embargo, la tabla con datos estadísticos por litología (Ver Anexo, Tabla A.2) muestra que las Calizas Margosas poseen un rango irrelevante en la variación de susceptibilidad magnética, con valores muy bajos. Esto sugiere una escasa presencia de minerales magnéticos como la magnetita, lo cual es consistente con la composición mineralógica típica de las calizas. Un bajo contenido en magnetita es esperable con los altos valores de resistividad observados en esta litología, ya que la ausencia de minerales metálicos explicaría su carácter aislante.

En el caso de la correlación para las Tobas de Agustina, estas presentan valores desde nulos a medios, destacando la correlación de la resistividad con la ley de oro. Este par presenta una fuerza de correlación débil y negativa, que sugiere una probable reducción de la resistividad a medida que la concentración de este mineral metálico aumenta. De acuerdo con la estadística general realizada en la tabla A.2, los valores de oro considerados en esta correlación son relacionados a una muy baja ley (<2 ppm).

6.2.3 Correlación por zonas de la mina.

De acuerdo con los diagramas de dispersión realizados para cada zona en la que se dividió la mina (norte, centro y sur) (Fig. V.10), se obtuvieron comportamientos similares respecto a la correlación de la resistividad con la ley de cobre total (Fig. V.12). Estos resultados determinan una nula correlación simple entre la ley de cobre total y la resistividad eléctrica para cada zona y litología correspondiente.

Aunque la correlación entre la ley de cobre y la resistividad eléctrica es nula, esto no implica que la presencia de cobre no influya en los valores de resistividad. Más bien, los datos sugieren que la relación es compleja y podría estar vinculada a un modelo de mezcla. En este modelo, diferentes factores y minerales, como sulfuros (por ejemplo, pirita) y óxidos (como magnetita y hematita), estarían implicando los bajos valores de resistividad en litologías como las Andesitas Superiores y Microdioritas Cuarcíferas, minerales que podrían contribuir con valores de resistividad similares a los de los minerales de cobre (Orellana, 1972; Palacky, 1987). Esto dificulta la identificación de una correlación directa, ya que la señal total de resistividad refleja una interacción combinada de varios factores y minerales.

6.3 Interpretación geológica del modelo de resistividad eléctrica.

La distribución de la resistividad eléctrica es compleja de caracterizar para todas las litologías del área de estudio, debido a los factores expuestos en las limitaciones de esta tesis. No obstante, el análisis a través de herramientas estadísticas, acompañadas de secciones transversales realizadas con el modelo litológico y de resistividad eléctrica, permiten interpretar la distribución en las litologías de mayor relevancia.

6.3.1 Distribución respecto a las variables.

Al observar la distribución de la resistividad eléctrica con respecto a cada variable presente en la base de datos, encontramos una distribución de poca significancia para la ley de Cu, la calidad de roca (RQD) y la susceptibilidad magnética. Esto no estaba dentro

de lo esperado, ya que se anticipaba una concentración en rangos de resistividades bajas a medida que aumentara la ley de cobre y la susceptibilidad magnética (posiblemente relacionada con la concentración de magnetita). Además, se esperaba que una mejor calidad de roca, con menor frecuencia de fracturas, resultara en un aumento de la resistividad eléctrica.

En el caso de la ley de oro, tenemos una concentración de datos importante para leyes mayores a 2 ppm en el intervalo de resistividades bajas (30-50 Ωm, ver Fig. V.5), esto podría indicar que, en zonas de bajas resistividades es posible que la concentración del mineral aumente, lo cual se encuentra en armonía con los valores propuestos por Orellana (1972). Para la ley de plata, sucede un caso similar para las leyes mayores a 20 ppm, teniendo una concentración en los valores menores a 100 Ωm, no obstante, se obstaculiza la interpretación geológica correcta de estos datos debido a la falta de un procedimiento estandarizado.

6.3.2 Distribución respecto a litologías.

Los resultados del análisis de distribución en ciertas litologías de interés, tienden a cambiar según la ubicación en la que la litología se distribuya, lo que sugiere una composición litológica heterogénea entre cada zona.

6.3.2.1 Andesitas Inferiores.

Los rangos de resistividad eléctrica obtenidos para las Andesitas Inferiores, rondan por una amplia gama de valores (10-1000 Ωm), estos son más bajos que los valores teóricos descritos por Glover (2015). La presencia de minerales de baja resistividad podría reducir la resistividad de esta litología. Los valores de tendencia central de esta litología indican resistividades bajas con rangos entre los 90-400 Ωm de acuerdo con los diagramas de caja (Fig. V.1). La resistividad de las Andesitas Inferiores varía según la zona en la que se localice, destacando en la zona norte con resistividades inferiores (80-280 Ωm) a las obtenidas para la zona centro y sur. Además, la influencia de cuerpos de baja resistividad relativamente superficiales en la zona norte (C2 y C3) podría ser un factor a considerar, de los cuales se hará mención en la subsección 6.3.3.

6.3.2.2 Lamprofíricos.

La alta variabilidad en la distribución de la resistividad para los diques lamprofíricos es similar a la de litologías como Tobas de Agustina y Andesitas Inferiores para el sector sur, donde su rango fluctúa entre 70-400 Ωm. Esta fluctuación podría relacionarse con la estrecha potencia de la litología (generalmente entre 0.5 a 3 metros), esto sugiere que los valores de resistividad respectivos a esta litología sean relacionados a la señal generada por las litologías encajantes.

6.3.2.3 Andesitas Superiores.

La litología de Andesitas Superiores se distribuye solo en la zona norte de la propiedad (sobre las Andesitas Inferiores y/o Albitófiro), y presenta un rango acotado de resistividad (70-130 Ωm). Esta litología presenta una ley de cobre menor al 1% en la mayoría de sus muestras (ver Anexo, Tabla. A.1). De acuerdo al análisis microscópico, un corte transparente correspondiente a esta litología presenta un 2% de minerales opacos de características metálicas finamente diseminados con una amplia distancia de diseminación lo que es inconsistente a la abundancia de minerales metálicos sugiriendo otros factores que incidan en los valores (ver Anexo, Fig. A.7).

6.3.2.4 Brechas Volcanosedimentarias.

En este caso los valores de baja resistividad y considerable variabilidad se podrían asociar a una mayor heterogeneidad en la unidad geológica, la cual no se encuentra bien detallada dentro de la base de datos. En los resultados se presenta un gran grupo con una tendencia en los valores de 50-100 Ωm (53%), sin embargo, esta litología no suele asociarse con factores relevantes que reduzcan la resistividad. Es por eso que, los datos sugieren estar asociados a las envolventes de baja resistividad que se correlacionan con fallas de la zona sur, cuya analogía será vista en detalle en la sección 6.3.3.

6.3.2.5 Calizas Margosas.

La litología con los valores más altos de resistividad eléctrica son las Calizas margosas, las que se encuentran lejanas al techo mineralizado. La resistividad de las Calizas

margosas oscila entre 350 y 1500 Ωm, no obstante, existen valores mayores a 1500 Ωm. Resistividades >1000 Ωm son comúnmente observados en calizas (Palacky, 1987). Si bien existe una clara concentración hacia altas resistividades, un 37% de la población presenta resistividades en el intervalo de 50-100 Ωm. Estos valores están asociados a dos sectores de muy baja resistividad eléctrica (C1, C4, ver Figs VI.8 y VI.9), uno superficial y el otro en profundidad ubicados en la zona sur, cuyas implicaciones serán discutidas en detalle en los perfiles del subcapítulo 6.3.3.

6.3.2.6 Microdioritas Cuarcíferas.

Las Microdioritas Cuarcíferas intruyen a las Andesitas Inferiores en un sector puntual que coincide con la zona de baja resistividad de las Calizas Margosas. Aunque deberían presentar alta resistividad, los valores bajos (60-100 Ωm) sugieren que la señal refleja las propiedades de las rocas circundantes, como ocurre en los Lamprofíricos.

6.3.2.7 Albitófiro.

Los resultados de la distribución de resistividad del Albitófiro varían según la zona geográfica. En el sector norte, los valores se encuentran en un rango de 80 a 150 Ωm, mientras que en el sector sur oscilan entre 200 y 400 Ωm. La zona central muestra una mayor variabilidad, con resistividades que van de 150 a 600 Ωm. Estos valores coinciden con dos interpretaciones correlacionables entre sí, la primera se relaciona con la composición más dacítica del Albitófiro hacia el norte del área de estudio (Miembro Dacitas de Meléndez), por otro lado, la segunda se relaciona con la mineralización preferente de cobre en el Albitófiro, especialmente en el sector norte, donde la litología tiende a estar mineralizada de cobre en un mayor grado que la zona centro-sur.

6.3.2.8 Otras litologías.

Las litologías Tobas de Agustina (TA), Sedimentos Rojos Brechizados (SR), y Tobas de Agustina y Sedimentos Rojos (TA), presentan rangos de resistividad similares. Esta similitud posiblemente se debe a su proximidad estratigráfica y a las pequeñas dimensiones que presentan a la escala del yacimiento. Estas litologías aproximadamente varían entre 40-400 Ωm, similar al rango de las Andesitas Inferiores, sugiriendo que estos

rangos están representando la presencia de las Andesitas Inferiores, y no a estas litologías de pequeñas dimensiones.

6.3.3 Interpretación de distribución espacial de unidades geológicas.

La interpretación de los datos estadísticos fue complementada con el análisis de secciones transversales tomadas del modelo geológico y del modelo de inversión 3D de resistividad. Adicionalmente, se revisaron cortes transparentes para identificar posibles factores mineralógicos que podrían explicar los rangos de resistividad eléctrica obtenidos para cada sector.

Se realizaron 8 secciones transversales, las cuales atraviesan todo el ancho y largo la zona de estudio (ver ubicación en Fig. VI.2). Estas secciones se dividen en dos grupos: las secciones norte-sur, denotadas con las letras desde la A hasta la D (Figs. VI.5 a VI.8), y las secciones oeste-este, denotadas desde la E hasta la H (Figs. VI.9 a VI.12). Los perfiles realizados en el oeste poseen una mayor cantidad de información relacionada a sondajes, lo que sirve como referencia y permite interpretar los perfiles ubicados hacia el este. Además, se analizaron cortes transparentes de ciertos sondajes que presentaban estas secciones.

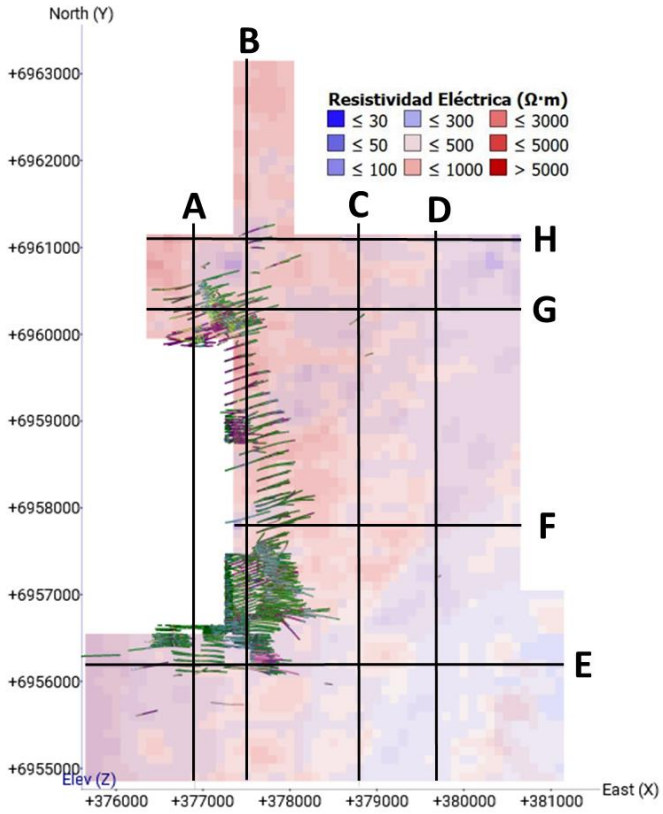

Figura VI.2 *Vista en planta del modelo de inversión 3D y sondajes en la zona de estudio. Las líneas negras gruesas, representan las secciones transversales realizadas para esta investigación. Las líneas coloridas son los sondajes del área de estudio.*

De acuerdo al modelo de inversión 3D, existen cuerpos de interés (C1, C2, C3 y C4) de resistividades intermedias a bajas (<200 Ωm), los cuales presentan un rumbo aproximado NW-SE, exceptuando el cuerpo superficial C4, que se encuentra en el lado oriental de la propiedad, el cual presenta un rumbo N-S (Fig. VI.3).

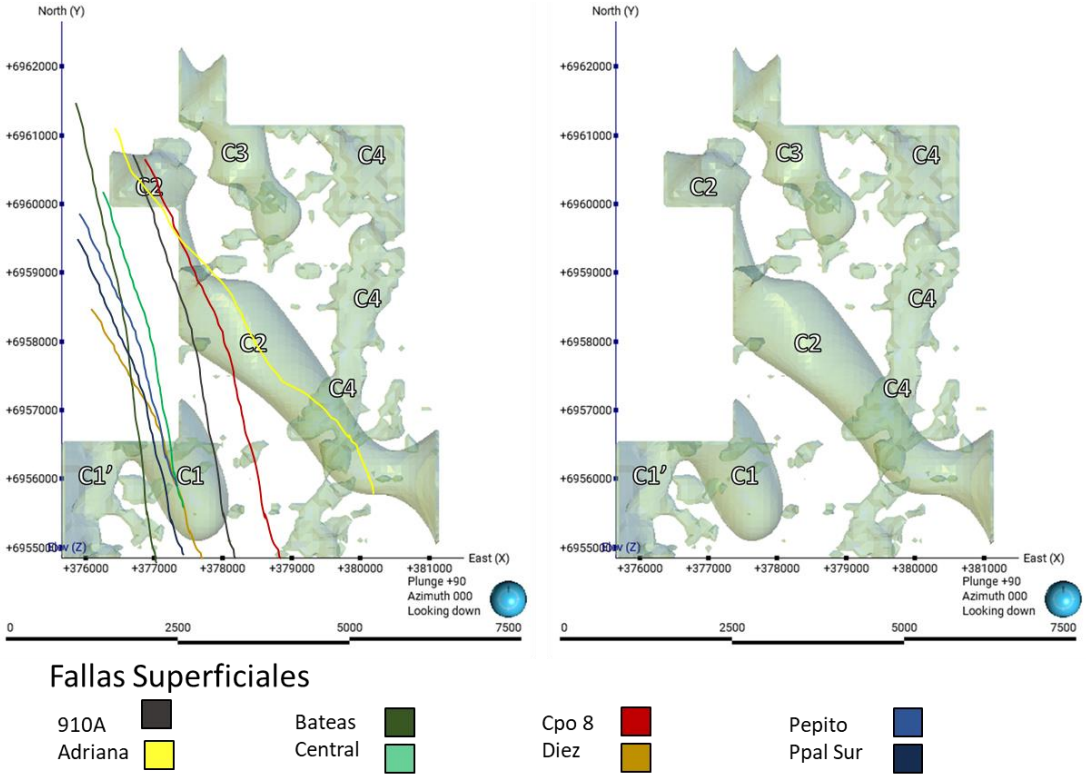

Figura VI.3 *Vista en planta del modelo de resistividad y cuerpos de resistividades eléctricas menores a 200 Ωm. En la figura izquierda las líneas de colores trazan las fallas superficiales y en la figura derecha se muestran solo los cuerpos de bajas resistividades.*

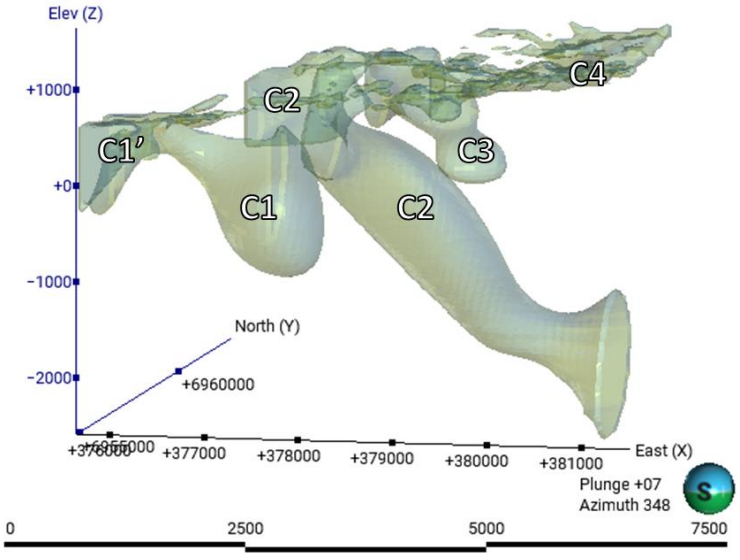

Figura VI.4 *Vista en profundidad apuntando hacia el norte del modelo de inversión 3D y los cuerpos de resistividades eléctricas menores a 200 Ωm.*

6.3.3.1 Cuerpo de interés 1 (C1).

Este cuerpo de interés se encuentra asociado a la zona sur del yacimiento y es observado a través de los perfiles A, B y E (Figs. VI.5; VI.6; VI.9). Es un cuerpo de resistividades inferiores a los 200 **Ω**m y un núcleo menor a 30 **Ω**m que se extiende longitudinalmente hacia el NW-SE ubicado dentro de las Andesitas Inferiores en la zona occidental sur, con información geológica importante relacionada al desarrollo minero del área de estudio.

Esta zona es interceptada por un conjunto de fallas (910, Diez, Pepito, Central y Cpo 8) sugiriendo un control estructural de la zona (Figs. VI.5; VI.6). Se interpreta que la correlación entre la traza de la falla Cpo8 y la zona de baja resistividad en el cuerpo C1 sugiere que esta estructura no solo controla la geometría del cuerpo, sino que también habría facilitado el flujo de fluidos hidrotermales cargados de mineralización relacionada a sulfuros masivos (como pirita o calcopirita) y posiblemente óxidos metálicos. Este contexto mencionado sugiere que el cuerpo C1 indicaría la presencia de un feeder, como los descritos por Camus (1980).

En el modelo geológico, el entorno de este cuerpo muestra una buena congruencia espacial, especialmente en la zona sur, con el contacto entre las Andesitas Inferiores y las Calizas Margosas. Este contacto se refleja en el modelo de resistividad como una transición entre una zona de baja resistividad, asociada a las Andesitas Inferiores, y una de alta resistividad, correspondiente a las Calizas Margosas (Figs. VI.5; VI.6). Al igual que el modelo geológico, el espesor de la zona de alta resistividad también sugiere que el espesor de las Calizas Margosas aumenta hacia el sur, posiblemente influenciado por el control estructural de la zona.

En el perfil E (Fig. VI.9) se aprecia una zona de resistividad <200 **Ω**m (**C1'**) en la zona oeste, la cual coincide con la presencia casi en superficie de las Andesitas Inferiores. Esta zona se adelgazaría entre las coordenadas 376.000 y 377.000 E, lo que coincide con la presencia de fallas mapeadas (Bateas, Cpo Ppal Sur).

Los cortes transparentes analizados del sondaje S-09-2 (ubicado en Fig. V.9) cuyo largo alcanza a pinchar a C1, permiten observar el cambio litológico y además diferentes estilos de diseminación (Ver Anexo, Fig. A.4). La unidad BrVs no presenta una cantidad

porcentual significativa (2%) de mineral con brillo metálico y el tamaño es menor a los 0.1 mm. Sin embargo, para el caso de las Andesitas Inferiores existe un mayor tamaño de diseminación (>0.1 mm) con un contenido de opacos del 5%. El corte transparente de Andesitas Inferiores del sondaje S-09-4, presenta un estilo de mineralización diseminado con un 2% de minerales opacos. Las láminas delgadas se obtuvieron de tramos donde el modelo muestra resistividades semejantes.

6.3.3.2 Cuerpo de interés 2 (C2).

El cuerpo C2 se identifica en siete perfiles diferentes, denominados de la letra A hasta la H (Figs. VI.5 - VI.11). Este cuerpo destaca por sus resistividades inferiores a 200 Ωm y se extiende gradualmente en profundidad, desde la zona noroeste superficial del yacimiento (500 m.s.n.m.), que ha sido explorada, hasta el extremo sureste (-2000 m.s.n.m.), donde no existen sondajes de exploración.

En la zona noroeste, este cuerpo presenta una buena correlación espacial con la presencia del Albitófiro, lo cual es consistente con los resultados obtenidos en los diagramas de caja para esta área (Fig. V.11). En cuanto a las Andesitas Superiores, los resultados de muy baja resistividad (Fig. V.11) podrían estar asociados a la proximidad de la envolvente de resistividad extremadamente baja, como se observa en el perfil B (Fig. VI.6). Por otro lado, en la zona central y sur, la ubicación y geometría del cuerpo C2 parecen estar relacionadas con las Andesitas Inferiores, las cuales, según el modelo, presentan un techo que se profundiza hacia el sur.

La proyección de la falla Adriana y la distribución del cuerpo C2 (Figs. VI.3; VI.6) sugieren un fuerte control estructural en su configuración. Asimismo, en el perfil C (Fig. VI.7) se interpreta un posible desplazamiento en la traza de la falla Adriana entre una zona de alta y baja resistividad. Otro desplazamiento se infiere en el perfil B (Fig. VI.6), en donde se ubica en discontinuidades horizontales de las zonas de alta resistividad que se interpreta que correspondan al sistema de fallas con orientación NW-SE, las cuales se correlacionan en profundidad con las estructuras que distribuyen las zonas de baja resistividad. Esta interpretación concuerda con investigaciones previas que relacionaban

fallas con patrones en la distribución de resistividad eléctrica (e.g., Fazzito *et* al, 2009; Bedrosian, 2007; Oskooi *et* al, 2013; Erdogan & Candansayar, 2017).

Es probable que la zona de muy baja resistividad esté asociada a fallas con orientación NW-SE, que habrían canalizado la inyección de fluidos hidrotermales responsables de la alteración y mineralización relacionada con el Albitófiro en el sector norte. Este proceso de mineralización podría explicar la señal de resistividad observada, similar a los hallazgos reportados por Guang-Ming (2020) en un depósito mineral en China.

El cuerpo C2 es interceptado por varios sondajes en la zona noroeste y además ciertos sondajes poseen cortes transparentes en lámina delgada, este es el caso del sondaje S-08-2 (Fig. VI.6) y S-01-A2 (Fig. VI.11), de los cuales se seleccionó un corte de interés perteneciente al Albitófiro ubicado en la zona de resistividad eléctrica entre 300-500 Ωm y menor a 100 Ωm respectivamente. De acuerdo al corte transparente (ver Anexo, Fig. A.1), se estima una cantidad de minerales con brillo metálico de un 7%, distribuidos de manera diseminada y en pequeñas vetillas de un ancho <0.5 mm. Además, el diseminado es de un tamaño menor a 0.5 mm y con una separación relativa menor a 0.5 mm. El siguiente corte transparente pertenece al sondaje S-01-A2 (Ver Anexo, Fig. A.5), el cual corresponde al Albitófiro con presencia de minerales de brillo metálico de manera diseminada y con un porcentaje máximo de 10%, además la distancia de diseminación entre cada grano es menor a 0.1mm. Estas distancias y tamaños indican una buena interconectividad entre minerales metálicos y/o submetálicos, lo que podría disminuir la conductividad del volumen de roca (Brown, 1994; citado en Rocha, 2019).

6.3.3.3 Cuerpo de interés 3 (C3).

El tercer cuerpo de interés (C3) es observado en los perfiles B, C, D, G y H (Figs. VI.6; VI.7; VI.8; VI.11; VI.12). Se encuentra ubicado en la zona noroeste en paralelo al cuerpo C2 (Fig. VI.3), este cuerpo tiene bajas resistividades (<200 Ωm) las cuales se correlacionan con el techo de las Andesitas Inferiores y parte del Albitófiro. Su extensión hacia el norte se encuentra débilmente explorada, constituyendo un target exploratorio relativamente somero (Perfil B, Fig. VI.6). La extensión hacia el este del cuerpo (Fig. VI.11), sugiere que el bloque de las Andesitas Inferiores mantea hacia el este en las zonas

orientales de la propiedad, posiblemente relacionado al manteo del flanco este del Anticlinorio de Tierra Amarilla (Segerstrom, 1968).

El sondaje S-02-1 (Fig. VI.7) alcanza a cortar solo el borde superior de C3, en un sector donde aumenta el espesor del paquete de calizas. Este sondaje registra cortes transparentes, los cuales fueron analizados y pertenecen a la unidad de Brechas Volcanosedimentarias (BrVs) y Andesitas Inferiores (Ver Anexo, Fig. A.2). La sección transparente para la unidad BrVs posee un tipo de diseminación aislada, compuesta de minerales con brillo metálico con un porcentaje visual del 2%, un tamaño de diseminación menor a 0.1 mm y una separación entre las zonas aisladas de al menos 1.5 mm. Este bajo porcentaje y alejada separación en la diseminación resulta en una baja interconectividad, sugiriendo ser un factor de los altos valores de resistividad asociados. El corte transparente de Andesitas Inferiores presenta una diseminación fina correspondiente a un 12% del total de la muestra, donde el tamaño y distancia de diseminación se encuentra por debajo de los 0.1 mm. Esta diseminación se podría asociar la presencia de magnetita, cuya baja resistividad y buena interconectividad podría explicar los bajos valores de resistividad asociados a la anomalía C3.

El sondaje S-01-1 (Fig. VI.12) correspondiente al perfil H (Ver Anexo, Fig. A.6), y su respectivo corte transparente extraído del Albitófiro, presenta leves diferencias con respecto al sondaje S-01-A2: 3% de opacos, de tamaño promedio menor a 0.1 mm y con una separación promedio de 0.3 mm.

6.3.3.4 Cuerpo de interés 4 (C4).

El último cuerpo de interés aparece en los perfiles D, E, F, G y H (Figs. VI.8; VI.9; VI.10; VI.11; VI.12). El cuerpo C4 representa una zona superficial de resistividades menores a 200 Ωm, la cual se encuentra orientada en dirección N-S y que atraviesa completamente el área de estudio (Fig. VI.3). Según el modelo geológico, C4 corresponde litológicamente a la unidad de Calizas Margosas (Fig. VI.8).

De acuerdo con lo presentado por Arévalo (2005), Corvalán (1973) y mapeos locales de superficie realizados por S.C.M. Carola, C4 coincide espacialmente con afloramientos del miembro superior de la Formación Nantoco y la Formación Totoralillo (Ver Anexo, Figs.

A.8; A.9). Esta zona (C4) también coincide con el despegue Cerrillos (Fig. VI.12), una falla de carácter inverso, formada por el retrocorrimiento o "back thrust" intraformacional (Arévalo, 2005). En base a lo anterior, se interpreta que este cuerpo norte-sur de resistividad baja (Fig. VI.3) no sería asociable a la presencia de mineralización metálica. Estas formaciones se componen por calcilutitas, lutitas calcáreas y calizas bituminosas lo que sugiere que la señal de baja resistividad correspondería al contenido arcilloso y posiblemente a materia orgánica existente que se encuentra fracturado y fallado debido al despegue Cerrillos.

Un caso similar sucede en el sector central del perfil G (Fig. VI.11), precisamente en el sector **β**, donde la presencia de una pequeña zona de baja resistividad es expuesta en superficie. Esto podría deberse a la presencia de arcillas, como indican los depósitos aluviales descritos por Arévalo (2005). La presencia de la Quebrada Meléndez podría complementar esta interpretación debido a su composición en sedimentos. En apoyo a esta interpretación, Gonzales (2016) concluye en su trabajo que, en regiones superficiales de bajas resistividades, es probable la presencia de un alto contenido de arcillas.

Para identificar la mineralogía que podría explicar la baja resistividad del cuerpo C4, se analizaron dos secciones transparentes tomadas de un sondaje que corta esta zona (sondaje S-04-2, Fig. VI.8): el primero en la zona superficial de baja resistividad (C4) y el segundo en la zona de alta resistividad (Ver Anexo, Fig. A.3). La ausencia de minerales con brillo metálico para la zona de baja resistividad sugiere que sus valores dependan netamente de otros como la posible presencia de minerales arcillosos descritos en antiguos mapeos superficiales. Por otro lado, el corte transparente tomado de la zona de alta resistividad muestra una diseminación fina de minerales opacos, con una abundancia de un 9%, tamaños de hasta 0.2 mm, y una separación de 0.2 mm.

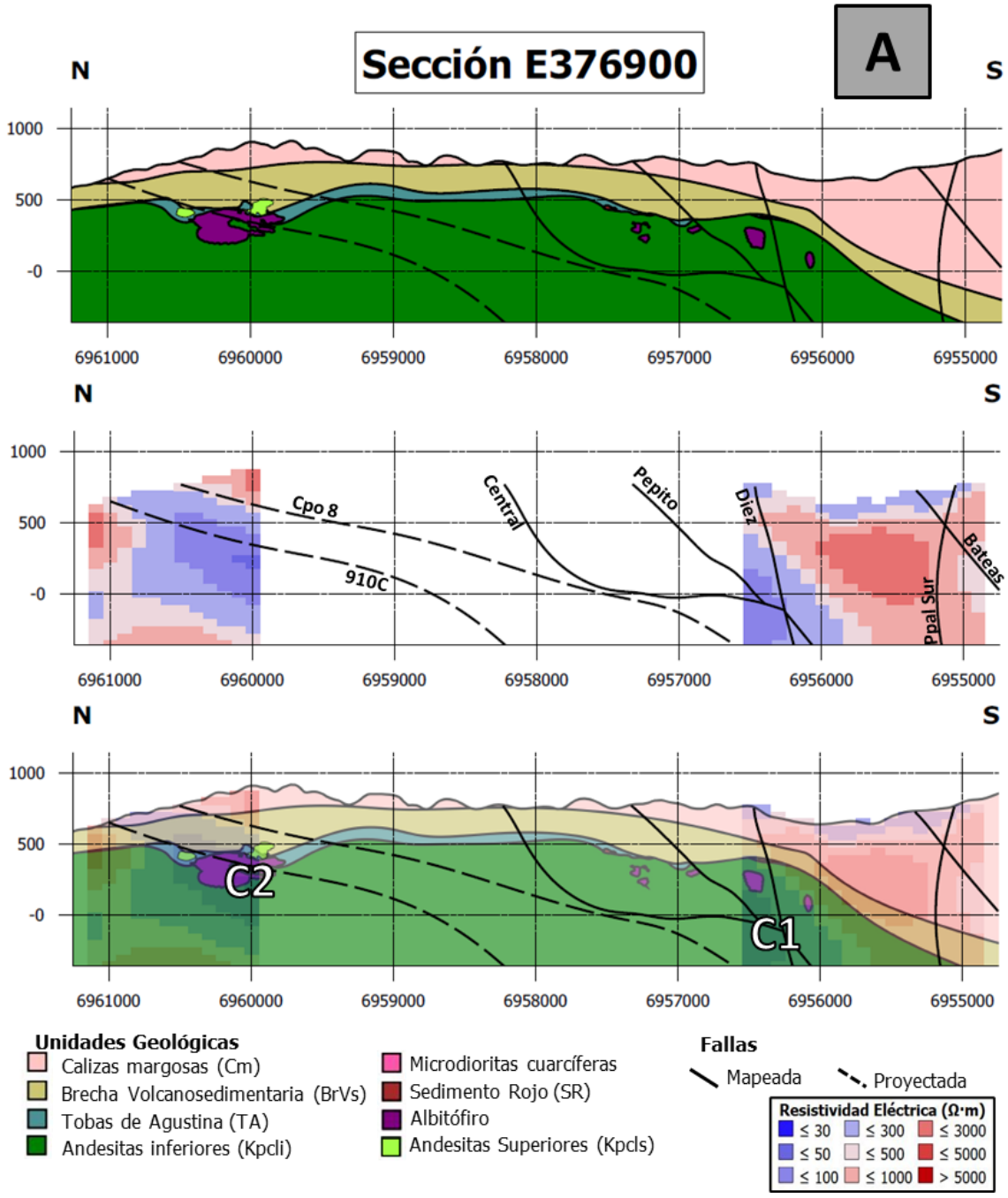

Figura VI.5 *Sección N-S E376900 a través del modelo geológico (panel superior), modelo de resistividad eléctrica (panel intermedio), y superposición de ambos modelos (panel inferior).*

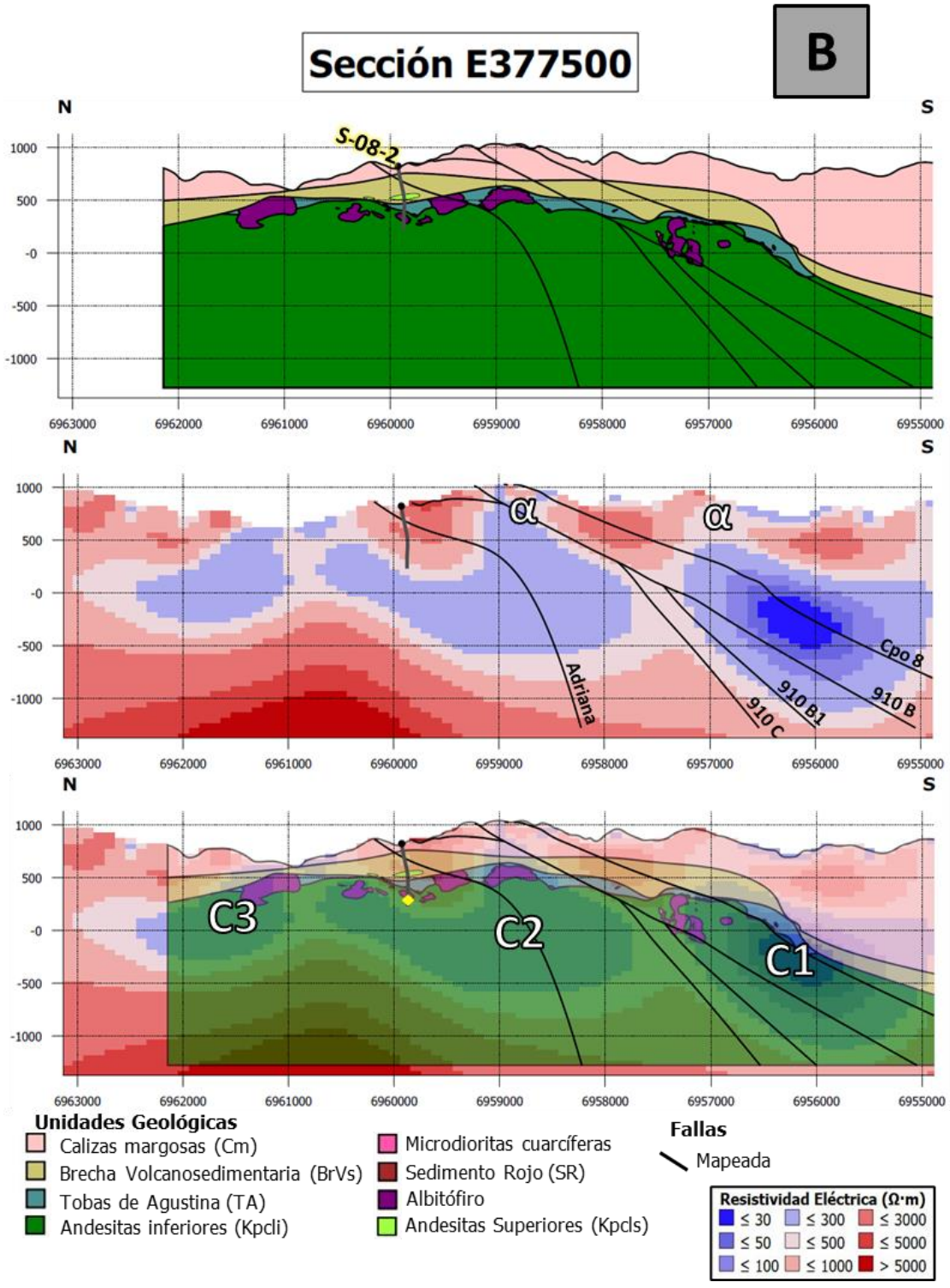

Figura VI.6 *Igual que Figura VI.5, pero para sección transversal E377500. Las líneas grises con un punto negro representan la traza de los sondajes y su punto de inicio, respectivamente. El rombo amarillo representa la ubicación del corte en lámina delgada mencionado en el texto.*

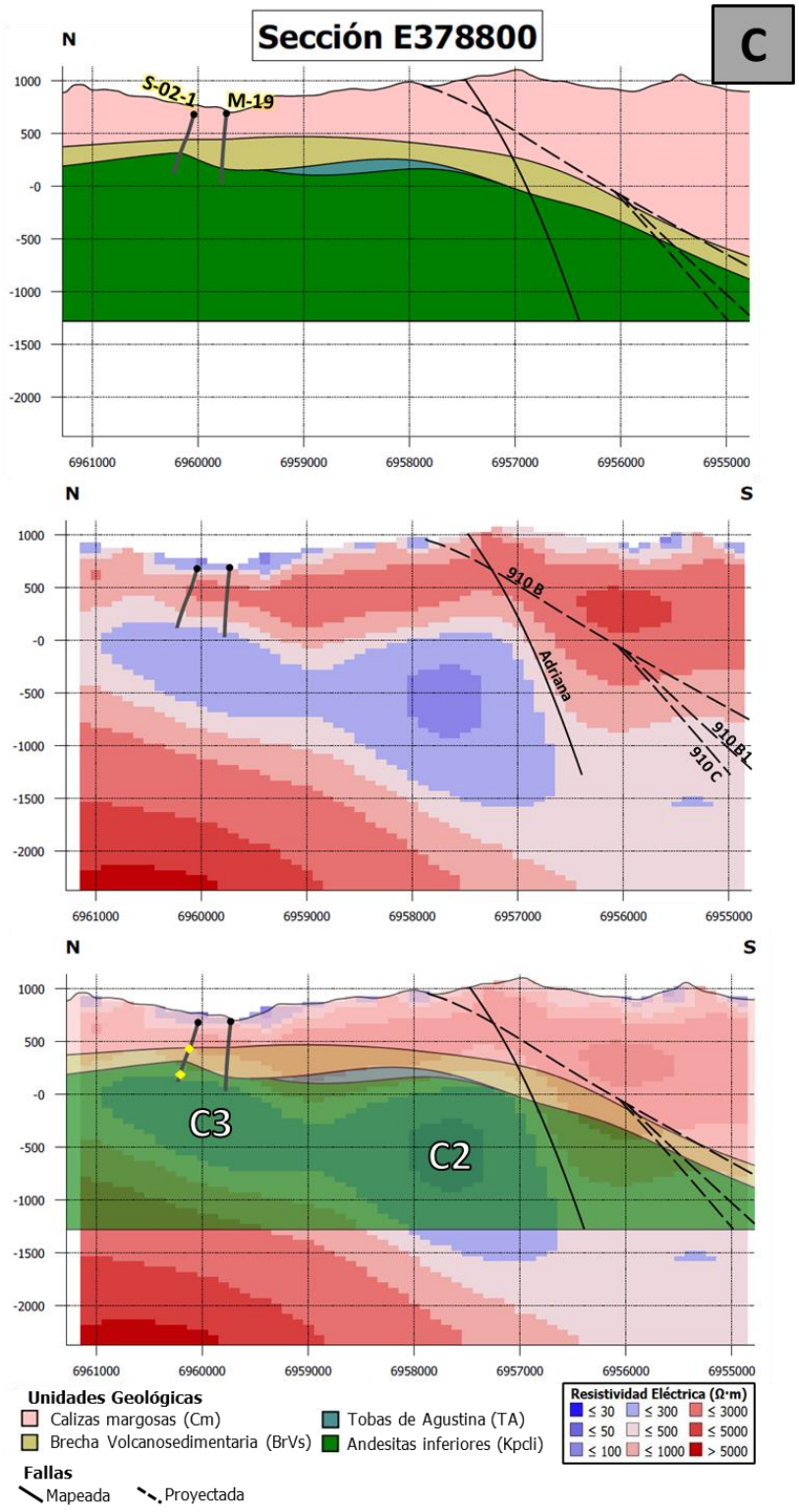

Figura VI.7 *Igual que figura VI.5, pero para sección transversal E378800. Las líneas grises con un punto negro representan la traza de los sondajes y su punto de inicio, respectivamente. El rombo amarillo representa la ubicación del corte en lámina delgada mencionado en el texto.*

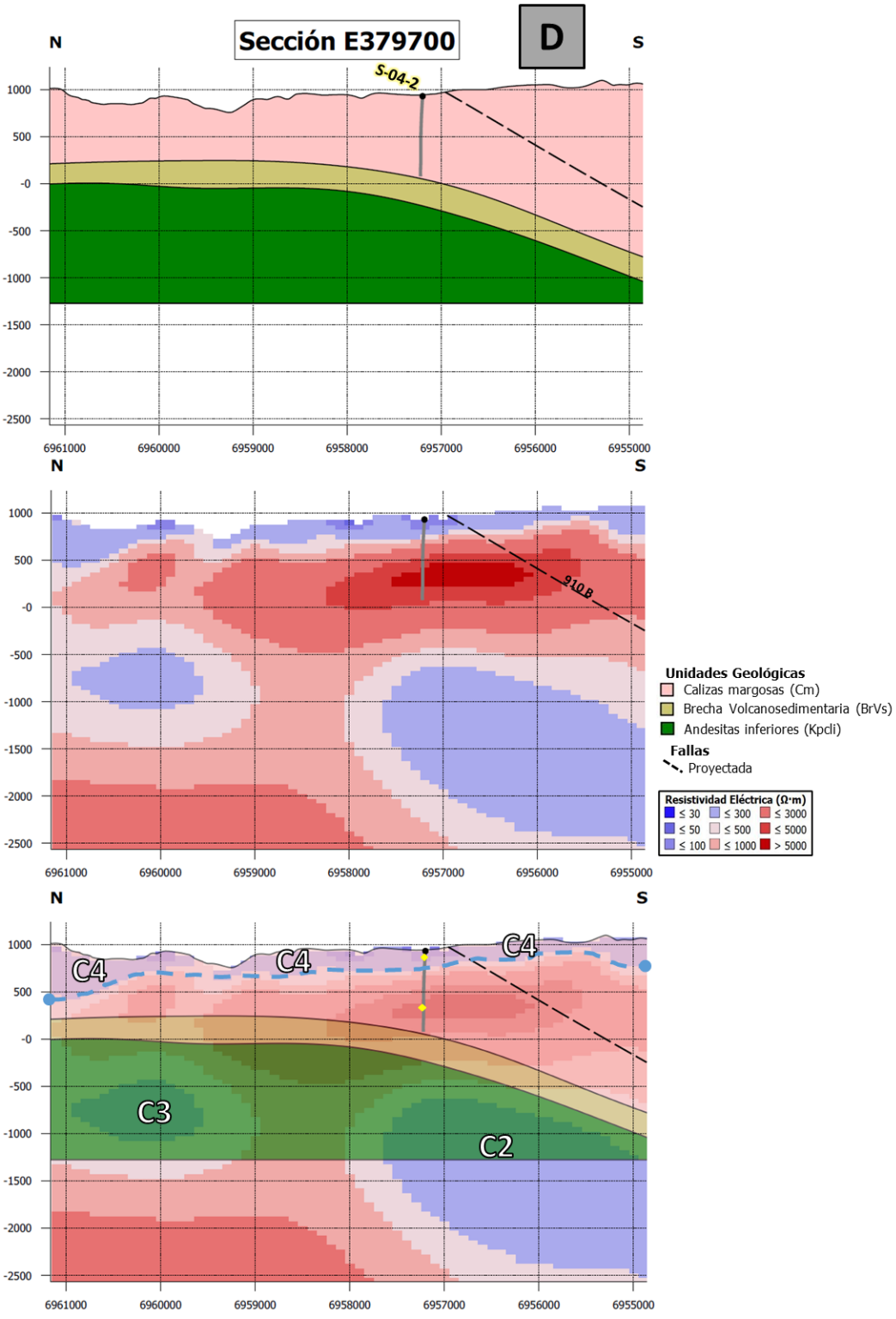

Figura VI.8 *Igual que figura VI.5, pero para sección transversal E379700. Las líneas grises con un punto negro representan la traza de los sondajes y su punto de inicio, respectivamente. El rombo amarillo representa la ubicación del corte en lámina delgada mencionado en el texto.*

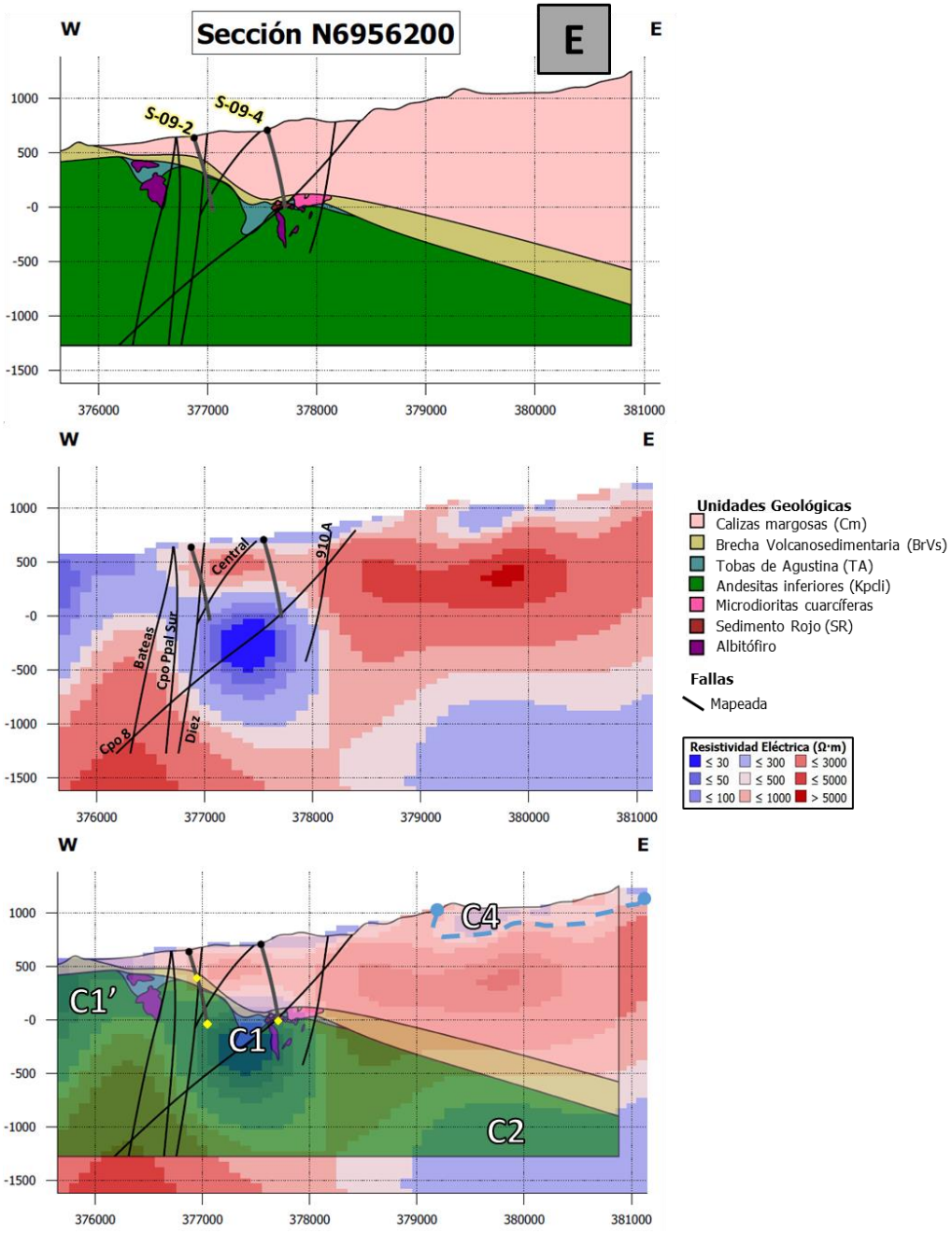

Figura VI.9 *Sección E-W N6956200 a través del modelo geológico (panel superior), modelo de resistividad eléctrica (panel intermedio) y superposición de ambos modelos (panel inferior). Las líneas grises con un punto negro representan la traza de los sondajes y su punto de inicio, respectivamente. El rombo amarillo representa la ubicación del corte en lámina delgada.*

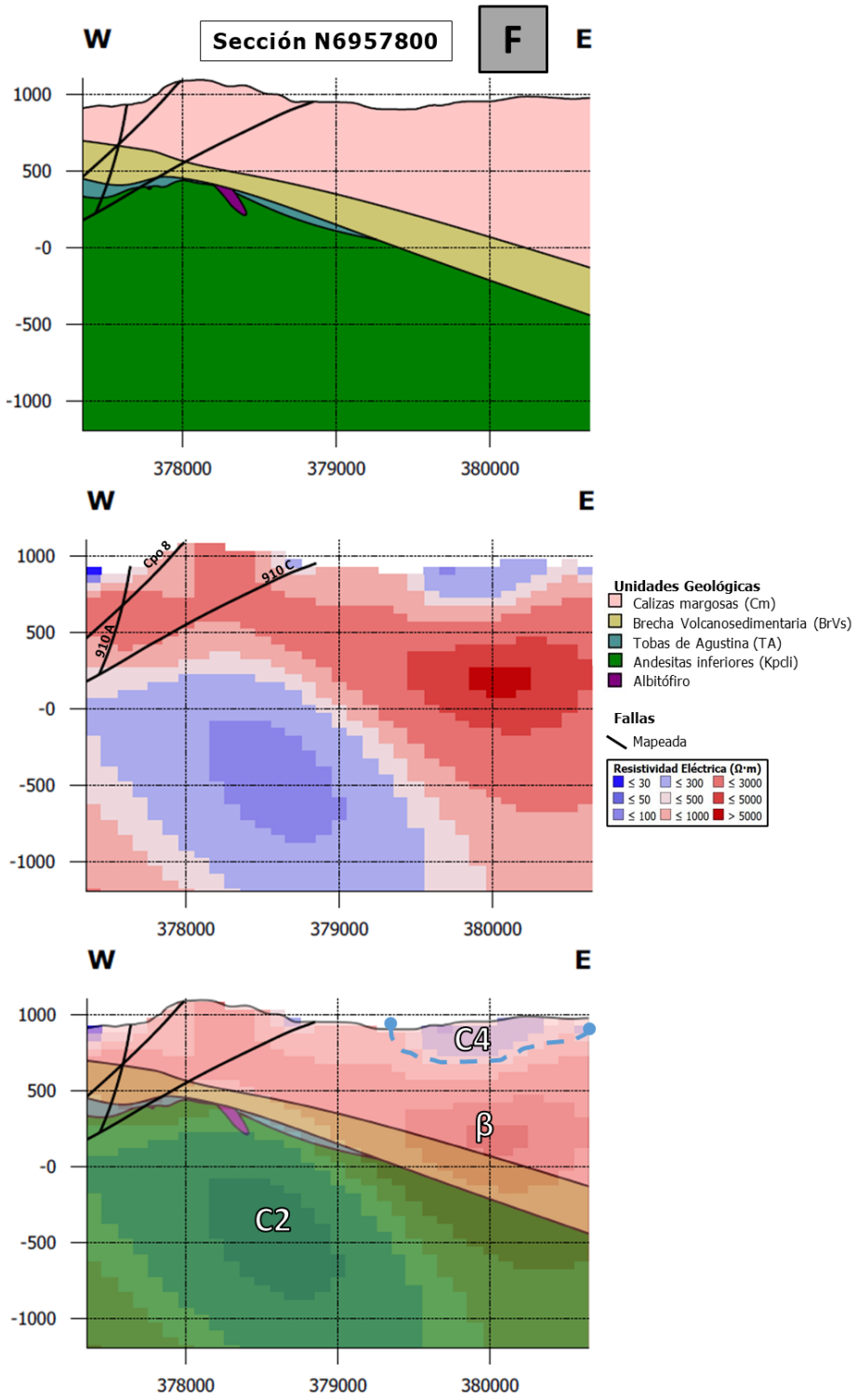

Figura VI.10 *Igual que figura VI.9, pero sección transversal N6957800. Las líneas grises con un punto negro representan la traza de los sondajes y su punto de inicio, respectivamente. El rombo amarillo representa la ubicación del corte en lámina delgada.*

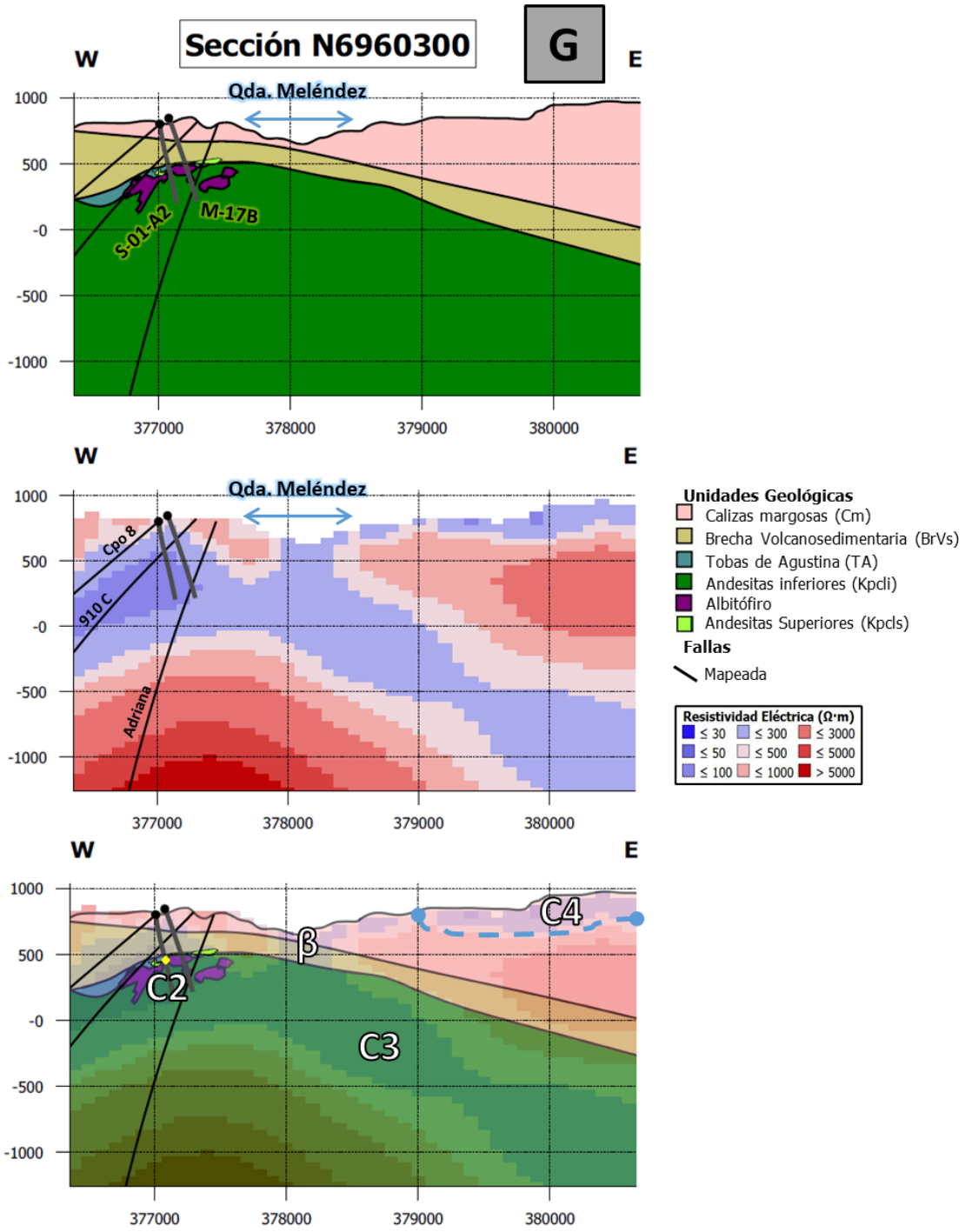

Figura VI.11 *Igual que figura VI.9, pero sección transversal N6960300. Las líneas grises con un punto negro representan la traza de los sondajes y su punto de inicio, respectivamente. El rombo amarillo representa la ubicación del corte en lámina delgada.*

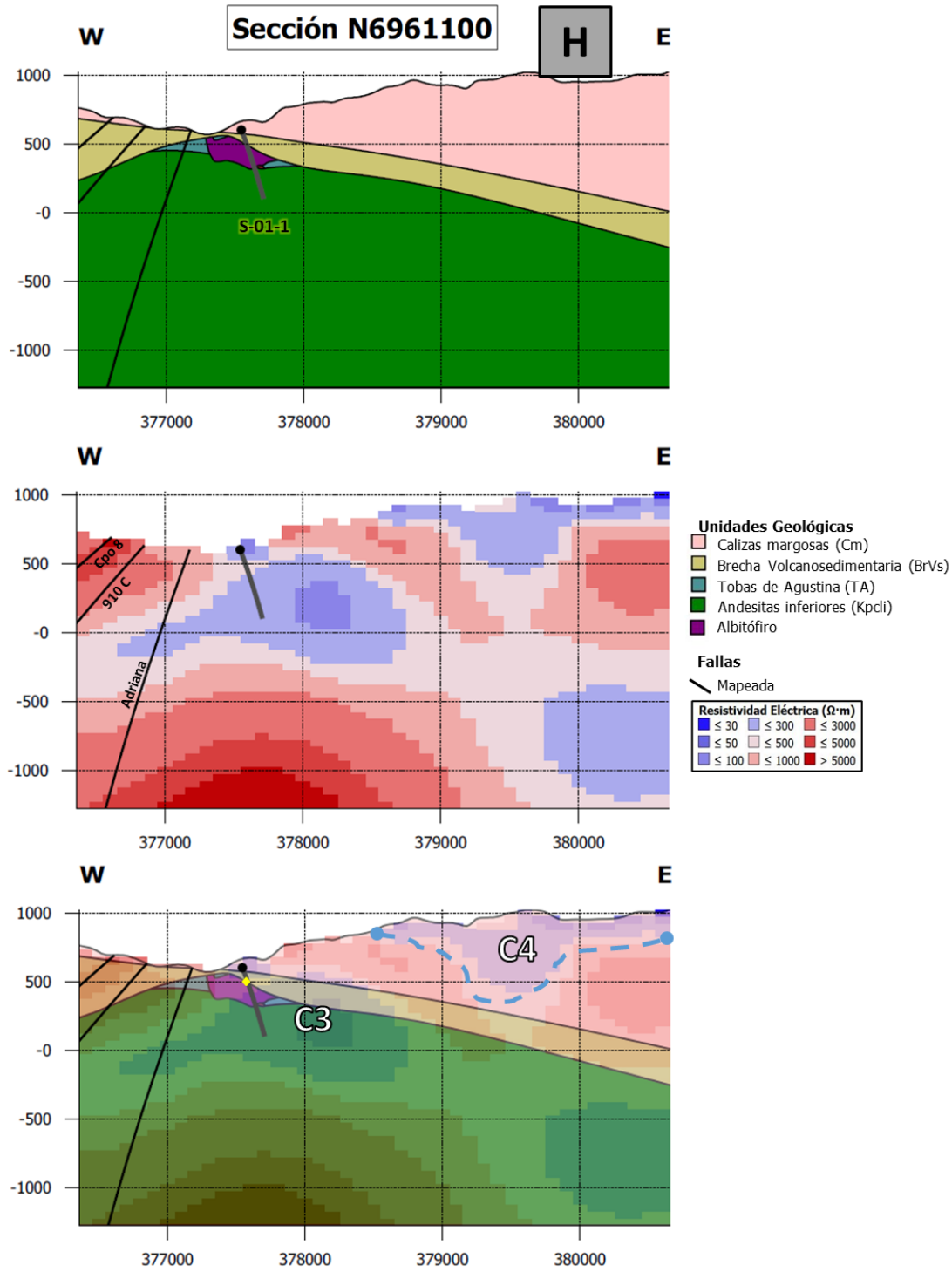

Figura VI.12 *Igual que la figura VI.9, pero sección transversal N6961100. Las líneas grises con un punto negro representan la traza de los sondajes y su punto de inicio, respectivamente. El rombo amarillo representa la ubicación del corte en lámina delgada.*

VII.Conclusiones y recomendaciones

En esta tesis se analizaron las características geológicas que podrían determinar la distribución de resistividad eléctrica del modelo 3D obtenido del estudio magnetotelúrico realizado en las pertenencias de SCM Carola.

Se observa una nula correlación estadística entre la resistividad eléctrica del modelo y los parámetros descritos en los sondajes (contenidos de cobre total, plata y oro; RQD; y susceptibilidad magnética). Solo en las Calizas Margosas se obtuvo que la correlación resistividad-RQD y resistividad-susceptibilidad magnética presentan una alta e intermedia fuerza de correlación. La ausencia de una correlación fuerte entre la resistividad eléctrica y los parámetros antes mencionados sugiere que no hay una correlación clara de la resistividad con la mineralización, y por lo tanto la resistividad eléctrica en el área depende de varios factores.

De las litologías presentes en el área del yacimiento, se obtuvo que el Albitófiro y Andesitas Inferiores presentan un rango de resistividad entre 90 y 350 Ωm. Estos rangos varían moderadamente entre las zonas norte, centro y sur del yacimiento. Los rangos de resistividad eléctrica que presentan el Albitófiro y las Andesitas Inferiores se traslapan con los rangos de resistividad de otras litologías, incluidas las que no presentan mineralización. Las litologías que no presentaban un volumen significativo (Microdioritas Cuarcíferas, Andesitas Superiores, Sed. Rojos Brechizados), no estarían claramente definidas en el modelo de resistividad. Esto se debe a que la señal de respuesta sería dominada por la litología circundante, debido a las diferencias de escala entre el modelo de celdas y las variables de los sondajes (metro a metro). Las Calizas Margosas se distinguen claramente del resto de las litologías al presentar una tendencia hacia valores altos de resistividad, en general valores en el rango entre 400 y 1000 Ωm.

Las secciones transversales permitieron analizar la correlación entre la distribución espacial de la resistividad eléctrica con la litología. El patrón de correlación más importante se relaciona a los cuerpos de bajas resistividades (C1, C2, C3) con las litologías correspondientes a Albitófiro y Andesitas Inferiores (Fm. Punta del Cobre). Estos cuerpos están asociados a fallas de rumbo NW-SE que sugieren una notoria influencia en los

cuerpos de bajas resistividades. Debido al contexto local, estos cuerpos indicarían la presencia de mineralización metálica alojada preferentemente en las Andesitas Inferiores y el Albitófiro. Se observa también un cuerpo superficial de baja resistividad en el sector oriental de la propiedad (C4), pero se interpreta que corresponde a rocas sedimentarias con presencia de arcillas secas.

En base a la correlación espacial entre resistividad eléctrica y litologías, se ratificaría que el bloque de Andesitas Inferiores presenta un manteo hacia el este siguiendo la trayectoria del flanco este del Anticlinorio de Tierra Amarilla, al igual que las Calizas Margosas acompañadas de Brecha Volcanosedimentarias. Sin embargo, el modelo de resistividad sugiere que en algunos sectores el techo de las Andesitas Inferiores se encontraría a mayor o menor profundidad a lo que el modelo geológico estima.

- Recomendaciones

De acuerdo con lo obtenido en este trabajo de investigación, se recomiendan las siguientes acciones: sondajes exploratorios, sugerencias de avances en interior mina y mapeo geológico en sectores superficiales (Tablas VII.1 y VII.2).

Tabla VII.1 *Recomendaciones por cuerpo de resistividades bajas.*

Acción	Cuerpo	Detalles
Sondajes exploratorios	C3	Realización de sondajes en esta zona (SE_GF_010 - SE_GF_011) para verificar proveniencia de la señal de baja resistividad. Los sondajes de reconocimiento "SE-CL-#", a medida que se acercan al cuerpo indican un aumento en la ley de cobre.
Sugerencia de avance	C3	Continuidad en labores hacia el sector Cecilia y orientar las futuras galerías en paralelo al cuerpo para realizar sondajes que sean perpendiculares al cuerpo.
Mapeo geológico	C4	Mapeo geológico en detalle del cuerpo oriental y superficial de bajas resistividades, con el fin de descartar una posible asociación de arcillas y oro.
Sugerencia de avance	C1 y C2	En futuras labores analizar factibilidad de explorar estas zonas de bajas resistividades y de mayores profundidades. En el caso de C1, se aprecia una posible correlación entre la tendencia de mineralización de Carola Central y el cuerpo de bajas resistividades en profundidad.

Tabla VII.2 *Detalles de los sondajes superficiales recomendados hacia el cuerpo C3.*

ID sondaje	Este	Norte	Elevación	Azimuth	Dip	Largo
SE_GF_010	377804,9	6961362	750,68	130	-70	600
SE_GF_011	377804,9	6961362	750,68	30	-70	600

Referencias

Arévalo, C. (2005). Carta Los Loros, Región de Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica*(92), 53.

Arévalo, C., Grocott, J., Martin, W., Pringle, M., & Taylor, G. (2006). Structural Setting of the Candelaria Fe Oxide Cu-Au Deposit, Chilean Andes (27°30'S). *Economic Geology, 101*, 819-841.

Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., & Palma, G. (2017). Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach. *Ore Geology Reviews, 81*, 62-78. doi:10.1016/j.oregeorev.2016.10.016

Bedrosian, P. (2007). MT+, Integrating Magnetotellurics to Determine Earth Structure, Physical State, and Processes. *Surv Geophys, 28*, 121-167. doi:10.1007/s10712-007-9019-6

Biese-Nickel, W. (1942). La distribución del cretáceo inferior al sur de Copiapó. *Primer Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología, II*, 429-466.

Brown, C. (1994). Tectonic Interpretation of Regional Conductivity Anomalies. *Surveys in Geophysics, 15*, 123-157.

Camus, F. (1980). Posible modelo genético para los yacimientos de cobre del distrito minero Punta del Cobre. *Revista Geológica de Chile*(11), 51-76.

Corvalán, D. (1973). Estratigrafía del Neocomiano Marino de la Región al sur de Copiapó, Provincia de Atacama. *Revista Geológica de Chile*, 13-36.

del Real, I., Thompson, J., & Carriedo, J. (2018). Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile. *Ore Geology Reviews*, 106-153. doi:10.1016/j.oregeorev.2018.08.034

Egbert, G., & Kelbert, A. (2012). Computational recipes for electromagnetic inverse problems. *Geophysical Journal International, 189*, 251-267. doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05347.x

Erdoğan, E., & Candansayar, M. (2017). The conductivity structure of the Gediz Graben geothermal area extracted from 2D and 3D magnetotelluric inversion: Synthetic and field data applications. *Geothermics, 65*, 170-179. doi:10.1016/j.geothermics.2016.09.0

Fazzito, S., Rapalini, A., Cortés, J., & Terrizzano, C. (2009). Characterization of Quaternary faults by electric resistivity tomography in the Andean Precordillera of Western Argentina. *Journal of South American Earth Sciences , 28*, 217-228. doi:10.1016/j.jsames.2009.06.001

Fernández, Y. (2023). Actualización de Modelo Geológico del Sector Adriana Norte de SCM Carola, Tierra Amarilla, Región de Atacama. *Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Atacama*, 128.

Glover, P. (2000). A modified Archie's law for two conducting phases. *Earth and Planetary Scince Letters*(180), 369-383. doi:https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00168-0

Glover, P. (2015). Electrical Properties. *Geophysical Propertiers of the Near Surface Earth*, 90-132.

Gonzales, A. (2016). Electrical Resistivity Tomography and Induced Polarization for Mapping the Subsurface of Alluvial Fans: A Case Study in Punata (Bolivia). *Geosciences, 6*. doi:10.3390/geosciences6040051

Guang-Ming, F. (2020). 3D inversion of audio-magnetotelluric data for mineral exploration: A case study of Layikeleke buried porphyry copper deposit, Xinjiang, China. *Applied Geophysicis* , 576-588. doi:10.1007/s11770-020-0836-4.

Hoffstetter, R., Fuenzalida, H., & Cecioni, G. (1957). *Lexique Stratigraphique International: Amerique Latine, Chile* (Vol. V).

Jansen, J., & Cristall, J. (2017). Mineral Exploration Using Natural EM Fields. *Proceedings of Exploration 17: Sixth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, (págs. 349-377).

Jeffrey, D. (1973). Conduction through a random suspension of spheres. *Proceedings of the Royal Society*, 355–367. doi:doi.org/10.1098/rspa.1973.0130

Lino, S. (1984). Geología de la Mina Agustina Comuna de Tierra Amarilla, Provincia de Copiapó, Región de Atacama. *Tesis para optar al título de Geólogo. Universidad Católica del Norte*, 158.

Marschik, R., & Fontboté, L. (2001). The Punta del Cobre Formation, Punta del Cobre-Candelaria area, northern Chile. *Journal of the South American Earth Sciences*, 401-433.

Marschik, R., Chiaradia, M., & Fontboté, L. (2003). Implications of Pb isotope signatures of rocks and iron oxide Cu-Au ores in the Candelaria-Punta del Cobre district, Chile. *Mineralium Deposita*, 900-912. doi:10.1007/s00126-003-0385-9

Marschik, R., Singer, B., Munizaga, F., Tassinari, C., Moritz, R., & Fontboté, L. (1997). Age of Cu(-Fe)-Au mineralization and therma evolution of the Punta del Cobre district, Chile. *Mineralium Deposita*(32), 531-546.

Martínez, F., Arriagada, C., Peña, M., Del Real, I., & Deckart, K. (2013). The structure of the Chañarcillo Basin: An example of tectonic inversion in the Atacama region, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*(42), 1-16. doi:10.1016/j.jsames.2012.07.001

Mücke, A., & Cabral, A. (2005). Redox and nonredox reactions of magnetite and hematite in rocks. *Geochemistry, 65*, 271-278. doi:10.1016/j.chemer.2005.01.002

Naidu, G. (2012). Magnetotellurics: Basic Theoretical Concepts. En G. Naidu, *Deep Crustal Structure of the Son-Narmada-Tapti Lineament, Central India* (págs. 13-35). doi:10.1007/978-3-642-28442-7_9

Orellana, E. (1972). *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua* (Vol. II). Madrid, España: Paraninfo.

Oskooi, B., Darijani, M., & Mirzaei, M. (2013). Investigation of the electrical resistivity and geological structures on the hot springs in Markazi province of Iran using

magnetotelluric method. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata , 54*, 245-256. doi:10.4430/bgta0102

Osten, G. V. (1969). Geología general y prospección geofísica del área Punta del Cobre entre Tierra Amarilla y Punta Bateas. *Memoria de Título, Universidad de Chile, Depto. Geol*, 143. Santiago.

Palacky, G. (1987). Resistivity Characteristics of Geologic Targets. En M. Nabighian, *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics - Theory* (págs. 56-125).

Pop, N., Heaman, L., Edelstein, O., Isache, C., Zentilli, M., Pecskay, Z., Valdman, S., Rusu, C. (2000). Geocronología de las rocas ígneas y los productos de alteración hidrotermal relacionadas con la mineralización de Cu-Fe(Au) del sector Adriana-Carola- Cobriza (Parte este del distrito Punta del Cobre-Candelaria), en base a dataciones U-Pb (En Circón). *IX Congreso Geológico Chileno, II*, 155-160.

Pous, J., & Marcuello, A. (2003). El método magnetotelúrico: descripción y aportaciones en investigaciones de ámbito regional. *Boletín Geológico y Minero, I*(114), 5-16. Obtenido de ISSN: 0366-0176

Quispe, L., Torres, V., Marchena, A., & Fernández, C. (2021). Interpretación de Datos Magnetotelúricos de la Transecta del Sur del Perú y su Relación con la Metalogenia. *XII Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores: Recursos minerales para un futuro sostenible*, (págs. 128-132). Lima, Perú. doi:https://hdl.handle.net/20.500.12544/3876

Rocha, N. (2019). Lithosphere structures of the Parnaíba Basin and adjacent provinces revealed by deep magnetotelluric imaging. *Journal of South American Earth Sciences, 92*, 1-11. doi:10.1016/j.jsames.2019.02.020

Ruiz, C. (1942). Estudio geológico de la región de Ojancos-Punta del Cobre. *I Congreso Panamericano*, 1186-1225.

Segerstrom, K. (1968). Geología de las Hojas Copiapó y Ojos del Salado, Provincia de Atacama. Instituto de Investigación Geológica. *Carta Geológica de Chile*(24), 35.

Segerstrom, K., & Parker, R. (1959). Cuadrángulo Cerrillos, Provincia de Atacama. Instituto. *Carta Geológica de Chile, I(2)*, 34. Santiago.

Segerstrom, K., & Ruiz, F. (1962). Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama. Instituto de Investigación Geológica. *Carta Geológica de Chile., VI*, 115. Santiago.

Shankland, T., & Waff, H. (1977). Partial melting and electrical conductivity anomalies in the upper mantle. *Geophys, 82*(33), 5409–5417. doi:doi:10.1029/JB082i033p05409.

Sillitoe, R. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 787-812. doi:DOI 10.1007/s00126-003-0379-7

SOUTHERNROCK GEOPHYSICS. (2023). *Informe para un Estudio Magneto-telúrico, Proyecto Carola, Región de Atacama, Chile.*

Vozoff, K. (1991). The Magnetotelluric Method. En M. Nabighian, *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics* (págs. 641-712). doi:10.1190/1.9781560802686.ch8

Anexo

Tabla A.1 Estadística general de las variables Resistividad, Cobre Total y RQD para cada litología.

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (Ω·m)

	Tobas de Agustina (TA)	Sed. Rojos brechizados (SR)	Andesitas inferiores (Kpcli)	Tobas de Agustina y Sed. Rojos (TA)	Lamprofíricos	Albitofiro	Andesitas superiores (Kpcls)	Brecha volcanosedimentaria (BrVs)	Calizas margosas (Cm)	Microdioritas cuarcíferas
Cantidad de datos	38441	14608	402292	7988	5006	92936	4519	1666	1024	2943
% del total de muestras	6.58%	2.50%	68.84%	1.37%	0.86%	15.90%	0.77%	0.29%	0.18%	0.50%
Min	17.9	17.9	17.9	21	17.9	27.2	55	16.5	38.6	19.4
Max	1593.3	1332.4	1593.3	1673.5	4808.3	1673.5	1257.5	1588.3	5767.7	678.6
Promedio	267.7	263.8	256.8	199.6	224.5	242.1	122.8	136.0	1086.6	92.9
Mediana	191.6	206.4	221.1	78.9	104.6	156.9	79	67.8	339.7	61.8
Desv estándar	223.8	206.5	190.5	236.1	258.1	201.6	120.1	163.7	1510.9	79.4
Percentiles 25	63.70	78.00	83.30	41.10	56.80	93.50	64.20	63.70	78.40	61.80
Percentiles 75	442.8	437.3	407.2	392	364.85	344.2	125.2	105.7	1749.8	94.1

Cobre Total (%)

	Tobas de Agustina (TA)	Sed. Rojos brechizados (SR)	Andesitas inferiores (Kpcli)	Tobas de Agustina y Sed. Rojos (TA)	Lamprofíricos	Albitofiro	Andesitas superiores (Kpcls)	Brecha volcanosedimentaria (BrVs)	Calizas margosas (Cm)	Microdioritas cuarcíferas
Cantidad de datos	38441	14608	402292	7988	5006	92936	4519	1666	1024	2943
% del total de muestras	6.58%	2.50%	68.84%	1.37%	0.86%	15.90%	0.77%	0.29%	0.18%	0.50%
Min	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Max	12.4	12.82	28.06	10.444	17.81	19.71	3.4	1.91	0.11	3.92
Promedio	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Mediana	0.01	0.02	0.07	0.01	0.02	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01
Desv estándar	0.3	0.7	0.9	0.5	0.8	0.7	0.1	0.1	0.0	0.2
Percentiles 25	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Percentiles 75	0.01	0.13	0.23	0.04	0.09	0.22	0.01	0.01	0.01	0.01

RQD

	Tobas de Agustina (TA)	Sed. Rojos brechizados (SR)	Andesitas inferiores (Kpcli)	Tobas de Agustina y Sed. Rojos (TA)	Lamprofíricos	Albitofiro	Andesitas superiores (Kpcls)	Brecha volcanosedimentaria (BrVs)	Calizas margosas (Cm)	Microdioritas cuarcíferas
Cantidad de datos	37070	14060	393344	7901	4859	86395	4510	1451	465	2942
% del total de muestras	6.56%	2.49%	69.58%	1.40%	0.86%	15.28%	0.80%	0.26%	0.08%	0.52%
Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Promedio	0.7	0.6	0.7	0.8	0.6	0.7	0.53	0.8	0.7	0.8
Mediana	0.79	0.73	0.82	0.88	0.67	0.78	0.57	0.9	0.86	0.89
Desv estándar	0.3	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3
Percentiles 25	0.44	0.27	0.63	0.65	0.47	0.55	0.33	0.76	0.61	0.68
Percentiles 75	0.94	0.92	0.92	0.97	0.83	0.93	0.76	0.95	0.93	0.97

Tabla A.2 Estadística general de las variables Ag, Au y SM para cada litología.

Ag (ppm)

	Tobas de Agustina (TA)	Sed. Rojos brechizados (SR)	Andesitas inferiores (Kpcli)	Tobas de Agustina y Sed. Rojos (TA)	Lamprofiricos	Albitófiro	Andesitas superiores (Kpcls)	Brecha volcanosedimentaria (BrVs)	Calizas margosas (Cm)	Microdioritas cuarcíferas
Cantidad de datos	393	477	20717	118	416	2099	0	2	18	16
% del total de muestras	1.60%	1.94%	84.28%	0.48%	1.47%	8.54%	0.00%	0.01%	0.07%	0.07%
Min	0.6	0.1	0.1	0.1	0.005	1	N/A	N/A	0.4	1
Max	96.0	42.0	2240.0	18.8	3.7	40.0	N/A	N/A	5.0	8.0
Promedio	5.2	5.4	7.4	2.9	0.2	2.8	N/A	N/A	1.4	2.4
Mediana	4	3	4	3	0.06	2	N/A	N/A	0.9	2
Desv estándar	7.9	6.6	25.7	2.5	0.4	3.2	N/A	N/A	1.2	1.7
Percentiles 25	2.40	2.00	2.00	1.00	0.01	1.00	N/A	N/A	0.60	1.25
Percentiles 75	5	6	7	4	0.35	3	N/A	N/A	1.6	3

Au (ppm)

	Tobas de Agustina (TA)	Sed. Rojos brechizados (SR)	Andesitas inferiores (Kpcli)	Tobas de Agustina y Sed. Rojos (TA)	Lamprofiricos	Albitófiro	Andesitas superiores (Kpcls)	Brecha volcanosedimentaria (BrVs)	Calizas margosas (Cm)	Microdioritas cuarcíferas
Cantidad de datos	416	527	23755	142	309	2268	0	2	212	11
% del total de muestras	1.47%	1.86%	83.84%	0.50%	1.09%	8.00%	0.00%	0.01%	0.75%	0.04%
Min	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	N/A	N/A	0.01	0.005
Max	3.7	3.2	9.5	0.7	5.8	3.9	N/A	N/A	0.03	0.2
Promedio	0.2	0.3	0.3	0.1	0.3	0.2	N/A	N/A	0.01	0.1
Mediana	0.06	0.11	0.13	0.02	0.1	0.09	N/A	N/A	0.01	0.03
Desv estándar	0.4	0.5	0.5	0.1	0.6	0.3	N/A	N/A	0.002	0.1
Percentiles 25	0.01	0.02	0.04	0.01	0.03	0.04	N/A	N/A	0.01	0.02
Percentiles 75	0.35	0.38	0.34	0.03	0.25	0.26	N/A	N/A	0.01	0.13

Susceptibilidad Magnética (10^-3 SI)

	Tobas de Agustina (TA)	Sed. Rojos brechizados (SR)	Andesitas inferiores (Kpcli)	Tobas de Agustina y Sed. Rojos (TA)	Lamprofiricos	Albitófiro	Andesitas superiores (Kpcls)	Brecha volcanosedimentaria (BrVs)	Calizas margosas (Cm)	Microdioritas cuarcíferas
Cantidad de datos	1648	1494	87854	279	662	12258	106	112	170	0
% del total de muestras	0.29%	0.26%	15.37%	0.05%	0.12%	2.15%	0.02%	0.02%	0.03%	0.00%
Min	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0	N/A
Max	892.9	594.6	2216.9	415.0	634.7	924.8	1022.0	8.7	8.8	N/A
Promedio	15.9	15.4	102.0	22.9	43.8	36.8	31.7	1.5	1.0	N/A
Mediana	0.8	0.5	36.6	2	17.4	14.45	0.95	1.5	0.9	N/A
Desv estándar	64.1	47.1	159.6	60.3	82.0	70.9	143.1	0.9	0.9	N/A
Percentiles 25	0.30	0.20	7.40	0.40	6.50	1.50	0.40	1.00	0.58	N/A
Percentiles 75	5.1	7.25	122.62	30.1	39.52	38.5	12.3	1.77	1.2	N/A

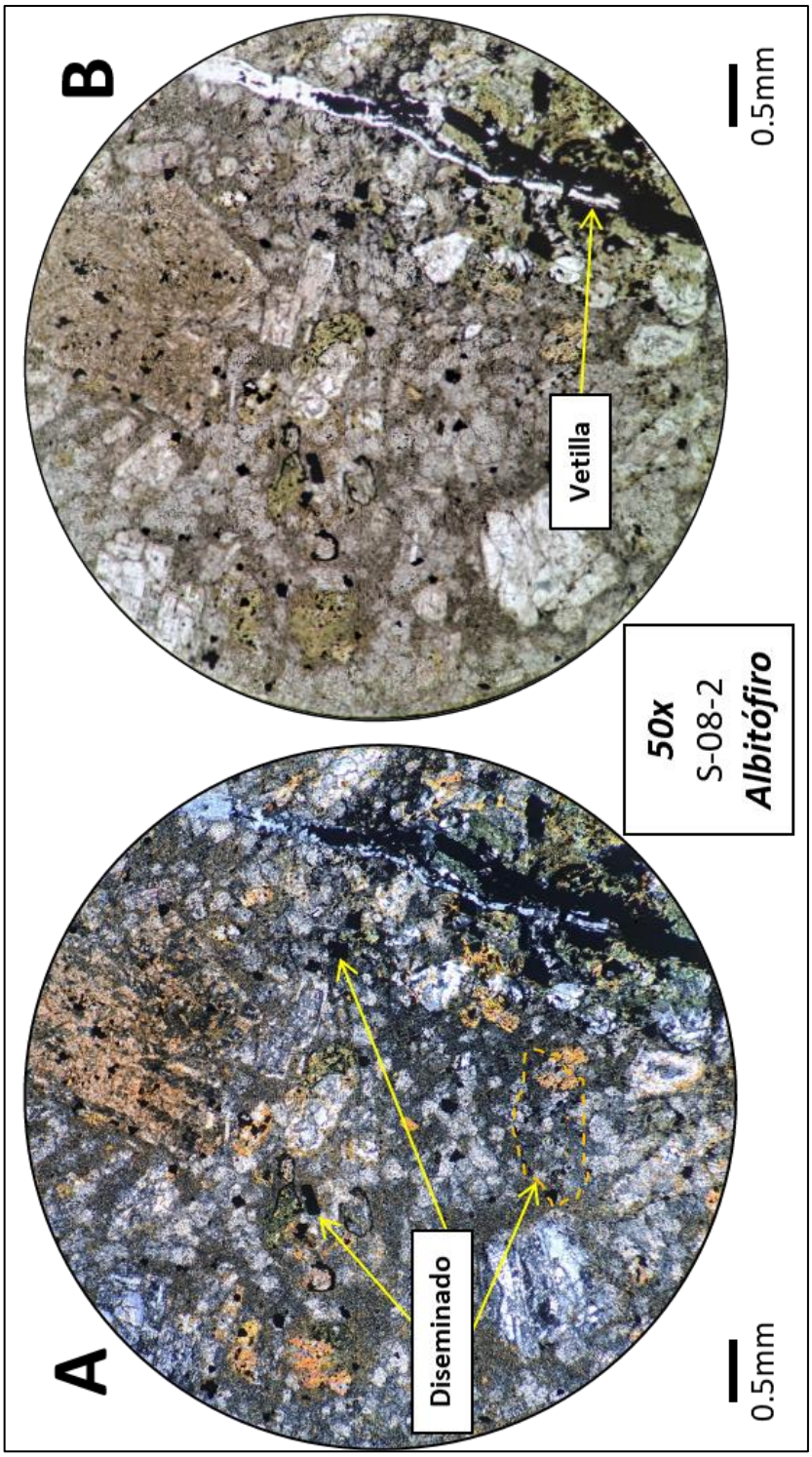

Figura A.1 Corte transparente del Albitófiro en sondaje S-08-2 visto en microscopio. A) nícoles cruzados. B) nícoles paralelos.

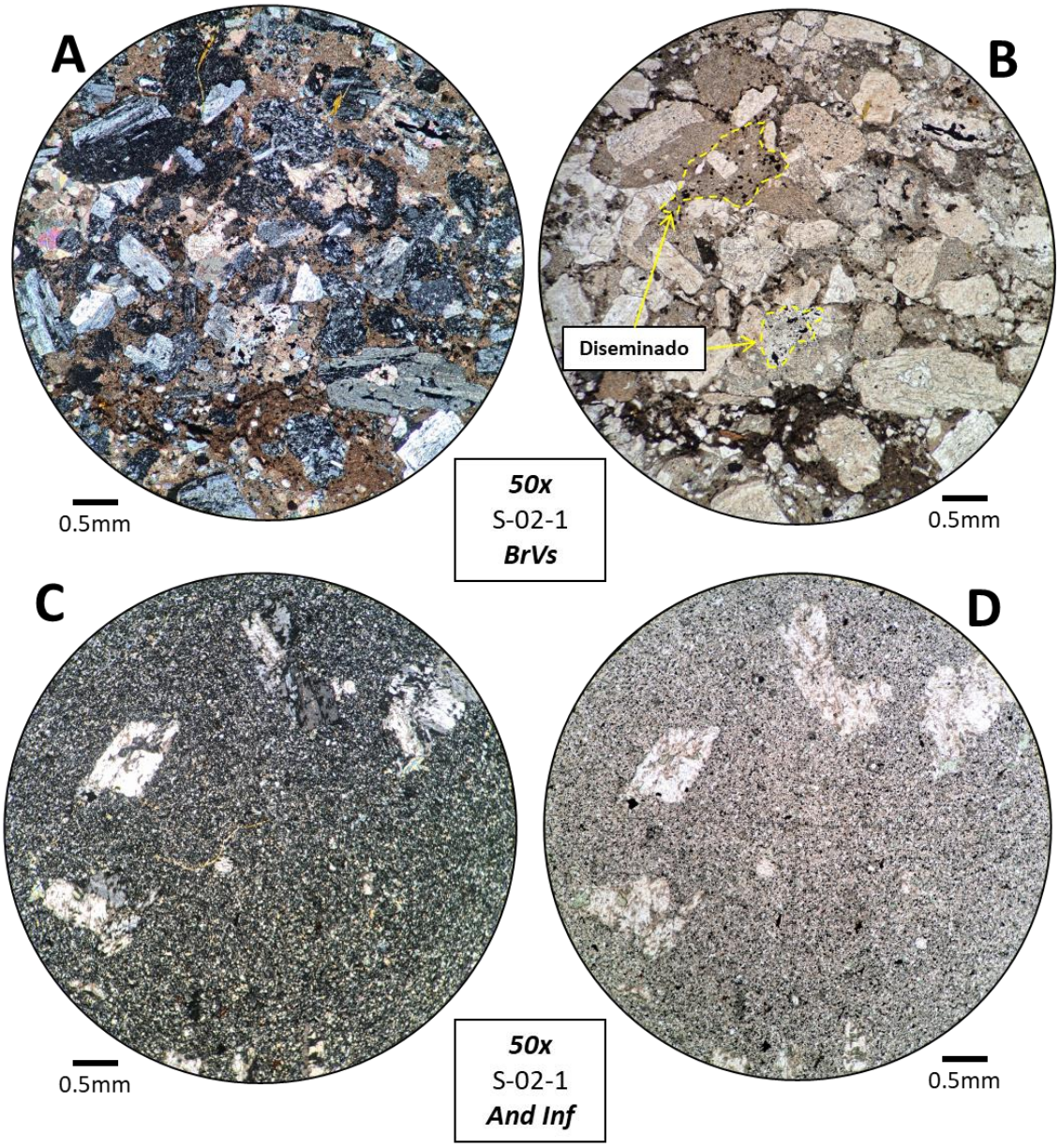

Figura A.2 Cortes transparentes del sondaje S-02-1. A) BrVs en nícoles cruzados. B) BrVs en nícoles paralelos. C) Andesita inferior en nícoles cruzados. D) Andesita inferior en nícoles paralelos.

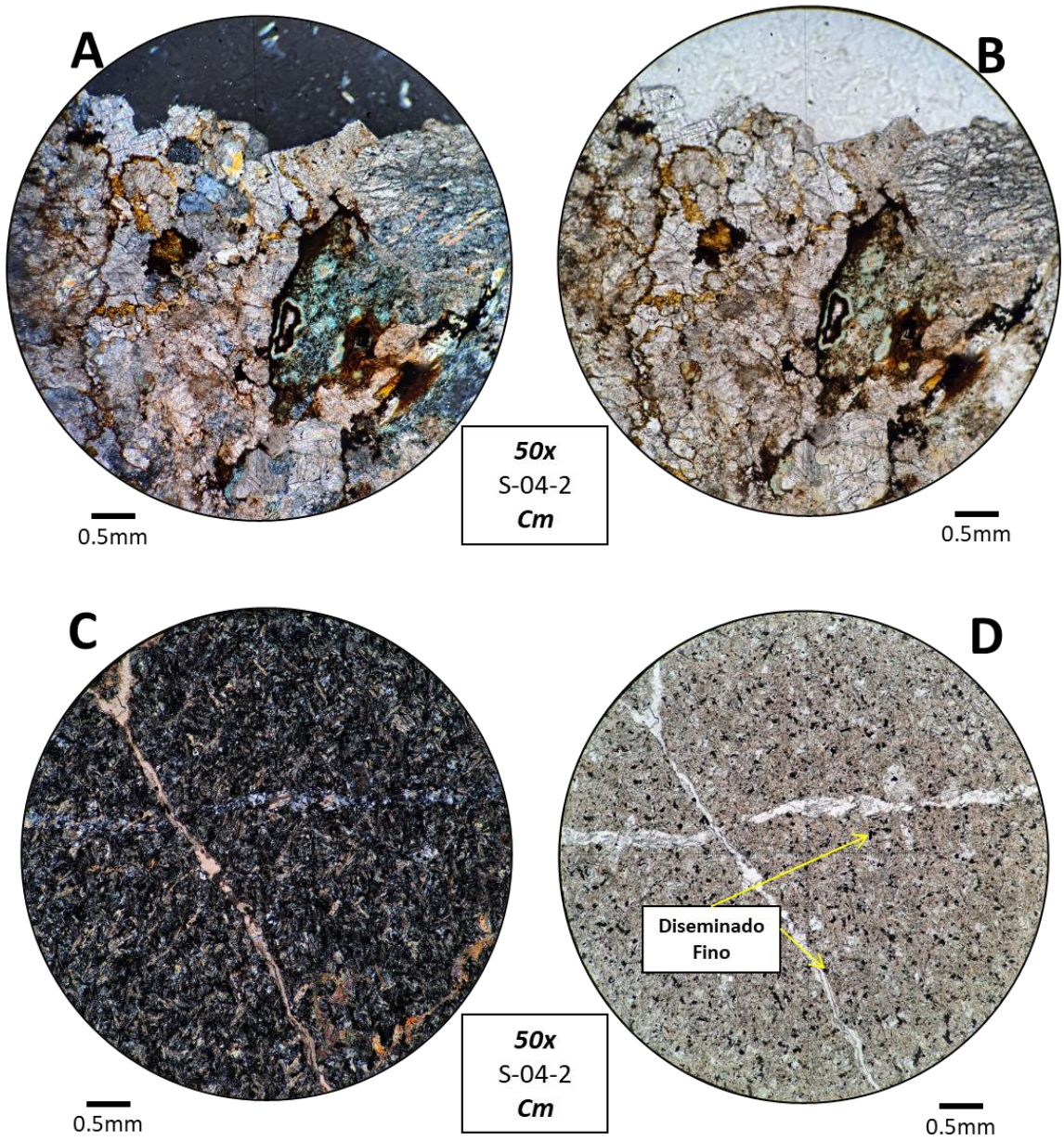

Figura A.3 Cortes transparentes de la unidad Calizas Margosas del sondaje S-04-2. A) Cm superficiales en nícoles cruzados. B) Cm superficiales en nícoles paralelos. C) Cm en profundidad en nícoles cruzados. D) Cm en profundidad en nícoles paralelos.

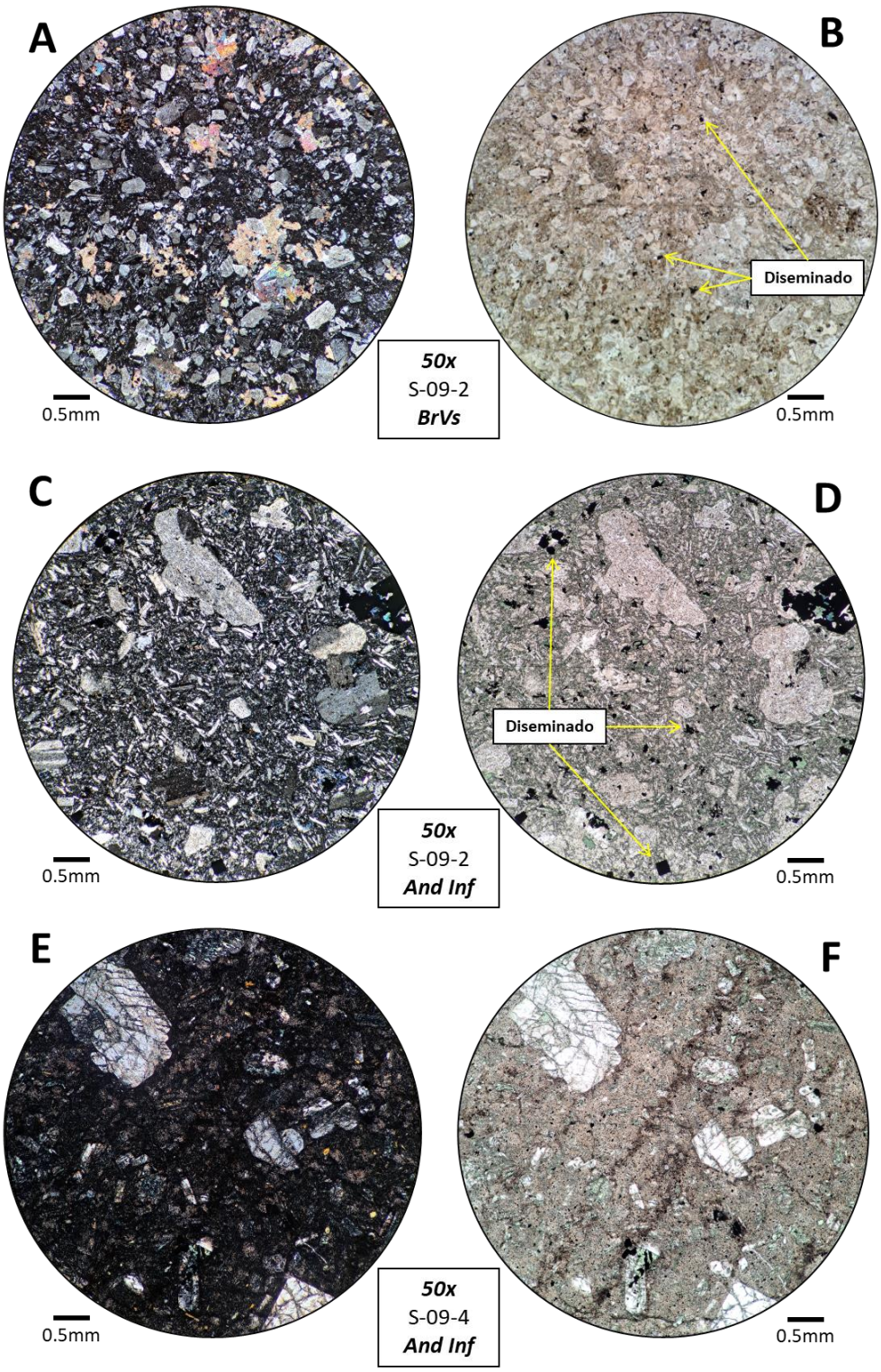

Figura A.4 Cortes transparentes del sondaje S-09-2. A-B) Brecha Volcanosedimentaria en nícoles cruzados y paralelos respectivamente. C-D) Andesita Inferior de en nícoles cruzados y paralelos. E-F) Andesita inferior del sondaje S-09-4 en nícoles cruzados y paralelos.

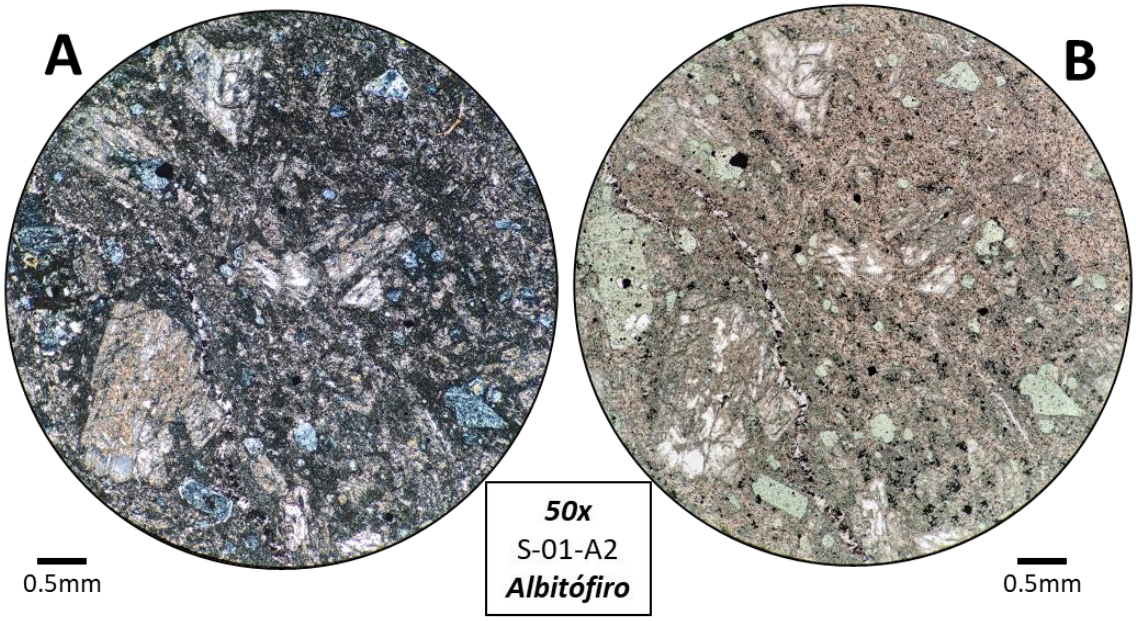

Figura A.5 Cortes transparentes del sondaje S-01-A2 correspondientes al Albitófiro. A) nícoles cruzados. B) nícoles paralelos.

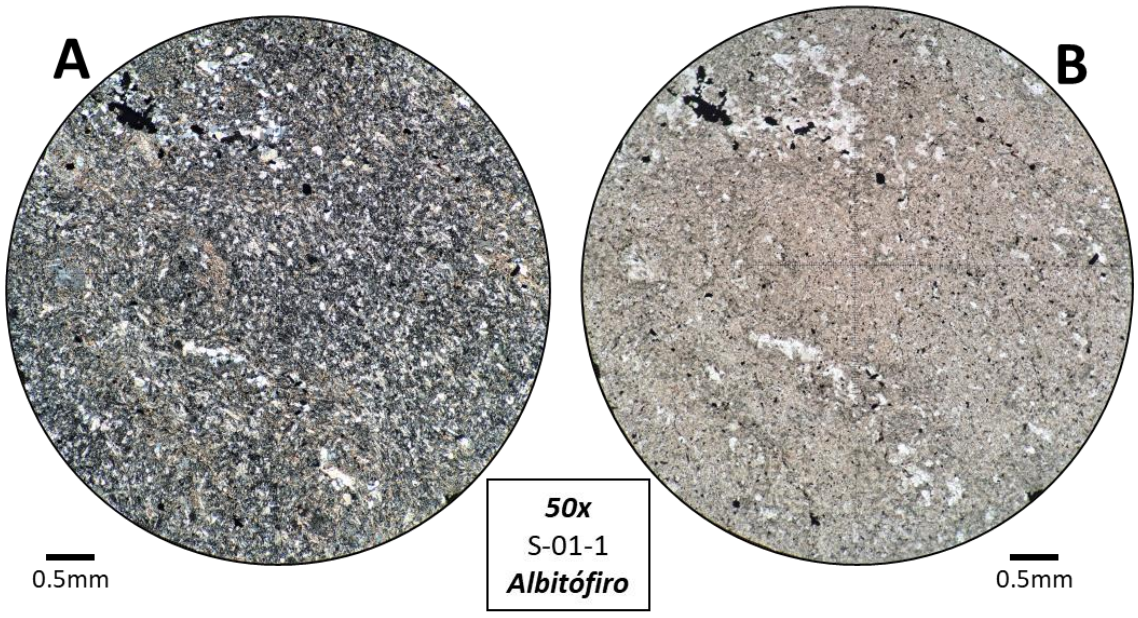

Figura A.6 Cortes transparentes del sondaje S-01-1 correspondientes al Albitófiro. A) nícoles cruzados. B) nícoles paralelos.

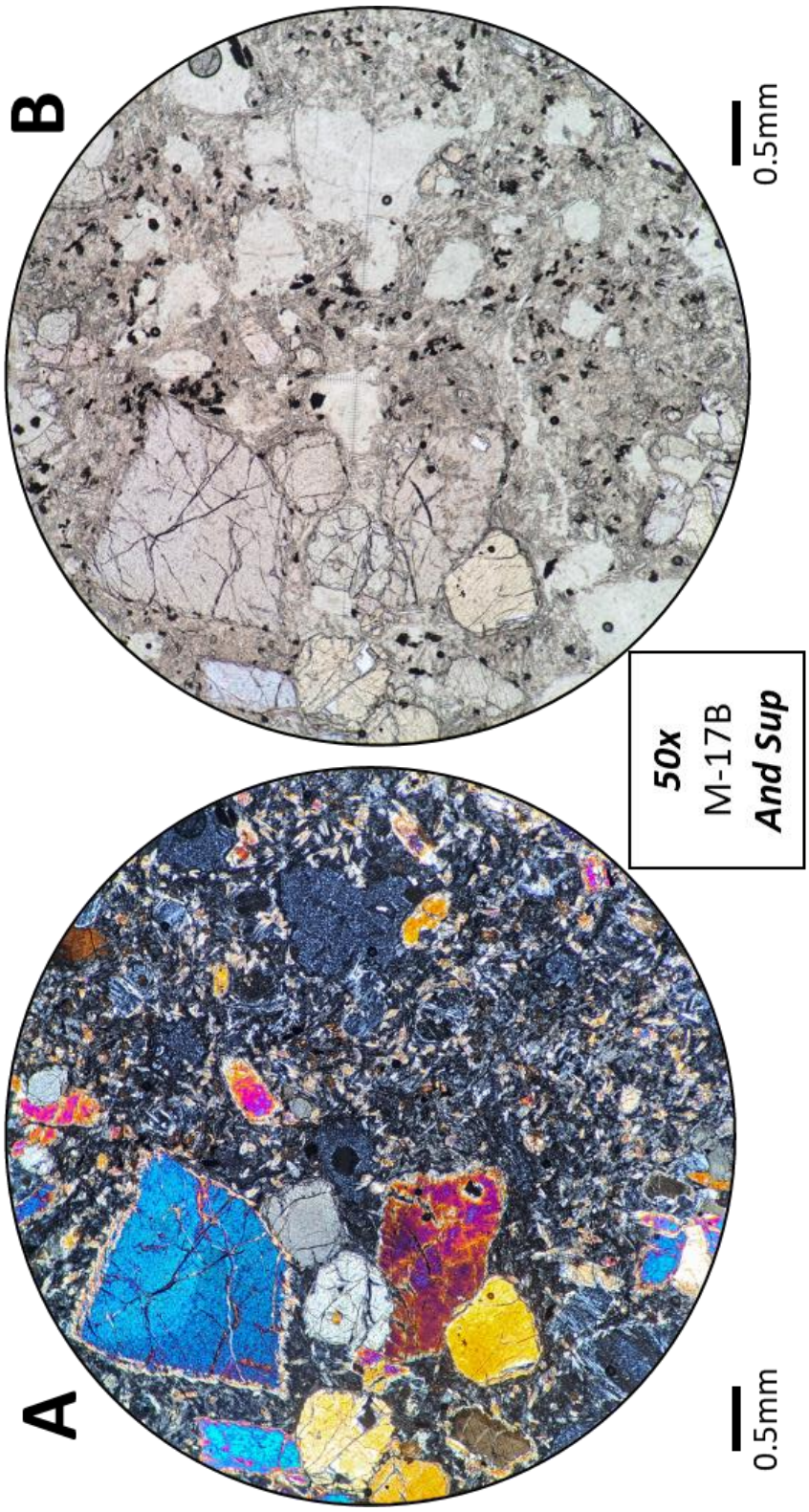

Figura A.7 Corte transparente del sondaje M-17B en el metro 332.65, correspondiente a la litología de Andesitas Superiores. A) Vista en nícoles cruzados. B) Vista en nícoles paralelos.

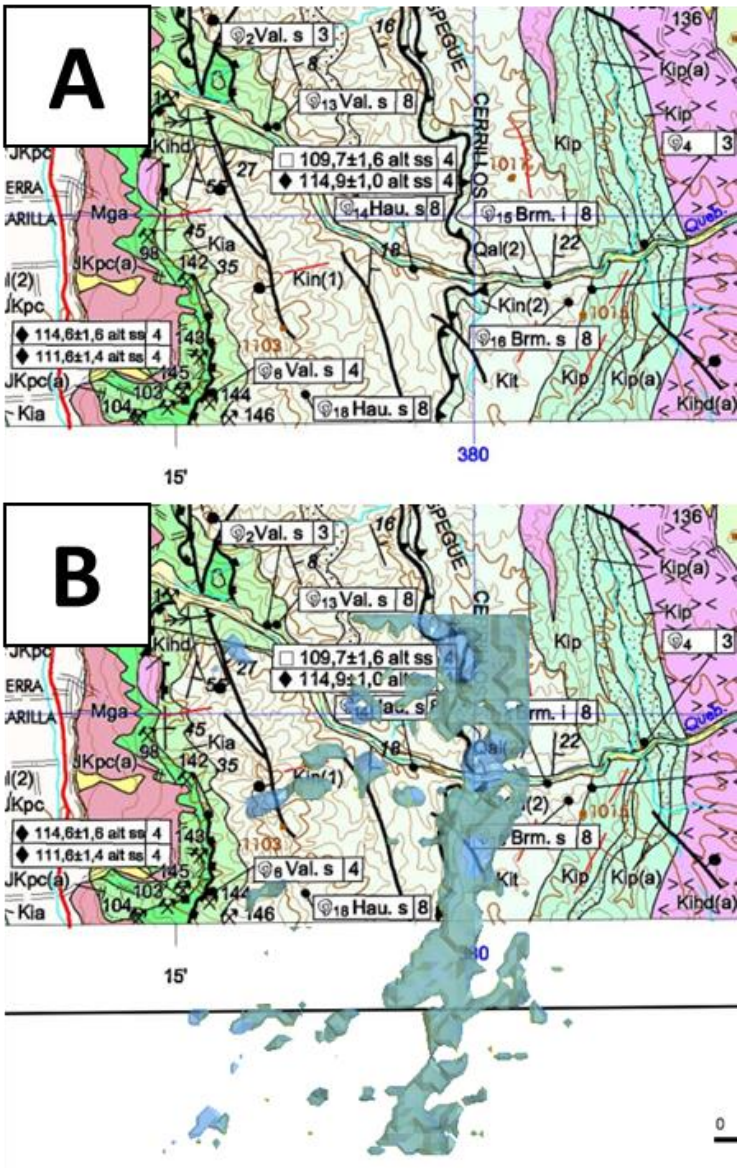

Figura A.8 Correlación espacial entre zona superficial de baja resistividad vista en planta y la traza de la falla inversa "Despegue Cerrillos". A) Extracto de la carta de Copiapó. B) Comparación de carta y modelo de resistividad. Mapa base extraído de la Carta Copiapó creado por Arévalo (2005).

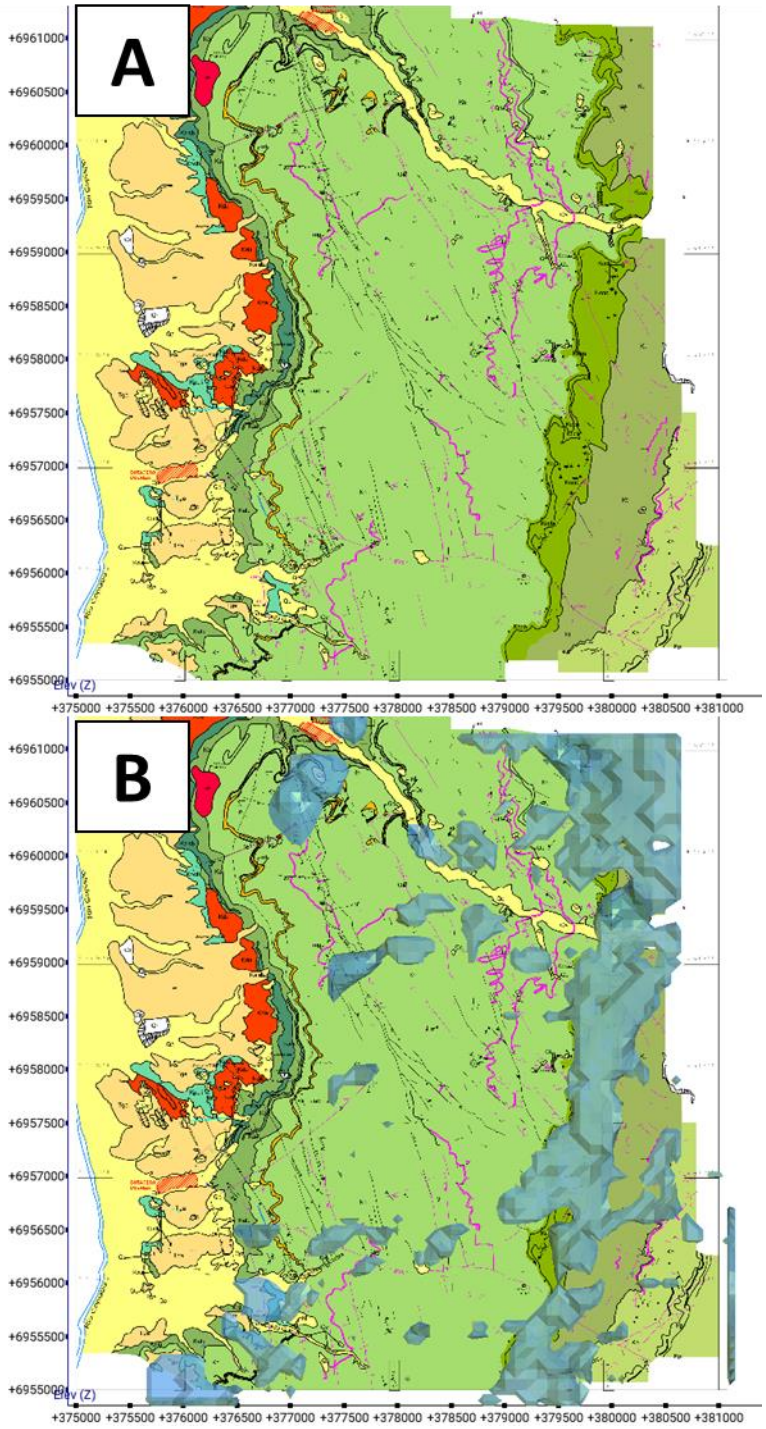

Figura A.9 A) Mapa geológico-estructural de Quebrada Meléndez-Quebrada Cobriza, S.C.M. Carola. B) Modelo de resistividad superficial visto en planta en comparación con mapa geo-estructural, donde se muestra una clara correlación espacial entre la unidad NORTE-SUR denominada "Kccc".

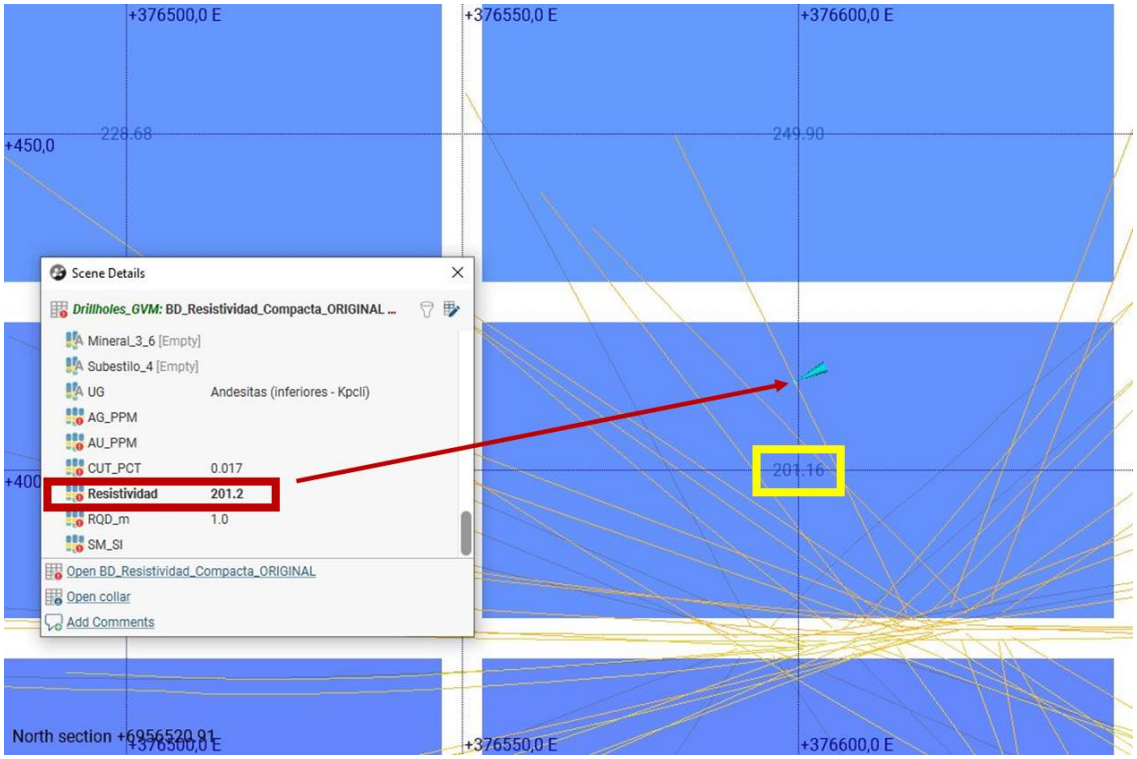

Figura A.10 Modelo de bloques de resistividad eléctrica en azul. Líneas amarillas y claras representan los sondajes a validar. En el rectángulo amarillo se señaliza el valor de resistividad del bloque. La flecha roja apunta el tramo del sondaje analizado y el rectángulo rojo señala el valor de resistividad.

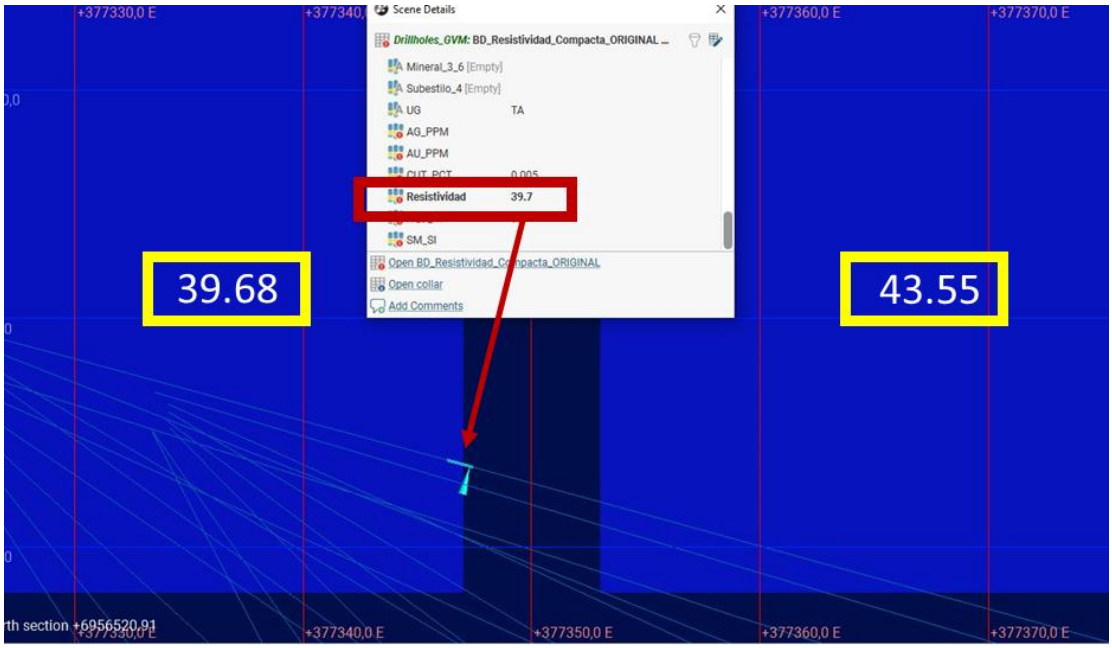

Figura A.11 Modelo de bloques de resistividad eléctrica en azul. El rectángulo amarillo destaca el valor de resistividad. El rectángulo rojo y flecha roja señalan el valor y tramo del sondaje analizado. Se selecciona un tramo cercano al bloque izquierdo para validar que toma el valor del bloque más cercano.

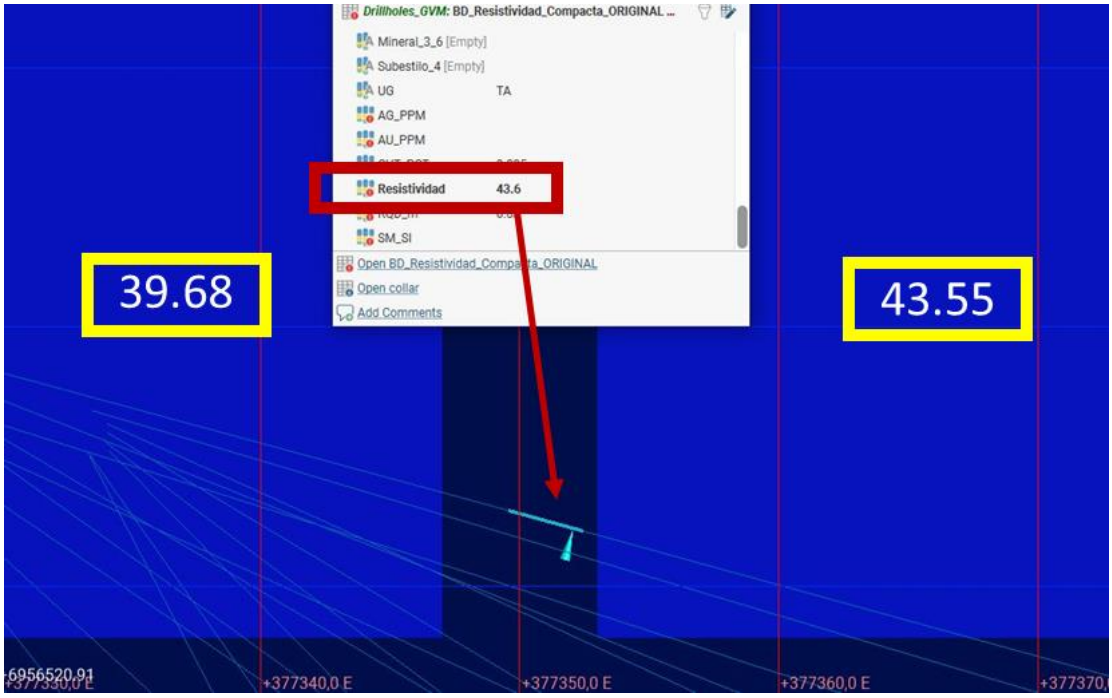

Figura A.12 Modelo de bloques de resistividad eléctrica en azul. El rectángulo amarillo destaca el valor de resistividad. El rectángulo rojo y flecha roja señalan el valor y tramo del sondaje analizado. Se selecciona un tramo cercano al bloque derecho para validar que toma el valor del bloque más cercano.