



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**MODELO DE EXPLORACIÓN MAGNÉTICA BASADO EN
ESTUDIO DE MAGNETOMETRÍA AÉREA CON DRON EN
LAS DEPENDENCIAS DE LA SCM CAROLA, TIERRA
AMARILLA, 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

Profesional tutor: María Montserrat Corvalán Sekul

Felipe Ignacio Viñales Lazo

Copiapó, Chile 2024

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a la SCM Carola por darme la oportunidad de realizar mi trabajo de memoria, y práctica profesional, en sus instalaciones. Además, quiero reconocer al equipo de la Gerencia de Geología, que con su buena disposición, compañerismo y apoyo constante hicieron que este proyecto fuera posible y, además, una experiencia muy enriquecedora.

A mi familia, y en especial a mis padres, les debo el mayor agradecimiento. Su cariño, esfuerzo y apoyo incondicional han sido el motor que me ha permitido avanzar y completar este trabajo. Todo lo que me han enseñado y los valores que me inculcaron se reflejan en cada paso que doy.

Por último, quiero agradecer a mi profesor guía, Dr. Jaime Araya Vargas, por ser un pilar esencial en este proceso. Su dedicación, paciencia y conocimientos fueron clave para llevar a cabo este proyecto y convertirlo en una experiencia que recordaré siempre con gratitud.

ÍNDICE

RESUMEN.....	17
ABSTRACT.....	18
CAPÍTULO 1. MARCO INTRODUCTORIO	19
1.1 Introducción	19
1.2 Problema de investigación	20
1.3 Hipótesis.....	21
1.4 Objetivos	21
1.4.1 Objetivo general.....	21
1.4.2 Objetivos específicos	21
1.5 Metodología	22
1.6 Ubicación	22
1.7 Trabajos anteriores	24
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	28
2.1 Conceptos básicos y unidades de geomagnetismo.....	28
2.1.1 Densidad de flujo, intensidad de campo y permeabilidad magnética	28
2.1.3 Magnetización (M).....	29
2.1.3.1 Magnetización inducida (M_i)	30
2.1.3.2 Susceptibilidad magnética (κ).....	30
2.1.3.3 Magnetización remanente (M_r)	30
2.2 Propiedad magnética de las rocas y minerales.....	31
2.2.1 Diamagnetismo	32
2.2.2 Paramagnetismo	33

2.2.3 Ferromagnetismo.....	33
2.2.4 Magnetismo de las rocas	35
2.3 Campo magnético terrestre	37
2.3.1 Variaciones temporales del campo magnético de la Tierra	40
2.4 Medición de la intensidad del campo magnético	44
2.4.1 Magnetómetros.....	45
2.4.2 Práctica de la prospección magnética	46
2.4.3 Productos magnéticos.....	48
2.4.3.1 Intensidad magnética total (IMT).....	48
2.4.3.2 Anomalías magnéticas	52
2.4.3.3 Reducción al polo (RTP).....	53
2.4.3.4 Señal analítica (SA).....	54
2.4.3.5 Inversión del vector de magnetización (MVI)	56
CAPÍTULO 3. MARCO GEOLÓGICO	58
3.1 Marco geológico regional	58
3.2. Geología del distrito Candelaria-Punta del Cobre	62
3.2.1. Unidades estratificadas.....	64
3.2.2. Unidades intrusivas	69
3.2.3. Estructura	72
3.3 Geología de la mina Carola.....	76
3.3.1. Unidades litológicas	76
3.3.1.1. Unidad Andesitas Inferiores.....	80
3.3.1.2 Unidad Albitófiro	82
3.3.1.3 Unidad Sedimentos Rojos brechizados.....	83

3.3.1.4 Unidad Tobas de Agustina.....	84
3.3.1.5 Unidad Sedimentos de Flujo laminados.....	85
3.3.1.6 Unidad Andesitas Superiores	86
3.3.1.7 Unidad Brecha volcanosedimentaria.....	87
3.3.1.8 Unidad Calizas margosa.....	89
3.3.1.9 Diques Lamprofiricos.....	89
3.3.1.10 Diorita	90
3.3.2 Estructura	90
3.3.3 Mineralización.....	91
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	96
4.1 Revisión bibliográfica	96
4.2. Recopilación de datos petrofísicos, magnéticos y geológicos	97
4.2.1 Selección de sondajes.....	97
4.2.2 Medición de susceptibilidad magnética	99
4.2.3 Interpolación de datos de modelos MVI y susceptibilidad en tramos de sondajes estratégicos.....	101
4.2.4 Generación de la base de datos	102
4.3 Análisis de relación geológica-magnética.....	103
4.3.1 Generación de figuras de análisis estadístico	104
4.3.2 Generación de secciones en modelo litológico, MVI y susceptibilidad	104
4.3.3 Análisis de cortes transparentes en microscopio	104
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....	106
5.1 Rangos de susceptibilidad magnética por litologías	106
5.1.1 Susceptibilidad magnética de unidades geológicas.....	106

5.1.2 Susceptibilidad magnética según intensidad de alteración	108
5.1.2 Susceptibilidad magnética en andesitas inferiores y albitófiro	111
5.1.2.1 Susceptibilidad magnética según sector.....	111
5.1.2.2 Susceptibilidad magnética según intensidad de alteración	113
5.2 Distribución estadística de los valores de susceptibilidad magnética	115
5.2.1. Susceptibilidad magnética para Andesitas Inferiores y Albitófiro	115
5.2.2 Susceptibilidad magnética para rangos de leyes de Cu.....	119
5.3 Correlación de la susceptibilidad magnética con otros parámetros	122
5.3.1 Susceptibilidad magnética medida y modelos geofísicos (MVI y susceptibilidad)	123
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN.....	126
6.1 Alcances y limitaciones del estudio	126
6.1.1 Área del levantamiento magnético.....	126
6.1.2 Ubicación de sondajes.....	126
6.1.3 Falta de información en sondajes seleccionados.....	127
6.1.4 Escala de muestras y modelos comparados	127
6.2 Relación de la susceptibilidad magnética con otros parámetros.	128
6.2.1 Susceptibilidad magnética de litologías y alteraciones.....	128
6.2.2 Susceptibilidad magnética y leyes de cobre.....	133
6.2.3 Relación entre valores de susceptibilidad magnética medida y valores de modelos geofísicos (MVI y susceptibilidad).....	134
6.2.4 Susceptibilidad magnética medida y profundidad	135
6.3 Interpretación geológica de modelos geofísicos MVI y susceptibilidad	135
6.3.1. Significado mineralógico de modelos MVI y SM.	138

6.3.2 Distribución de unidades geológicas.....	144
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	166
8. REFERENCIAS	168
ANEXOS.....	176
ANEXO A. Procedimiento de interpolación de datos de modelos MVI y susceptibilidad en tramos de sondajes estratégicos.....	176
ANEXO B: Procedimiento de generación de secciones en modelo litológico, MVI y susceptibilidad.....	180
Modificación en la escala de colores para el modelo MVI.....	180
Generación de secciones	183
ANEXO C: Matriz de correlación de Pearson	185

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación del área de estudio. A la izquierda se encuentra una imagen satelital donde se delimitan las concesiones unificadas de la SCM Carola, y a la derecha una representación gráfica del mapa de Chile con la ubicación relativa de la concesión (elaboración propia a través de software QGIS ©).....	23
Figura 1.2. Ruta de acceso al sector norte del área de estudio (elaboración propia a través del software Google Earth Pro ©).....	24
Figura 2.1. Suma vectorial de intensidades de magnetización inducida y remanente (modificado de Reynolds, 2011).	31
Figura 2.2. Diferentes tipos de comportamiento magnético. Las flechas grandes de color negro indican el campo aplicado, mientras que las flechas grandes de color blanco indican la magnetización del material bajo el campo aplicado (lado izquierdo) o en ausencia del campo (lado derecho) (Caballero, 2011).....	32
Figura 2.3. Relación entre el magnetismo y la temperatura de Curie en la magnetita (Lowrie, 2007).....	34
Figura 2.4. Susceptibilidades de rocas y minerales ($\kappa \times 10^6$ unidades SI). (d) = material diamagnético; (o) = mena de Fe; (m) = con minerales magnéticos (Reynolds, 2011). ...	36
Figura 2.5. Valores de susceptibilidad. (a) Valores medios y rangos de la susceptibilidad magnética de algunos tipos de rocas comunes, y (b) susceptibilidades de algunos minerales importantes (Lowrie, 2007).	37
Figura 2.6. El campo debido a un dipolo geocéntrico inclinado (Reynolds, 2011).	38
Figura 2.7. El campo debido a un dipolo geocéntrico inclinado (Gubbins y Herrero-Bervera, 2007).....	39
Figura 2.8. El campo magnético total vectorial se puede definir como (a) tres componentes ortogonales (norte horizontal, este horizontal y vertical) o (b) como la magnitud escalar del campo total, F y dos ángulos, la inclinación desde la horizontal, I, y la declinación desde el norte (geográfico) verdadero, D. (Reeves, 2005).	40
Figura 2.9. Espectro de amplitud de las variaciones geomagnéticas (Constable, 2016).41	
Figura 2.10. Vista esquemática de las fuentes geomagnéticas. La corriente helicoidal y el viento solar no están dibujados a escala (Constable y Constable, 2004).	42
Figura 2.11. Variaciones temporales de IMT del campo geomagnético. A) variaciones diurnas, b) tormenta magnética y c) micropulsaciones (Dentith y Mudge, 2014).	44
Figura 2.12. Trayectorias de vuelo típicas de los levantamientos aéreos. (a) Levantamiento con líneas de medición adyacentes voladas en direcciones alternas, y (b) levantamiento en formación de hipódromo. En ambos casos, las líneas de enlace	

perpendiculares se vuelan con una separación de, por lo general, 10 veces la separación de la línea de prospección (Dentith y Mudge, 2014).	47
Figura 2.13. Intensidad magnética total medida en una superficie horizontal sobre una esfera (e) magnetizada por campos inductores con diferente inclinación. (a) Polar, inclinación = 90°. (b) Hemisferio norte, inclinación = +45°. (c) Ecuador, inclinación = 0°. (d) Hemisferio sur, inclinación = 45° (Dentith y Mudge, 2014).	50
Figura 2.14. Ilustraciones esquemáticas de los campos magnéticos inducidos de una fuente esférica con magnetización total paralela a la dirección del campo magnético total en ese punto. (a) En el polo norte magnético, (b) latitud media en el hemisferio norte, (c) el ecuador magnético y (d) latitud media en el hemisferio sur. Se muestran las variaciones en TMI a lo largo del perfil principal sobre la fuente resultantes de la suma vectorial del campo (geomagnético) de la Tierra con el de la fuente y el campo magnético inducido. La intensidad del campo geomagnético es muchas veces mayor que la de la fuente, pero aquí se ha reducido para mayor claridad (Dentith y Mudge, 2014).	52
Figura 2.15. Anomalía magnética generada en el hemisferio norte por un cuerpo magnetizado con magnetización total paralela a la dirección del campo magnético de la Tierra (Geomaster: geofísica, s.f).	53
Figura 2.16. Ejemplo de una anomalía ITM (izquierda) versus a su respectiva anomalía de reducción al polo (RTP) (derecha) (FCAG, 2023).	54
Figura 2.17. Esquema del método de señal analítica. Las derivadas horizontales y verticales se calculan a partir de la anomalía del campo total sobre un prisma cuadrado y se combinan para producir el valor absoluto de la señal analítica. Las ubicaciones de los máximos y la forma de esta señal se pueden utilizar para encontrar los bordes del cuerpo y las estimaciones de profundidad correspondientes (Roest et al., 1992).	55
Figura 2.18. Mapa de intensidad magnética total (TMI) y de señal analítica (AS) (MacLeod y Ellis, 2013).	55
Figura 2.19. Modelos generados en estudios magnéticos realizados en el Cuadrilátero Ferrífero, situado en el estado de Minas Gerais, Brasil. A) comparación del modelo de susceptibilidad convencional (arriba) con el modelo MVI (abajo), y b) vista en perspectiva 3D de los modelos de susceptibilidad y MVI mirando hacia el Este a través de la sección A-A' (el vector de magnetización se muestra como conos en ambos casos junto con las isosuperficies indicadas) (MacLeod y Ellis, 2013).	56
Figura 2.20. Representación del subsuelo en la discretización regular para realizar la inversión del vector de magnetización (MVI), donde el subsuelo se divide en celdas cuboides, donde cada celda está magnetizada por un vector de magnetización total homogéneo (TMV). Se tiene x (oeste-este) y (sur-norte), z (arriba-abajo) y centro (Liu et al., 2017).	57
Figura 3.1. Principales trazas de falla que conforman los sistemas de fallas de Atacama y Domeyko y del sistema de fallas del límite de la Cordillera de la Costa y/o de la Precordillera de Copiapó. También se indican las principales minas y yacimientos de magnetita-apatita y óxido de Fe Cu-Au (Arévalo et al., 2006).	60

Figura 3.2. Evolución de cuencas de trasarco. a. Extensión y formación de semigrábenes con depositación marina sintectónica y magmatismo sinextensional; b. Somerización de la cuenca y depositación continental; c. Inversión; d. Alzamiento del basamento por sobre el nivel de los sedimentos. Achurado es el basamento, punteado corresponde a los depósitos sedimentarios (Skarmeta, 1991).....	61
Figura 3.3. Columna estratigráfica del distrito con las principales edades geocronológicas y paleontológicas (del Real et al., 2018).....	63
Figura 3.4. Mapa geológico y secciones del distrito Candelaria-Punta del Cobre, mostrando las principales intrusiones del batolito del Cretácico Inferior y las estructuras de la adyacente Precordillera de Copiapó. En las secciones transversales se encuentra en el contacto superior del yacimiento (modificado de Arévalo et al., 2006).	75
Figura 3.5. Eventos tectónicos y de mineralización interpretados para el distrito Candelaria-Punta del Cobre (del Real et al., 2018).....	76
Figura 3.6. Columna estratigráfica de Mina Carola, extraída de informe geológico y mineralógico de la propiedad (modificado de SCM Carola, 2019).	77
Figura 3.7. Columna estratigráfica tipo de Adriana Norte con las unidades litológicas presentes en el sector (Fernández, 2024).	78
Figura 3.8. Extracto de carta geológica Copiapó (Arévalo, 2005a) y Los Loros (Arévalo, 2005b) con la ubicación relativa de las concesiones de SCM Carola. Con líneas rojas se indican las concesiones de SCM Carola y con líneas punteadas azules el área abarcada por el estudio de magnetometría aérea realizada por Southernrock geophysics.	79
Figura 3.9. Sección N-S representativa de la geología presente en las concesiones de SCM Carola, donde se muestran las principales unidades geológicas, contactos y líneas de fallas.	80
Figura 3.10. Vista 3-D hacia el NE, donde se muestra la mineralización controlada por las fallas mayores. (1) Andesitas Inferiores (Kpcli), (2) Albitófiro, (3) Tobas de Agustina, (4) Andesitas superiores (Kpcls) y Brecha volcanosedimentaria (BrVs), (5) Grupo Chañarcillo, (6) Aluvios y/o Coluvios (SCM Carola, 2019).....	95
Figura 4.1. Mapa con la ubicación de sondajes seleccionados, total de sondajes realizados en mina Carola, distribución de los distintos sectores que conforman mina Carola (cuadros con fondo rosado) y distribución de los sectores determinados para este estudio (diferenciados por color e indicados por su nombre a la izquierda del mapa). En rojo se presenta la envolvente de las concesiones de SCM Carola, y con líneas punteadas el área cubierta por las mediciones magnéticas realizadas por la empresa geofísica Southernrock (elaboración propia, utilizando software Leapfrog Geo ©).	98
Figura 4.2. Compilación de tablas con sector, nombre y tramo de sondajes seleccionado donde se realizaron las mediciones de susceptibilidad magnética (elaboración propia, utilizando software Microsoft Excel ©).....	99
Figura 4.3. Foto que muestra el proceso de medición de susceptibilidad magnética (izquierda) e imagen referencial del susceptibilímetro KT 20 Terraplus (derecha).	100

Figura 4.4. Foto de la pantalla del susceptibilímetro, donde se muestra la configuración utilizada para las mediciones de susceptibilidad magnética.	100
Figura 4.5. Fragmento de sondaje (NQ) referencial donde se realizó logueo geológico y medición de susceptibilidad magnética. La muestra corresponde a una andesita con mineralización metálica de calcopirita, pirita, magnetita y mushketovita.	101
Figura 4.6. Captura de pantalla de extracto de la base de datos que compila datos de mediciones de susceptibilidad magnética (SM), logueo geológico, y de los modelos geofísicos.....	103
Figura 4.7. Cortes transparentes de Andesitas Inferiores y Albitófiro de sondajes realizados en SCM Carola.....	105
Figura 4.8. Microscopio petrográfico Olympus BX51 utilizado para análisis de cortes transparentes seleccionados.	105
Figura 5.1. (Izquierda) Tabla resumen con la cantidad de datos obtenidos por sector para el análisis estadístico. (Derecha) Gráfico indicando el porcentaje del total de datos que se obtuvo en cada sector.	106
Figura 5.2. Gráfico de cajas y bigotes (boxplot) realizado con los valores de susceptibilidad magnética (SM) medida en cada litología. (Elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).....	107
Figura 5.3. Gráficos de cajas y bigotes (boxplot) para cada alteración e intensidad según los valores de susceptibilidad magnética (SM) medida. Se presentan: a) SM en silicificación, b) SM en carbonitización, c) SM en cloritización, d) SM en alteración potásica, e) SM en alteración argílica y f) SM en alteración sericítica. (Elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).....	109
Figura 5.4. Gráficos de cajas y bigotes (boxplot) de susceptibilidad magnética (SM) medida para las litologías de Andesitas Inferiores y Albitófiro en cada sector. Se presentan: a) SM en Andesitas Inferiores sector norte b) SM en Albitófiro sector norte, c) SM en Andesitas Inferiores sector centro norte, d) SM en Albitófiro sector centro norte, e) SM en Andesitas Inferiores sector centro sur, f) SM en Albitófiro sector centro sur, g) SM en Andesitas Inferiores sector sur, h) SM en Albitófiro sector sur (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).....	112
Figura 5.5. Gráficos de cajas y bigotes (boxplot) de susceptibilidad magnética (SM) medida según el tipo e intensidad de alteración en Andesitas Inferiores y Albitófiro. Se presentan: a) SM de silicificación en Andesitas Inferiores, b) SM de silicificación en Albitófiro, c) SM de carbonitización en Andesitas Inferiores, d) SM de carbonitización en Albitófiro, e) SM de cloritización en Andesitas Inferiores, f) SM de cloritización en Albitófiro, g) SM de alteración potásica en Andesitas Inferiores, h) SM de alteración potásica en Albitófiro e i) SM de alteración argílica en Andesitas Inferiores (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).....	115
Figura 5.6. Histogramas de susceptibilidad magnética (SM) para litologías de Andesitas Inferiores y Albitófiro. Se presenta: a) SM en Andesitas Inferiores y b) SM en Albitófiro (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).....	116

Figura 5.7. Histogramas de susceptibilidad magnética (SM) para litologías de Andesitas Inferiores y Albitófiro para cada sector. Se presentan: a) SM en Andesitas Inferiores sector norte, b) SM en Albitófiro sector norte, c) SM en Andesitas Inferiores sector centro norte, d) SM en Albitófiro sector centro norte, e) SM en Andesitas Inferiores sector centro sur, f) SM en Albitófiro sector centro sur, g) SM en Andesitas Inferiores sector sur, h) SM en Albitófiro sector sur (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©). 118

Figura 5.8. Gráficos de dispersión de susceptibilidad magnética (SM) para valores de % de Cu. Se presenta: a) susceptibilidad magnética (SM) para % de Cu en todas las litologías, b) susceptibilidad magnética (SM) en % de Cu para Andesitas Inferiores, c) susceptibilidad magnética (SM) en % de Cu para Albitófiro, d) susceptibilidad magnética (SM) para % de Cu en todas las litologías del sector norte, e) susceptibilidad magnética (SM) para % de Cu en todas las litologías del sector centro norte, f) susceptibilidad magnética (SM) para % de Cu en todas las litologías del sector centro sur y g) susceptibilidad magnética (SM) para % de Cu en todas las litologías del sector sur (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©). 120

Figura 5.9. Histogramas de susceptibilidad magnética (SM) para rangos de valores de %Cu. Se presentan: a) SM en %Cu <0,1, b) SM en %Cu de 0,1 – 0,3, c) SM en %Cu de 0,3 – 0,8, d) SM en %Cu de 0,8 – 1,3 ye) SM en %Cu >1,3 (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©). 122

Figura 5.10. Gráficos de dispersión que compara el promedio de los valores de susceptibilidad magnética (SM) medida y los valores presentes en los modelos geofísicos MVI y susceptibilidad magnética (modelada). Se presentan: a) SM medida (promedio) vs SM modelada, b) SM medida (promedio) vs SM MVI modelo MVI y c) SM modelo Susceptibilidad vs SM MVI modelo MVI (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©). 124

Figura 5.11. Gráfico de dispersión de susceptibilidad magnética (SM) medida según la profundidad (m.s.n.m) a la que se encontraban los tramos de sondajes seleccionados para medición (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©). 125

Figura 6.1. Imagen referencial de las dimensiones de uno de los bloques en los que se componen los modelos geofísicos y el área que abarca un sondaje perforado (elaboración propia a través del software Leapfrog Geo ©). 128

Figura 6.2. Cortes transparentes de unidad geológica de Andesitas Inferiores. A la izquierda se observan los cortes en luz polarizada plana (LPP) y a la derecha en nicoles cruzados (NC). Se muestran indicados con flechas los siguientes minerales: plagioclasa (Plg), ortoclasa (Or), biotita primaria (Bt), biotita secundaria (Bt II), epidota (Ep), clorita (Cl), sericita (Ser), titanita (Ttn). 132

Figura 6.3. Cortes transparentes de unidad geológica de Albitófiro. A la izquierda se observan los cortes en luz polarizada plana (LPP) y a la derecha en nicoles cruzados (NC). Se muestran indicados con flechas los siguientes minerales: plagioclasa (Plg), ortoclasa (Or), cuarzo (Qz), epidota (Ep), clorita (Cl), sericita (Ser). 133

Figura 6.4. Vista en perspectiva (mirando hacia el SE) del modelo de susceptibilidad magnética entregado por Southernrock. a) Valores altos de modelo susceptibilidad (>0,004

SI); b) valores bajos de modelo susceptibilidad (<-0.007 SI). En líneas rojas se demarca la concesión de la SCM Carola. 137

Figura 6.5. Vista en perspectiva (mirando hacia el SE) del modelo MVI entregado por Southernrock. a) Valores altos de modelo MVI ($>0,006$ SI); b) valores bajos de modelo MVI ($<0,006$ SI). En líneas rojas se demarca la concesión de la SCM Carola. 138

Figura 6.6. Vista en planta de los cuerpos 3-D definidos por altos valores del modelo susceptibilidad magnética (escala de rojo a rosado) ($>0,004$ SI) y altos valores del modelo MVI (escala de blanco a anaranjado) ($>0,006$ SI). En líneas rojas se encuentra demarcada la concesión minera perteneciente a la SCM Carola (elaboración propia a través de software Leapfrog Geo ©). 139

Figura 6.7. Vista en planta de los cuerpos 3-D definidos por altos valores del modelo susceptibilidad magnética (escala de rojo a rosado) ($>0,004$ SI) y bajos valores del modelo MVI (azul) ($<0,006$ SI). En líneas rojas se encuentra demarcada la concesión minera perteneciente a la SCM Carola (elaboración propia a través de plataforma Leapfrog Geo ©). 141

Figura 6.8. Vista en planta de los cuerpos 3-D definidos por bajos valores del modelo susceptibilidad magnética (celeste) ($<-0,007$ SI) y altos valores del modelo MVI (escala de blanco a anaranjado) ($>0,006$ SI). En líneas rojas se encuentra demarcada la concesión minera perteneciente a la SCM Carola (elaboración propia a través de plataforma Leapfrog Geo ©). 143

Figura 6.9. Mapa con la traza de los sondajes estudiados y el total de sondajes realizados en mina Carola. En negro se presenta la envolvente de las concesiones de SCM Carola, en líneas punteadas azules el área cubierta por las mediciones magnéticas realizadas por la empresa geofísica Southernrock y en líneas rojas la traza de las secciones realizadas, junto con el nombre de la figura correspondiente a cada sección. (Elaboración propia, utilizando software Leapfrog Geo ©). 145

Figura 6.10. Secciones N-S del área con mayor densidad de sondajes de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (Susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de Susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia a través de la plataforma Leapfrog Geo ©). 149

Figura 6.11. Secciones NNE-SSW del área occidental de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (Susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de Susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia utilizando software Leapfrog Geo ©). 150

Figura 6.12. Secciones W-E del sector norte de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia utilizando software Leapfrog Geo ©). 152

Figura 6.13. Secciones W-E del sector centro-norte de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia utilizando software Leapfrog Geo ©).	153
Figura 6.14. Secciones W-E del sector centro sur de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (Susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de Susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia a través de la plataforma Leapfrog Geo ©).....	155
Figura 6.15. Secciones W-E del sector sur de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (Susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de Susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia a través de la plataforma Leapfrog Geo ©).....	156
Figura 6.16. Secciones NNE-SSW del área oriental de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (Susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de Susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia a través de la plataforma Leapfrog Geo ©).....	157
Figura 6.17. Secciones NNE-SSW del área central de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (Susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de Susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia a través de la plataforma Leapfrog Geo ©).....	158
Figura 6.18. Vista en planta de la proyección de los cuerpos 3-D definidos por valores altos del modelo MVI y susceptibilidad. Se superponen la imagen satelital, túneles de la mina y sondajes perforados. Cada cuerpo de interés con alta susceptibilidad MVI y susceptibilidad magnética se indica con una letra diferente. En líneas rojas se encuentra demarcada la concesión minera perteneciente a la SCM Carola (elaboración propia mediante software Leapfrog Geo ©).....	160
Figura 6.19. Vista 3-D (hacia el NE) del cuerpo definido por altos valores del modelo de susceptibilidad magnética, indicando los collares y trayectoria de los sondajes propuestos para explorar cada cuerpo de interés. Cada zona de interés se diferencia con una letra distinta (A, B, C, D y E) y los nombres de los sondajes se ubican en la parte superior de cada collar. En líneas rojas se encuentra demarcada la concesión minera perteneciente a la SCM Carola (elaboración propia mediante software Leapfrog Geo ©).	163
Figura 6.20. Imagen en planta de sondajes recomendados para la campaña de exploración, junto con fallas principales (que controlan mineralización) en rojo y secundarias en azul. Se indican el nombre de las fallas principales, nombre y ubicación de los sondajes, y el área de concesión minera de la SCM Carola contorneada en color rojo (elaboración propia a través de la plataforma Leapfrog Geo ©).....	165

Figura A.1. Proceso de exportación de datos de sondajes y modelos geofísicos (captura de pantalla desde software Leapfrog Geo ©).....	176
Figura A.2. Captura de pantalla del software Geoscience Analyst © con la base de datos de sondajes importada. La imagen 3D muestra la totalidad de los sondajes realizados en SCM Carola a la fecha y el collar de estos.....	177
Figura A.3. Menú de configuración “Desurvey Drillhole Logs” de software Geoscience Analyst © (Mira Geoscience Limited, 2024).....	177
Figura A.4. Captura de pantalla del software Geoscience Analyst © con la base de datos de sondajes y modelos geofísicos. La imagen 3D muestra la totalidad de los sondajes realizados en SCM Carola, el collar de los sondajes y el modelo MVI generado por Southernrock.	178
Figura A.5. Menú de configuración “Transfer Data” de software Geoscience Analyst © (Mira Geoscience Limited, 2024).	179
Figura A.6. Captura de pantalla del software Geoscience Analyst © indicando el proceso de exportación de datos. La imagen 3D muestra la totalidad de los sondajes realizados en SCM Carola y el collar de los sondajes con la interpolación de los datos del modelo MVI generado por Southernrock.	180
Figura B.1. Captura de pantalla de software Leapfrog Geo © donde se muestra en una lista el modelo MVI y las dos copias generadas.	180
Figura B.2. Captura de pantalla de software Leapfrog Geo © con el procedimiento para crear un nuevo color de mapa (“new colourmap”).	181
Figura B.3. Captura de pantalla de software Leapfrog Geo © con el procedimiento de modificación de gradientes de colores (arriba), y aplicación de valores mínimos y máximos (abajo).....	182
Figura B.4. Captura de pantalla de software Leapfrog Geo © con las copias de modelo MVI con las nuevas gradientes de color (arriba) y los filtros aplicados para cada uno (abajo).	183
Figura B.5. Captura de pantalla de software Leapfrog Geo © con el procedimiento de creación de secciones.	184
Figura B.6. Captura de software Leapfrog Geo © con secciones creadas y la opción de selección para generar el diseño de impresión.	184
Figura B.7. Captura de software Leapfrog Geo © con modelos (geológico, MVI y susceptibilidad) y base de datos de sondajes añadidos al diseño de impresión para generar las secciones (parte superior). La imagen inferior muestra como exportar la sección generada.	185
Figura C.1. Matriz de correlación de Pearson basado en valores de susceptibilidad magnética medida (SM Prom) en sondajes seleccionados. (Elaboración propia a través de plataforma Excel ©).....	185

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6.1. Tabla resumen de la explicación magnética y geológica de las combinaciones de valores del modelo MVI y susceptibilidad.....	159
Tabla 6.2. Tabla con zonas de interés recomendadas. Se indica su prioridad, observaciones y recomendaciones ante una tentativa etapa de exploración.....	162
Tabla 6.3. Tabla con información sobre los sondajes de exploración propuestos para cada cuerpo de alta susceptibilidad magnética.....	164

RESUMEN

En esta tesis se caracterizaron las propiedades magnéticas del yacimiento Carola, ubicado en la comuna de Tierra Amarilla, con el fin de identificar la señal magnética de zonas mineralizadas con posible interés económico. La caracterización de las unidades geológicas se basó en mediciones de susceptibilidad magnética realizadas en 10 sondajes representativos del yacimiento, las cuales se compararon con datos geológicos, geoquímicos y con modelos preexistentes de susceptibilidad magnética y de magnitud del vector de magnetización (MVI) obtenidos de la inversión de un levantamiento magnético realizado con dron. Las mediciones realizadas en sondajes muestran que las unidades mineralizadas del yacimiento, Andesitas Inferiores y Albitófiro, presentan mayoritariamente valores moderados a altos de susceptibilidad magnética (valores promedio de $\sim 0,1$ y $\sim 0,03$ SI, respectivamente), que se distinguen de los valores comparativamente menores que predominan en las unidades estériles. Esta distinción es consistente con la correlación espacial observada entre la distribución de las unidades mineralizadas y los altos valores de los modelos de MVI y susceptibilidad magnética. En base a los resultados obtenidos (comparación de mediciones de susceptibilidad magnética en sondajes, datos geológicos, geoquímicos y modelos geofísicos), se recomienda explorar cinco sectores donde el modelo MVI y el modelo de susceptibilidad magnética presentan coincidentemente valores altos. Finalmente, se diseñó una campaña de sondajes dirigida a las zonas de interés interpretadas, preferentemente en fallas principales y secundarias controladoras de mineralización.

MAGNETOMETRÍA-ANOMALÍAS MAGNÉTICAS-EXPLORACIÓN MINERA-
DEPÓSITO IOCG-TIERRA AMARILLA

ABSTRACT

In this thesis, the magnetic properties of the Carola deposit, located in Tierra Amarilla, were characterized in order to identify the magnetic signal of mineralized zones of potential economic interest. The characterization of the geological units was based on magnetic susceptibility measurements made in 10 representative drill holes of the deposit, which were compared with geological and geochemical data and with pre-existing models of magnetic susceptibility and magnitude of the magnetization vector (MVI) obtained from the inversion of a magnetic survey carried out with a drone. Drillhole measurements show that the mineralized units of the deposit, Andesitas Inferiores and Albitófiro, have mostly moderate to high magnetic susceptibility values (average values of ~ 0.1 and ~ 0.03 SI, respectively), which are distinguishable from the comparatively lower values that predominate in the barren units. This distinction is consistent with the observed spatial correlation between the distribution of the mineralized units and the high values of the MVI and magnetic susceptibility models. Based on the results obtained (comparison of magnetic susceptibility measurements in drill holes, geological, geochemical data and geophysical models), it is recommended to explore five sectors where the MVI model and the magnetic susceptibility model present coincidentally high values. Finally, a drilling campaign was designed to target the interpreted zones of interest, preferably in main and secondary faults controlling mineralization.

MAGNETOMETRY-MAGNETIC ANOMALIES-MINING EXPLORATION-IOCG
DEPOSIT-TIERRA AMARILLA

CAPÍTULO 1. MARCO INTRODUCTORIO

1.1 Introducción

Dado que la mayoría de los yacimientos minerales superficiales ya han sido identificados, la exploración minera se ha orientado hacia objetivos económicos ubicados a mayor profundidad y bajo secuencias de cobertura cercanas a la superficie. Esta evolución en la estrategia de exploración ha impulsado el uso de técnicas geofísicas, donde se requiere obtener interpretaciones más precisas desde una perspectiva geológica. En este contexto, es crucial considerar las propiedades petrofísicas de las rocas que cubren o albergan los cuerpos mineralizados, con el fin de optimizar la detección y caracterización de recursos minerales subyacentes (Dentith et al., 2020). Los estudios magnéticos proporcionan información sobre la distribución de la magnetización de la corteza terrestre, de escala global a local. La magnetometría aérea es uno de los métodos geofísicos más utilizados en exploración de minerales, ya que los patrones de anomalías revelados por tales estudios pueden usarse como herramientas para mapear litologías, zonificación metamórfica y alteración hidrotermal, así como para identificar estructuras que puedan controlar el paso de magmas o fluidos hidrotermales asociados a mineralización. Las anomalías magnéticas pueden proporcionar una indicación directa de ciertos tipos de depósito de mineral o sistema mineralizado como, por ejemplo, depósitos de magnetita y apatito de tipo Kiruna; así como también entregar indicadores indirectos relacionados a depósitos de óxido de hierro, cobre y oro (IOCG); depósitos de pórfido de cobre ricos en oro; depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos que contienen magnetita y/o pirrotina (Clark, 2014).

El distrito Candelaria-Punta del Cobre es el que más recursos conocidos tiene del cinturón IOCG chileno, con más de 13 Mt de cobre contenido (del Real et al., 2018). Candelaria es el yacimiento más importante del distrito, que incluye otros productores

menores (Carola, Punta del Cobre, Mantos de Cobre, Candelaria Norte, Granate, Alcaparrosa, Atacama Kozan, Las Pintadas, Santos) (del Real et al., 2018). Los depósitos IOCG comprenden un clan amplio y mal definido de estilos de mineralización que, como su nombre lo indica, se agrupan principalmente porque contienen óxidos de hierro (magnetita y/o hematita) como acompañantes principales de mineralización de cobre \pm oro (Sillitoe, 2003).

1.2 Problema de investigación

La mina Carola y concesiones aledañas, ubicadas en la comuna de Tierra Amarilla, son explotadas por la Sociedad Contractual Minera Carola (SCM Carola). La mineralización conocida para estas concesiones se describe como un IOCG (Fernández, 2024). Durante el último trimestre de 2023, ante la perspectiva de un futuro plan de expansión, fue llevado a cabo un estudio de magnetometría aérea con dron dentro de estas concesiones mineras. Para interpretar de manera adecuada estos datos magnéticos, surgió la necesidad de caracterizar la señal magnética asociada a las litologías y zonas de alteración/mineralizaciones presentes en las concesiones mineras de SCM Carola (e.g. Dentith et al., 2020 y Clark, 2014). En esta tesis, se buscó identificar la señal magnética de las zonas mineralizadas en las dependencias de SCM Carola y generar un modelo interpretativo, a través de la comparación y correlación de los datos obtenidos en el estudio, datos históricos de la mina, y datos de susceptibilidad medidos en terreno, con el propósito de localizar probables zonas de interés económico para la SCM Carola. Los resultados de esta investigación buscaron contribuir al desarrollo y optimización de las operaciones futura en SCM Carola, al proporcionar antecedentes para interpretar la distribución y características de los cuerpos mineralizados fuera de las áreas en explotación.

1.3 Hipótesis

Basado en los modelos geofísicos presentados en el “Informe para un estudio de magnetometría aérea con dron proyecto Carola, III región, Chile” realizado por Southernrock Geophysics (2024), se planteó como hipótesis que las zonas con anomalías positivas reflejadas en los mapas de inversión del vector de magnetización (MVI) indicarían la presencia de cuerpos en profundidad con una alta magnetización, los cuales señalarían los sitios más propicios para localizar cuerpos mineralizados con potencial económico. Se planteó esto, ya que se conoce que la mineralización presente en el distrito Punta del Cobre se caracteriza por una asociación mineral dada por calcopirita, pirita, magnetita y hematita (Marschik et al., 1997), y que la magnetita aparece junto con la calcopirita y como cuerpos masivos de forma irregular y vetas (Lino, 1984; Hopf, 1990; Ryan et al., 1995; Marschik et al., 1997).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Identificar la señal magnética de las zonas mineralizadas en las dependencias de SCM Carola, Tierra Amarilla, región de Atacama, Chile.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Identificar y caracterizar los rangos de susceptibilidad magnética de las unidades geológicas de interés en las dependencias de SCM Carola, Tierra Amarilla, región de Atacama, Chile.
2. Identificar si las unidades geológicas presentan un patrón distintivo en los resultados del estudio magnético.
3. Estimar la distribución de unidades geológicas y zonas mineralizadas en base a la información magnética disponible.

1.5 Metodología

Para cumplir con el objetivo específico n°1, primeramente, se realizó una revisión exhaustiva de mapas y secciones geológicas, así como de la base de datos de sondajes pertenecientes a SCM Carola, con el fin de determinar las unidades geológicas relevantes cuya susceptibilidad magnética fue caracterizada. Posteriormente, se identificaron sectores, laboreos y/o sondajes específicos donde se realizaron las mediciones de susceptibilidad magnética. Las mediciones de susceptibilidad magnética se realizaron en sondajes utilizando el instrumento de medición de propiedades físicas Terraplus KT-20.

Para cumplir con el objetivo específico n°2, se analizó la correlación entre los valores de susceptibilidad magnética medida y los valores de susceptibilidad magnética modelados por la empresa geofísica a partir del estudio magnético. Además, se comparó la distribución en planta y secciones de unidades geológicas con los cuerpos de susceptibilidad magnética proporcionados por la empresa geofísica, utilizando gráficos de correlación y tablas de patrones magnéticos para cada unidad geológica.

Para cumplir con el objetivo específico n°3, se interpretó la distribución de cuerpos mineralizados y unidades geológicas en base a la información magnética. Esta interpretación se realizó utilizando los mapas magnéticos y el modelo de susceptibilidad magnética proporcionado por la empresa geofísica, y los criterios obtenidos de los objetivos específicos n°1 y 2.

1.6 Ubicación

El área de estudio corresponde a SCM Minera Carola ubicada 20 kilómetros al sureste de la ciudad de Copiapó, en la comuna de Tierra Amarilla, región de Atacama. El área de estudio se extiende entre las coordenadas UTM 6955000 – 6963000 mN, y 376000 – 381000 mE (fig. 1.1).

La vía de acceso óptima para ingresar al área de estudio es a través de la ruta C-385. Desde Copiapó, se debe tomar la ruta C-35 al Sur por 13 km, posteriormente virar a mano izquierda por la ruta C-385 y avanzar en dirección SE por 3 km aproximadamente, permitiendo llegar al sector norte del área de estudio (fig. 1.2).

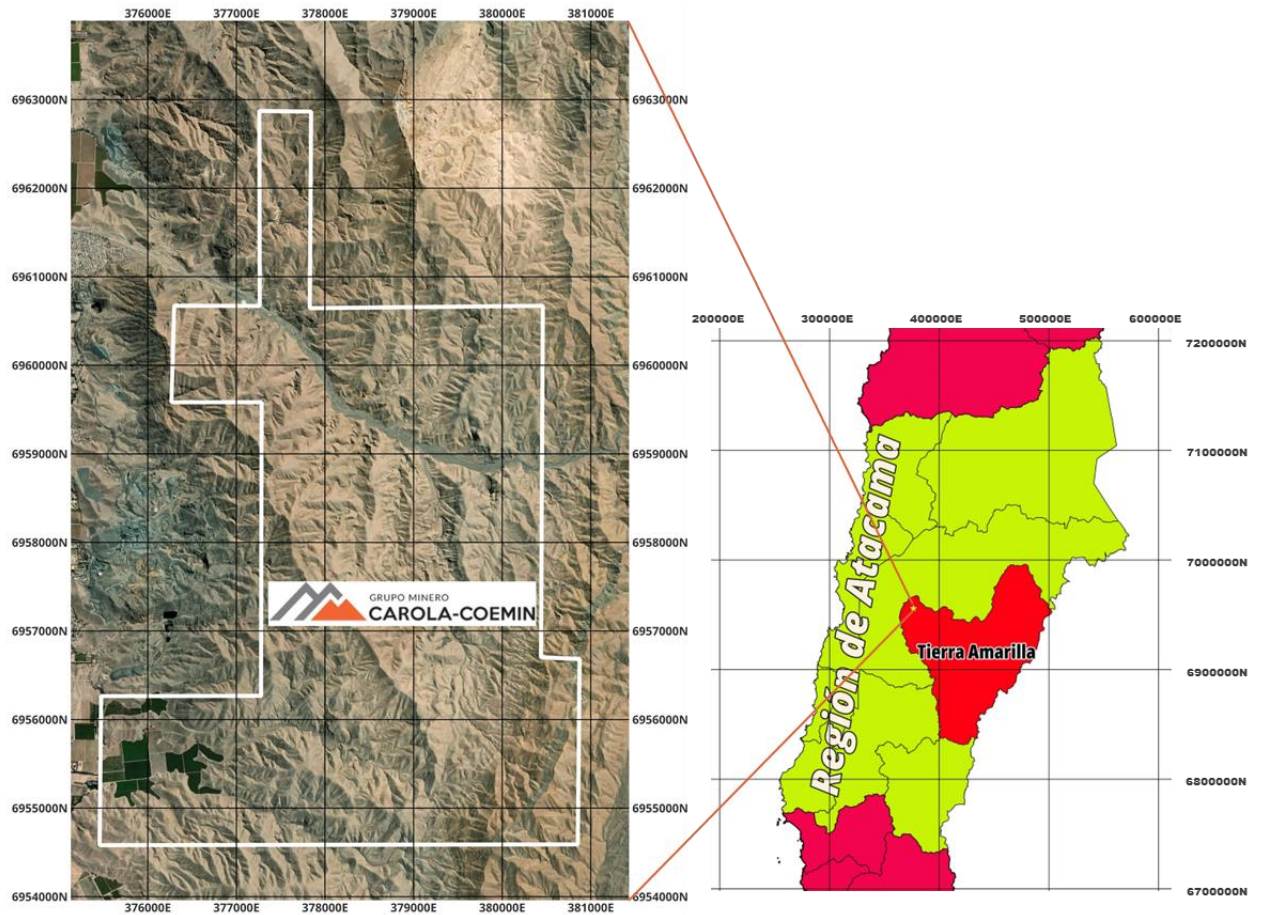


Figura 1.1. Ubicación del área de estudio. A la izquierda se encuentra una imagen satelital donde se delimitan las concesiones unificadas de la SCM Carola, y a la derecha una representación gráfica del mapa de Chile con la ubicación relativa de la concesión (elaboración propia a través de software QGIS ©).



Figura 1.2. Ruta de acceso al sector norte del área de estudio (elaboración propia a través del software Google Earth Pro ©).

1.7 Trabajos anteriores

La literatura muestra escasos estudios magnetométricos publicados en el distrito Candelaria-Punta del Cobre. Para el caso de los depósitos IOCG presentes en Atacama, existen trabajos de tesis que entregan más información acerca de mediciones geofísicas, junto con la modelación y análisis de los datos medidos. Con excepción del informe geofísico realizado por Southernrock Geophysics (2024), SCM Carola no posee respaldados físicos o digitales, acerca de informes técnicos referentes a estudios geofísicos en sus dependencias, los cuales se llevaron a cabo entre los años 1990 y 1995. Solo cuenta con bases de datos de medición de susceptibilidad magnética tomados en testigos y modelos MVI y resistividad en el sector de Adriana. A continuación, se mencionan algunos estudios previos relevantes para esta investigación:

- Geología del área de estudio

Fernández (2024). Tesis de pregrado donde se realizó una revisión exhaustiva de las litologías presentes en el sector Adriana Norte de la SCM Carola, entregando una actualización en las litologías presentes en la mina y su relación estratigráfica.

del Real et al. (2018). Entregaron una visión actual del control litológico y estructural en la formación del distrito minero Candelaria-Punta del Cobre.

- Magnetometría del área de estudio

Aedo (2022). Realizó estudios de magnetometría terrestre, polarización inducida y tomografía de resistividad en el yacimiento cuprífero de María Elena, ubicado a 30 km al SE del área de estudio.

Ortiz (2020). Propone nuevas directrices para la búsqueda de depósitos minerales en la Quebrada Toro Muerto, al norte de Vallenar (130 km al S del área de estudio), utilizando tecnologías aerotransportadas y sensores remotos.

Austin et al. (2014). Realizaron un estudio detallado del depósito IOCG Candelaria, centrándose en la comprensión de su comportamiento magnético mediante mediciones de la susceptibilidad magnética y la magnetización remanente.

Southernrock Geophysics (2024). Informe de empresa donde se realizó un levantamiento magnético de las concesiones mineras de SCM Carola, con el fin de apoyar la interpretación geológica y exploración minera del proyecto. Entregaron como

resultados diversos mapas magnéticos y modelos con la distribución 3-D de susceptibilidad magnética y magnitud del vector de magnetización.

Vivallos y Donoso (2014a, b). Cartas magnéticas de los sectores Copiapó y Los Loros, las cuales presentan mapas de intensidad de campo magnético total que cubre el área de estudio.

Pérez (2017). Tesis de grado (magister) donde se realizó un modelo e interpretación de datos magnéticos y gravimétricos en la caracterización de un depósito IOCG denominado proyecto Buen Retiro, ubicado 35 km al SW del área de estudio.

- Interpretación petrofísica de estudios magnéticos

Townley et al. (2007). Realizó un estudio de la alteración hidrotermal y las propiedades magnéticas de las rocas en el distrito de Carolina de Michilla, donde se presenta mineralización de cobre estratoligada alojada en rocas volcánicas jurásicas a lo largo de la traza del Sistema de Fallas de Atacama.

Banchero (2015). Realizó un análisis geofísico en proyectos IOCG y pórfidos, ejemplificando el aporte obtenido desde la geofísica para lograr respuestas cuantitativas en estimación de recursos.

Clark (2014). Generó una revisión de los efectos de la alteración hidrotermal sobre las propiedades y las firmas magnéticas de los sistemas de pórfido de cobre e IOCG, y presenta ejemplos de modelos predictivos de exploración magnética, y sus firmas predichas, en diversas circunstancias geológicas.

Dentith et al. (2020). Presentaron una metodología para realizar análisis de datos petrofísicos y consideraciones en cuanto a las condiciones de las rocas al momento de tomar mediciones de sus propiedades físicas.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptos básicos y unidades de geomagnetismo

2.1.1 Densidad de flujo, intensidad de campo y permeabilidad magnética

Alrededor de una barra magnética, se observa un flujo magnético que converge cerca de los extremos del imán, conocidos como polos magnéticos. Si suspendemos una barra magnética en el aire, ésta se alinearán con el campo magnético terrestre, con un polo (positivo) apuntando hacia el polo norte de la Tierra y el otro (negativo) hacia el polo magnético sur. Los polos magnéticos siempre existen en pares de sentido opuesto, formando un dipolo. Cuando un polo está lo suficientemente alejado del otro, se denomina monopolo (Reynolds, 2011).

La fuerza entre dos polos magnéticos de fuerza m_1 y m_2 , separados por una distancia r , depende de si son del mismo tipo (repulsión) o de polaridad opuesta (atracción). Esta fuerza se puede describir mediante la teoría del campo de potencial, similar a la fuerza de atracción gravitatoria (Reynolds, 2011).

$$\vec{F} = \frac{m_1 m_2}{4\pi\mu r^2}$$

La densidad de flujo magnético (\mathbf{B}) o intensidad magnética, medida en teslas (T) ($T = \text{Weber/m}^2$) o nanoteslas (nT) ($nT = 10^{-9} T$), es una magnitud vectorial que indica la proximidad de las líneas de flujo magnético. La intensidad de campo magnetizante (\mathbf{H}),

medida en amperios por metro (A/m), es otro aspecto del campo magnético, relacionado con las corrientes eléctricas. La relación entre \mathbf{B} y \mathbf{H} se expresa mediante la permeabilidad magnética absoluta (μ), siendo μ_0 la permeabilidad del espacio libre (vacío). Para cualquier otro medio que no sea el vacío, la permeabilidad magnética es igual a μ_0 . La relación entre las permeabilidades de un medio y la del espacio libre es igual a la permeabilidad relativa μ_r , tal que $\mu_r = \mu/\mu_0$ (Reynolds, 2011).

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Con: $\mu = \mu_r \mu_0$

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$

2.1.3 Magnetización (M)

La magnetización, \mathbf{M} , de un material es el momento dipolar magnético neto por unidad de volumen. Para calcular la magnetización de un volumen particular, la suma vectorial de los momentos magnéticos se divide por el volumen que encierra esos momentos magnéticos (Butler, 1992):

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i m_i$$

Donde $\sum m_i$ es la suma vectorial de momentos magnéticos en un volumen (V) dado.

Bajo el parámetro de intensidad magnética se desprenden 2 tipos de magnetización: la magnetización inducida que se presenta al momento de exponer un material a un campo magnético \mathbf{H} (campo actual); y la magnetización remanente, que es un registro de campos magnéticos pasados que han actuado sobre el material (Butler, 1992).

2.1.3.1 Magnetización inducida (M_i)

Una masa rocosa que contenga minerales magnéticos tendrá una magnetización tanto inducida como remanente. Estas magnetizaciones pueden tener diferentes direcciones y magnitudes de intensidad (Reynolds, 2011). La magnetización que presentan las rocas producto del campo magnético externo o campo de referencia (H) es inducida. En este caso, la magnetización es proporcional al campo externo, es decir, tiene la misma dirección y su magnitud es proporcional al módulo de campo externo (Pérez, 2017).

$$\vec{M}_i = k\vec{H}$$

2.1.3.2 Susceptibilidad magnética (κ)

Es posible expresar la relación entre B y H en términos de la susceptibilidad magnética κ . La susceptibilidad magnética es la capacidad que tiene un material para adquirir magnetización. Aunque la susceptibilidad no tiene unidades, para racionalizar su valor numérico y sea compatible con el SI, el valor en unidades equivalentes c.g.s., debe multiplicarse por 4π ($\kappa(\text{S.I.}) = 4\pi\kappa(\text{c.g.s.})$) (Reynolds, 2011).

$$\vec{B} = \kappa\vec{H}$$

2.1.3.3 Magnetización remanente (M_r)

En muchos casos también las rocas presentan magnetización remanente (M_r), la cual no depende del campo externo inductor, sino que es una magnetización adquirida en el pasado y que prevalece en la roca. La magnetización neta final (M) de la roca, se traduciría en la suma vectorial de las magnetizaciones inducida y remanente (Pérez, 2017).

La magnetización total de una roca (fig. 2.1) es la suma vectorial de la magnetización inducida y remanente, y se expresa como:

$$\vec{M} = \vec{M}_i + \vec{M}_r$$

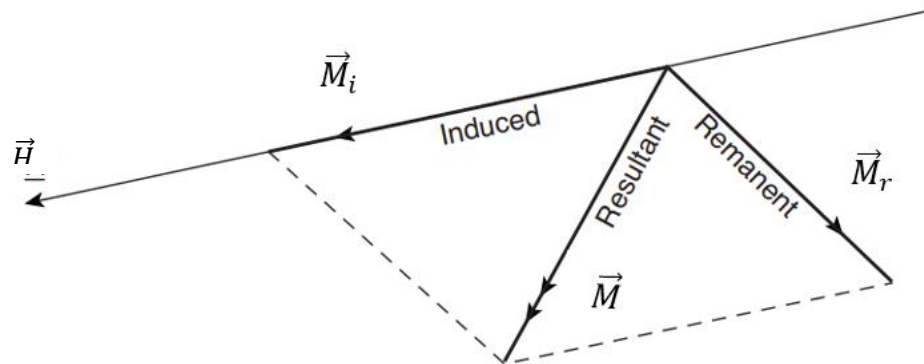


Figura 2.1. Suma vectorial de intensidades de magnetización inducida y remanente (modificado de Reynolds, 2011).

2.2 Propiedad magnética de las rocas y minerales

Según las propiedades magnéticas de un material, se pueden dividir las sustancias en diamagnéticas, paramagnéticas y ferromagnéticas (fig. 2.2). Las últimas poseen, para las condiciones de temperatura conocidas, altos valores de susceptibilidad y se dividen en ferromagnéticos, antiferromagnéticos y ferrimagnéticos (González, 2010).

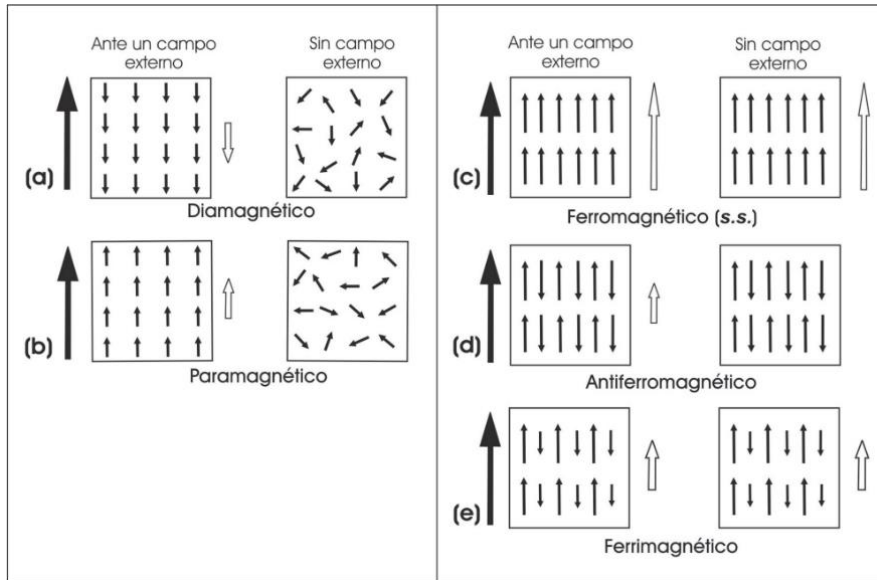


Figura 2.2. Diferentes tipos de comportamiento magnético. Las flechas grandes de color negro indican el campo aplicado, mientras que las flechas grandes de color blanco indican la magnetización del material bajo el campo aplicado (lado izquierdo) o en ausencia del campo (lado derecho) (Caballero, 2011).

2.2.1 Diamagnetismo

El diamagnetismo se manifiesta en materiales cuyos átomos no tienen momentos magnéticos constantes, lo que ocurre en estructuras electrónicas simétricas donde los momentos magnéticos de los electrones se compensan. En ausencia de un campo magnético externo, el momento resultante en cada átomo es cero (Butler, 1992). Cuando se aplica un campo magnético, estos materiales adquieren una pequeña magnetización inducida, M_i , opuesta al campo aplicado, la cual es linealmente proporcional al campo y se anula al retirarlo. Esta respuesta es característica de toda la materia, pero en sustancias con momentos magnéticos atómicos, el diamagnetismo se ve contrarrestado. Los materiales compuestos de átomos sin momentos magnéticos atómicos se clasifican como diamagnéticos, y su susceptibilidad magnética, κ , es negativa e independiente de la temperatura. Ejemplos incluyen el cuarzo, con una susceptibilidad típica de $\sim -0,8 \times 10^{-7}$ SI, así como el cobre, plata, oro, mercurio, plomo y arsénico (Butler, 1992).

2.2.2 Paramagnetismo

Cuando los átomos tienen capas electrónicas incompletas, sus propiedades magnéticas se ven afectadas, dando lugar a momentos magnéticos distintos de cero. En ausencia de un campo magnético externo, la dirección de estos momentos es indeterminada debido al movimiento térmico. Sin embargo, un campo magnético externo orienta estos momentos, generando magnetización en el material. A medida que aumenta el campo magnético, más átomos se alinean, resultando en una magnetización positiva y manifestando el paramagnetismo, que es más intenso que el diamagnetismo (Reeves, 2005).

Los sólidos paramagnéticos, como la fayalita (Fe_2SiO_4) (κ a temperatura ambiente de $\sim 3,5 \times 10^{-5}$ SI), contienen átomos con momentos magnéticos atómicos que se orientan paralelamente al campo aplicado. Esta magnetización inducida depende linealmente del campo magnético externo y desaparece cuando se elimina este campo. En estos sólidos, los momentos magnéticos reaccionan de forma independiente a los campos magnéticos aplicados y a la energía térmica. A temperaturas por encima del cero absoluto, la energía térmica provoca oscilaciones aleatorias en la orientación de los momentos, resultando en una magnetización nula en ausencia de un campo magnético aplicado. El paramagnetismo también se puede observar en sustancias como el cromo, molibdeno, wolframio, uranio, manganeso, entre otros (Butler, 1992).

2.2.3 Ferromagnetismo

Las sustancias ferromagnéticas, como el hierro, níquel, cobalto y varias aleaciones, se caracterizan por su alta susceptibilidad magnética (k) y una relación complicada entre la magnetización, la magnitud del campo magnetizante y la temperatura. Estas propiedades se manifiestan hasta su temperatura crítica, conocida como punto de Curie, por encima de la cual se transforman en paramagnéticas (fig. 2.3). En los sólidos ferromagnéticos, los átomos tienen momentos magnéticos y, a diferencia de los sólidos paramagnéticos, estos momentos interactúan fuertemente entre sí, lo que produce magnetizaciones mucho más intensas (Butler, 1992; González, 2010).

Para un material ferromagnético y una temperatura dados, existe una magnetización máxima denominada magnetización de saturación J_s . La magnetización de saturación es la máxima magnetización que puede alcanzar un material ferromagnético a una temperatura determinada. Para el hierro, por ejemplo, esta magnetización máxima es de aproximadamente $1,8 \times 10^3$ gauss a temperatura ambiente. Sin embargo, esta magnetización disminuye a medida que aumenta la temperatura y se vuelve nula cuando el material alcanza su temperatura crítica (T° de Curie), que es alrededor de 580°C para la magnetita y 680°C para la hematita (Butler, 1992).

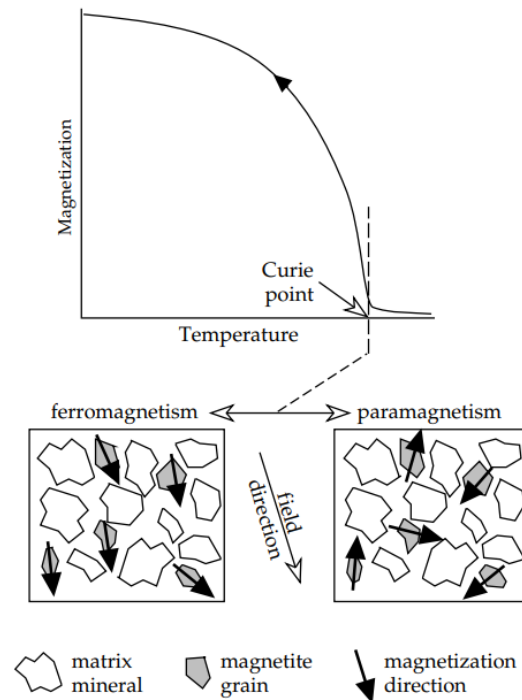


Figura 2.3. Relación entre el magnetismo y la temperatura de Curie en la magnetita (Lowrie, 2007).

Un aspecto fundamental de los sólidos ferromagnéticos es su capacidad para retener la dirección de un campo magnético aplicado, incluso después de retirar el campo magnetizante. Esta propiedad se manifiesta en el bucle de histéresis, donde la magnetización no vuelve a cero al eliminar el campo aplicado. El ferromagnetismo

implica un acoplamiento paralelo de los momentos magnéticos atómicos adyacentes, aunque también existen fenómenos antiferromagnéticos y ferrimagnéticos, donde la orientación de los momentos varía en función de la estructura del material (Butler, 2004).

2.2.4 Magnetismo de las rocas

Una roca se puede entender como una mezcla heterogénea de minerales. Los minerales predominantes suelen ser silicatos o carbonatos, con propiedades diamagnéticas. En menor cantidad se encuentran minerales secundarios como los minerales arcillosos, que poseen propiedades paramagnéticas. Aunque la mayoría de los minerales presentes en una roca contribuyen a su susceptibilidad magnética, solo una distribución mínima de minerales ferrimagnéticos, como menos del 0,01% en una caliza, son responsables de las propiedades magnéticas remanentes. Las variaciones en las concentraciones de estos minerales ferrimagnéticos y en la matriz resultan en una amplia gama de susceptibilidades en las rocas (figs. 2.4 y 2.5) (Lowrie, 2007).

Mineral or rock type	Susceptibility*
<i>Sedimentary</i>	
Dolomite (pure)	-12.5 to +44
Dolomite (impure)	20,000
Limestone	10 to 25,000
Sandstone	0 to 21,000
Shales	60 to 18,600
Average for various	0 to 360
<i>Metamorphic</i>	
Schist	315 to 3000
Slate	0 to 38,000
Gneiss	125 to 25,000
Serpentinite	3100 to 75,000
Average for various	0 to 73,000
<i>Igneous</i>	
Granite	10 to 65
Granite (m)	20 to 50,000
Rhyolite	250 to 37,700
Pegmatite	3000 to 75,000
Gabbro	800 to 76,000
Basalts	500 to 182,000
Oceanic basalts	300 to 36,000
Peridotite	95,500 to 196,000
Average for acid igneous	40 to 82,000
Average for basic igneous	550 to 122,000
<i>Minerals</i>	
Ice (d)	-9
Rocksalt (d)	-10
Gypsum (d)	-13
Quartz (d)	-15
Graphite (d)	-80 to -200
Chalcopyrite	400
Pyrite (o)	50 to 5000
Hematite (o)	420 to 38,000
Pyrrhotite (o)	1250 to 6.3×10^6
Illmenite (o)	314000 to 3.8×10^6
Magnetite (o)	70,000 to 2×10^7

Figura 2.4. Susceptibilidades de rocas y minerales ($\kappa \times 10^6$ unidades SI). (d) = material diamagnético; (o) = mena de Fe; (m) = con minerales magnéticos (Reynolds, 2011).

La débil y variable concentración de minerales ferrimagnéticos juega un papel clave en la determinación de las propiedades magnéticas de la roca que son significativas geológica y geofísicamente. Los factores más importantes que influyen en el magnetismo de las rocas son el tipo de mineral ferrimagnético, su tamaño de grano y la forma en que adquiere una magnetización remanente (Lowrie, 2007).

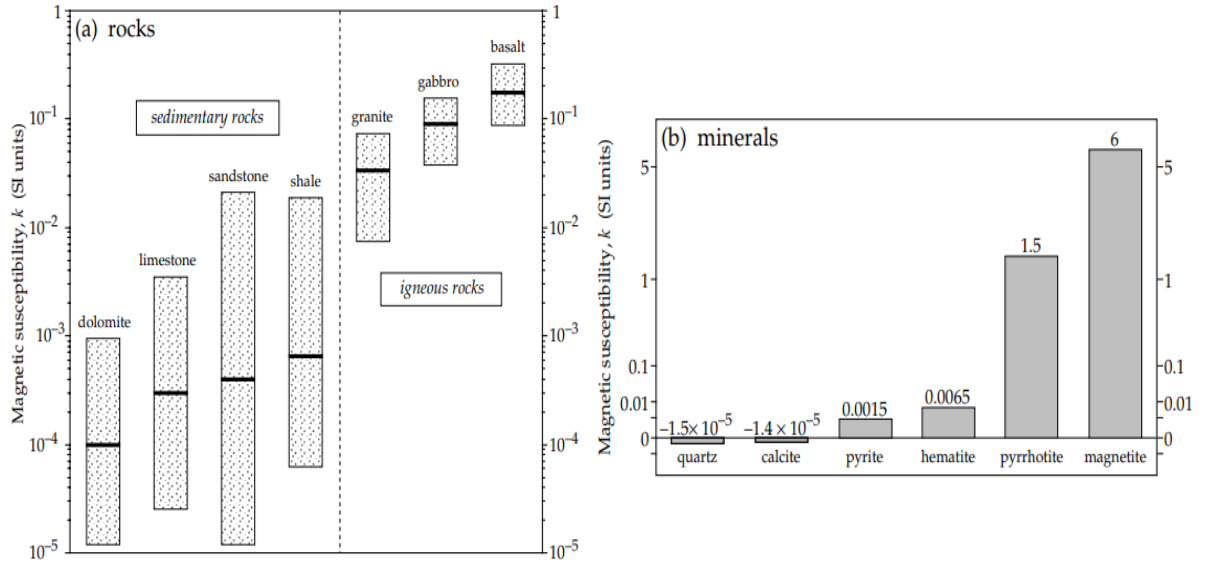


Figura 2.5. Valores de susceptibilidad. (a) Valores medios y rangos de la susceptibilidad magnética de algunos tipos de rocas comunes, y (b) susceptibilidades de algunos minerales importantes (Lowrie, 2007).

2.3 Campo magnético terrestre

El campo magnético terrestre se puede aproximar en primer orden con el campo magnético generado por un dipolo o imán en el centro de la Tierra. En la actualidad este dipolo posee una magnitud de $\sim 7 \times 10^{22} \text{Am}^2$, presenta una inclinación de aproximadamente $11,5^\circ$ con respecto al eje N-S de rotación de la Tierra y apunta en la dirección del Polo Sur Magnético (PSM) (fig. 2.6). El campo magnético terrestre es variable en el tiempo y por lo tanto los modelos que se utilizan para describirlo deben ser actualizados permanentemente. Uno de los modelos más utilizados para describir el campo magnético terrestre para cada punto de la Tierra, en un momento determinado, se denomina IGRF (International Geomagnetic Reference Field), y la entidad encargada de mantenerlo actualizado es la IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) (Pérez, 2017).

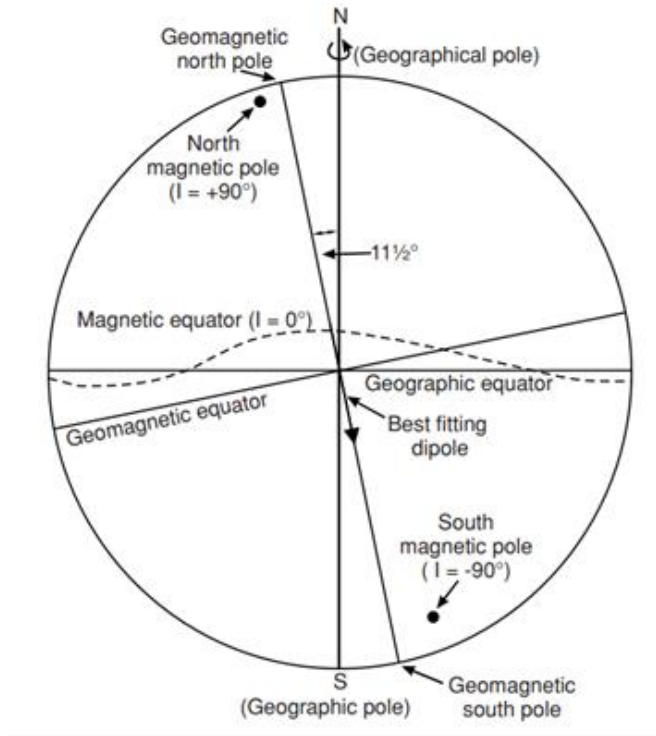


Figura 2.6. El campo debido a un dipolo geocéntrico inclinado (Reynolds, 2011).

El campo magnético de la Tierra se genera principalmente en el núcleo externo de nuestro planeta, el cual representa en promedio más del 90% del valor del CMT medido en la superficie. Este fenómeno se produce por el movimiento convectivo de metales sometidos a altas temperaturas y presiones. Las corrientes de convección generan corrientes eléctricas en el núcleo, las cuales a su vez generan un campo magnético. Este proceso se conoce como el "dínamo geodinámico" (fig. 2.7). Además, las corrientes externas a la Tierra en la ionosfera y la magnetosfera asociadas con los cinturones de radiación de Van Allen, las corrientes inducidas en la Tierra por variaciones del campo externo y las magnetizaciones permanentes (remanentes) y de estado estacionario, inducidas por las rocas de la corteza terrestre, también contribuyen a el campo geomagnético general. La magnetosfera es vital para la supervivencia de la vida en la Tierra, ya que forma el campo de fuerza principal que protege al planeta de la radiación dañina del Sol (Reynolds, 2011; Gubbins y Herrero-Bervera, 2007).

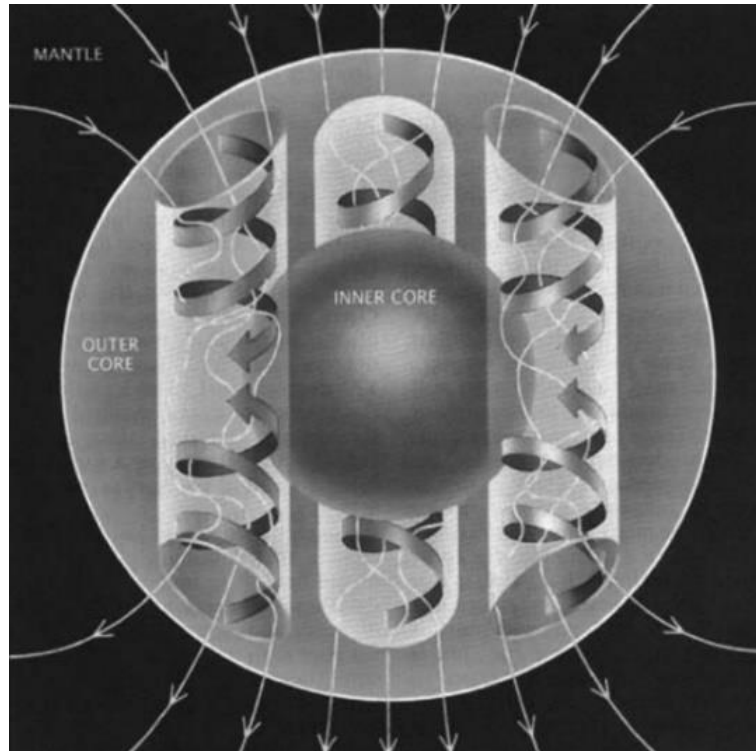


Figura 2.7. El campo debido a un dipolo geocéntrico inclinado (Gubbins y Herrero-Bervera, 2007).

Para describir el vector del campo magnético en cualquier punto de la superficie terrestre requiere caracterizar tres valores escalares (Fig. 2.8), normalmente expresados como tres componentes ortogonales (componente vertical, horizontal norte y horizontal este) o la magnitud del vector de campo total (F) y su orientación en buzamiento y azimut. En general, en estudios aeromagnéticos se suele medir sólo la magnitud F . El ángulo que forma el vector de campo total por encima o por debajo del plano horizontal se conoce como inclinación magnética, I , que es convencionalmente positiva cuando el vector apunta hacia el interior de la Tierra (al norte del ecuador magnético) y negativa cuando el vector apunta hacia el exterior de la Tierra ($-90^\circ \leq I \leq 90^\circ$). El ángulo entre el plano vertical que contiene F y el norte verdadero (geográfico) se conoce como declinación magnética, D , que se considera positiva hacia el este y negativa hacia el oeste. D es inferior a 15° en

la mayoría de los lugares de la Tierra, aunque alcanza valores de hasta 180° a lo largo de las líneas que unen los polos magnético y geográfico (Reeves, 2005).

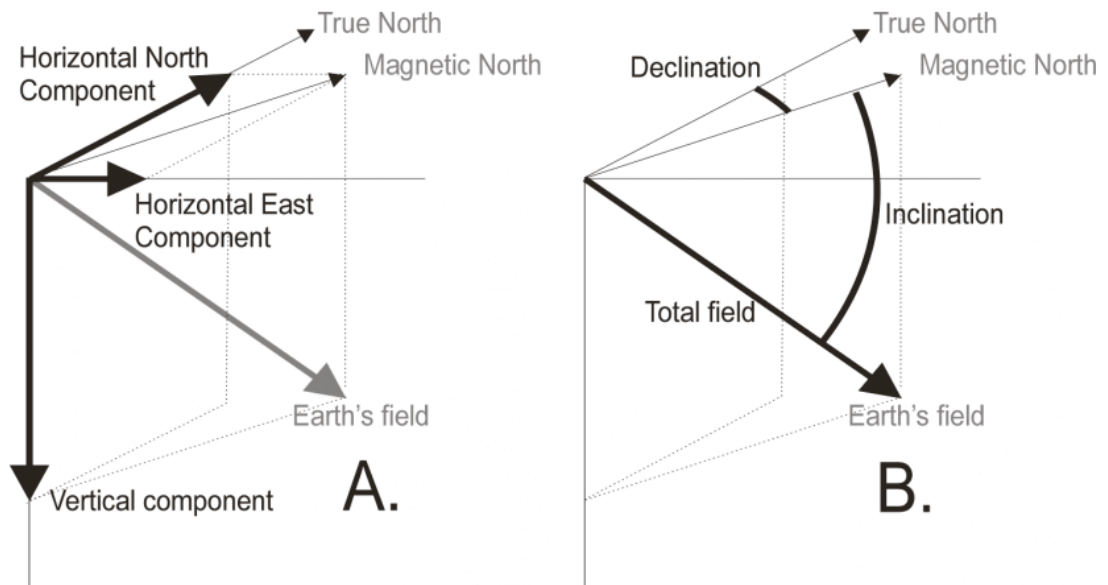


Figura 2.8. El campo magnético total vectorial se puede definir como (a) tres componentes ortogonales (norte horizontal, este horizontal y vertical) o (b) como la magnitud escalar del campo total, F y dos ángulos, la inclinación desde la horizontal, I , y la declinación desde el norte (geográfico) verdadero, D . (Reeves, 2005).

2.3.1 Variaciones temporales del campo magnético de la Tierra

Las variaciones electromagnéticas que rodean a la Tierra se extienden por una enorme gama de frecuencias y están controladas por diversos procesos físicos internos y externos (fig. 2.9) (Constable, 2016). El origen espacial de las fuentes se puede dividir según las escalas temporales características de cada variación, con algunos solapamientos importantes (Constable, 2016).

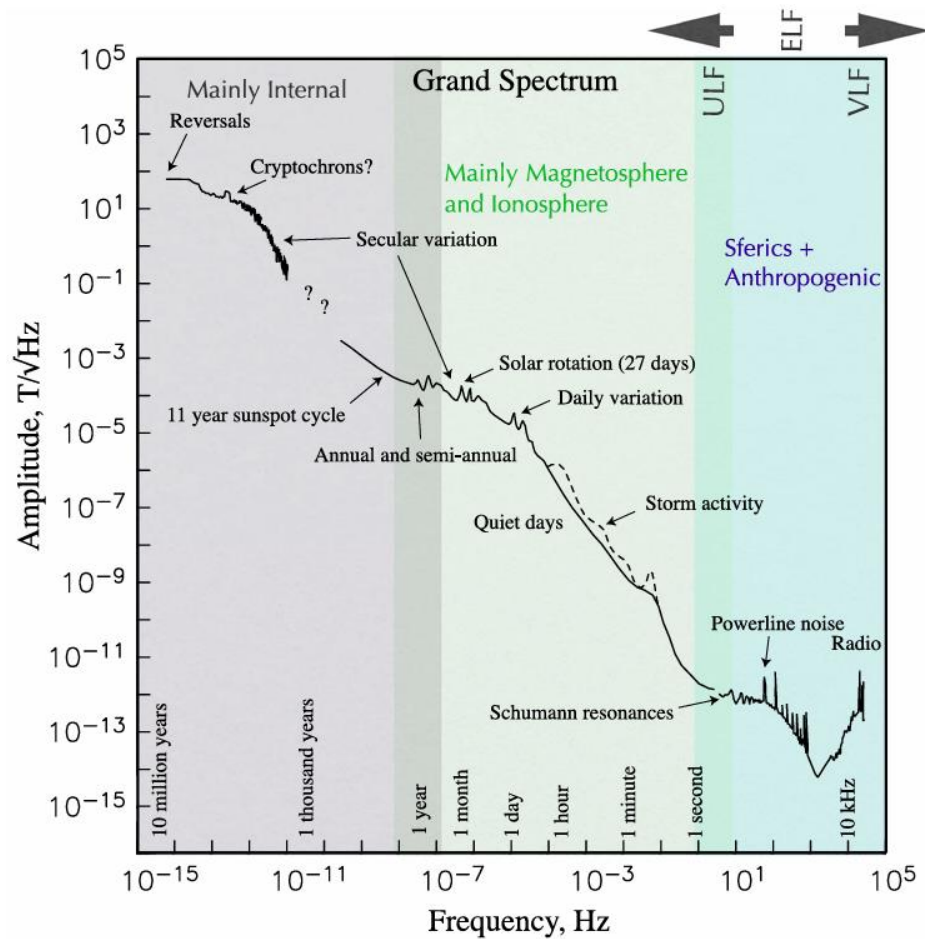


Figura 2.9. Espectro de amplitud de las variaciones geomagnéticas (Constable, 2016).

El fluido en el núcleo externo de alta conductividad eléctrica produce variaciones seculares en el campo magnético, que se propagan hacia arriba a través del manto y la litosfera, de conductividad mucho menor. La parte dipolar del campo magnético presenta los cambios más a largo plazo, asociados a excursiones e inversiones geomagnéticas (Constable, 2016). La conductividad eléctrica finita del manto filtra las variaciones del campo del núcleo en escalas de tiempo muy inferiores a un año (Backus, 1983). De manera que la parte interna del espectro se ve disminuida en el rango de frecuencia dominado por el ciclo solar y los procesos magnetosféricos. Sobre la atmósfera aislante, se encuentra la ionosfera, la cual es relativamente conductora de electricidad y genera una corriente (S_q en la fig. 2.10) como resultado del calentamiento solar diurno. Fuera de la Tierra sólida, la magnetosfera es deformada y modulada por el viento solar, la cual se comprime en el

lado del Sol y alarga en el lado de la noche (fig. 2.10). Los campos magnéticos generados por la magnetosfera y la ionosfera se propagan por inducción en la Tierra conductora, proporcionando información sobre las variaciones de conductividad eléctrica en la corteza y el manto. Los satélites en órbita terrestre baja observan los campos magnéticos por encima de la ionosfera, pero por debajo de las fuentes de inducción magnetosféricas (Constable, 2016).

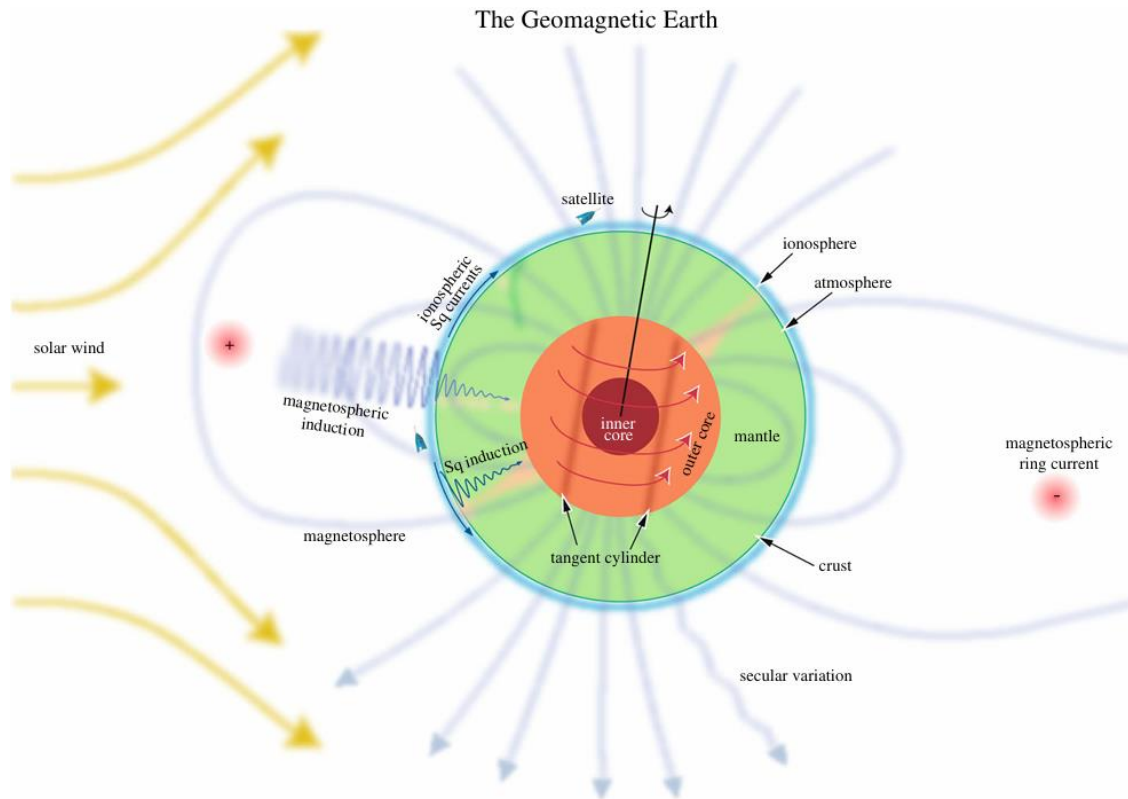


Figura 2.10. Vista esquemática de las fuentes geomagnéticas. La corriente helicoidal y el viento solar no están dibujados a escala (Constable y Constable, 2004).

Las mayores contribuciones externas son mínimas en comparación con la intensidad de la parte interna, que actualmente oscila entre unos 22 μT sobre Brasil y más de 65 μT cerca de los polos. Los estudios de inducción electromagnética hacen uso de las variaciones del campo externo con frecuencias de van desde el ciclo solar (usados para sondeos geomagnéticos de profundidad, GDS) hasta la banda de frecuencia de $10^{-4} - 10^4$ Hz utilizado ampliamente en estudios magnetotelúricos (MT) y audio-magnetotelúricos

(AMT). A frecuencias de 1 Hz el espectro está dominado por el ruido esférico y antropogénico (Constable, 2016).

Las variaciones de corta duración del campo terrestre que afectan a la prospección magnética (fig. 2.11) son producidas por corrientes eléctricas que fluyen en la ionosfera, y están asociadas a la radiación procedente del Sol. Éstas generan campos magnéticos que interfieren con el campo terrestre y lo hacen variar y oscilar a lo largo de minutos y horas, sobre todo durante el día (Dentith y Mudge, 2014). Estas variaciones son:

- Variación diurna: alcanzan hasta unos 30 nT y son mínimas por la noche, cuando el hemisferio nocturno está protegido por la radiación solar. Se controlan rutinariamente durante los estudios magnéticos debido a su gran incidencia sobre los datos (Dentith y Mudge, 2014).
- Tormentas magnéticas: variaciones rápidas del campo con periodos de milisegundos a minutos, que a menudo aparecen como ráfagas irregulares y duran de horas a varios días, y están asociados al ciclo de 11 años de actividad de las manchas solares. Provocan cambios de amplitud variados, de hasta 1000 nT, que pueden ser mayores en las regiones polares. Estas tormentas generan que la prospección magnética sea poco práctica debido a que las anomalías de importancia en la corteza poseen menores amplitudes que estas variaciones (Dentith y Mudge, 2014).
- Micropulsaciones: poseen amplitudes inferiores a 10 nT y periodos de segundos a unos pocos minutos. Son muy frecuentes y se producen de forma aleatoria, variando su amplitud a lo largo de la zona de prospección (Dentith y Mudge, 2014).

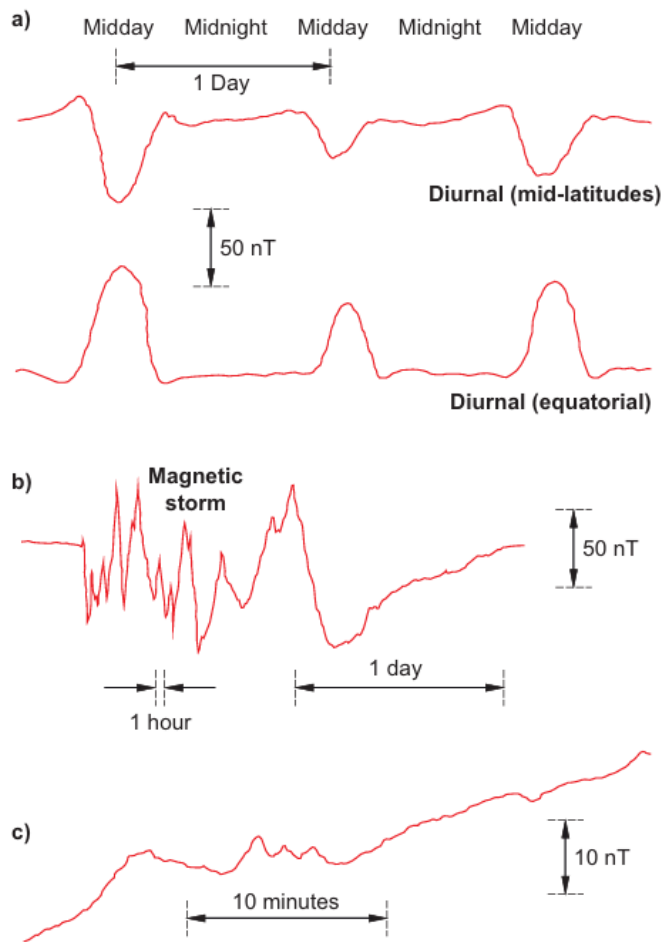


Figura 2.11. Variaciones temporales de IMT del campo geomagnético. A) variaciones diurnas, b) tormenta magnética y c) micropulsaciones (Dentith y Mudge, 2014).

2.4 Medición de la intensidad del campo magnético

La intensidad del campo magnético es la propiedad que se mide y cartografía en la prospección magnética. Los objetos magnéticos alteran la intensidad y la dirección del campo magnético terrestre. Los cambios en la dirección del campo debido a las características geológicas son muy pequeños y ofrecen poca resolución a la hora de detectar variaciones en las propiedades magnéticas del subsuelo. Sin embargo, el efecto sobre la intensidad de campo es significativa y es el elemento más sensible a los cambios en las propiedades magnéticas de las rocas de la corteza (Dentith y Mudge, 2014).

Los estudios magnéticos pueden realizarse caminando, con un sensor situado en lo alto de un poste a unos metros del suelo, en pequeños vehículos todo terreno (si el acceso lo permite), o por medio de aeronaves. Las aeronaves que vuelan a baja altura ofrecen ventajas significativas con respecto a la prospección terrestre, debido a que no se ven obstaculizadas por el acceso al terreno ni por la vegetación, y pueden cubrir grandes zonas con mayor rapidez entregando un coste de prospección relativamente menor. El sensor magnético se sitúa lo más lejos posible de la plataforma topográfica para minimizar el efecto magnético en el sensor, y normalmente se monta en el extremo de un soporte no magnético que se extiende desde el vehículo/aeronave (Dentith y Mudge, 2014).

2.4.1 Magnetómetros

En la prospección magnética se utilizan habitualmente 4 tipos de sensores magnéticos: el fluxgate, el de precesión de protones, el de Overhauser y el de vapores alcalinos. El fluxgate se basa en el principio de inducción magnética, y permite medir la magnitud, dirección y sentido del vector del campo magnético. El funcionamiento de los tres últimos se basa en las propiedades mecánico-cuánticas de los átomos, y solo permiten medir la magnitud del vector del campo magnético. Los magnetómetros que utilizan estos sensores pueden almacenar miles de mediciones, y en algunos pueden registrar y almacenar internamente la información de localización obtenida por satélite (Dentith y Mudge, 2014).

Para el sensor de protones de precesión las mediciones pueden realizarse a un ritmo aproximado de una por segundo, aunque también son posibles tiempos de ciclos menores, pero con menor precisión. Los instrumentos modernos pueden medir la IMT con una precisión mínima de 0,1 nT, aumentando su precisión en periodos más largos de medición. El sensor Overhauser puede realizar mediciones más rápidas, normalmente a 0,01 nT

varias veces por segundos, y puede funcionar en gradientes de campo más elevados que el sensor de protones de precesión (Dentith y Mudge, 2014).

El sensor de vapores alcalinos es un dispositivo analógico que produce una señal continua, por lo que las mediciones de campo pueden realizarse rápidamente. Las mediciones de IMT se realizan normalmente a 0,01 nT y a 1 pT para sensores basados en tipos particulares de vapores de metales alcalinos. Pueden funcionar con gradientes de campo más elevados que los dos anteriores, y son los que se utilizan habitualmente para la mayoría de los trabajos de prospección (Dentith y Mudge, 2014).

2.4.2 Práctica de la prospección magnética

Para descontar el efecto de las variaciones temporales de las mediciones realizadas en el campo, se instala un magnetómetro adicional fijo (estación base), con la finalidad de registrar los cambios temporales del campo geomagnético, normalmente con un intervalo de uno a varios segundos (Dentith y Mudge, 2014).

Las estaciones base también permiten controlar la velocidad de cambio del campo, que es la base operativa para identificar una tormenta magnética. Los datos obtenidos durante este periodo serán rechazados y se procederá a repetir las mediciones cuando el campo magnético se considere estable (Dentith y Mudge, 2014).

Los levantamientos magnéticos terrestres y aéreos suelen constar de una serie de líneas paralelas y líneas de enlace (fig. 2.12). En estudios aerotransportados, la velocidad de la aeronave y la frecuencia de muestreo del magnetómetro determinan el intervalo de datos, el cual suele ser pequeño debido al rápido muestreo de los instrumentos. Se registran también la ubicación mediante GPS y la altura de la aeronave con un radioaltímetro cada

0,1 s. En levantamientos terrestres, las lecturas se realizan en puntos específicos o se puede usar un magnetómetro de muestreo continuo (Dentith y Mudge, 2014).

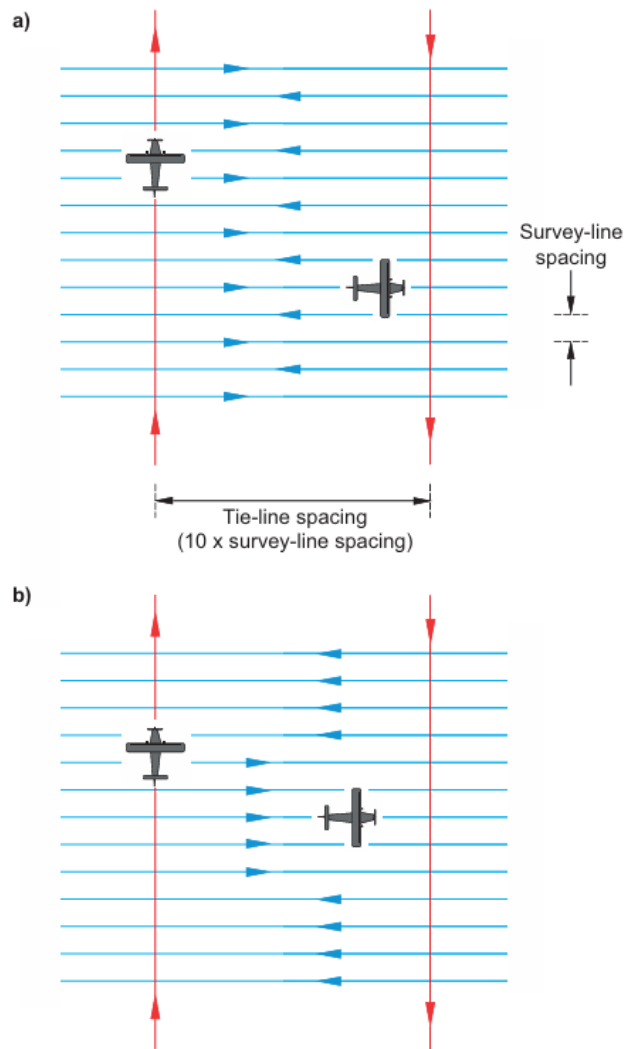


Figura 2.12. Trayectorias de vuelo típicas de los levantamientos aéreos. (a) Levantamiento con líneas de medición adyacentes voladas en direcciones alternas, y (b) levantamiento en formación de hipódromo. En ambos casos, las líneas de enlace perpendiculares se vuelan con una separación de, por lo general, 10 veces la separación de la línea de prospección (Dentith y Mudge, 2014).

2.4.3 Productos magnéticos

2.4.3.1 Intensidad magnética total (IMT)

La intensidad magnética total (IMT) corresponde a la magnitud del vector del campo magnético terrestre en un punto. Las anomalías magnéticas se refieren a las variaciones en la IMT, las cuales pueden ser causadas por diferentes orientaciones del campo geomagnético (fig. 2.13). Estas variaciones son el resultado de la combinación de los campos magnéticos de la Tierra y de las fuentes locales. La magnetización total de un cuerpo estará determinada por la magnetización inducida y por la magnetización remanente (fig. 2.1), donde la magnetización inducida estará controlada tanto por la susceptibilidad del material en cuestión y del campo magnético terrestre. Como se menciona en el apartado 2.2, la susceptibilidad magnética de un material controlará la respuesta magnética, o intensidad, con la que este responderá frente a un campo externo aplicado (en este caso el campo magnético terrestre) (fig. 2.2), determinando la magnitud del vector de magnetización inducida. Por otra parte, el vector de magnetización remanente es un magnetismo intrínseco del material, el cual fue adquirido al momento de su formación, por ende, la dirección y sentido del vector de magnetización remanente no necesariamente serán similares a la del campo magnético terrestre. Todo lo anterior, indica que la anomalía magnética generada por un cuerpo fuertemente magnetizado no se presentará de la misma manera en cualquier ubicación de la Tierra, ya que es sabido que la dirección e intensidad del campo geomagnético es variable alrededor de ella.

La figura 2.13 muestra como varía la anomalía resultante para diferentes orientaciones (inclinación) del campo (geomagnético) inductor respecto a la horizontal. Se puede observar que las anomalías magnéticas resultantes son muy diferentes, aunque la forma de la fuente sea la misma. Las variaciones observadas en el campo magnético son los efectos combinados de los campos magnéticos de la Tierra y de la esfera, es decir, la suma vectorial de los dos campos (Dentith y Mudge, 2014).

La figura 2.14 muestra como en algunos lugares el campo de la esfera tiene una dirección aproximadamente similar a la del campo magnético terrestre, por lo que la intensidad de campo resultante (IMT) es mayor que la del campo terrestre por sí solo. En otros lugares, ambos campos tienen direcciones opuestas, por lo que el campo resultante será más débil que el campo magnético terrestre. En el caso que el campo magnético terrestre esté inclinado, el magnetismo del cuerpo también lo estará y la anomalía será asimétrica y dipolar. Cuando el campo terrestre es horizontal, la respuesta dominante es una disminución de la IMT por encima del cuerpo magnetizado, aunque este sea más magnético que su entorno. Esto ocurre porque los dos campos son opuestos en la región donde se mide la IMT. Solo cuando el campo magnético terrestre y el magnetismo del cuerpo son predominantemente verticales se producirá una respuesta simple comparable a la gravedad (Dentith y Mudge, 2014).

El magnetismo remanente, la anisotropía magnética y la autodesmagnetización tienen la capacidad de cambiar la intensidad y la dirección del magnetismo total del cuerpo. Debido a la gran cantidad de combinaciones entre las intensidades y direcciones posibles del magnetismo total, existe un gran número de formas y amplitudes posibles de las anomalías. El magnetismo remanente es comúnmente el factor que complica de manera más significativa en el análisis de anomalías magnéticas. A pesar de estas complejidades, la medición de la TMI sigue siendo comúnmente utilizada debido a su rapidez y simplicidad, proporcionando información suficiente para la mayoría de las aplicaciones (Dentith y Mudge, 2014).

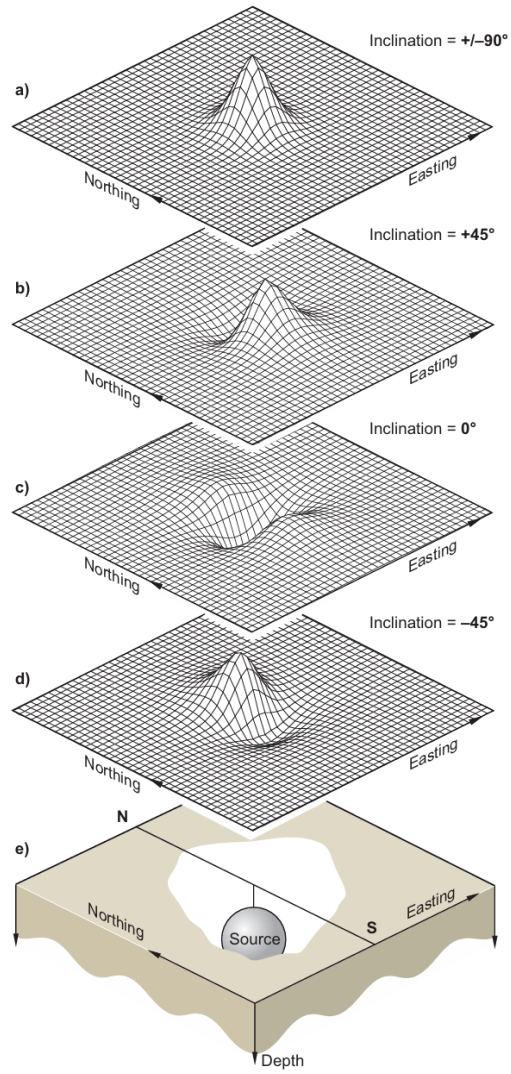
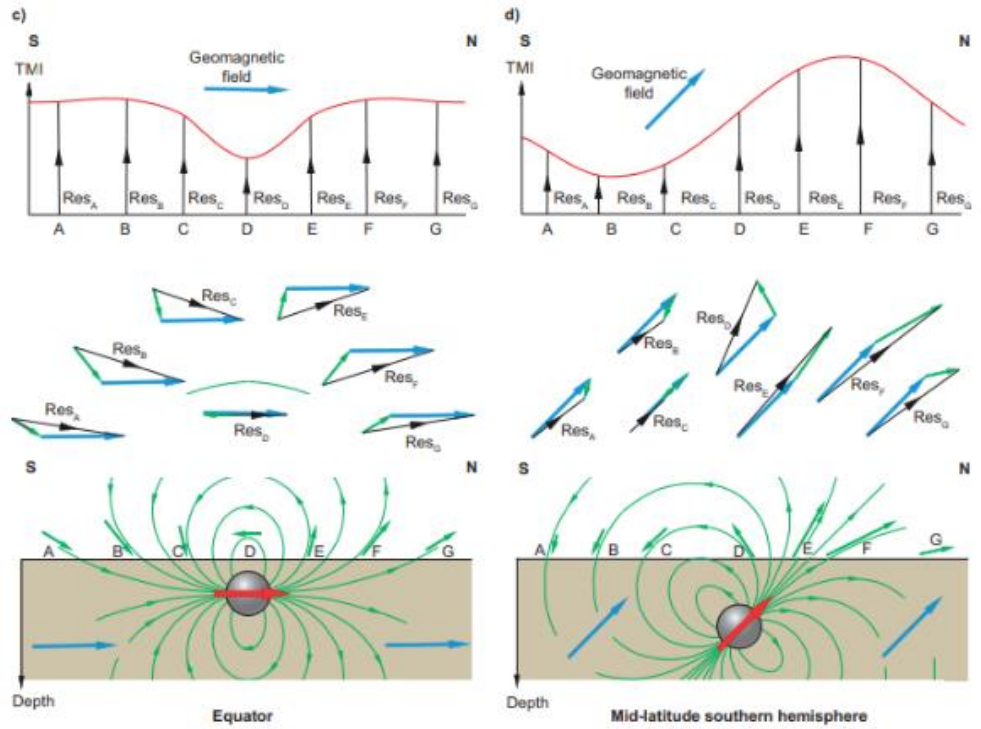


Figura 2.13. Intensidad magnética total medida en una superficie horizontal sobre una esfera (e) magnetizada por campos inductores con diferente inclinación. (a) Polar, inclinación = 90° . (b) Hemisferio norte, inclinación = $+45^\circ$. (c) Ecuador, inclinación = 0° . (d) Hemisferio sur, inclinación = 45° (Dentith y Mudge, 2014).



Geomagnetic field Induced magnetism Source's field at the surface Resultant magnetic field

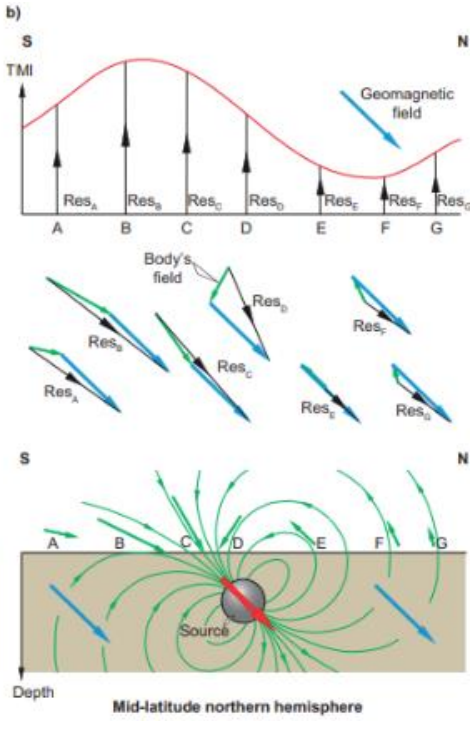
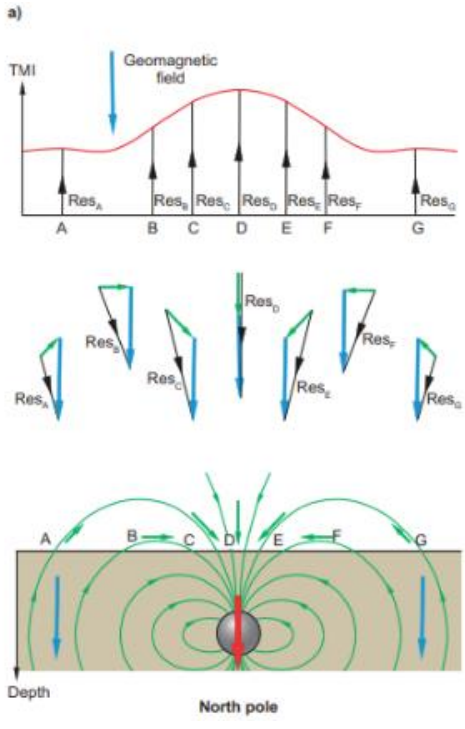


Figura 2.14. Ilustraciones esquemáticas de los campos magnéticos inducidos de una fuente esférica con magnetización total paralela a la dirección del campo magnético total en ese punto. (a) En el polo norte magnético, (b) latitud media en el hemisferio norte, (c) el ecuador magnético y (d) latitud media en el hemisferio sur. Se muestran las variaciones en TMI a lo largo del perfil principal sobre la fuente resultantes de la suma vectorial del campo (geomagnético) de la Tierra con el de la fuente y el campo magnético inducido. La intensidad del campo geomagnético es muchas veces mayor que la de la fuente, pero aquí se ha reducido para mayor claridad (Dentith y Mudge, 2014).

2.4.3.2 Anomalías magnéticas

El valor de campo magnético total medido reúne el efecto de diversas fuentes que generan campos magnéticos en el lugar de medición, sin distinguir las fuentes que las generan. En términos de magnitud, la principal fuente es la generada en el núcleo externo de la Tierra (campo principal). Muy por debajo del campo principal, se tienen las variaciones generadas por procesos externos (en la atmósfera, ionosfera o magnetosfera), y las causadas por la magnetización de las rocas de la corteza que suelen ser denominadas campo anómalo de la Tierra (anomalía). Esta última fuente magnética, es la de interés en los estudios magnéticos, en donde, para encontrar el valor de la anomalía magnética de interés, es necesario extraer los efectos de las otras dos fuentes. El modelo más utilizado para extraer los valores del campo principal es el IGRF. El efecto generado por las fuentes externas se extrae del monitoreo hecho por las estaciones base (Télliz et al., 2010). De modo que, la ecuación que refleja el cálculo de la anomalía magnética de interés, en función del campo magnético observado es la siguiente:

$$\textit{Anomalía magnética} = \mathbf{CM}_{\textit{medido}} - \mathbf{CM}_{\textit{principal}} - \textit{variación temporal}$$

\mathbf{CM} = *Campo magnético*

Cuando se realizan mediciones a través de cuerpos magnéticos locales, se observa que el campo magnético puede reforzar o resistir al campo geomagnético, produciendo anomalías dobles (fig. 2.15). Esta característica es común en la interpretación de anomalías magnéticas, donde la similitud entre anomalías naturales y las calculadas para

cuerpos teóricos sugiere que estos últimos pueden aproximarse a la realidad (Reeves, 2005).

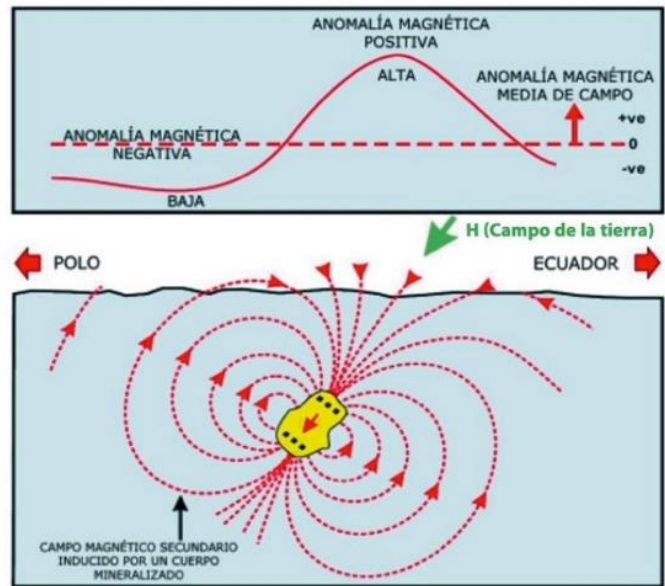


Figura 2.15. Anomalía magnética generada en el hemisferio norte por un cuerpo magnetizado con magnetización total paralela a la dirección del campo magnético de la Tierra (Geomaster: geofísica, s.f).

2.4.3.3 Reducción al polo (RTP)

La interpretación de los mapas de anomalías magnéticas totales (IMT) puede complicarse debido a las variaciones en la geometría dipolar de estas anomalías, las cuales varían según la latitud magnética a la cual se encuentran (asumiendo que la magnetización total es paralela a la dirección del campo magnético terrestre). Para simplificar esto, se suele aplicar un filtro matemático llamado reducción al polo (RTP), que elimina los efectos de la latitud geomagnética y produce un mapa de anomalías como si se hubiera medido en el polo magnético (figs. 2.13a y 2.16). Este proceso se basa en un operador matemático que puede calcularse en el dominio de la frecuencia. Sin embargo, la RTP puede amplificar el ruido, especialmente en áreas de baja latitud magnética. Además, el filtro RTP asume que la magnetización total del cuerpo que genera las anomalías es paralela a la dirección del campo magnético de la Tierra en ese punto, por lo cual no sirve

para representar adecuadamente anomalías generadas por una magnetización total significativamente diferente a la dirección del campo magnético terrestre. Para abordar estos problemas, se han desarrollado otras técnicas de procesamiento, como la Señal Analítica 3D (Reynolds, 2011).

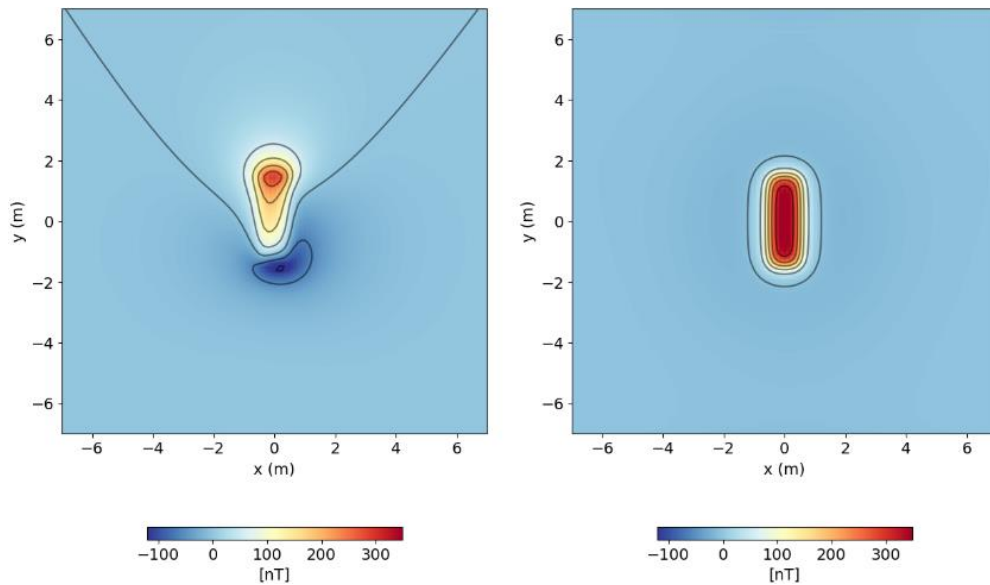


Figura 2.16. Ejemplo de una anomalía ITM (izquierda) versus a su respectiva anomalía de reducción al polo (RTP) (derecha) (FCAG, 2023).

2.4.3.4 Señal analítica (SA)

La señal analítica es una técnica utilizada en geofísica que combina los tres gradientes direccionales de la gravedad o del campo magnético para obtener un gradiente total (fig. 2.17) (Dentith y Mudge, 2014). En los casos donde la dirección de magnetización no está en la misma dirección que el campo terrestre, especialmente en latitudes bajas, la reducción al polo tiende a presentar problemas importantes. Por el contrario, la señal analítica es eficaz para delinear límites geológicos y resolver cuerpos muy próximos (fig. 2.18). Dado que la señal analítica magnética depende de la intensidad y no de la dirección del magnetismo de un cuerpo, es particularmente útil para analizar datos de regiones ecuatoriales, donde la respuesta IMT proporciona una resolución espacial limitada, y cuando la fuente lleva una fuerte magnetización remanente (MacLeod et al., 1993).

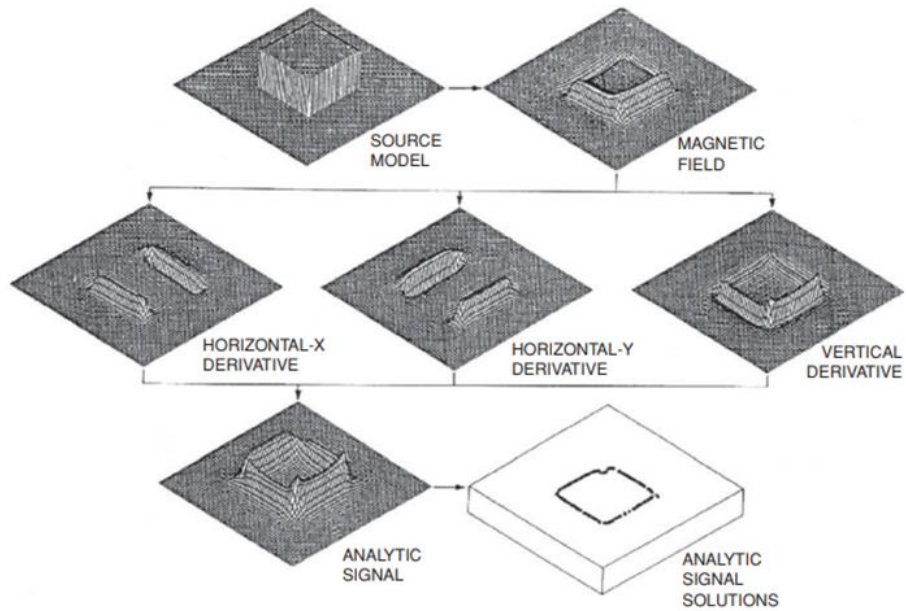


Figura 2.17. Esquema del método de señal analítica. Las derivadas horizontales y verticales se calculan a partir de la anomalía del campo total sobre un prisma cuadrado y se combinan para producir el valor absoluto de la señal analítica. Las ubicaciones de los máximos y la forma de esta señal se pueden utilizar para encontrar los bordes del cuerpo y las estimaciones de profundidad correspondientes (Roest et al., 1992).

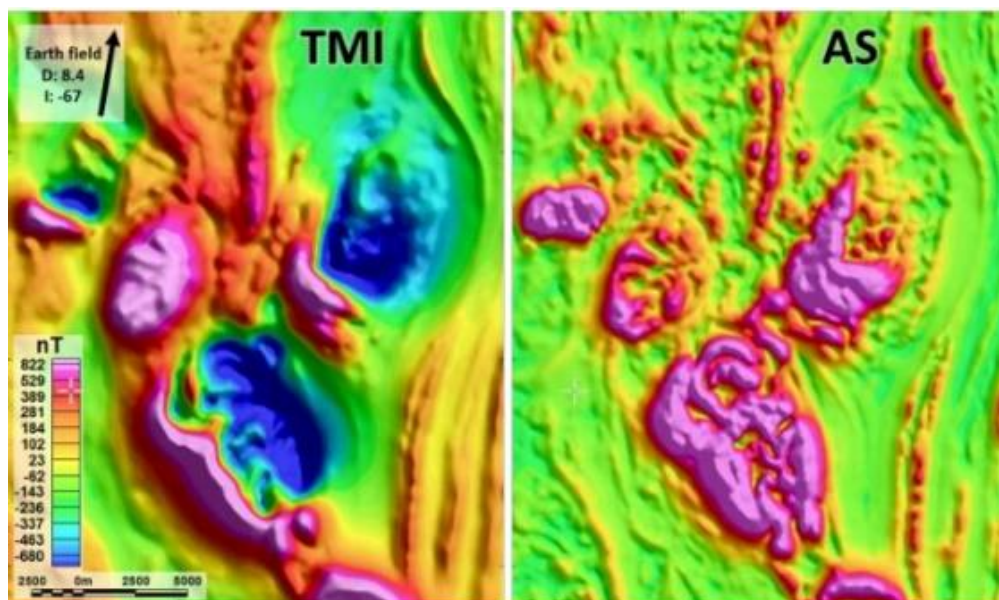


Figura 2.18. Mapa de intensidad magnética total (TMI) y de señal analítica (AS) (Macleod y Ellis, 2013).

2.4.3.5 Inversión del vector de magnetización (MVI)

La inversión del vector de magnetización (MVI) es una técnica que permite obtener una representación tridimensional sobre la magnitud y dirección de la magnetización de objetos magnéticos en el subsuelo (fig. 2.19). A diferencia de la inversión tradicional de susceptibilidad escalar, el enfoque del MVI considera tanto la magnetización inducida como la remanente, lo que permite una interpretación más completa de los datos magnéticos y evita interpretaciones erróneas causadas por la magnetización remanente (Shi et al., 2022). Para resolver el problema de la magnetización remanente, se utiliza un vector de magnetización del subsuelo de tres componentes (figs. 2.20 y 2.8). El vector de magnetización puede formularse en un sistema coordenado cartesiano o esférico. En la formulación cartesiana, la magnetización total se divide en un componente paralelo y dos componentes perpendiculares al campo terrestre (x, y, z). En la formulación esférica, se invierte la amplitud de la magnetización, el buzamiento y azimut de la dirección de la magnetización (Lelièvre et al., 2009).

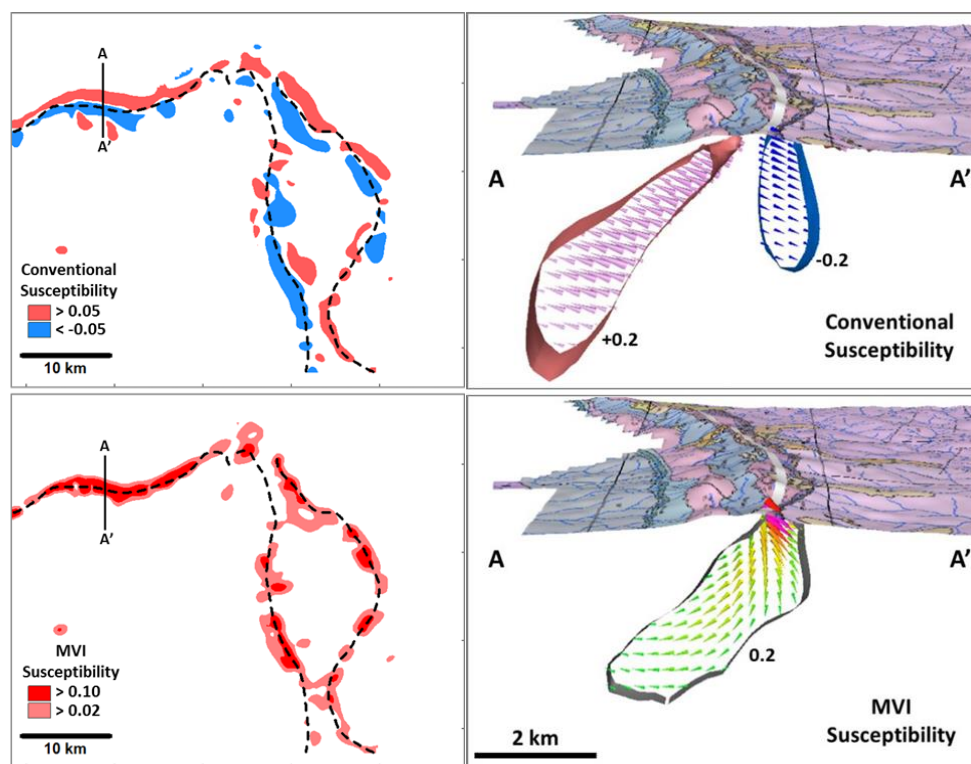


Figura 2.19. Modelos generados en estudios magnéticos realizados en el Cuadrilátero Ferrífero, situado en el estado de Minas Gerais, Brasil. A) comparación del modelo de susceptibilidad convencional (arriba) con el modelo MVI

(abajo), y b) vista en perspectiva 3D de los modelos de susceptibilidad y MVI mirando hacia el Este a través de la sección A-A' (el vector de magnetización se muestra como conos en ambos casos junto con las isosuperficies indicadas) (MacLeod y Ellis, 2013).

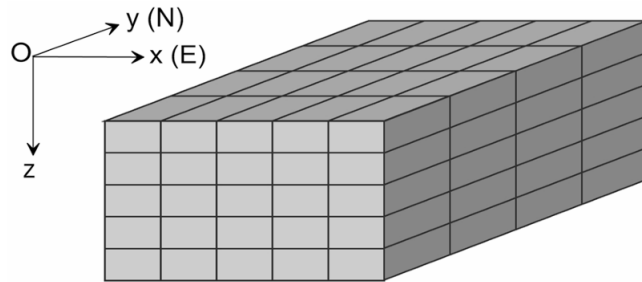


Figura 2.20. Representación del subsuelo en la discretización regular para realizar la inversión del vector de magnetización (MVI), donde el subsuelo se divide en celdas cuboides, donde cada celda está magnetizada por un vector de magnetización total homogéneo (TMV). Se tiene x (oeste-este) y (sur-norte), z (arriba-abajo) y centro (Liu et al., 2017).

CAPÍTULO 3. MARCO GEOLÓGICO

En el siguiente capítulo se describe la geología regional, distrital y local referente al área de estudio. Gran parte de las descripciones realizadas para la geología regional y distrital se basan en la síntesis del trabajo de del Real et al. (2018). Para el caso de la geología local, se toma como principal referencia a Fernández (2024).

3.1 Marco geológico regional

La zona de estudio está ubicada en la región de Atacama, específicamente en la comuna de Tierra Amarilla, dentro del cinturón cordillerano IOA-IOCG, en el límite entre la cordillera de la Costa y la Precordillera de Copiapó (fig. 3.1). Las rocas aflorantes y la mineralización conocida son predominantemente de edad Jurásico tardío a Cretácico temprano (~ 163-100 Ma) (del Real et al., 2018). Durante el Jurásico tardío-Cretácico temprano, habrían tenido lugar dos etapas principales en la actividad magmática y la evolución de las cuencas en la región. La primera etapa, que abarca desde el Pliensbachiano hasta el Kimmeridgiano (180- 100 Ma), estuvo marcada por una intensa actividad magmática en el arco, seguida por una disminución en la actividad magmática en algunas áreas durante el Kimmeridgiano hasta el Aptiano-Albiano (157– 100 Ma). En la región de Atacama, las rocas volcánicas formadas en el Jurásico tardío, durante la primera subetapa del magmatismo de arco y formación de la cuenca, se atribuye la Formación La Negra (Pliensbachiano-Jurásico Superior) (Naranjo, 1978; Godoy y Lara, 1998), mientras que en el sureste del distrito, unidades volcánicas similares se denominan Formación Sierra de Fraga (Iriarte et al., 1996) que se interdigitan hacia el este con unidades sedimentarias de la cuenca de retroarco pertenecientes a la Formación Lautaro (Jensen, 1976; Soffia, 1989). Durante la segunda subetapa, se registró un ciclo transgresivo-regresivo en lo que sería una cuenca de trasarco, donde se habrían depositado los productos volcánicos y sedimentarios que conforman las formaciones Punta del Cobre

(Jurásico Superior–Valanginiano inferior), Grupo Chañarcillo (Valanginiano superior–Aptiano) (conformado por: Fm. Abundancia, Fm. Nantoco, Fm. Totoralillo, Fm. Pabellón), y Fm. Bandurrias (Huateriviano–Aptiano inferior), la cual se interdigita con las formaciones del Grupo Chañarcillo (fig. 3.3). Luego, en el Cenomaniano, el entorno tectónico se volvió predominantemente transtensivo, caracterizado por vulcanismo episódico y depositación de sedimentos en cuencas marinas y continentales poco profundas en el intra-arco y trasarco, los que serían parte de la Formación Cerrillos (Albiano-Turoniano) (fig. 3.3) (Morata y Aguirre, 2003; Arévalo, 2005; del Real et al., 2018).

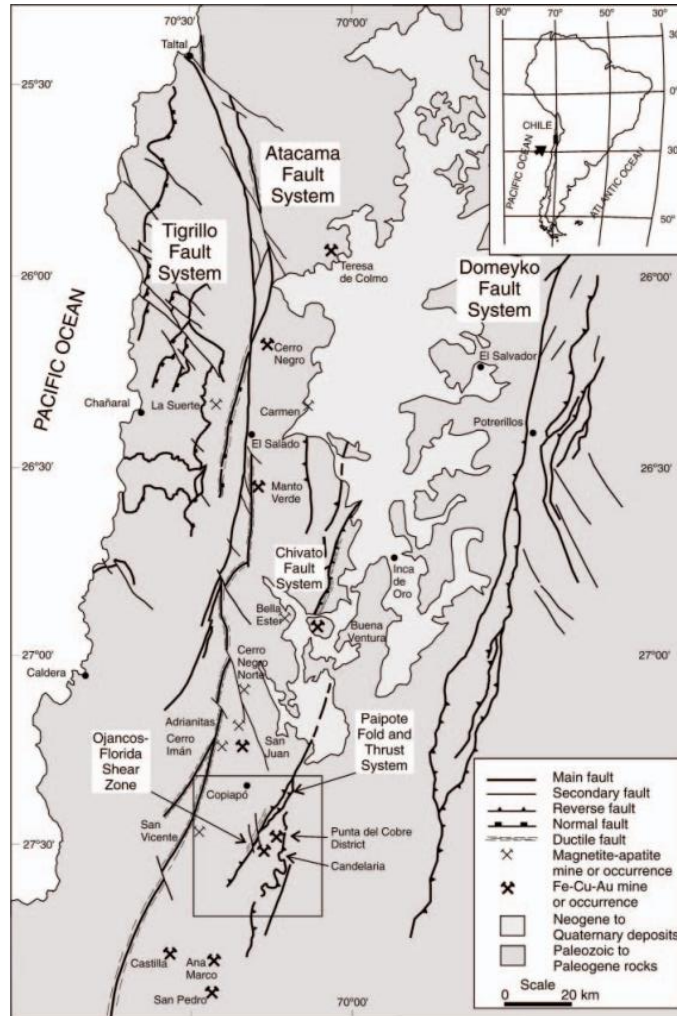


Figura 3.1. Principales trazas de falla que conforman los sistemas de fallas de Atacama y Domeyko y del sistema de fallas del límite de la Cordillera de la Costa y/o de la Precordillera de Copiapó. También se indican las principales minas y yacimientos de magnetita-apatita y óxido de Fe Cu-Au (Arévalo et al., 2006).

El registro geológico mencionado previamente muestra una transición desde un ambiente marino con actividad magmática continua (Charrier et al., 2007), hacia un ambiente continental con vulcanismo episódico (Morata y Aguirre, 2003), que terminaría con la erosión y remoción de los depósitos acumulados durante el Jurásico superior al Cretácico inferior (Kay y Kay, 1991; Stern, 1991). Lo anterior, se debería a la inversión y cierre de las cuencas de trasarco, que generarían el levantamiento de las formaciones del Jurásico Superior y del Cretácico Inferior (fig. 3.2) (Charrier et al., 2007; Ramos, 2009; Chen et al., 2013). Hacia el Cretácico Inferior, la extensión asociada a la formación de las

cuencas cambio paulatinamente hacia un ambiente transtensivo, el cual comienza en el norte durante el Barremiense (130 Ma) y alcanza su máximo en el Aptiano-Albiano (125-110 Ma) (Charrier et al., 2007). El plutonismo ocurrió durante ambas etapas de formación de cuencas y abarcó el cambio de tectónica extensional a la transtensional. Los cambios relacionados con el entorno tectónico se atribuyen a la reorganización paleogeográfica ocurrida desde el Cretácico Superior, donde se separa América del Sur de África. Las cuencas de trasarco a lo largo del margen Andino se cerraron, la placa Sudamericana comenzó a moverse hacia la placa de Nazca. Las tasas de convergencia relacionadas a la subducción en el margen Andino occidental aumentaron y la compresión-transpresión comenzó en la placa superior y ha sido relativamente continua desde entonces (Royden, 1993; Scheuber et al., 1994; Amilibia et al., 2008; Ramos, 2009).

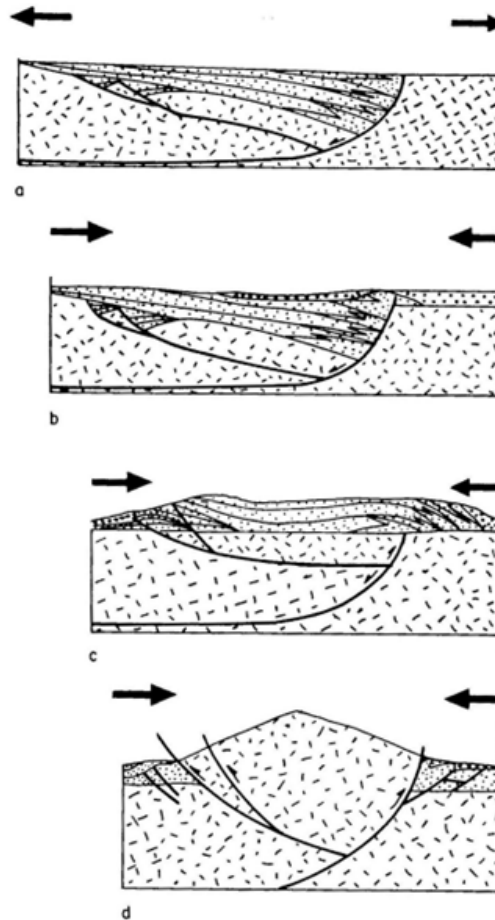


Figura 3.2. Evolución de cuencas de trasarco. a. Extensión y formación de semigrábenes con deposición marina sintectónica y magmatismo sinextensional; b. Somerización de la cuenca y deposición continental; c. Inversión; d.

Alzamiento del basamento por sobre el nivel de los sedimentos. Achurado es el basamento, punteado corresponde a los depósitos sedimentarios (Skarmeta, 1991).

Los principales sistemas estructurales reconocidos en el área de estudio son: el Sistema de Falla de Atacama (SFA), el Sistema de Falla de Domeyko (SFD), y la Faja Plegada y Corrida de Paipote. El SFA habría controlado el emplazamiento y deformación del arco magmático y las cuencas de arco durante el Jurásico Superior-Cretácico Inferior (Arabasz, 1971; Scheuber y González, 1999). La evolución cinemática de este sistema muestra un cambio de régimen dúctil, 195-155 Ma (Jurásico Inferior-Jurásico Superior), a uno frágil a partir de los 155 Ma (Jurásico Superior) (Brown et al., 1993; Scheuber et al., 1995; Dallmeyer et al., 1996; Scheuber y González, 1999; Grocott y Taylor, 2002). Los depósitos IOCG, como Mantoverde y algunos depósitos IOA en el cinturón de hierro chileno, se encuentran alojados dentro del SFA (Espinoza, 1990; Grocott et al., 1994; Wilson y Grocott, 1999; Grocott y Taylor, 2002). En diferentes áreas, estos depósitos muestran una relación espacial y temporal con fallas sinestrales de orientación N-NE y W-NE, como en los casos de los depósitos de Candelaria, Carola y Teresa de Colmo (fig. 3.4) (Arévalo et al., 2006; Cembrano et al., 2009; Marquardt et al., 2009). Algunas de estas fallas con rumbo N-NE se consideran como fallas de segundo orden directamente asociadas con el SFA, aunque en otros casos, muestran evidencia de actividad previa al desarrollo del SFA (Grocott y Taylor, 2002).

3.2. Geología del distrito Candelaria-Punta del Cobre

Los yacimientos del distrito Candelaria-Punta del Cobre están emplazados en rocas volcánicas de la Formación Punta del Cobre y las rocas sedimentarias suprayacentes del Grupo Chañarcillo, ambas intruidas por el batolito Copiapó hacia el oeste. Al oeste del distrito, se asignan a la Formación Bandurrias rocas volcánicas estratigráficamente equivalentes al Grupo Chañarcillo (fig. 3.3) (del Real et al., 2018).

El rumbo dominante de las unidades volcánicas y sedimentarias es N-NE, con manteos al W y E que definen el anticlinorio de Tierra Amarilla en la parte central del distrito (fig. 3.4), y estructuras subordinadas similares en otros lugares. La falla de Paipote está ubicada en el contacto del Batolito Copiapó y las rocas de la Formación Punta del Cobre/Grupo Chañarillo, y ha sido interpretada como una falla de cabalgamiento con vergencia W que se formó durante la inversión del Cretácico medio (del Real et al., 2018).

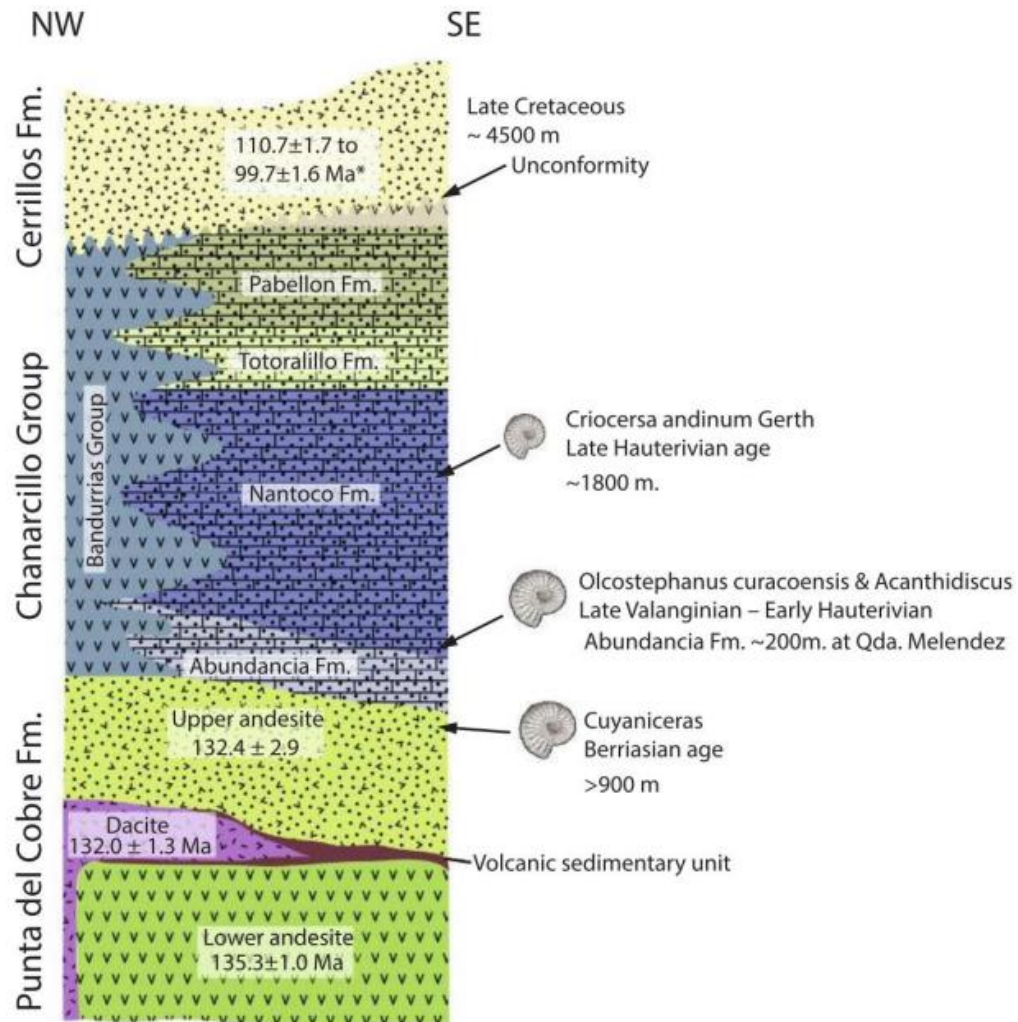


Figura 3.3. Columna estratigráfica del distrito con las principales edades geocronológicas y paleontológicas (del Real et al., 2018).

3.2.1. Unidades estratificadas

Formación Punta del Cobre (Segerstrom y Ruiz, 1962)

Definida como una secuencia volcánica sedimentaria, de estratificación gruesa, que sobreyace concordantemente a los estratos de la Formación La Negra, y subyace con el mismo tipo de relación a la Formación Abundancia (Arévalo, 205). Ha sido subdividida en varios miembros (Marschik y Fontbote, 2001b), que de base a techo son: Andesita Inferior, Dacita, Volcánico-sedimentario, y Andesita Superior (fig. 3.3). Del Real et al. (2018), basado en dataciones de U-Pb en circón, establece una edad mínima de la formación de $135,3 \pm 1,0$ Ma (parte superior del miembro de Andesita Inferior) y una edad máxima de $132,4 \pm 2,9$ Ma (miembro Andesita Superior).

Miembro Andesita Inferior

Rocas volcánicas masivas dominan la Andesita Inferior, las cuales comprenden andesitas de grano fino a medio, autobrechas de flujo, flujos de bloques y cenizas, y sedimentos volcánicos retrabajados (del Real et al., 2018). Las andesitas presentan fenocristales de plagioclasa y hornblenda, y en menor cantidad piroxeno. Se le interpreta un espesor mayor a 800 m basado en perforaciones de exploración (del Real et al., 2018). Bajo los 700 m del contacto superior, contiene intercalaciones sedimentarias que incluyen brechas polimícticas matriz soportadas y finas capas de sedimentos (del Real et al., 2018). Este miembro tiene una datación U-Pb en circón de $135,3 \pm 1,0$ Ma (del Real et al., 2018).

Miembro Dacita

Cuerpos dacíticos masivos y brechizados localmente se superponen en conformidad al miembro Andesita Inferior. Estos cuerpos dacíticos presentan textura porfídica con fenocristales de plagioclasas y biotitas. Las brechas se ubican comúnmente en los contactos inferiores y superiores de los cuerpos individuales de dacita (del Real et al.,

2018). Su espesor varía desde unos metros, hasta más de 200 m. Se propone que la Dacita se formó como serie de domos de lava sobre la Andesita Inferior (Marschik et al., 1997). Comúnmente la dacita está intensamente alterada a albita de color blanco a rosa pálido, razón por la cual esta unidad también ha sido llamada “Albitófiro” (del Real et al., 2018). Se tienen edades U-Pb en circón de $132,0 \pm 1,3$ Ma (del Real et al., 2018).

Miembro Volcánico-sedimentario

Cubriendo a la Andesita Inferior, en ausencia de la dacita, se observa una secuencia volcano-sedimentaria, la cual está compuesta de brechas volcánicas al este del valle de Copiapó, y por rocas sedimentarias de grano fino bien estratificadas con intercalaciones tobáceas al oeste. Este miembro se observa tanto sobreyaciendo como subyaciendo a la dacita (del Real et al., 2018), lo que sugiere que son contemporáneos. Las brechas volcánicas al este del río Copiapó son polimícticas, clasto soportadas y contienen mezclas variables de clastos de andesita, dacita, calizas y chert. La matriz de las brechas es comúnmente roja, producto de la hematita terrosa. En la parte occidental, este miembro está dominado por capas sedimentarias de grano fino y bandas ricas en biotita oscura. El espesor de este miembro varía desde ~20m en el lado este del río Copiapó hasta más de 150 m al norte del depósito Candelaria (del Real et al., 2018).

Miembro Andesita Superior

El miembro superior de la Formación Punta del Cobre consta de coladas andesítico-basálticas con fenocristales de plagioclasa, facies de autobrecha de flujo local, y lavas basálticas afaníticas. El miembro Andesita Superior se superpone en conformidad a los miembros Volcánico-sedimentario y Dacítico. Tiene un espesor variable de ~600 m al norte de Candelaria, pero se adelgaza significativamente hacia el norte y el este (10-50 m) de este yacimiento. El basalto presenta estructuras de *pillow*, de 0,5 a 1 m de ancho, y contiene amígdalas en una matriz afanítica (del Real et al., 2018). Las coladas andesítico-basálticas están localmente intercaladas con brechas, rocas volcánicas sedimentarias,

areniscas y calizas hacia la parte superior del miembro, el cual está cubierto en conformidad por las rocas sedimentarias de la Formación Abundancia del Grupo Chañarcillo. Se tiene una edad U-Pb en circón de $132,4 \pm 2,9$ Ma (del Real et al., 2018).

Grupo Chañarcillo (Segerstrom y Parker, 1959)

Sobreyace a la Formación Punta del Cobre e incluye un paquete mixto de rocas sedimentarias (Segerstrom y Parker, 1959; Segerstrom y Ruiz, 1962), la cual, desde la base, se divide en 4 formaciones: Abundancia, Nantoco, Totoralillo y Pabellón (fig. 3.3). El Grupo Chañarcillo varía desde lutitas, arcosas y estratos volcánicos menores en su base (Formación Abundancia), pasando por lutitas y brechas calcáreas con matriz evaporítica (Formación Nantoco), limolitas calcáreas (Formación Totoralillo), y cherts, calizas y areniscas calcáreas (Formación Pabellón) (del Real et al., 2018). La parte superior de la Formación Pabellón se habría formado en la etapa regresiva de la secuencia sedimentaria marina (Cisternas y Díaz, 1990; Mourgues, 2004).

Formación Abundancia (Biese-Nickel en Hoffstetter et al., 1957)

Serie calcáreo-arenosa, de alrededor de 200 m, que aparece cubierta en concordancia por las calizas de la Formación Nantoco. Secuencia formada por calcilutitas y grauwakas verdes con abundantes estructuras tipo *flame* y seudonódulos en la parte baja de la formación. Se dispone en capas muy continuas, internamente gradadas a techos de calcilutitas blanquecinas macizas o que desarrollan laminación muy fina. En la parte basal y media de la secuencia, se intercalan capas de volcarenitas verdes oscuras de grano fino a muy grueso y, en algunos lugares, conglomerádicas con gradación normal y bases erosivas, dándole un aspecto bandeado a la secuencia (Arévalo, 2005). Basado en la paleofauna descrita y descubierta en la formación se le asigna una edad correspondiente al Valanginiense Superior (Corvalán, 1974; Hoffstetter et al., 1957; Corvalán en Segerstrom, 1960; Segerstrom y Ruiz, 1962; Tavera, 1951; Mourgues, 2001).

Formación Nantoco (Biese-Nickel en Hoffstetter et al., 1957)

Secuencia monótona de calizas grises cuyo espesor varía entre 600 y 1200 m, que se apoya en concordancia sobre los estratos de la Formación Abundancia, y subyace de la misma manera a las rocas de la Formación Totoralillo (Arévalo, 2005). La formación se divide en 2 miembros, el miembro inferior está formado por 600 a 1000 m de calcilitas y calcilitas limosas (mudstones) en capas continuas, con presencia de facies de areniscas rojas y conglomerados bien estratificados desde la Quebrada de Meléndez hacia el norte. El miembro superior está formado por calcilitas negras finamente laminadas y calcarenitas amarillentas, y posee un espesor promedio de 200 m. Las rocas de esta unidad se encuentran comúnmente plegadas y brechizadas formando un solo nivel deformado, generalmente concordante con la estratificación (Seegerstrom y Parker, 1959). La presencia de ammonites en la parte alta de la formación permite asignarle una edad del Huateriviano (Seegerstrom 1960; Corvalán 1974; Mourgues 2001).

Formación Totoralillo (Biese-Nickel en Hoffstetter et al., 1957)

Secuencia de calcilitas con buena estratificación y colores gris claros a amarillentos, de aspecto uniforme en toda la extensión de sus afloramientos. Sobreyace, de manera concordante, a las rocas de la Formación Nantoco y está cubierta, de la misma manera, por los estratos de la Formación Pabellón. El espesor de la formación varía entre 170 y 250 m (Arévalo, 2005). Las calcilitas se organizan en ciclos grano y estrato crecientes de calcilitas con laminación plana milimétrica en la base, que gradan a calcilitas arenosas con intercalaciones de calcilitas bioclásticas ('wackestones') en capas macizas (20-40 cm de espesor) hacia el techo (Arévalo, 2005). Se le asigna una edad del Barremiano, basado en los ejemplares de ammonites descritos en la formación (Tavera, 1956; Corvalán, 1974; Mourgues, 2001).

Formación Pabellón (Biese-Nickel en Hoffstetter et al., 1957)

Secuencia calcárea arenosa de 450 a 700 m de espesor, que yace en concordancia sobre las calcilitas de la Formación Totoralillo. Está cubierta en una relación de discordancia erosiva por los estratos de la Formación Cerrillos (Arévalo, 2005). La secuencia está formada en la base por calcilitas gris claras y amarillentas y calcilitas bioturbadas bien estratificadas. Hacia arriba se intercalan progresivamente bancos más potentes de calcarenitas y calciruditas muy bioclásticas hasta hacerse dominantes en el techo. En su parte más basal, presenta intercalación de fangolitas montmorilloníticas negras. En la sierra Checo de Cobre las calizas se intercalan con areniscas y conglomerados volcánicos con buena estratificación (Arévalo, 2005). En base a la paleofauna presente y descrita en la formación, se le asigna una edad Barremiano superior - Aptiano superior temprana (Tavera, 1956; Corvalán, 1974; Pérez et al., 1990; Pérez et al., 2000; Mourgues, 2001).

Formación Bandurrias (Segerstrom, 1960)

Secuencia volcánica sedimentaria que sobreyace concordantemente a las calizas de la Formación Abundancia y a brechas de la Formación Punta del Cobre, y subyace mediante discordancia de erosión a rocas de la Formación Cerrillos (Arévalo, 2005). Se interdigita con el Grupo Chañarcillo hacia el norte del distrito, indicando una temporalidad equivalente (fig. 3.3). Su potencia aumenta hacia el norte del distrito, alcanzando espesores de entre 2500 y 3000 m (del Real et al., 2018). Contiene andesitas basálticas a andesitas y traquiandesitas, mezclada con sedimentos volcanoclásticos continentales y tobas intercaladas de calizas y areniscas marinas someras (Segerstrom, 1960, 1967). La paleofauna presente en la formación sugiere un rango de edad que va entre el Huateriviano y el Aptiano inferior (Corvalán en Segerstrom, 1960; Covacevich, 1994; Pérez y Reyes, 1999; Mourgues, 2001).

Formación Cerrillos (Segerstrom y Parker, 1959)

Serie clásica volcánica continental, con aproximadamente 4000 m de espesor, la cual yace en discordancia de erosión sobre la Formación Pabellón (Arévalo, 2005). Consiste

en una sucesión de areniscas bien estratificadas seguidas, hasta el techo de la formación, por brechas y conglomerados en los que se intercalan aisladamente coladas andesítico-basálticas (Arévalo, 2005). Las unidades clásticas gruesas contienen clastos de piedra caliza de la Formación Nantoco (Amilibia, 2009). Las intercalaciones volcánicas en los conglomerados arrojaron edades U-Pb en circón de $110,7 \pm 1,7$ y $99,7 \pm 1,6$ Ma (Maksaev et al., 2009).

3.2.2. Unidades intrusivas

En el área se reconocen rocas intrusivas que varían composicionalmente desde diorita a cuarzo monzonita (Marschik y Fontbote, 2001a), con edades en un rango de 135–47 Ma (del Real et al., 2018). Los cuerpos plutónicos de mayor tamaño han sido interpretados como parte de un cuerpo de grandes dimensiones comúnmente denominado batolito Copiapó (p.ej. Diorita La Brea, monzodiorita San Gregorio, Los Lirios granodiorita a tonalitas, Tilling, 1976; Arévalo, 1999; Marschik y Söllner, 2006). Intrusivos más pequeños, diques y sills se presentan en el área con relaciones temporales variables con el batolito Copiapó, deformación y mineralización (del Real et al., 2018).

Intrusivos pre-mineralización

Se expone un pequeño cuerpo de granodiorita cerca del depósito de Alcaparrosa, que intruye en la Andesita Inferior. La intrusión está compuesta por plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo y biotita, con texturas equigranulares de grano medio a fino. Se altera hacia sus márgenes a albita y magnetita, con algunas vetas de calcopirita y pirita. Los datos geocronológicos indican que esta unidad tiene una edad U-Pb en circón de $135,2 \pm 1,3$ Ma (del Real et al., 2018). Esta intrusión granodiorítica se interpreta como un cuerpo subvolcánico relacionado con la Andesita Inferior de la Formación Punta del Cobre. Aunque es de edad sin-volcánica, la mineralización y la alteración se limitarían al margen de la intrusión debido a su naturaleza competente y la falta de estructuras transversales (del Real et al., 2018).

En minas cercanas (Candelaria Norte, Carola, Punta del Cobre y Santos), están expuestos diques dioríticos. Los diques presentes en mina Carola presentan una orientación N-NW, y cortan dacitas masivas del miembro Dacita (del Real et al., 2018). Los diques presentes en Candelaria Norte presentan una orientación N-NW a NW (Del Real et al., 2018). En ambos sectores, los diques muestran una alteración moderada de magnetita-biotita-actinolita y vetillas transversales de calcopirita-magnetita \pm actinolita. En dos de los diques presentes en mina Carola se han obtenido edades U-Pb en circón de $124,9 \pm 0,4$ Ma y $121,9 \pm 2,4$ Ma (Pop et al., 2000). Ninguno de estos diques corta la mineralización, por lo que se considera que son pre-mineralización (del Real et al., 2018).

Batolito Copiapó

El batolito Copiapó está compuesto por tres fases principales: dioritas La Brea, la monzodiorita San Gregorio y la granodiorita Los Lirios (Tilling, 1976; Arévalo, 1999; Marschik y Söllner, 2006). Además, se encuentran dos intrusiones más pequeñas: el pórfido de Adamelita y una granodiorita sin nombre (del Real et al., 2018).

La diorita La Brea es la fase dominante, y comprende diorita de piroxeno con grano grueso y diorita de hornblenda con grano medio a grueso (del Real et al., 2018). Muestra una alteración moderada a débil de feldespato \pm magnetita (Marschik y Fontbote, 2001a; Kreiner y Barton, 2009) y localmente posee vetillas mineralizadas (calcopirita-pirita) (Kreiner y Barton, 2009). La edad U-Pb en circón para La Brea es 118 ± 1 Ma, la cual es la edad más antigua reportada para cualquier fase del batolito Copiapó (Marschik y Söllner, 2006).

La fase San Gregorio es una monzodiorita de grano medio a grueso, presenta una orientación norte-noreste, y se observa en contacto por falla con la diorita La Brea (del

Real et al., 2018). La edad U-Pb en circón para la fase intrusiva San Gregorio es de 115,5 ± 0,4 Ma (Marschik y Söllner ,2006).

La fase Los Lirios varía de granodiorita a tonalita en composición, y tiene una tendencia alargada N-NE (Arévalo, 1999; Tilling, 1976). Presenta un contacto vertical con la diorita La Brea al oeste, mientras que al este intruye a rocas de la Formación Punta del Cobre y del Grupo Chañarcillo (Arévalo et al., 2006). Su edad U-Pb en circón es de 110,7 ± 0,4 Ma, convirtiéndola en la fase más joven del batolito de Copiapó (Marschik y Söllner, 2006).

El pórfido de Adamelita, una intrusión más pequeña, posee una orientación N-NW (Marschik et al., 2003; Marschik y Söllner, 2006), y está compuesta principalmente por pórfido de cuarzo monzonita con fenocristales de plagioclasa y anfíbol en una matriz rica en ortoclasa y cuarzo (del Real et al., 2018). Se reporta una edad U-Pb en circón de 116 ± 0,4 Ma (Marschik y Söllner, 2006).

Una intrusión granodiorítica fue mapeada por Marschick et al. (2003) al SW del yacimiento de Candelaria, la cual consiste en plagioclasa equigranular de grano medio, ortoclasa, cuarzo, anfíbol y biotita. Se interpreta que esta intrusión pertenece al batolito Copiapó (Marschik et al., 2003) y puede estar relacionada con la fase adyacente de Los Lirios, aunque no hay pruebas suficientes que verifiquen dicha asociación (del Real et al., 2018).

Una serie de diques de dacita con textura porfídica y fenocristales de plagioclasa y anfíbol se observaron en un sondeo profundo al sur del yacimiento de Candelaria, que expuestos tiene una orientación NW (del Real et al., 2018). Los diques de dacita cortan el reemplazo pervasivo y la mineralización de vetas asociadas, pero albergan vetillas de magnetita y calcopirita, lo que sugiere que se emplazaron tarde en el evento mineralizador

(del Real et al., 2018). Dos de los diques muestreados arrojaron edades U-Pb en circón de $115,2 \pm 1,8$ y $112,8 \pm 1,3$ Ma, correlacionándose con el rango medio de edades del batolito Copiapó (del Real et al., 2018).

Intrusiones post-mineralización

Diques lamprofíricos cortan la mineralización en los depósitos Santos, Punta del Cobre y Carola, los cuales se extienden desde la Formación Punta del Cobre hasta los sedimentos suprayacentes del Grupo Chañarcillo (del Real et al., 2018). Pop et al. (2000), señalan edades K-Ar en roca total de $85,2 \pm 4$ Ma hasta $63,2 \pm 2,5$ Ma para los diques lamprofíricos. En la parte sur del distrito, entre Candelaria y el prospecto Kaiser (8 km al SW de Candelaria) se observan una serie de diques dioríticos porfídicos con fenocristales de plagioclasa que suelen ser llamados “pórpidos dacíticos” (del Real et al., 2018). Estos diques tienen orientación E-W y cortan a la Formación Punta del Cobre y el Grupo Chañarcillo (del Real et al., 2018). Para uno de estos diques se tiene una edad U-Pb en circón de $47,3 \pm 3,9$ Ma (del Real et al., 2018).

3.2.3. Estructura

En el distrito se observa una compleja estructura definida por fallas, pliegues y diques que exhiben diversas orientaciones, aunque predominan fallas con tendencias: N-S, NW-SE, NE-SW y ~E-W (Arévalo et al., 2006; del Real et al., 2018). El rasgo estructural de mayor tamaño es el llamado Anticlinorio de Tierra Amarilla (fig. 3.4) (p. ej., Marschik y Fontbote, 2001a; Arévalo et al., 2006; Amilibia, 2009; Martínez et al., 2013; del Real et al., 2018), definido por la orientación y manteo que muestran los estratos y varias estructuras a ambos lados del valle del río Copiapó. El anticlinorio muestra una orientación N-S en el valle, pero con tendencia NE-SW en el depósito Candelaria (fig. 3.4), y según Ortega (1998), el manteo de las capas de los flancos varía entre 20° a 30° con dirección SE, pero algunas flexuras bruscas pueden llegar a ser verticales. Siguiendo el esquema de del Real et al. (2018), basado en sus interpretaciones y exposiciones

disponibles, junto con la de otros autores (Marschik y Fontbote, 2001a; Arévalo et al., 2006; Amilibia, 2009; Martínez et al., 2013), se pueden describir cinco estilos de fallas en el distrito:

- 1) Fallas normales de rumbo E-W, E-NE, W-NW, N-NW, con deslizamiento horizontales a subverticales, se han observado en el valle del río Copiapó, al sur de Paipote (Arévalo, 2005). Estas fallas afectan a las rocas de la Formación Punta del Cobre y se hacen más evidentes en las rocas sedimentarias suprayacentes, donde el desplazamiento en la parte basal de la Formación Abundancia es del orden de decena de metros (fig. 3.5a) (del Real et al., 2018). Estas fallas se relacionarían con la extensión y formación de la cuenca Chañarcillo (Martínez et al., 2013; del Real et al., 2018).
- 2) Zona de cizalle de alto ángulo de Ojancos, la cual se interpreta como una estructura sin-intrusión relacionada con el emplazamiento del batolito Copiapó. Ocurre en el contacto entre la fase intrusiva San Gregorio y el Grupo Chañarcillo (fig. 3.4), extendiéndose hacia el sur donde se infiere que forma el contacto oriental con la diorita La Brea (del Real et al., 2018).
- 3) Zonas de cizalle Candelaria de orientación ~NE y bajo ángulo, presente en el depósito del mismo nombre, se desarrolla y sigue el contacto de la Andesita Inferior y el miembro volcánico-sedimentario extendiéndose hacia el sur del depósito (del Real et al., 2018).
- 4) Fallas de rumbo de orientación ~N-S con un movimiento de deslizamiento lateral izquierdo (sinestral) (Arévalo et al., 2006), algunas con extensión hacia rocas sedimentarias de la Formación Abundancia. Las principales fallas de este tipo son la falla de Lar, que corta el yacimiento de Candelaria y falla del Rocío/Alcaparrosa (fig. 3.4). Se interpreta que el movimiento principal de estas fallas se relacionaría

con un evento transpresional sinistral regional durante el Aptiano (Marschik y Fontbote, 2001a; del Real et al., 2018).

- 5) Pliegues abiertos a localmente reclinados y fallas inversas relacionadas con la compresión e inversión tectónica de la cuenca como, por ejemplo, la falla Paipote, la cual tienen una tendencia N-S y NE-SW (Arévalo et al., 2009). Las fallas inversas como, por ejemplo, la falla San Gregorio (fig. 3.4), la cual tiene orientación NW-SE, y N-S al sur de Candelaria, están asociadas a pliegues asimétricos (e.g. Cerrillos, La Portuguesa, Nantoco) y se han interpretadas como fallas normales de alto ángulo reactivadas inversamente (fig. 3.5c) (Martínez et al., 2013).

Varios trabajos coinciden en que la estructura habría desempeñado un control relevante en la distribución de las zonas mineralizadas en el distrito de Candelaria-Punta del Cobre (p.ej., Camus, 1980; Arévalo et al., 2006; Amilibia, 2009). En ciertos depósitos, especialmente en la parte oriental del área, la mineralización se encuentra en estructuras de vetas que se extienden por kilómetros en dirección N-S a N-NW. Estas estructuras registran predominantemente una cinemática de deslizamiento sinistral durante el relleno de las vetas (del Real et al., 2018). Además, en algunos depósitos, las áreas con minerales diseminados y reemplazo siguen la orientación de las fallas que contienen la mineralización, con fracturas mineralizadas que también se alinean de manera similar (del Real et al., 2018).

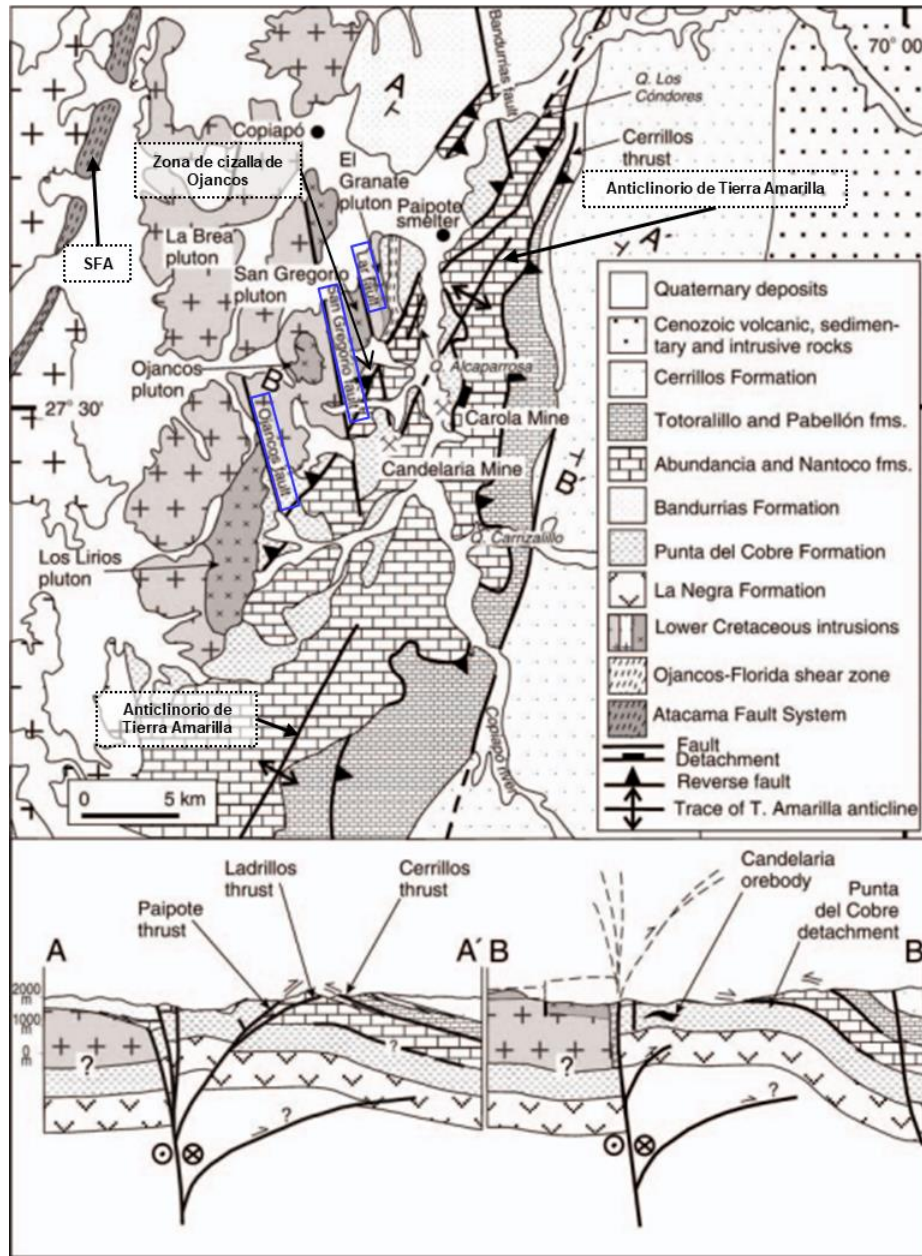


Figura 3.4. Mapa geológico y secciones del distrito Candelaria-Punta del Cobre, mostrando las principales intrusiones del batolito del Cretácico Inferior y las estructuras de la adyacente Precordillera de Copiapó. En las secciones transversales se encuentra en el contacto superior del yacimiento (modificado de Arévalo et al., 2006).

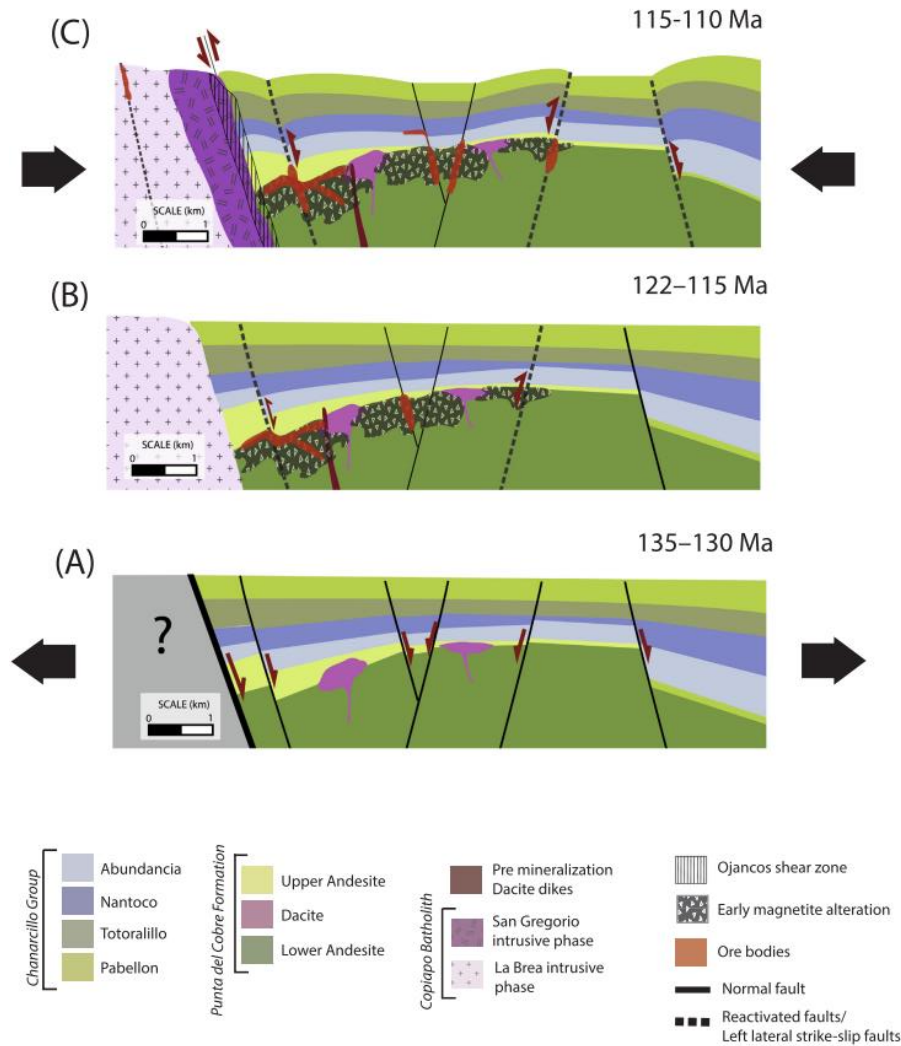


Figura 3.5. Eventos tectónicos y de mineralización interpretados para el distrito Candelaria-Punta del Cobre (del Real et al., 2018).

3.3 Geología de la mina Carola

3.3.1. Unidades litológicas

Las rocas observadas en la propiedad de la SCM Carola mayoritariamente son parte de la Formación Punta del Cobre y del Grupo Chañarcillo. Las figuras 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 muestran columnas estratigráficas, planta y sección representativa de la geología de la mina. Las unidades litológicas que se presentan a continuación siguen la convención de

mapeo establecido por la Superintendencia de Geología de SCM Carola y se basan principalmente en las descripciones que aparecen en el trabajo de Fernández (2024), el cual se enfocó en los sectores de Carola Central (fig. 3.6) y Adriana Norte (fig. 3.7). De base a techo, las unidades son:

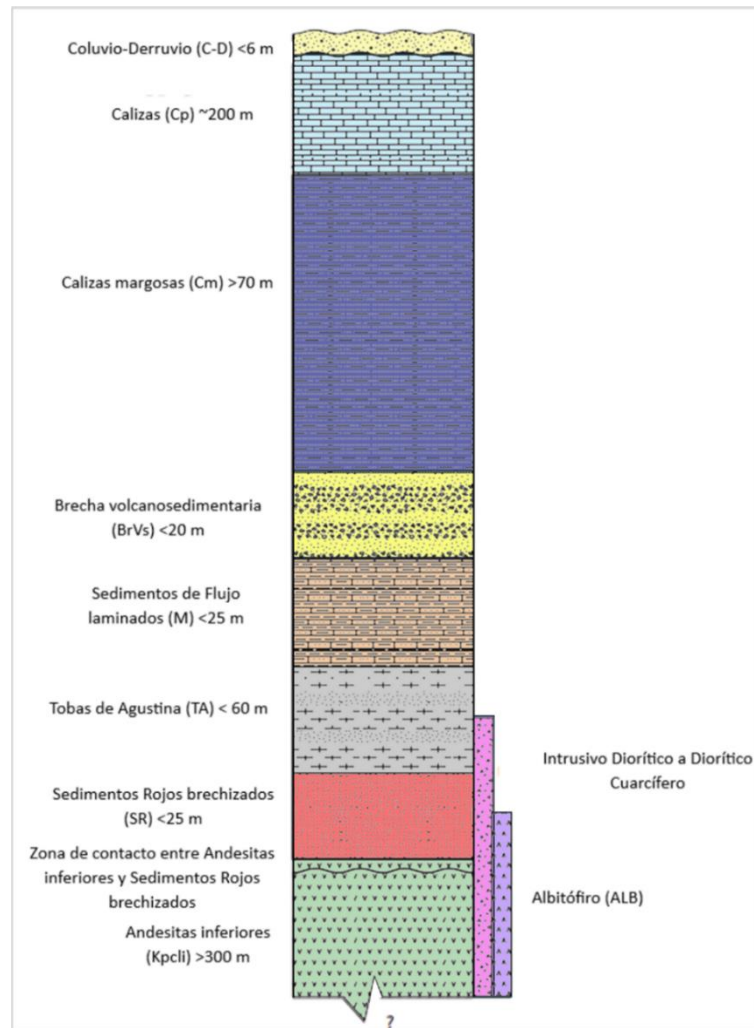


Figura 3.6. Columna estratigráfica de Mina Carola, extraída de informe geológico y mineralógico de la propiedad (modificado de SCM Carola, 2019).

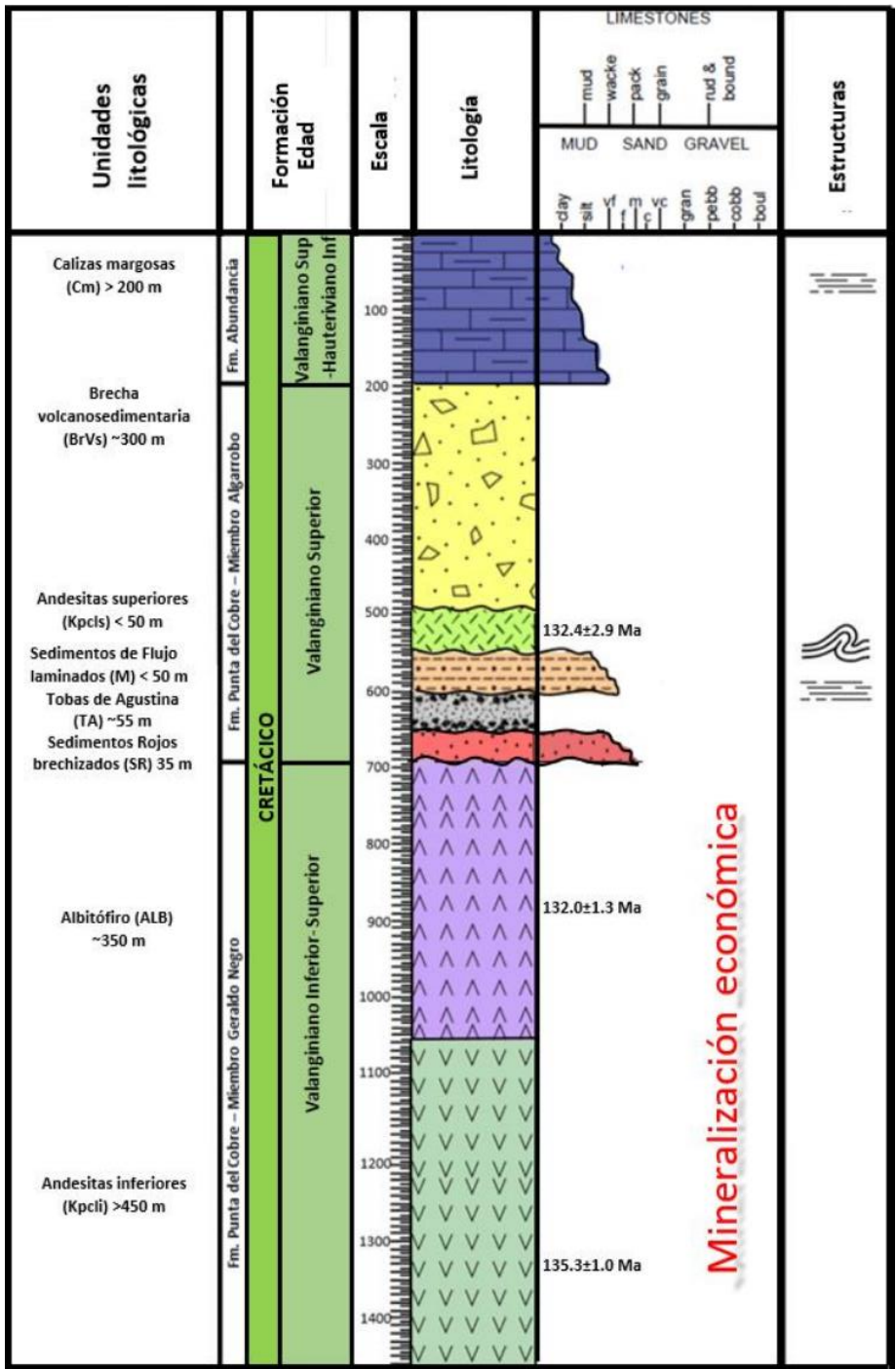


Figura 3.7. Columna estratigráfica tipo de Adriana Norte con las unidades litológicas presentes en el sector (Fernández, 2024).

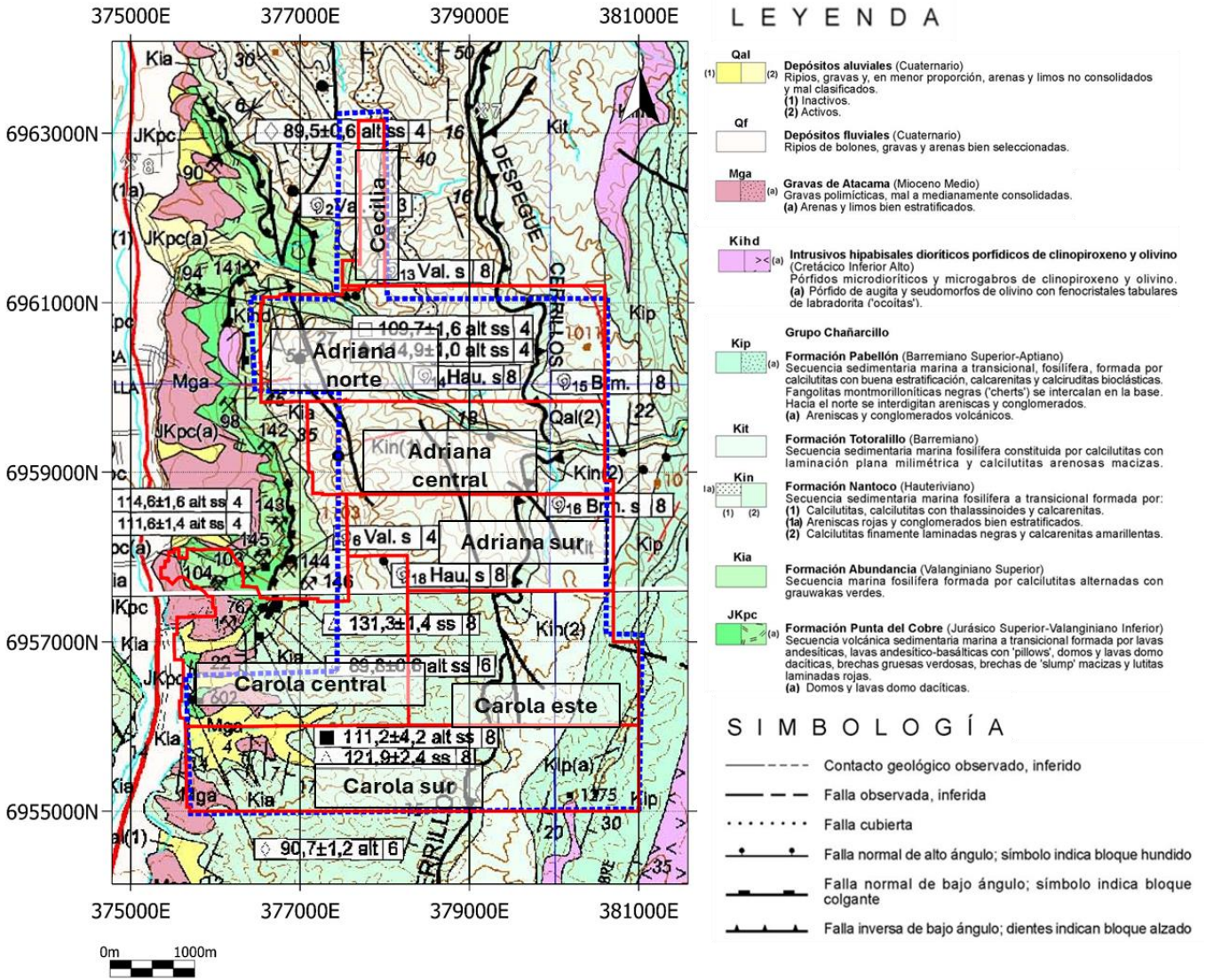


Figura 3.8. Extracto de carta geológica Copiapó (Arévalo, 2005a) y Los Loros (Arévalo, 2005b) con la ubicación relativa de las concesiones de SCM Carola. Con líneas rojas se indican las concesiones de SCM Carola y con líneas punteadas azules el área abarcada por el estudio de magnetometría aérea realizada por Southernrock geophysics.

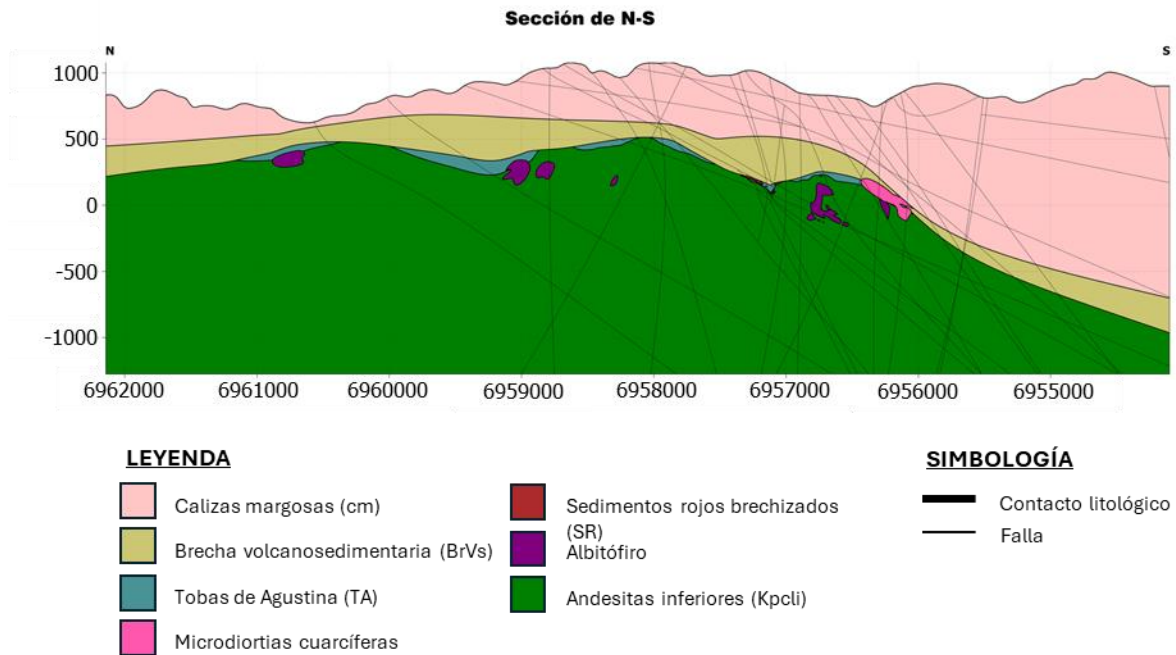


Figura 3.9. Sección N-S representativa de la geología presente en las concesiones de SCM Carola, donde se muestran las principales unidades geológicas, contactos y líneas de fallas.

3.3.1.1. Unidad Andesitas Inferiores

Dentro de esta unidad se describen 3 tipos de litologías: andesitas inferiores, brecha de techo y brecha hidrotermal. La base de la unidad es desconocida, pero se estima que cuentan con un espesor aproximado de 300 - 400 metros (figs. 3.6 y 3.7). Esta unidad se correlacionaría con el miembro Andesita Inferior de la Formación Punta del Cobre (fig. 3.3), descrito por ejemplo en Marschik y Fontboté (2001) y del Real et al. (2018).

Litología andesitas inferiores

Corresponde a una roca volcánica color gris oscuro verdoso, de textura principalmente porfídica, y en algunos casos afanítica. Presenta fenocristales de plagioclasa sobre una masa fundamental afanítica de tonalidad oscura. La matriz se encuentra cloritizada y los fenocristales presentan alteración potásica (feldespato potásico, biotita y/o sericita) leve a intermedia. Esta litología comúnmente presenta silicificación, magnetización y, en menor

proporción, epidotización. Esta unidad es la principal hospedante de calcopirita (que se presenta en vetillas, diseminados, cúmulos y masiva), y presenta comúnmente pirita (en cúmulos, diseminado y vetillas) y óxidos de hierro en vetillas, stockwork y diseminados (hematita, especularita, magnetita y mushketovita). Según la base de datos de sondajes históricos de mina Carola, las intensidades de los óxidos de hierro puede variar de débil a fuerte según la profundidad y el tipo de mineral. En general, en zonas más profundas se presentan intensidades moderadas a fuertes de magnetita y mushketovita, e intensidades débiles de hematita y especularita. Para las zonas más cercanas al techo, se presentan intensidades débiles a moderadas de magnetita y mushketovita, e intensidades moderadas de especularita y hematita. La litología de andesitas inferiores también presenta calcita, actinolita y cuarzo.

Litología brecha de techo

Corresponde a una brecha volcanosedimentaria, con una matriz andesítica afectada por cloritización fuerte y alteración potásica (feldespato potásico, biotita y/ sericita) intermedia a fuerte, y clastos de origen sedimentario (generalmente de la unidad Sedimentos Rojos brechizados). Se ubica en el contacto entre la litología de Andesitas inferiores y la unidad Sedimentos Rojos brechizados (SR) o la unidad Toba de Agustinas (TA), y se presenta cuando el Albitófiro no está en contacto simultáneo con las Andesitas inferiores (base) y los Sedimentos Rojos brechizados (techo). Hospeda calcopirita (diseminada, vetillas y/o cúmulos), pirita (cúmulos y diseminados), calcita (vetillas) y cuarzo (vetillas).

Litología brecha hidrotermal

Consiste en una brecha monomítica clastosoportada, con matriz andesítica y clastos de andesita con alteración potásica (feldespato potásico y/o biotita) intermedia a fuerte. El cemento consiste en minerales hidrotermales como magnetita y mushketovita (no se presenta información de sus intensidades) o incluso calcopirita asociada a pirita. Su

ubicación es variable, pudiendo presentarse en contacto, y entrelazada, con litologías de andesitas inferiores y brecha de techo.

3.3.1.2 Unidad Albitófiro

Dentro de esta unidad se agrupan las litologías de Albitófiro y Autobrecha, la cual cuenta con un espesor estimado de 350 m. Para la litología albitófiro se describen 2 litologías, una de manera general para las dependencias de SCM Carola, y otra establecida específicamente en el sector de Adriana Norte.

Litología albitófiro

El albitófiro generalmente se intercala con la unidad de Andesitas Inferiores o está en contacto con la unidad Sedimentos Rojos brechizados, y es de gran importancia económica al igual que las Andesitas Inferiores. Corresponde a una roca volcánica andesítica de textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa y una masa fundamental de color gris verdoso. Presenta además minerales ferromagnesianos como anfíboles y biotita altamente cloritizados. La masa fundamental presenta alteración de albita intermedia a fuerte. Presenta calcopirita débil-moderada (vetillas, diseminado y/o cúmulos) y minerales de ganga como vetillas de calcita, hematita y specularita débiles. Según Lino (1984), esta roca andesítica pasó por un proceso de espilitización, donde su mineralogía primaria (plagioclasa, calcita, máficos y vidrio) fue transformada en un agregado de clorita, epidota, albita, sílice residual y hematita.

El albitófiro descrito para Adriana Norte consiste en una roca volcánica de composición dacítica con textura porfídica y una masa fundamental afanítica de color gris verdoso claro, y fenocristales de plagioclasa. Los minerales ferromagnesianos se encuentran cloritizados y presenta alteración de feldespato potásico y sericita leve en la masa fundamental. Presenta mineralización de pirita y calcopirita débil, y no presenta hematita ni magnetita. Esta unidad se correlacionaría con la Dacita o Dacita de Meléndez (fig. 3.3) descrita por Marschik y Fontboté (2001) perteneciente a la Formación Punta del Cobre.

Litología autobrecha

Se encuentra delimitada por la unidad Albitófiro en su parte inferior y superior, y corresponde a una brecha monomítica volcánica clastosoportada, con clastos de Albitófiro y de mala selección. La matriz posee tonalidades más oscuras que los clastos, presentando mineralización de pirita diseminada.

3.3.1.3 Unidad Sedimentos Rojos brechizados

Se ubica sobre, o en intercalación con, las unidades de Andesitas Inferiores y Albitófiro, y tiene un espesor de 35 m o menos (figs. 3.6 y 3.7). Dentro de la unidad se encuentran definidas las litologías denominadas sedimentos rojos brechizados, sedimentos rojos laminados y brecha de contacto, esta última solo para el sector de Adriana Norte. Esta unidad se correlaciona con el miembro Volcánico-sedimentario (fig. 3.3) descrito por ejemplo en Marschik y Fontboté (2001) y del Real et al. (2018) para la Formación Punta del Cobre.

Litología sedimentos rojos brechizados

Consiste en una brecha volcanosedimentaria polimítica, de matriz tamaño arena o lutita de color rojo. Presenta mala selección de clastos, los cuales en caso de ser volcánicos presentan alteración potásica (feldespato potásico y/o biotita) y cloritización. Puede presentar mineralización de calcopirita débil (diseminada) con asociaciones de pirita y vetillas de calcita, aunque en general esta unidad es considerada el horizonte estratigráfico donde termina la mineralización. También puede presentar especularita débil en vetillas y diseminado.

Litología sedimentos rojos laminados

Consiste en rocas compactas de color rojo con estructura laminar, afectada por microfallas. En cuanto a mineralización, solo presenta pirita diseminada.

Litología brecha de contacto

Corresponde a una brecha volcanosedimentaria ubicada en el contacto entre la Unidad Albitófiro y la unidad de Sedimentos Rojos brechizados (SR). Se compone de clastos volcánicos de Albitófiro y Andesitas Inferiores, principalmente, con alteración potásica (feldespato potásico y/o biotita) y cloritización leve a intermedia, y con matriz tamaño arena de color rojo. Presenta mineralización de calcopirita débil (diseminado o cúmulos), diseminación de pirita, y vetillas de mushketovita débil, magnetita débil y calcita.

3.3.1.4 Unidad Tobas de Agustina

En su base, se encuentra en contacto con la unidad Sedimentos Rojos brechizados, y en su techo, por lo general, con la unidad Sedimentos de Flujo laminados. Cuenta con un espesor aproximado de 55 metros (figs. 3.6 y 3.7) e incluye las litologías de (i) toba de Agustina, (ii) toba de Agustina y sedimentos rojos, (iii) lutitas margosas y la (iv) brecha de contacto. Esta unidad se correlacionaría con el miembro Volcánico-sedimentario (fig. 3.3) de la Formación Punta del Cobre descrito por ejemplo en Marschik y Fontboté (2001) y del Real et al. (2018).

Litología toba de Agustina

Consiste en una toba lítica con piroclastos polimícticos, de origen volcánico y sedimentario, muy mal seleccionados. La matriz es de color verde claro, generalmente carbonatada. Presenta mineralización de pirita diseminada, magnetita débil (diseminada o en vetillas) y calcita en vetillas. También se considera dentro de esta litología a rocas brechosas volcanosedimentarias, polimícticas, mal seleccionada y matriz soportada, con

clastos provenientes de la unidad Sedimentos Rojos brechizados, lutitas verdes y calizas en una matriz con granos de tamaño arena a arcilla de color verde.

Litología lutitas margosas

Rocas sedimentaria clásticas de grano tamaño arcilla y color verde claro,. El autor de esta tesis observó en sondajes la presencia de minerales como calcita y/o yeso, y carbonatación.

Litología tobas de Agustina y Sedimentos Rojos

Corresponde a brechas volcanosedimentarias con matriz tamaño arena de color rojo, con clastos mal seleccionados de lutitas margosas pertenecientes a la unidad Toba de Agustina. Generalmente presenta vetillas de calcita, hematita débil, especularita débil y diseminación de pirita.

Litología brecha de contacto

Se ubica en el contacto entre las unidades de Tobas de Agustina y Albitófiro, presentando interdigitación con Sedimentos Rojos brechizados. Consiste en una brecha volcanosedimentaria con matriz de color verde correspondiente a la unidad Tobas de Agustina principalmente de lutita o toba, con clastos mal seleccionados de Albitófiro cloritizado y/o arena rojiza de la unidad Sedimentos Rojos brechizados. Presenta mineralización de pirita.

3.3.1.5 Unidad Sedimentos de Flujo laminados

Comúnmente se encuentra sobre la unidad Tobas de Agustina (fig. 3.6) o en intercalaciones con la unidad de Andesitas Superiores. Presenta un espesor máximo de 50 metros (fig. 3.7) y consta de dos tipos de litologías: los sedimentos de flujo laminados y la brecha de contacto (exclusivamente observada en Adriana Norte). Se correlacionaría

con el miembro Volcánico- sedimentario (fig. 3.3) de la Formación Punta del Cobre descrito por ejemplo en Marschik y Fontboté (2001) y del Real et al. (2018).

Litología sedimentos de flujo laminados

Corresponde a rocas sedimentarias de color gris claro a oscuro con estructura de laminación y en ocasiones *slumping*. Las laminaciones consisten principalmente de calizas, lutitas y areniscas, generalmente silicificadas. Presenta minerales como pirita, hematita, jaspe y cuarzo.

Litología brecha de contacto

Brecha volcanosedimentaria de matriz color gris oscuro a negro de composición andesítica-basáltica con clastos mal seleccionados. Sus clastos corresponden a rocas sedimentarias carbonáticas, como calizas o margas, usualmente con laminaciones. Presenta mineralización de pirita, hematita y calcita.

3.3.1.6 Unidad Andesitas Superiores

Esta unidad se encuentra intercalada con rocas sedimentarias y volcanosedimentarias pertenecientes a la unidad Brecha volcanosedimentaria y la unidad Sedimentos de Flujo laminados, y contempla un solo tipo de litología con un espesor máximo de 50 metros (fig. 3.7). Consiste en rocas volcánicas de composición andesítica a basáltica de color verde oscuro a gris oscuro o negro de textura tanto afanítica como porfídica, comúnmente presenta vesículas o amígdalas de calcita. La textura porfídica se identifica por la presencia de fenocristales de plagioclasas en una masa fundamental mesocrática. En ocasiones los cristales de plagioclasa son reemplazados por calcita. Generalmente presenta cloritización fuerte y silicificación intermedia a fuerte. Contiene vetillas de cuarzo y calcita, stockwork de calcita y diseminación de pirita. No presenta mineralización de mena. Esta unidad correspondería a las Lavas Superiores descritas en Marschik y

Fontboté (2001), y al miembro Andesítico Superior descrito en del Real et al. (2018), siendo parte del techo de la Formación Punta del Cobre.

3.3.1.7 Unidad Brecha volcanosedimentaria

Esta unidad cuenta con variadas litologías, dentro de ellas se encuentran las brechas volcanosedimentarias, lutitas silíceas, chert, lutitas margosas, litoarenitas, areniscas y calizas margosas. En cuanto a las litologías sedimentarias, estas generalmente se interdigitan, además de formar estructuras de laminación. Esta unidad se correlacionaría con el miembro Andesítico Superior (fig. 3.3) mencionado por ejemplo en Marschik y Fontboté (2001) y del Real et al. (2018).

Litología brecha volcanosedimentaria

Consiste en una brecha polimíctica matriz-soportada de matriz sedimentaria con grano medio y color verde oscuro a café. Los clastos corresponden a rocas volcánicas andesíticas y rocas sedimentarias detríticas (areniscas y lutitas), los cuales se encuentran mal seleccionados. Comúnmente presenta silicificación y oxidación en menor proporción. Presenta diseminación de pirita y magnetita débil, y vetillas de hematita débil, calcita y yeso.

Litología lutitas silíceas

Corresponde a rocas clásticas de color verde de grano fino, presentando silicificación moderada a fuerte. Presenta mineralización de hematita débil, especularita débil, magnetita débil y calcita.

Litología chert

Roca clástica de color blanco a rojizo y de grano fino, su coloración se debe principalmente a la presencia de jaspe. Según Fernández (2024) esta roca presenta silicificación.

Litología lutitas margosas

Rocas clásticas de color verde claro a oscuro con tamaño de grano muy fino y presencia de carbonatos. También puede presentar silicificación, y generalmente cuenta con calcita y hematita débil.

Litología litoarenitas

Corresponde a areniscas de color gris verdoso oscuro ricas en fragmentos líticos, con tamaño de grano de fino a grueso. Presenta silicificación y oxidación, además se dispone en alternancia con calizas y calizas margosas. Presenta disseminación de pirita y magnetita débil, y vetillas de calcita y cuarzo.

Litología areniscas margosas

Consta de areniscas de color verde claro a oscuro de tamaño de grano fino a medio. Presenta principalmente carbonatación y ocasionalmente silicificación. Se encuentra intercalada o interdigitada con calizas y calizas margosas, presentando laminaciones. Presenta calcita.

Litología calizas margosas

Descrita específicamente para el sector Adriana Norte, se caracterizan por ser mudstone, de color gris claro a oscuro. Presenta meteorización y oxidación.

3.3.1.8 Unidad Calizas margosa

Esta unidad cuenta con un espesor aproximado de 200 metros (figs. 3.6 y 3.7), y consta de dos litologías principales: calizas margosas y litoarenitas. Se correlacionaría con la Formación Abundancia (fig. 3.3).

Litología calizas margosas

Similar a las calizas margosas de la Unidad Brecha volcanosedimentaria, corresponden a mudstone de color gris claro a oscuro, presenta meteorización y/u oxidación, silicificación. Presenta pirolusita, pirita, calcita, yeso, arcillas y cuarzo.

Litología litoarenitas

Corresponde a rocas detríticas de color verde claro con tamaño de grano arena media a gruesa, generalmente se encuentra intercalada con lutitas y calizas margosas. Presenta oxidación, pirita y calcita.

3.3.1.9 Diques Lamprofíricos

Corresponde a diques microdioríticos de textura porfídica, con presencia de fenocristales máficos como anfíboles, piroxenos y biotita. Su nombre se basa en su textura, no en su composición. Posee una matriz color verde claro a oscuro rica en plagioclasas. Generalmente cuenta con carbonatación y presenta calcita débil en vetillas y/o diseminada, no presenta mineralización de mena ni óxidos de hierro. Pueden alcanzar un espesor de hasta 4 metros y corta las unidades volcánicas y volcanosedimentarias de la Formación Punta del Cobre. La ausencia de mineralización de mena es indicio de un emplazamiento post-mineralización. Estos diques se correlacionan con los diques Lamprofíricos mencionados en Pop et al. (2000) y en del Real et al. (2018).

3.3.1.10 Diorita

Consiste en una unidad intrusiva-hipabisal, la cual agrupa a gabros, dioritas y dioritas cuarcíferas, microdioritas y microdioritas cuarcíferas. Esta unidad corta toda la secuencia estratigráfica del área, pero las microdioritas y microdioritas cuarcíferas se emplazan como sills entre de andesitas Inferiores y la brecha de techo. Presentan mineralización de pirita.

3.3.2 Estructura

El control estructural de la mina Carola estaría relacionado con fallas de orientación NNW-SSE y NNE-SSO, las que desplazan hacia abajo el bloque occidental, originando una sucesión de bloques horst y graben (Sepúlveda, 2017). Estas fallas habrían también controlado el emplazamiento de intrusivos y la circulación de fluidos hidrotermales que originaron los cuerpos mineralizados (Sepúlveda, 2017).

Lino (1984) define 3 grupos estructurales principales para el sector Bateas, ubicado 15 km al sur de la mina Carola:

1. Fallas, vetas, vetillas y diaclasas. Se presentan en las unidades volcánicas (miembro Geraldo Negro de la Fm. Punta del Cobre) y volcanosedimentarias (miembro Algarrobo de la Fm. Punta del Cobre) en menor proporción. Las fallas son pre y post mineralización.
2. Imbricación, estratificaciones grabadas, marcas de fondo y *ripples-mark*. Estructuras sedimentarias presentes en las rocas volcanosedimentarias.
3. Pliegues, producto de flujo y brechas de deslizamiento gravitacional. Se distribuyen en la parte basal de las rocas del miembro Algarrobo de la Formación Punta del Cobre.

En mina Carola se han reconocido dos sistemas de fallas mayores, las cuales controlarían la distribución de la mineralización. Estas fallas tendrían orientación de N20-40W/65-90°SW, y N40-60W/30-50°SW (Fernández, 2024). La interacción entre estos sistemas provoca cuencas caracterizadas por caídas de hasta 200 metros en la vertical en el techo de la unidad de Andesitas Inferiores (Fernández, 2024). La formación de estas depresiones da lugar para la depositación de material volcánico y sedimentario que terminarían en la formación de las unidades Brecha de techo y Sedimentos Rojos Brechizados. La presencia de estas unidades volcanosedimentarias estratificadas, debido al desarrollo de cuencas a lo largo del arco volcánico facilitarían una mineralización del tipo manto (Lino, 1984). Se reconocen también dos sistemas de fallas de manteo subvertical, uno de orientación NS-N20W y otro N70E-EW, los cuales serían posteriores a los sistemas anteriores (Fernández, 2024).

3.3.3 Mineralización

Lino (1984) describe 5 etapas de mineralización para la mina Carola:

- 1) Espilitización: su nombre se le atribuye por la transformación de una probable andesita original en un albitófiro, transformando su mineralogía primaria de plagioclasa cálcica, máficos y vidrio en un agregado de clorita, epidota, albita y sílice residual y hematita. Consiste en una etapa de preparación del flujo volcánico para recibir la mineralización, y cuando el flujo entra en contacto con el agua de mar en las etapas de enfriamiento induce al intercambio de Na por Ca en las plagioclasas, la desvitrificación del vidrio y alteración de los máficos, que tienden a originar clorita, hematita y sílice. Los residuos de sílice, hierro oxidado y calcita que no alcanzan a formar minerales en la roca, son liberados al fondo marino y forman exhalitas con bandas de chert rico en hematita y bandas de margas. Este evento se desarrolla conjuntamente con el flujo de lava en un ambiente de rift tranquilo y la espilitización (intercambio de Na y Ca) al contacto del flujo aún fundido en el agua de mar.

- 2) Etapa ferrífera: Denominada así por la depositación de hierro, corresponde a los primeros eventos de mineralización que muestra el flujo andesítico (ahora espelitizado). Se forma magnetita, hematita acompañados de pequeñas cantidades de sílice y pirita por el aporte del hierro liberado en el primer evento y otro por los fluidos residuales del fundido. El ambiente es dominado por alta temperatura, fugacidad de O₂, y pH ácido introducido por la mezcla de agua de mar, que induce la entrada de NaCl al sistema.
- 3) Etapa cuprífera: En esta etapa, los últimos fluidos ricos en Cu, S y Ca (que no formó plagioclasa-Ca debido a las reacciones espiliticas), emergen por los canales estructurales preparados y se depositan formando diversos cuerpos mineralizados. Esta mineralización primaria está compuesta por minerales metálicos principales, tales como: calcopirita, pirita marcasita, hematita (especularita), magnetita (mushketovita) y arsenopirita, pirrotina, esfalerita y galena en cantidades menores. Estrechamente ligado a la pirita y calcopirita aparece el oro nativo. Los minerales no metálicos asociados son el cuarzo, feldespato, actinolita, biotita, clorita, calcita y con menor frecuencia epidota, esfeno (titanita) y turmalina.
- 4) Etapa polimetálica tardía: En esta etapa, el vulcanismo evolucionó a términos bimodales, y centros volcánicos alejados emitieron piroclastos. La ceniza, en casos, se resbaló hacia el fondo marino mezclada con escombros andesíticos de falda o se depositó como flujos de cenizas. La resurgencia breve de los fenómenos de emanaciones termales, cargados solo de elementos polimetálicos más tardíos que aprovecharon de escapar debido a la actividad volcánica.
- 5) Oxidación y enriquecimiento secundario: En esta etapa culmina el vulcanismo la depositación de sedimentitas sello la formación del yacimiento. Posteriormente la acción exógena expuso el depósito y lo alteró formando una zona de oxidación y enriquecimiento secundario. La incisión moderna del río Copiapó eliminó gran parte de una presunta extensa zona secundaria y oxidada dejando solo algunos remanentes. Sin embargo, el carácter macizo de la mineralización mantuvo el alto

valor económico. De esta manera, en sectores superficiales puntuales de mina Carola, tales como Esmeralda, Manto Geraldo, Bateas y Unión, se han generado zonas con minerales de óxidos de cobre como, por ejemplo, malaquita, atacamita, azurita, crisocola, sulfatos de cobre, cuprita, cobre nativo. También se generaron abundantes óxidos hidratados de hierro, y minerales de ganga como cuarzo, calcita yeso y baritina.

La mineralización de importancia económica para la mina Carola son los sulfuros de cobre, cobre-hierro, hierro y zinc, los cuales están asociados a óxidos de hierro (Pop et al., 2008). Los minerales de interés económico son principalmente la calcopirita, pirita, marcasita y esfalerita. La calcopirita corresponde a la principal mena de cobre con una recuperación promedio de 1,2% Cu al año 2024, desde la pirita y marcasita se recuperan cantidades significativas de cobalto, las cuales alcanzan, en promedio, las 303 ppm para el año 2024. La esfalerita es la principal mena de zinc con una recuperación del 0,06% al año 2024. También se tendría mineralización de oro, concentrado en tamaño de micrones en las estructuras internas de la calcopirita (como inclusión o relleno de pequeñas fracturas) y en menor medida asociado a esfalerita (Tarnovschi, 1999), y de plata asociada a calcopirita y esfalerita. Además, existe importante presencia de magnetita, mushketovita o especularita-hematita.

La calcopirita se observa asociada a pirita, magnetita, mushketovita, hematita, esfalerita, galena, oro y plata (Tarnovschi, 1999). Se puede presentar con formas globulares, alargadas, y de forma maciza en texturas de intercrecimiento con esfalerita y pirita, reemplazando a esta última en sus bordes y fracturas. La calcopirita puede presentar texturas de exsolución con la esfalerita, e intercrecimiento y sustitución recíproca. También, puede presentarse relleno de espacios vacíos como cemento de granos idiomorfos de magnetita (Tarnovschi, 1999).

La pirita está asociada principalmente a calcopirita, esfalerita, y en menor proporción con magnetita, mushketovita y hematita. También puede estar asociada a calcosina, galena, esfalerita y pirrotina, esta última se encuentra en como inclusiones relictas (en unidades Andesitas Inferiores y Albitófiro) entregando evidencia de una posible génesis de pirita en base a la destrucción de pirrotina (Tarnovschi, 1999). Tarnovschi (1999) interpreta dos generaciones de pirita: la pirita I, la cual se relaciona a la magnetita, hematita y calcopirita, y la pirita II asociada a calcopirita, hematita, magnetita-mushketovita, calcosina y esfalerita.

La magnetita es muy frecuente, especialmente a medida que aumenta la profundidad del yacimiento, bajo los 300 m.s.n.m. en litologías de andesitas inferiores. Se han interpretado dos generaciones de magnetita (Tarnovschi, 1999). La magnetita I consiste en granos monominerales o mostrando contacto con calcopirita, pirita y en menor proporción esfalerita, además de presentar martitización. La magnetita II (mushketovita) ocurre por efecto de un reemplazo hipógeno de los cristales de hematita por magnetita (Tarnovschi, 1999).

En el cuerpo central de Carola se observa esfalerita, específicamente en los niveles inferiores de la mina, específicamente, en la unidad de Andesitas Inferiores bajo los 300 m.s.n.m. Como se menciona previamente, la esfalerita se encuentra principalmente asociada a calcopirita formando estructuras de exsolución e intercrecimiento. También puede estar asociada a pirita, magnetita, oro, plata, y actinolita como relleno de espacios vacíos (Tarnovschi, 1999).

La mineralización primaria esta mayormente hospedada en las unidades de Andesitas Inferiores y Albitófiro (fig. 3.11). También existe mineralización en las unidades Brecha de Techo y Sedimentos Rojos brechizados. La mineralización se profundiza hacia el sur, lo que es consistente con el manto de la unidad Andesitas Inferiores. La mineralización

ocurre principalmente como vetas, stockwork, brecha, manto y diseminación (Lino, 1984; Tarvnovschi, 1999; Sepúlveda; 2017; Fernández, 2024).

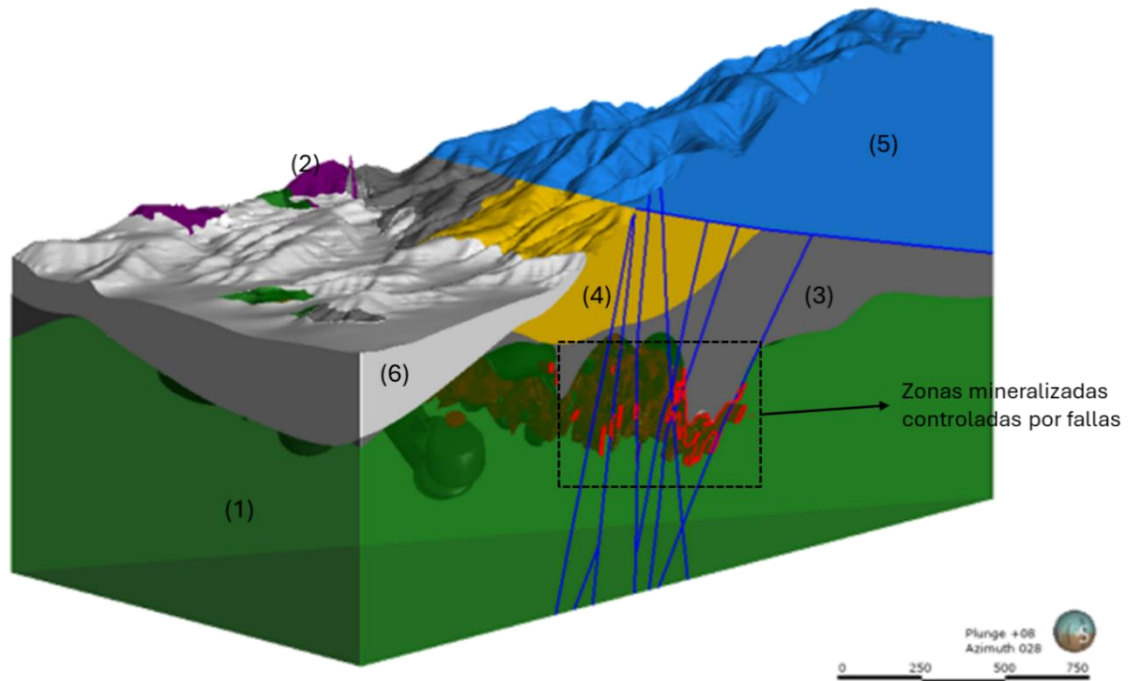


Figura 3.10. Vista 3-D hacia el NE, donde se muestra la mineralización controlada por las fallas mayores. (1) Andesitas Inferiores (Kpcli), (2) Albitófiro, (3) Tobas de Agustina, (4) Andesitas superiores (Kpcls) y Brecha volcanosedimentaria (BrVs), (5) Grupo Chañarcillo, (6) Aluvios y/o Coluvios (SCM Carola, 2019).

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

Este trabajo comprendió 3 grandes etapas: 1) revisión bibliográfica, 2) adquisición de datos petrofísicos, magnéticos y geológicos, y 3) análisis e interpretación de la relación geológica-magnética. En primera instancia, se realizó una búsqueda exhaustiva sobre magnetometría y propiedades magnéticas de rocas y minerales, junto con una compilación de información sobre geología local y distrital de la zona de estudio. Posteriormente, haciendo uso de la base de datos histórica de sondajes de SCM Carola, se escogieron sondajes representativos para medir la susceptibilidad magnética en tramos específicos, realizar logueo geológico y obtener información sobre su contenido de cobre. Además, se obtuvo datos petrofísicos (magnitud del vector de magnetización y susceptibilidad) extraídos de los modelos geofísicos entregados por la empresa geofísica Southernrock. Los datos obtenidos durante la recopilación de datos se compilaron en una base de datos en Microsoft Excel © para su posterior análisis. El análisis realizado se enfocó en encontrar la relación existente entre las diferentes litologías, mineralización y alteraciones presentes, con la susceptibilidad magnética medida y los modelos geofísicos presentados por Southernrock.

4.1 Revisión bibliográfica

Como etapa preliminar se desarrolló una revisión bibliográfica abarcando información relevante sobre la geología y estratigrafía del distrito Punta del Cobre, geología local de mina Carola, y bases teóricas de magnetometría y propiedades físicas de rocas y minerales. La información recabada se extrajo mayoritariamente de artículos científicos, cartas geológicas y ediciones digitales de libros, junto con información local entregada por la Superintendencia de Geología de SCM Carola.

4.2. Recopilación de datos petrofísicos, magnéticos y geológicos

Como parte fundamental de la caracterización de litologías en base a sus propiedades magnéticas, se desarrolló una etapa de medición en tramos específicos de sondajes estratégicos, considerando mediciones de susceptibilidad magnética y logueo geológico en los tramos de sondaje. Además, se recopilaron los datos de los modelos presentados por Southernrock (magnitud del vector de magnetización y susceptibilidad) para cada tramo seleccionado. Este proceso permitió verificar y calibrar los valores de propiedades magnéticas de los modelos con mediciones de susceptibilidad in situ, permitiendo interpretar de manera más informada los modelos de magnitud del vector de magnetización (MVI) y de susceptibilidad.

4.2.1 Selección de sondajes

Con ayuda de la base de datos de sondajes histórica de SCM Carola se seleccionaron 10 sondajes representativos. La finalidad de este proceso fue obtener mayor representatividad en cuanto a las litologías presentes en el área de estudio. En primera instancia, se dividió el área en 4 sectores (norte, centro norte, centro sur y sur) (fig. 4.1) donde se seleccionaron sondajes de cada sector, definiendo tramos específicos para su medición (fig. 4.2). La elección de cada tramo, para la medición de susceptibilidad magnética, se enfocó en la obtención de datos para todas las litologías presentes en SCM Carola, considerando como factor de discriminación la presencia o no de mineralización metálica, alteraciones, y contenido de cobre. En general, se enfocó en crear un contraste entre tramos estériles y con presencia de minerales metálicos que podrían indicar una señal magnética significativa, y de esta manera establecer alguna relación entre susceptibilidad magnética y % de Cu.

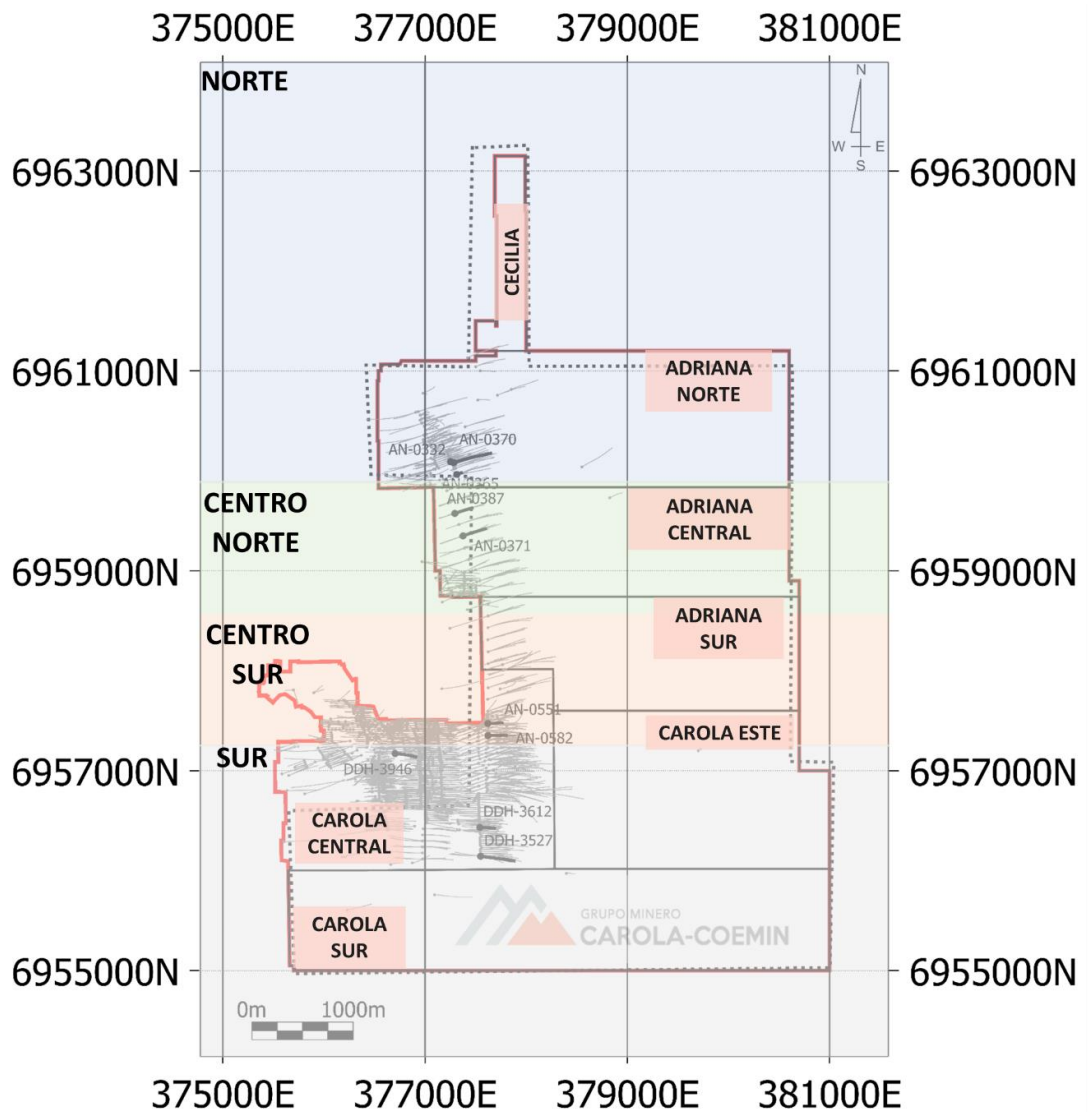


Figura 4.1. Mapa con la ubicación de sondajes seleccionados, total de sondajes realizados en mina Carola, distribución de los distintos sectores que conforman mina Carola (cuadros con fondo rosado) y distribución de los sectores determinados para este estudio (diferenciados por color e indicados por su nombre a la izquierda del mapa). En rojo se presenta la envolvente de las concesiones de SCM Carola, y con líneas punteadas el área cubierta por las mediciones magnéticas realizadas por la empresa geofísica Southernrock (elaboración propia, utilizando software Leapfrog Geo ©).

SECTOR	HOLEID	FROM	TO	SECTOR	HOLEID	FROM	TO
NORTE	AN-0365	2	6,3	CENTRO-NORTE	DDH-3946	123	125
	AN-0365	91	94		DDH-3946	161	164
	AN-0365	104	106		DDH-3946	205	209
	AN-0365	126	134		DDH-3946	219	221
	AN-0370	29	36		DDH-3946	226	228
	AN-0370	108	112		DDH-3946	247	251
	AN-0370	182	185		DDH-3946	263	266
	AN-0370	329	332		DDH-3612	2	6
	AN-0370	339	343		DDH-3612	24	27
	AN-0370	358	361		DDH-3612	28	31
	AN-0332	4	10	DDH-3612	64	66	
	AN-0332	11	16	DDH-3612	69	73	
	AN-0332	16	20	DDH-3612	85	88	
	AN-0332	26	29	DDH-3612	115	118	
CENTRO-SUR	AN-0551	186	192	DDH-3612	148	151	
	AN-0551	110	114	DDH-3527	14	20	
	AN-0551	75	80	DDH-3527	48	52	
	AN-0551	30	34	DDH-3527	141	144	
	AN-0582	139	143	DDH-3527	221	225	
	AN-0582	150	155	DDH-3527	274	283	
	AN-0582	82	86	DDH-3527	308	312	
	AN-0582	100	103	DDH-3527	388	391	
	AN-0582	128	132				
	AN-0582	212	214				
	AN-0582	240	243				

Figura 4.2. Compilación de tablas con sector, nombre y tramo de sondajes seleccionado donde se realizaron las mediciones de susceptibilidad magnética (elaboración propia, utilizando software Microsoft Excel ©)

4.2.2 Medición de susceptibilidad magnética

La recopilación y medición de susceptibilidad magnética de los sondajes seleccionados fue realizada por el autor de esta tesis. En una primera instancia, se recopilaron las cajas de sondajes que contenían los sondajes seleccionados, las cuales estaban ubicadas en las testigotecas de Adriana norte y Carola central (fig. 4.3). Posterior a la recolección de sondajes, se procedió a disponer las cajas en mesones utilizados para logeo, las cuales tuvieron que ser reubicadas para su medición debido a la composición de dichos mesones (estructuras de fierro) que generaban saturación en los valores medidos. La susceptibilidad magnética de cada uno de los tramos seleccionados se midió sobre un mesón compuesto totalmente de madera, mediante un susceptibilímetro marca Terraplus modelo KT 20 (fig. 4.3) que indicaba los valores de susceptibilidad magnética en mili SI (10^{-3} SI) con una precisión de $0,0006 \times 10^{-3}$ SI. Se utilizó el método de medición continua, a través del modo “Scan” y una frecuencia de 10 kHz (fig. 4.4). Las especificaciones de este instrumento se pueden encontrar en GeoRESULTS Pty Ltd (2016).

Para cada tramo medido se realizó un logeo geológico (fig. 4.5), en el cual se mapearon los siguientes parámetros: litología, mineralización, intensidad de

mineralización, alteraciones e intensidades de cada alteración. Tanto las mediciones de susceptibilidad como los parámetros geológicos mapeados fueron registrados en una base de datos.

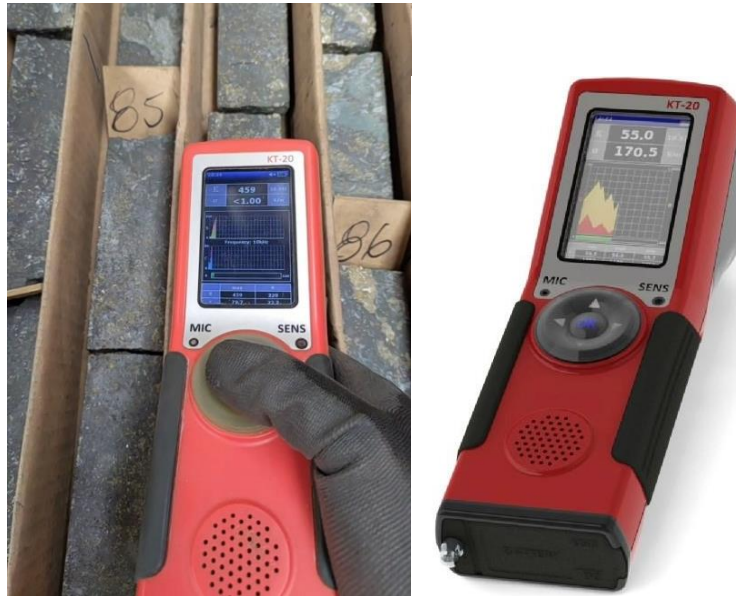


Figura 4.3. Foto que muestra el proceso de medición de susceptibilidad magnética (izquierda) e imagen referencial del susceptibilímetro KT 20 Terraplug (derecha).

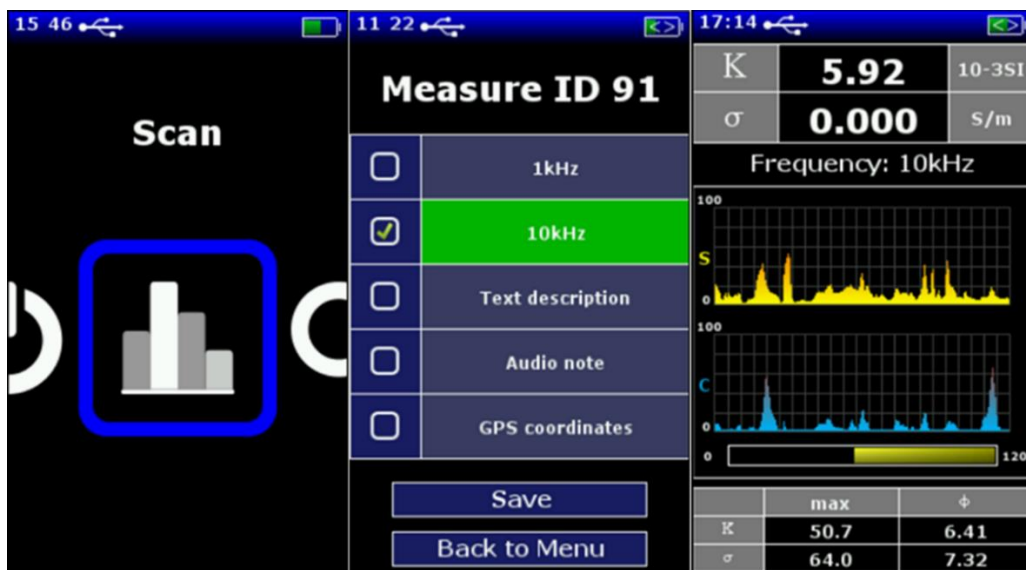


Figura 4.4. Foto de la pantalla del susceptibilímetro, donde se muestra la configuración utilizada para las mediciones de susceptibilidad magnética.



Figura 4.5. Fragmento de sondaje (NQ) referencial donde se realizó logueo geológico y medición de susceptibilidad magnética. La muestra corresponde a una andesita con mineralización metálica de calcopirita, pirita, magnetita y mushketovita.

4.2.3 Interpolación de datos de modelos MVI y susceptibilidad en tramos de sondajes estratégicos

Ya finalizada la etapa de medición, se integraron 2 nuevos parámetros dentro de los datos recopilados, los cuales consisten en valores de los modelos de MVI (expresados como una “pseudo susceptibilidad” en unidades de mili SI = 10^{-3} SI), y de susceptibilidad magnética (expresados en unidades de SI), que fueron realizados por la empresa geofísica Southernrock. Debido a que cada modelo se compone de un número definido de bloques, donde cada uno de ellos presenta un valor específico, fue necesario cruzar los valores de los modelos con los collares de sondajes presentes en SCM Carola y de esa manera identificar que valores del modelo MVI y del modelo de susceptibilidad magnética correspondían para los tramos seleccionados en una primera instancia (anexo A). Los valores del modelo de susceptibilidad magnética son el producto de la inversión 3D de

susceptibilidad magnética convencional, la cual modela las propiedades magnéticas del subsuelo asumiendo que solo existe magnetización inducida y, por lo tanto, se encuentra alineada con el campo magnético terrestre actual o paralelo a él. Los valores de del modelo MVI son el resultado de modelar directamente el vector de magnetización a partir de datos de campo magnético total (TMI) y corresponde a la magnitud (absoluta) del vector de magnetización, es decir, el valor absoluto de la magnetización total. Para el modelo MVI, la modelación inversa 3D de los datos de estudio de magnetometría, recopilados por Southernrock, se realizaron con VOXI de Geosoft © utilizando un Magnetization Vector Inversión (MVI) tal como se describe en MacLeod y Ellis (2016). Los datos de estos modelos se interpolaron en las muestras de los sondajes estudiados, esto se realizó con los softwares Leapfrog Geo © y Geoscience Analyst © y su procedimiento se describe en el anexo A.

4.2.4 Generación de la base de datos

En base a los datos recopilados desde la base de datos de sondajes histórica de SCM Carola, el logueo geológico, las mediciones de susceptibilidad magnética, y los modelos MVI y susceptibilidad, se generó una base de datos general con el software Microsoft Excel © (fig. 4.6). La base de datos contiene los siguientes parámetros (columnas): Sector de ubicación del sondaje, nombre del sondaje, desde y hasta, largo de medición, cota en la que se encuentra el tramo medido, ley de Cu, susceptibilidad magnética promedio medida, pseudosusceptibilidad magnética del modelo MVI, susceptibilidad magnética del modelo de susceptibilidad, tipo de alteración, intensidad de alteración (leve, moderada, intensa), mineralización, litología y unidad geológica. Las clasificaciones de intensidad, tipo de alteración, litología y unidad geológica se describen según los criterios utilizados por mina Carola.

Sector	Sondaje	Desde	Hasta	largo de medición (m)	Cota en el punto (m.s.n.m)	Ley Cu	SM medida	SM Modelo Susc	SM Modelo MVI
Norte	AN-332	18,12	18,82	0,7	444,7464	0,01	0,538	14,6	8,7
Norte	AN-332	18,82	19,1	0,28	444,2937	0,01	0,585	14,6	8,7
Norte	AN-332	19,1	19,84	0,74	444,1127	0,005	13,2	14,6	8,7
Norte	AN-332	19,84	20,34	0,5	443,6341	0,005	6,83	14,6	8,7
Norte	AN-332	20,34	20,91	0,57	443,3107	0,005	4,78	14,6	8,7
Norte	AN-332	20,91	21,55	0,64	442,9421	0,005	2,02	14,6	8,7
Norte	AN-332	25,61	26,15	0,54	439,9025	0,37	0,584	14,6	8,7
Norte	AN-332	26,15	26,72	0,57	439,5533	1,51	0,547	14,5	8,7
Norte	AN-332	26,72	27,18	0,46	439,1847	1,51	1,29	14,5	8,7
Norte	AN-332	27,18	27,75	0,57	438,8872	0,55	0,698	14,5	9,1
Norte	AN-332	27,75	28,3	0,55	438,5185	0,55	0,672	14,5	9,1
Norte	AN-332	28,3	28,87	0,57	438,1628	1,93	0,554	14,5	9,1
Norte	AN-332	28,87	29,49	0,62	437,7942	0,24	0,763	14,5	9,1
Centro Norte	AN-371	102	102,6	0,58	416,4956	1,11	167	14,5	3,2
Centro Norte	AN-371	102,6	103	0,42	416,7122	1,11	208	14,5	3,2
Centro Norte	AN-371	103	103,6	0,6	416,8691	0,94	125	14,5	3,2

Alteración 1	Intensidad 1	Alteración 2	Intensidad 2	Alteración 3	Intensidad 3	Mineralización 1	Mineralización 2	Mineralización 3	Mineralización 4	Litología	Unidad
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Carbonización	Débil	Hematita	Calcita	#N/D	#N/D	Albitófiro	Alb
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Carbonización	Débil	Hematita	Calcita	#N/D	#N/D	Albitófiro	Alb
Cloritización	Moderada	Carbonización	Débil	Argilica	Débil	Magnetita	#N/D	#N/D	#N/D	Dique lamprofirico	Diques lamprofiricos
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Carbonización	Débil	Magnetita	Calcita	#N/D	#N/D	Albitófiro	Alb
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Carbonización	Débil	Magnetita	Calcita	#N/D	#N/D	Albitófiro	Alb
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Carbonización	Débil	Magnetita	Calcita	#N/D	#N/D	Albitófiro	Alb
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Carbonización	Débil	Pirita	Calcopirita	Calcita	Hematita	Albitófiro	Alb
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Carbonización	Débil	Pirita	Calcopirita	Calcita	Hematita	Albitófiro	Alb
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Carbonización	Débil	Pirita	Calcopirita	Calcita	Hematita	Albitófiro	Alb
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Carbonización	Débil	Pirita	Calcopirita	Calcita	Hematita	Albitófiro	Alb
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Carbonización	Débil	Pirita	Calcopirita	Calcita	Hematita	Albitófiro	Alb
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Carbonización	Débil	Pirita	Calcopirita	Calcita	Hematita	Albitófiro	Alb
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Carbonización	Débil	Pirita	Calcopirita	Calcita	Hematita	Albitófiro	Alb
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Potásica	Débil	Magnetita	Pirita	Calcopirita	#N/D	Andesitas inferiores	Kpcli
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Potásica	Débil	Magnetita	Pirita	Calcopirita	#N/D	Andesitas inferiores	Kpcli
Cloritización	Moderada	Silicificación	Moderada	Potásica	Débil	Magnetita	Pirita	Calcopirita	#N/D	Andesitas inferiores	Kpcli

Figura 4.6. Captura de pantalla de extracto de la base de datos que compila datos de mediciones de susceptibilidad magnética (SM), logueo geológico, y de los modelos geofísicos.

4.3 Análisis de relación geológica-magnética

Posterior al proceso de recopilación de datos se desarrolló una etapa de análisis estadístico. Este análisis buscó caracterizar la estadística de los valores de susceptibilidad magnética para las unidades geológicas, e identificar patrones de relación entre la susceptibilidad magnética y parámetros geológicos y propiedades físicas obtenidos de los modelos geofísicos.

4.3.1 Generación de figuras de análisis estadístico

Mediante los valores recopilados para la base de datos generada, se obtuvo gráficos de cajas y bigotes (boxplot), histogramas, gráficos de dispersión. Estos gráficos se obtuvieron utilizando los softwares Microsoft Excel © y Minitab ©. En los gráficos de cajas y bigotes, histogramas y gráficos de dispersión, se utilizó una escala de valores logarítmica para los valores de susceptibilidad magnética con el fin de evidenciar de mejor manera sus variaciones. Para los valores del modelo de susceptibilidad magnética y MVI utilizados en los gráficos de dispersión, se multiplicaron por 1000 para mantener la misma unidad con la susceptibilidad magnética medida.

4.3.2 Generación de secciones en modelo litológico, MVI y susceptibilidad

La generación de secciones para los modelos se dividió en 2 partes. La primera parte consistió en la modificación en la escala de colores para el modelo MVI, y la segunda parte en la generación de las secciones. Todo el proceso se realizó por medio del software Leapfrog Geo © y la metodología empleada se describe a detalle en el anexo B.

4.3.3 Análisis de cortes transparentes en microscopio

Como una etapa final de corroboración mineralógica, se desarrollaron análisis de cortes transparentes en Andesitas Inferiores y Albitófiro para metros que señalaban silicificación fuerte en logeos históricos de SCM Carola. Dentro de los cortes existentes, solo se encontraron 5 que contaban con las características previamente mencionadas (fig. 4.7). El equipo utilizado para el análisis fue el microscopio petrográfico Olympus BX51 (fig. 4.8), con el cual se analizaron los cortes transparentes en luz polarizada plana (LPP) y en nícoles cruzados (XLP).

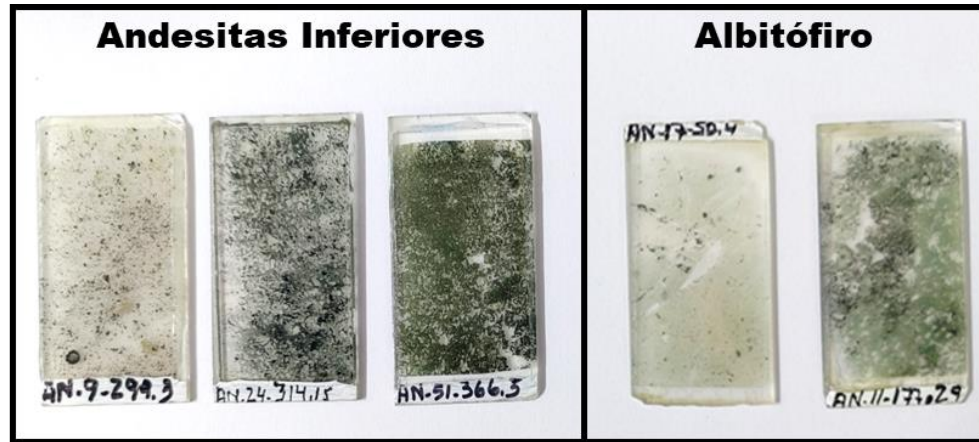


Figura 4.7. Cortes transparentes de Andesitas Inferiores y Albitófiro de sondajes realizados en SCM Carola.



Figura 4.8. Microscopio petrográfico Olympus BX51 utilizado para análisis de cortes transparentes seleccionados.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

Por medio de las etapas de recopilación de datos y análisis de relación geológica-magnética, previamente mencionadas en metodologías, se generaron las diferentes figuras que se presentaran como resultados en este capítulo. En cuanto a los datos recopilados, y posteriormente evaluados, se obtuvieron un total de 3949 que se resumen en la fig. 5.1:

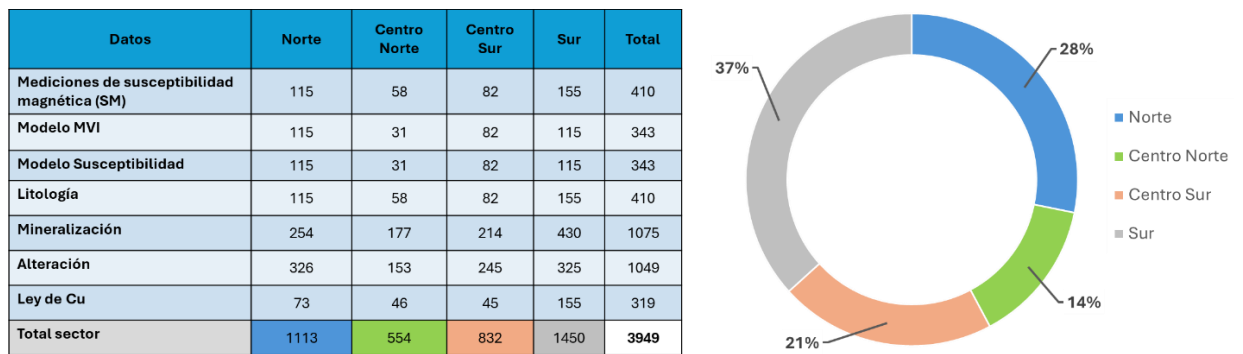


Figura 5.1. (Izquierda) Tabla resumen con la cantidad de datos obtenidos por sector para el análisis estadístico. (Derecha) Gráfico indicando el porcentaje del total de datos que se obtuvo en cada sector.

5.1 Rangos de susceptibilidad magnética por litologías

Los siguientes gráficos muestran la distribución general de los rangos de susceptibilidad magnética en las diferentes litologías y las alteraciones que ellas presentan.

5.1.1 Susceptibilidad magnética de unidades geológicas

En la fig. 5.2 se muestra la distribución de susceptibilidad magnética (SM) medida para un total de 20 litologías presentes en el área de estudio. Los valores de SM obtenidos se clasificaron cualitativamente como valores bajos, intermedios o altos en base a los siguientes rangos: baja ($<30 \times 10^{-3}$ SI), intermedia ($30-100 \times 10^{-3}$ SI) y alta ($>100 \times 10^{-3}$ SI).

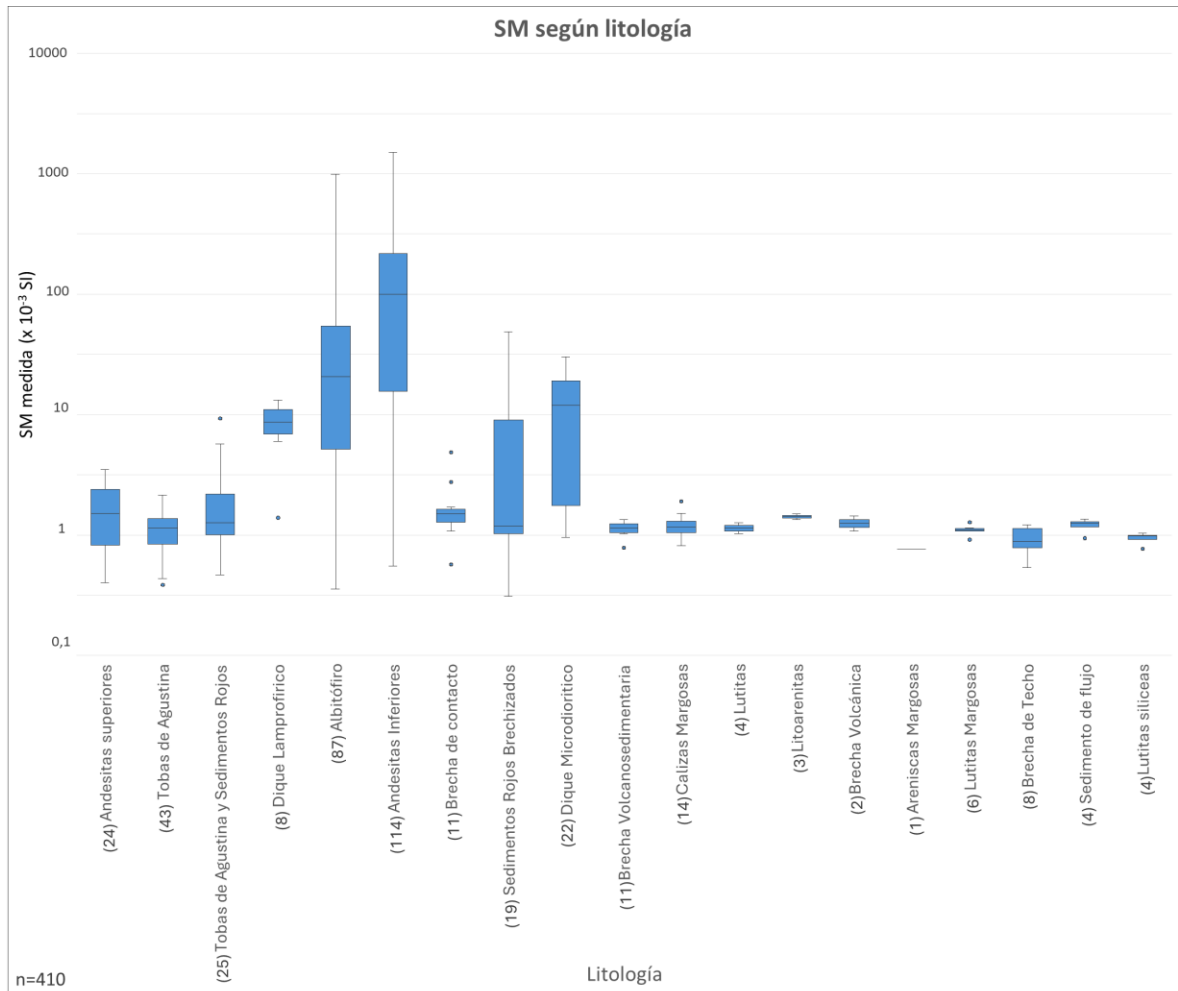
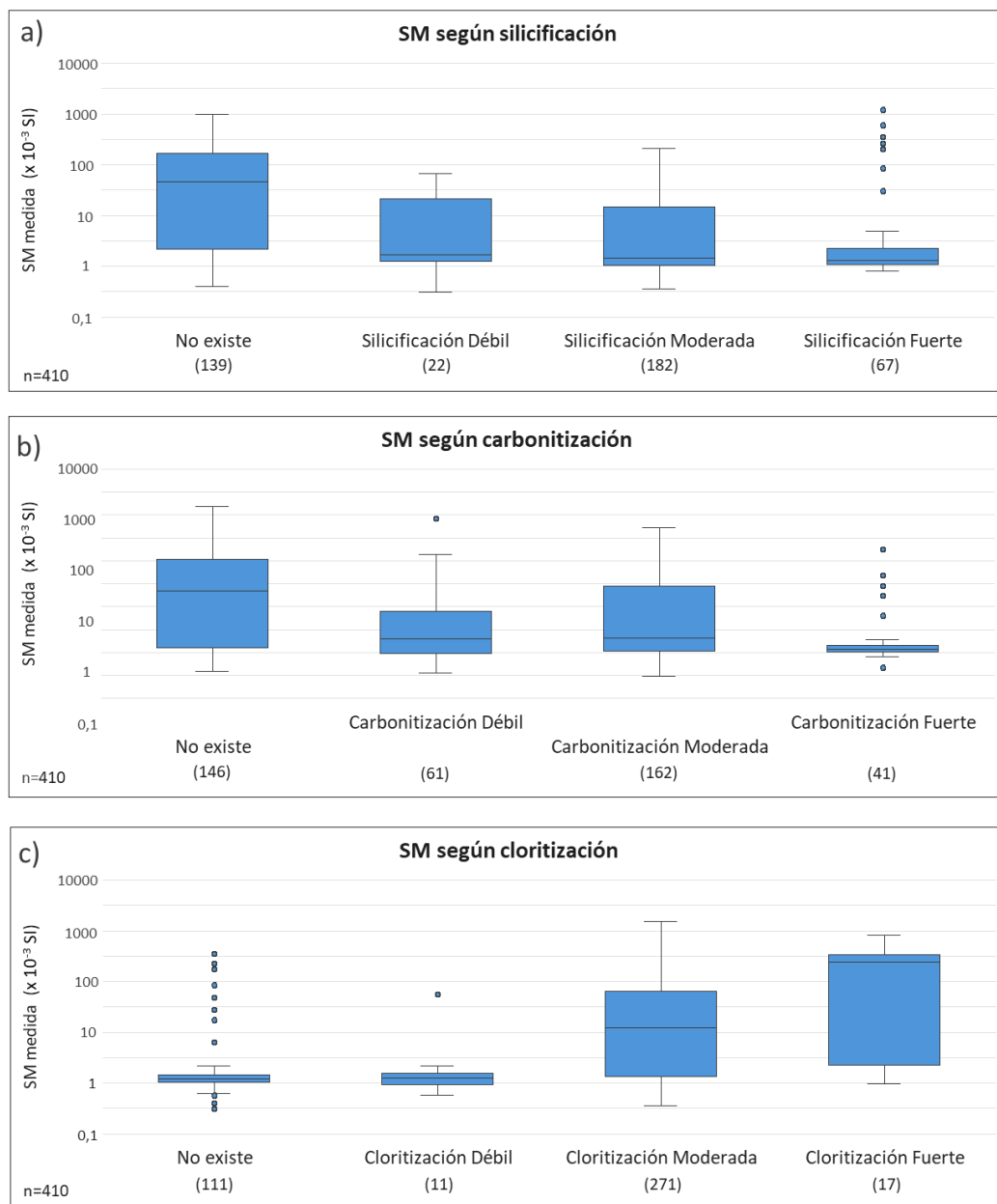


Figura 5.2. Gráfico de cajas y bigotes (boxplot) realizado con los valores de susceptibilidad magnética (SM) medida en cada litología. (Elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).

Para la figura 5.2 destacan valores en rangos de SM medios ($30-100 \times 10^{-3}$ SI) a altos ($>100 \times 10^{-3}$ SI) en Albitófiro y Andesitas Inferiores, teniendo los valores más altos entre todas las litologías. Específicamente las Andesitas Inferiores presentan una densidad de datos mayor en rangos de SM media-alta.

5.1.2 Susceptibilidad magnética según intensidad de alteración

La fig. 5.3 muestra los boxplot de SM según intensidad de alteración, con la finalidad de identificar la variación en los rangos de SM entre una alteración y otra, y a medida que ellas se intensifican.



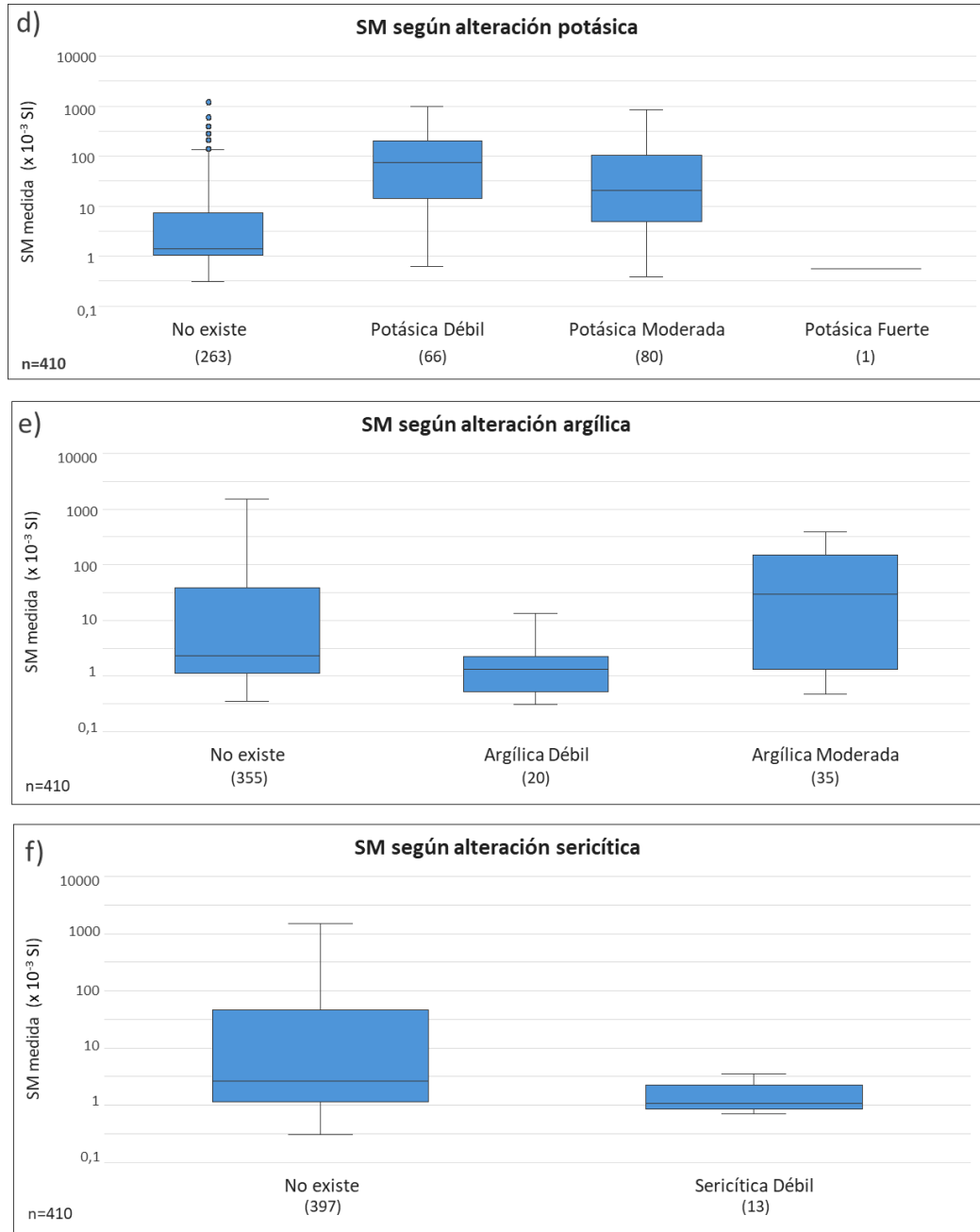


Figura 5.3. Gráficos de cajas y bigotes (boxplot) para cada alteración e intensidad según los valores de susceptibilidad magnética (SM) medida. Se presentan: a) SM en silicificación, b) SM en carbonización, c) SM en cloritización, d) SM en alteración potásica, e) SM en alteración argílica y f) SM en alteración sericítica. (Elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).

En la figura 5.3 para las distintas alteraciones se observa lo siguiente:

Los valores más altos de susceptibilidad magnética se observan en cloritización fuerte (fig. 5.3c) y alteración potásica débil (fig. 5.3d). Los valores de susceptibilidad magnética en cloritización fuerte alcanzan un promedio de 244×10^{-3} SI (rango alto de susceptibilidad magnética), pero la distribución de sus datos abarca rangos bajos, moderados y altos de susceptibilidad magnética. Para alteración potásica débil, sus valores de susceptibilidad magnética tienen un promedio $75 \text{ SI} \times 10^{-3}$ ubicado en un rango moderado de susceptibilidad magnética, pero la distribución de sus datos se encuentra en rangos moderados y altos de susceptibilidad magnética. También, se aprecia que ante la no existencia de cloritización y alteración potásica (fig. 5.3c y d), los valores de susceptibilidad magnética se mantienen en rangos bajos, donde la no existencia de cloritización posee un promedio de $1,2 \times 10^{-3}$ SI, y la no existencia de alteración potásica un promedio de $1,4 \times 10^{-3}$ SI.

La no existencia de silicificación y carbonización indican valores de susceptibilidad magnética mayores en comparación a cuando están presente estas alteraciones. Para la no existencia de silicificación (fig. 5.3a), la caja (50% de los datos) abarca rangos bajos, moderados y altos de susceptibilidad magnética, con un promedio de 46×10^{-3} SI que se ubica en un rango moderado de susceptibilidad magnética. Para la no existencia de carbonización (fig. 5.3b), la caja abarca rangos de susceptibilidad magnética baja y moderada, con un promedio de 22×10^{-3} SI que se ubica en un rango a de susceptibilidad magnética baja, pero este promedio sigue siendo mayor que los promedios que presentan las distintas intensidades de carbonización.

Para la cloritización y la alteración argílica se muestra una tendencia creciente en los valores de susceptibilidad magnética y la intensidad de las alteraciones (fig. 5.3c y e), donde aumentan los valores de susceptibilidad magnética a medida que las alteraciones se intensifican. Por el contrario, se muestra una tendencia decreciente en los valores de susceptibilidad magnética en la silicificación (fig. 5.3a), donde los valores de

susceptibilidad magnética van disminuyendo a medida que aumenta la intensidad de estas alteraciones.

5.1.2 Susceptibilidad magnética en andesitas inferiores y albitófiro

5.1.2.1 Susceptibilidad magnética según sector

Respecto a cada sector previamente definido dentro del área de estudio (norte, centro norte, centro sur, sur), se analizó la distribución de SM para las 2 litologías más relevantes (andesitas inferiores y albitófiro). La fig. 5.4 muestra la distribución en los valores de SM para las unidades de Andesitas Inferiores y Albitófiro en los distintos segmentos de sondajes seleccionados a lo largo de las dependencias de SCM Carola, con el fin de visualizar las variaciones espaciales en los rangos de SM.

Para Andesitas Inferiores y Albitófiro los valores varían en los diferentes sectores. Los valores más altos de SM, para las dos litologías, se observa hacia el sector sur (fig. 5.4g y h), donde la media de los datos supera los 100×10^{-3} SI para Andesitas Inferiores, y es cercana a los 100×10^{-3} SI en Albitófiro. En ambos casos, las cajas indican que los datos se mueven entre rangos de susceptibilidad magnética moderado y alto ($>30 \times 10^{-3}$ SI).

Para ambas litologías, los valores de susceptibilidad magnética más bajos, y con mayor variación, se observan en el sector norte (figs. 5.4a y b), donde la caja de las Andesitas Inferiores muestra una variación de valores que se mueven en rangos de susceptibilidad magnética baja, moderada y alta (fig. 5.4a). Para el Albitófiro, se observa que la caja se encuentra en rangos de susceptibilidad magnética baja (fig. 5.4b). Para Andesitas Inferiores destaca una tendencia de valores hacia rangos de susceptibilidad magnética moderada ($30 - 100 \times 10^{-3}$ SI) en los sectores centro norte y centro sur (fig. 5.4c y e), y susceptibilidad magnética alta ($>100 \times 10^{-3}$ SI) en el sector sur (fig. 5.4g). En el caso del

Albitófiro, hay una tendencia de valores hacia rangos de susceptibilidad magnética baja ($<30 \times 10^{-3}$ SI) en el sector centro norte (fig. 5.4d), susceptibilidad magnética moderada ($10 - 100 \times 10^{-3}$ SI) en el sector centro sur (fig. 5.4f), y susceptibilidad magnética alta ($>100 \times 10^{-3}$ SI) en el sector sur (fig. 5.4h).

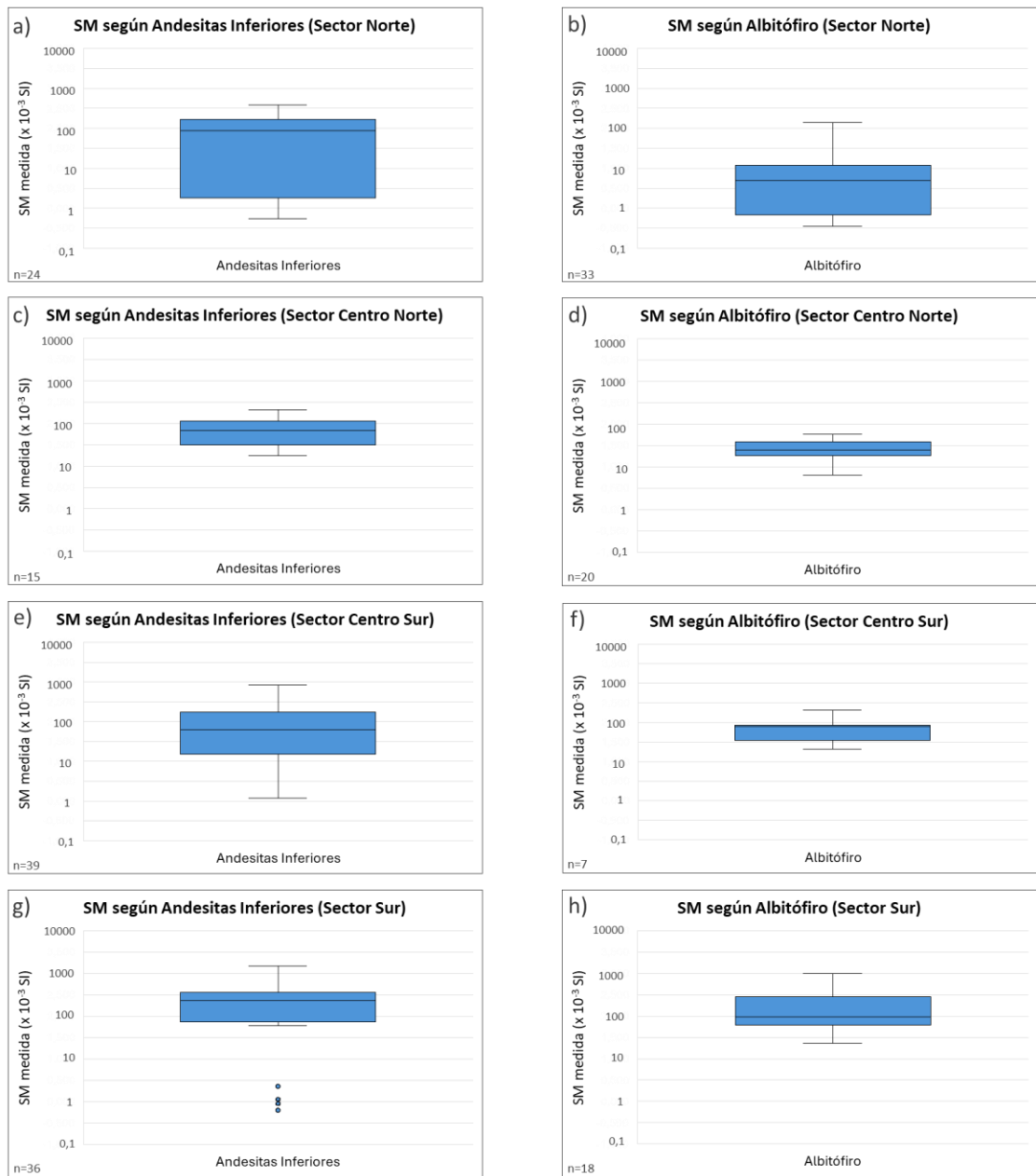


Figura 5.4. Gráficos de cajas y bigotes (boxplot) de susceptibilidad magnética (SM) medida para las litologías de Andesitas Inferiores y Albitófiro en cada sector. Se presentan: a) SM en Andesitas Inferiores sector norte b) SM en

Albitófiro sector norte, c) SM en Andesitas Inferiores sector centro norte, d) SM en Albitófiro sector centro norte, e) SM en Andesitas Inferiores sector centro sur, f) SM en Albitófiro sector centro sur, g) SM en Andesitas Inferiores sector sur, h) SM en Albitófiro sector sur (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).

5.1.2.2 Susceptibilidad magnética según intensidad de alteración

La fig. 5.5 muestra las variaciones de susceptibilidad magnética (SM) en Andesitas Inferiores y Albitófiro para diferentes alteraciones e intensidad. Se destaca lo siguiente:

Para Andesitas Inferiores se observa que los valores más altos de susceptibilidad magnética se encuentran en silicificación fuerte y cloritización fuerte (fig. 5.5a y e), donde la media, y la mayor densidad de sus valores, se encuentra en rangos de susceptibilidad magnética altos ($>100 \times 10^{-3}$ SI). Para la cloritización (fig. 5.5e), se observa una relación creciente entre su intensidad y la susceptibilidad magnética, aumentando la susceptibilidad magnética cuando esta alteración se intensifica.

Para el Albitófiro los valores de susceptibilidad magnética más altos se encuentran relacionados con la alteración potásica débil (fig. 5.5h), donde la mayor densidad de sus valores se encuentra en rangos de susceptibilidad magnética alta ($>100 \times 10^{-3}$ SI). La ausencia de alteración potásica muestra una disminución en los valores de susceptibilidad magnética, donde la mayor densidad de sus valores se encuentra en rangos de susceptibilidad magnética baja ($<30 \times 10^{-3}$ SI). En el caso de la silicificación y carbonitización (fig. 5.5b y d), su ausencia indica valores de susceptibilidad magnética moderada a alta ($>30 \times 10^{-3}$ SI), siendo más evidente para el caso de la silicificación (fig. 5.5b).

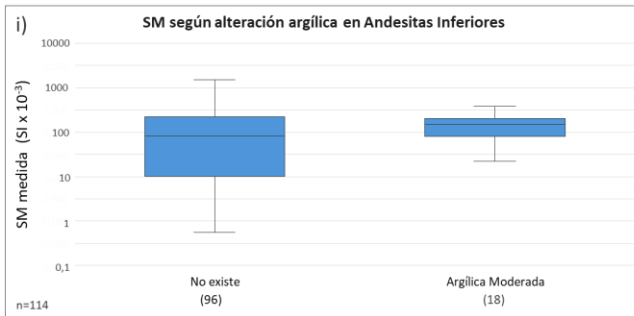
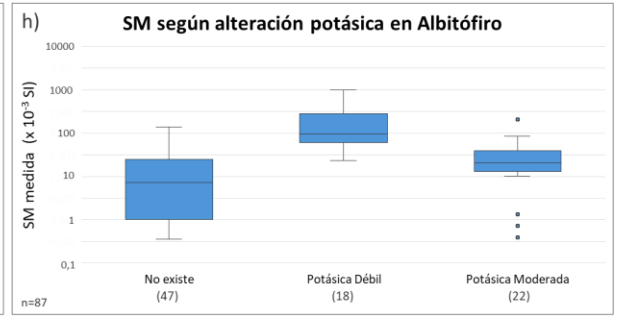
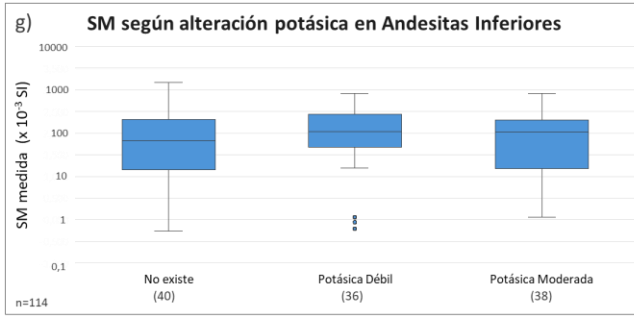
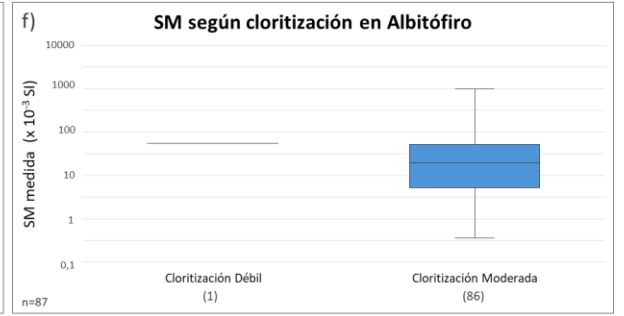
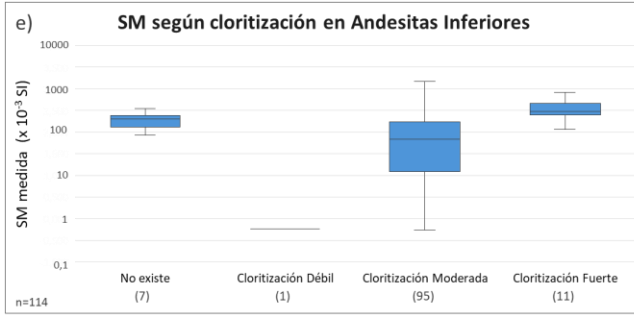
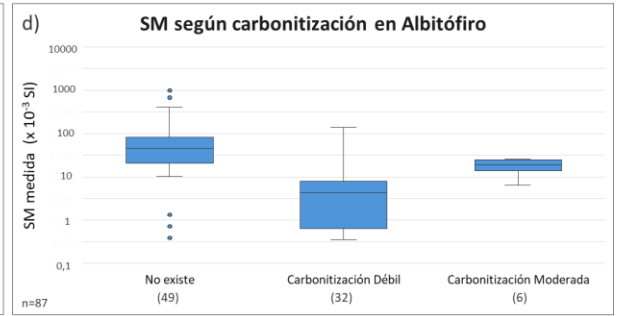
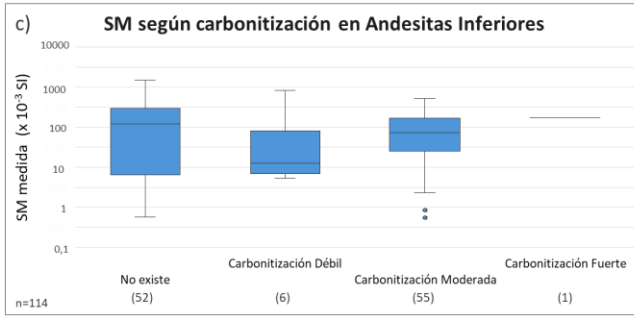
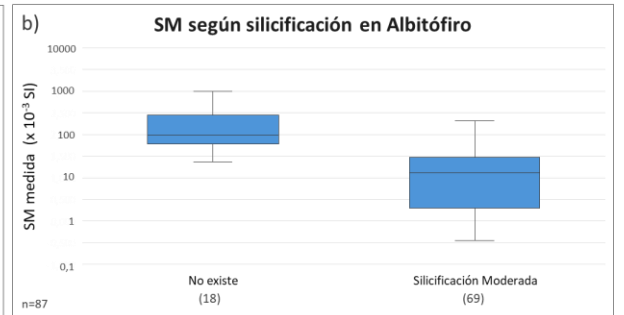
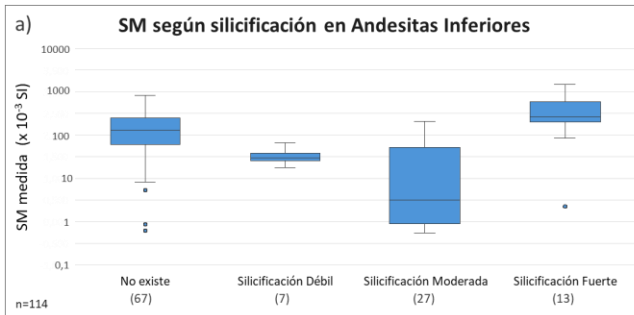


Figura 5.5. Gráficos de cajas y bigotes (boxplot) de susceptibilidad magnética (SM) medida según el tipo e intensidad de alteración en Andesitas Inferiores y Albitófiro. Se presentan: a) SM de silicificación en Andesitas Inferiores, b) SM de silicificación en Albitófiro, c) SM de carbonización en Andesitas Inferiores, d) SM de carbonización en Albitófiro, e) SM de cloritización en Andesitas Inferiores, f) SM de cloritización en Albitófiro, g) SM de alteración potásica en Andesitas Inferiores, h) SM de alteración potásica en Albitófiro e i) SM de alteración argílica en Andesitas Inferiores (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).

5.2 Distribución estadística de los valores de susceptibilidad magnética

Se realizaron histogramas de susceptibilidad magnética (SM) para las principales litologías (Andesitas Inferiores y Albitófiro) y para los rangos de % Cu establecidos en SCM Carola. La finalidad de esto es observar la proporción y frecuencia de los rangos de SM bajo los parámetros mencionados anteriormente.

5.2.1. Susceptibilidad magnética para Andesitas Inferiores y Albitófiro

En la figura 5.6 se muestran los histogramas con los valores de SM para los datos medidos en Andesitas Inferiores (fig. 5.6a) y en Albitófiro (fig. 5.6b).

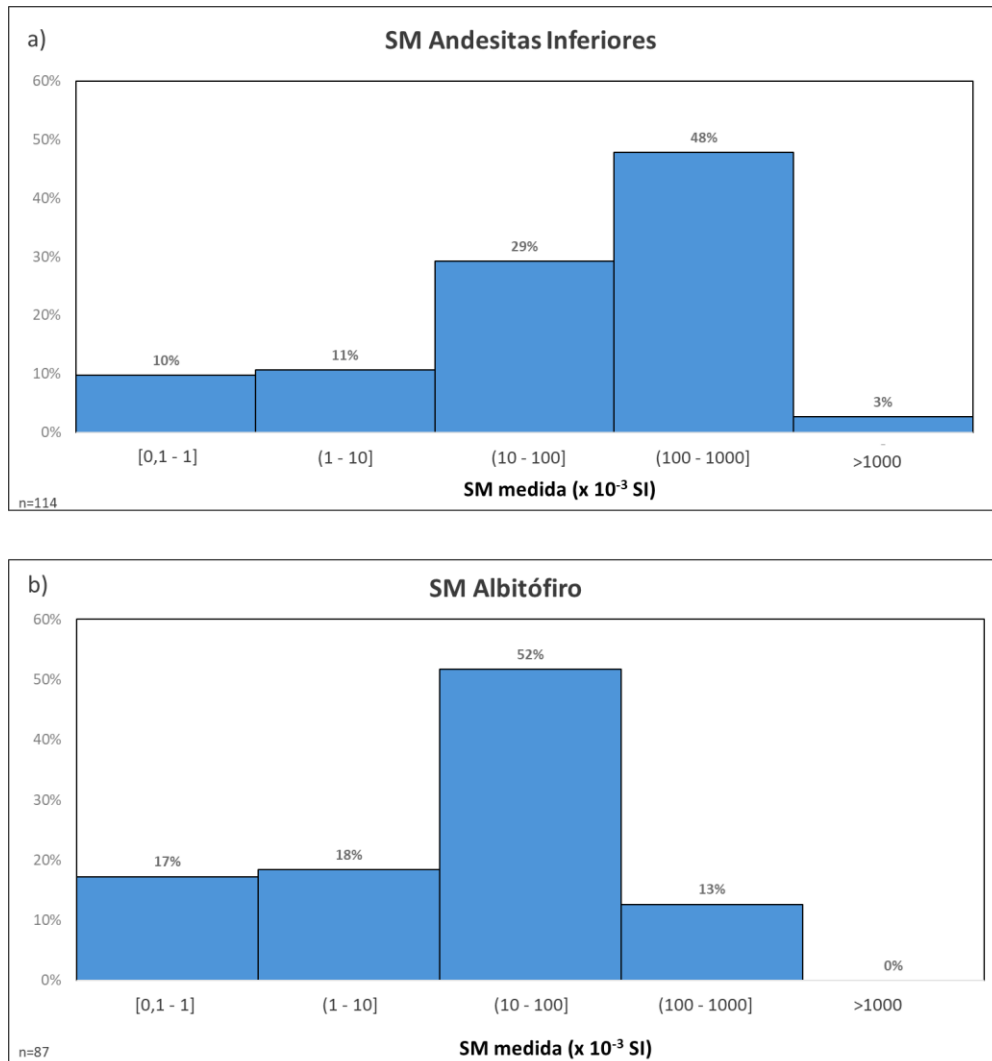


Figura 5.6. Histogramas de susceptibilidad magnética (SM) para litologías de Andesitas Inferiores y Albitófiro. Se presenta: a) SM en Andesitas Inferiores y b) SM en Albitófiro (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).

Para las Andesitas Inferiores (fig. 5.6a) existe un predominio de valores (>50%) con SM altas (>100 x 10⁻³ SI), donde la mayor densidad de datos se encuentra en el rango de susceptibilidades de entre 100 y 1000 (x 10⁻³ SI). En el caso del Albitófiro (fig. 5.6b), se aprecia que el rango de datos con mayor densidad se encuentra en el intervalo de entre 10 y 100 (x 10⁻³ SI), donde, considerando el total de datos evaluados, existe un predominio en valores de SM baja (<30 x 10⁻³ SI).

Para la figura 5.7 se subdividieron los valores recopilados de SM en Andesitas Inferiores y Albitófiro por sector (norte, centro norte, centro sur y sur), de la cual se puede apreciar lo siguiente:

Para Andesitas Inferiores y Albitófiro los rangos de SM varían en cada sector. Se observa un aumento paulatino en los valores de SM desde el sector norte hacia el sector sur, siendo este último (fig. 5.7g y h) donde se presentan los valores más altos de SM para ambas litologías. Además, se observa que en el sector norte se encuentra la mayor densidad de datos con valores <10 ($\times 10^{-3}$ SI) (fig. 5.7a y b).

Para Andesitas Inferiores se observa un predominio claro en el intervalo de 100-1000 ($\times 10^{-3}$ SI), que se mantiene relativamente constante (fig. 5.7a, c, e y g). Para el sector sur (fig. 5.7g), se observan los valores de susceptibilidad magnética más alta, donde se hacen presentes valores de susceptibilidad magnética >1000 ($\times 10^{-3}$ SI). Para Albitófiro el rango de 10-100 ($\times 10^{-3}$ SI) es el que más predomina para esta litología (fig. 5.7d, f y h). Al igual que en Andesitas Inferiores, el sector sur (fig. 5.7h) es el que presenta los valores de SM más altos, donde se observa un porcentaje importante (50%) de valores en el rango de 100-1000 ($\times 10^{-3}$ SI).

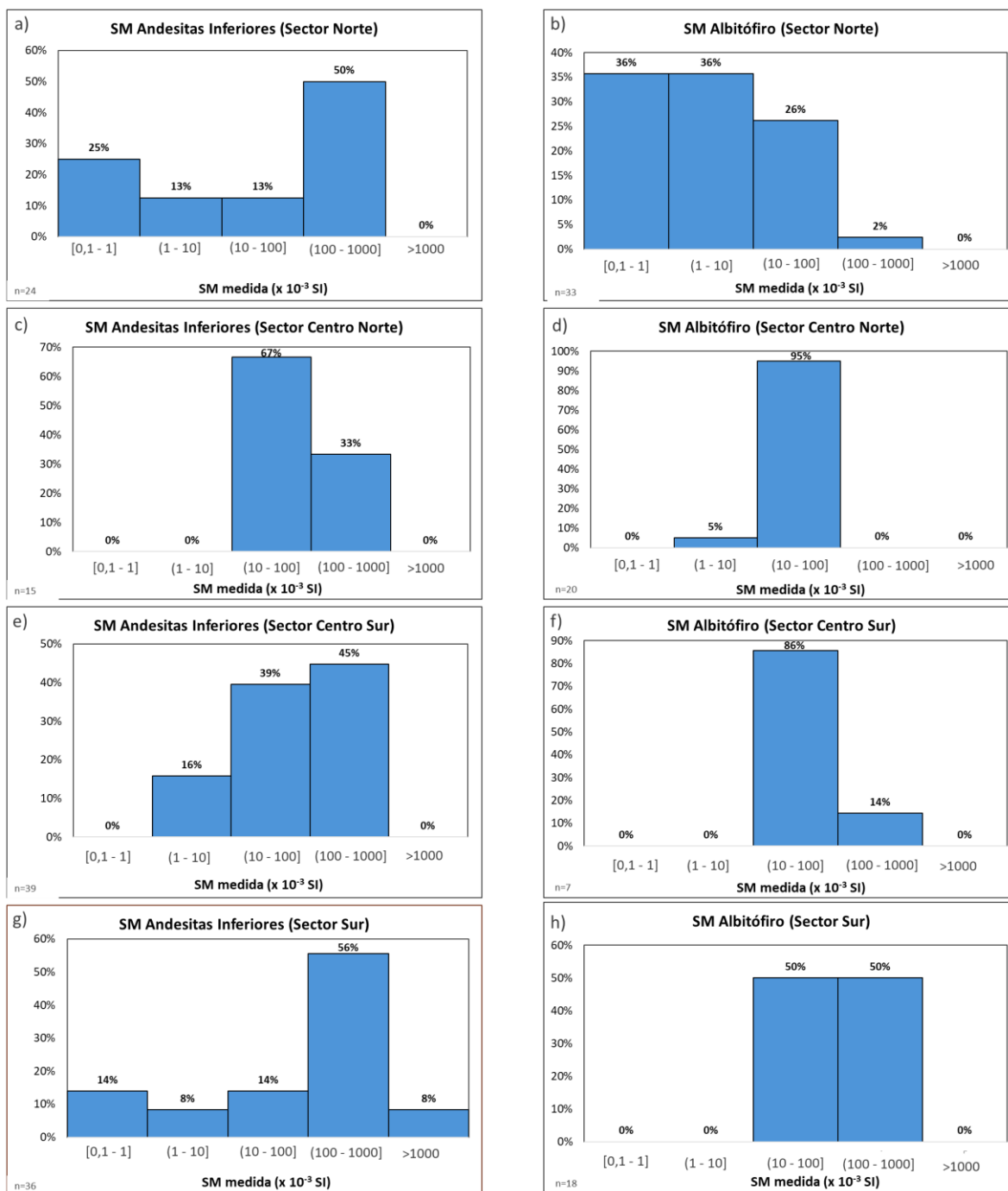


Figura 5.7. Histogramas de susceptibilidad magnética (SM) para litologías de Andesitas Inferiores y Albitófiro para cada sector. Se presentan: a) SM en Andesitas Inferiores sector norte, b) SM en Albitófiro sector norte, c) SM en Andesitas Inferiores sector centro norte, d) SM en Albitófiro sector centro norte, e) SM en Andesitas Inferiores sector centro sur, f) SM en Albitófiro sector centro sur, g) SM en Andesitas Inferiores sector sur, h) SM en Albitófiro sector sur (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).

5.2.2 Susceptibilidad magnética para rangos de leyes de Cu

En la figura 5.8 se muestran gráficos de dispersión con los valores de susceptibilidad magnética (SM) medida según los contenidos (%) de cobre para todos los sondajes seleccionados (fig. 5.8a), para Andesitas Inferiores (fig. 5.8b), para Albitófiro (fig. 5.8c) y para todos los sondajes seleccionados según el sector (norte, centro norte, centro sur y sur) (fig. 5.8d, e, f y g).

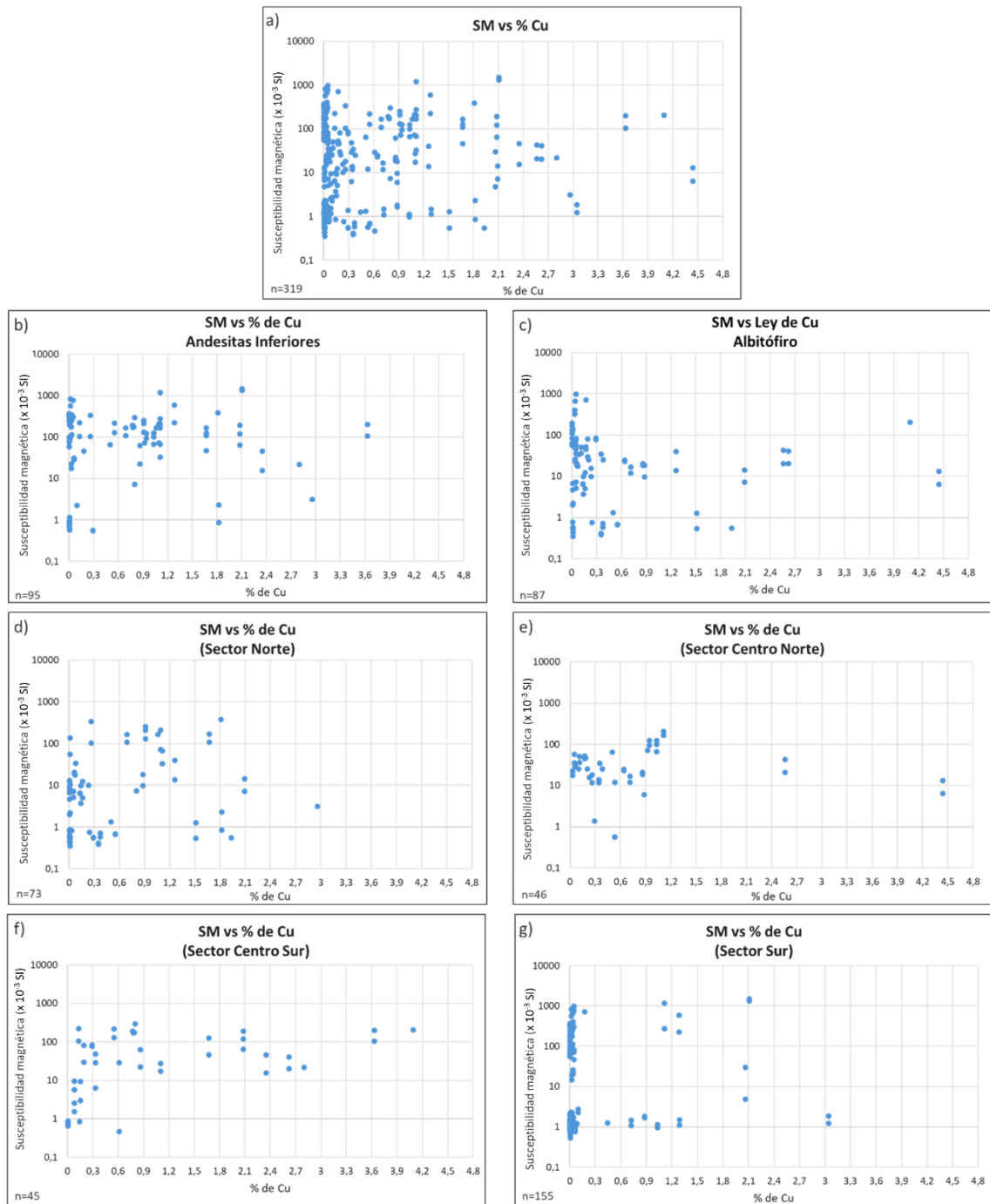


Figura 5.8. Gráficos de dispersión de susceptibilidad magnética (SM) para valores de % de Cu. Se presenta: a) susceptibilidad magnética (SM) para % de Cu en todas las litologías, b) susceptibilidad magnética (SM) en % de Cu para Andesitas Inferiores, c) susceptibilidad magnética (SM) en % de Cu para Albitófiro, d) susceptibilidad magnética (SM) para % de Cu en todas las litologías del sector norte, e) susceptibilidad magnética (SM) para % de Cu en todas las litologías del sector centro norte, f) susceptibilidad magnética (SM) para % de Cu en todas las litologías del sector centro sur y g) susceptibilidad magnética (SM) para % de Cu en todas las litologías del sector sur (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).

Para el total de litologías (fig. 5.8a) se observa una correlación positiva débil entre la SM medida y el contenido (%) de cobre. Para Andesitas Inferiores y Albitófiro (fig. 5.8b y c) la SM no muestra una correlación notoria con el contenido (%) de cobre. Para los sectores norte, centro norte y centro sur (fig. 5.8d, e y f) se observa una correlación positiva débil entre los valores de SM medida y el contenido (%) de cobre. Independiente del contenido de cobre, los valores en Andesitas Inferiores se concentran en intervalos de SM entre 100 y 1000 ($\times 10^{-3}$ SI) (fig. 5.8b), y para Albitófiro en intervalos de SM entre 10 y 100 ($\times 10^{-3}$ SI) (fig. 5.8c).

La figura 5.9 agrupa histogramas referentes a las variaciones de SM según distintos rangos de contenido (%) de cobre en los tramos de sondaje seleccionados, con el fin de identificar posibles tendencias en los valores de SM con respecto a los contenidos de cobre. Para la figura 5.9 se puede apreciar lo siguiente:

- La distribución de SM no es igual para todos los rangos de contenidos (%) de cobre.
- Para leyes $<0,1\%$ Cu (fig. 5.9a), se observa la mayor frecuencia de datos en el intervalo 1 – 10 ($\times 10^{-3}$ SI) con un 44% del total de datos. La mayor parte de los datos se concentra hacia valores de SM baja ($<30 \times 10^{-3}$ SI).
- Para leyes entre 0,1 y 0,8% Cu (fig. 5.9b y c), se observa la mayor frecuencia de datos en el intervalo 10 – 100 ($\times 10^{-3}$ SI). La mayor parte de los datos se concentra hacia valores de SM moderados (30 - 100 $\times 10^{-3}$ SI).
- Para leyes $>0,8\%$ Cu (fig. 5.9d y e), se observa la mayor frecuencia de datos en el intervalo 10 – 100 ($\times 10^{-3}$ SI). La mayor parte de los datos se concentra hacia valores de SM moderados (30 - 100 $\times 10^{-3}$ SI), pero con un porcentaje considerable de datos hacia SM >100 ($\times 10^{-3}$ SI), y aparición de valores >1000 ($\times 10^{-3}$ SI), indicando una presencia importante de valores de SM altos para leyes $>0,8\%$ Cu.

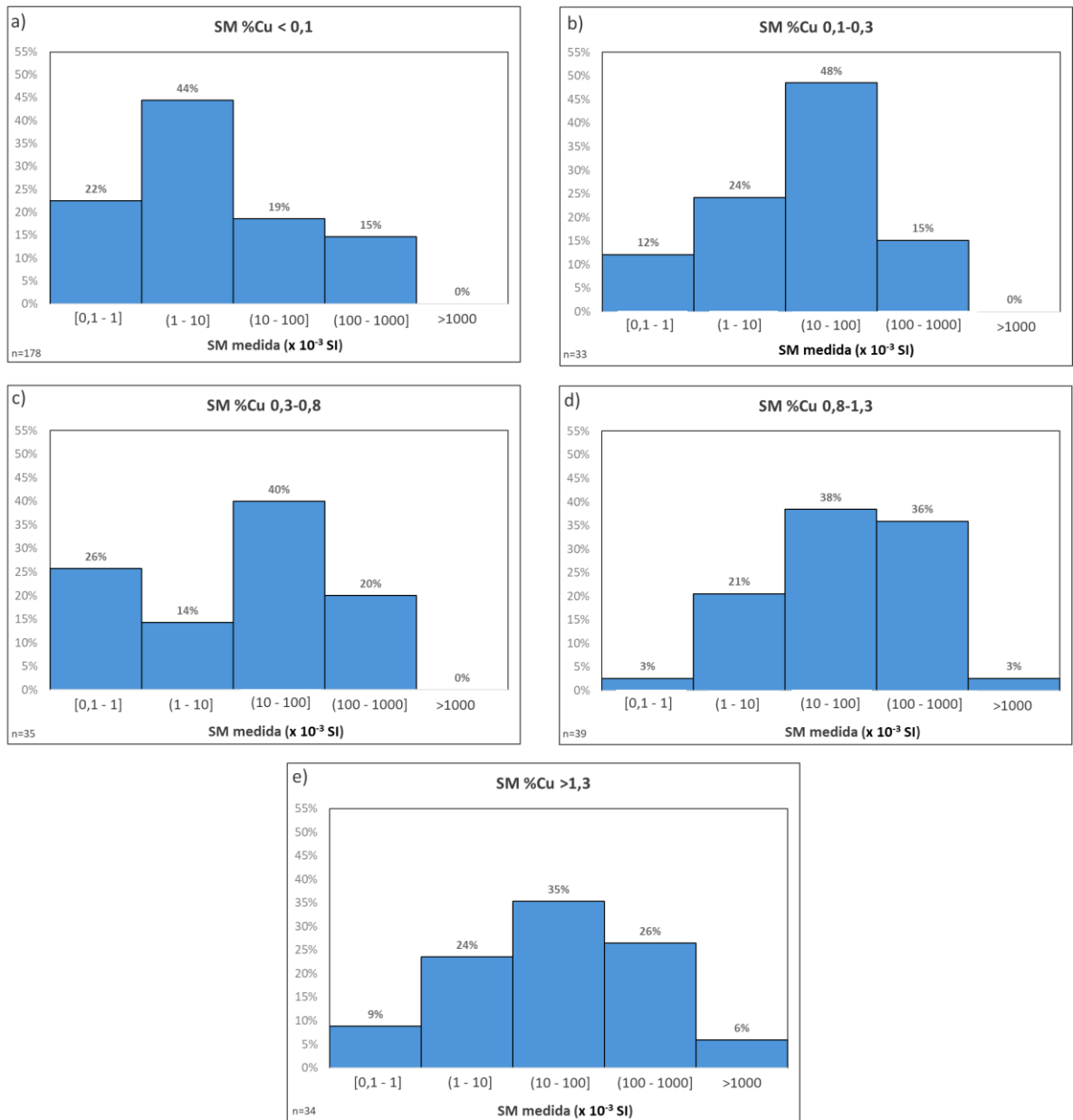


Figura 5.9. Histogramas de susceptibilidad magnética (SM) para rangos de valores de %Cu. Se presentan: a) SM en %Cu <0,1, b) SM en %Cu de 0,1 – 0,3, c) SM en %Cu de 0,3 – 0,8, d) SM en %Cu de 0,8 – 1,3 ye) SM en %Cu >1,3 (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).

5.3 Correlación de la susceptibilidad magnética con otros parámetros

Se realizaron gráficos de dispersión basados en valores de los modelos MVI y susceptibilidad, valores de las mediciones de susceptibilidad magnética (SM), y de la

profundidad en la que se encontraban los tramos de sondajes seleccionados. El objetivo de estos gráficos es evaluar la relación existente entre los valores de SM medidos en los tramos de sondaje y los valores presentes en los modelos de inversión obtenidos por Southernrock (MVI y susceptibilidad), y la relación existente entre los valores de SM medida y la profundidad (cota) a la que se encontraban los sondajes seleccionados.

5.3.1 Susceptibilidad magnética medida y modelos geofísicos (MVI y susceptibilidad)

La figura 5.10 reúne gráficos de dispersión donde se compara la información referente al promedio, por tramo, de valores de SM medida en los sondajes seleccionados con los valores del modelo susceptibilidad (fig. 5.10a), y otro con los valores del modelo MVI (fig. 5.10b) También se presenta un gráfico donde se comparan los valores de ambos modelos (MVI y susceptibilidad) (fig. 5.10c).

Para la figura 5.10a se comparan valores de SM medida y valores del modelo de susceptibilidad. En general, a medida que aumentan los valores de SM medida, aumentan los valores del modelo susceptibilidad. Para la figura 5.10b se comparan valores de SM medida y valores del modelo MVI. En cuanto a los puntos graficados, se aprecia una partición de los valores generando 2 tramos, el primero de 2 a 10 SM MVI ($\times 10^{-3}$ SI) y el segundo de 17 a 22 SM MVI ($\times 10^{-3}$ SI). De igual manera, se observa una relación creciente en ellos, donde, en general, los valores de SM crecen a medida que aumentan los valores del modelo MVI. En la figura 5.10c se comparan los valores de ambos modelos geofísicos (MVI y susceptibilidad). Se observa una tendencia similar a la fig. 5.10b, con dos grupos de datos separados a lo largo del eje horizontal: un primer grupo de 2 a 10 SM MVI ($\times 10^{-3}$ SI), y un segundo de 17 a 22 SM MVI ($\times 10^{-3}$ SI). A rasgos generales, la fig. 5.9c muestra una relación creciente entre los parámetros comparados para cada grupo, donde a medida que aumentan los valores del modelo susceptibilidad, aumentan los valores del modelo MVI.

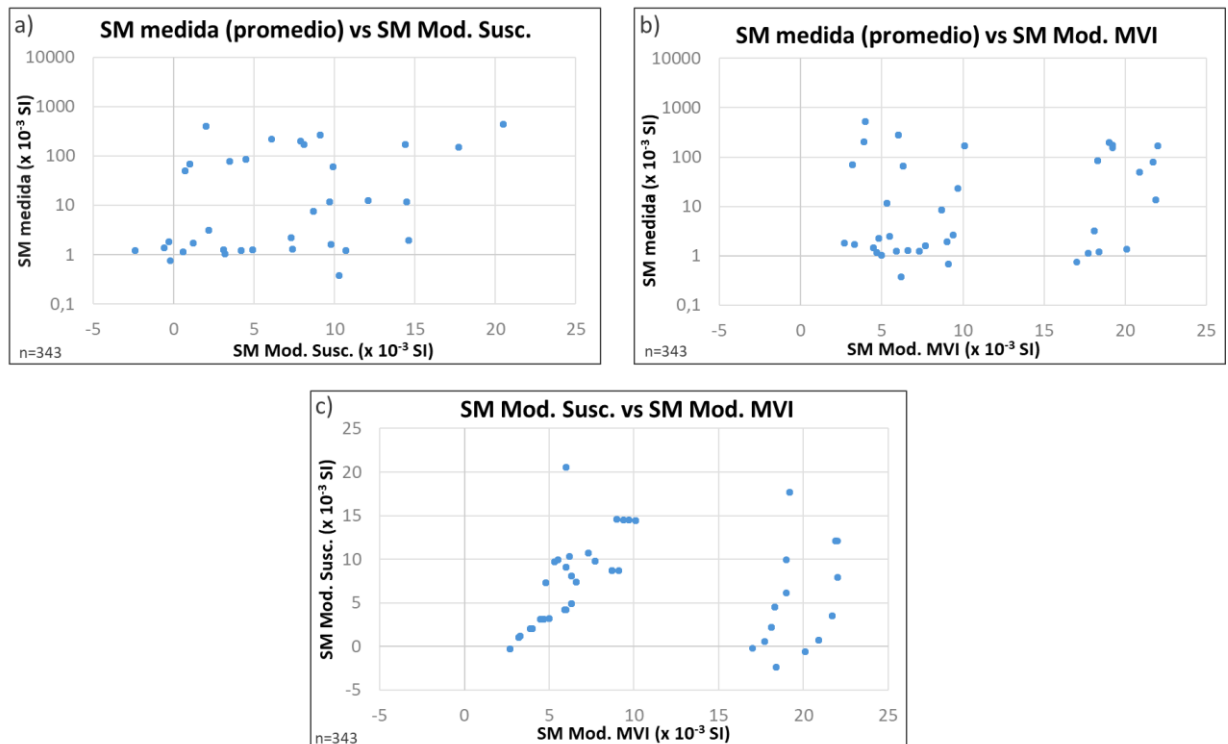


Figura 5.10. Gráficos de dispersión que compara el promedio de los valores de susceptibilidad magnética (SM) medida y los valores presentes en los modelos geofísicos MVI y susceptibilidad magnética (modelada). Se presentan: a) SM medida (promedio) vs SM modelada, b) SM medida (promedio) vs SM MVI modelo MVI y c) SM modelo Susceptibilidad vs SM MVI modelo MVI (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).

5.3.2 Susceptibilidad magnética y profundidad

La figura 5.11 compara los valores de SM medida con la profundidad (cota) en la que se encontraban los tramos de sondajes seleccionados. Se observa una tendencia decreciente entre la SM y la cota. En general, se aprecia que a medida que aumenta la cota (elevación sobre el mar) de los sondajes, la SM disminuye.

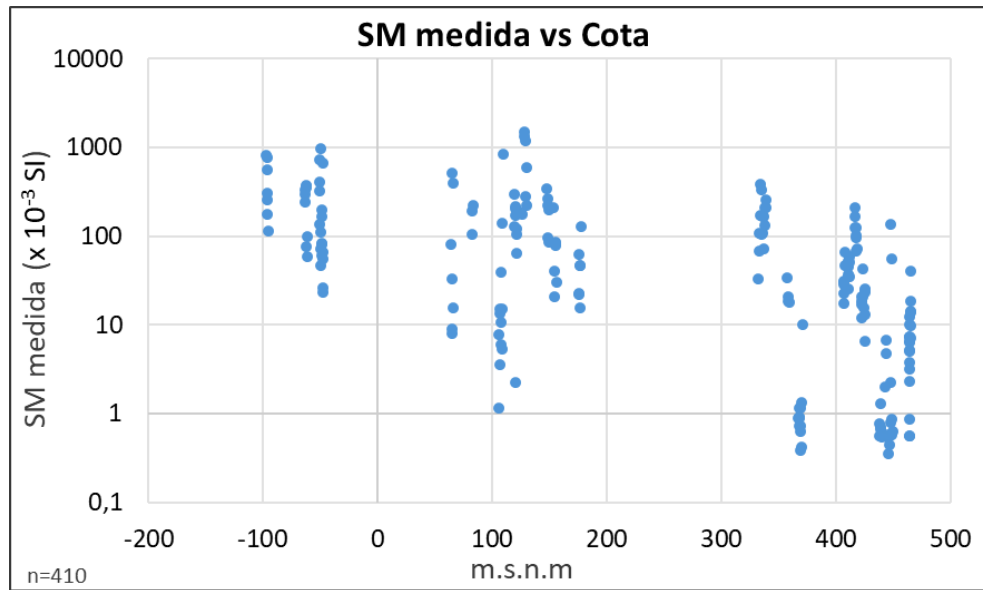


Figura 5.11. Gráfico de dispersión de susceptibilidad magnética (SM) medida según la profundidad (m.s.n.m) a la que se encontraban los tramos de sondajes seleccionados para medición (elaboración propia utilizando software Microsoft Excel ©).

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

6.1 Alcances y limitaciones del estudio

6.1.1 Área del levantamiento magnético

El área donde se realizó el levantamiento magnético cubrió principalmente zonas sin laboreos de SCM Carola, y por lo tanto con escasa información sobre la geología de subsuperficie. El problema de esto radica en nula información geofísica previa que se tiene sobre la zona donde se realizan o realizaron labores mineras (Carola central y parte occidental de Adriana norte y Adriana central) (fig. 4.1), en la que no se ejecutaron mediciones por parte de la empresa geofísica Southernrock. El sector de la concesión minera de SCM Carola omitida en el estudio (Carola central) es la que presenta la mayor cantidad de información geológica basada en perforación, logueo de sondajes y modelación (fig. 4.1). Medir sobre esta área permitiría caracterizar la señal magnética de la zona donde mejor se conoce la geología.

6.1.2 Ubicación de sondajes

La mayor parte de los sondajes perforados tiene la finalidad de estimar la distribución espacial y propiedades de la mineralización económica (calcopirita principalmente), junto con la estimación de leyes y relaciones minerales que sean relevantes para el proceso metalúrgico. De igual manera, los sondajes buscan establecer la calidad geomecánica de las rocas para los procesos de avance y fortificación al interior de la mina. Todo lo anterior genera un sesgo espacial para la caracterización de las propiedades de las rocas, por ejemplo, la susceptibilidad magnética de las litologías, debido a que toda la información geológica existente en sondajes abarca un área acotada (19% de la concesión) en comparación al total de área comprendida para el estudio geofísico (fig. 4.1).

6.1.3 Falta de información en sondajes seleccionados

De los 410 tramos o muestras de sondaje analizados, 67 (16% del total) caen fuera del levantamiento magnético, y por lo tanto no tienen valores de los modelos MVI y susceptibilidad. Junto a lo anterior, se tienen 91 tramos (22% del total) sin leyes de cobre. Cabe señalar, además, que existe una base de datos con 108.274 mediciones de susceptibilidad magnética realizadas en 424 sondajes, obtenidas antes que esta tesis. El problema de estos datos preexistentes es que el procedimiento de medición no se realizaba de manera correcta, ya que las mediciones de susceptibilidad se realizaban en un sector donde las cajas con sondajes estaban situadas en mesones de hierro. Se comprobó que al medir susceptibilidad magnética de los sondajes sobre mesones de hierro, el susceptibilímetro arrojaba valores de susceptibilidad magnética $>100 \times 10^{-3}$ SI en litologías que no contenían minerales ferromagnéticos, como por ejemplo, Tobas de Agustina o calizas margosas. Por lo tanto, se concluyó que los mesones de hierro contaminaban la medición de susceptibilidad magnética.

6.1.4 Escala de muestras y modelos comparados

Cada uno de los modelos geofísicos obtenidos por la empresa Southernrock (MVI y susceptibilidad) se componen de varios bloques, los cuales, de manera individual, poseen solo un valor de la propiedad física que representan. Cada uno de estos bloques tiene dimensiones variables de 15 a 176,056 m de largo x 30 m de ancho x 30 m de profundidad (volumen variable de $13.500 - 158.450,4 \text{ m}^3$), lo que abarca un volumen considerablemente mayor con relación a las dimensiones que tiene cada una de las muestras de sondajes (cilindros de 1 m de largo x 0,476 m de diámetro) (fig. 6.1). Esta significativa diferencia en escalas dificulta la comparación de los valores de susceptibilidad magnética medida con los valores de susceptibilidad que presentan los modelos geofísicos (MVI y susceptibilidad), debido a que cada bloque de los modelos (caracterizado por un valor de susceptibilidad) puede contener varias decenas de muestras de sondajes (fig. 4.12). Por lo anterior, se realizó una interpolación de los valores de los modelos MVI y susceptibilidad magnética en los collares de los sondajes realizados en

mina Carola, donde se promedió el valor de susceptibilidad magnética medida en cada tramos de sondajes seleccionado, y luego se comparó dicho promedio con el valor del bloque que indicaban los modelos geofísicos (MVI y susceptibilidad magnética) para la ubicación del tramo de sondaje seleccionado (e.g. Austin y Foss, 2014).

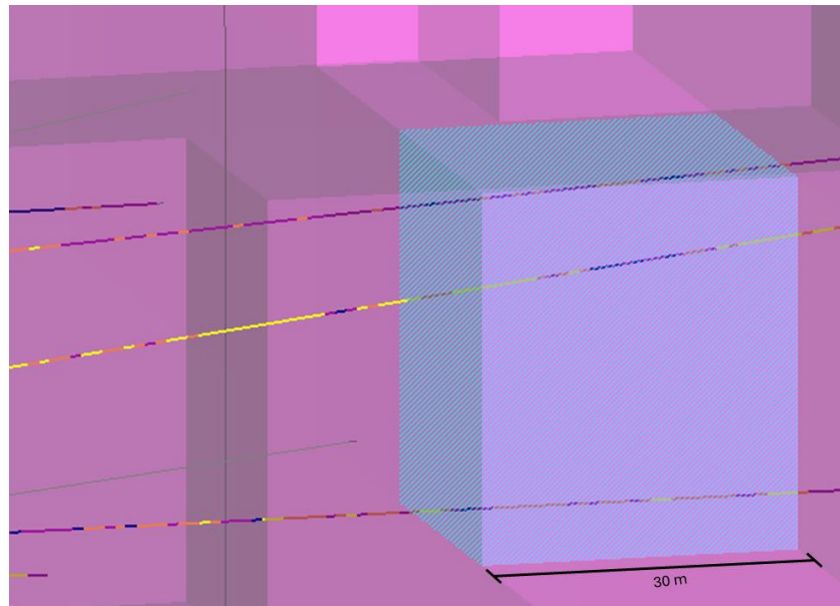


Figura 6.1. Imagen referencial de las dimensiones de uno de los bloques en los que se componen los modelos geofísicos y el área que abarca un sondaje perforado (elaboración propia a través del software Leapfrog Geo ©).

6.2 Relación de la susceptibilidad magnética con otros parámetros.

6.2.1 Susceptibilidad magnética de litologías y alteraciones

Las susceptibilidades pueden ser muy variables, principalmente debido a las diferentes concentraciones de minerales magnéticos, pero también debido a las variaciones en el tamaño de grano (Clark, 1983, 1984; Dekkers, 1988, 1989; Austin et al., 2013a), y a las impurezas o variaciones estructurales en la red cristalina de los minerales (Austin et al., 2013a). La fig. 5.2 muestra que las Andesitas Inferiores y Albitófiro presentan principalmente valores de SM media a alta (en promedio $SM > 30 \times 10^{-3}$ SI), lo que permite diferenciarlas fácilmente de las otras litologías. Por otra parte, las unidades ubicadas por

sobre las Andesitas Inferiores y Albitófiro en la columna estratigráfica, se caracterizan por poseer una SM generalmente baja (en promedio $SM < 3 \times 10^{-3}$ SI) (fig. 5.2).

Para los diferentes sectores del área de estudio (norte, centro norte, centro sur, sur) (fig. 5.4), se observó que los valores de SM medidos en Andesitas Inferiores y Albitófiro aumentan en el sector sur. En los histogramas de estas litologías (fig. 5.7), se visualiza que hacia el sector sur la población de muestras tiende a concentrarse en valores de SM medios a altos. Esta tendencia se hace más evidente en el Albitófiro, donde más del 60% de la población en el sector norte presenta valores de SM baja ($< 10 \times 10^{-3}$ SI) (fig. 5.7b), pasando por un predominio de valores medios de SM en los sectores centrales (fig. 5.7d y f), hasta observarse un predominio en el sector sur de valores de SM alta ($> 100 \times 10^{-3}$ SI) (fig. 5.7h).

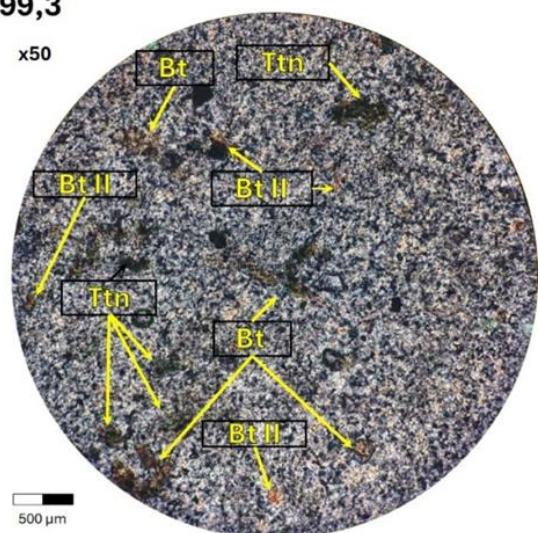
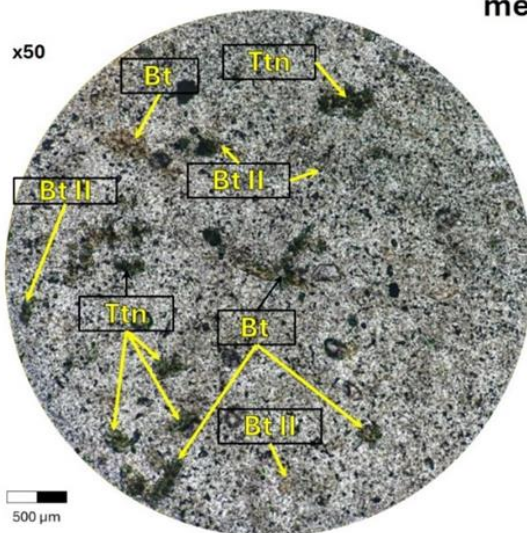
En cuanto a la relación de la SM con las alteraciones (fig. 5.3), principalmente se destaca que la SM presenta valores medios a altos con la presencia de cloritización fuerte (promedio de 244×10^{-3} SI) (fig. 5.3c) y alteración potásica débil (promedio de 75×10^{-3} SI) (fig. 5.3d). Estos valores se obtuvieron principalmente en Andesitas Inferiores (cloritización fuerte y alteración potásica débil) (fig. 5.5e y g, y anexo C) y Albitófiro (alteración potásica débil) (fig. 5.5h). Esta relación entre las alteraciones y los valores de SM media a alta son consistentes, debido a que la magnetita tiende a presentarse como un mineral accesorio en estas alteraciones. Es probable que la cloritización esté asociada a alteración potásica y/o alteración propilítica. Townley et al. (2007), para un depósito similar a Carola en el distrito de Carolina de Michilla, identificaron una alteración regional del tipo propilítica de bajo grado y una alteración hidrotermal relacionada con mineralización de cobre. La alteración regional se caracteriza por epidota-clorita-esmectita-titanita-albita-cuarzo-calcita que se extendía dentro de las rocas volcánicas, donde la clorita presentaba una composición rica en Fe. No existía gran diferencia mineralógica entre ambos tipos de alteración, en ambos casos se sugería un metasomatismo rico en Na-Fe con tendencia a la oxidación. Los minerales magnéticos

presentes eran magnetita que estaba en ambos tipos de alteración, maghemita que era mayoritariamente producto de la alteración regional y hematita que era mayoritariamente característica de la alteración hidrotermal. Por otra parte, Clark (2014) señala que la alteración potásica (feldespato K-sericita-magnetita-cuarzo \pm biotita \pm hematita \pm clorita \pm actinolita) está estrechamente asociada a la mineralización en los sistemas IOCG, donde existe abundante magnetita multidominio creada indicando alta susceptibilidad magnética.

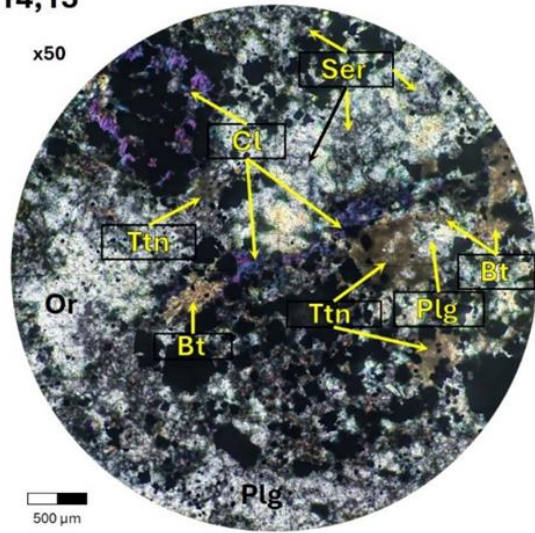
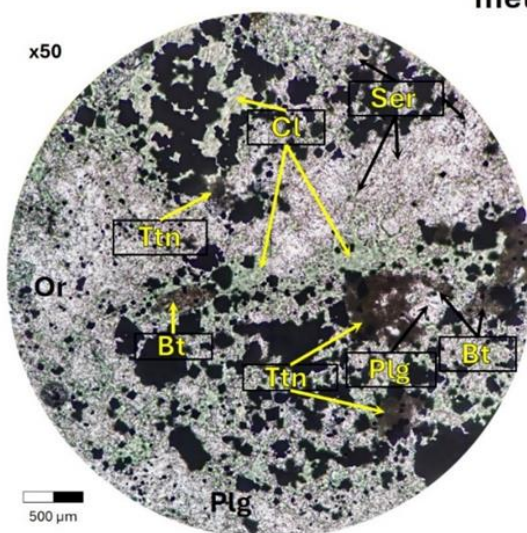
La fig. 5.5a muestra que tramos con silicificación fuerte tienden a presentar SM media a alta. Como el cuarzo es un material diamagnético, se esperarían SM bajas en rocas con fuerte silicificación. Para identificar la causa de las altas SM medidas en rocas con fuerte silicificación, se analizaron diversos cortes transparentes tomados de zonas que, según la base de datos de sondaje histórica de Carola, presentarían una silicificación fuerte para las litologías de Andesitas Inferiores y Albitófiro. Bajo los parámetros anteriores se encontraron 5 muestras de cortes transparentes (fig. 4.21). Las figuras 6.2 (Andesitas Inferiores) y 6.3 (Albitófiro) muestran los cortes seleccionados bajo el microscopio. Para los cortes analizados no se observó evidencia de silicificación afectando a las rocas, solo la presencia de cuarzo en vetillas acompañando otros minerales, como se muestra en la muestra de sondaje AN-17 (fig. 6.3). Se observaron minerales opacos que podrían ser magnetita o pirita según el hábito que presentan, principalmente en los cortes transparentes de los sondajes AN-24 (fig. 6.2) y AN-11 (fig. 6.3). En cuanto a minerales de alteración, en general las muestras presentaban principalmente clorita, epidota y biotita secundaria identificable en todas las muestras analizadas (figs. 6.2 y 6.3), además de calcita específicamente en la muestra AN-17. Todos los cortes analizados, según sus características mineralógicas, correspondían a andesitas, presentando principalmente plagioclasa, acompañado de ortoclasa (primaria), biotita (primaria) y cantidades menores de cuarzo. Cabe mencionar que en todas las muestras de Andesitas Inferiores se destacaba la presencia de titanita, común en rocas ácidas e intermedias, y minerales opacos, que según su hábito corresponderían a pirita o magnetita. Las altas SM presentes en alteración de silicificación fuerte en Andesitas Inferiores (fig. 5.5a) serían producto de la presencia

de magnetita. Es importante mencionar que la identificación de silicificación en los sondajes analizados dentro de la SCM Carola se hace de manera mecánica, a través de golpes con martillo en el testigo para evaluar la dureza de la roca, y auditiva según el sonido que genere el impacto del martillo. En base a lo anterior, es posible que la “silicificación” descrita en algunos de los sondajes analizados corresponda a otro tipo de alteración, por ejemplo, albitización.

**AN-9
metro 299,3**



**AN-24
metro 314,15**



AN-51
metro 366,5

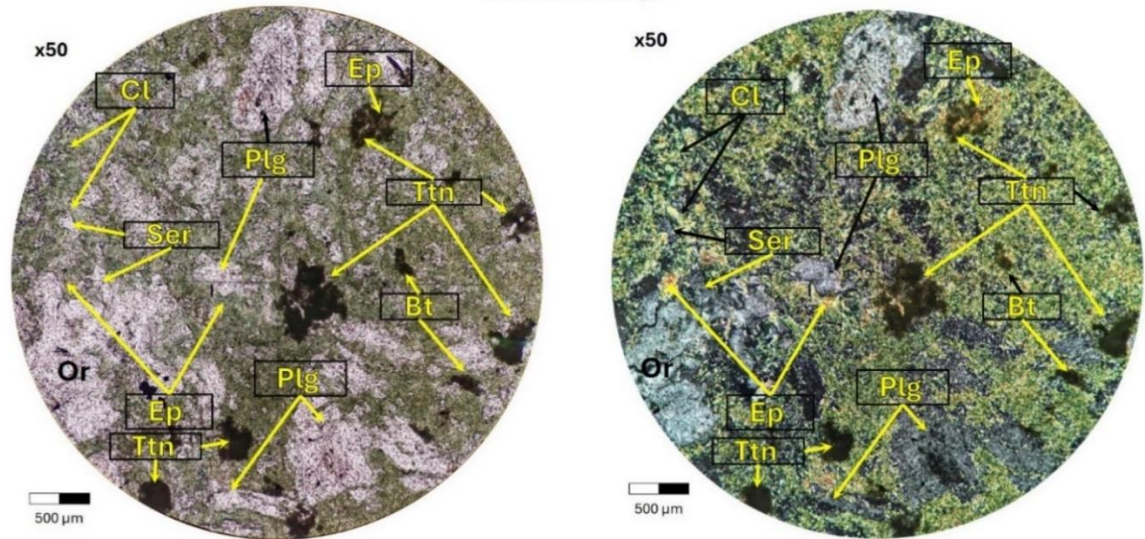


Figura 6.2. Cortes transparentes de unidad geológica de Andesitas Inferiores. A la izquierda se observan los cortes en luz polarizada plana (LPP) y a la derecha en nicoles cruzados (NC). Se muestran indicados con flechas los siguientes minerales: plagioclasa (Plg), ortoclasa (Or), biotita primaria (Bt), biotita secundaria (Bt II), epidota (Ep), clorita (Cl), sericita (Ser), titanita (Ttn).

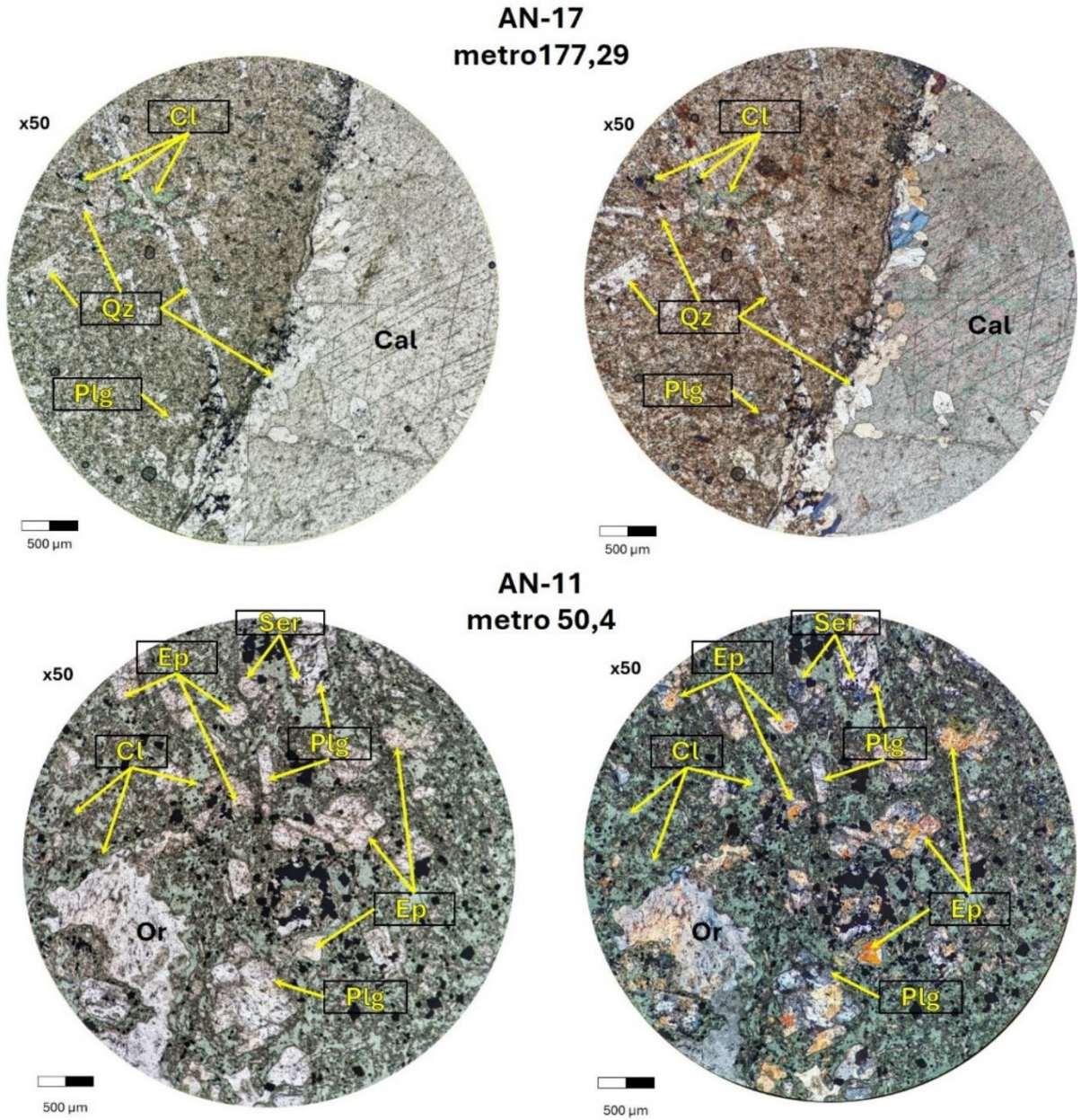


Figura 6.3. Cortes transparentes de unidad geológica de Albitófiro. A la izquierda se observan los cortes en luz polarizada plana (LPP) y a la derecha en nícoles cruzados (NC). Se muestran indicados con flechas los siguientes minerales: plagioclasa (Plg), ortoclasa (Or), cuarzo (Qz), epidota (Ep), clorita (Cl), sericita (Ser).

6.2.2 Susceptibilidad magnética y leyes de cobre

Respecto a los valores de SM medida y las leyes de cobre (figs. 5.8 y 5.9), se aprecia una correlación positiva débil entre la SM y el contenido (%) de cobre (fig. 5.8a). Para

leyes $<0,8\%$ Cu, la mayoría de las muestras se tiende a concentrar hacia valores de SM $<10 \times 10^{-3}$ SI (fig. 5.9a, b y c). Para leyes $>0,8\%$ Cu, se observa que más del 60% de la población presenta SM $>10 \times 10^{-3}$ SI. Además, dentro de este rango de leyes se tiene la aparición de valores de SM $>1000 \times 10^{-3}$ SI, cuya proporción de muestras aumenta para leyes $>1,3\%$ Cu (fig. 5.9d y e). Se conoce que la mineralización presente en el distrito Punta del Cobre se caracteriza por un conjunto mineral simple formado por calcopirita, pirita, magnetita y hematita (Marschik et al., 1997), y que la magnetita aparece junto con la calcopirita y como cuerpos masivos de forma irregular y vetas (Lino, 1984; Hopf, 1990; Ryan et al., 1995; Marschik et al., 1997). Todo lo anterior indicaría que existiría una relación levemente proporcional entre los contenidos de Cu y la SM, lo que respaldaría utilizar como guía de exploración la presencia de cuerpos con alta SM.

6.2.3 Relación entre valores de susceptibilidad magnética medida y valores de modelos geofísicos (MVI y susceptibilidad)

En cuanto a los gráficos de dispersión entre los valores de SM medida y los valores de los modelos MVI y susceptibilidad (fig. 5.10), se desprende que los valores de SM medida son consistentes con los valores entregados por el modelo de susceptibilidad, manteniendo al menos una relación proporcional entre ellos (fig. 5.10a).

Al comparar los valores de SM medida y modelada con los valores del modelo MVI (fig. 5.10b y c), se aprecian dos poblaciones de datos: uno hacia la izquierda y otro a la derecha de los gráficos. La población de datos a la izquierda abarca valores de susceptibilidad MVI desde 2 a 10×10^{-3} SI, observándose cierta proporcionalidad entre los datos de SM modelada y susceptibilidad MVI. Esta proporcionalidad indicaría que la magnitud del vector de magnetización (valor MVI) depende de la SM, y por lo tanto la magnetización total estaría dominada por la magnetización inducida. Esto implicaría que la magnetización remanente es nula o despreciable en estas muestras. Por otro lado, la población de datos ubicada a la derecha presenta valores de susceptibilidad MVI altos (17 a 22×10^{-3} SI) en celdas donde la SM es nula o muy baja. Esto sugiere la presencia de

magnetización remanente significativa en estas muestras, indicando que la magnetización total, para estas zonas, no estaría controlada solo por la magnetización inducida (y SM).

6.2.4 Susceptibilidad magnética medida y profundidad

La relación decreciente que existe entre los valores de SM medida y la cota (m.s.n.m.) (fig. 5.11) indican que a mayor profundidad tiende a aumentar comparativamente el rango de SM medidas. Esta tendencia de relativo aumento de la susceptibilidad con la profundidad se correlacionaría con la posición más profunda que tienen las litologías de Andesitas Inferiores y Albitófiro en el área de estudio, litologías que presentan contenidos comparativamente mayores de minerales ferromagnéticos. Para el área de estudio, según la base de datos histórica de SCM Carola y los sondeos logueados, los principales minerales magnéticos presentes son la magnetita y mushketovita.

6.3 Interpretación geológica de modelos geofísicos MVI y susceptibilidad

En base a la información geológica, mineralógica y petrofísica recabada, se interpretó el significado geológico de los modelos geofísicos (MVI y susceptibilidad) entregados por la empresa Southernrock. En primera instancia, se analizaron las áreas con mayor densidad de información, con el objetivo de identificar patrones de correlación entre la distribución espacial de los valores de los modelos geofísicos (MVI y susceptibilidad) y las diferentes litologías. Posteriormente, se interpretaron las zonas con menor o nula cantidad de sondeos o labores mineras, lo que permitió inferir la geología presente en profundidad para zonas poco exploradas. Finalmente, considerando todo lo anterior, se interpretaron zonas con potencial presencia de mineralización, definiendo zonas de interés para ser exploradas.

Los valores de susceptibilidad modelada son el producto de la inversión 3D convencional de datos magnéticos, donde se asume que la magnetización total es producto solo de la magnetización inducida. Por otra parte, los valores MVI corresponden a un

modelo de la magnitud del vector de magnetización total, que es resultado de modelar directamente el vector de magnetización a partir de datos de campo magnético total (TMI). Para facilitar la interpretación y comparación de los modelos, los valores MVI se clasificaron en valores altos ($>0,006$ SI) y bajos ($<0,006$ SI), mientras que la susceptibilidad modelada se clasificó en valores altos ($>0,004$ SI), intermedios ($-0,007$ a $0,004$ SI), y bajos ($<-0,007$ SI) (Figs. 6.4 y 6.5). El criterio de clasificación para los valores altos y bajos del modelo SM se realizó en base a valores estadísticos del total de datos que componen el modelo, donde el límite de valores bajos se determinó en base al percentil 25 y el límite de valores altos en base al percentil 75. Para los valores del modelo MVI, se estableció un valor bajo y alto en base a la relación de los datos de ambos modelos que se muestra en la fig. 5.9c, en ella se observa que valores desde $0,006$ SI tienen una relación proporcional con valores altos de SM ($>0,004$ SI). Considerando esta clasificación, se realizaron las siguientes comparaciones:

- a) Zonas de alto MVI y alta SM: zonas con alta magnetización total y alta magnetización inducida.
- b) Zona de bajo MVI y alta SM: representarían zonas que se pueden explicar por tres razones: (i) la presencia de alta SM y alta magnetización inducida, que es contrarrestada por una magnetización remanente de sentido contrario y de amplitud similar, resultando en un vector de magnetización total con baja magnitud (bajo MVI); (ii) la presencia de baja SM que no se modeló correctamente en el modelo de SM, y/o (iii) la presencia de zonas afectadas por autodesmagnetización.
- c) Zona de alto MVI y baja SM: zonas con alta magnetización total debido a alta magnetización remanente.

Estas combinaciones de rangos de propiedades magnéticas se deben a los contenidos de minerales ferromagnéticos presentes en las rocas. Los contenidos de estos minerales resultan de la mineralogía primaria y la superposición de todos los eventos hidrotermales y meteóricos que han experimentado estas rocas.

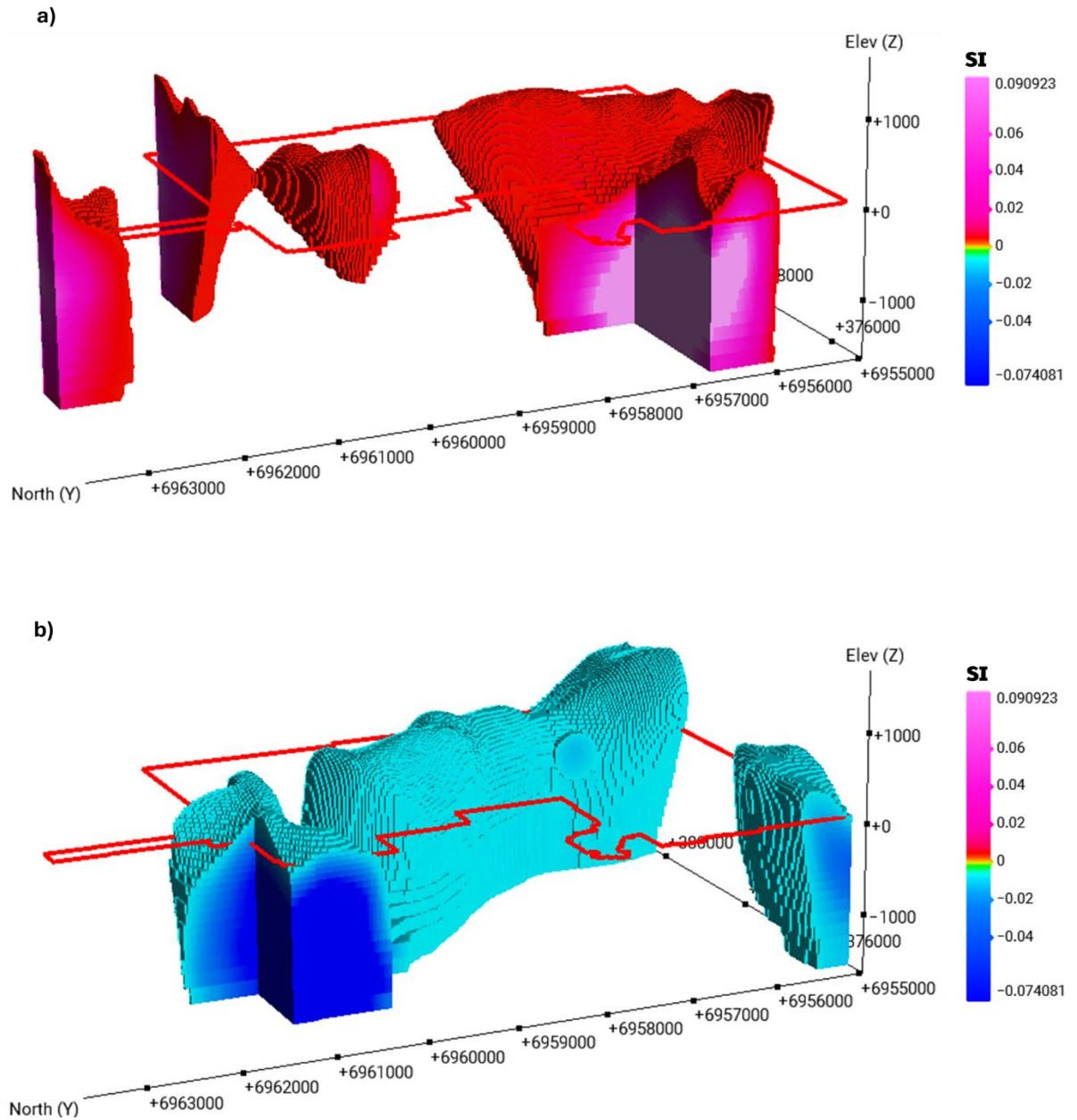


Figura 6.4. Vista en perspectiva (mirando hacia el SE) del modelo de susceptibilidad magnética entregado por Southernrock. a) Valores altos de modelo susceptibilidad ($>0,004$ SI); b) valores bajos de modelo susceptibilidad ($<-0,007$ SI). En líneas rojas se demarca la concesión de la SCM Carola.

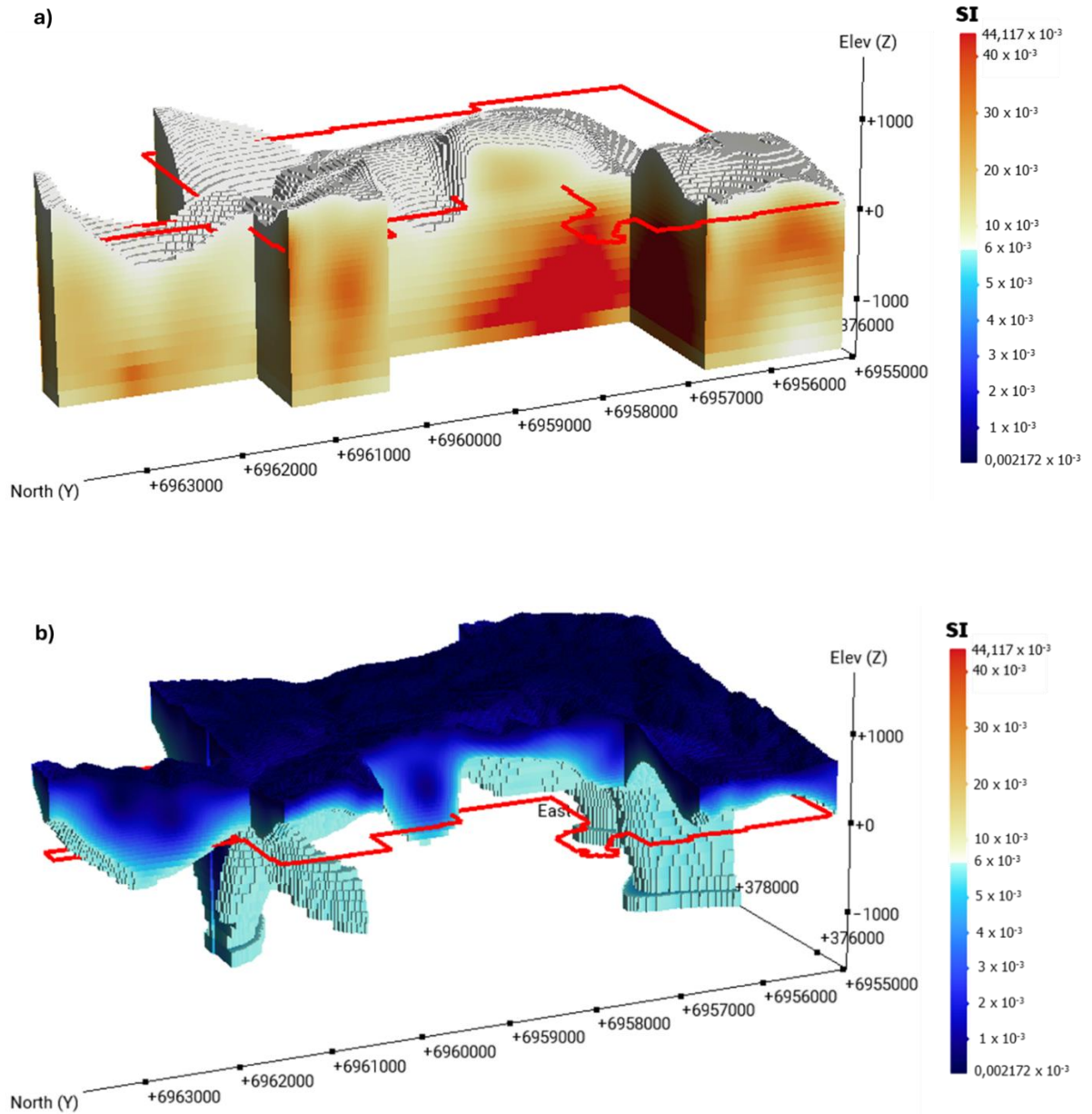


Figura 6.5. Vista en perspectiva (mirando hacia el SE) del modelo MVI entregado por Southernrock. a) Valores altos de modelo MVI ($>0,006$ SI); b) valores bajos de modelo MVI ($<0,006$ SI). En líneas rojas se demarca la concesión de la SCM Carola.

6.3.1. Significado mineralógico de modelos MVI y SM.

Considerando los valores de los modelos geofísicos (MVI y susceptibilidad), y las variaciones que se observan en las diversas secciones generadas para el área de estudio,

se identifican 3 tipos de zonas relevantes para su análisis: a) zonas con alta SM y alta MVI, b) zona de alta SM y baja MVI, c) zonas de baja SM y alta MVI. Las zonas relevantes para analizar se encuentran a profundidades variables que van desde la cota 200 hasta la cota -1600.

a) **Zonas de alto MVI y baja SM**

Zonas donde tanto el modelo MVI como el de susceptibilidad magnética muestran altos valores (ver fig. 6.6 y zonas indicadas con letras “a” en las figuras 6.10, 6.11, 6.12, 6.14, 6.15, 6.16 y 6.17) indicarían la presencia de cuerpos ferromagnéticos de alta susceptibilidad y baja remanencia, o que poseen una remanencia con dirección y sentido similar a la del campo magnético de la Tierra (CMT).



Figura 6.6. Vista en planta de los cuerpos 3-D definidos por altos valores del modelo susceptibilidad magnética (escala de rojo a rosado) ($>0,004$ SI) y altos valores del modelo MVI (escala de blanco a anaranjado) ($>0,006$ SI). En

líneas rojas se encuentra demarcada la concesión minera perteneciente a la SCM Carola (elaboración propia a través de software Leapfrog Geo ©).

Como señala Austin et al. (2013a) según las mediciones geofísicas realizadas en diversos IOCG ricos en magnetita (Ernest Henry en Clark, 1994; Starra y Osborne en Clark, 1988; Candelaria en Austin et al., 2012; Monakoff en Austin et al., 2013a), se ha observado en estos casos que la remanencia suele ser una quinta parte de la intensidad magnetización inducida (razón de Koeningsberger Q de 0.2 aproximadamente), y que de ello el 60-80% de la remanencia comúnmente es remanencia viscosa (VMR), la cual es inestable y normalmente se alinea con el CMT, imitando el efecto de magnetización inducida. También existe la posibilidad de presentar minerales magnéticos de grano fino con una dirección y sentido del vector de magnetización remanente similar al del CMT. Estos granos finos presentan una estructura dominio magnético único y muy estable, y son los portadores más importantes de remanencia intensa en muchas rocas (Dentith y Mudge, 2014). Para este tipo de eventos, la magnetización total estaría controlado por la alta SM de los minerales ferromagnéticos presentes, lo cual se representa en valores altos en el modelo de susceptibilidad (figs. 6.9c y 6.10c). Además, una remanencia baja o con una dirección de magnetización remanente similar al CMT mantendrían estos altos valores de magnetización, lo que se ve reflejado en los valores del modelo MVI (figs. 6.9b y 6.10b).

b) Zona de bajo MVI y alta SM

Se identificaron algunas zonas donde el modelo de susceptibilidad muestra valores altos, pero el modelo MVI presenta valores bajos (ver fig. 6.7 y zonas indicadas con letras “b” en las figuras 6.15 y 6.17).

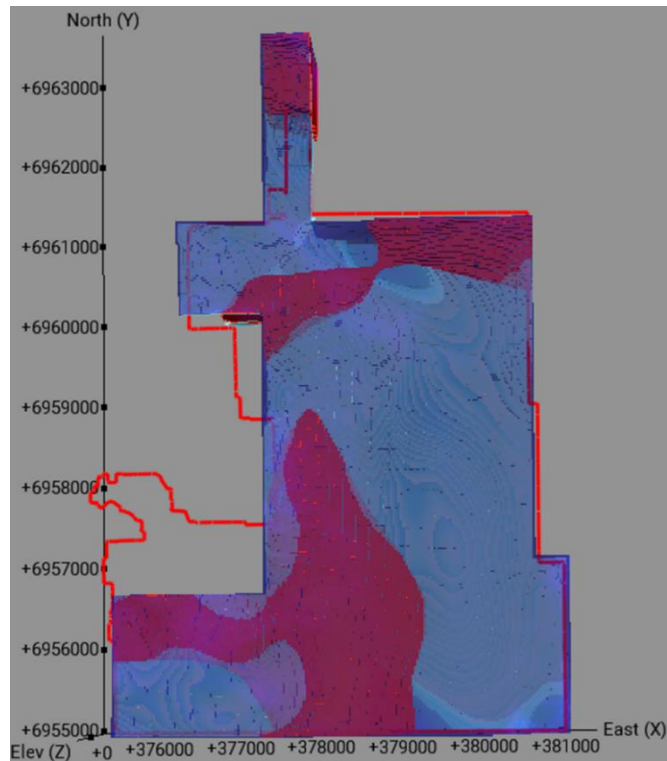


Figura 6.7. Vista en planta de los cuerpos 3-D definidos por altos valores del modelo susceptibilidad magnética (escala de rojo a rosado) ($>0,004$ SI) y bajos valores del modelo MVI (azul) ($<0,006$ SI). En líneas rojas se encuentra demarcada la concesión minera perteneciente a la SCM Carola (elaboración propia a través de plataforma Leapfrog Geo ©).

Las zonas con altos valores en el modelo de susceptibilidad deberían indicar la presencia importante de minerales ferromagnéticos de alta SM. Dentith y Mudge (2014) señalan SM de 0,01 SI para un 1% de magnetita, 0,1 SI para un 10% y 1 SI para un 20%. Para los sondajes medidos se obtuvieron valores $>100 \times 10^{-3}$ SI (0,1 SI) como valores altos de SM, que indicarían una presencia considerable de magnetita y/o mushketovita. La presencia de un bajo MVI, se puede explicar por diversos factores. Uno de ellos sería la existencia de un magnetismo multidominio (presente en magnetita con granulometría $>10\mu\text{m}$) o una cualidad ferrimagnética de los minerales, lo cual se originan cuando los subdominios magnéticos antiparalelos de la red tienen una magnetización desigual o cuando hay más de un tipo de subdominio que del otro, lo que disminuirían la intensidad de magnetización. Estos materiales poseen altas SM positivas y pueden adquirir

magnetismo remanente, generalmente se presentan en magnetita con granulometría $>10\mu\text{m}$ (Austin et al., 2013a; Dentith y Mudge, 2014). Otro factor importante sería la autodesmagnetización (*self-demagnetization*), que ocurre en minerales con SM alta ($>0,1$ SI), donde los campos de desmagnetización comienzan a tener un efecto de supresión importantes sobre la magnetización y, por lo tanto, sobre los campos externos observados (Austin et al., 2014). La autodesmagnetización puede conducir a la rotación del vector del campo magnético hacia el eje más largo de un cuerpo con forma de tubo, y hacia el plano de un cuerpo con forma de lámina, y también producir interacciones entre cuerpos magnéticos cercanos generando complejidad al momento de la modelación (Clark, 2000; Clark y Emerson, 1999; Clark y Schmidt, 1994; Gay, 1963; Gidley, 1988; Guo et al., 1998 2001; Hillan, 2013 a y b; Krahenbuhl y Li, 2007; Zietz y Henderson, 1956; Austin et al., 2014). Esta variación entre las señales magnéticas de los modelos geofísicos también podría atribuirse a hematitas con alta remanencia. En Austin et al. (2013a) se señala que láminas finas de magnetita dentro de los cuerpos de hematita también pueden causar un magnetismo muy extremo, y que según las mediciones realizadas en Schmidt et al. (2007) se propuso que los intercrecimientos finos de cantidades muy pequeñas de magnetita y/o maghemita dentro de un cuerpo de hematita de alto grado (>680 °C) fueron responsables de una alta coercitividad y magnetización remanente.

Todo lo anterior, indica que para una zona donde existe una alta SM, pero bajo MVI, hay tres factores, o combinación de éstos, que pueden explicar este fenómeno. El primero sería la presencia de una magnetización remanente de sentido contrario y una amplitud similar a una alta magnetización inducida (alta SM), que generaría una magnetización total baja (bajo MVI). Otro factor sería que exista una alta SM que genere un efecto de autodesmagnetización, lo que terminaría disminuyendo la magnetización total. Un tercer factor podría ser errores en el modelo de susceptibilidad. Bajo lo que señala Austin et al. (2014) para Candelaria y zonas adyacentes, es probable que las señales bajo MVI y alto SM observadas en Carola se deba mayoritariamente a efectos de desmagnetización,

que disminuirían la magnetización total y habrían generado complicaciones al momento de la modelación.

c) Zonas de alto MVI y baja SM

Se identificaron zonas donde el modelo de susceptibilidad muestra valores bajos, pero el modelo MVI presenta valores altos (ver fig. 6.10 y zonas indicadas con letras “c” en las figuras 6.10, 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, 6.16 y 6.17).

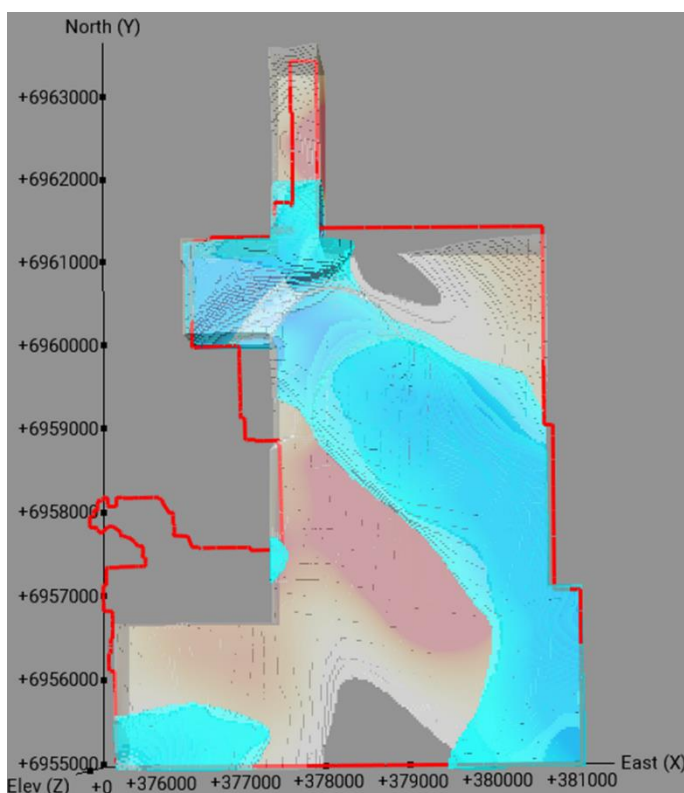


Figura 6.8. Vista en planta de los cuerpos 3-D definidos por bajos valores del modelo susceptibilidad magnética (celeste) ($<-0,007$ SI) y altos valores del modelo MVI (escala de blanco a anaranjado) ($>0,006$ SI). En líneas rojas se encuentra demarcada la concesión minera perteneciente a la SCM Carola (elaboración propia a través de plataforma Leapfrog Geo ©).

La presencia de un alto MVI y bajo SM se asocia a la presencia de un volumen con magnetización remanente de alta intensidad y sentido contrario al CMT, que además presenta una baja SM, indicando que la magnetización total estaría

controlada por la magnetización remanente. Los altos valores MVI y baja SM se podrían asociar a la presencia de hematita con alta remanencia, típico de los sistemas IOCG, como señala Austin et al. (2013a). La génesis de hematita se puede asociar a eventos térmicos y metasomáticos, que ante la presencia de sulfuros de Fe (pirita, pirrotina) se transformaron a óxidos de hierro (magnetita, hematita) en un entorno rico en oxígeno y calor (Austin et al., 2013a). Los óxidos de hierro también pueden reemplazar a otros óxidos, como ocurre con la magnetita, que en condiciones oxidantes/ácidas puede formar martita (hematita en reemplazo de magnetita) (Clark, 2014). Otro factor que podría explicar estas zonas son la limitación que tienen los algoritmos que solo modelan la SM, ya que asumen que la magnetización total es paralela a la dirección del CMT. Cuando se presentan anomalías magnéticas generadas por cuerpos con magnetización total en dirección opuesta al CMT, los algoritmos generan zonas de alta y baja SM en lugares erróneos, por lo que, para este caso, las zonas bajas de SM podrían ser un mecanismo para explicar anomalías que salen del supuesto asumido por el código de inversión. Para el sector de Carola, los dos factores mencionados podrían ser causal del fenómeno de alto MVI y baja SM, pero el más consistente, en vista que no hay evidencia de grandes zonaciones de hematita en profundidad que se indiquen para el área, sería mayoritariamente producto de un error del algoritmo en zonas que presentan un alto magnetismo remanente. La presencia de hematitas con alta remanencia es también válida, pero sería un factor considerable en áreas más acotadas, o donde se tenga mayor certeza sobre su presencia.

6.3.2 Distribución de unidades geológicas

a) Áreas con mayor información geológica disponible

Bajo las concesiones mineras de SCM Carola estudiadas, las áreas con más información geológica disponible se encuentran en la parte occidental (ver fig. 6.9). En esta zona se localiza la mayoría de los sondajes perforados, los cuales son la fuente de información litológica y mineralógica en profundidad, que permite generar una

correlación fundamentada entre los valores de los modelos geofísicos (MVI y susceptibilidad) y las litologías presentes.

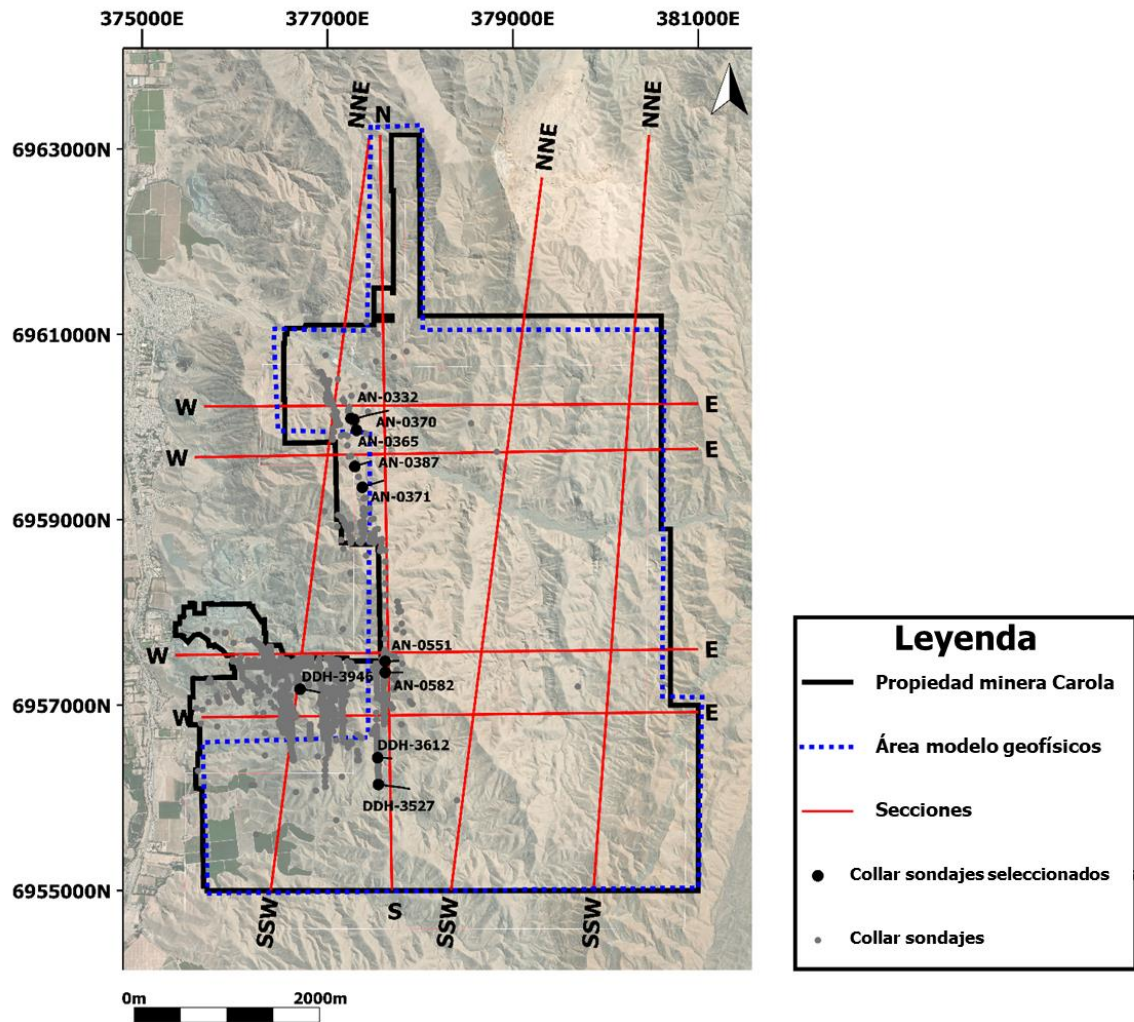


Figura 6.9. Mapa con la traza de los sondajes estudiados y el total de sondajes realizados en mina Carola. En negro se presenta la envolvente de las concesiones de SCM Carola, en líneas punteadas azules el área cubierta por las mediciones magnéticas realizadas por la empresa geofísica Southernrock y en líneas rojas la traza de las secciones realizadas, junto con el nombre de la figura correspondiente a cada sección. (Elaboración propia, utilizando software Leapfrog Geo ©).

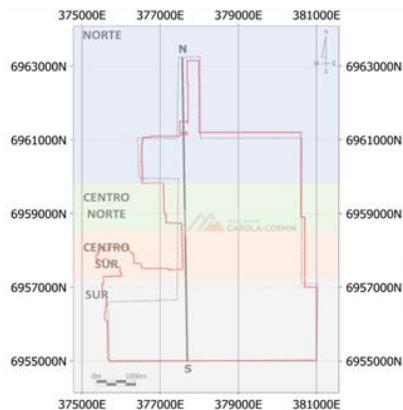
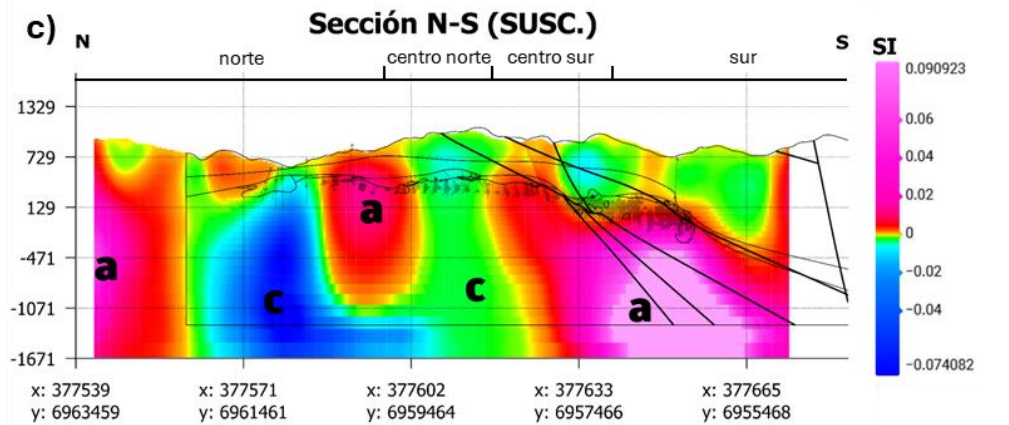
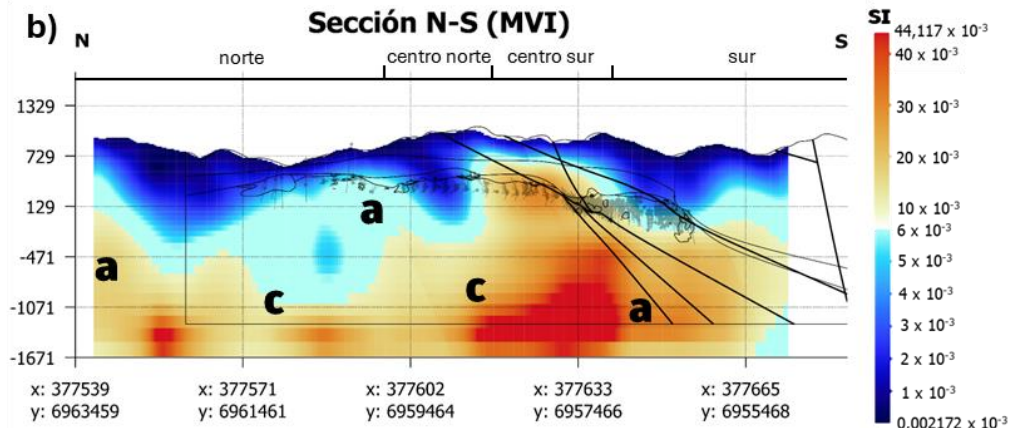
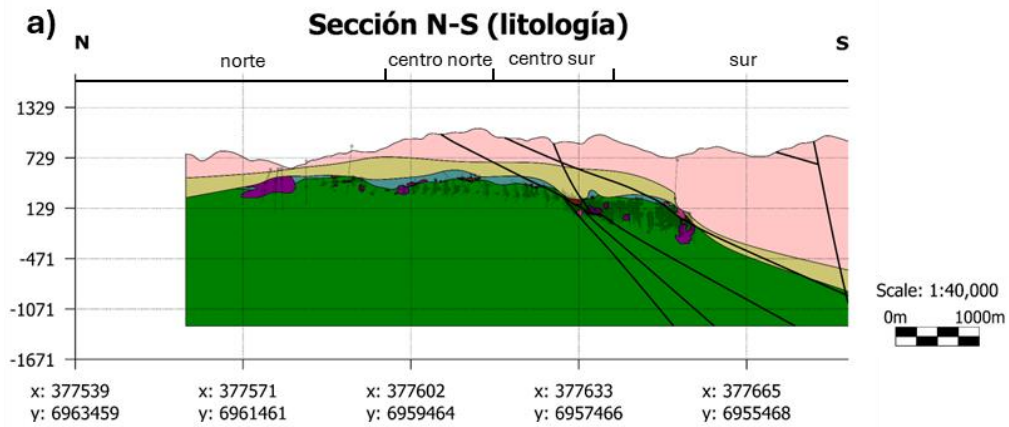
Las figuras 6.10 y 6.11 muestran secciones de litología (unidades geológicas), modelo MVI y modelo de susceptibilidad para perfiles de rumbo N-S y NNE-SSW,

respectivamente. Estos perfiles atraviesan las zonas con mayor densidad de sondajes de SCM Carola. Las Andesitas Inferiores y el Albitófiro tienden a ubicarse en zonas con valores altos de MVI ($>0,006$ SI, escala de colores blanco a anaranjado en los paneles b de cada figura). Cabe notar que ambas litologías se distinguen también por tener los valores más altos de SM medida (fig. 5.2). Por el contrario, se aprecia que valores bajos de MVI ($<0,006$ SI, escala de colores azules en los paneles b de cada figura) se correlacionan con las calizas margosas (cm), brecha volcanosedimentaria (BrVs) y Tobas de Agustina (TA), lo cual es consistente con los valores bajos de SM medidas en estas unidades (fig. 5.2). Para los perfiles del modelo de susceptibilidad (figs. 6.10c y 6.11c), se aprecian zonas con valores de SM bajas ($<-0,007$ SI, escala de colores de azul a celeste), intermedias ($-0,007$ a $0,004$ SI, escala de colores de verdes a anaranjado) y altas ($>0,004$ SI, escala de colores rojo a rosado). Las Andesitas Inferiores y el Albitófiro se presentan en zonas con valores positivos y negativos de SM, pero en comparación a las unidades estériles son las que mayor presencia tienen hacia valores altos de SM ($>0,004$ SI). Las unidades estériles, en general, se mueven en valores intermedios ($-0,007$ a $0,004$ SI, escala de colores verdes a anaranjado) y bajos de SM ($<-0,007$ SI).

Al comparar la distribución de litologías y los valores en los perfiles del modelo MVI y SM de las figuras 6.10 y 6.11, se observa que la distribución de los valores del modelo MVI, en comparación al modelo de SM, es correlacionable a la estratigrafía del área de estudio, por lo que sería más asertivo al momento de distinguir las unidades litológicas que albergan mineralización de las estériles. Para el modelo SM existe una gran variación de valores para todas las litologías presentes, lo que hace más confuso el distinguir las unidades mineralizadas de las estériles sobre todo si no se cuenta con información previa de la distribución de la geología local. Esto indicaría que el modelo más adecuado sería el de MVI.

En cuanto a las fallas, el modelo MVI y el modelo SM son consistentes con la ubicación de estas estructuras, indicándolas con valores altos ($>0,006$ SI para el modelo MVI, y $>$

0,004 SI para el modelo SM). La única diferencia entre ambos modelos y las zonas de falla es que el modelo SM tiende a presentar una tendencia hacia valores altos en zonas de falla, donde valores altos de SM tienen unas morfologías similares a la orientación de las fallas presentes (figs. 6.10c y 6.11c).



LEYENDA

- Calizas margosas (cm)
- Brecha volcanosedimentaria (BrVs)
- Tobas de Agustina (TA)
- Microdiortias cuarcíferas
- Sedimentos rojos brechizados (SR)
- Albitófiro
- Andesitas inferiores (Kpcli)

SIMBOLOGÍA

- Collar sondaje
- Falla
- Contacto litológico
- a** Zona de alto MVI y alta SM
- b** Zona de bajo MVI y alta SM
- c** Zona de alto MVI y baja SM

Figura 6.10. Secciones N-S del área con mayor densidad de sondajes de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (Susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de Susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia a través de la plataforma Leapfrog Geo ©).

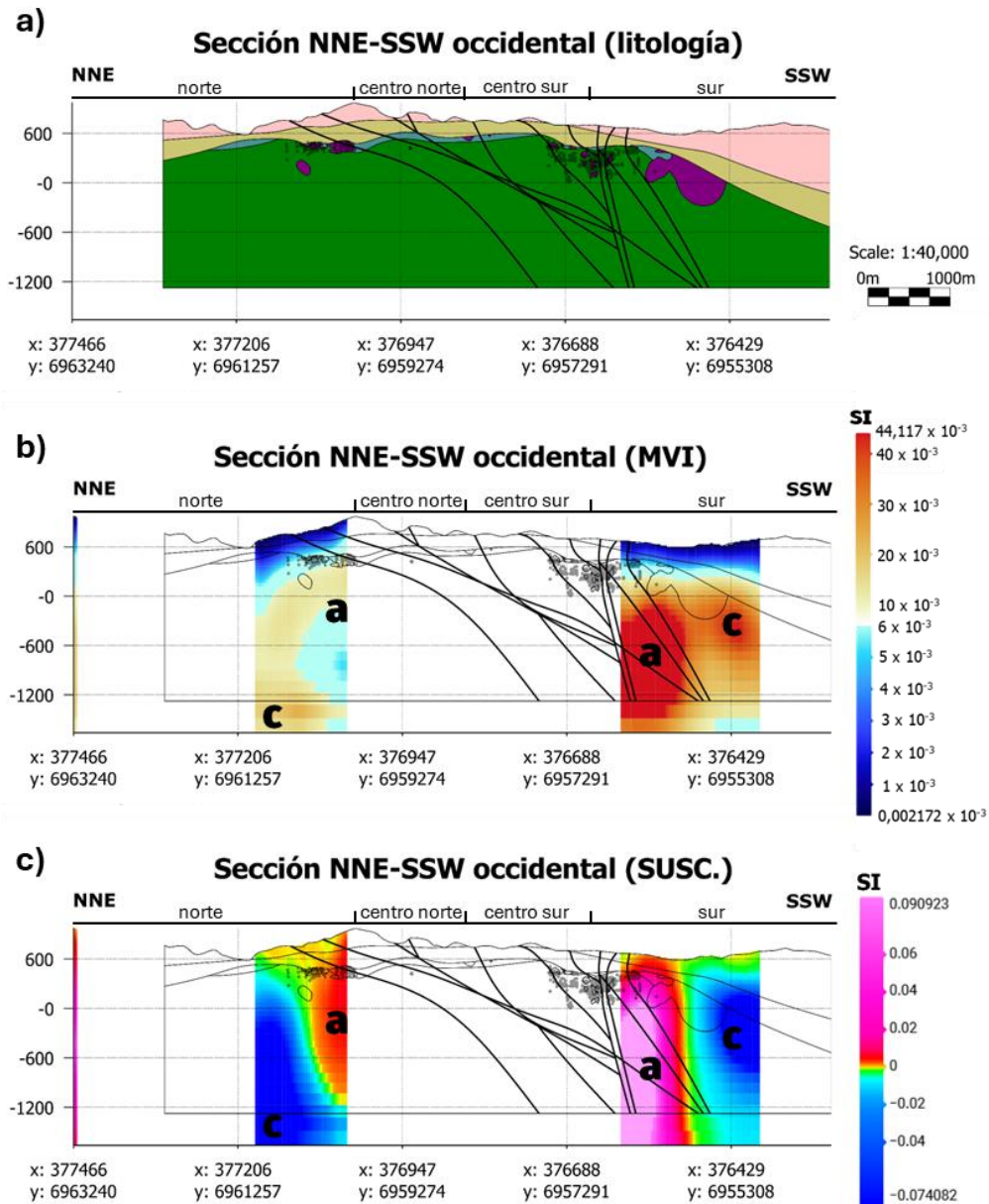




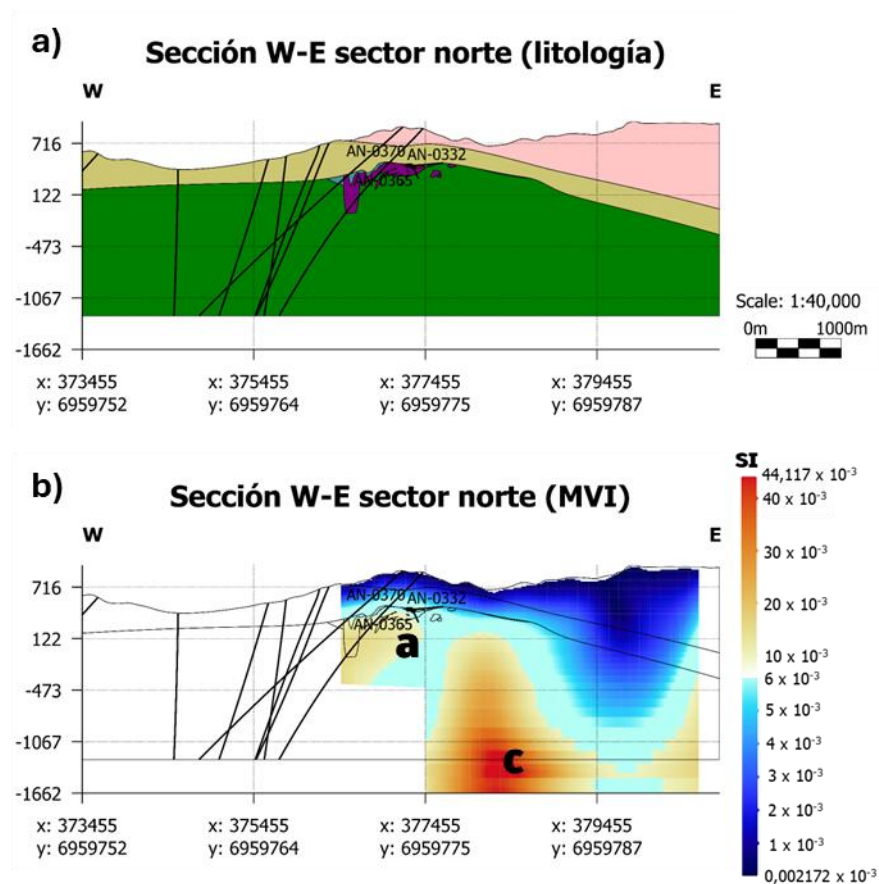
Figura 6.11. Secciones NNE-SSW del área occidental de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (Susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de Susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia utilizando software Leapfrog Geo ©).

b) Áreas con poca o nula información geológica disponible

En base a las interpretaciones realizadas para las áreas con más información geológica disponible, se analizaron las áreas donde se disponía de menor información (81% del área de las concesiones de SCM Carola). Para el área que abarca la concesión unificada de SCM Carola, se realizaron 4 secciones W-E para los distintos sectores (sector norte, centro-norte, centro-sur y sur; figuras 6.12 – 6.15). Además, se realizaron 2 secciones NNE-SSW para el área oriental de la concesión (figuras 6.16 y 6.17), donde la información geológica proveniente de sondajes exploratorios es mínima o prácticamente nula. En la zona oriental se tiene una densidad de sondajes muy reducida, por lo que la modelación geológica de esta zona está escasamente verificada y por lo tanto tiene mayor incertidumbre. De las secciones realizadas en estos sectores, se destaca que:

- Para el modelo MVI las unidades de Andesitas Inferiores y Albitófiro se distribuyen en valores altos de MVI ($>0,006$ SI) (figs. 6.12b, 6.13b, 6.14b, 6.15b, 6.16b y 6.17b).
- Para el modelo de susceptibilidad, las unidades de Andesitas Inferiores y Albitófiro se mueven hacia valores altos ($>0,004$ SI), intermedios ($-0,007$ a $0,004$ SI) y bajos ($<-0,007$ SI) de SM (figs. 6.12c, 6.13c, 6.14c, 6.15c, 6.16c y 6.17c).

- El modelo MVI es el más asertivo para diferenciar las unidades mineralizadas de las estériles, e identificar la distribución de las diversas litologías. Además, en algunos sectores más orientales del área, donde se tiene poca o ninguna información de sondajes, la distribución de las Andesitas Inferiores en la sección de litología no es congruente con los valores MVI que se asumen para esta unidad (figs. 6.12b, 6.13b y 6.17b), lo que señalaría un error en la distribución de las Andesitas Inferiores en el modelo geológico para las áreas más orientales.
- Con relación a las fallas, en general, los modelos MVI y susceptibilidad indican dichas zonas con valores altos ($>0,006$ SI para el modelo MVI, y $>0,004$ SI para el modelo SM), con la diferencia que el modelo SM tiene una tendencia a presentar valores más altos con una orientación similar a las zonas de fallas presentes (figs. 6.12c, 6.14c, 6.15c y 6.17c).



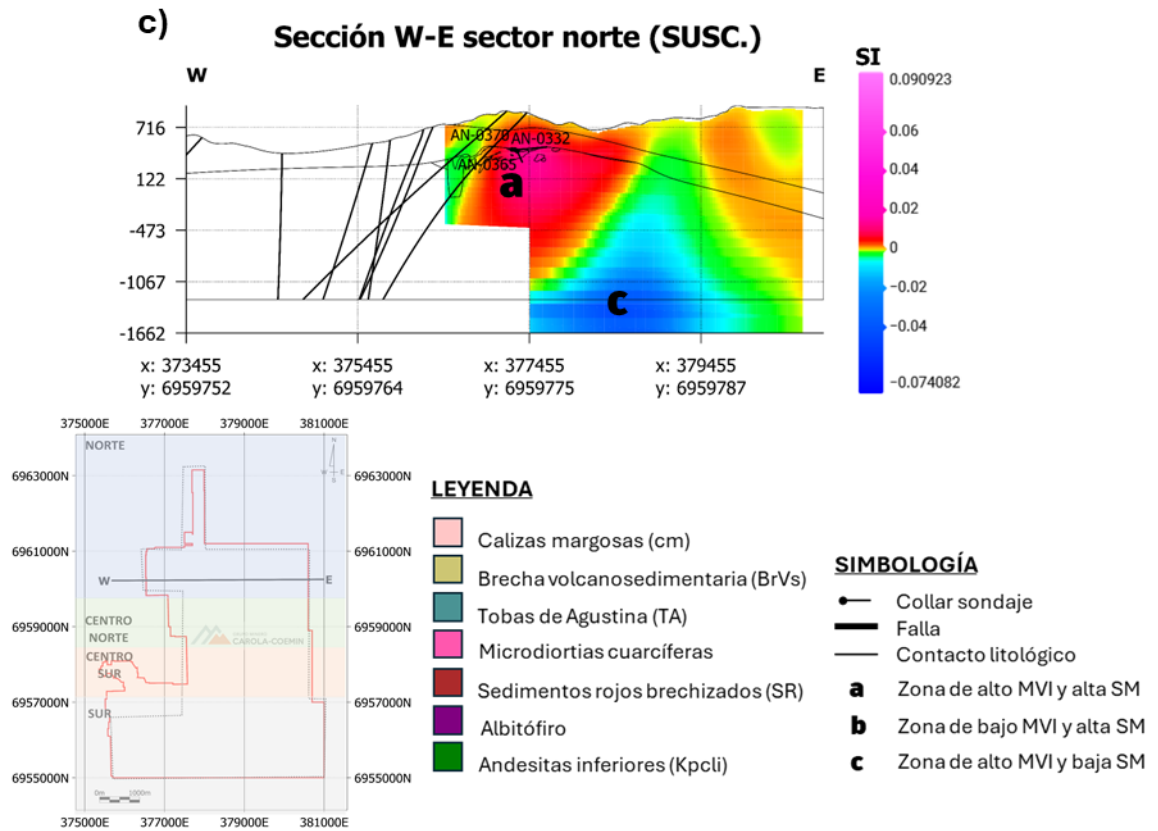
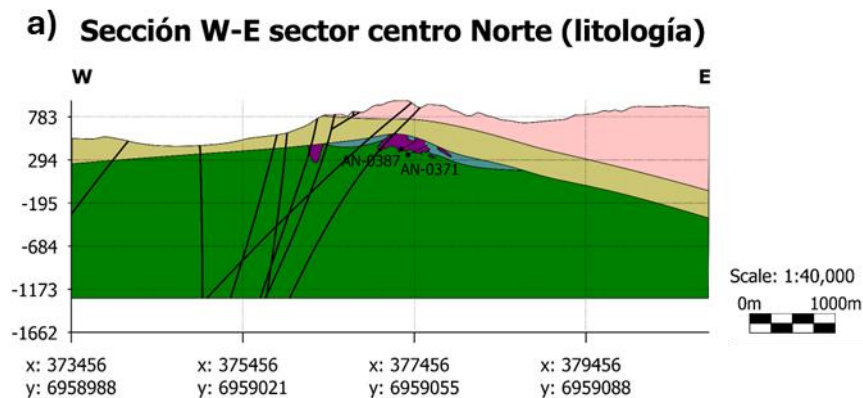


Figura 6.12. Secciones W-E del sector norte de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia utilizando software Leapfrog Geo ©).



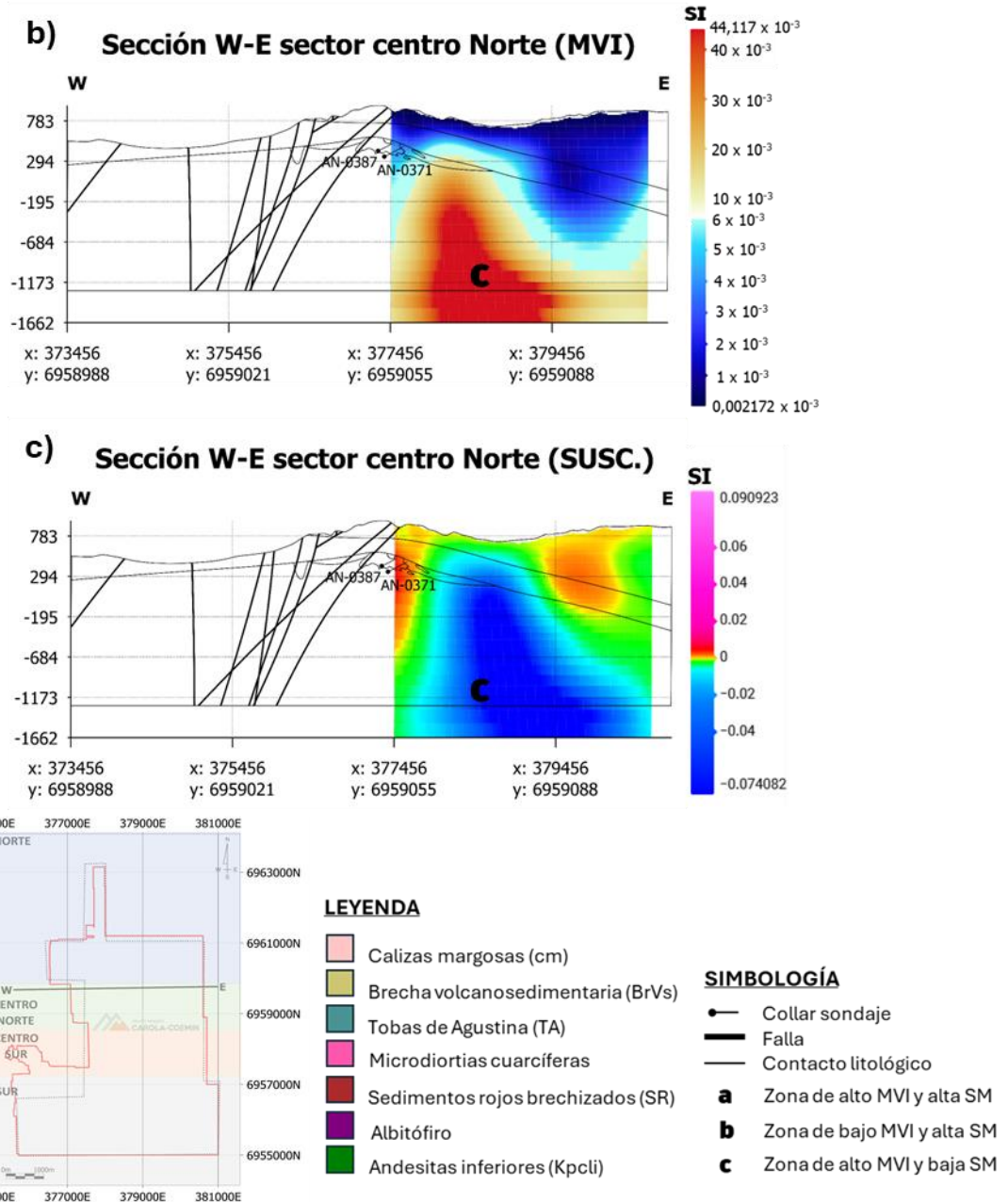
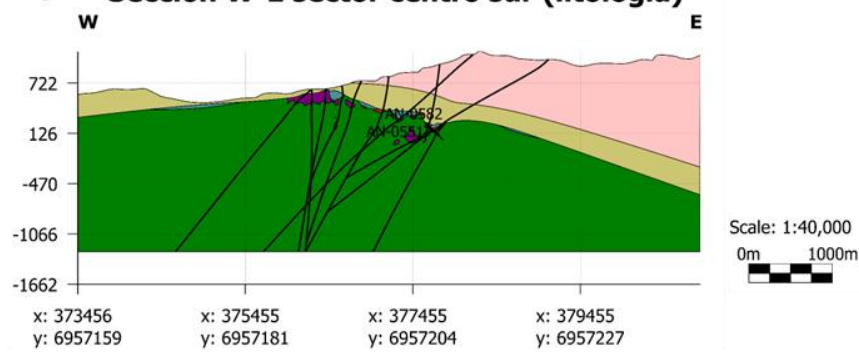
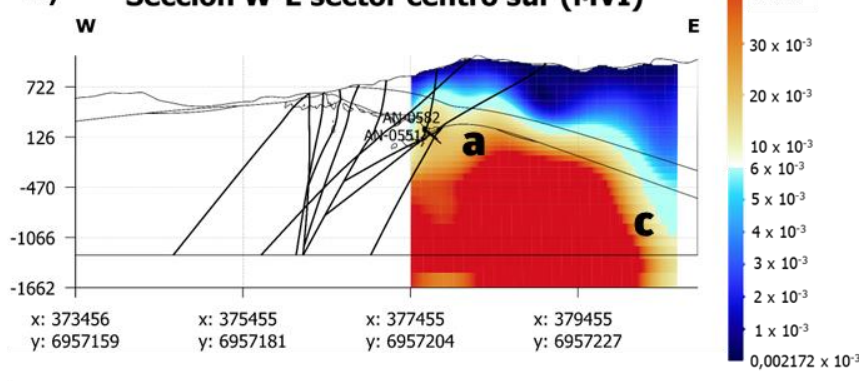


Figura 6.13. Secciones W-E del sector centro-norte de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia utilizando software Leapfrog Geo ©).

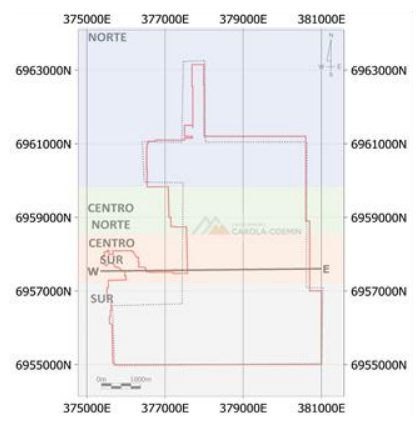
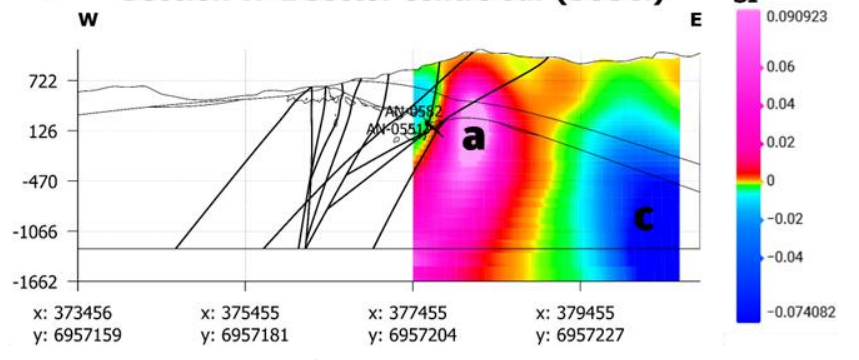
a) Sección W-E sector centro sur (litología)



b) Sección W-E sector centro sur (MVI)



c) Sección W-E sector centro sur (SUSC.)



LEYENDA

- Calizas margosas (cm)
- Brecha volcanosedimentaria (BrVs)
- Tobas de Agustina (TA)
- Microdiortias cuarcíferas
- Sedimentos rojos brechizados (SR)
- Albitófiro
- Andesitas inferiores (Kpcli)

SIMBOLOGÍA

- Collar sondaje
- Falla
- Contacto litológico
- a** Zona de alto MVI y alta SM
- b** Zona de bajo MVI y alta SM
- c** Zona de alto MVI y baja SM

Figura 6.14. Secciones W-E del sector centro sur de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (Susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de Susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia a través de la plataforma Leapfrog Geo ©).

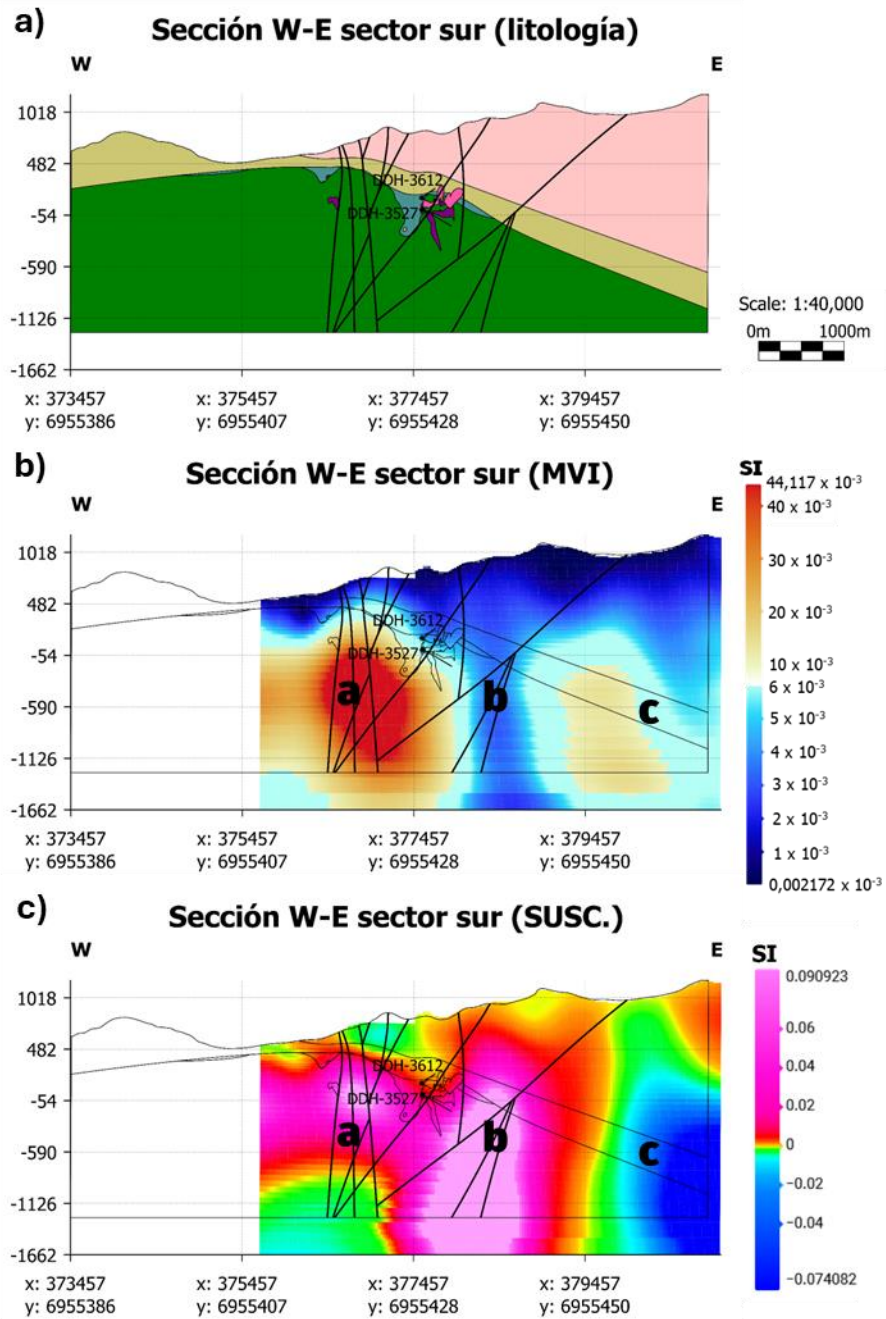
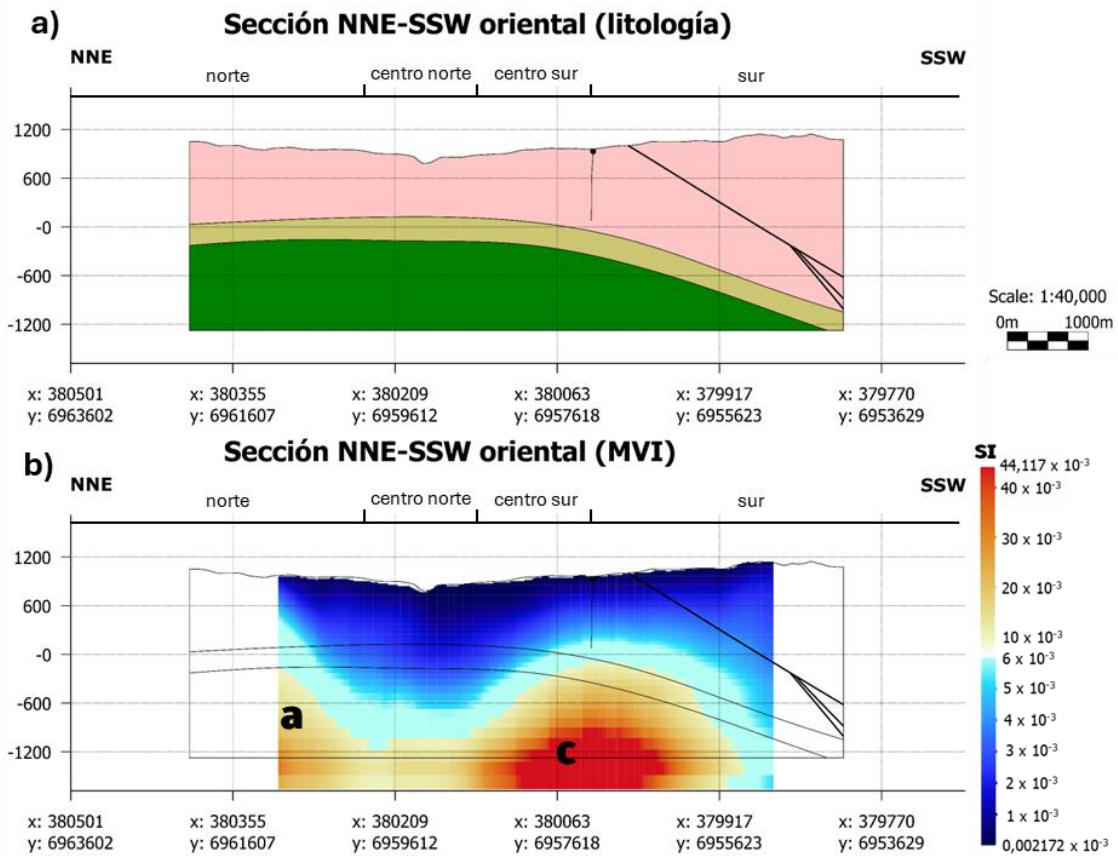




Figura 6.15. Secciones W-E del sector sur de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (Susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de Susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia a través de la plataforma Leapfrog Geo ©).



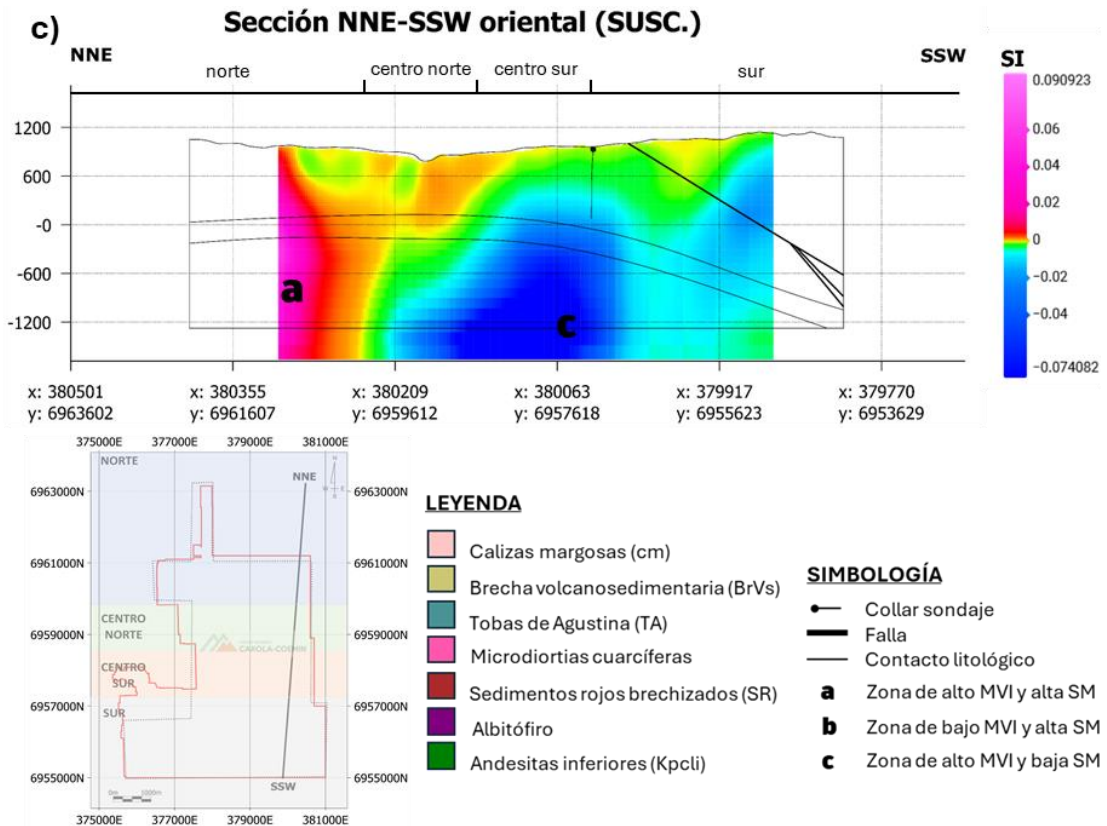
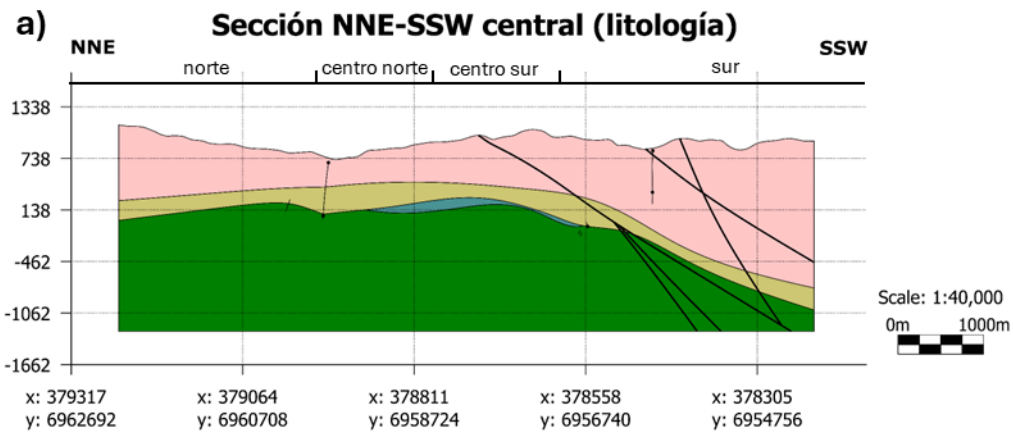


Figura 6.16. Secciones NNE-SSW del área oriental de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (Susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de Susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia a través de la plataforma Leapfrog Geo ©).



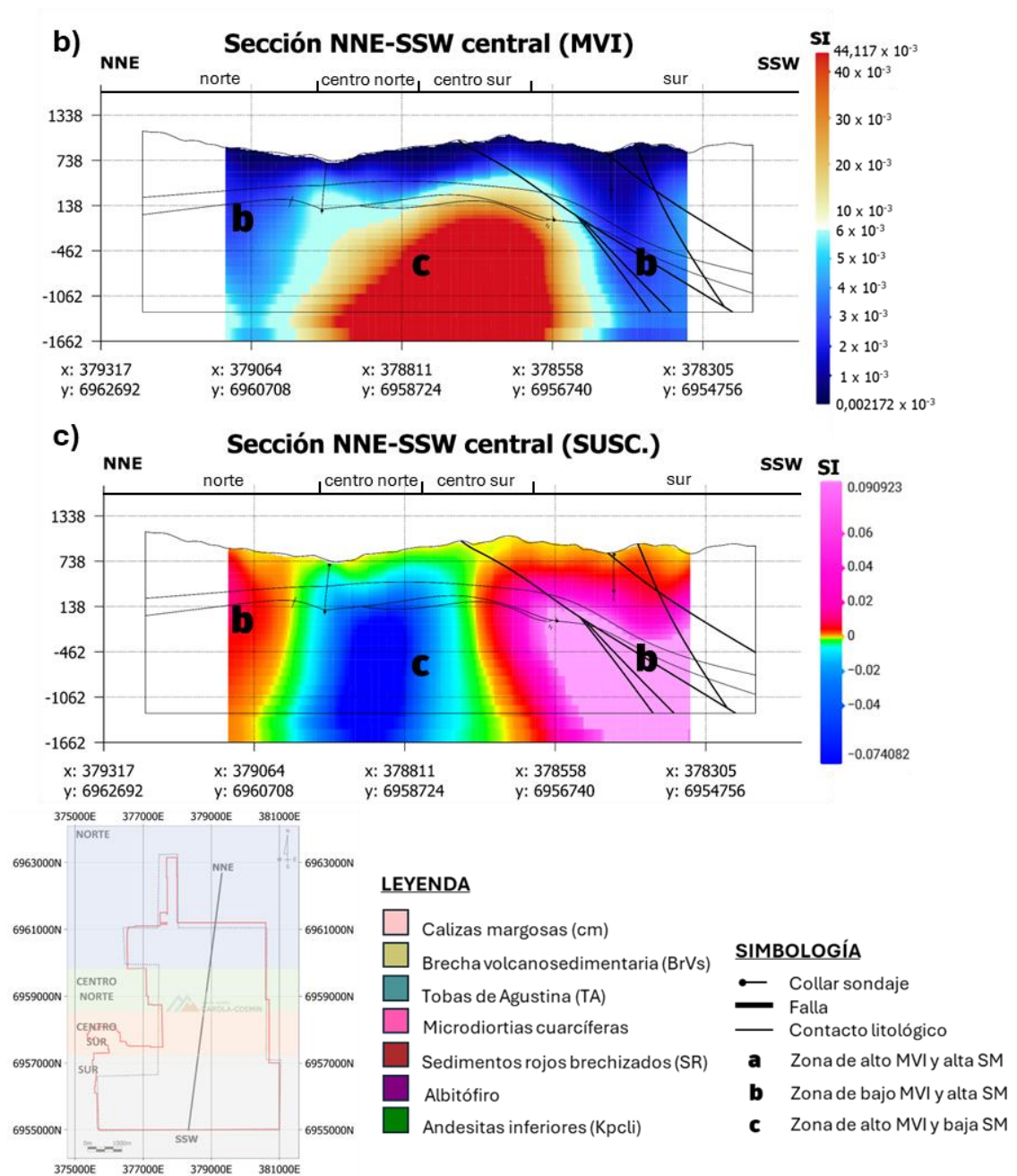


Figura 6.17. Secciones NNE-SSW del área central de SCM Carola, las cuales comparan su modelo geológico y modelos geofísicos (Susceptibilidad y MVI). Se presentan: a) Modelo geológico, b) Modelo MVI y c) Modelo de Susceptibilidad. En la parte inferior de la figura se indica la ubicación de la línea de perfil de las secciones (elaboración propia a través de la plataforma Leapfrog Geo ©).

6.4 Zonas de interés exploratorio

La tabla 6.1 resume la explicación magnética y geológica de las diferentes combinaciones de valores de MVI y SM (alto MVI y alta SM, bajo MVI y alta SM, alto MVI y baja SM) presentados anteriormente.

Tabla 6.1. Tabla resumen de la explicación magnética y geológica de las combinaciones de valores del modelo MVI y susceptibilidad (elaboración propia mediante software Excel ©).

MVI	SM	Explicación magnética	Explicación geológica
Alta	Alta	Alta magnetización inducida, donde la magnetización remanente puede ser baja o ser paralela al CMT	Probabilidad de que exista un alto contenido de magnetita, lo cual indicaría una zona favorable para que exista mineralización de cobre
Baja	Alta	Solo alta magnetización remanente	Posible presencia de magnetita o hematita con remanencia. Menor certeza en la posibilidad de existencia de mineralización de cobre
Alta	Baja	Presencia de autodesmagnetización y/o zonas no bien modeladas por el algoritmo de inversión de susceptibilidad convencional	Combinación con mayor incertidumbre. Se tienen 2 explicaciones posibles: 1. Zonas con bajo contenido de magnetita que ha sido mal interpretado por el algoritmo de inversión de SM 2. Posible presencia de magnetita, la cual ha sido afectada por fenómenos de autodesmagnetización, como los que han sido documentados en sectores de Candelaria por Austin et al. (2014)
Baja	Baja	Baja magnetización total	Probabilidad de una baja existencia de magnetita, lo cual indica una zona no favorable para la presencia de mineralización de cobre + magnetita

Las zonas de interés para la continuidad de etapas exploratorias serían las que indican una alta susceptibilidad modelada y alta pseudo susceptibilidad MVI (fig. 6.6), las cuales están representadas por cuerpos al sur, centro sur y norte de la concesión (A, B, C, D y E) (fig. 6.18), que indicarían una presencia de magnetita importante potencialmente correlacionable con el conjunto mineral primario formado por calcopirita, pirita, y magnetita, y con la presencia de fallas en profundidad que controlarían dicha mineralización. La mineralización de mayor importancia sería la calcopirita, la cual aparece en conjunto con la magnetita y representa la principal mena de cobre en el distrito.

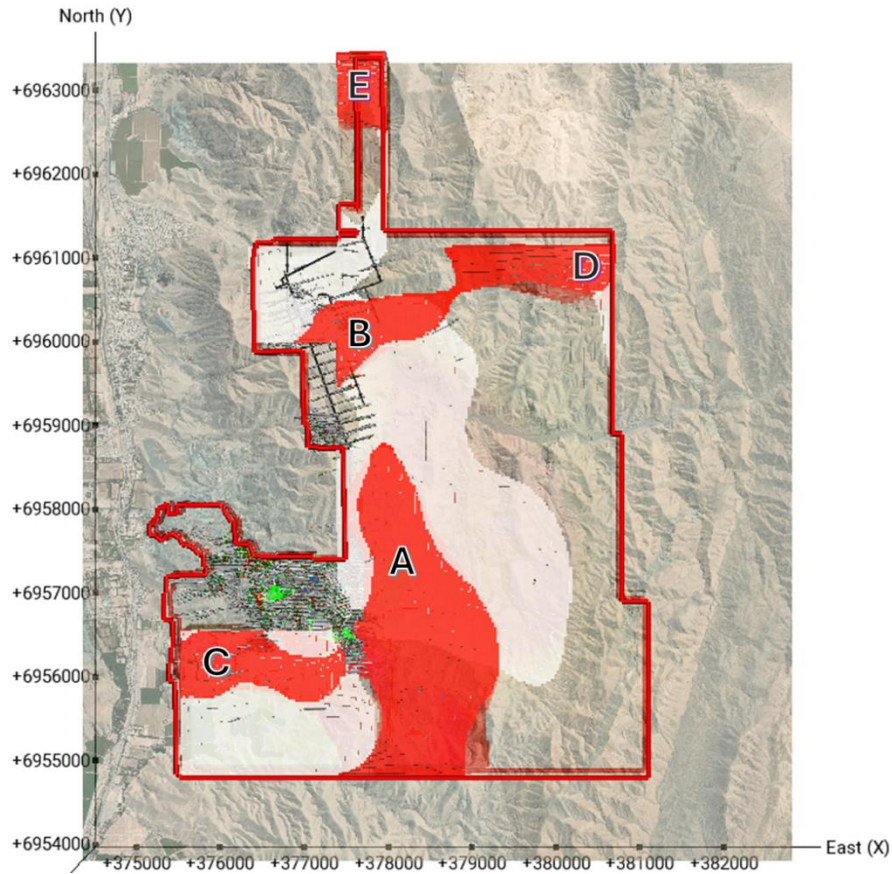


Figura 6.18. Vista en planta de la proyección de los cuerpos 3-D definidos por valores altos del modelo MVI y susceptibilidad. Se superponen la imagen satelital, túneles de la mina y sondajes perforados. Cada cuerpo de interés con alta susceptibilidad MVI y susceptibilidad magnética se indica con una letra diferente. En líneas rojas se encuentra demarcada la concesión minera perteneciente a la SCM Carola (elaboración propia mediante software Leapfrog Geo ©).

Como se muestra en las diferentes secciones presentadas, los cuerpos de alta susceptibilidad MVI son un buen indicador de las unidades geológicas mineralizadas (Andesitas Inferiores y Albitófiro) (figs. 6.10b, 6.11b, 6.12b, 6.13b, 6.14b, 6.15b, 6.16b y 6.17b) y los cuerpos de alta SM modelada presentan una relación directa con las fallas mayores que controla la mineralización en la mina (figs. 6.10c, 6.11c, 6.12c, 6.14c, 6.15c y 6.17c). Se propone realizar sondajes exploratorios en dirección a zonas de alta susceptibilidad MVI y alta susceptibilidad modelada, que crucen fallas principales que controlan la mineralización de la mina y que se ubiquen dentro de las principales unidades

geológicas que albergan la mineralización de mena (Andesitas Inferiores y Albitófiro), las cuales están indicadas por el modelo MVI.

Basado en los diferentes cuerpos de alta susceptibilidad magnética mencionados previamente se propone cinco zonas de interés que tendrían el potencial de albergar mineralización de interés económico. Se presenta una tabla de prioridad (tabla 6.2) que categoriza los cuerpos según importancia, relevancia de exploración e indica factores importantes a considerar para sondearlas. Se proponen 9 sondajes tentativos para explorar las zonas de interés (figs. 6.19 y 6.20), cada uno elaborado según las recomendaciones presentadas en la tabla 6.1. Todos los sondajes poseen 800 metros de profundidad (tabla 6.2), lo que se traduce en un total de 7200 metros de perforación. El manto de cada sondaje es de -70° , a excepción de los sondajes SE_GF_003 y SE_GF_008 que se planifica con un manto de -75° (tabla 6.2). El azimuth varía según las estructuras de interés y la ubicación de las zonas de alta SM que se encuentran dentro de las zonas de alto MVI. Para la zona A, debido a su cercanía a las obras actuales de la mina y su gran magnitud, se recomienda un total de 3 sondajes. Para las zonas B y D se recomiendan 2 sondajes en cada una, y para las zonas C y E solo un sondaje (figs. 6.19, 6.20 y tabla 6.3). Los sondajes recomendados para las zonas A y B poseen una ubicación relativa relacionada con fallas principales que controlan la mineralización en la mina, y algunas fallas secundarias (fig. 6.20). El sondaje propuesto para la zona C posee una ubicación relativa relacionada a una falla secundaria presente. Finalmente, los sondajes para las zonas D y E, debido a que se encuentran en zonas menos exploradas y no existe información de estructuras importantes, se orientan principalmente hacia zonas donde se cumplen las condiciones de alto MVI y alta SM, donde logísticamente se hace más rentable la operación.

Tabla 6.2. Tabla con zonas de interés recomendadas. Se indica su prioridad, observaciones y recomendaciones ante una tentativa etapa de exploración (elaboración propia mediante software Excel ©).

TABLA DE PRIORIDAD		
Prioridad	Cuerpo	Observaciones
1	A	•Cuerpo de gran magnitud cercano, y relacionado, con la obra actual de la mina
		• Extensión del cuerpo en profundidad va desde la cota 800 - 400 (techo) hasta la cota -1600 (base)
		•Sondajes cercanos y dentro del cuerpo indican mineralización importante en el área
		•Fallas principales que controlan la mineralización de la mina cruzan esta zona
		•Presencia de caminos rurales preexistentes que facilitarían el acceso y logística ante una etapa exploratoria
		•Se recomienda realizar sondajes de superficie en zonas no exploradas que cumplan los siguientes criterios:
		1.Estén dirección a las zonas de alta susceptibilidad
		2.Se orienten hacia zonas con mineralización de cobre, indicado por sondajes cercanos previos.
		3.La trayectoria de los sondajes corte las fallas principales que controlan la mineralización
2	B	•Cuerpo cercano a obras previas de la mina (Quebrada de Meléndez)
		• Extensión del cuerpo en profundidad va desde la cota 650 (techo) hasta la cota -100 (base)
		•Sondajes previos indican presencia de mineralización de cobre en el área
		•Continuidad de etapa de explotación está orientada hacia este sector
		•Presencia de caminos rurales preexistentes que facilitarían el acceso y logística ante una etapa exploratoria
		•Se recomiendan sondajes de superficie en zonas no exploradas que cumplan el siguiente criterio:
		1.Se ubiquen en el extremo derecho del cuerpo
		2.Se orienten con dirección a zonas con valores altos de SM y MVI para evaluar la continuidad de mineralización de cobre
		3.Corten la falla principal que controla la mineralización en ese sector
3	C	•Cuerpo cercano a la obra actual de la mina
		•Extensión del cuerpo en profundidad va desde la cota 700 (techo) hasta la cota -1600 (base)
		•Escasos sondajes de exploración cercanos
		•Presencia de caminos rurales preexistentes que facilitarían el acceso y logística ante una etapa exploratoria
		•Se recomienda:
		1.Realizar sondajes de superficie hacia zonas con valores altos de SM y MVI
4	D	•Cuerpo de magnitud importante en la zona nor-oriental de la concesión
		• Extensión del cuerpo en profundidad va desde la cota 750 (techo) hasta la cota -1600 (base)
		•No presenta información de exploración previa,
		•Presencia de caminos rurales preexistentes que facilitarían el acceso y logística ante una etapa exploratoria
		•La continuidad del cuerpo podría extenderse hacia zonas no pertenecientes a la concesión
		•Se recomienda:
		1.Realizar sondajes de superficie hacia zonas con valores altos de SM y MVI
5	E	•Cuerpo en el límite norte de la concesión
		• Extension del cuerpo en profundidad va desde la cota 850 (techo) hasta la cota -1600 (base)
		•La continuidad del cuerpo se extiende a zonas no pertenecientes a la concesión
		•No presenta información de exploración previa
		•Presencia de caminos rurales preexistentes que facilitarían el acceso y logística ante una etapa exploratoria
		•Se recomienda:
		1.Realizar sondaje de superficie hacia el zonas con valores altos de SM y MVI (implica negociaciones con los dueños de la concesión contigua)

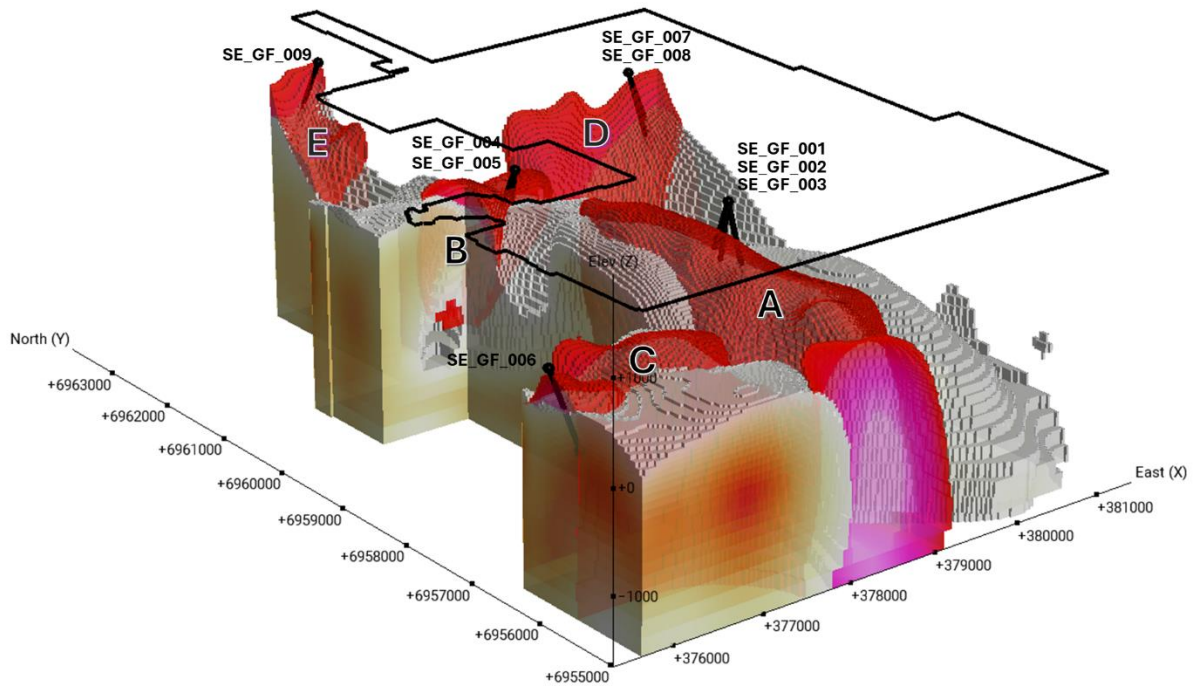


Figura 6.19. Vista 3-D (hacia el NE) del cuerpo definido por altos valores del modelo de susceptibilidad magnética, indicando los collares y trayectoria de los sondajes propuestos para explorar cada cuerpo de interés. Cada zona de interés se diferencia con una letra distinta (A, B, C, D y E) y los nombres de los sondajes se ubican en la parte superior de cada collar. En líneas rojas se encuentra demarcada la concesión minera perteneciente a la SCM Carola (elaboración propia mediante software Leapfrog Geo ©).

Tabla 6.3. Tabla con información sobre los sondeos de exploración propuestos para cada zona de alta susceptibilidad magnética y alto MVI (elaboración propia mediante software Excel ©).

ZONA	ID SONDAJE	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN (m.s.n.m.)	AZIMUTH	MANTEO	LARGO (m)	OBJETIVOS
A	SE_GF_001	378574.55	6957402.53	1068.039	180.0	70.0	800	<ul style="list-style-type: none"> Intersecar la falla Veta Isabel a los 550 metros de profundidad. Entrar en zona de alto MVI y alta SM a los 600 metros de profundidad.
	SE_GF_002	378574.55	6957402.53	1068.039	240.0	70.0	800	<ul style="list-style-type: none"> Intersecar la falla Veta Isabel a los 420 metros de profundidad. Entrar en zona de alto MVI y alta SM a los 535 metros de profundidad.
	SE_GF_003	378574.55	6957402.53	1068.039	320.0	75.0	800	<ul style="list-style-type: none"> Intersecar las fallas Cpo 910B y Adriana Oriental a los 440 metros de profundidad. Entrar en zona de alto MVI y alta SM a los 500 metros de profundidad.
B	SE_GF_004	378124.41	6960041.21	705.119	330.0	70.0	800	<ul style="list-style-type: none"> Intersecar la falla Cecilia a los 120 metros de profundidad. Entrar en zona de alto MVI y alta SM a los 425 metros de profundidad.
	SE_GF_005	378124.41	6960041.21	705.119	20.0	70.0	800	<ul style="list-style-type: none"> Intersecar la falla Cecilia a los 300 metros de profundidad. Entrar en zona de alto MVI y alta SM a los 425 metros de profundidad.
C	SE_GF_006	375662.13	6956250.7	106.803	140.0	70.0	800	<ul style="list-style-type: none"> Intersecar la falla Dique NE Central a los 225 metros de profundidad. Entrar en zona de alto MVI y alta SM a los 400 metros de profundidad.
D	SE_GF_007	380264.43	6961030.39	957.003	100.0	70.0	800	<ul style="list-style-type: none"> Entrar en zona de alto MVI y alta susceptibilidad magnética a los 520 metros de profundidad.
	SE_GF_008	380264.43	6961030.39	957.003	140.0	75.0	800	<ul style="list-style-type: none"> Entrar en zona de alto MVI y alta SM a los 600 metros de profundidad.
E	SE_GF_009	377981.94	6963138.73	975.513	300.0	70.0	800	<ul style="list-style-type: none"> Entrar en zona de alto MVI y alta SM a los 410 metros de profundidad.

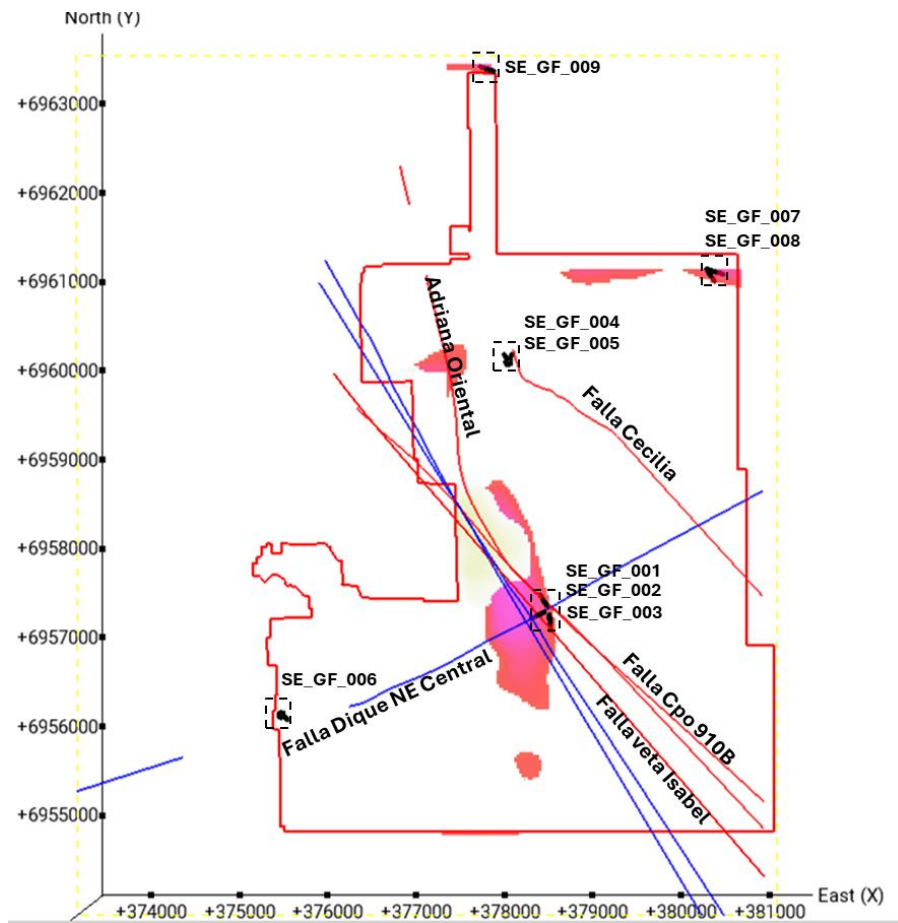


Figura 6.20. Imagen en planta de sondajes recomendados para la campaña de exploración, junto con fallas principales (que controlan mineralización) en rojo y secundarias en azul. Se indican el nombre de las fallas principales, nombre y ubicación de los sondajes, y el área de concesión minera de la SCM Carola contorneada en color rojo (elaboración propia a través de la plataforma Leapfrog Geo ©).

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

En base a la caracterización de las unidades geológica mediante la medición de susceptibilidad magnética de tramos de sondajes, junto con el análisis de los modelos de inversión de susceptibilidad magnética convencional y de la magnitud del vector de magnetización (MVI), y el modelo geológico de mina Carola, se concluye que las Andesitas Inferiores destacan por presentar un 51% de sus valores en rangos de susceptibilidad magnética medida $>0,1$ SI, con un valor promedio de $\sim 0,1$ SI, junto con una distribución espacial correlacionada con los valores más altos del modelo MVI ($>0,006$ SI), y una presencia continua hacia zonas con los valores más altos del modelo de susceptibilidad ($>0,004$ SI). El Albitófiro presenta mayormente valores moderados a altos de susceptibilidad ($>0,03$ SI), y una distribución espacial que se correlaciona con los valores más altos del modelo MVI ($>0,006$ SI) y presencia en zonas con altos valores del modelo de susceptibilidad ($>0,004$ SI). Las unidades restantes presentan valores bajos de susceptibilidad ($<0,03$ SI), su distribución espacial se relaciona con los valores bajos del modelo MVI ($<0,006$ SI) y presencia en zonas con valores intermedios y bajos del modelo de susceptibilidad ($<0,004$ SI).

Bajo las diferentes combinaciones de valores presentes entre los modelos geofísicos (alto MVI y baja SM, bajo MVI y alta SM, alto MVI y baja SM), y las secciones generadas con el modelo geológico de mina Carola, junto con los modelos geofísicos, se identifica una relación estrecha entre la distribución de los altos valores MVI y la unidad de Andesitas Inferiores. Además, se observa que los altos valores del modelo de susceptibilidad coinciden espacialmente con la presencia de fallas que controlan la mineralización en la mina.

De la comparación entre los valores de susceptibilidad magnética medidos y parámetros geológicos y geoquímicos, se identificaron algunas correlaciones. Se observó una relación débilmente proporcional entre los valores de susceptibilidad magnética medidos y los contenidos de cobre. Para leyes $>0,8$ % Cu se observan susceptibilidades magnéticas $>0,01$ SI, y además el aumento de las leyes se correlaciona con el aumento de los valores de susceptibilidad magnética, llegando a presentarse valores de susceptibilidad magnética >1 SI para leyes $>1,3$ % Cu. Para los valores de susceptibilidad magnética medida y los tipos de alteración que se describen en Carola, destaca que la cloritización fuerte se relaciona con altas susceptibilidades (en promedio $0,244$ SI) y la alteración potásica débil (en promedio $0,075$ SI), las cuales se relacionan con rangos de susceptibilidad magnética medida $>0,03$ SI, y que, a su vez, están ligados a Andesitas Inferiores y Albitófiro. En relación con las fallas presentes en las secciones generadas, en general, los modelos MVI y susceptibilidad indican dichas zonas con valores altos ($>0,006$ SI para el modelo MVI, y $>0,004$ SI para el modelo SM), con la diferencia que el modelo SM tiene una tendencia a presentar valores más altos con una orientación similar a las zonas de fallas presentes.

El modelo más adecuado para encontrar cuerpos mineralizados con potencial económico sería el modelo MVI. Dentro de este modelo, se interpreta que son favorables zonas con valores altos ($>0,006$ SI) que, en condiciones específicas, pueden ser cruzados con valores altos del modelo de susceptibilidad magnética ($>0,004$ SI).

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda explorar con sondajes 5 zonas específicas caracterizadas por presentar altos valores en los modelos MVI y de susceptibilidad magnética. Se interpreta que estas zonas representarían la presencia importante de magnetita, la cual podrían estar asociadas a mineralización de cobre. Estas zonas se encuentran en los sectores norte, centro sur y sur de las concesiones, específicamente en las áreas conocidas como Cecilia, Adriana norte, Adriana central y Carola central.

8. REFERENCIAS

- Alken, P., Thébault, E., Beggan, C.D. et al. (2021).** International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth Planets Space* 73, 49. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>
- Amilibia, A. (2009).** Compressional deformation along the Chañarcillo basin west margin: North Chilean Late Jurassic-Early Cretaceous back-arc basin: *Trabajos Geológicos. Univ. Oviedo* 29, 78–83.
- Amilibia, A., Sàbat, F., McClay, K.R., Muñoz, J.A., Roca, E., Chong, G. (2008).** The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean mountain belt: Insights from the Cordillera de Domeyko. *J. Struct. Geol.* 30, 1520–1539.
- Arabasz, W. (1971).** Geological and geophysical studies of the Atacama fault zone in northern Chile: Unpublished. PhD. thesis. California Institute of Technology, Pasadena, USA.
- Arévalo, C. (1999).** The Coastal Cordillera/Precordillera Boundary in the Tierra Amarilla area (27° 20' 27 40'S/70° 05'–70 20'W), northern Chile, and the structural setting of the Candelaria Cu-Au ore deposit: Unpublished. PhD. Thesis. University of Queens, Kingston, Canada.
- Arévalo, C. (2005a).** Carta Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 91, 53 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Arévalo, C. (2005b).** Carta Los Loros, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 92, 53 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- 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). *Econ. Geol.* 101, 819–841.
- Austin, J., Clark, D., Schmidt, P., Hillan, D., Foss, C. (2013a).** Magnetic anomalies to mines: Practical insights into the myths, methods and mysteries in relating mineralization and magnetization. In 23rd ASEG Conference and Exhibition, Melbourne.
- Austin, J. R., Schmidt, P. W., Lilly, R. (2013b).** Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) and Paleomagnetism applied to the differentiation of structural and metallogenic controls on Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) mineralization: a case study from Monakoff, NW Queensland. Extended Abstracts, 23rd ASEG Conference and Exhibition, Melbourne.
- Austin, J. R., Foss, C. A. (2014).** The Paradox of Scale: Reconciling magnetic anomalies with rock magnetic properties for cost-effective mineral exploration. *Journal of Applied Geophysics*, 104, 121-133.
- Austin, J., Geuna, S., Clark, D., Hillan, D. (2014).** Remanence, self-demagnetization and their ramifications for magnetic modelling of iron oxide copper-gold deposits: An example from Candelaria, Chile. *Journal of Applied Geophysics*, 109, 242-255.

- Austin, J.R., Hillan, D., Geuna, S., Clark, D. (2012).** Magnetic modeling of the Candelaria IOCG deposit, Chile: The Influence of Remanent Magnetism and Self-demagnetization. SEG 2012 Conference: Integrated Exploration and Ore Deposits. Lima, Perú.
- Backus, G.E. (1983)** Application of mantle filter theory to the magnetic jerk of 1969. *Geophys J Int* 74(3):713–746
- Banchero, L. (2015).** Interpretación Geofísica Integrada, Enfoque a Modelos de Exploración Minera y Casos de Estudio. Congreso Geológico Chileno, 14, La Serena, Chile, pp. 118-121. <https://repositorio.sernageomin.cl/handle/0104/22412>
- Brown, M., Díaz, F., Grocott, J. (1993).** Displacement History of the Atacama Fault System 25° 00' S–27° 00' S, Northern Chile. *Geological Society of America*, pp. 1165–1174.
- Butler, R.F. (1992).** *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes.* Blackwell Scientific Publications, Boston, MA. 319 p.
- Caballero-Miranda, C.I. (2011).** La fábrica magnética a partir de la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS): sus bases generales y ejemplos como auxiliar para determinar direcciones, fuentes y dinámicas de flujo. *Monografías del Instituto de Geofísica N°16.*
- Camus, F. (1980).** Posible modelo genético para los yacimientos de cobre del distrito minero Punta del Cobre. *Revista Geológica de Chile N° 11*, p. 51-76.
- Cembrano, J., Garrido, A., Marquardt, M. (2009).** Tectonic Setting of IOCG Deposits in the Central Andes: Strike-Slip-Dominated Deformation. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago, Chile Extended Abstract.
- Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P. (2007).** Tectonostratigraphic evolution of the Andean orogen in Chile: the geology of Chile. *The Geological Society of London*, London, pp. 21–114.
- Chen, H., Cooke, D.R., Baker, M.J. (2013).** Mesozoic iron oxide copper-gold mineralization in the central Andes and the Gondwana Supercontinent breakup. *Econ. Geol.* 108, 37–44.
- Cisternas, M.E., Díaz, L.L. (1990).** Geologic Evolution of the Atacama Basin during the Lower Cretaceous: Stratabound Ore Deposits in the Andes. Springer, Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 495–504.
- Clark, D. A. (1983).** Magnetic properties of pyrrhotite-applications to geology and geophysics, MSc thesis, University of Sydney.
- Clark, D. A. (1984).** Hysteresis properties of sized, dispersed monoclinic pyrrhotite grains, *Geophys. Res. Lett.*, 11, 173–176.
- Clark, D. A. (2014).** Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper–gold systems: A review. *Tectonophysics*, 624, 46-65.
- Clark, D., Emerson, D. (1999).** Self-demagnetization. *Preview (ASEG)* 79, 22–25.
- Clark, D., Schmidt, P. (1994).** Magnetic properties and magnetic signatures of BIFs of the Hamersley Basin and Yilgarn block. *Western Australia: Geophysical Signatures of Western Australian Mineral Deposits*, pp. 343–354.
- Clark, D.A. (1988).** Magnetic properties and magnetic Signatures of the Trough Tank and Starra copper-gold deposits, eastern Mount Isa Block. AMIRA Project 78/P96B: Applications of Rock Magnetism.

- Clark, D.A. (1994).** Magnetic properties and magnetic contents of ores from the Ernest Henry Deposit, eastern Mount Isa Inlier. CSIRO Exploration and mining Report 23C.
- Clark, D.A. (2000).** Self-demagnetization in practice: the Osborne Cu-Au deposit. *Preview* 85, 31–36.
- Constable, C.G., Constable S.C. (2004)** Satellite magnetic field measurements: applications in studying the deep earth. In: *The state of the planet: frontiers and challenges in geophysics*. American Geophysical Union, International Union of Geodesy and Geophysics, Washington, DC
- Corvalán, J. (1974).** Estratigrafía del Neocomiano marino de la región al sur de Copiapó, Provincia de Atacama. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 1, p. 13-36.
- Covacevich, V. (1994).** Informe Paleontológico Carta Copiapó (Inédito), Servicio Nacional de Geología y Minería, 7 p.
- Dallmeyer, D., Brown, M., Grocott, J., Taylor, G.K., Treloar, P. (1996).** Mesozoic Magmatic and Tectonic Events Within the Andean Plate Boundary Zone, 26°-27°30', North Chile: Constraints from 40Ar/39Ar Mineral Ages. *Journal of Geology*, Vol. 104, p. 19-40.
- Dalziel, I.W.D., Brown, R.L. (1987).** Andean Core Complex Evolution Related to Marginal Basin Collapse; Implications for Cordilleran Tectonics. *Geological Society of America*, pp. 634 Annual Meeting and Exposition, extended abstract.
- Dekkers, M.J. (1989).** Magnetic properties of natural pyrrhotite. II. High and low temperature behavior of Jrs and TRM as function of grain size, *Phys. Earth planet. Inter.*, 57, 266–283.
- Dekkers, M.J. (1988).** Magnetic properties of natural pyrrhotite. I. Behavior of initial susceptibility and saturation magnetization related rockmagnetic parameters in a grain size dependent framework, *Phys. Earth planet. Inter.*, 52, 376–393.
- Del Real, I., Thompson, J. F., 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*, 102, 106-153.
- Dentith, M., Enkin, R. J., Morris, W., Adams, C., Bourne, B. (2020).** Petrophysics and mineral exploration: a workflow for data analysis and a new interpretation framework. *Geophysical Prospecting*, 68(1-Cost-Effective and Innovative Mineral Exploration Solutions), 178-199.
- Dentith, M., Mudge, S.T. (2014).** *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press.
- Díaz, A., Lledó, H., Gelcich, S., Espinoza, C., Portigliati, C., Vivallo, W., Vogel, S., Carrasco, R. (1999).** Atlas de Yacimientos Metalíferos de la III Región de Atacama entre los 26 y 28° S. Servicio Nacional de Geología y Minería: Informe Registrado IR 99-18, 18 mapas a escala 1: 50.000. Santiago, Chile
- Espinoza, S. (1990).** The Atacama-Coquimbo Ferriferous Belt, Northern Chile: stratabound ore deposits in the Andes. Springer, Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 353–364.
- Facultad de ciencias astronómicas y geofísicas (2023).** Métodos potenciales de prospección. Universidad nacional de La Plata. http://carina.fcaglp.unlp.edu.ar/mpp/notebooks/pole_reduction.html

- Fernández, Y. (2024).** Actualización de modelo geológico del sector Adriana Norte de SCM Carola, Tierra Amarilla, Región de Atacama. Trabajo de titulación para obtener el título de Geólogo. Universidad de Atacama, Chile.
- Gay, S.P. (1963).** Standard curves for interpretation of magnetic anomalies over long tabular bodies. *Geophysics* 28, 161–200.
- Geomaster: geofísica (s.f).** Estudio magnetometría. <http://www.geomastersac.com/servicios-geof%C3%ADsicos/estudio-magnetometria.html>
- GeoRESULTS Pty Ltd (2016).** KT- 20 Magnetic Susceptibility y Conductivity Meter - User's Guide.
- Gidley, P.R. (1988).** Geophysics of the Trough Tank Gold-Copper prospect, Australia. *Bull. Aust. Soc. Explor. Geophys.* 19, 76–78.
- Glatzmaier, G.A., Roberts, P.H. (1995).** A Three-dimensional Self-consistent Computer Simulation of a Geomagnetic Field Reversal, *Nature*, V. 377, p. 203–209.
- Godoy, E., Lara, L. (1998).** Hojas Chañaral y Diego de Almagro, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica.
- González Rivera, D. (2010).** La exploración magnética aérea en la prospección de yacimientos de oro y plata: caso Peña de Bernal, Querétaro. Tesis (Maestro en Ciencias Aplicadas), Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., México.
- Grocott, J., Brown, M., Dallmeyer, R.D., Taylor, G.K., Treloar, P.J. (1994).** Mechanisms of continental growth in extensional arcs: an example from the Andean plate-boundary zone. *Geology* 22, 391–394.
- Grocott, J., Taylor, G.K. (2002).** Magmatic arc fault systems, deformation partitioning and emplacement of granitic complexes in the Coastal Cordillera, north Chilean Andes (25 30' S to 27 00' S). *J. Geol. Soc. London* 159, 425–443.
- Gubbins, D., y Herrero-Bervera, E. (Eds.). (2007).** Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism. Springer Science y Business Media.
- Guo, W., Dentith, M., Bird, R., Clark, D. (2001).** Systematic error analysis of demagnetization and implications for magnetic interpretation. *Geophysics* 66, 562–570.
- Guo, W., Dentith, M., Zhengxiang, L., Powell, C. (1998).** Self -demagnetization corrections in magnetic modelling: some examples. *Explor. Geophys.* 29, 396–401.
- Hardwick, C.D. (1984).** Important design considerations for inboard airborne magnetic gradiometers. *Geophysics*, 49(11), 2004-2018.
- Hillan, D. (2013a).** Modelling Self-Demagnetization and Body-Body Interactions in the Fourier Domain: EAGE 2013 Extended Abstract, pp. 1–4.
- Hillan, D. (2013b).** Self-demagnetization: implications and corrections in magnetic modelling. A Forum on the Application of Remanent Magnetization and Self-Demagnetization Estimation to Mineral Exploration 23rd ASEG Conference and Exhibition, Melbourne.
- Hoffstetter, R., Fuenzalida, H., Cecioni, G. (1957).** Lexique Stratigraphique International, Amerique Latine, Vol. 5, 444 p
- Hopf, S. (1990).** The Agustina Mine, a volcanic-hosted copper deposit in northern Chile. In: Fontboté L, Amstutz GC, Cardozo M, Cedillo E, Frutos J (eds) *Stratabound ore deposits in the Andes*. Springer, Berlín Heidelberg New York, pp 421-434.

- Ian, N. MacLeod, Robert G. Ellis (2016).** Quantitative Magnetization Vector Inversion, ASEG Extended Abstracts, 2016:1, 1-6, DOI: 10.1071/ASEG2016ab115 (<https://doi.org/10.1071/ASEG2016ab115>)
- Iriarte, S., Arévalo, C. Mpodozis, C., Rivera, O. (1996).** Mapa Geológico de la Hoja Carrera Pinto, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, No. 12, 1 mapa escala 1:100.000.
- Jensen, H. (1965).** Instrument details and application of a new airborne magnetometer: Geophysics, V.30, p. 875–882.
- Jensen, O. (1976).** Geología de las nacientes del Río Copiapó, entre los 27° 53' y 28° 20' de latitud sur, Provincia de Atacama, Chile: Unpublished PhD, thesis. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Kay, R.W., Kay, S. (1991).** Creation and destruction of lower continental crust. Geol. Rundsch. 80, 259–278.
- Krahenbuhl, R.A., Li, Y. (2007).** Influence of self-demagnetization effect on data interpretation in strongly magnetic environments, pp. 713–717, (SEG 2007 Extended Abstracts).
- Kreiner, D.C., Barton, M.D. (2009).** Hydrothermal Alteration and Mineralization Zoning in Iron-Oxide (-Cu-Au) Vein Deposits, near Copiapó, Chile. Extended abstract. 10th Biennial SGA Meeting, pp. 635–639.
- Lino, S. (1984).** Geología de la mina Agustina. Comuna de Tierra Amarilla. Provincia de Copiapó. Región de Atacama. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad Católica del Norte, Inédito.
- Lowrie, W. (2007).** Geomagnetism and paleomagnetism. In *Fundamentals of Geophysics* (pp. 281–362). Cambridge: Cambridge University Press.
- MacLeod, I. N., Ellis, R. G. (2013).** Magnetic Vector Inversion, a simple approach to the challenge of varying direction of rock magnetization. A Forum on the Application of Remanent Magnetization and Self-Demagnetization Estimation to Mineral Exploration. In *23rd ASEG Conference and Exhibition, Melbourne*. http://www.geosoft.com/media/uploads/resources/technicalpapers/aseg_2013_mvi_simple_approach_challenge_varying_direction_rock_magnetization.pdf.
- Macleod, I.N., Ellis, R.G. (2013).** Magnetic Vector Inversion, a simple approach to the challenge of varying direction of rock magnetization
- Maksaev, V., Munizaga, F., Valencia, V., Barra, F. (2009).** LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology to constrain the age of post-Neocomian continental deposits of the Cerrillos Formation, Atacama Region, northern Chile. *Andean Geol.* 36, 264–287.
- Marquardt, M., Cembrano, J., Siña, A., Garrido, I. (2009).** IOCG-type Deposits in North Central Chile: A Case Study and Implications for Exploration. XII Congreso geológico Chileno, Santiago, Chile.
- Marschik, R., Fontbote, L. (2001a).** The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au(-Zn-Ag) deposits, Chile. *Econ. Geol.* 96, 1799–1826.
- Marschik, R., Fontbote, L. (2001b).** The Punta del Cobre Formation, Punta del Cobre-Candelaria area, northern Chile. *J. S. Am. Earth Sci.* 14.
- Marschik, R., Fontignie, D., Chiaradia, M., Voldet, P. (2003).** Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotope composition of granitoids of the Early Cretaceous Copiapó plutonic complex (27°30'S), Chile. *J. S. Am. Earth Sci.* 16, 381–398.

- Marschik, R., Singer, B.S., Munizaga, F., Tassinari, C., Moritz, R., Fontbote, L. (1997).** Age of Cu(-Fe-Au) mineralization and thermal evolution of the Punta del Cobre district, Chile. *Miner. Deposita* 32, 531–546.
- Marschik, R., Söllner, F. (2006).** Early cretaceous U-Pb zircon ages for the Copiapó plutonic complex and implications for the IOCG mineralization at Candelaria, Atacama Region, Chile. *Miner. Deposita* 41, 785–801.
- 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. *J. S. Am. Earth Sci.* 42, 1–16.
- Mira Geoscience Limited (2024).** Geoscience ANALYST 4.3 - User Guide.
- Morata, D., Aguirre, L. (2003).** Extensional Lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29° 20'–30° S), Chile: geochemistry and petrogenesis. *J. S. Am. Earth Sci.* 16, 459–476.
- Moscoso, R., Nasi, C., Salinas, P. (1982).** Hoja Vallenar y parte norte de La Serena, Regiones de Atacama y Coquimbo, mapa escala 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile n. 55.
- Mourgues, F.A. (2001).** Bioestratigrafía y paleontología del Grupo Chañarcillo, Cretácico Inferior, III Región, Chile (Inédito), Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Paleontológico, No. 2000-09, 84 p.
- Mourgues, F.A. (2004).** Advances in ammonite biostratigraphy of the marine Atacama basin (Lower Cretaceous), northern Chile, and its relationship with the Neuquén basin, Argentina. *J. S. Am. Earth Sci.* 17, 3–10.
- Naranjo, J. (1978).** Zona interior de la Cordillera de la Costa entre los 26 00' y 26 20' S. Región de Atacama: Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica.
- Ortega, R. (1998).** Geología, mineralogía y microtermometría de vetas y stockworks en los niveles 362 y 335 de la Mina Agustina, Tierra Amarilla, III Región, Chile.
- Peirce, J.W., Glenn W.E., Brown K. (1998).** High resolution aeromagnetism for hydrocarbon exploration: *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, V. 34, p. 49-57.
- Pérez Orrego, C.E. (2017).** Modelamiento e interpretación de datos magnéticos y gravimétricos en la caracterización de un depósito tipo IOCG. Tesis (Magister en ciencias, mención geofísica), Universidad de Chile, Chile.
- Pérez, E. (1998).** Ammonites recolectados por Carlos Arévalo en quebrada El Algarrobo (denominación informal), afluente de quebrada Nantoco, sur de Copiapó, III Región (Inédito), Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Paleontológico, No. 98-3, 2 p.
- Pérez, E., Cooper, M., Covacevich, V. (1990).** Aptian ammonite-based age for the Pabellón Formation, Atacama region, Northern Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 17, No. 2, p. 181-185.
- Pérez, E., Reyes, R. (1999).** Moluscos fósiles neocomianos, procedentes de quebrada Bandurrias, norte de mina Teresita, oeste de Copiapó, III Región (Inédito), Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Paleontológico, No. 1999-13, 3 p.
- Pérez, E., Reyes, R., Mourgues, F.A., Rubilar, A. (2000).** Perfil estratigráfico detallado de la sucesión de edad cretácica inferior (Formación Pabellón) medido en quebrada Meléndez, ladera sur (27°29' y 70 °12'W), ca. 2 km al norte de Tierra Amarilla, sureste de Copiapó. Informe paleontológico de avance (Inédito), Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Paleontológico, No. 2000-10, 32 p.

- Pop, N., Isache C., Valdman S. et al. (2008).** Informe sobre la Explotación del área de Adriana Norte, Sector Meléndez, Mina Carola. SCM Carola, Copiapó, Chile.
- Pop, N., Heaman, L., Edelstein, O., Isache, C., Zentilli, M., Pecskey, Z., Valdman, S., Rusu, C. (2000).** Geocronología de las rocas ígneas y los productos de alteración hidrotermal relacionados con la mineralización de Cu-Fe (Au) del sector Adriana-Carola-Cobrizza (parte este del distrito Punta del Cobre-Candelaria), en base a dataciones U-Pb (en circón), $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ y K/Ar. En Congreso Geológico Chileno, No. 10, Actas, Vol. 2, p. 155-160. Puerto Varas.
- Ramos, V.A. (2009).** Anatomy and global context of the Andes: main geologic features and the Andean orogenic cycle. *Geol. Soc. Am. Mem.* 204, 31–65.
- Reeves, C. (2005).** Aeromagnetic Surveys: Principles, Practice and Interpretation. Earthworks, Washington DC, 155 p.
- Reynolds, J. M. (2011).** An introduction to applied and environmental geophysics.
- Rezaie, M. (2021).** 3D Inversion of Magnetic Amplitude Data with Sparseness Constraint. *Pure and Applied Geophysics*, 178(6), 2111–2126. doi:10.1007/s00024-021-02747-6
- Roest, W. R., Verhoef, J., Pilkington, M. (1992).** Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57(1), 116-125.
- Royden, L.H., 1993.** The tectonic expression slab-pull at continental convergent boundaries. *Tectonics* 12, 303–325.
- Ryan, P.J., Lawrence, A.I., Jenkins, R.A., Matthews, J.P., Zamora, J.C., Marino, E., Urqueta, I. (1995).** The Candelaria copper-gold deposit, Chile. In: Pierce FW, Bolm JG (eds) Porphyry copper deposits of the American Cordillera. *Arizona Geol Soc Digest* 20: 625-645.
- Scheuber, E., Bogdanic, T., Jensen, A., Reutter, K. J. (1994).** Tectonic Development of the North Chilean Andes in Relation to Plate Convergence and Magmatism since the Jurassic: Tectonics of the Southern Central Andes. Springer, Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 121–139.
- Scheuber, E., González, G. (1999).** Tectonics of the Jurassic-Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22° – 26° S): a story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics* 18, 895–910.
- Scheuber, E., Hammerschmidt, K., Friedrichsen, H. (1995).** $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ and Rb-Sr analyses from ductile shear zones from the Atacama Fault Zone, northern Chile: the age of deformation. *Tectonophysics* 250, 61–87.
- SCM Carola (2019).** Informe local de la Superintendencia de Geología. SCM Carola, Atacama, Chile. Inédito.
- Segestrom, K. (1960).** Cuadrángulo Quebrada Paipote. Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, Vol. 2, No. 1, 55 p, 1 mapa escala 1: 50.000.
- Segestrom, K. (1967).** Geology and ore deposits of central Atacama Province, Chile. *Bull. Geol. Soc. Am.* 78, 305–318.
- Segestrom, K., Parker, R.L. (1959).** Cuadrángulo Cerrillos, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile.
- Segestrom, K., Ruiz, C. (1962).** Geología del Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile.

- Segerstrom, K., Thomas, H., Tilling, R. (1963).** Cuadrángulo Pintadas. Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 12, 53 p., 1 mapa escala 1: 50.000.
- Sepúlveda, M. (2017).** Validación y redefinición de la geología del Cuerpo 1E de mina Meléndez de Sociedad Contractual Minera Carola, Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile. Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Geólogo. Universidad de Atacama.
- Shi, X., Geng, H., Liu, S. (2022).** Magnetization vector inversion based on amplitude and gradient constraints. *Remote Sensing*, 14(21), 5497.
- Skarmeta, J.J. (1991).** Evolución de cuencas de Trasarco en el norte de Chile: Un Análisis basado en el emplazamiento de diques y filones. In *Congreso Geológico Chileno*. 6 (pp. 649-653).
- Soffia, J. (1989).** Estratigrafía y geología estructural del área del río Jorquera, Región de Copiapó: Unpublished. PhD. thesis. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Southernrock Geophysics (2024).** informe para un estudio de magnetometría aérea con dron Proyecto Carola, III región, Chile.
- Stern, C.R. (1991).** Role of subduction erosion in the generation of Andean magmas: *Geology*, v. 19, p. 78–81.
- Tarnovschi, R. (1999).** Estudio de la alteración hidrotermal y mineralización asociada del yacimiento Carola, III Región de Copiapó, Chile. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad Católica del Norte.
- Tavera, J. (1951).** Informe sobre investigación de un material de fósiles, proveniente de la región vecina a la mina Teresita, de la Fundición Nacional de Paipote (Inédito), Departamento de Minas y Petróleo, 2 p.
- Tavera, J. (1956).** Fauna del Cretáceo Inferior de Copiapó. Universidad de Chile, Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Vol. 13, p. 205-216.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990).** Applied geophysics, 2nd ed., Cambridge University Press, 860 p.
- Télez Moncada, S., Fuentes López, J., Fabra Camacho, L.M. (2010).** Aplicación del análisis geostadístico para el procesamiento de datos de anomalía magnética marina sobre un naufragio en el Caribe colombiano. *UD y la geomática*, (4), 43–66. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/UDGeo/article/view/3657>
- Tilling, R.I., 1976.** El Batolito andino cerca de Copiapó, Provincia de Atacama. *Geol. Petrol.: Andean Geol.* 3, 1–24.
- Townley, B. (2001).** Metalogénesis: Hidrotermalismo y modelos de yacimientos. *Geología Económica*. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Townley, B., Roperch, P., Oliveros, V., Tassara, A., Arriagada, C. (2007).** Hydrothermal alteration and magnetic properties of rocks in the Carolina de Michilla stratabound copper district, northern Chile. *Mineralium Deposita*, 42, 771-789.
- Wilson, J., Grocott, J. (1999).** The emplacement of the granitic Las Tazas complex, northern Chile: the relationship between local and regional strain. *J. Struct. Geol.* 21, 1513–1523.
- Zietz, I., Henderson, R.G. (1956).** A preliminary report on model studies of magnetic anomalies of three-dimensional bodies. *Geophysics* 21, 794–814.

ANEXOS

ANEXO A. Procedimiento de interpolación de datos de modelos MVI y susceptibilidad en tramos de sondajes estratégicos

1. Se exportaron los valores de los sondajes, modelo MVI y modelo susceptibilidad desde el software Leapfrog Geo © (fig. A.1).

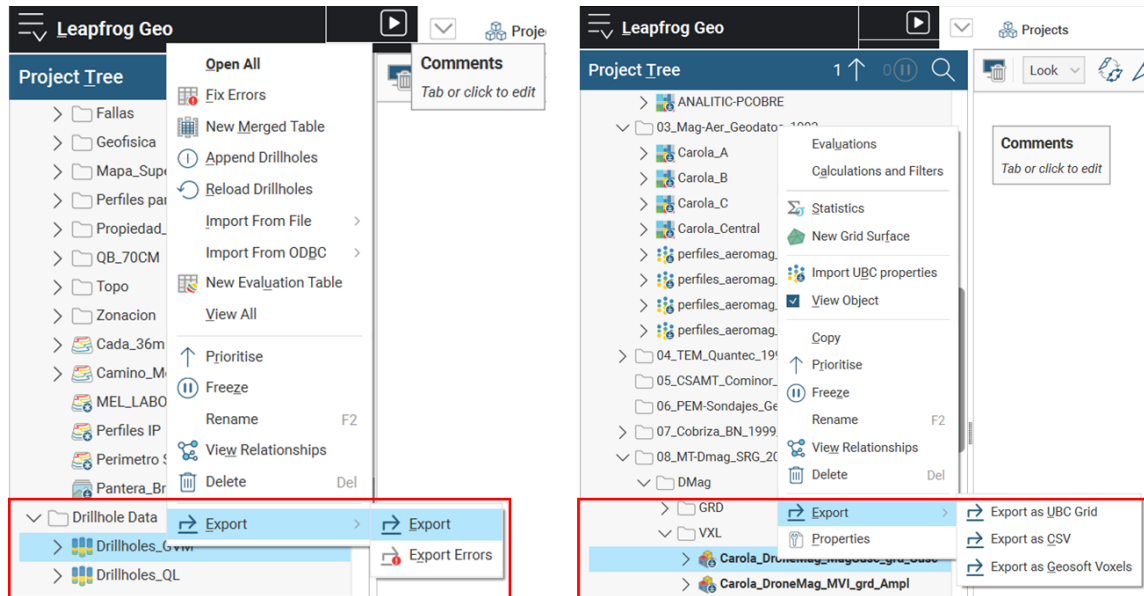


Figura A.1. Proceso de exportación de datos de sondajes y modelos geofísicos (captura de pantalla desde software Leapfrog Geo ©).

1. En el software Geoscience Analyst ©, se subió la información de los sondajes extraídos previamente (fig. A.2).

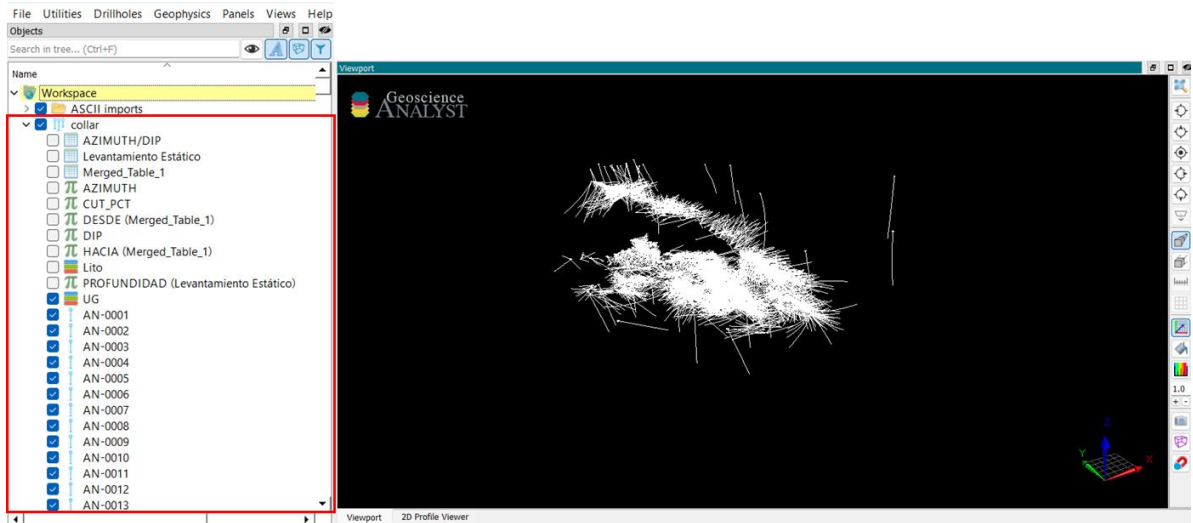


Figura A.2. Captura de pantalla del software Geoscience Analyst © con la base de datos de sondajes importada. La imagen 3D muestra la totalidad de los sondajes realizados en SCM Carola a la fecha y el collar de estos.

2. En la opción “Desurvey Drillhole Logs”, con los datos de los sondajes, y usando como referencia la información de % de Cu por metro (“Master log”), se generaron puntos medios (fig. A.3). Se utilizaron los % de Cu debido a que contaban con un espaciamiento menor dentro de los tramos, otorgando un punto medio (“Middle”) más acotado y dando mayor precisión a la interpolación posterior de los datos de los modelos magnéticos (MVI y susceptibilidad).

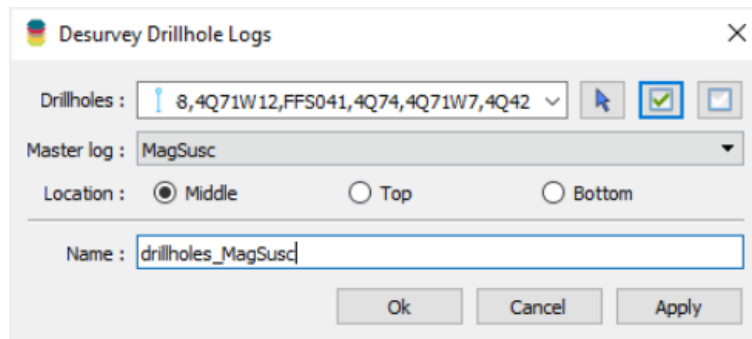


Figura A.3. Menú de configuración “Desurvey Drillhole Logs” de software Geoscience Analyst © (Mira Geoscience Limited, 2024).

3. Se importaron los datos de los modelos MVI y susceptibilidad (fig. A.4)

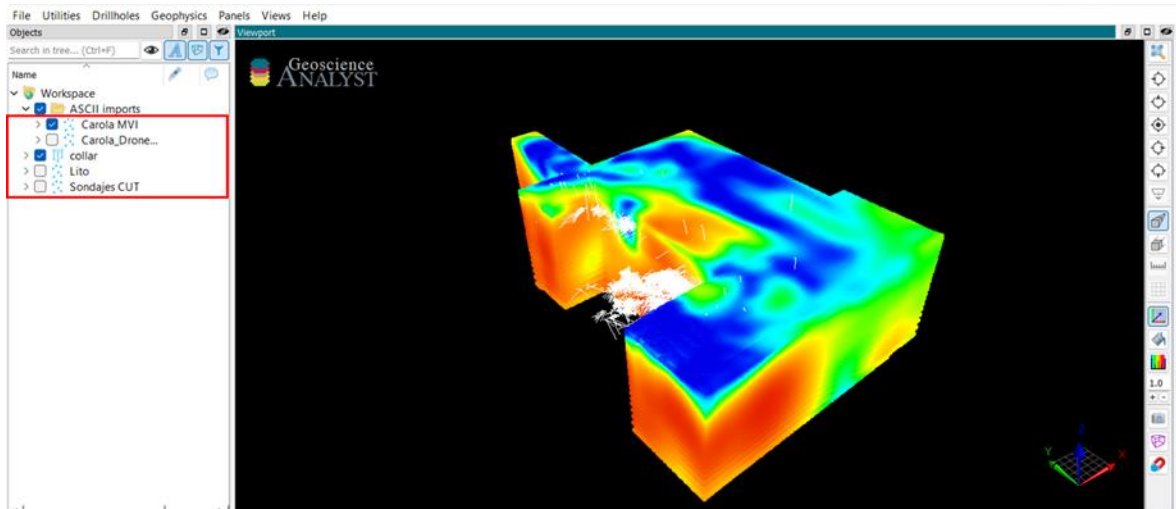


Figura A.4. Captura de pantalla del software Geoscience Analyst © con la base de datos de sondajes y modelos geofísicos. La imagen 3D muestra la totalidad de los sondajes realizados en SCM Carola, el collar de los sondajes y el modelo MVI generado por Southernrock.

4. Para interpolar los datos desde los modelos (MVI y susceptibilidad) al collar, se debió usar la opción “Transfer Data”. En el apartado “Source” se escogieron los modelos, en “Destination” se seleccionó el “Desurvey” previamente realizado, y como método de transferencia (“Transfer method”) se seleccionó el método del vecino más cercano (“Nearest neighbour”) con 30 metros como radio de búsqueda (“Search radius”) (fig. A.5).

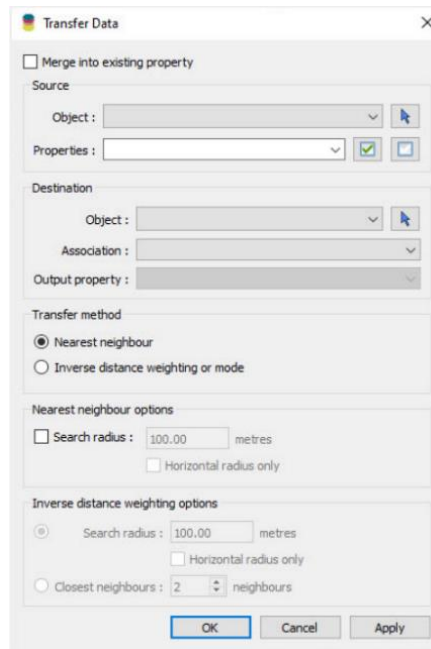


Figura A.5. Menú de configuración “Transfer Data” de software Geoscience Analyst © (Mira Geoscience Limited, 2024).

5. Finalmente, se exportó la base de datos generada en Geoscience Analyst (fig. A.6) para su posterior integración a la base de datos de los valores correspondientes a los tramos de sondajes estratégicos seleccionados en un principio. Para más información consultar Mira Geoscience Limited (2024).

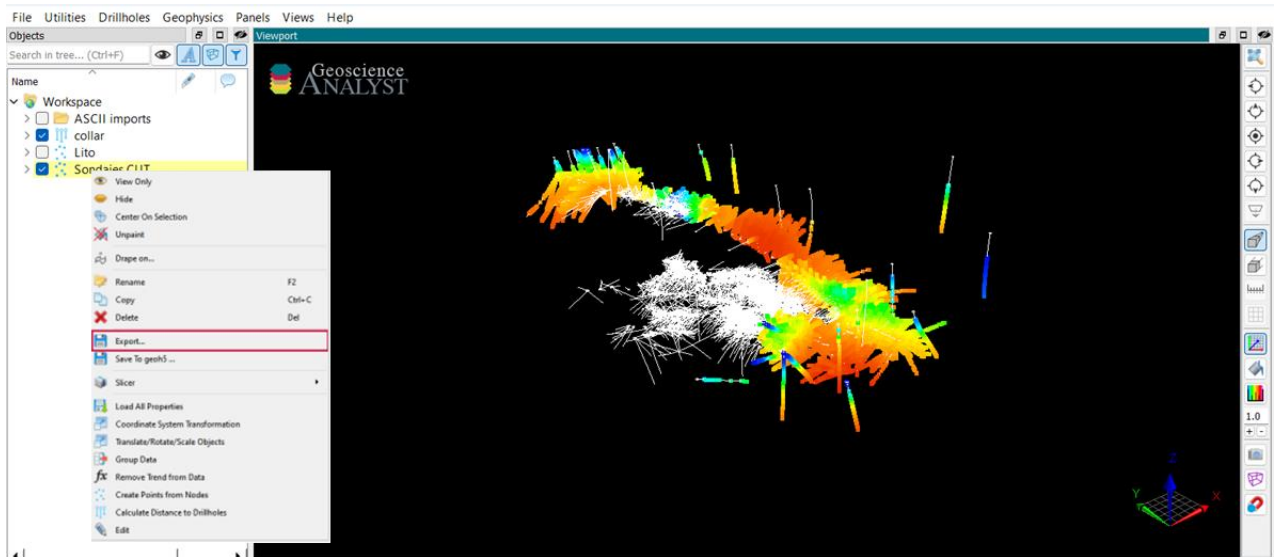


Figura A.6. Captura de pantalla del software Geoscience Analyst © indicando el proceso de exportación de datos. La imagen 3D muestra la totalidad de los sondajes realizados en SCM Carola y el collar de los sondajes con la interpolación de los datos del modelo MVI generado por Southernrock.

ANEXO B: Procedimiento de generación de secciones en modelo litológico, MVI y susceptibilidad

Modificación en la escala de colores para el modelo MVI

A modo de facilitar la interpretación de las secciones y observar de mejor manera la variación de los valores del modelo MVI, se modificó la escala de color del modelo MVI de la siguiente manera:

1. Se generaron 2 copias para el modelo MVI (fig. B.1).

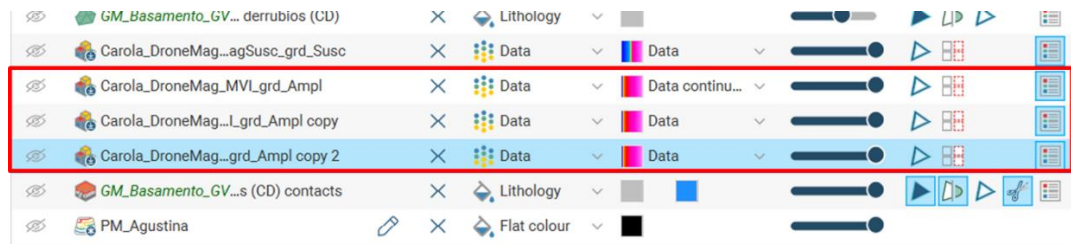


Figura B.1. Captura de pantalla de software Leapfrog Geo © donde se muestra en una lista el modelo MVI y las dos copias generadas.

2. Para ambas copias se creó un nuevo color de mapa (“new colourmap”), el cual fue del tipo continuo (“continuos”) (fig.B.2).

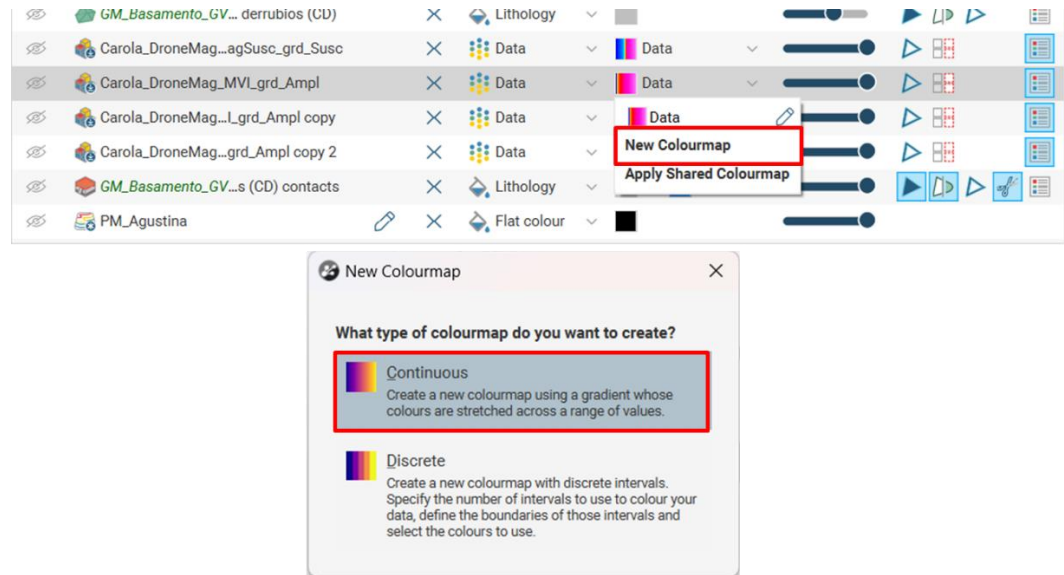


Figura B.2. Captura de pantalla de software Leapfrog Geo © con el procedimiento para crear un nuevo color de mapa (“new colourmap”).

3. A cada copia del modelo MVI se le otorgo una gradiente de color distinta, y un valor mínimo y máximo (fig.B.3).

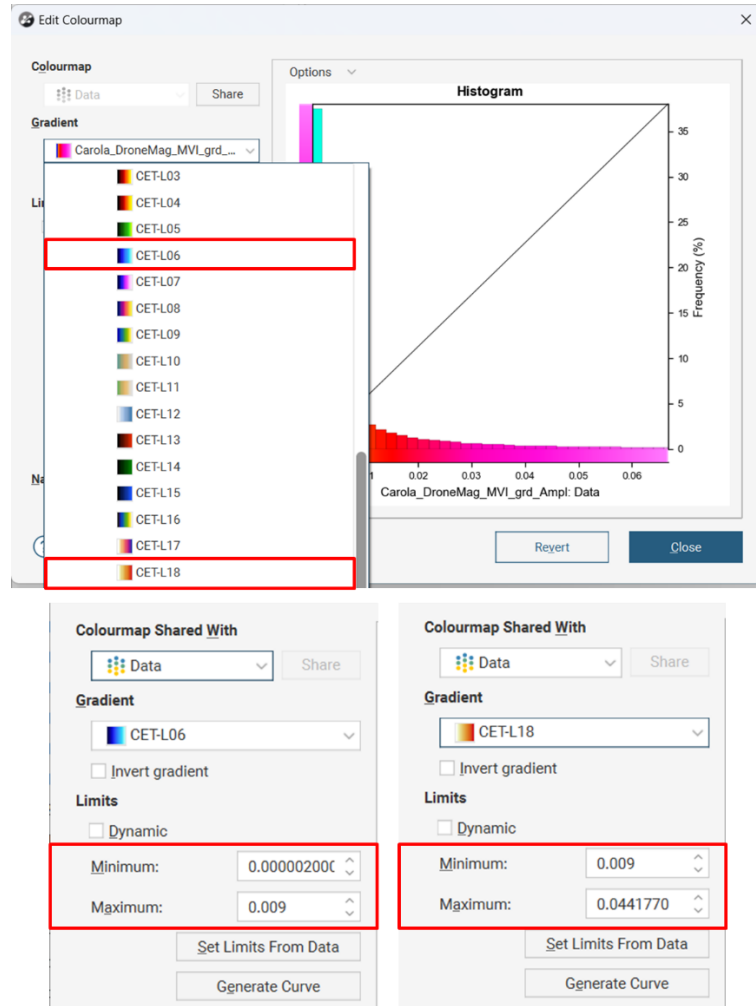


Figura B.3. Captura de pantalla de software Leapfrog Geo © con el procedimiento de modificación de gradientes de colores (arriba), y aplicación de valores mínimos y máximos (abajo).

- Finalmente, para ambas copias se habilitó un filtro (“enable filter”) con los valores establecidos previamente para cada gradiente de color (fig. B.4).

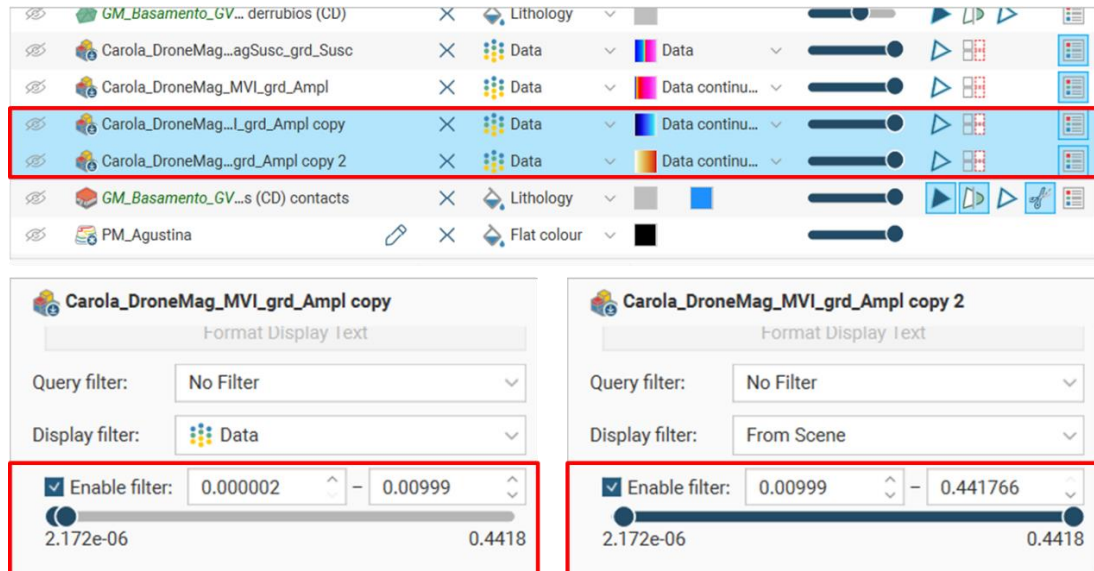


Figura B.4. Captura de pantalla de software Leapfrog Geo © con las copias de modelo MVI con las nuevas gradientes de color (arriba) y los filtros aplicados para cada uno (abajo).

Generación de secciones

Con el fin de identificar correlaciones espaciales entre las unidades geológicas y las propiedades magnéticas, se comparó el modelo geológico presente en SCM Carola con los modelos MVI y susceptibilidad entregados por Southernrock a través de secciones W-E por sector (norte, centro norte, centro sur y sur), secciones N-S para la zona con mayor densidad de sondajes y secciones NNE-SSW para los sectores occidental, central y oriental del área de estudio. Las secciones se obtuvieron mediante el software Leapfrog, utilizando el siguiente procedimiento:

1. A través de la carpeta “Sections, Plans and Contours” se crearon las secciones en el apartado “New Cross Section”, y se determinaron las ubicaciones de estas (fig. B.5).

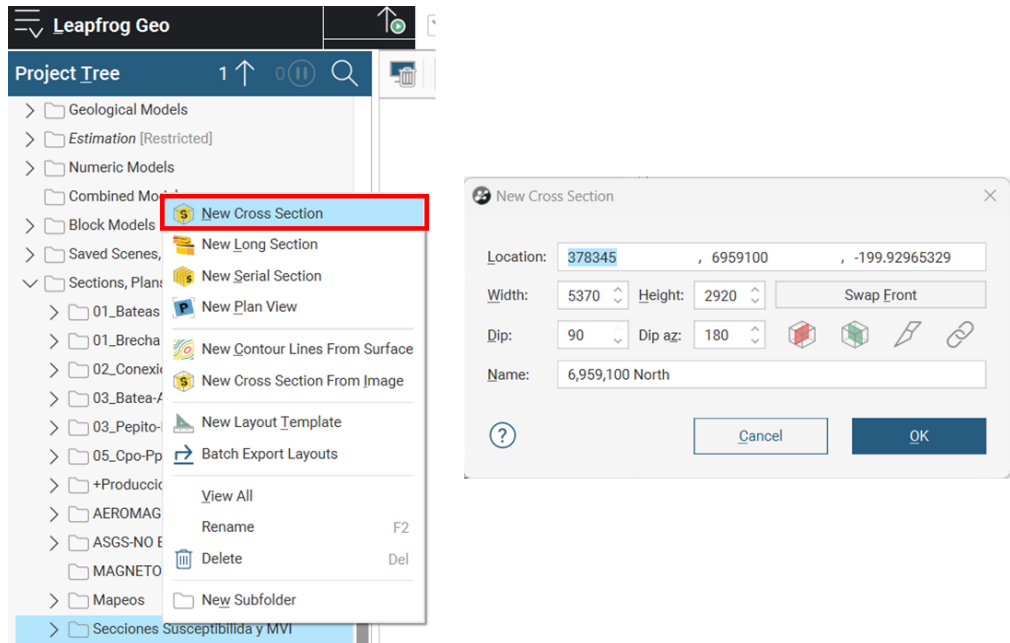


Figura B.5. Captura de pantalla de software Leapfrog Geo © con el procedimiento de creación de secciones.

2. En las secciones ya generadas, se crearon los diseños de impresión por medio de la opción “New Layout” (fig. B.6).

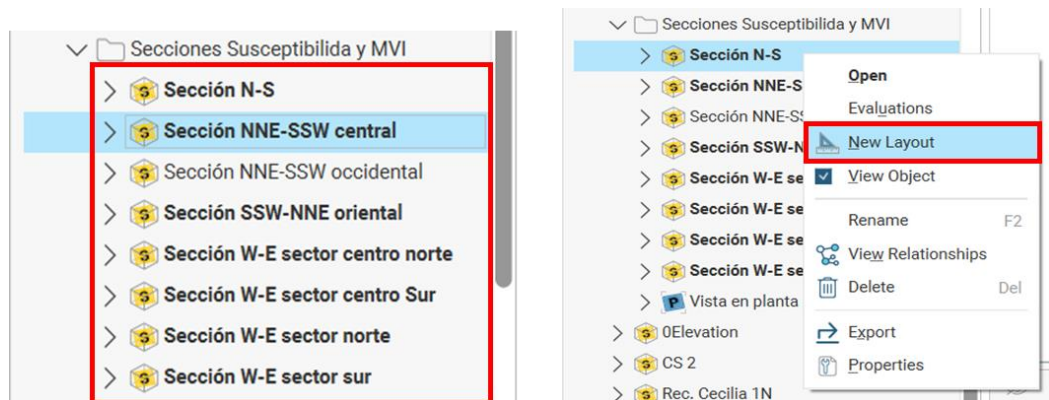


Figura B.6. Captura de software Leapfrog Geo © con secciones creadas y la opción de selección para generar el diseño de impresión.

3. Se modificaron los diseños de impresión integrando el modelo geológico, modelo MVI, modelo susceptibilidad y la base de datos de sondajes. Se generó una sección

por cada modelo y se integraron los collares de sondajes cercanos a las transectas para posteriormente exportar los diseños (fig. B.7).

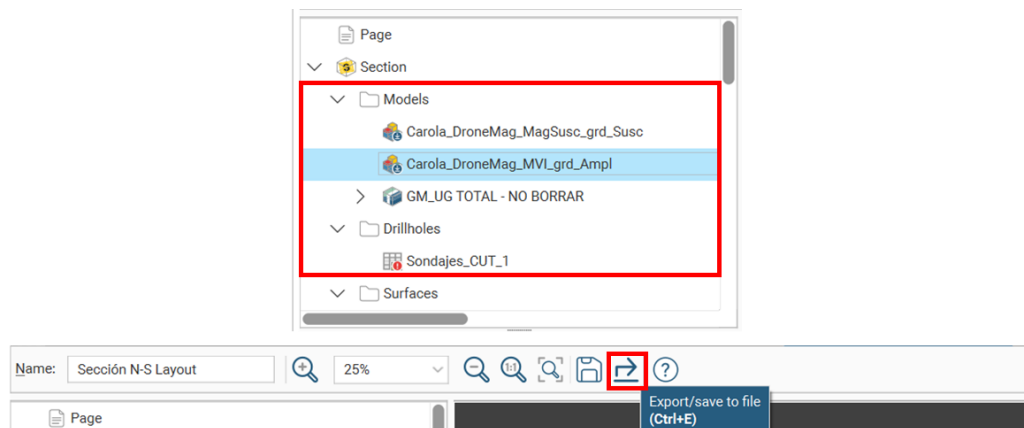


Figura B.7. Captura de software Leapfrog Geo © con modelos (geológico, MVI y susceptibilidad) y base de datos de sondajes añadidos al diseño de impresión para generar las secciones (parte superior). La imagen inferior muestra como exportar la sección generada.

ANEXO C: Matriz de correlación de Pearson

	Ley Cu	SM Prom	Andesitas Inferiores	Albitófiro	Silicificación	Carbonización	Cloritización	Potásica	Argilica	Sericítica	Cota
Ley Cu	1,00	0,16	0,22	0,14	0,01	-0,01	0,20	0,11	0,09	-0,09	0,04
SM Prom	0,16	1,00	0,41	0,01	-0,16	-0,24	0,23	0,16	0,00	-0,07	-0,32
Andesitas Inferiores	0,22	0,41	1,00	-0,32	-0,31	-0,12	0,33	0,33	0,10	-0,11	-0,20
Albitófiro	0,14	0,01	-0,32	1,00	0,07	-0,36	0,29	0,10	-0,19	-0,09	0,14
Silicificación	0,01	-0,16	-0,31	0,07	1,00	-0,10	-0,34	-0,31	-0,45	-0,23	0,07
Carbonización	-0,01	-0,24	-0,12	-0,36	-0,10	1,00	-0,47	-0,31	0,27	0,13	0,08
Cloritización	0,20	0,23	0,33	0,29	-0,34	-0,47	1,00	0,18	-0,11	0,10	0,03
Potásica	0,11	0,16	0,33	0,10	-0,31	-0,31	0,18	1,00	0,09	-0,13	-0,26
Argilica	0,09	0,00	0,10	-0,19	-0,45	0,27	-0,11	0,09	1,00	-0,07	0,08
Sericítica	-0,09	-0,07	-0,11	-0,09	-0,23	0,13	0,10	-0,13	-0,07	1,00	0,19
Cota	0,04	-0,32	-0,20	0,14	0,07	0,08	0,03	-0,26	0,08	0,19	1,00

Figura C.1. Matriz de correlación de Pearson basado en valores de susceptibilidad magnética medida (SM Prom) en sondajes seleccionados. (Elaboración propia a través de plataforma Excel ©).