

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE LA SUPERFICIE DEL
DISTRITO FORTRESS, CHUNGUNGO, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE**

Memoria entregada a la Universidad Mayor en cumplimiento de los requisitos para
optar al Título de Geólogo

GABRIEL ALEJANDRO LOBOS LOBOS

Profesor Guía:

GISELLA PALMA LIRA

Comisión evaluadora:

EDUARDO SALAZAR ARIAS

ITALO PAYACÁN PAYACÁN

Santiago de Chile

Septiembre, 2022

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA PRELIMINAR DE SUPERFICIE DEL DISTRITO FORTRESS, CHUNGUNGO, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE

El Distrito Fortress se encuentra emplazado en la Franja Ferrífera Chilena, dentro del dominio de la Cordillera de la Costa, Región de Coquimbo. Esta franja metalogénica se caracteriza por la ocurrencia de depósitos minerales ricos en Fe, tales como depósitos del tipo magnetita-apatito o *iron oxide-apatite* (IOA) y tipo *iron oxide-copper-gold* (IOCG).

En este trabajo se presenta un estudio de la geología de superficie del Distrito Fortress con la finalidad de reconocer potenciales zonas de interés económico. Esto se llevó a cabo mediante mapeo en terreno, descripciones macroscópicas y petro-calcográficas de rocas representativas del distrito, además de la confección de mapas de litología, alteración hidrotermal, mineralización y estructuras a escala 1:4.000.

Los resultados de este trabajo muestran que en el Distrito Fortress afloran vetas con mineralización de magnetita, las cuales corresponderían a vetas del tipo IOA hospedadas en rocas intrusivos de composición diorítica a cuarzdiorítica. En este distrito se identificaron tres eventos (Evento I, II y III) de alteración hidrotermal y mineralización. El Evento I comprende magnetita diseminada y en vetillas, asociada principalmente a alteración calco -sódica. El Evento II se caracteriza por la ocurrencia de magnetita en vetas, vetillas y diseminada, con escasa mineralización de piritita, asociada principalmente a silicificación y alteración de sericita -arcillas. El Evento III, de carácter supérgeno, se caracterizaría por la oxidación de magnetita in situ para formar hematita (martita) y limonitas (goethita, hematita, jarosita). Adicionalmente, los fluidos mineralizadores habrían sido canalizados por estructuras con orientación NW - NNW subordinadas al Sistema de Fallas El Tofo.

Los resultados obtenidos permiten vectorizar futuros trabajos de exploración minera dentro del Distrito Fortress. Potenciales *targets* de mineralización tipo IOA, se asociarían a estructuras extensionales con orientación NW – NNW y al emplazamiento de diques hipabisales intermedios a máficos, que se observan en algunos sectores del distrito cortando a los intrusivos dioríticos - cuarzdioríticos. Dichas estructuras serían perpendiculares al Sistema de Fallas El Tofo y habrían permitido el emplazamiento de plutones de edad Cretácica en la Cordillera de la Costa. Finalmente, se sugiere que el mayor potencial económico se encontraría hacia el sector oriental del distrito.

SOLO USO ACADÉMICO

“Quisiera dedicar este hito de mi vida

a mi abuela y mi abuelo

que en paz descansen”

“Y a madre

Que hizo esto posible”

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas las personas que de alguna u otra forma han aportado en mi crecimiento personal y en hacer posible este hito en mi vida.

En primer lugar, agradecer a mi madre por el inmenso esfuerzo que tuvo que hacer para poder entregarme una buena educación, inculcarme valores y formar a la persona que actualmente soy. Gracias por siempre estar ahí apoyándome y cumplir con el rol de madre, padre y amiga. A mi abuela Quena y a mi tata Ramon, que cumplieron el rol de padres los primeros diez años de mi vida y siempre entregaron lo mejor de ellos hasta sus últimos momentos de vida. Los amo y los extraño muchísimo. Agradecer a mi tío hermano mayor Ricardo por tenerme la paciencia de soportarme esos primeros diez años de mi vida, gracias por ser mi hermano mayor y mi amigo del alma. A mis primos hermanos Joaco, Felipe y Robertito, por siempre estar ahí, aunque yo no siempre pude estarlo. Agradecer a todos mis primos pequeños, que son mis hermanitos chicos, la Dani, el Maxi, el Iñaqui, Luciano y la Vale que los vi crecer desde que nacieron.

De manera especial quiero dar las gracias a la Karo por llegar a mi vida, apoyarme y amarme en los momentos difíciles que pasaron estos últimos dos años.

Agradecer al Kevin, amigo de infancia. A mis compañeros de colegio en especial a Perales, Mario, Jk, Mati y Xao, por todas las locuras vividas y hacer los últimos dos años de enseñanza media entretenidos. Al Koza por ser un amigo de vida con el que he compartido, aprendido y vivido muchas experiencias. Al Gonzalo por ser un muy buen amigo y vecino. Quiero también agradecer a mis amigos de universidad, en especial al Sopapo, Wagner, Fem, Huaso, Diego, Pipeño, Pancha, Mica, Agatha, Kim, Eli por todos los momentos bueno, malos, angustias, estrés, y vivencias compartidas durante todos los años de vida universitaria, ya que gracias a esa vida logre conocer personas increíbles. Gracias Santi por apañarme en este terreno.

Por último, quisiera agradecer mi profesora guía Gisella, por toda la paciencia y apoyo que me brindó durante todo el proceso de memoria. Muchas gracias por ser una excelente profesional y llegar de manera milagrosa a guiarme en este trabajo. Agradecer a la comisión evaluadora a Eduardo, Italo y Christian por aportar igualmente en este proceso. Agradecer a la Escuela de Geología de la Universidad mayor a todos sus docentes y fundadores por darme la oportunidad de estudiar y formarme como profesional.

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Clan de depósitos IOCG	1
1.2	Mercado del Fe	5
1.3	Distrito Fortress	5
1.4	Propiedad minera	7
1.5	Hipótesis de trabajo	7
1.6	Objetivos.....	8
1.6.1	Objetivo general	8
1.6.2	Objetivos específicos.....	8
1.7	Ubicación y vías de acceso	8
1.8	Metodologías	9
1.8.1	Recopilación de antecedentes geológicos y mineros de la zona	10
1.8.2	Trabajo de terreno.....	10
1.8.3	Procesamiento de datos	11
2	Antecedentes geológicos	12
2.1	Geología distrital.....	12
2.1.1	Unidades estratificadas	12
2.1.2	Rocas Intrusivas.....	14
2.1.3	Depósitos sedimentarios	15
2.2	Geología estructural.....	15
3	Resultados.....	18
3.1	Litología.....	18
3.1.1	Diorita - Cuarzodiorita.....	19

3.1.2	Diques andesíticos	21
3.1.3	Clasificación de Rocas ígneas	23
3.1.4	Composición de Plagioclasas	24
3.1.5	Depósitos coluviales	24
3.1.6	Depósitos aluviales	25
3.1.7	Depósitos Antrópicos	26
3.2	Alteración hidrotermal y mineralización	27
3.2.1	Zonas de actinolita.....	28
3.2.2	Zona de arcillas - sericita.....	31
3.2.3	Zona de silicificación.....	31
3.2.4	Zona de silicificación – arcillas – sericita - óxidos Fe - Mn.....	33
3.2.5	Mineralización de magnetita	34
3.3	Estructuras	37
3.3.1	Diaclasas.....	38
3.3.2	Fallas.....	39
3.3.3	Diques, vetas y vetillas	40
4	Discusiones.....	42
4.1	Relación del intrusivo diorítico - cuarzodiorítico con la MCG y el CPET.....	42
4.2	Alteración hidrotermal y mineralización del distrito.....	43
4.3	Comparación del distrito con yacimientos proximales.....	45
4.4	Relación de las estructuras con el Sistema de Fallas El Tofo.....	47
4.5	Síntesis geológica	49
4.6	Implicancias en la exploración geológica.....	50
5	Conclusiones.....	52

5.1	Recomendaciones	53
5.	Bibliografía.....	55
6.	Anexos.....	66

Índice de Figuras

Figura 1.	Modelos genéticos para depósitos IOA. A) Modelo puramente magmático, i.e., inmiscibilidad líquida (Palma, no publicado). B) Modelo puramente hidrotermal i.e., metasomatismo de Fe (Palma, no publicado). C) Modelo magmático-hidrotermal para el depósito El Romeral (Rojas et al., 2018a), basado en el modelo de flotación de magnetita (Knipping et al., 2015a, b).....	3
Figura 2.	Modelos genéticos asociado al origen de los fluidos hidrotermales en depósitos IOCG. A) Origen magmático. B) Origen de salmueras de cuencas. Extraído de (Barra et al., 2017).....	4
Figura 3.	Variaciones del precio del Fe (62% contenido de Fe) durante durante los años 2017 y 2022. Extraído del Mercado mundial de commodities de New York (Investing, 2022).....	5
Figura 4.	Depósitos de Fe dentro de la Franja Ferrífera Chilena. A) Principales depósitos IOA e IOCG. Modificado de (Barra et al., 2017). B) Distrito Fortress (rectángulos azules) y yacimiento IOA El Tofo.....	6
Figura 5.	Ubicación y vías de acceso hacia el Distrito Fortress, Región de Coquimbo, Chile.	9
Figura 6.	Imagen satelital con puntos de control medidos durante el trabajo de campo dentro del Distrito Fortress. Los puntos de control corresponden a los indicados en la Tabla 1..	10
Figura 7.	Mapa geológico del Distrito Fortress 1:65.000. Los rectángulos azules representan las propiedades del distrito. Modificado de Creixell et al. (2012).....	12
Figura 8.	Sección estructural correspondiente a una traza ubicada a 6 kilómetros hacia el NE del Distrito Fortress. La figura muestra los miembros de la Formación Punta del Cobre en verde con arquitectura de hemigrabenes invertidos. El bloque yacente de la falla el Tofo, muestra importante silicificación con sericita y arcillas (Creixell et al., 2012). La imagen al costado derecho de la sección presenta la traza del perfil en una línea negra y en el rectángulo azul el Distrito Fortress. Referencia en la Figura 7.....	17
Figura 9.	Mapa de litologías escala 1:4.000 del Distrito Fortress.	18

Figura 10. Intrusivo diorítico - cuarzodiorítico. A) Afloramiento de intrusivo meteorizado (IA: 2). B) Afloramiento de intrusivo fresco cortado por vetillas de cuarzo y epidota - clorita (IA: 1). C) Muestra de mano de intrusivo diorítico..... 19

Figura 11. Fotomicrografía con luz transmitida de la diorita. A) - B) Muestra **FC004TA** a nicoles paralelos y cruzados, aumento de 4X. Cuarzodiorita compuesta por plagioclasa, biotita y escazo cuarzo. C) Muestra **FC016TB** a nicoles cruzados, aumento de 4X. Cuarzodiorita compuesta por plagioclasa, hornblenda, biotita y cuarzo. D) Muestra **FC059TA** a nicoles cruzados, aumento de 4X. Cuarzodiorita compuesta por plagioclasa, clino y ortopiroxeno, biotita y cuarzo. Abreviaturas: plagioclasa (Plg), biotita (Bt), cuarzo (Qz), hornblenda (Hrb) clinopiroxeno (Cpx), ortopiroxeno (Opx)..... 20

Figura 12. Diques hipabisales. A) - B) Afloramientos de diques. Las líneas negras representan el contacto de los diques con la roca hospedante. C) Muestras extraídas de la familia de diques con masa fundamental aparentemente vítrea y fenocristales de plagioclasa. D) Muestra de la familia de diques con masa fundamental microcristalina y fenocristales de plagioclasa de hasta un cm. 21

Figura 13. Fotomicrografía con luz transmitida de las familias de diques. A) – B) muestra **FC016TB** a nicoles paralelos y cruzados, con aumento de 4X. Dique hipabisal andesítico de hornblenda con masa fundamental vítrea. Fenocristales de plagioclasa y microlito de plagioclasa, hornblenda, y biotita. B) Contacto entre cuarzodiorita y dique andesítico con masa fundamental vítrea. Contacto roca de caja incorpora parte del dique afanítico (polígono con borde amarillo) y el dique también incorpora parte de la roca hospedante. C) – D) Muestra **FC044TA** a nicoles paralelos y cruzados con aumento de 4X. Dique hipabisal diorítico compuesto por fenocristales plagioclasa, hornblenda, y biotita y masa fundamental cristalina con microlito compuesto por la misma mineralogía. Maficos se encuentran de parcial a completamente obliterados. plagioclasa (Plg), biotita (Bt), cuarzo (Qz), hornblenda (Hrb)..... 22

Figura 14: Diagrama de clasificación de rocas ígneas intrusivas (Streckeisen, 1976). En color verde se aprecia los resultados de las descripciones a muestra de mano y en color rojo los resultados a microscopio petrográfico..... 23

Figura 15. Tabla 2A) Resumen de las mediciones en maclas de plagioclasas. El símbolo de estrella marca las muestras correspondientes a diques. B) Grafico utilizado para determinar la composición de las plagioclasas (Na-Ca) respecto al ángulo de extinción promedio (Chirif, 2010). 24

Figura 16. Cobertura sedimentaria. A) Fotografía panorámica con mapeo superficial de las unidades litológicas del Distrito Fortress (Figura 9). B) Depósitos coluviales. C) Depósitos aluviales.....	26
Figura 17. Plataformas de línea férrea. A) Sección transversal de las plataformas. B) Cobertura superficial de las plataformas (vista en planta). C) Pendiente del talud de la plataforma. D) y E) Rodados de magnetita masiva, actinolita y apatito.	27
Figura 18: Escala de intensidades para la alteración hidrotermal. El nivel uno representa la roca fresca, y el nivel cuatro la roca con textura totalmente obliterada.	27
Figura 19. Mapa de alteración hidrotermal y mineralización escala 1:4.000 del Distrito Fortress. Notar que en el sector occidental del distrito se reconoció una veta de magnetita y predomina la alteración de actinolita. En el sector oriental, se reconocieron 5 vetas de magnetita y predomina la alteración a arcillas, sericita y silicificación.....	28
Figura 20. Zona actinolita. A) - B) Afloramientos con vetillas de actinolita. C) Roca con actinolita en vetilla. D) Rocas extraídas de zonas donde la actinolita coexiste con silicificación, arcillas, sericita y óxidos de Mn.....	29
Figura 21. Fotomicrografía con luz transmitida de la zona de actinolita. A) Muestra FC004TA a nicoles paralelos, aumento de 4X. Vetilla de actinolita, junto con vetillas de cuarzo y alteración sericita en plagioclasa. Presenta diseminado opacos anhedrales. B) Muestra FC019TB a nicoles paralelos, aumento de 4X. Zona de alteración de actinolita, opacos de magnetita, turmalina, en menor proporción cuarzo, albita, clorita y epidota. C) muestra FC024TC a nicoles cruzados, aumento de 4X. Zona de alteración de actinolita con epidota y titanita. En menor proporción epidota y albita. D) muestra FC027TC a nicoles cruzados, aumento de 20X. Vetilla de act subhedrales con dos familias de cristales, con epidota y opacos subhedrales. Abreviaturas: actinolita (Act), albita (Ab), clorita (Chl), epidota (Ep), sericita (Ser), magnetita (Mt), turmalina (Tur), titanita (Ti)	30
Figura 22. Zona de arcillas – sericita. A) Afloramiento con textura obliterada de la roca hospedante. B) Corte paralelo a la dirección de la vetilla de sericita con magnetita diseminada. C) - D) Rocas extraídas cercanas al núcleo de alteración y de la zona de vetillas, respectivamente.	31
Figura 23. Zona silicificada. A) - B) Afloramientos color anaranjado a blanquesinos. C) - D) Rocas extraídas desde el núcleo de la alteración y de una zona distal al núcleo, respectivamente.	32

Figura 24. Fotomicrografía con luz transmitida de la zona de silicificación. A) Muestra **FC007TB** a nicols cruzados, aumento de 4X. Se reconocen cuarzo en desequilibrio con texturas de rotaciones de subgranos, migración de borde de grano, crecimiento mineral y recristalización tipo mosaico. Se observan cristales de plagioclasas sericitadas con crecimiento de cristales de albita y titanita. Presenta diseminado opacos de magnetita. B) Muestra **FC024TA** a nicols cruzados, aumento de 4X. Se reconocen cuarzos con texturas de rotaciones de subgranos, migración de borde de grano, crecimiento mineral. C) Muestra **FC025TC** a nicols cruzados, aumento de 4X. Se observa cuarzo con texturas de rotaciones de subgranos, migración de borde de grano, crecimiento mineral y recristalización tipo mosaico. Tiene diseminado abundante de opacos de magnetita. D) Muestra **FC063TA** a nicols cruzados, aumento de 4X. Se reconoce cuarzo con texturas de rotaciones de subgranos, migración de borde de grano, crecimiento mineral y recristalización tipo mosaico. Además, presenta abundante diseminado de opacos asociados espacialmente con cumulos de agregados microcristalinos de epidota. Abreviaturas: actinolita (Act), albita (Ab), epidota (Ep), sericita (Ser)..... 33

Figura 25. Zona silicificación – arcillas – sericita – óxidos de Fe y Mn. A) Afloramiento de roca silicificada. B) Afloramiento con arcillas, limolitas, magnetita diseminada y silicificación. C) Muestras extraídas de la zona silicificada con vetillas de magnetita y actinolita. D) Muestra de roca con magnetita – goetita - hematita y arcillas, además de actinolita-limolitas y óxidos de Mn. 34

Figura 26. Vetas de magnetita. A) - B) Zona de alteración con dique brechizado y harina de falla. Hacia el borde del dique se observa una veta de magnetita. La línea roja representa la forma sigmoide de la veta. C) Dique (límites del dique en negro) y hacia la derecha veta de magnetita que bifurca desde el dique. D) Rocas extraídas de la veta de magnetita anhedral, donde se observa la magnetita siendo oxidada a goetita y hematita con aspecto terroso. E) Vetillas de magnetita en la zona occidental del distrito. 36

Figura 27. Fotomicrografía con luz transmitida de las vetas y diseminación de magnetita. A) Muestra **FC004TA** a luz reflejada, aumento de 20X. Dos tipos de magnetita diseminada, una euhedral (V) y otra anhedral (I). La magnetita euhedral, presenta remplazo de hematita tabular. Se observa un cristal cubico reemplazado totalmente por goetita. B) Muestra **FC035TA** a luz reflejada aumento de 40X. Acercamiento a la magnetita diseminada V, con remplazo de hematita tabular dentro de la magnetita. C) Muestra **FC025TB** luz reflejada, aumento de 20X. Núcleos de alteración

presenta vetillas de magnetita (IV) y goetita (II) concéntricas alrededor de oquedades. Dentro de las oquedades existe relleno de hematita coliforme (IV). D) Muestra **FC026TC** a luz reflejada, aumento 20X. Veta de magnetita, se distingue una magnetita-hematita (II) euhdrales bien desarrollada de hasta 4 mm, y una segunda familia que no supera los 0,2 mm (III). Además, se pueden distinguir halos de goetita (II) alrededor de la magnetita. 37

Figura 28. Mapa de estructuras escala 1:4.000 del Distrito Fortress. Las zonas de falla (F) representan las estructuras reconocidas en los diferentes sectores del distrito..... 38

Figura 29 Sistema de diaclasas conjugadas. A) Fotografía en planta de afloramientos en la diorita - cuarzodiorita. B) Diagrama de rosetas sistema de fracturas conjugadas. Flechas negras corresponden a la dirección de esfuerzo compresivo (σ_1), y las flechas grises indican la dirección del esfuerzo extensivo (σ_3). Las líneas amarillas representan la familia de fracturas NS, y las líneas azules representan la familia de fracturas WNW. C) Diagrama de concentración de polos que representa los planos de rumbo y manteo medidos. 39

Figura 30. Fallas. A) - B) Sector F1 donde en A) zona de daño donde se curvan las fracturas. B) Plano de falla NS manteo de 65° aprox, con deformación frágil. C) Diagrama de rosetas de las fallas. D) - E) Zona de falla del sector F4 con brecha, harina de falla y el emplazamiento de una veta de magnetita y un dique. Los polígonos con contorno negro muestran los clastos de la brecha de falla no cohesiva en diques andesíticos en contacto con la diorita de hornblenda. F) Diagrama de concentración de polos donde se aprecian los manteos de las fallas en el distrito. 40

Figura 31: Diques, vetas y vetillas. A) Diagrama de roseta y B) de concentración de polos, de datos medidos en diques. C) Diagrama de rosetas y D) de concentración de polos, de vetas y vetillas. 41

Figura 32. Secuencia paragenética preliminar del Distrito Fortress. Se determinan tres eventos, donde el primero y el segundo corresponden al desarrollo la mena de magnetita, y un tercer evento supérgeno. El grosor de las líneas muestran la proporción del mineral durante los eventos..... 44

Figura 33: Superposición de mapa de la Geología de Carrizalillo-El Tofo (Creixell et al., 2012) con mapas elaborados en este estudio. La leyenda de los mapas se puede observar en la Figura 7, Figura 9, Figura 19 y Figura 28. 47

Figura 34. Representación de las estructuras generadas por sistemas transpresivos siniestrales con un vector de esfuerzo principal NW. Los gráficos de rosetas adyacentes muestran la orientación de

los datos estructurales de diques, vetas, vetillas, estructuras y diaclasas. Extraído y modificado de (Van Der Pluijm & Marshak, 2004). 49

Figura 35. Sección esquemática del contexto regional del emplazamiento de los intrusivos y mineralización para el Distrito Fortress. En colores rojos y anaranjados se aprecia la Monzodiorita Cruz Grande (MCG) y el Complejo Plutónico El Tofo (CPET). Las estructuras con manteos al este son parte del Sistema de Fallas El Tofo (SFET) y con manteos al oeste es la Zona de Cizalle La Higuera (ZCLH). En color verde con baja opacidad muestra la zona de alteración actinolita y la de color amarillo con baja opacidad a la silicificación. Extraído y modificado de (Creixell et al., 2012; Martínez et al., 2019; Rojas et al., Genesis of the El Romeral iron ore: New contributions to the understanding of the iron oxide apatite deposits, 2017). 50

Índice de Tablas

Tabla 1. Coordenadas y superficie del Distrito Fortress 7

Figura 15. Tabla 2A) Resumen de las mediciones en maclas de plagioclasas. El símbolo de estrella marca las muestras correspondientes a diques. B) Grafico utilizado para determinar la composición de las plagioclasas (Na-Ca) respecto al ángulo de extinción promedio (Chirif, 2010). 24

Índice de Anexos

Anexo 1. Certificado de análisis químico de muestras extraídas de los sectores interesantes de las plataformas ferroviarias. Análisis realizado por el Laboratorio Químico San Lorenzo mediante ensayo de tubo de Davis. 66

Anexo 2. Resumen de descripciones de muestras de rocas en el Distrito Fortress. Código de muestras correlativo a los puntos identificados en la Figura 6 que es de donde se extrajo cada roca. Abreviaturas: Act: actinolita, Alb: albita, Arc: arcillas blancas, Bt: biotita, Chl: clorita, Epi: epidota, Feld: Feldespato K, Goe: goetita, Hem: hematita, Hrb: hornblenda, Mgt: magnetita, OxMn: óxidos de manganeso, OxCu: óxidos de cobre, Pir: Pirolusita, Plg: plagioclasa, Py: pirita, Qz: Cuarzo, Ser: sericita, Tur: turmalina, ?: incierto. 66

Anexo 3. Resumen de descripciones de cortes petro-calcográficos en el Distrito Fortress. Código de muestras correlativo a los puntos identificados en la Figura 6 que es de donde se extrajo cada roca. Abreviaturas: Act: actinolita, Ab: albita, Arc: arcillas blancas, Bt: biotita, Chl: clorita, Cpx: Clinopiroxeno, Epi: epidota, Esc: escapolita, Feld: Feldespato K, Goe: goetita, Hem: hematita, Hrb:

hornblenda, Id: iddingsita, Mgt: magnetita, Ol: olivino, Opx: ortopiroxeno, OxMn: óxidos de manganeso, OxCu: óxidos de cobre, Pir: Pirolusita, Plg: plagioclasa, Py: pirita, Qz: Cuarzo, Rt: rutilo, Ser: sericita, Ti: titanita, Tur: turmalina, Zr: Zircón. 69

Anexo 4. Tabla de datos estructurales medidos en el Distrito Fortress. Códigos correlativos con los puntos de control en la Figura 6. 71

SOLO USO ACADÉMICO

1 Introducción

1.1 Clan de depósitos IOCG

El clan de los depósitos tipo IOCG está compuesto por diferentes tipos de depósitos ricos en Fe, incluyendo depósitos tipo magnetita-apatito o *iron oxide-apatite* (IOA), hierro-cobre-oro o *iron oxide-copper-gold sensu stricto* (IOCG) y estratoligados de Cu-Ag (Williams et al., 2005). Los depósitos IOA e IOCG son fuente importante de Fe, Cu y Au, y ocurren en diversos ambientes tectónicos y geográficos (Reich et al., 2022). Las edades de estos depósitos son variables y ocurren desde el Arqueano Tardío (Carajas, Brasil; Perez et al., 2019) al Plioceno (El Laco, Altiplano Chileno; Nystrom & Henriquez, 1994). En Chile, la mayoría de estos depósitos se ubican dentro de la Franja Ferrífera Chilena de edad Jurásica - Cretácica, la cual se extiende entre los 25°S a los 31°S en la Cordillera de la Costa (Oyarzun et al., 2003; Sillitoe, 2003).

Los depósitos IOA presentan como mena principal magnetita, la cual puede estar acompañada por cantidades variables de actinolita y apatito (Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005; Barton, 2014). En menor medida, pueden presentar albita, escapolita, piroxeno, epidota y escasos sulfuros, principalmente pirita y calcopirita (Reich et al., 2022). La alteración hidrotermal predominante es calco - sódica y los cuerpos de magnetita ocurren en forma de vetas, masivos, brechas y vetillas (Ruíz et al., 1965; Bookstrom, 1977; Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005).

Los depósitos IOCG presentan como mena principal calcopirita y en menor proporción bornita, las cuales pueden estar acompañadas con abundante magnetita, hematita especular y pirita (Hitzman et al., 1992; Groves et al., 2010; Barton, 2014; Barra et al., 2017). Como mineralogía de alteración ocurren minerales como albita, actinolita, epidota, biotita, ortoclasa, clorita, sericita y calcita. La alteración hidrotermal se caracteriza por ser del tipo calco - sódica en niveles profundos, potásica en nivel intermedio y sericita con silicificación en niveles someros (Hitzman et al., 1992; Groves et al., 2010; Barton, 2014; Barra et al., 2017). Los cuerpos mineralizados ocurren como vetas masivas en profundidad, *stockworks* y brechas en el sector intermedio, y en vetillas y diseminados en niveles superficiales (Hitzman et al., 1992; Groves et al., 2010; Barton, 2014; Barra et al., 2017).

El origen de los depósitos IOA continúa siendo un tema controversial, y se han postulado dos hipótesis históricas y contrapuestas: (a) la primera hipótesis comprende un origen puramente

magmático, el cual involucra la separación de un fundido inmisible rico en Fe-P desde un fundido silicatado, con la subsecuente intrusión y cristalización de un cuerpo rico en Fe en los niveles más someros (Nystrom & Henriquez, 1994; Naslund et al., 2002; Chen et al., 2010; Tornos et al., 2016; Velasco et al., 2016; Figura 1A), (b) la segunda hipótesis involucra un origen puramente hidrotermal, en donde la magnetita se formaría por el reemplazo metasomático de la roca de caja por la circulación de fluidos ricos en Fe, provenientes desde una fuente de origen magmático o no-magmático (Rhodes & Oreskes, 1995; Barton & Johnson, 1996; Rhodes & Oreskes, 1999; Sillitoe & Burrows, 2002; Barton & Johnson, 2004; Pollard, 2006; Dare et al., 2014;; Westhues et al., 2016; 2017a, b; Figura 1B).

Recientemente, una nueva hipótesis propone un origen magmático - hidrotermal para la mineralización de magnetita, conocido como “modelo de flotación” (Knipping et al., 2015a, b; Rojas et al., 2018a; Simon et al., 2018; Palma et al., 2020; Reich et al., 2022; Figura 1C). Este modelo propone que a medida que un magma silicatado de composición intermedia- máfica se enfría, cristalizaría magnetita primaria, la cual se caracteriza por presentar núcleos ricos en inclusiones minerales (Figura 1C1). En la superficie de los cristales de magnetita, se generaría nucleación y crecimiento de burbujas de fluido hidrotermal hipersalino, las cuales ascenderían por fuerza boyante positiva. Este fluido hidrotermal transporta Fe y otros metales (e.g., Cu, Au y S) como complejos clorurados (Figura 1C2). Posteriormente, el sistema es despresurizado por la generación de fallas normales asociados a la ZFA, lo que reduciría la solubilidad del Fe (Rojas et al., 2018a). Esto genera la precipitación de magnetita hidrotermal y otros minerales (e.g., piroxeno, actinolita, cuarzo y sulfuros) sobre la magnetita primaria (Figura 1C3). Finalmente, la recirculación de fluidos hidrotermales podría generar mineralización tardía de vetillas magnetita al interior del cuerpo mineralizado principal (Figura 1C4).

En los depósitos IOCG existe un consenso respecto al origen hidrotermal de la mineralización (Mumin et al., 2007; Barton, 2014). Sin embargo, continúa siendo controversial el origen o fuente de los fluidos mineralizadores (Barton, 2014; Barra et al., 2017). Las principales fuentes de fluidos propuestos para los depósitos IOCG son: a) provenientes de fuentes magmáticas (Hitzman et al., 1992; Pollard R., 2000; Rieger et al., 2010), donde se produce un metasomatismo del Fe que reemplaza la roca hospedante (Figura 2A), y b) que provienen de fluidos meteóricos o de salmueras de cuenca (Barton & Johnson, 1996; Chen et al., 2011) que son transportados por el calor de cuerpos magmáticos (Figura 2B).

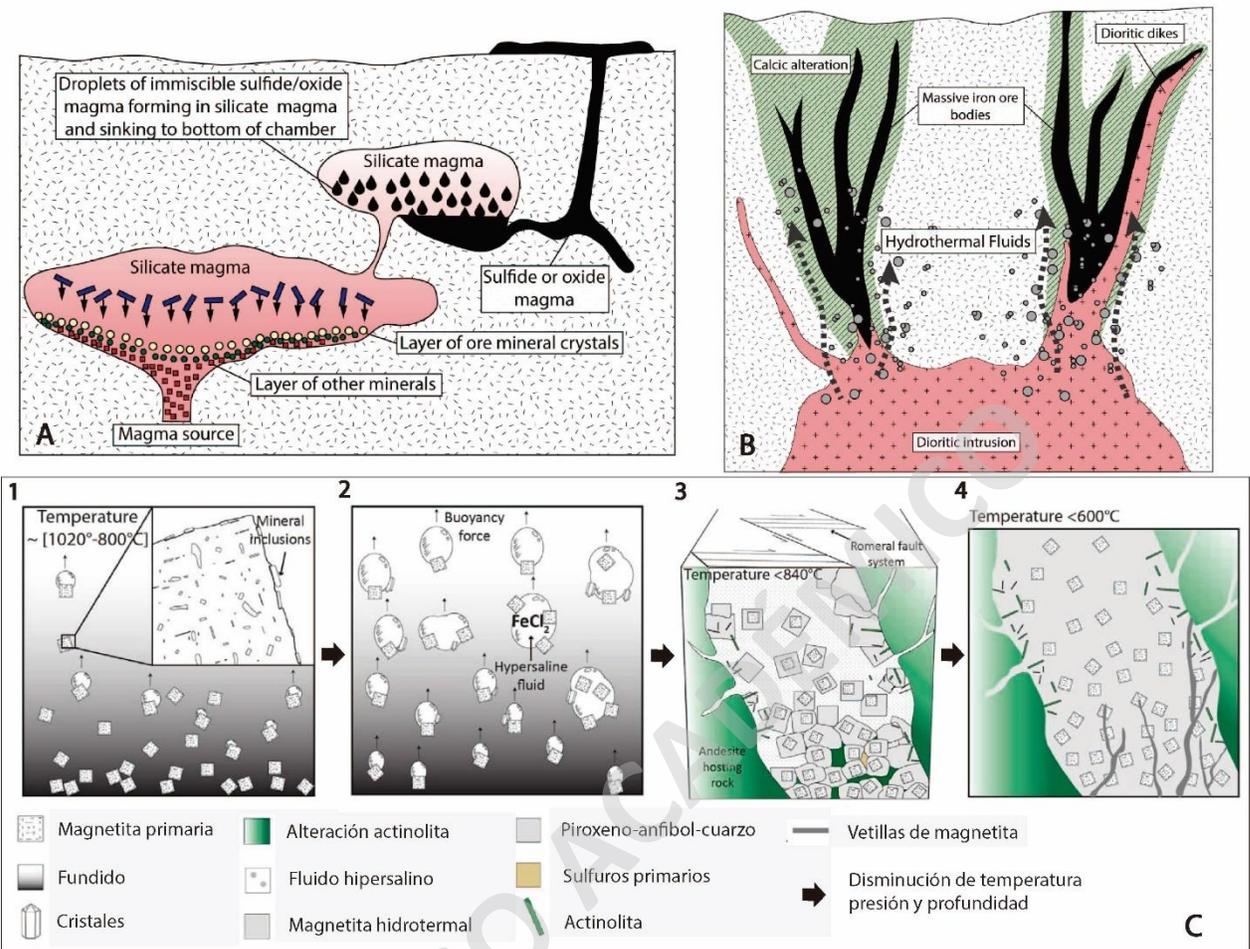


Figura 1. Modelos genéticos para depósitos IOA. A) Modelo puramente magmático, i.e., inmiscibilidad líquida (Palma, no publicado). B) Modelo puramente hidrotermal i.e., metasomatismo de Fe (Palma, no publicado). C) Modelo magmático-hidrotermal para el depósito El Romeral (Rojas et al., 2018a), basado en el modelo de flotación de magnetita (Knipping et al., 2015a, b).

Respecto a ambos tipos de depósito, se pueden reconocer características análogas de mineralización hospedada en rocas volcánicas – volcanoclásticas, fuertemente controlada por estructuras de la ZFA, espacial y temporalmente emplazados dentro de la FFC durante el Mesozoico, con desarrollo de alteración calco - sódica, y enriquecimiento de elementos como el Co, U y tierras raras (Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005; Barton, 2014; Barra et al., 2017).

Con base en lo anterior, diversos autores han propuesto una conexión genética entre los depósitos IOA e IOCG de la Cordillera de la Costa. En este contexto, los depósitos IOA corresponderían a la raíces o porción profunda de estos sistemas mineralizados, empobrecidos en sulfuros. Mientras que los depósitos IOCG corresponderían a la parte somera de esos sistemas, enriquecidos en sulfuros (Espinoza et al., 1996; Sillitoe, 2003). Así mismo, el modelo de flotación

de magnetita entrega una explicación plausible para la formación de ambos tipos de mineralización dentro de un mismo sistema en evolutivo (Barra et al., 2017; Knipping et al., 2015a, b; Reich et al., 2016; Sillitoe, 2003; Simon et al., 2018). Cabe aclarar que no necesariamente en todos los casos se desarrollarían ambos tipos de depósitos como parte de un mismo sistema mineralizado (Barra et al., 2017). Algunos ejemplos son los depósitos IOA como Los Colorados (Knipping et al., 2015a, b; Reich et al., 2016; Deditius et al., 2018; La Cruz et al., 2019) y Cerro Negro Norte (Raab, 2001; Salazar et al., 2020), además de los depósitos IOCG como Candelaria (del Real et al., 2018; 2021) y Mantoverde (Rieger et al., 2010; Simon et al., 2018; Childress et al., 2020). Por otra parte, estudios recientes en cristales de actinolita del Distrito Candelaria proporcionan una explicación diferente a la antes mencionada (del Real et al., 2021), la cual propone que ambos estilos de mineralización podrían estar asociados a episodios hidrotermales no equivalentes, atemporales y no necesariamente estarían asociados a una misma fuente magmática precursora (del Real et al., 2021).

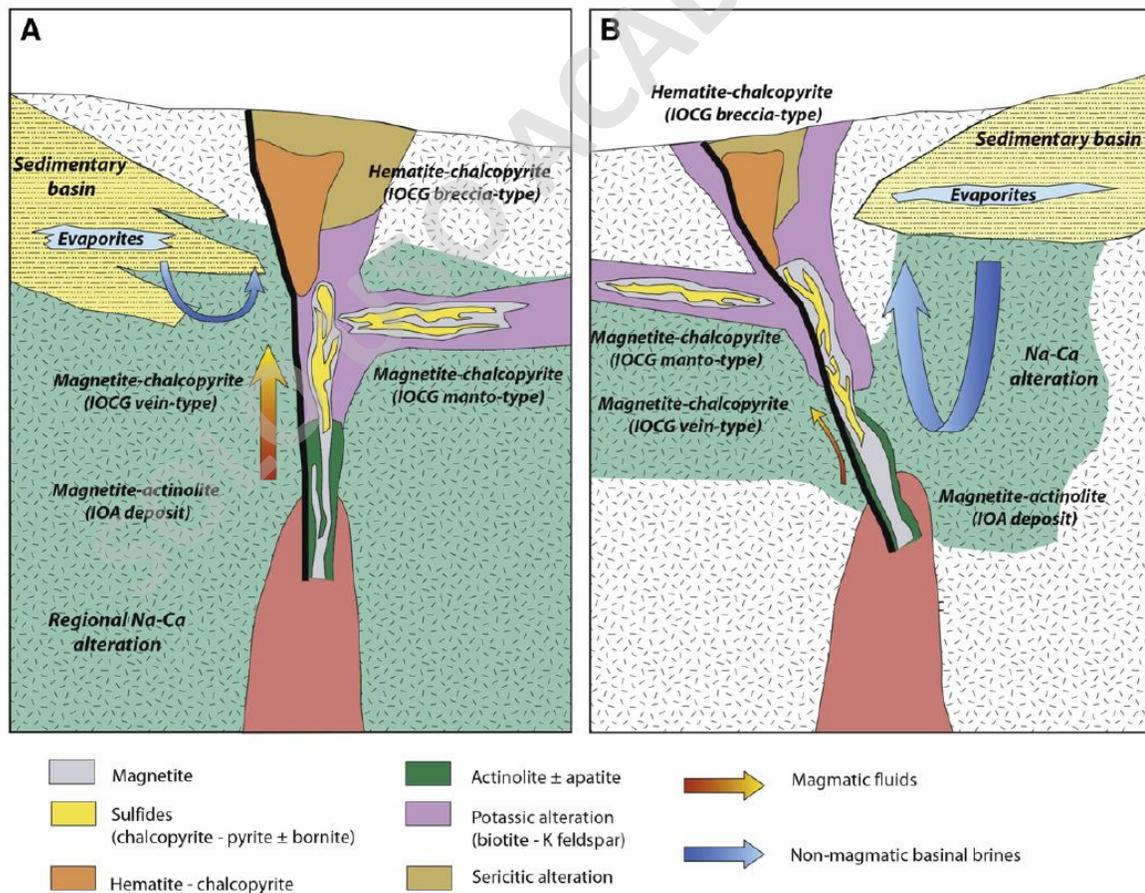


Figura 2. Modelos genéticos asociado al origen de los fluidos hidrotermales en depósitos IOCG. A) Origen magmático. B) Origen de salmueras de cuencas. Extraído de (Barra et al., 2017).

1.2 Mercado del Fe

Desde el año 2017, el mercado del Fe ha mantenido un valor atractivo para la comercialización de este *commoditie*, alcanzando un máximo histórico durante el mes de Julio del 2021 de US\$219,8/ton (Cochilco, 2021; Figura 3). Esta alza en el precio del Fe comienza en el primer semestre del 2020 manteniendo una tendencia alcista hasta el primer semestre del 2021 (Cochilco, 2021). Durante febrero del 2020 el Fe mantenía un precio promedio de US\$86,5/ton, aumentando a finales de año a US\$155,9/ton (Cochilco, 2021). El alza en el precio del Fe es producto de la fuerte demanda por parte de China, país que durante el 2020 fue responsable del 59% de la demanda a nivel mundial de este elemento y la baja producción por parte de Vale S.A. en Brasil, uno de los productores de Fe más grandes en el mundo. Actualmente, el valor medio de este *commoditie* de los últimos 30 días se encuentra en US\$127,1/ton (Investing, 2022).

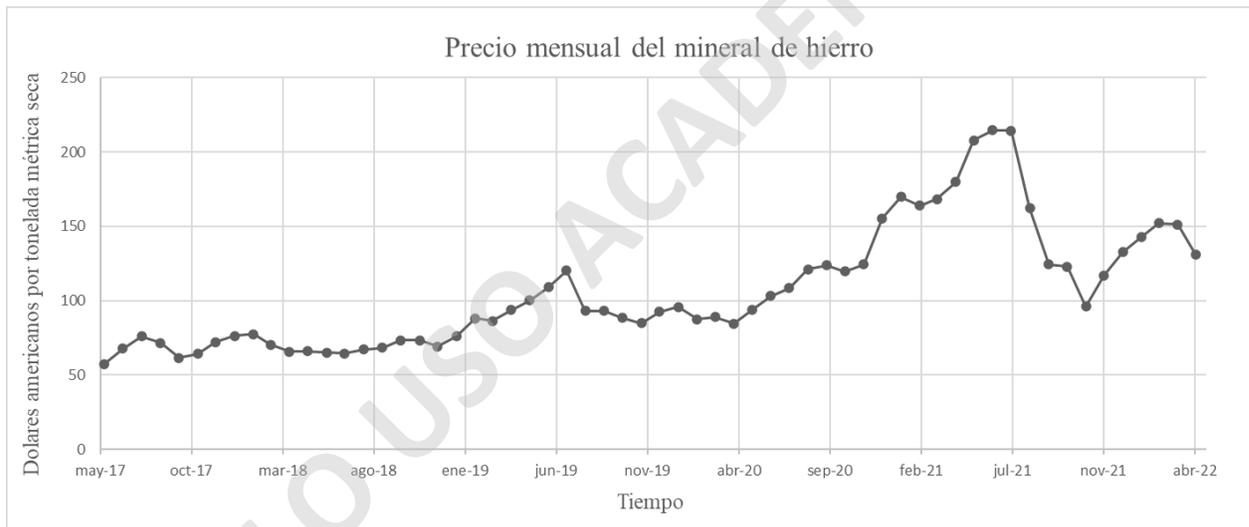


Figura 3. Variaciones del precio del Fe (62% contenido de Fe) durante durante los años 2017 y 2022. Extraído del Mercado mundial de commodities de New York (Investing, 2022).

1.3 Distrito Fortress

El Distrito Fortress, perteneciente a la empresa “*Inversiones, Inmobiliaria y Constructora Lobos e Hijos Limitada*”, se sitúa a dos kilómetros hacia el sureste de la localidad de Chungungo, entre los 29°27' S - 71°18' O y los 29°28' S - 71°16' O (Figura 4). El área de estudio se ubica dentro de la Franja Ferrífera Chilena (FFC) de la Cordillera de la Costa, en el dominio de la Zona de Falla de Atacama (ZFA) desarrollada durante el Cretácico Inferior (Naranjo, 1987; Oyarzun et al., 2003; Sillitoe, 2003).

Actualmente, el Distrito Fortress se encuentra en fase de exploración ante la posible ocurrencia de depósitos tipo IOA e IOCG, los cuales constituyen blancos potencialmente rentables de Fe, Cu y Au. Sin embargo, a la fecha no existen antecedentes geológicos relacionados a la alteración hidrotermal, mineralización y estructuras presentes en el área de estudio. Entre la región de Atacama y de Coquimbo existen numerosos depósitos del tipo IOA, tales como Los Colorados, El Romeral y Cerro Negro Norte, y depósitos del tipo IOCG, tales como Candelaria, Mantoverde y Dominga (Figura 4A). En particular, el Distrito Fortress se encuentra a 5 km al oeste del yacimiento IOA El Tofo (Figura 4B).

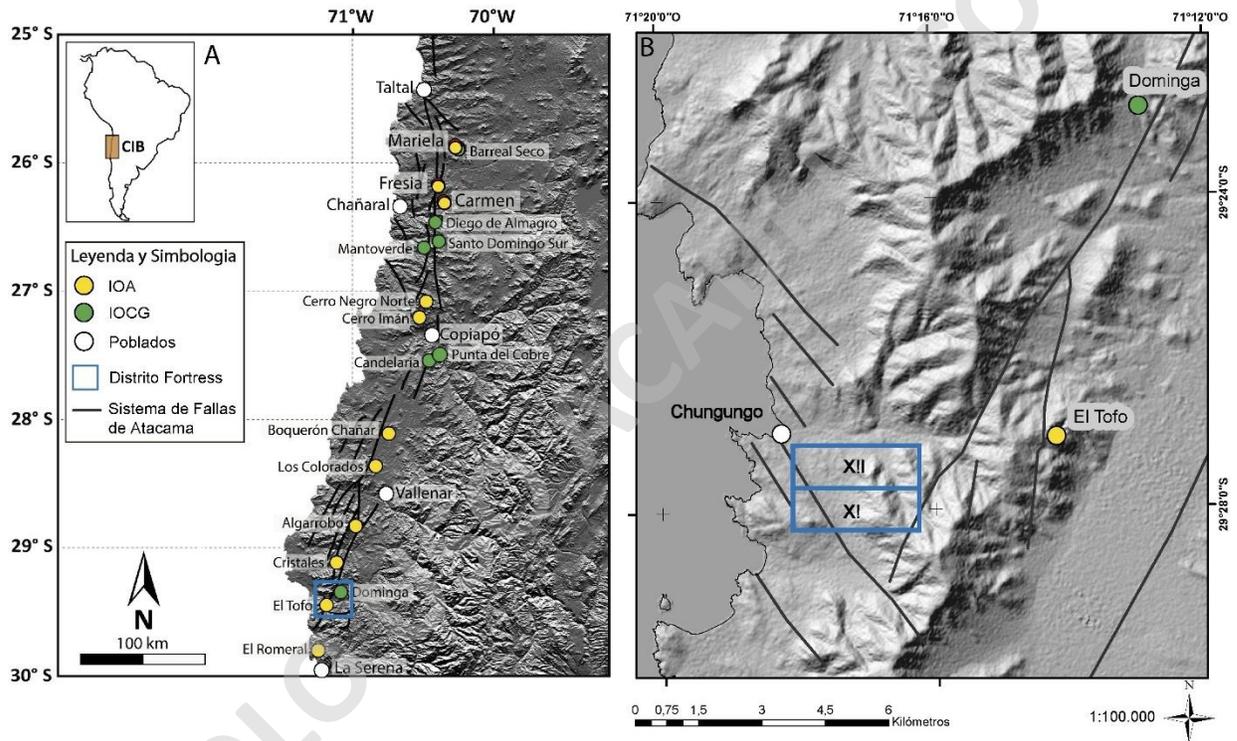


Figura 4. Depósitos de Fe dentro de la Franja Ferrífera Chilena. A) Principales depósitos IOA e IOCG. Modificado de (Barra et al., 2017). B) Distrito Fortress (rectángulos azules) y yacimiento IOA El Tofo.

Este trabajo de memoria tiene por objetivo caracterizar la geología 1:4.000 de la superficie del Distrito Fortress, además de identificar zonas de interés para la realización de estudios especiales en un futuro. El mapeo superficial incluye la descripción macroscópica en detalle de las distintas litologías, alteración hidrotermal, mineralización y estructuras de la zona de estudio. Adicionalmente, se realizaron descripciones de cortes transparentes-pulidos en muestras de roca representativas del distrito.

1.4 Propiedad minera

El Distrito Fortress consta de dos concesiones mineras (Tabla 1) situadas en el límite norte de la cuarta región, hacia el borde occidental de la Cordillera de la Costa, en el pueblo de Chungungo. Dentro de ellas, existen 7,5 km de plataformas para el transporte de material del yacimiento El Tofo hacia el Puerto Cruz Grande. Algunos sectores de las plataformas albergan concentraciones anómalas de magnetita que pareciera estar reforzando zonas cercanas a la quebrada Cruz Grande. Estas concentraciones anómalas de Fe son atractivas económicamente por su ocurrencia superficial y su cercanía con caminos habilitados. Como antecedente, en una campaña de terreno previa a este trabajo, se estimó como mínimo ~128 mil toneladas Fe totales para ambas propiedades (Jofré, 2021). Los análisis químicos de las muestras recolectadas indican una ley media de 67% Fe y una ley magnética sobre el 45% (Jofré, 2021).

Actualmente, los derechos de explotación del Distrito pertenecen a la empresa *Inversiones, Inmobiliaria y Constructora Lobos e Hijos Limitada*. Por otra parte, la empresa *Mining Iron Chungungo Limitada* (MINROCH) se encargará de la extracción del Fe de las plataformas. El proyecto cuenta con un plan de extracción y procesamiento de Fe que contempla la producción de 5.000 toneladas mensuales e inicios de actividades durante el 2023.

Tabla 1. Coordenadas y superficie del Distrito Fortress

Propiedades Mineras				
Propiedad	Punto	UTM WGS 84		Área
		Este	Norte	
FORTRESS XI 1/60	A	276.810	6.737.673	300 Ha
	B	279.798	6.737.669	
	C	276.808	6.738.670	
	D	279.800	6.738.673	
FORTRESS XII 1/60	C	276.808	6.738.670	300 Ha
	D	279.800	6.738.673	
	E	276.806	6.739.669	
	F	279.801	6.739.677	

1.5 Hipótesis de trabajo

Como hipótesis de trabajo se postula que la alteración hidrotermal y mineralización dentro del Distrito Fortress corresponderían a las del tipo magnetita-apatito o *iron oxide - apatite*, caracterizados por magnetita como su mena principal, junto con actinolita y apatito subordinados.

El emplazamiento de los fluidos hidrotermales se encontraría controlado por fallas y estructuras locales de orientación NW - NNW asociadas a la Zona de Fallas de Atacama.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

El objetivo general de este estudio es caracterizar la geología de superficie del Distrito Fortress, junto con la propuesta de una secuencia paragenética de alteración hidrotermal y mineralización, además de un modelo geológico evolutivo preliminar. Adicionalmente, se espera identificar potenciales zonas de interés económico dentro del distrito

1.6.2 Objetivos específicos

- A. Caracterizar de manera macroscópica y microscópica las distintas litologías, alteración hidrotermal y mineralización, mediante observaciones realizadas en terreno, descripción a muestra de mano y estudios petro-calcográficos.
- B. Identificar aspectos generales de la geología estructural por medio de características reconocidas en terreno.
- C. Determinar la distribución espacial de las unidades litológicas, alteración hidrotermal, mineralización y estructuras dentro del área de estudio.
- D. Integrar y comparar los resultados obtenidos para el Distrito Fortress con información geológica disponible de depósitos minerales cercanos al área de estudio
- E. Reconocer implicancias para la exploración geológica que se generen de este estudio.

1.7 Ubicación y vías de acceso

El Distrito Fortress se ubica en la Región de Coquimbo dentro de la provincia del Elqui en la comuna de La Higuera. Este Distrito se encuentra a 65 km hacia norte de la ciudad de La Serena (Figura 5A), específicamente a 2 kilómetros hacia el sureste del pueblo de Chungungo y a 5 kilómetros hacia el oeste del yacimiento El Tofo (Figura 5B). La vía de acceso más próxima (Ruta 1; Figura 2B) es la Ruta 5 norte en dirección hacia Caleta Hornos. Luego se accede al camino D-190 que termina en el pueblo de Chungungo. Esta ruta cruza por el medio del distrito. Desde el norte, se puede acceder mediante la Ruta 5 en dirección al sur (Ruta 2; Figura 2B), entre el sector

de Quebrada Seca y La Higuera, se accede al camino de tierra D-180 hacia el yacimiento El Tofo que posteriormente se une al camino D-190 (Figura 5B).

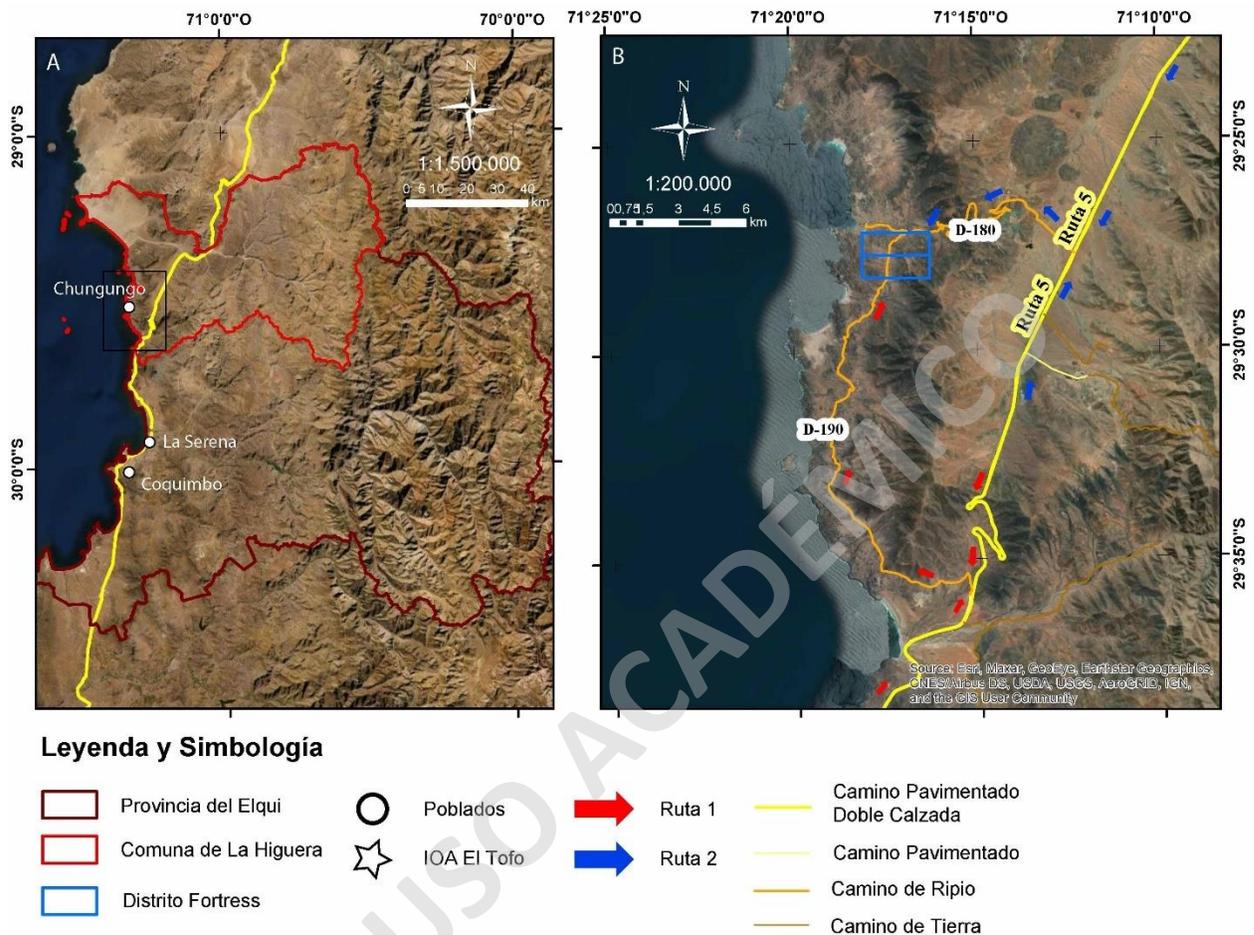


Figura 5. Ubicación y vías de acceso hacia el Distrito Fortress, Región de Coquimbo, Chile.

1.8 Metodologías

La metodología de trabajo se desarrolló en tres etapas. En la primera etapa, se recopiló la información bibliográfica y antecedentes geológicos de la zona de estudio. La segunda etapa contempló el desarrollo de una campaña de terreno durante el mes de noviembre del 2021. Finalmente, durante la tercera etapa se realizó el procesamiento de datos de terreno, la descripción macroscópica y microscópica de las muestras extraídas de las propiedades, además de la confección de mapas geológicos.

1.8.1 Recopilación de antecedentes geológicos y mineros de la zona

En primera instancia, se recopiló la bibliografía sobre los depósitos IOA e IOCG de la Cordillera de la Costa, además de los antecedentes disponibles de la zona de estudio, para realizar el estado del arte de este trabajo y la planificación de terreno. Adicionalmente, se confeccionó un plan de trabajo de terreno, el cual contempló 7 días de trabajo efectivo, 1 día de gabinete y 2 días de viaje. El financiamiento de la campaña fue cubierto por la empresa *Mining Iron Chungungo Limitada*.

1.8.2 Trabajo de terreno

Entre el 14 y el 23 de noviembre del 2021 se realizó el levantamiento geológico de superficie del Distrito Fortress. Esta etapa incluyó la descripción de afloramientos, con énfasis en la litología, alteración hidrotermal y mineralización, además de la medición de rumbos y manteos de vetas, vetillas, diques, diaclasas y fallas observadas en campo. Luego, se confeccionaron mapas preliminares de las principales unidades geológicas observadas dentro del distrito. Adicionalmente, se realizó la toma de muestras de roca representativas para la descripción macroscópica y la elaboración de secciones transparentes - pulidas. En total se obtuvieron 72 puntos de control y se midieron 255 datos estructurales (Figura 6).

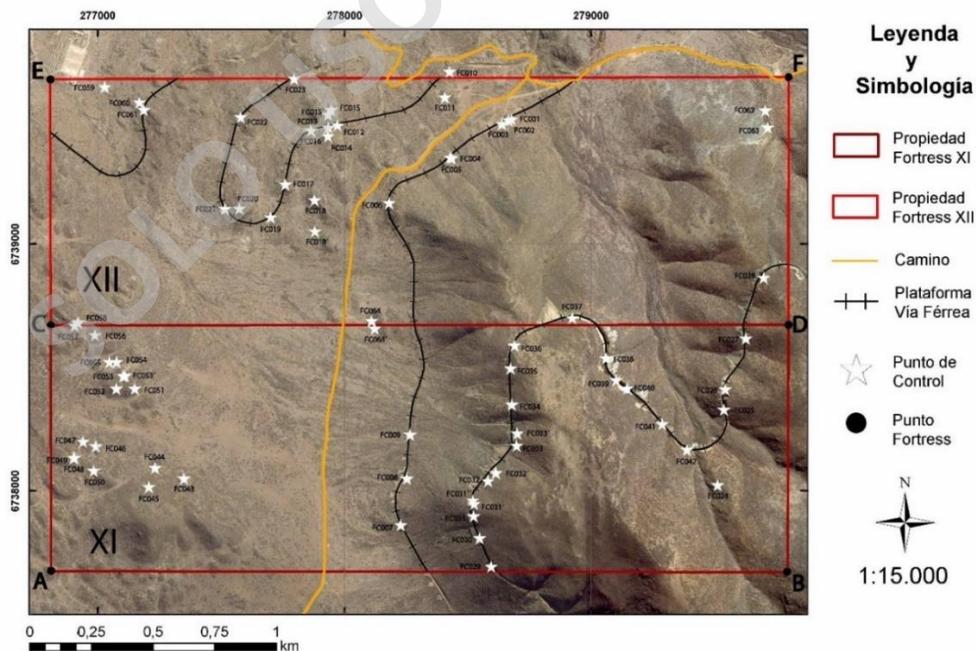


Figura 6. Imagen satelital con puntos de control medidos durante el trabajo de campo dentro del Distrito Fortress. Los puntos de control corresponden a los indicados en la Tabla 1.

1.8.3 Procesamiento de datos

La información de terreno fue digitalizada en una base de datos que incluye las coordenadas, características geológicas principales, datos estructurales, fotografías y otras observaciones. Posteriormente, se procedió con la descripción de muestras, confección de mapas geológicos, interpretación de datos y correlación de datos con antecedentes ya publicados.

1.8.3.1 Descripción de muestras

Para la realización de esta tesis se realizó una descripción macroscópica de 94 muestras de roca extraídas de los puntos de control (Figura 6). Se seleccionaron 20 muestras representativas de los distintos tipos de rocas y alteración hidrotermal para la confección de secciones transparentes - pulidas, financiados por la Escuela de Geología de la Universidad Mayor. La mineralogía y texturas se describieron en el laboratorio de microscopía de la misma institución, utilizando un microscopio petrográfico modelo Nikon Eclipse E200, que incluye una cámara DS - U3. Además, se utilizó el método de Michelle Levy (Chirif, 2010) para determinar cuantitativamente la composición de las plagioclasas de los diques e intrusivos.

1.8.3.2 Confección de mapas y elaboración de la información

Se confeccionaron tres mapas geológicos 1:4.000: (1) un mapa litológico, (2) un mapa de alteración hidrotermal y mineralización, y (3) un mapa estructural. Posteriormente, estos datos fueron integrados para definir posibles zonas con potencial económico y los posibles controles asociados a su formación.

1.8.3.3 Análisis de estructuras

Para el análisis estructural se utilizó el *software* Stereonet (Allmendinger et al., 2012). Este programa permite visualizar fácilmente la orientación de los planos de las diferentes estructuras (diacclasas, vetas, vetillas, diques y fallas) mediante diagramas de polos y rosetas. De esta forma, se puede definir y extrapolar las direcciones de estructuras que mantienen el control de la mineralización en el Distrito Fortress.

2 Antecedentes geológicos

2.1 Geología distrital

Los antecedentes geológicos del Distrito Fortress se encuentran contenidos dentro de la geología del sector de Carrizalillo - El Tofo 1:100.000, correspondiente a una carta geológica de Chile confeccionada por Creixell et al., 2012 (Figura 7).

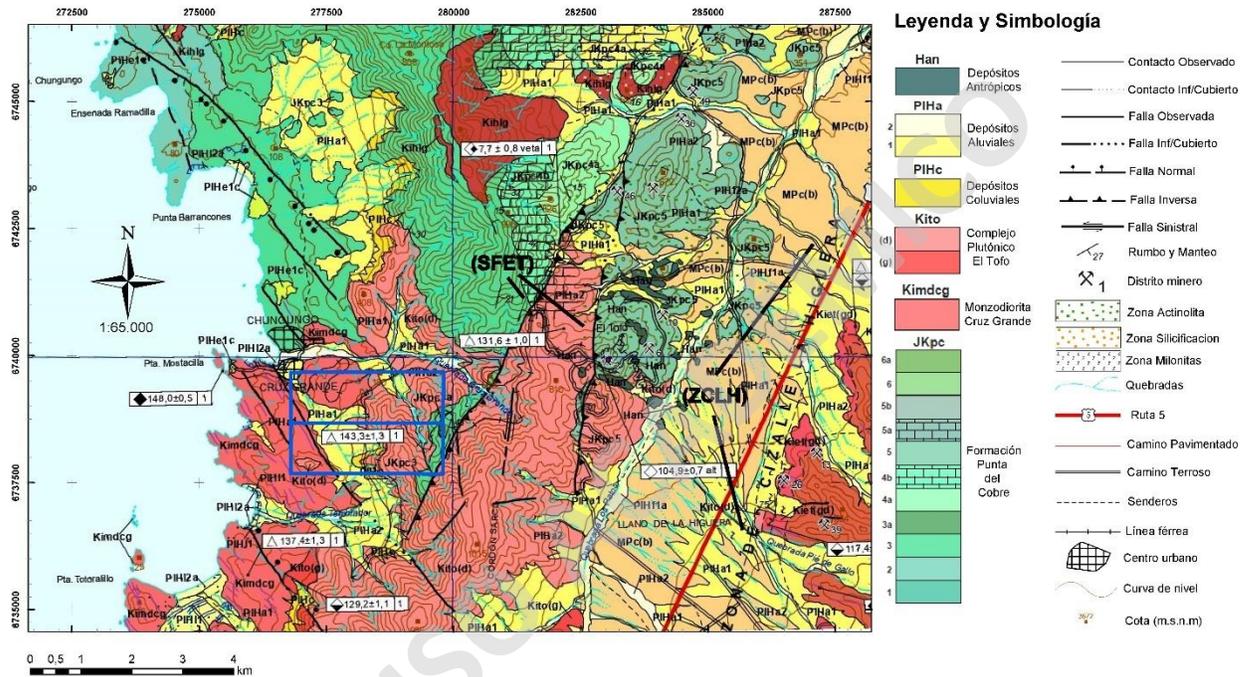


Figura 7. Mapa geológico del Distrito Fortress 1:65.000. Los rectángulos azules representan las propiedades del distrito. Modificado de Creixell et al. (2012).

2.1.1 Unidades estratificadas

2.1.1.1 Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior – Aptiense)

La Formación Punta del Cobre corresponde a una secuencia volcánica y sedimentaria de edad Jurásica-Cretácica que se distribuye como una franja irregular con orientación N - NE. En el sector de la Carrizalillo, se compone principalmente por lavas, brechas, tobas, areniscas y calizas (Creixell et al., 2012; Figura 7). El miembro basal no está expuesto en este sector y se encuentra en disconformidad sobre la Formación Canto del Agua hacia el sur de la quebrada Carrizalillo en contacto con la falla Las Leñas.

En el sector de Carrizalillo, la formación Punta del Cobre se subdivide en seis miembros (Creixell et al., 2012; Figura 7), los cuales desde su base a techo se componen por:

Areniscas cuarcíferas: es una secuencia clástica fina que se compone principalmente por areniscas cuarcíferas intercaladas con brechas, limolitas y areniscas calcáreas con trigonias y gastrópodos.

Brechas epiclásticas: secuencia compuesta por brechas con fragmentos andesíticos y afaníticos de plagioclasa. Tiene matriz fina y con cristales de plagioclasa.

Andesitas ocoíticas vesiculares: esta secuencia consiste principalmente en lavas de composiciones basálticas a andesíticas - basálticas, la cuales se encuentran intruidas por el Complejo Plutónico El Tofo y la monzodiorita Cruz Grande.

Secuencia sedimentaria compuesta, de base a techo, por brechas areniscas y calcilitas, miembro que aflora en la quebrada Los Choros y se extiende desde la ladera oeste del cerro Punta Blanca hasta el flanco sureste del cerro La Montosa.

Secuencia de lavas andesíticas: son intruidas por el complejo plutónico La Higuera y El Trapiche. De base a techo se compone por lavas porfídicas de color negro que se intercalan con brechas finas y areniscas verdosas. Sobre estas yacen lavas con textura de autobrecha. En la franja oriental, afloran lavas daciandesitas con textura porfídica. Esta secuencia presenta alteraciones propilítica, cuarzo - sericita, argílica, actinolitización y silicificación, en zonas cercanas al yacimiento Dominga, El Tofo y El Pleito (Figura 4).

Andesitas rojas alternadas con brechas epiclásticas e intercaladas con areniscas lenticulares: secuencia de lavas andesíticas y brechas epiclásticas. De base a techo, se compone de areniscas intercaladas con brechas volcánicas. Sobre estas yace una alternancia de lavas andesíticas y brechas epiclástica.

El miembro basal (1) de esta formación presenta una fauna fósil compuesta por bivalvos, trigonias, celenterados y cefalópodos que indican un rango entre Titoniense - Valanginiense correspondiente al piso más antiguo de la formación (Covacevich, 1980). El tercer miembro de esta formación se encuentra intruido por la Monzodiorita Cruz Grande de edades U/Pb en circones de $137,4 \pm 1,3$ Ma - $143,3 \pm 1,3$ Ma (Creixell et al., 2012). Así mismo, edades U/Pb en circones en un domo riolítico indican edades de $131,5 \pm 1,5$ Ma (Creixell et al., 2012). En el sexto miembro, edades U/Pb en circones dentro de domo fragmentado indica edades de $118,7 \pm 3$ Ma (Creixell et al., 2013).

2.1.2 Rocas Intrusivas

2.1.2.1 Monzodioritas Cruz Grande (143 - 137 Ma)

Este cuerpo intrusivo aflora al occidente del Cordón Sarco, desde la quebrada Cruz Grande (Figura 7) hacia el sur de la quebrada Temblador, y corresponde a una monzodiorita con anfíbola y biotita con una marcada foliación magmática (Creixell et al., 2012). Este cuerpo presenta enclaves dioríticos, recristalización de plagioclasas, máficos deformados, además de cuarzo y biotita. Adicionalmente, intruye al miembro tres de la Fm. Punta del Cobre, y del mismo modo, es intruído por el Complejo Plutónico El Tofo.

Esta unidad presenta edades U/Pb en circones que indican $143,3 \pm 1,3$ Ma, medidos en la quebrada Cruz Grande (Creixell et al., 2012). Hacia la quebrada Temblador, dataciones U/Pb en circones, indican edades de $137,4 \pm 1,3$ Ma (Creixell et al., 2012).

2.1.2.2 Complejo Plutónico El Tofo (132 - 127 Ma)

El Complejo Plutónico El Tofo se ubica hacia el oeste de la Zona de Cizalle La Higuera (ZCLH), entre la quebrada Cruz Grande (Figura 7) y la quebrada Temblador (Creixell et al., 2012). Este complejo intruye a la Formación Punta del Cobre y a la Monzodiorita Cruz Grande (Creixell et al., 2012). Se infiere un contacto milonítico al este con el Complejo Plutónico El Trapiche, en la ZCLH. Además, se encuentra deformado por el Sistema de Fallas El Tofo (Creixell et al., 2012). Esta unidad se subdivide en dos miembros que se componen por:

Miembro superior (d), compuesto por dioritas cuarcíferas de anfíbola y clinopiroxeno, además de tonalitas de anfíbola y clinopiroxeno. Presenta alteración hidrotermal asociada al reemplazo de minerales ferromagnesianos por actinolita, clorita, epidota y titanita, y en sericita en feldespatos. Hacia el norte del Cordón Sarco, se identifican zonas actinolitizadas y silicificadas tanto en rocas dioríticas como en el miembro cinco de la Formación Punta del Cobre, asociadas a cuerpos vetiformes de magnetita - apatito. En menor proporción, afloran zonas con limonitas y alunita asociadas a alteración supérgena.

Miembro inferior (g), compuesto por granitos de biotita y anfíbola con texturas de deformación magmática. Las anfíbolas, presentan reemplazo de titanita y cuarzo, además de cristales accesorios de circón y titanita.

El miembro (d) de esta unidad, indica edades U/Pb en circones de $131,6 \pm 1,0$ Ma, en una diorita ubicada al norte de la quebrada Los Patos, mientras que el miembro (g) indica edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en anfíbola de $129,2 \pm 1,1$ Ma, hacia el sur de la quebrada Temblador. Además, Emparán y Pineda (2000), indican edades U/Pb en circones de $126,5 \pm 2,1$ Ma para el miembro granítico en la quebrada El Olivo.

2.1.3 Depósitos sedimentarios

En el Distrito Fortress, existen un conjunto de depósitos no consolidados y semiconsolidados que se encuentran activos e inactivos de edades desde el Pleistoceno al Holoceno, respectivamente (Creixell et al., 2012). Los depósitos predominantes son de origen continental, los cuales se encausan principalmente por quebradas y laderas de altos topográficos (Creixell et al., 2012; Figura 7). Además, se reporta una serie de depósitos antrópicos asociados a la industria minera, tales como relaves, botaderos y plataformas ferroviarias (Creixell et al., 2012).

Estos depósitos sedimentarios se conforman por depósitos coluviales, los cuales corresponden a gravas mal seleccionadas con matriz de arena-gravilla, encausados en las laderas con pendientes altas y depósitos aluviales, compuestos principalmente por gravas matriz soportada, en donde se diferencia un nivel inferior con estratificación leve al nivel que yace sobre este (Creixell et al., 2012).

2.2 Geología estructural

En la Geología del Área Carrizalillo - El Tofo (Creixell et al., 2012) predomina el segmento sur del Zona de Fallas de Atacama llamada El Salado (Naranjo, 1987; Scheuber & Andriessen, 1990). Esta zona se compone por la Zonas de Cizalle la Higuera (ZCLH) y el Sistema de Falla El Tofo (Creixell et al., 2012; Figura 7) en el área de estudio. Hacia el norte de la carta, incluye al Sistema de Fallas Las Leñas (SFL) y la Zona de Cizalle Algarrobo (ZCA). Estos sistemas se caracterizan por tener una orientación NNE y cinemática transpresiva sinistral, deformando principalmente unidades Mesozoicas (Emparán & Pineda, 2000). Las unidades deformadas presentan una arquitectura homoclinal con inclinaciones hacia el este ($20^\circ - 45^\circ$) que afecta sobre todo a la formación Punta del Cobre (Creixell et al., 2012).

2.2.1.1 Zona de cizalle La Higuera

La zona de cizalle La Higuera, corresponde a una franja NNE que se distribuye desde la quebrada Los Patos y Los Choros Altos hacia el norte de la Sierra Cachiyuyo (Figura 8). Esta franja presenta un ancho de 200 m que disminuye hacia el norte la cual se compone de protomilonitas de biotita y anfíbola que afectan el sector occidental del complejo plutónico El Trapiche. Además, presenta una foliación penetrativa que indica inclinaciones entre 70° - 85° hacia el oeste e indicadores cinemáticos como porfiroclastos sigma, mica *fish* y enclaves sigmoidales, que indican un desplazamiento normal para el bloque oeste y un segundo evento de bandas de cizalle conjugadas que indican un acortamiento ortogonal tardío. Conjuntamente, presenta una sobreimposición progresiva de carácter frágil con cataclasitas y alteración hidrotermal (Creixell et al., 2012).

2.2.1.2 Sistema de Fallas El Tofo

El Sistema de Fallas El Tofo, presenta una estructura principal NNE, con una extensión aproximada de 25 km que se distribuye hacia el oeste de la quebrada Los Patos y se propaga hacia la Sierra del Pleito donde continua la zona de cizalle Algarrobo (Figura 8). Esta traza se inclina 75° - 85° hacia el sureste y presenta indicadores de deformación frágil a transicional. Esta estructura adosa a la formación Punta del Cobre y al complejo plutónico El Tofo, donde se reconocen cataclasitas y salbanda de falla con indicadores cinemáticos tipo bandas S´C y lentes sigmoidales que indican movimientos sinistres. Adicionalmente, a este sistema se le asocian estructuras menores con orientaciones NNE y NS, las cuales están rellenas de calcopirita y especularita (Creixell et al., 2012). Presentan indicadores cinemáticos como escalones RM, estrías horizontales, y fibras de recristalización que indican desplazamientos sinistres, e intrusión de diques andesíticos - basálticos (Creixell et al., 2012). Estructuras antitéticas con orientación WNW presentan una cinemática dextral, estriamiento horizontal y vertical (Creixell et al., 2012). Este sistema es consistente con el modelo de fracturas conjugadas Riedel y anti - Riedel de cinemática transpresiva sinistral (Arévalo & Creixell, 2009).

El evento transpresivo sinistral está delimitado por dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en actinolita neoformadas que indican edades de $121,9 \pm 1,5$ y $119,8 \pm 1,6$ Ma (Creixell et al., 2012). Dichas edades fueron medidas en actinolitas provenientes de halos de las vetas asociadas a estructuras NS y NNE, respectivamente (Creixell et al., 2012).

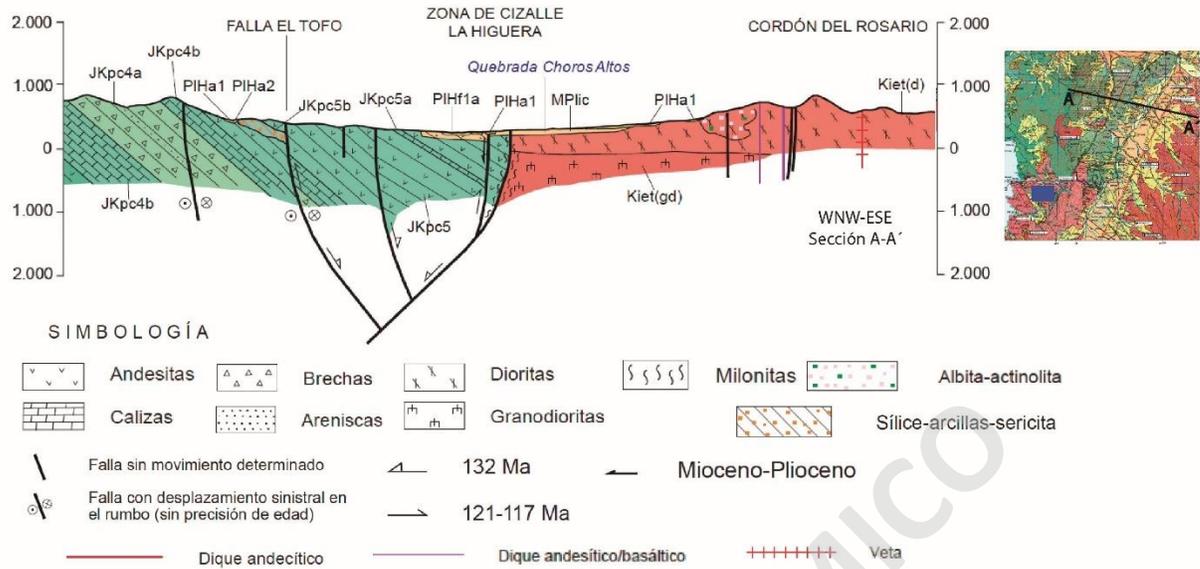


Figura 8. Sección estructural correspondiente a una traza ubicada a 6 kilómetros hacia el NE del Distrito Fortress. La figura muestra los miembros de la Formación Punta del Cobre en verde con arquitectura de hemigrabenes invertidos. El bloque yacente de la falla el Tofo, muestra importante silicificación con sericita y arcillas (Creixell et al., 2012). La imagen al costado derecho de la sección presenta la traza del perfil en una línea negra y en el rectángulo azul el Distrito Fortress. Referencia en la Figura 7.

3 Resultados

En el siguiente capítulo se presentan los resultados de este estudio, incluyendo el mapa de superficie realizado en terreno, así como las descripciones a escala de afloramiento, muestra de mano, petrografía y calcografía. Adicionalmente, se incluye la confección de mapas de litología, alteración hidrotermal y mineralización, además de estructuras.

3.1 Litología

En el Distrito Fortress se identifica un cuerpo intrusivo diorítico a cuarzodiorítico de hornblenda y biotita (Figura 9). Este intrusivo se extiende dentro de la mayor parte del distrito, y corresponde a la roca hospedante de la mineralización. También, se observa una sucesión de diques hipabisales andesíticos con texturas porfídicas y de orientación NW - NNW. Por otra parte, se reconoció una cobertura sedimentaria inactiva compuesta por depósitos coluviales ubicados en las altas pendientes del borde occidental de la Cordillera de la Costa. Se identifican diferentes pulsos de depósitos aluviales que se encuentran rellenando las principales quebradas del área de estudio, y depósitos antrópicos construidos para el transporte de material del yacimiento El Tofo.

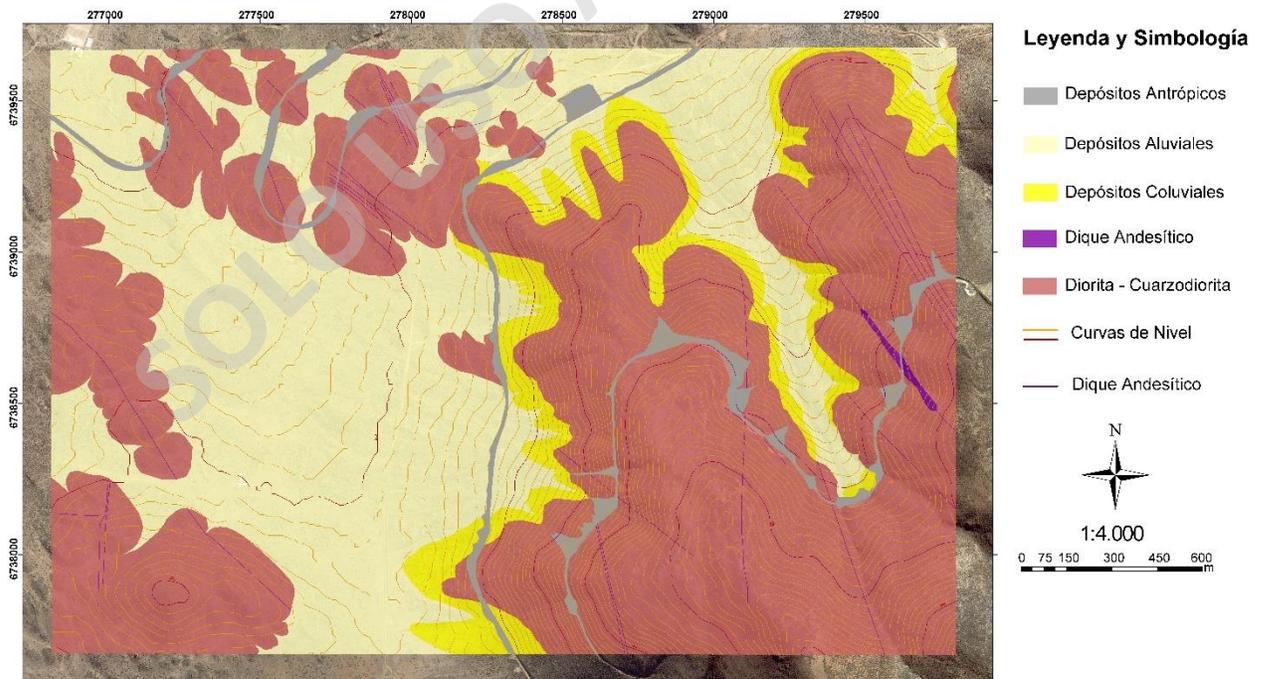


Figura 9. Mapa de litologías escala 1:4.000 del Distrito Fortress.

3.1.1 Diorita - Cuarzodiorita

Esta unidad se extiende dentro de toda la zona de estudio y corresponde a la roca hospedante de la mineralización de magnetita (Figura 9). En superficie, se observa como una cobertura de color marrón y presenta exfoliación en capas concéntricas producto de la meteorización (Figura 10A). A muestra de mano, la roca presenta una composición diorítica con texturas equigranular, holocristalina y fanerítica (Figura 10B, C). Hacia el sector occidental del distrito, las rocas frescas presentan textura porfírica e inequigranular con masa fundamental cristalina. Hacia el sector oriental, donde aumenta la altura de la topografía, se observan sectores en donde la textura de esta unidad se encuentra totalmente obliterada.

Con respecto a la mineralogía, se observan cristales de plagioclasa subhedrales (45 - 70% modal), acompañados de hornblenda (25 - 40% modal) y en menor proporción biotita (5 - 15% modal). En sectores donde se reconoce textura porfírica, se identifica una segunda familia de cristales euhedrales de plagioclasa y de hornblenda que alcanzan 1 cm de tamaño. Adicionalmente, se reconocen cúmulos con hornblenda, biotita y magnetita (leve magnetismo).



Figura 10. Intrusivo diorítico - cuarzodiorítico. A) Afloramiento de intrusivo meteorizado (IA: 2). B) Afloramiento de intrusivo fresco cortado por vetillas de cuarzo y epidota - clorita (IA: 1). C) Muestra de mano de intrusivo diorítico.

Las observaciones con microscopio petrográfico indican que la roca varía desde composiciones dioríticas a cuarzodioríticas (Figura 11). Esta se compone principalmente por plagioclasas subhedrales que varían entre un 25% - 40% modal y presentan un tamaño promedio entre 2 - 3 mm. La integridad de las plagioclasas disminuye hacia el sector oriental, las que se observan reemplazadas parcial a completamente por sericita. También se observa cuarzo subhedral - anhedral de hasta un 5% modal con un tamaño ≤ 1 mm. La concentración de minerales máficos

dentro del distrito es variable. Se reconoce una tendencia en donde los contenidos de estos minerales disminuyen desde un 30% a menos de un 5% modal, desde el sector occidental hacia el sector oriental del distrito. Se reconocen minerales como clinopiroxeno, ortopiroxeno, hornblenda y biotita, los cuales se encuentran mejor conservados hacia el sector oriental del distrito (Figura 11C, D). Particularmente, en el sector oriental no se observan cristales de piroxeno y disminuye la proporción modal de hornblenda y biotita a menos de 15% modal (Figura 11). En sectores con un mayor grado de alteración, los minerales máficos se encuentran remplazados parcial a completamente por agregados de actinolita, epidota y clorita (Figura 11B, C).

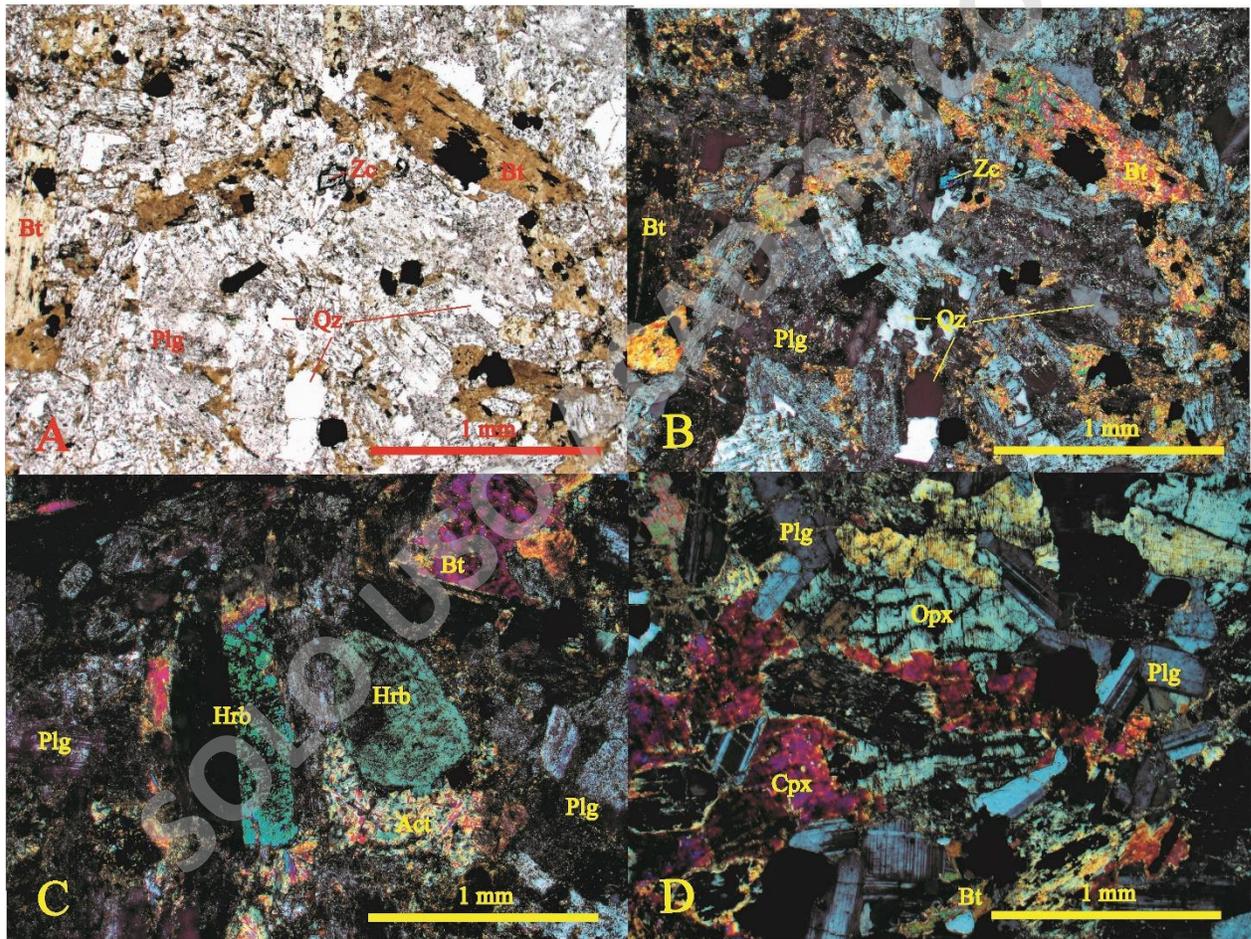


Figura 11. Fotomicrografía con luz transmitida de la diorita. A) - B) Muestra **FC004TA** a nicoles paralelos y cruzados, aumento de 4X. Cuarzodiorita compuesta por plagioclasa, biotita y escazo cuarzo. C) Muestra **FC016TB** a nicoles cruzados, aumento de 4X. Cuarzodiorita compuesta por plagioclasa, hornblenda, biotita y cuarzo. D) Muestra **FC059TA** a nicoles cruzados, aumento de 4X. Cuarzodiorita compuesta por plagioclasa, clino y ortopiroxeno, biotita y cuarzo. Abreviaturas: plagioclasa (Plg), biotita (Bt), cuarzo (Qz), hornblenda (Hrb) clinopiroxeno (Cpx), ortopiroxeno (Opx).

3.1.2 Diques andesíticos

Se identifica una serie de diques intrusivos (Figura 9) con formas tabulares y espesores que varían entre 0,2 a 10 m (Figura 12A, B). Estos presentan una orientación preferencial NW - NNW. A muestra de mano, estas rocas presentan composición andesítica y se observan texturas hipocristalinas, porfídicas, afaníticas y masa fundamental mayormente microcristalina (Figura 12C, D). Se reconocen al menos dos familias de diques andesíticos. La primera familia, se compone de un ≥ 90 % de masa fundamental afanítica vítrea (Figura 12C) con fenocristales de plagioclasa subhedrales - anhedrales ≤ 2 mm de tamaño. La segunda familia de diques se compone de ≤ 80 % de masa fundamental microcristalina con fenocristales de plagioclasa euhedrales - subhedrales $\leq 1,5$ cm en algunos casos (Figura 12D). Adicionalmente, se reconocen minerales de hornblenda y biotita subhedrales. Ambas familias presentan leve a moderado magnetismo.



Figura 12. Diques hipabisales. A) - B) Afloramientos de diques. Las líneas negras representan el contacto de los diques con la roca hospedante. C) Muestras extraídas de la familia de diques con masa fundamental aparentemente vítrea y fenocristales de plagioclasa. D) Muestra de la familia de diques con masa fundamental microcristalina y fenocristales de plagioclasa de hasta un cm.

Bajo el microscopio petrográfico, la primera familia de diques hipabisales presenta una masa fundamental vítrea (40% modal), además de microlitos que no superan los 0,2 mm. Los microlitos se componen principalmente de plagioclasa subhedral, hornblenda y biotita subhedral - anhedral, alterados a actinolita, clorita y epidota. Los fenocristales no superan el 5% modal y se componen en su mayoría por plagioclasas. En esta familia se reconocen texturas glomeroporfírica en plagioclasa, hornblenda y biotita, además de textura traquítica en plagioclasas (Figura 13A). Además, hacia el contacto del dique con la roca hospedante, se observan fragmentos de dique con texturas fluidales inmersos en la roca hospedante y fragmentos de la roca hospedante inmersos dentro del dique (Figura 13B).

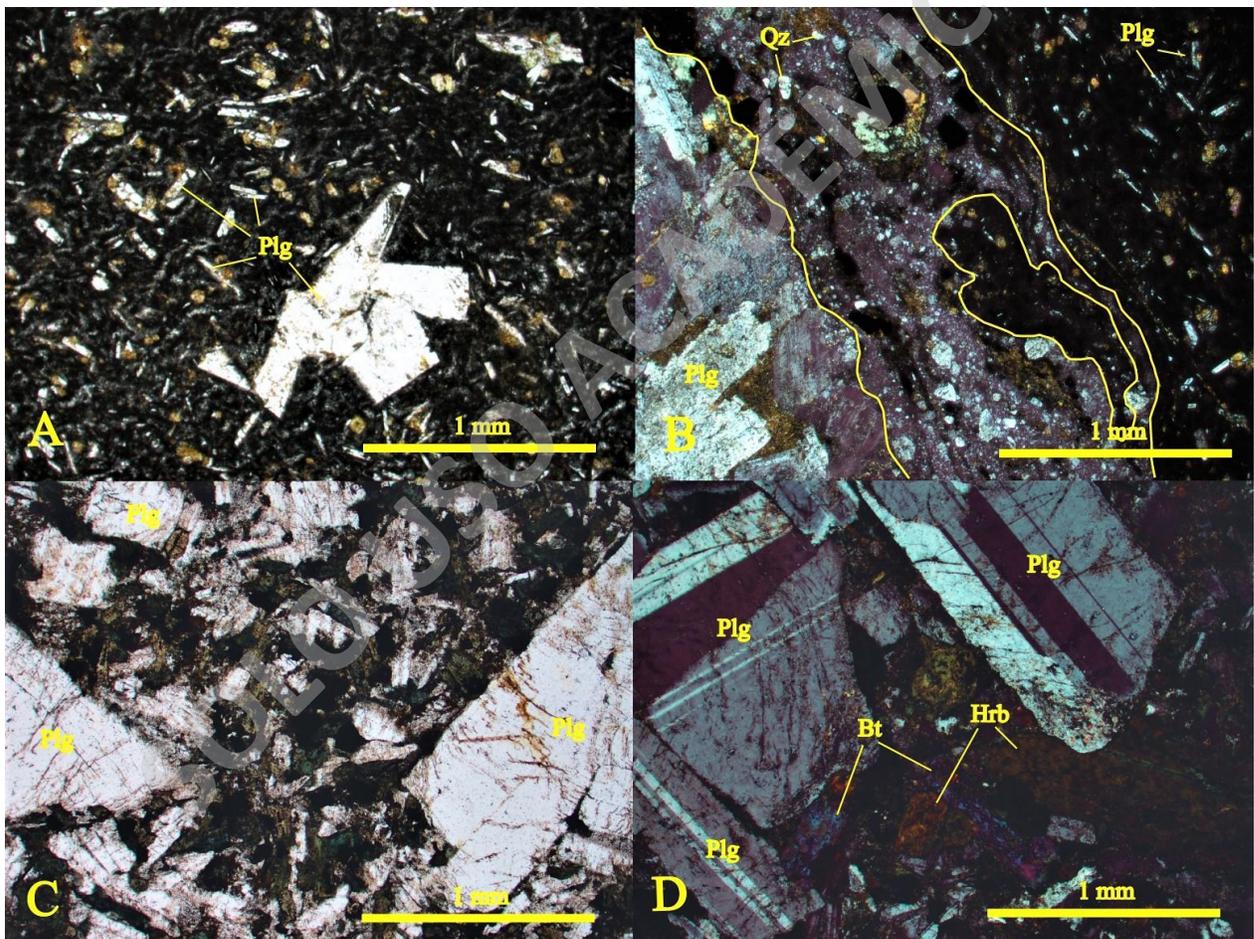


Figura 13. Fotomicrografía con luz transmitida de las familias de diques. A) – B) muestra **FC016TB** a niclos paralelos y cruzados, con aumento de 4X. Dique hipabisal andesítico de hornblenda con masa fundamental vítrea. Fenocristales de plagioclasa y microlito de plagioclasa, hornblenda, y biotita. B) Contacto entre cuarzodiorita y dique andesítico con masa fundamental vítrea. Contacto roca de caja incorpora parte del dique afanítico (polígono con borde amarillo) y el dique también incorpora parte de la roca hospedante. C) – D) Muestra **FC044TA** a niclos paralelos y cruzados con aumento de 4X. Dique hipabisal diorítico compuesto por fenocristales plagioclasa, hornblenda, y biotita y masa fundamental cristalina con microlito compuesto por la misma mineralogía. Maficos se encuentran de parcial a completamente obliterados. plagioclasa (Plg), biotita (Bt), cuarzo (Qz), hornblenda (Hrb)

La segunda familia de diques hipabisales, corresponde a diques dioríticos con una masa fundamental cristalina que se compone al menos un 50% modal por minerales subhedrales de plagioclasas, ortopiroxeno, clinopiroxeno y hornblendas ($\leq 0,5$ mm). Los fenocristales de plagioclasa son euhedrales - subhedrales de hasta 3,5 mm y alcanzan $\leq 20\%$ modal. Los fenocristales de ortopiroxeno, clinopiroxeno y hornblenda se encuentran en una proporción modal $\leq 5\%$. Se observan texturas de cúmulo y glomeroporfírica en plagioclasas, piroxenos, hornblendas (Figura 13C, D).

3.1.3 Clasificación de Rocas ígneas

El resumen de las descripciones tanto macroscópicas y microscópicas de las muestras del Distrito Fortress se presentan en Anexo 2 y Anexo 3, respectivamente. En el diagrama ternario de clasificación de rocas ígneas (Streckeisen, 1976), se graficaron las muestras de acuerdo con su proporción modal de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasas (Figura 14). Cabe destacar que, para las muestras de mano y microscopio, la composición de la roca hospedante varía de diorítica a cuarzodiorítica (Figura 14). Respecto a los diques, se clasifican como rocas ígneas intrusivas donde la composición varían de diorítica a cuarzodiorítica (Figura 14).

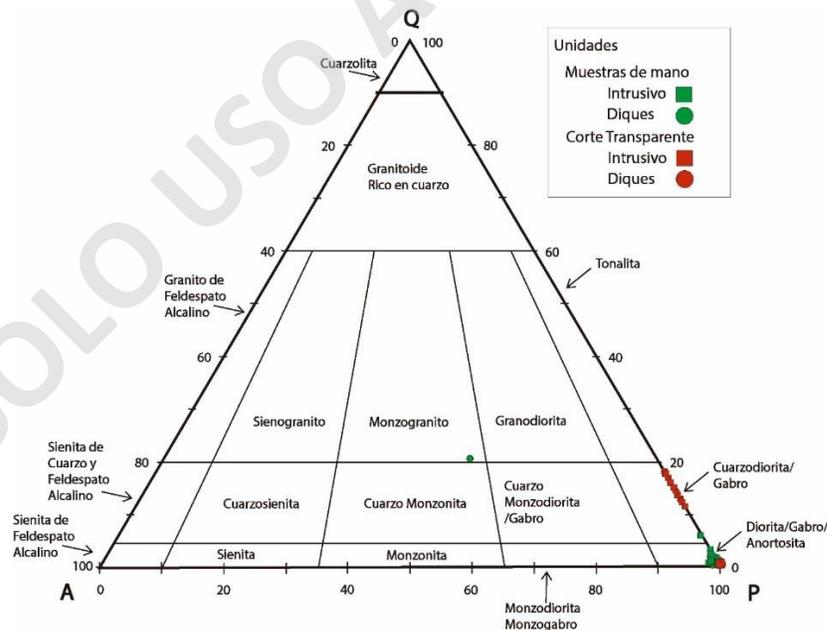


Figura 14: Diagrama de clasificación de rocas ígneas intrusivas (Streckeisen, 1976). En color verde se aprecia los resultados de las descripciones a muestra de mano y en color rojo los resultados a microscopio petrográfico.

3.1.4 Composición de Plagioclasas

En 14 de los 20 cortes transparentes, se pudo medir 84 datos de plagioclasas (6 por cada corte; Figura 15A), mediante el método estadístico de Michel - Levy, para obtener una composición aproximada de este mineral respecto a la proporción de Na y Ca (Figura 15B). Dentro de los 14 cortes analizados, 11 son correspondientes a la diorita - cuarzodiorita y solo 3 son de diques hipabisales. En la Figura 15, Tabla 2A se muestra el resultado por cada cristal de plagioclasa medido. En la diorita - cuarzodiorita hay una clara dominancia de labradoritas (50 datos) y subordinadamente de bitownita (12 datos). Respecto a los diques hipabisales se observa que, de las 18 mediciones, 15 corresponden a cristales de labradorita y tan solo 3 corresponden a bitownita.

Es decir, que las plagioclasas tanto de los diques como la roca hospedante tendrían una concentración de Ca entre 50 - 70%. lo cual indicaría que este intrusivo presenta composiciones intermedias-máficas.

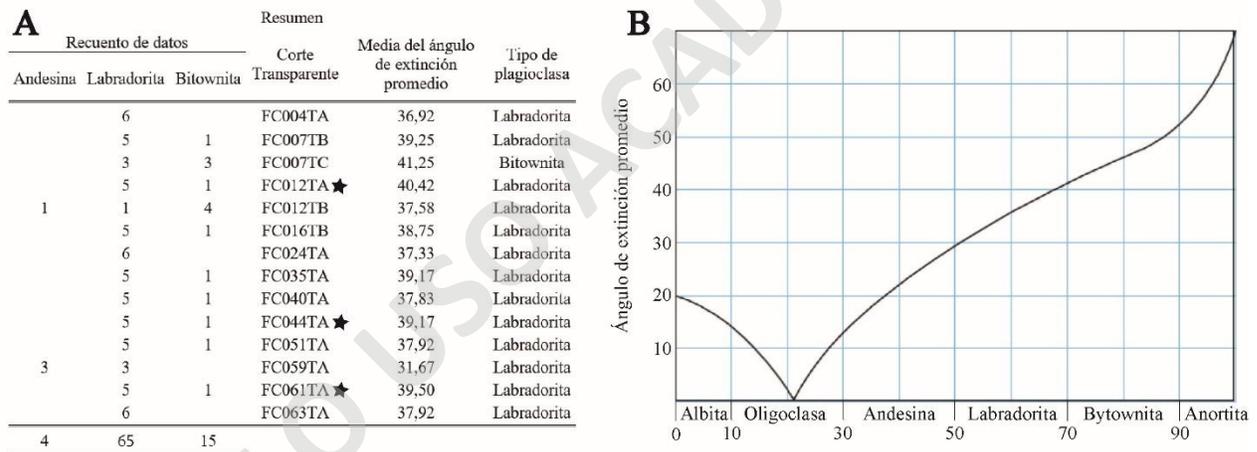


Figura 15. Tabla 2A) Resumen de las mediciones en maclas de plagioclasas. El símbolo de estrella marca las muestras correspondientes a diques. B) Gráfico utilizado para determinar la composición de las plagioclasas (Na-Ca) respecto al ángulo de extinción promedio (Chirif, 2010).

3.1.5 Depósitos coluviales

Dentro del Distrito Fortress se observa una cobertura compuesta por depósitos coluviales, los que se depositan en la zona basal del flanco occidental de la Cordillera de la Costa (Figura 9; Figura 16A). Esta unidad se encuentra depositada en pendientes con inclinaciones que varían entre 30° - 45°. Estos depósitos poseen una extensión de 30 a 50 m de distancia, y se encuentran semi consolidados. Además, se encuentran cubiertos por diferentes eventos aluviales. Estos depósitos son relativamente homogéneos, monomícticos, con matriz soportada, con escasa madurez textural

y composicional (Figura 16B). Su dispersión es caótica y en algunos sectores se encuentra clasto soportado. Los clastos (45%) son angulosos a subangulosos, los que alcanzan entre 1 – 3 m. Se componen principalmente por dioritas que se encuentran tanto frescas como silicificadas. La matriz (55%) se compone de arena media a gruesa.

3.1.6 Depósitos aluviales

En el Distrito Fortress, se observa una cobertura aluvial depositada en las principales quebradas del distrito (Figura 9; Figura 16A) donde se pueden identificar diferentes pulsos superpuestos. Esta unidad presenta una tendencia con orientación preferencial NW y cubre al menos el 50% del distrito. Estos depósitos tienen inclinaciones de entre 5° a 15°, se extienden sobre 150 m de distancia y se encuentran semi consolidados. Esta unidad se describe como polimíctica, matriz soportada, con escasa madurez textural y composicional (Figura 16C). Los clastos varían desde subangulosos a subredondeados, con tamaños desde arena gruesa a ripio, donde algunos clastos alcanzan entre 1 – 2 m. Los clastos se componen por dioritas de hornblenda, dioritas silicificadas, diques porfídicos andesíticos y diques afaníticos andesíticos. La matriz varía desde limo a arena media, con oquedades menores a un milímetro (porosidad). Se identifican al menos tres pulsos (Figura 16C), diferenciados principalmente por la proporción clasto - matriz y tamaño de clastos: 1) nivel inferior con 30% de matriz y 70% de clastos, 2) nivel intermedio con 60% de matriz y 40% de clastos, y 3) nivel superior con 35% de matriz y 65% de clastos.



Figura 16. Cobertura sedimentaria. A) Fotografía panorámica con mapeo superficial de las unidades litológicas del Distrito Fortress (Figura 9). B) Depósitos coluviales. C) Depósitos aluviales.

3.1.7 Depósitos Antrópicos

Dentro del Distrito Fortress se observan antiguas plataformas que se ocupaban para el transporte de material desde el yacimiento IOA El Tofo hasta el puerto Cruz Grande. Estos depósitos tienen 7,5 km de largo en formas meándricas (Figura 9). Poseen dimensiones de entre cuatro a ocho metros de altura, cerca de seis metros de ancho en la superficie de la plataforma y entre 25 a 30 m hacia la base del terraplén.

Estos se componen de una cobertura superficial clasto soportada de 10 cm (Figura 17A - C), polimíctica, medianamente seleccionada, con baja madurez textural y composicional. El interior de la plataforma se describe como matriz soportada, polimíctico y con escasa madurez textural y composicional. Los clastos (40%) de estos depósitos son principalmente angulosos a subangulosos, con tamaño gravilla a ripio alcanzando clastos métricos, compuestos de rocas intrusivas de composición diorítica y diques andesíticos. La matriz del depósito (60%) varía de tamaño entre limo - arcilla a arena gruesa. El material con Fe corresponde a rocas compuestas principalmente por magnetita masiva con hematita, goetita y limonitas (Figura 17E). Además, se

identifican rodados con textura brechosa, fragmentos de actinolita y apatito inmersos en una matriz de magnetita (Figura 17D).

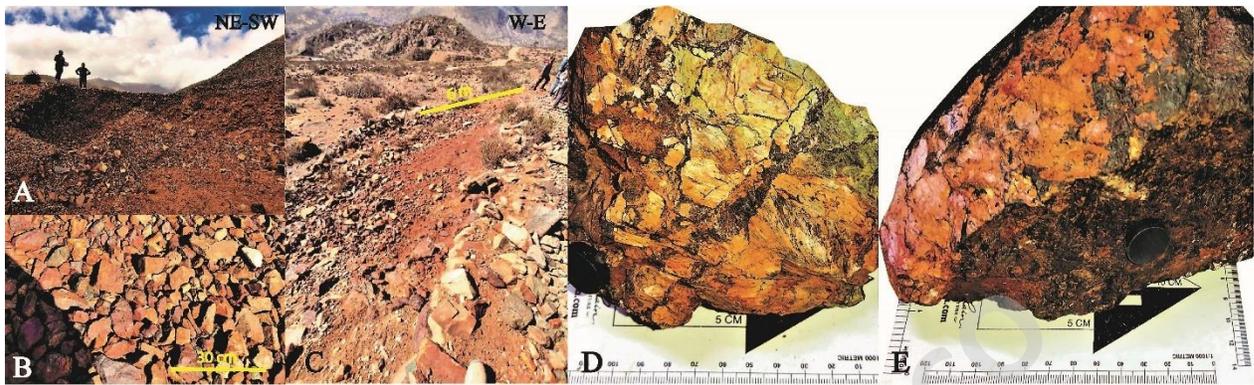


Figura 17. Plataformas de línea férrea. A) Sección transversal de las plataformas. B) Cobertura superficial de las plataformas (vista en planta). C) Pendiente del talud de la plataforma. D) y E) Rodados de magnetita masiva, actinolita y apatito.

3.2 Alteración hidrotermal y mineralización

Para este apartado, se realiza una clasificación para las intensidades de las alteraciones hidrotermales, a través de porcentajes que representan el reemplazo mineral en la roca hospedante (Figura 18).

IA: Intensidad de Alteracion

1	2	3	4
0%	25%	50%	75% 100%

Figura 18: Escala de intensidades para la alteración hidrotermal. El nivel uno representa la roca fresca, y el nivel cuatro la roca con textura totalmente obliterada.

En el Distrito Fortress se identifican al menos cuatro tipos de alteración hidrotermal. En el sector occidental, se extiende una zona compuesta por vetillas de actinolita (Figura 19) con orientación NNW, acompañadas ocasionalmente con magnetita, turmalina y cuarzo. Hacia las zonas donde aumenta el grado de alteración hidrotermal, se observan arcillas blancas, sericita y magnetita (Figura 19). En el sector oriental del distrito se observan las zonas con la principal mineralización del distrito, constituida por vetas de magnetita y menor goetita y hematita (Figura 19). La alteración hidrotermal es pervasiva y se compone por arcillas, sericita, sílica, actinolita y óxidos de Fe y Mn (Figura 19).



Figura 19. Mapa de alteración hidrotermal y mineralización escala 1:4.000 del Distrito Fortress. Notar que en el sector occidental del distrito se reconoció una veta de magnetita y predomina la alteración de actinolita. En el sector oriental, se reconocieron 5 vetas de magnetita y predomina la alteración a arcillas, sericita y silicificación.

3.2.1 Zonas de actinolita

Las zonas de actinolita se distribuyen principalmente en el sector occidental del distrito en donde se reconoce una tendencia en dirección NW (Figura 19). En este sector, se observan vetas y vetillas de actinolita con espesores que varían desde 1mm a 10 cm (Figura 20A, B). Las vetillas sobre 1 mm de espesor presentan agregados de cristales de actinolita euhedral - subhedral y hábito radial, que alcanzan tamaños de hasta 1 cm (Figura 20C). Hacia los bordes de las vetillas, se observa alteración de cuarzo, albita, epidota y clorita. Adicionalmente, se observa magnetita y limonitas en vetillas de hasta 1 cm y en forma diseminada, vetillas de cuarzo (0.2 - 1.5 cm) y vetillas de turmalina (0.5 - 1.5 cm). Esta zona de alteración también incluye el reemplazo parcial de minerales primarios de hornblenda y biotita de la roca hospedante por actinolita. Hacia el sector oriental del distrito, se identifican zonas de actinolita local que no superan los 30 m de espesor, que se encuentran inmersas dentro de zona silicificada (Figura 20D). Las zonas de actinolita se ubican principalmente en los núcleos de alteración donde la textura de la roca hospedante se encuentra obliterada.

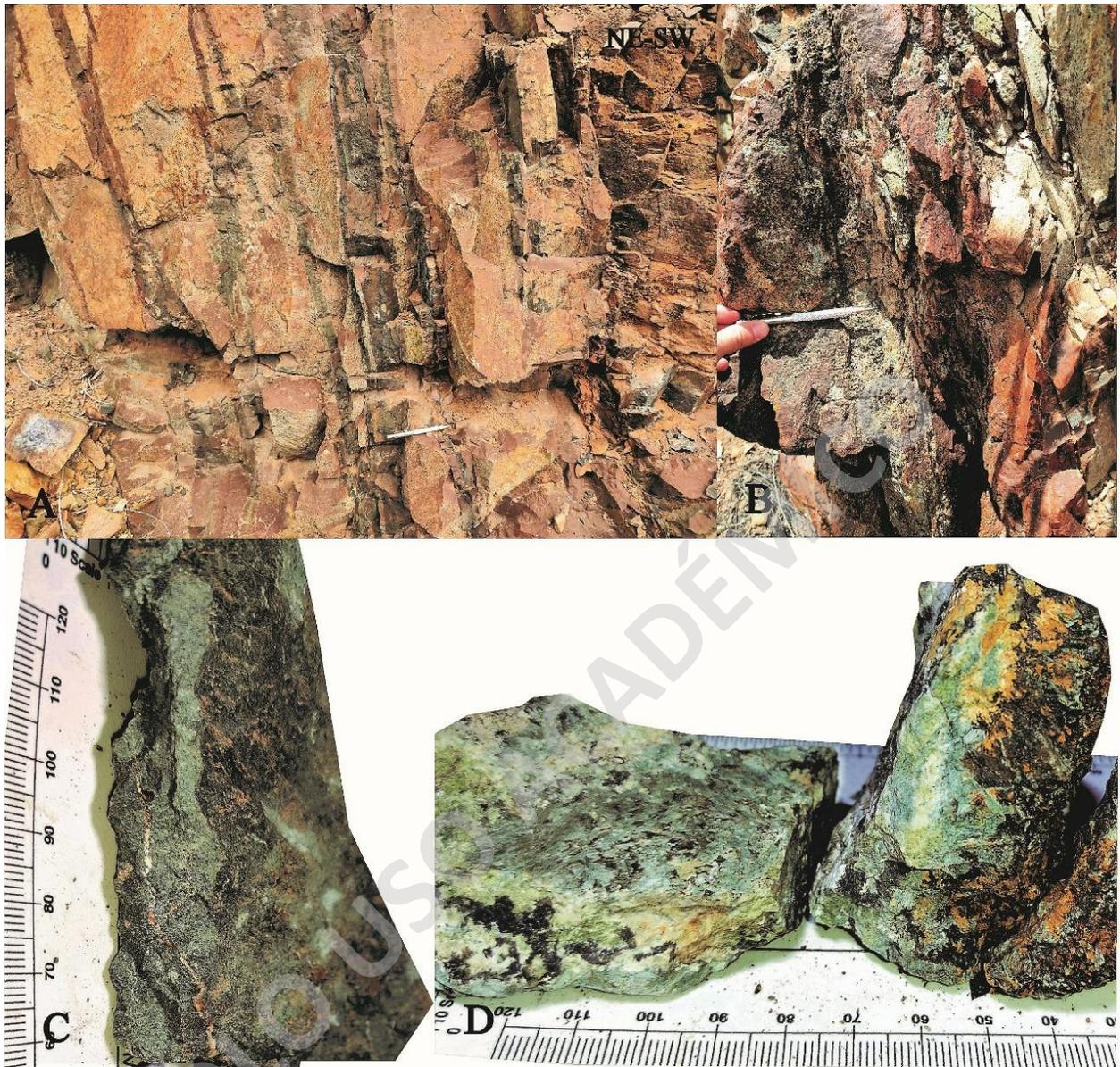


Figura 20. Zona actinolita. A) - B) Afloramientos con vetillas de actinolita. C) Roca con actinolita en vetilla. D) Rocas extraídas de zonas donde la actinolita coexiste con silicificación, arcillas, sericita y óxidos de Mn.

Las observaciones a microscopio permiten identificar dos familias de actinolita en el sector occidental. Una familia con cristales subhedrales de actinolita de hasta 0,3 mm que ocurre hacia los bordes de las vetillas, y otra familia con cristales euhedrales de actinolita de hasta 1 mm que se ubican hacia el centro de las vetillas (Figura 21A, B). Estas están acompañadas de minerales como epidota, clorita, titanita y turmalina subhedral a anhedral, diseminados y en parches de hasta 0,4 mm (Figura 21A, B). También se observan vetillas de cuarzo subhedrales de hasta 0,5 mm, que

cortan a las vetillas de actinolita. Los minerales opacos dentro de estas vetillas corresponden a cristales anhedrales - subhedrales de magnetita diseminados.

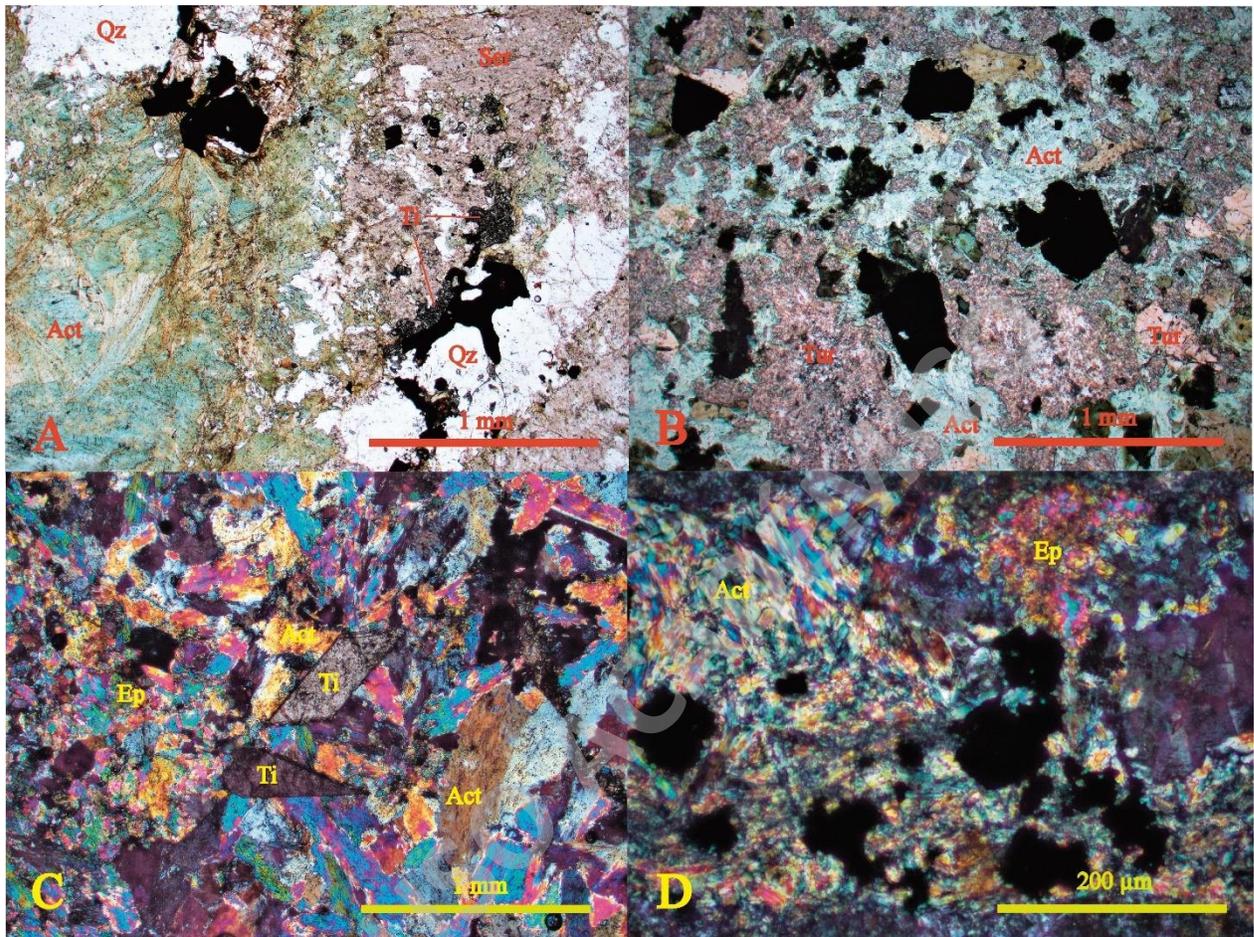


Figura 21. Fotomicrografía con luz transmitida de la zona de actinolita. A) Muestra **FC004TA** a nicoles paralelos, aumento de 4X. Vetilla de actinolita, junto con vetillas de cuarzo y alteracion sericita en plagioclasa. Presenta diseminado opacos anhedrales. B) Muestra **FC019TB** a nicoles paralelos, aumento de 4X. Zona de alteracion de actinolita, opacos de magnetita, turmalina, en menor proporcion cuarzo, albita, clorita y epidota. C) muestra **FC024TC** a nicoles cruzados, aumento de 4X. Zona de alteración de actinolita con epidota y titanita. En menor proporcion epidota y albita. D) muestra **FC027TC** a nicoles cruzados, aumento de 20X. Vetilla de act subhedrales con dos familias de cristales, con epidota y opacos subhedrales. Abreviaturas: actinolita (Act), albita (Ab), clorita (Chl), epidota (Ep), sericita (Ser), magnetita (Mt), turmalina (Tur), titanita (Ti)

Hacia el sector oriental, en donde la mayor parte de la textura de la roca hospedante está obliterada (IA:3-4; Figura 18), se observan dos familias de actinolitas. Una familia en donde la actinolita es euhedral - subhedral y se presenta como parches con cristales de hasta 5 mm. Estos cristales de actinolita coexisten con cristales subhedrales de albita (≤ 3 mm), cuarzo (≤ 4 mm), escapolita (≤ 1 mm), epidota ($\leq 1,5$ mm), clorita (≤ 1 mm), y titanita (≤ 1 mm) (Figura 21C, D). Una segunda familia corresponde a vetillas de actinolita de 1 - 2 mm de espesor. Ambas familias de actinolitas se observan adyacentes a vetas de magnetita (Figura 19).

3.2.2 Zona de arcillas - sericita

Una zona de alteración de arcillas – sericita se ubica en el sector occidental del distrito, asociada principalmente a una veta de magnetita con tendencia NW (Figura 19). En esta zona la textura de la roca hospedante se encuentra totalmente obliterada (IA:4; Figura 18) y no se logra reconocer el protolito (Figura 22A). Esta alteración presenta un espesor promedio de 10 a 20 m. Está compuesta por arcillas blancas y sericita las cuales se encuentran poco consolidadas (Figura 22C). Se puede reconocer magnetita diseminada menor a 2 mm y ocasionalmente cúmulos de turmalina de hasta 4 cm. En lugares hacia disminuye la intensidad de alteración de la roca (IA:1-2; Figura 18), predomina la ocurrencia de vetillas de sericita (≤ 2 mm) y magnetita diseminada (≤ 1 mm) (Figura 22B, D). Algunos granos de magnetita presentan reemplazo por hematita - goetita.

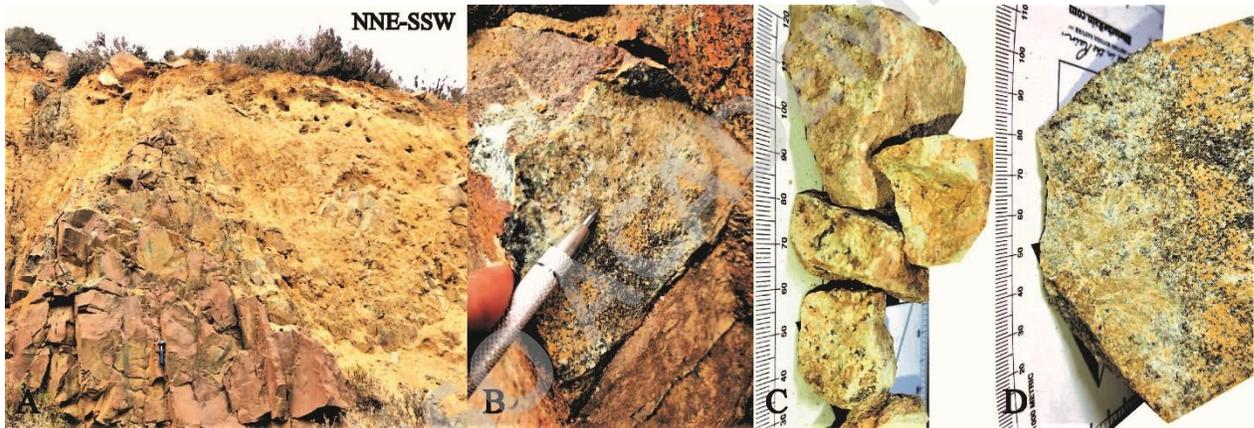


Figura 22. Zona de arcillas – sericita. A) Afloramiento con textura obliterada de la roca hospedante. B) Corte paralelo a la dirección de la vetilla de sericita con magnetita diseminada. C) - D) Rocas extraídas cercanas al núcleo de alteración y de la zona de vetillas, respectivamente.

3.2.3 Zona de silicificación

La zona de silicificación se ubica en la parte oriental del distrito (Figura 19). Esta se distribuye en un cuerpo irregular con tendencias hacia el NW. Los afloramientos de roca hospedante se exhiben en tonos anaranjado y presentan una mayor dureza (IA:2 - 4; Figura 18; Figura 23A, B). Esta zona se constituye principalmente por sílice o cuarzo anhedral como una recristalización tanto en cristales primarios de la roca hospedante como en la masa fundamental de los diques (Figura 23C, D). En estas zonas la textura de la roca está totalmente obliterada (IA:4; Figura 23C).

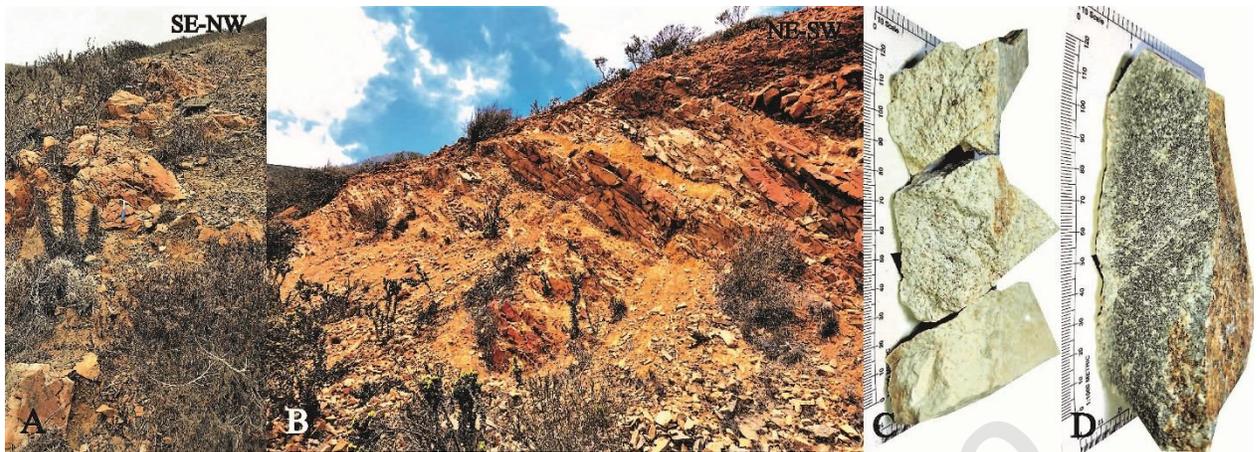


Figura 23. Zona silicificada. A) - B) Afloramientos color anaranjado a blanquesinos. C) - D) Rocas extraídas desde el núcleo de la alteración y de una zona distal al núcleo, respectivamente.

Las observaciones a microscopio permiten reconocer dos tipos de cuarzo. El primer tipo, ocurre como cuarzo anhedral de hasta 3 mm en agregados, cúmulos y parches, y presenta texturas de reequilibrio y recristalización (Figura 24). Estas texturas varían desde bordes de reabsorción, rotación de subgrano (RSG), migración de borde de grano (MBG) y crecimiento mineral desde un cristal primario (Figura 24B, C). El segundo tipo consiste en un agregado tipo mosaico de cristales de cuarzos euhedrales - subhedrales de hasta 0,4 mm de tamaño (Figura 24D). Adicionalmente, se observa reemplazo de albita, sericita y arcillas en granos de plagioclasa (≤ 2 mm), crecimiento de cúmulos de actinolita – epidota – clorita (≤ 5 mm) reemplazando a minerales máficos. También se observa titanita (≤ 1 mm) y rutilo ($\leq 0,4$ mm) diseminados en paragénesis con los cúmulos anteriormente descritos. La intensidad de la alteración aumenta hacia el interior de las zonas y/o cercano a las vetas de magnetita (IA:2 – 4; Figura 18).

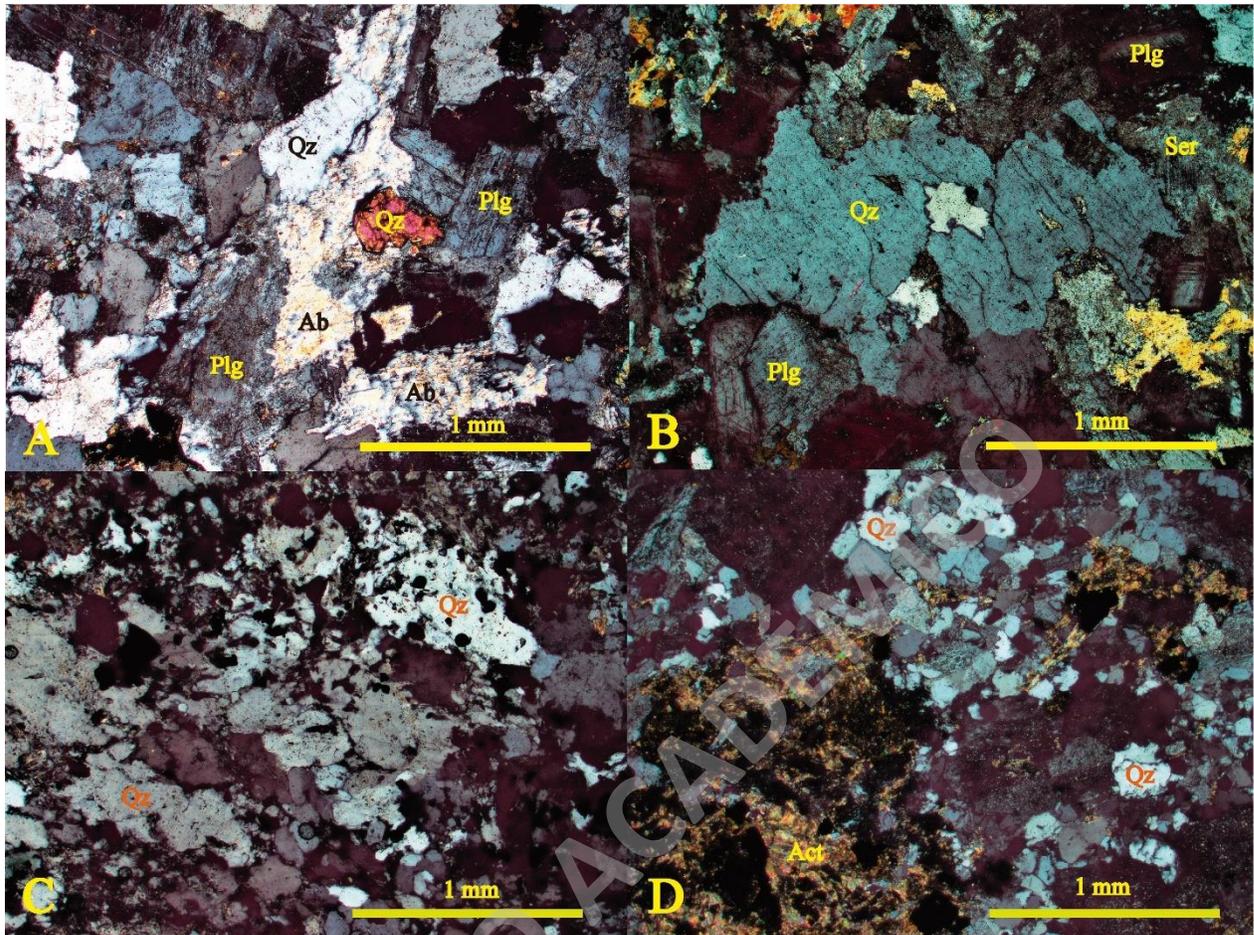


Figura 24. Fotomicrografía con luz transmitida de la zona de silicificación. A) Muestra **FC007TB** a nicoles cruzados, aumento de 4X. Se reconocen cuarzo en desequilibrio con texturas de rotaciones de subgranos, migración de borde de grano, crecimiento mineral y recristalización tipo mosaico. Se observan cristales de plagioclasas sericitadas con crecimiento de cristales de albita y titanita. Presenta diseminado opacos de magnetita. B) Muestra **FC024TA** a nicoles cruzados, aumento de 4X. Se reconocen cuarzos con texturas de rotaciones de subgranos, migración de borde de grano, crecimiento mineral. C) Muestra **FC025TC** a nicoles cruzados, aumento de 4X. Se observa cuarzo con texturas de rotaciones de subgranos, migración de borde de grano, crecimiento mineral y recristalización tipo mosaico. Tiene diseminado abundante de opacos de magnetita. D) Muestra **FC063TA** a nicoles cruzados, aumento de 4X. Se reconoce cuarzo con texturas de rotaciones de subgranos, migración de borde de grano, crecimiento mineral y recristalización tipo mosaico. Además, presenta abundante diseminado de opacos asociados espacialmente con cumulos de agregados microcristalinos de epidota. Abreviaturas: actinolita (Act), albita (Ab), epidota (Ep), sericita (Ser).

3.2.4 Zona de silicificación – arcillas – sericita - óxidos Fe - Mn

Esta zona de alteración se observa en el sector oriental del distrito (Figura 19). La alteración se distribuye en cuerpos irregulares con orientación NW - NNW. Las rocas de esta zona presentan una textura totalmente obliterada (IA:4; Figura 18; Figura 25A, B, C).

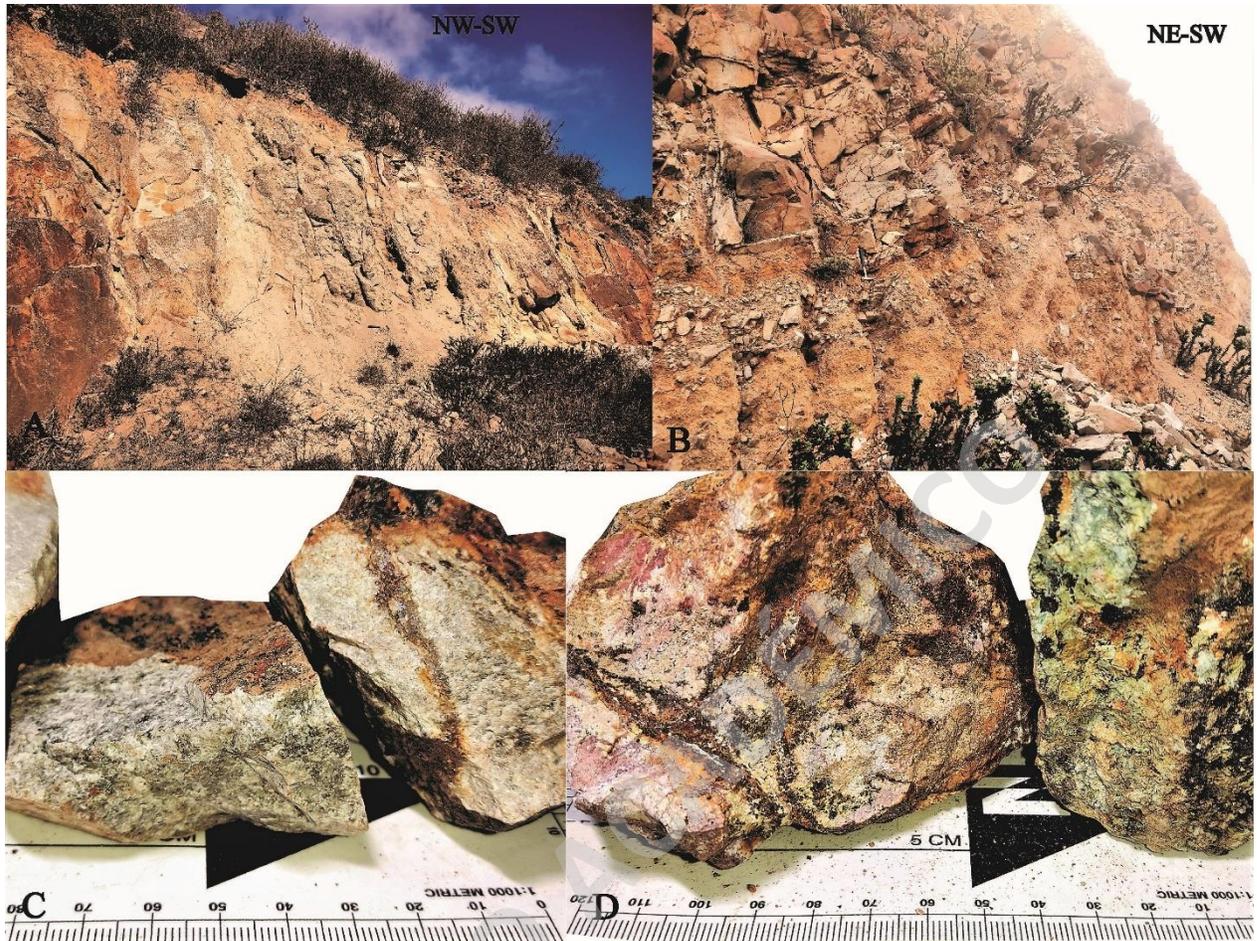


Figura 25. Zona silicificación – arcillas – sericita – óxidos de Fe y Mn. A) Afloramiento de roca silicificada. B) Afloramiento con arcillas, limolitas, magnetita diseminada y silicificación. C) Muestras extraídas de la zona silicificada con vetillas de magnetita y actinolita. D) Muestra de roca con magnetita – goetita - hematita y arcillas, además de actinolita-limolitas y óxidos de Mn.

La potencia de estas zonas varía entre 30 a 100 m aproximadamente y se observan principalmente arcillas blancas, sericita, sílice y limolitas (Figura 25D, E). Además, se reconoce vetillas de hasta 3 mm de espesor y agregados dendríticos de óxidos de manganeso (pirolusita). También, se observan óxidos de hierro en donde dominan minerales como hematita, goetita y limonitas (Figura 25F). En estas zonas se reconocen zonas de actinolita anhedral descritas en los apartados anteriores.

3.2.5 Mineralización de magnetita

Dentro del Distrito Fortress la mineralización principal corresponde a vetas de magnetita que se distribuyen principalmente hacia el sector oriental del distrito (Figura 19). Estas presentan espesores de hasta 40 cm, inclinación subvertical y orientación NNW - NW. Las vetas de magnetita

se asocian espacialmente con zonas con asociaciones de actinolita, arcillas – sericita y silicificación, estructuras y diques hipabisales andesíticos (Figura 26A, C).

En este sector oriental, se observa magnetita siendo reemplazada parcial a completamente por hematita, goetita y limonitas (IA 2-4; Figura 18; Figura 26B, D). Además, se identifican múltiples oquedades de hasta 6 mm de diámetro producto de procesos de lixiviación. Hacia el sector occidental, se reconocen vetillas de magnetita de hasta 2 cm de espesor y diseminado de magnetita (≤ 1 mm), asociadas con las zonas de actinolita y sericita - arcillas, respectivamente (Figura 26E).

Las observaciones a microscopio permiten reconocer cinco tipos de magnetita, las cuales ocurren de forma diseminada diseminado (I y V), vetas (II y III) y vetillas (IV). Además, se reconoce un reemplazo parcial de estos distintos tipos de magnetita por hematita (I, II, III y V) y goetita (I y II), y hematita (IV) rellenando oquedades o cavidades.

El primer tipo corresponde a magnetita (I), anhedral ($\leq 0,5$ mm) y con bordes redondeados, donde se observa un reemplazo parcial a completamente por hematita (I) anhedral ($\leq 0,4$ mm) (Figura 27A). Adicionalmente, se reconoce de manera local goetita (I) diseminada con forma anhedral ($\leq 0,3$ mm). También, se identifica pirita anhedral ($\leq 0,1$ mm) y diseminada en una proporción modal $\leq 1\%$ (Figura 27A). Este tipo de magnetita se asocia a cúmulos de minerales máficos alterados a epidota, actinolita y clorita.

Hacia el sector de vetas y vetillas de magnetita, se reconocen tres tipos de magnetita. Se observa una magnetita (II) euhedral con hábitos prismáticos a tabulares de hasta 3 mm, la cual se encuentra parcialmente alterado a hematita (II) anhedral (IA2-3; Figura 27D). Adyacente a estos grandes cristales, se observa una cristalización de una familia de magnetita (III) de hasta 0,2 mm, que posee cristales subhedrales prismáticos con bordes de hematita (III) (IA:2; Figura 27D).

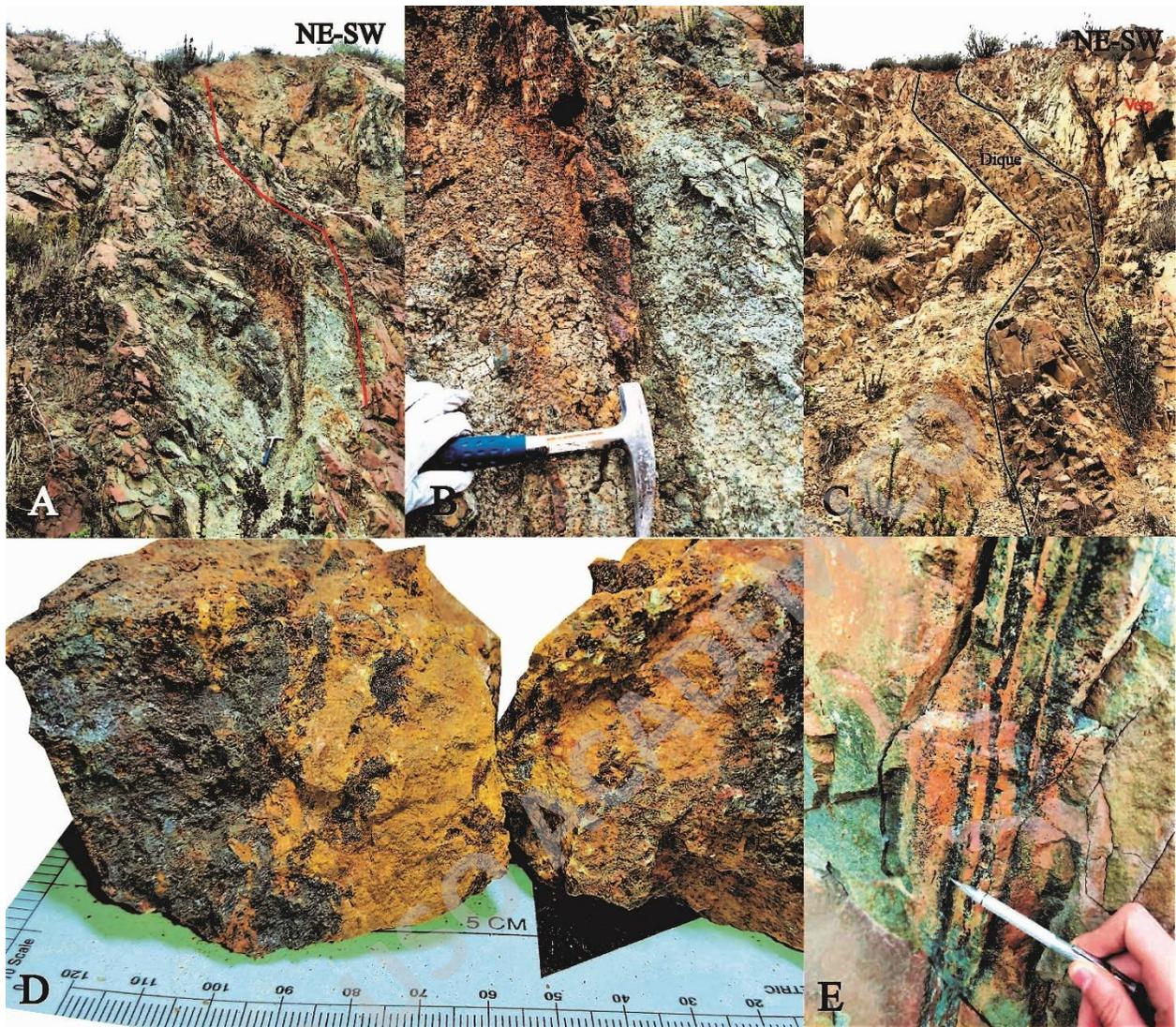


Figura 26. Vetas de magnetita. A) - B) Zona de alteración con dique brechizado y harina de falla. Hacia el borde del dique se observa una veta de magnetita. La línea roja representa la forma sigmoide de la veta. C) Dique (límites del dique en negro) y hacia la derecha veta de magnetita que bifurca desde el dique. D) Rocas extraídas de la veta de magnetita anhidral, donde se observa la magnetita siendo oxidada a goetita y hematita con aspecto terroso. E) Vetillas de magnetita en la zona occidental del distrito.

Las oquedades observadas dentro de las vetas y vetillas de magnetita se encuentran rellenas por hematita (IV) con formas botroidales - coliformes concéntricas (Figura 27C). Estas oquedades están inmersas en magnetitas (IV) y goetitas (II) anhedrales en formas concéntricas a las cavidades rellenas (IA:2-3; Figura 27C). Finalmente se reconoce un diseminado de magnetita (V), subhedral ($\leq 0,5$ mm), con hábito prismático, la cual posee reemplazo parcial de hematita (V) euhedral ($\leq 0,3$ mm) y con hábito acicular (IA:1; Figura 27A, B).

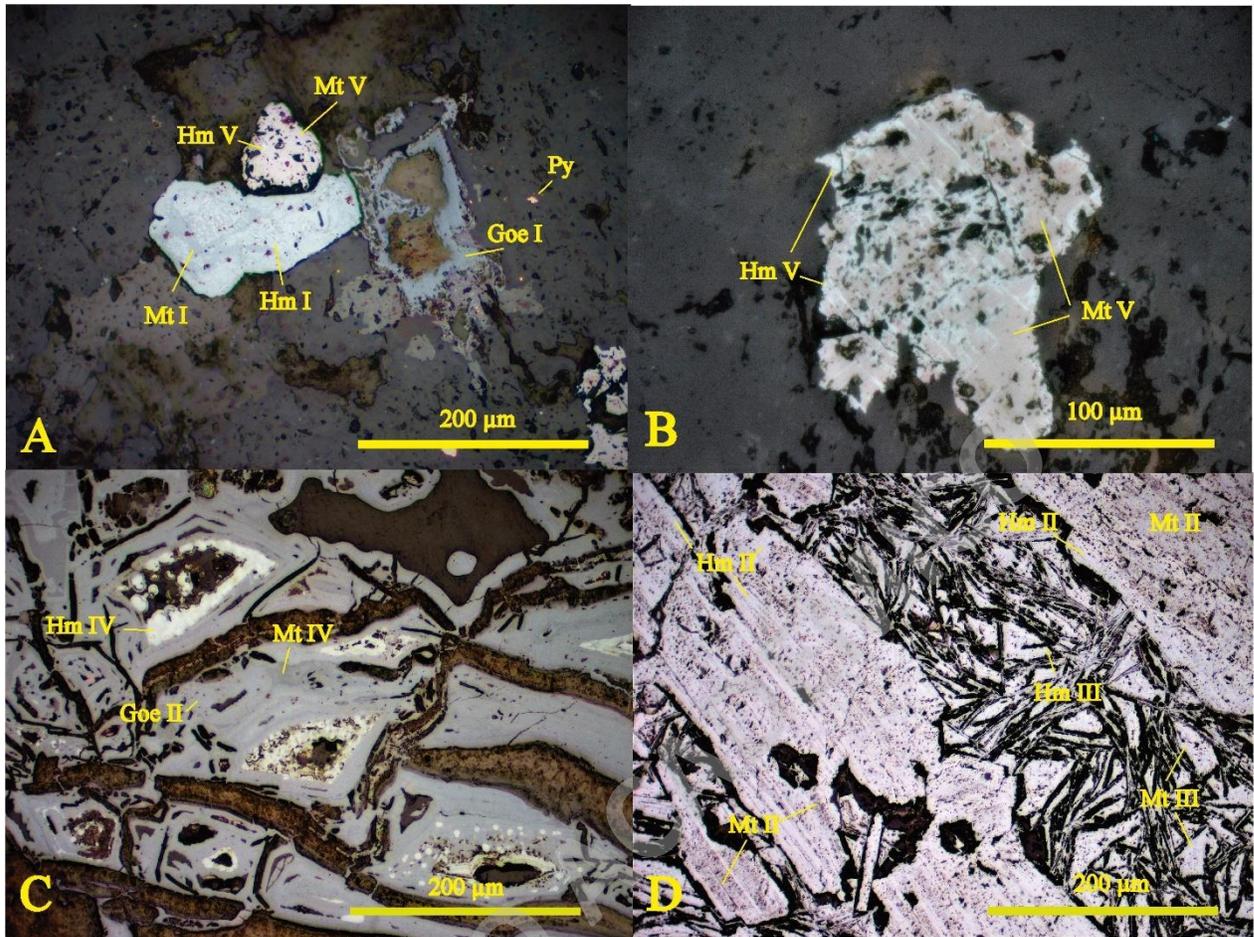


Figura 27. Fotomicrografía con luz transmitida de las vetas y diseminación de magnetita. A) Muestra FC004TA a luz reflejada, aumento de 20X. Dos tipos de magnetita diseminada, una euhedral (V) y otra anhedral (I). La magnetita euhedral, presenta remplazo de hematita tabular. Se observa un cristal cubico reemplazado totalmente por goetita. B) Muestra FC035TA a luz reflejada aumento de 40X. Acercamiento a la magnetita diseminada V, con remplazo de hematita tabular dentro de la magnetita. C) Muestra FC025TB luz reflejada, aumento de 20X. Núcleos de alteración presenta vetillas de magnetita (IV) y goetita (II) concéntricas alrededor de oquedades. Dentro de las oquedades existe relleno de hematita coloforme (IV). D) Muestra FC026TC a luz reflejada, aumento 20X. Veta de magnetita, se distingue una magnetita-hematita (II) euhdrales bien desarrollada de hasta 4 mm, y una segunda familia que no supera los 0,2 mm (III). Además, se pueden distinguir halos de goetita (II) alrededor de la magnetita.

3.3 Estructuras

En la campaña de terreno se midieron 254 datos estructurales, los cuales corresponden a 154 datos de orientación de diaclasas, 16 planos de fallas, 42 datos de orientación de diques y 42 datos de orientación de vetas y vetillas. La disposición de estas estructuras se presenta en un mapa estructural (Figura 28). El resumen de los datos estructurales medidos se encuentra en Anexo 4.

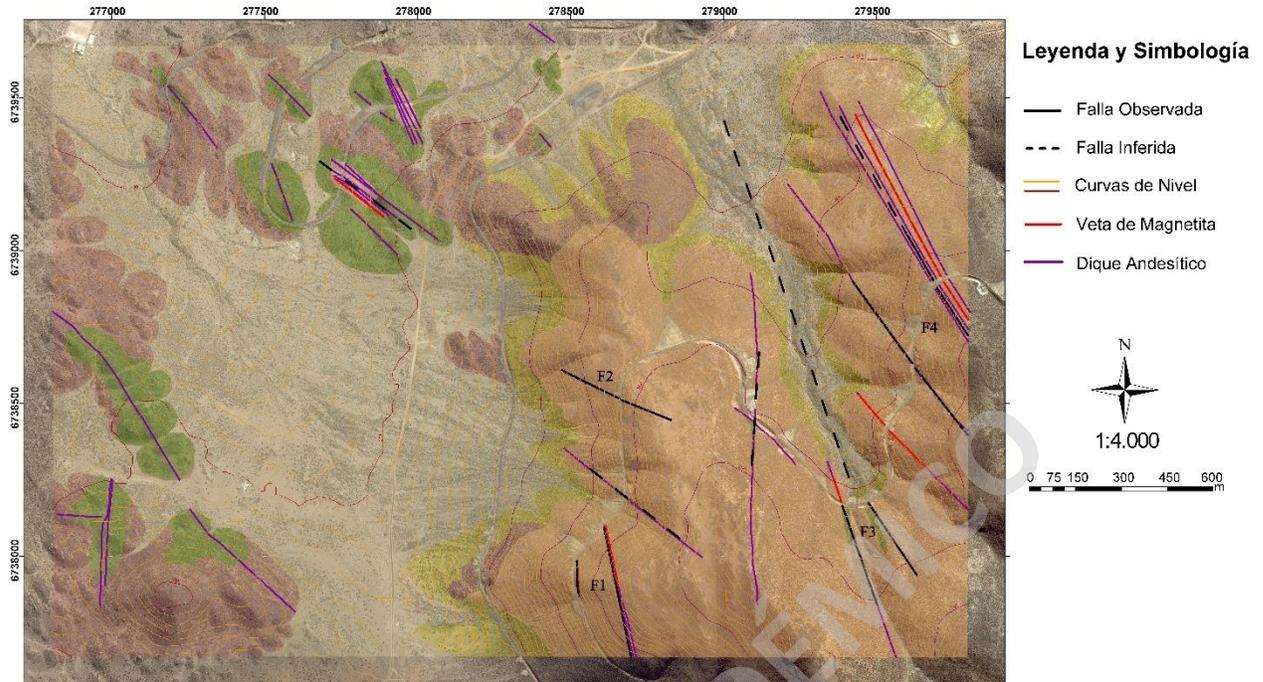


Figura 28. Mapa de estructuras escala 1:4.000 del Distrito Fortress. Las zonas de falla (F) representan las estructuras reconocidas en los diferentes sectores del distrito.

3.3.1 Diaclasas

Los afloramientos del distrito presentan diferentes niveles de fracturas, los cuales aumentan latitudinalmente hacia el sector oriental del área de estudio. Los planos de diaclasas medidos indican dos familias dominantes (Figura 29AB). Una familia con rumbo NS (355°) y una segunda familia hacia el WNW (295°). Ambas familias de diaclasas presentan manteos subverticales de entre $65 - 85^\circ$ (Figura 29C). Adicionalmente, estos sistemas estructurales presentan un ángulo de intersección de 60° , lo que también indica un vector de esfuerzo principal en dirección NW y una dirección de máxima elongación perpendicular (NE) a este vector (Figura 29B).

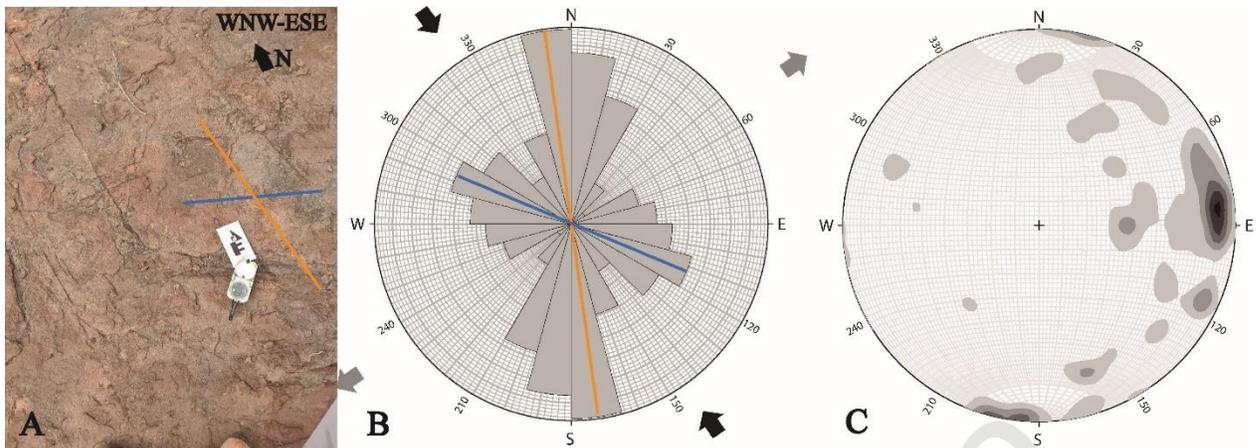


Figura 29 Sistema de diaclasas conjugadas. A) Fotografía en planta de afloramientos en la diorita - cuarzodiorita. B) Diagrama de rosetas sistema de fracturas conjugadas. Flechas negras corresponden a la dirección de esfuerzo compresivo (σ_1), y las flechas grises indican la dirección del esfuerzo extensivo (σ_3). Las líneas amarillas representan la familia de fracturas NS, y las líneas azules representan la familia de fracturas WNW. C) Diagrama de concentración de polos que representa los planos de rumbo y manteo medidos.

3.3.2 Fallas

Dentro del distrito se reconocen cuatro estructuras relevantes que se ubican principalmente hacia el sector oriental del distrito (Figura 28 F1, F2, F3 y F4). A lo largo de todo el distrito, estas estructuras se caracterizan por presentar planos irregulares con espesores de 20 cm a 1 - 2 m aproximadamente (Figura 30A, B; F1), que se componen de roca pulverizada. En las estructuras F3 y F4, se observa salbanda y brecha de falla en la roca hospedante y diques hipabisales (Figura 30D, E). Además, en las zonas cercanas y entre las estructuras, se observa una zona de daño donde el nivel de fracturamiento de la diorita - cuarzodiorita aumenta con planos de fracturas paralelos y curvos hacia la falla (Figura 30A). Las estructuras F1 se caracterizan por presentar un rumbo NS con manteos entre 65 - 75° al este. Las estructuras F2 se caracterizan por presentar rumbos y manteos aproximados de 280°/30°. Las estructuras F3 poseen rumbo y manteo de 150°/55°. Las estructuras F4 poseen orientaciones 325°/85°. No se reconoce cinemática a las estructuras. Se infiere la ocurrencia de estructuras con base en taludes pulverizados con alteración de arcillas - sericita (IA:4; Figura 18), además de la intrusión de múltiples diques y vetas de magnetita.

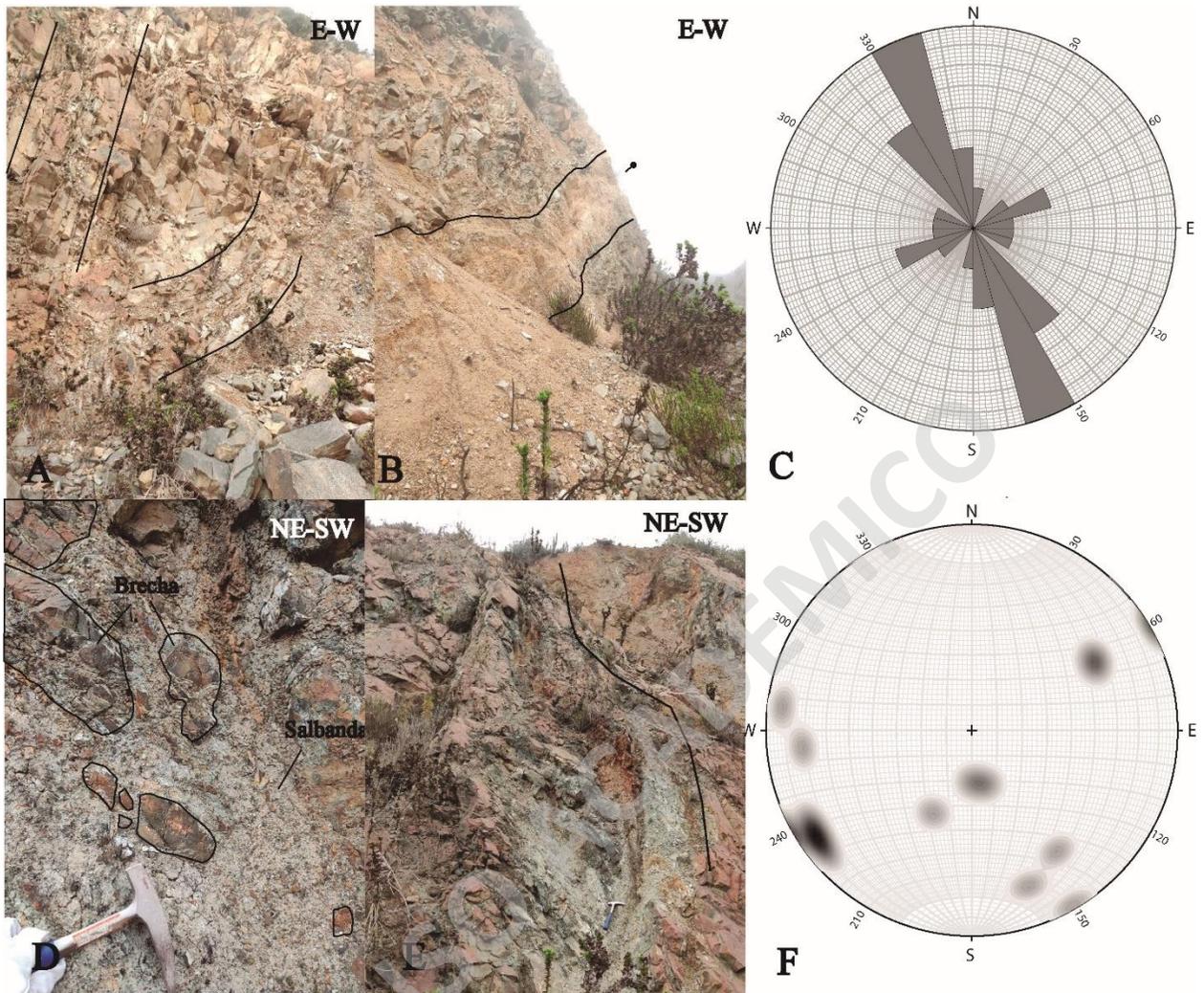


Figura 30. Fallas. A) - B) Sector F1 donde en A) zona de daño donde se curvan las fracturas. B) Plano de falla NS manteo de 65° aprox, con deformación frágil. C) Diagrama de rosetas de las fallas. D) - E) Zona de falla del sector F4 con brecha, harina de falla y el emplazamiento de una veta de magnetita y un dique. Los polígonos con contorno negro muestran los clastos de la brecha de falla no cohesiva en diques andesíticos en contacto con la diorita de hornblenda. F) Diagrama de concentración de polos donde se aprecian los manteos de las fallas en el distrito.

3.3.3 Diques, vetas y vetillas

Dentro del Distrito Fortress se identificaron una serie de diques, vetas y vetillas que corresponden a cuerpos emplazados principalmente dentro de las debilidades de la corteza. Estas estructuras tienen una orientación preferencial NNW y son subverticales. En el caso de los diques se puede apreciar una tendencia dominante NNW, subordinada NS y presenta manteos entre 70 - 90° (Figura 31A, B). Con respecto a las vetas y vetillas, estas se engloban en un mismo diagrama y se observan orientaciones NNW, con manteos dominantes entre 70 - 90° (Figura 31C, D). Subordinadamente se presentan manteos menores a los antes mencionados.

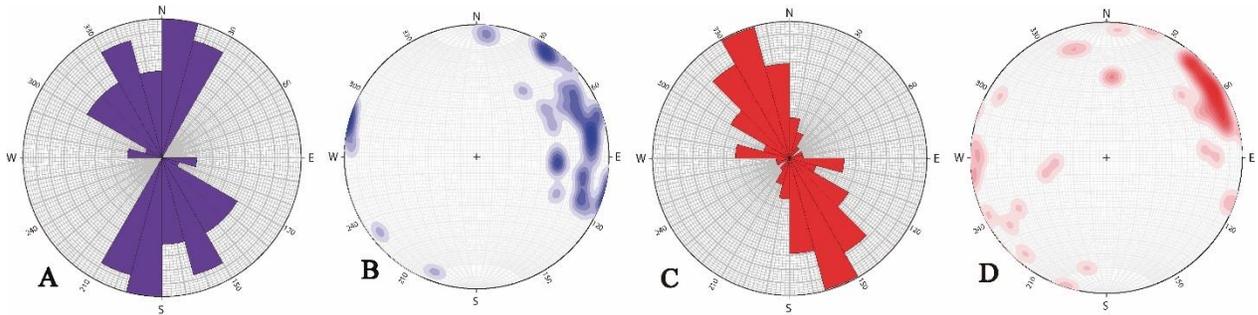


Figura 31: Diques, vetas y vetillas. A) Diagrama de roseta y B) de concentración de polos, de datos medidos en diques. C) Diagrama de rosetas y D) de concentración de polos, de vetas y vetillas.

SOLO USO ACADÉMICO

4 Discusiones

4.1 Relación del intrusivo diorítico - cuarzodiorítico con la MCG y el CPET

La litología principal dentro del distrito corresponde a un cuerpo intrusivo de composición diorítica a cuarzodiorítica con contenidos variables de minerales máficos, como piroxeno, hornblenda y biotita. Particularmente, hacia el sector occidental del distrito los minerales máficos se encuentran menos alterados y mejor preservados con respecto a los que se encuentran en el sector oriental. Estas rocas intrusivas aparecen en toda la extensión del Distrito Fortress y hospedan la mineralización de Fe, lo cual es relevante considerando que la mineralización tipo magnetita-apatito e IOCG suele hospedarse en rocas volcánicas y volcánicas – sedimentarias, como es el caso de Candelaria, Mantoverde, El Romeral y Cerro Negro Norte. Al igual que en el Distrito Fortress, Díaz (2020) describió las vetas mineralizadas del depósito I Higuera de la Cordillera de la Costa en la Región de Coquimbo, las cuales se encuentran emplazadas en rocas intrusivas dioríticas a granodioríticas de edad Cretácica. Cabe destacar que las vetas de la Higuera reflejarían una transición entre depósitos IOA en profundidad a IOCG a niveles más someros, consistente con el modelo de flotación propuesto para explicar el origen y la relación espacial de estos depósitos (Díaz, 2020; Figura 1)

De acuerdo con Creixell et al. (2012), dentro del distrito se habría emplazado la Monzodiorita Cruz Grande (MCG; 143-137 Ma) y el Complejo Plutónico El Tofo (CPET; 132-127 Ma). La MCG se caracterizaría por la ocurrencia de hornblenda y biotita, y una menor proporción de SiO₂ en comparación con el CPET, el cual presentaría una composición diorítica a tonalítica con anfíbola y piroxeno (Creixell et al., 2012). Cabe destacar, que las edades radiométricas de la MCG (143 Ma) fueron tomadas dentro del distrito, mientras que las edades del CPET (132 Ma) hacia el este del Sistema de Fallas El Tofo (Figura 7). La información geológica generada en este trabajo no sería suficiente para definir si los cuerpos intrusivos del Distrito Fortress corresponden a la MCG o al CPET, ya que no se observaron contactos entre intrusivos en terreno. Sin embargo, con base en la relación espacial y las dataciones radiométricas disponibles (Creixell et al., 2012) sugieren que el intrusivo diorítico - cuarzodiorítico se asociaría con la MCG (143 -137 Ma).

Otro punto interesante serían los diques hipabisales. De acuerdo con la escasa información disponible, estos presentarían composiciones andesíticas – basálticas y una orientación preferencial NW (Creixell et al., 2012). Esta información se condice con las observaciones en terreno respecto

a la orientación y composición de los diques andesíticos – dioríticos con orientaciones NW - NNW. Se reconocen fragmentos de roca hospedante dentro de ambas familias de diques (Figura 12B) lo cual también fue observado con el microscopio petrográfico (Figura 13EF). Esto sugiere que en el momento en que los diques andesíticos – basálticos fueron emplazados, el intrusivo diorítico – cuarzodiorítico no se encontraba totalmente fría. Cabe destacar, que una parte importante de la mineralización del distrito se encuentra estrechamente relacionado al emplazamiento de estos intrusivos. En los diques se observa mineralización de magnetita al igual que la encontrada dentro de la roca hospedante. Además, hacia el sector oriental, se observa que las vetas de magnetita, que corresponden a la principal mineralización del distrito, se canalizan por las mismas estructuras por donde fueron emplazados los diques (Figura 26A, C).

4.2 Alteración hidrotermal y mineralización del distrito

Una característica importante en la definición del tipo de depósito mineral es la clara identificación de las asociaciones minerales (paragénesis). Por lo tanto, una parte preponderante de este trabajo fue identificar las distintas alteraciones, su distribución en la zona de estudio y como estas estarían asociadas a mineralización de Fe.

Con base en las asociaciones minerales descritas a partir de secciones transparentes y pulidas, se propone una secuencia de eventos de alteración hidrotermal y mineralización para el Distrito Fortress, desarrollada de acuerdo con relaciones de corte y características texturales.

Se proponen tres eventos principales de alteración hidrotermal y mineralización para el Distrito Fortress (Eventos I, II y III; Figura 32). El primer evento (Evento I) comprende magnetita y actinolita diseminada y en vetillas, seguido del Evento II caracterizado por magnetita – actinolita diseminada, en vetillas y vetas, con escasa mineralización de pirita. Aparentemente el Evento I evento hace alusión a mineralización temprana que probablemente se encontraría distal a un cuerpo de magnetita vetiforme que no afloraría dentro del distrito. Durante la segunda etapa, se formarían distintos minerales de alteración tales como biotita, turmalina, albita, sericita epidota, clorita, escapolita, cuarzo, titanita y arcillas (Figura 32). Hacia el sector oriental del distrito, se observa un evento con alteración de sericita, arcillas y silicificación que se superimpondría a una zona de actinolita con vetas y vetillas de magnetita. El evento III corresponde a un evento de carácter supérgeno, caracterizado por la oxidación de magnetita in situ para formar hematita (martita) y rellenos de oquedades con limonitas (goethita, hematita, jarosita). Durante esta etapa también se

generaría algo de cuarzo, óxidos de Mn y arcillas. Adicionalmente, se formaría hematita de textura coloforme la cual se observa relleno de oquedades.

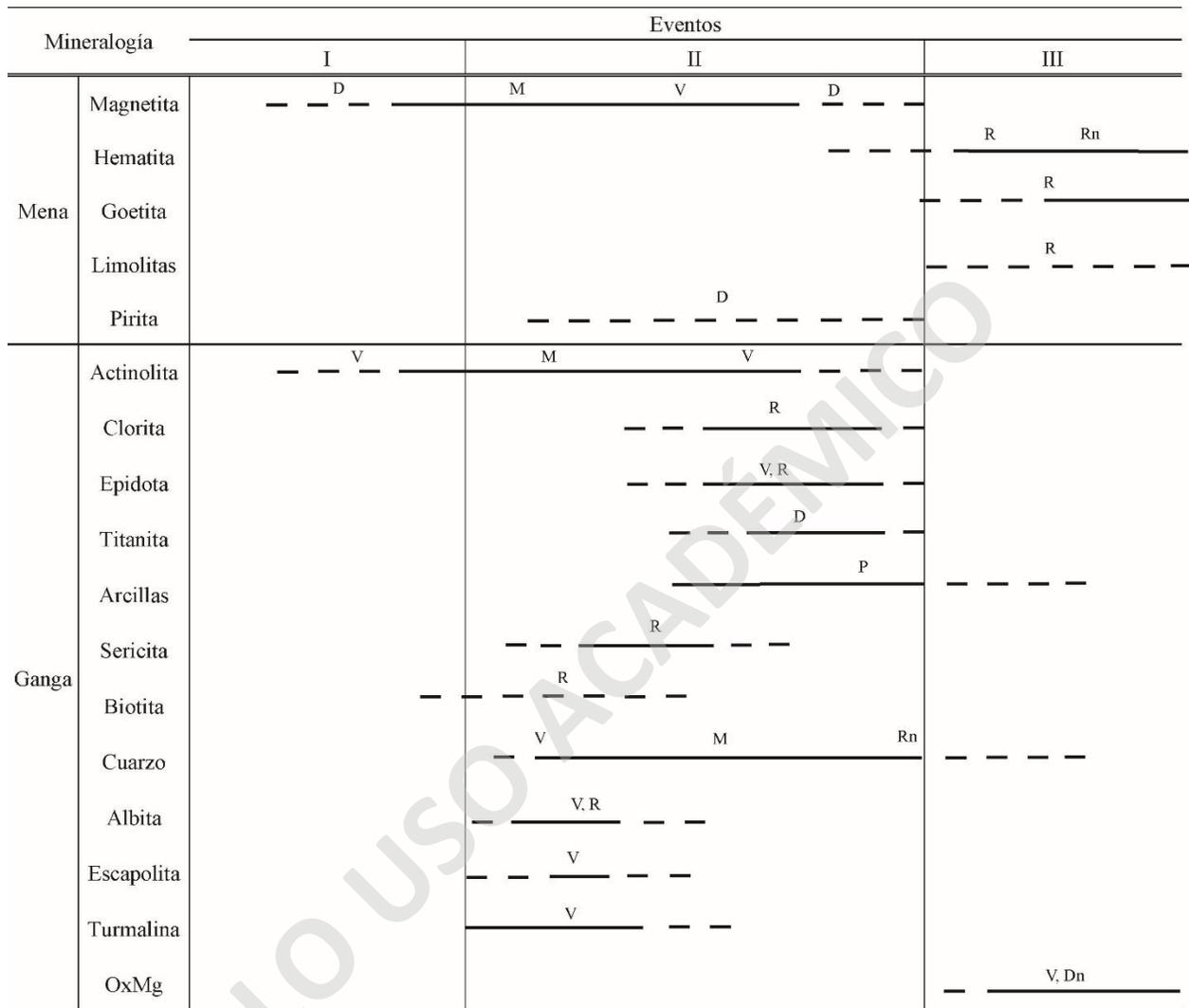


Figura 32. Secuencia paragenética preliminar del Distrito Fortress. Se determinan tres eventos, donde el primero y el segundo corresponden al desarrollo la mena de magnetita, y un tercer evento supérgeno. El grosor de las líneas muestra la proporción del mineral durante los eventos.

A grandes rasgos, las alteración hidrotermal y mineralización en el Distrito Fortress se engloba en el dominio occidental y oriental del distrito. El dominio occidental, presenta una mineralización de magnetita en vetillas y diseminado, junto con una serie de vetillas de actinolita, cuarzo, turmalina, además de epidota, titanita y albita diseminada. El dominio oriental, presenta una mineralización que consiste en vetas, vetillas y diseminado de magnetita la cual está inmersa en una amplia zona de silicificación, acillas y sericita. Esta zona también presenta minerales de epidota, clorita y albita en las vetas de magnetita. Según las asociaciones mineralógicas descritas

(Figura 32), el sector occidental del distrito estaría dominado por una alteración tipo calco – sódica, caracterizada por abundante actinolita y albita. Cabe destacar la ocurrencia escapolita dentro la secuencia paragenética, para la cual se ha sugerido un origen neumatolítico producto de la exsolución de volátiles provenientes de un magma (Rojas et al., 2018b). El caso del Distrito El Romeral se reportó la presencia de escapolita rica en Na en vetillas, la cual contiene ≤ 3000 ppm de Cl, indicando una proveniencia de fluidos hipersalinos y exsueles a partir de magmas de arco (Johnson et al., 2010). La mineralización por su parte se distribuye fundamentalmente en el sector oriental en al menos 5 vetas principales que indican un fuerte control estructural. Las vetas principales tienen una orientación NW – NNW y NS subordinada.

Considerando la presencia de alteración calco - sódica, el dominio de la mineralización de magnetita, la escasa presencia de sulfuros y la presencia de escapolita asociadas a las vetas y vetillas de magnetita, además del contexto geotectónico donde se emplaza el distrito dentro de la Franja Ferrífera Chilena, el Distrito Fortress presentaría características principalmente asociadas con depósitos tipo IOA (Williams et al., 2005; Palma et al., 2020). Adicionalmente, la sucesión de eventos paragenéticos muestra un sistema mineralizado que evolucionaría desde un evento de alta temperatura, profundo, posiblemente de carácter magmático-hidrotermal que dio origen a la mineralización tipo IOA, que gradaba hacia condiciones dominantes por fluidos hidrotermales que dan origen a alteraciones hidrotermales más ácidas y de menor temperatura. Posteriormente, la exhumación y erosión junto con la influencia de aguas meteóricas habrían facilitado la alteración supérgena de la magnetita.

4.3 Comparación del distrito con yacimientos proximales

El depósito El Tofo, es un depósito tipo IOA con una ley media de un 64% Fe y al menos 1,6 Mt (Rojo, 1991). Este yacimiento se encuentra a 5 km del Distrito Fortress (Figura 4B), y comparte diversas características como la orientación NW de la mineralización principal. Esta se sobrepone a estructuras NS correspondiente a una de las trazas del sistema de fallas El Tofo (Rojo, 1991). La unidad de baja ley (~20-35% Fe) propuesta por Rojo (1991) se compone principalmente de vetillas y diseminados de magnetita, lo cual es consistente con lo observado en el sector occidental del Distrito Fortress. La unidad de media-baja ley se compone principalmente por ocurrencia de magnetita en brechas, vetas y vetillas (~35 - 55% Fe) y se condice con la mineralización encontrada en el sector oriental del distrito. Adicionalmente, en el trabajo de Rojo

(1991), se reconoce una amplia zona de magnetita - actinolita con intercrecimiento de albita, silicificación y cuarzo - sericita en las proximidades del sistema de fallas. Estas asociaciones minerales también son reconocidas dentro del Distrito Fortress.

En el depósito El Tofo no existen datos directos de dataciones radiométricas. Sin embargo, se atribuyen edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de $104,9 \pm 0,7$ Ma en actinolitas hacia el sur del depósito El Tofo (Creixell et al., 2012) y de 129 ± 2 Ma en actinolitas hacia la quebrada Agua Salada (Jorquera et al., 2011). Estas edades son consistentes con dataciones U/Pb en circones magmáticos realizadas en diferentes intrusivos en el sector de La Serena - La Higuera y en Carrizalillo - El Tofo, indicando que los plutones precursores de la mineralización tienen edades entre los 132 - 129 Ma (Jorquera et al., 2011).

Por otro lado, en el depósito IOA El Romeral se ha estimado una cantidad de recursos sobre los 450 Mt con un 28,3% de ley de Fe (CAP, 2014). Este yacimiento se encuentra a 30 km del Distrito Fortress y la mineralización presenta un control principal asociado a la falla sinistral NNW El Romeral (Rojas et al., 2018a; Figura 4). Este distrito se encuentra limitado por la diorita El Romeral (129.0 ± 0.9 Ma U-Pb en circones; Rojas et al., 2018b) y por la granodiorita Punta de Piedra (102.2 ± 2.0 Ma U-Pb en circones; Rojas et al., 2018b), además de ser intruido por diques NW - NNW. La mineralización de Fe se compone principalmente por tres cuerpos mineralizados (Espinoza, 2000): (1) Cerro Norte, correspondiente a cuerpos de magnetita masiva subverticales y empobrecido de P y S; (2) Extensión Sur, correspondiente a cuerpos de magnetita masiva y brechas con abundante apatito y pirita; y (3) Cerro Principal, correspondiente a cuerpos de magnetita masiva y actinolita, además de magnetita diseminada. Este último cuerpo mineralizado alberga leyes entre 22% a 45% de Fe. Los estudios geocronológicos realizados en el depósito El Romeral sugieren al menos dos eventos de mineralización. El primer evento indica edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 128 Ma en cristales de actinolita asociados al cuerpo principal de magnetita. Mientras que el segundo evento indica edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 118 Ma en cristales de biotita secundarias (Rojas et al., 2018b).

A partir de los datos disponibles de los depósitos IOA proximales al Distrito Fortress, se reconoce una similitud entre estos depósitos respecto a las asociaciones mineralógicas, así como del sistema estructural dominante. El Distrito Fortress, El Tofo y El Romeral se habrían formado dentro del contexto regional de la Franja Ferrífera Chilena, en donde se ha determinado que la mineralización Fe se habría originado a partir de fluidos exsueles a partir de magmas de

composición intermedio - máficos durante la primera etapa del ciclo andino (Simon et al., 2018; Palma et al., 2020; Reich et al., 2022).

4.4 Relación de las estructuras con el Sistema de Fallas El Tofo

La deformación registrada en el distrito representa aparentemente una deformación frágil en lo que respecta al dominio oriental, con presencia de salbanda y brechas de falla. Sin embargo, la presencia de formas sigmoidales y el desarrollo de foliación en vetas y vetillas en el sector occidental del distrito permiten inferir un nivel estructural transicional - frágil. En general, las estructuras se disponen perpendiculares a la traza principal del sistema de fallas El Tofo, que tiene cinemática transpresiva siniestral (Figura 33). Se especula que estas estructuras probablemente estén asociadas a fallas normales con dirección NW (Figura 33), como se observan hacia el NW y SW del distrito (Figura 33).

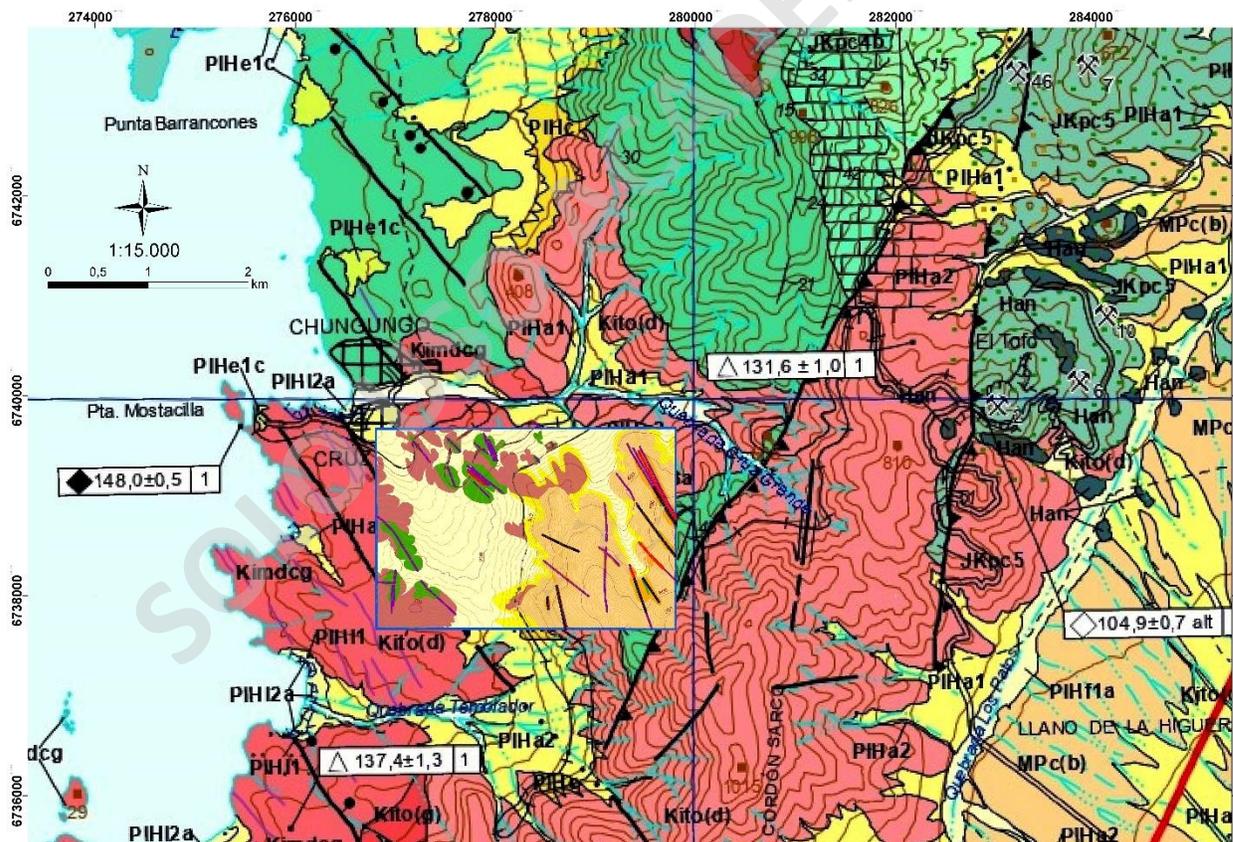


Figura 33: Superposición de mapa de la Geología de Carrizalillo-El Tofo (Creixell et al., 2012) con mapas elaborados en este estudio. La leyenda de los mapas se puede observar en la Figura 7, Figura 9, Figura 19 y Figura 28.

En las proximidades del distrito, se observa la zona de cizalle La Higuera, la cual tiene una traza NNE compuesta por milonitas que registran un evento transpresivo sinistral sobrepuesto a un

evento extensional (Creixell et al., 2012). Así mismo, el sistema de fallas El Tofo presenta una traza paralela a la ZCLH y deformación frágil (Creixell et al., 2012). El Sistema de Fallas El Tofo y la Zona de Cizalle La Higuera tienen manteos pronunciados ($70 - 80^\circ$) hacia el este y el oeste respectivamente, el cual forma arquitecturas de tipo hemigraben invertida (Creixell et al., 2012; Figura 8). Además, perpendicular a estos sistemas, se ha reconocido una serie de fallas normales NW, que forman cuencas extensionales con arquitecturas de tipo flor negativa, generadas por la transpresión sinistral de los sistemas estructurales antes mencionados (Van Der Pluijm & Marshak, 2004; Creixell et al., 2012).

Se propone que las estructuras del distrito están posiblemente asociadas a fallas normales (*Jog* extensional/cuencas de *pull-apart*) generadas por los sistemas de fallas de rumbo con cinemática transpresiva sinistral (Figura 33). Aunque en la Geología de Carrizalillo - El Tofo no se describen en detalle estas fallas normales, son reconocidas tanto en la Formación Punta del Cobre, como en la Monzodiorita Cruz Grande y en el Complejo Plutonico El Tofo. Esto indicaría que se generarían posterior a la formación y emplazamiento de estas unidades. Los sistemas transpresivos sinistrales suelen generar estructuras extensionales paralelos al vector de esfuerzo principal, es decir, perpendicular al SFET para el área de estudio (Van Der Pluijm & Marshak, 2004). El distrito presenta estructuras extensionales como vetas, vetillas y diques, las cuales presentan una tendencia principal en dirección NW (Figura 34). Además, los sistemas de diaclasas conjugadas indican una dirección de máximo esfuerzo en esta misma dirección (Figura 34). Esto es consistente con la formación de fallas normales en dirección NW generadas por la ZFA (SFET; Figura 33) durante el Cretácico.

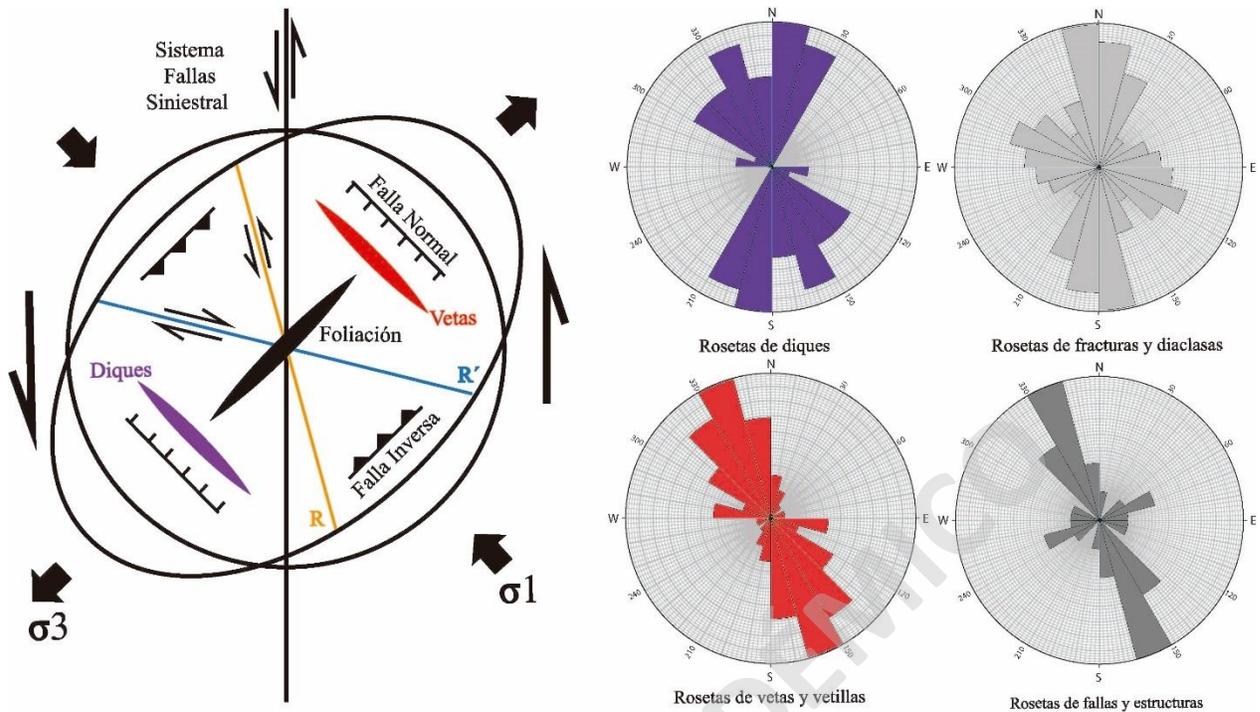


Figura 34. Representación de las estructuras generadas por sistemas transpresivos sinistral con un vector de esfuerzo principal NW. Los gráficos de rosetas adyacentes muestran la orientación de los datos estructurales de diques, vetas, vetillas, estructuras y diaclasas. Extraído y modificado de (Van Der Pluijm & Marshak, 2004).

4.5 Síntesis geológica

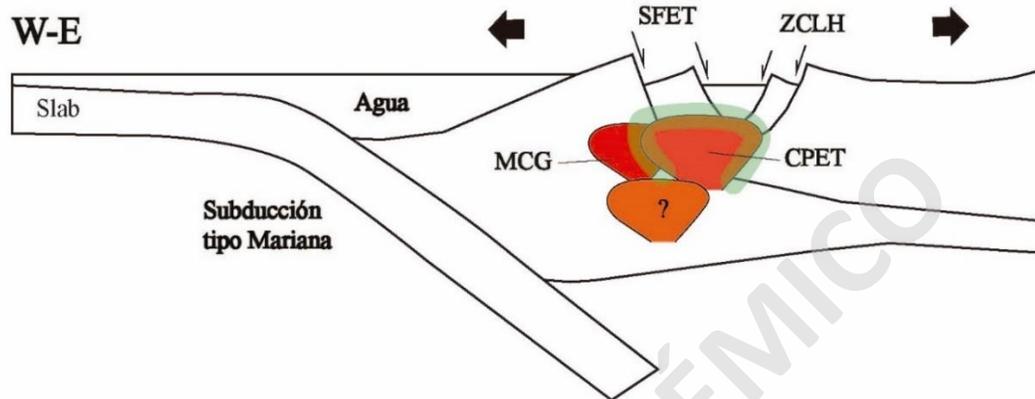
El evento más antiguo registrado en el Distrito Fortress estaría asociado al Cretácico Inferior (143-127 Ma), marcado por el emplazamiento de intrusivos de composiciones intermedias a máficas, como la Monzodiorita Cruz Grande y el Complejo Plutónico el El Tofo (Creixell et al., 2012; Figura 35A). Estos corresponderían a la roca hospedante de la mineralización del Distrito Fortress. Las rocas intrusivas se emplazarían en secuencias volcánicas y sedimentarias marinas de edad Jurásica asociadas a la Formación Punta del Cobre (Creixell et al., 2012), la cual no ha sido reconocida dentro del distrito.

Durante los ~132 - 127 Ma ocurriría la extensión de la zona de cizalle La Higuera, además de la intrusión del plutón el Tofo, el cual se especula que es uno de los precursores de la mineralización en la zona (Arévalo & Creixell, 2009). Asimismo, se sugiere que el arco magmático se encontraba en este lugar en ese periodo (Creixell et al., 2012). Posiblemente la etapa temprana de mineralización estaría relacionado al término de este periodo (Figura 35A).

Posteriormente, hacia finales del Cretácico Inferior (~129 - 121 Ma), se generaría la mineralización del Distrito Fortress, que incluye sistemas de vetas de magnetita y una extensa zona

de alteración hidrotermal (Figura 35B). El sistema de fallas El Tofo y la zona de cizalle La Higuera cambiarían su cinemática a movimientos transpresivos sinistres. Esta etapa se enmarcaría la mineralización del Distrito.

A Emplazamiento syn extensional de plutones dioríticos (143-127 Ma)



B Cinemática transpresiva sinistral en SFET y ZCLH (121 Ma)

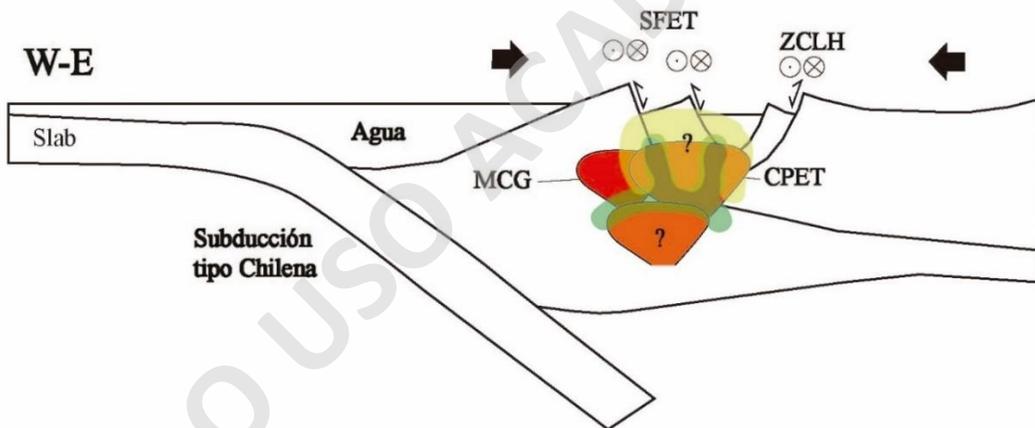


Figura 35. Sección esquemática del contexto regional del emplazamiento de los intrusivos y mineralización para el Distrito Fortress. En colores rojos y anaranjados se aprecia la Monzodiorita Cruz Grande (MCG) y el Complejo Plutónico El Tofo (CPET). Las estructuras con manteos al este son parte del Sistema de Fallas El Tofo (SFET) y con manteos al oeste es la Zona de Cizalle La Higuera (ZCLH). En color verde con baja opacidad muestra la zona de alteración actinolita y la de color amarillo con baja opacidad a la silicificación. Extraído y modificado de (Creixell et al., 2012; Martínez et al., 2019; Rojas et al., Genesis of the El Romeral iron ore: New contributions to the understanding of the iron oxide apatite deposits, 2017).

4.6 Implicancias en la exploración geológica

En resumen, se identifican dos dominios de alteración hidrotermal y mineralización en el Distrito Fortress. El sector occidental, con mineralización de magnetita en vetillas y diseminado acompañada principalmente de actinolita y albita, el cual se podría relacionar con un nivel estructural transicional controlado por estructuras NW-NNW, representando un nivel más profundo del sistema. El dominio oriental, con mineralización de magnetita en vetas, vetillas y

diseminado, con predominio de silicificación y alteración a arcilla - sericita, el cual se podría relacionar con un nivel estructural frágil controlado por estructuras NW-NNW, representando un nivel más somero del sistema. Cabe destacar que la mineralización del distrito se encontraría estrechamente relacionado al emplazamiento de diques hipabisales, posteriores a la intrusión de la diorita - cuarzodiorita de hornblenda.

Las características geológicas mencionadas son útiles para vectorizar futuros trabajos de exploración minera dentro del distrito. Potenciales *targets* de mineralización tipo IOA, se asociarían a estructuras extensionales con orientación NW – NNW y al emplazamiento de diques hipabisales intermedios a máficos, que se observan en algunos sectores del distrito cortando a los intrusivos dioríticos -cuarzodioríticos. Dichas estructuras serían perpendiculares al Sistema de Fallas El Tofo y habrían permitido el emplazamiento de plutones de edad Cretácica en la Cordillera de la Costa. Finalmente, se sugiere que el mayor potencial económico se encontraría hacia el sector oriental del distrito.

SOLO USO ACADÉMICO

5 Conclusiones

Mediante este trabajo se caracterizó la geología de superficie del Distrito Fortress, ubicado dentro de la Franja Ferrífera Chilena en la Cordillera de la Costa. Específicamente, se elaboraron mapas 1:4.000 de litologías, alteración hidrotermal, mineralización y estructuras. Esto permitió proponer una secuencia paragénetica mediante la descripción macroscópica y petro-calcográfica de rocas representativas del distrito. Adicionalmente, se propuso una evolución geológica con base en dataciones geocronológicas obtenidas de la literatura, y la compilación de antecedentes regionales y de los depósitos IOA El Tofo y El Romeral.

Respecto a la litología, en el área de estudio se reconoció una diorita - cuarzodiorita de horblenda, la cual estaría espacialmente relacionado con la Monzodiorita Cruz Grande (143 - 137 Ma) y el Complejo Plutónico El Tofo (132 - 127 Ma) (Creixell et al., 2012). Estas rocas intrusivas aparecen en toda el área de estudio y hospedan cuerpos vetiformes de magnetita, lo cual es relevante considerando que la mineralización tipo magnetita-apatito e IOCG suele hospedarse en rocas volcánicas y volcánicas – sedimentarias a lo largo de la Franja Ferrífera Chilena de la Cordillera de la Costa. Adicionalmente, se reconoció una estrecha relación entre los diques hipabisales - que cortan al cuerpo intrusivo principal - y la mineralización de Fe. La formación de vetas de magnetita se encontraría relacionada a estas mismas estructuras por donde se emplazaron dichos diques.

En el Distrito Fortress se reconoció dos dominios de alteración hidrotermal. Por una parte, el sector occidental se encuentra dominado por una alteración hidrotermal tipo calco – sódica de baja intensidad, con abundante actinolita y albita. Por otra parte, el sector oriental, se encuentra dominado por una silificación y asociación de sericita – arcillas de alta intensidad. La mineralización ocurre principalmente como magnetita diseminada, además de magnetita en vetillas y vetas con orientación preferencial NNW. Las vetas de magnetita se distribuyen principalmente hacia el sector oriental del distrito.

Con base en las descripciones petro-calcográficas se identificaron tres eventos (Evento I, II y III) de alteración hidrotermal y mineralización en el distrito. El primer evento (Evento I) comprende magnetita diseminada y en vetillas, asociada principalmente con alteración calco - sódica. El Evento II se caracteriza por magnetita diseminada, en vetillas y vetas, con escasa mineralización de pirita, asociada principalmente con silificación, alteración de arcillas -sericita y calco – sódica subordinada. El evento III corresponde a un evento de carácter supérgeno,

caracterizado por la oxidación de magnetita in situ para formar hematita (martita) y limonitas (goethita, hematita, jarosita).

Las características geológicas, incluyendo la ocurrencia de magnetita en cuerpos vetas y vetillas, el fuerte control estructural de la mineralización, la presencia de alteración calco – sódica, la ocurrencia de escapolita y la escasa (casi nula) ocurrencia de sulfuros, permiten asociar la mineralización del distrito a la de un depósito de tipo magnetita – apatito o *iron oxide - apatite*.

Los datos estructurales medidos y la relación espacial de las estructuras extensionales (diques, vetas, vetillas y diaclasas) indican que la mineralización de Fe estaría fuertemente controlada por estructuras con orientación NW. Estas estructuras serían paralelas al vector de compresión durante el régimen transpresivo sinistral que se desarrolló durante el Cretácico en el margen Andino, y se encontrarían subordinadas a la traza principal del sistema de fallas El Tofo.

Los resultados obtenidos de este estudio permiten vectorizar futuros trabajo de exploración minera dentro del Distrito Fortress. La búsqueda de potenciales *targets* de mineralización tipo IOA debiese enfocarse en la ocurrencia de estructuras extensionales con orientación NW – NNW y diques hipabisales intermedios a máficos. Dichas estructuras serían perpendiculares al Sistema de Fallas El Tofo con cinemáticas transpresivas sinistralas, que permitieron el emplazamiento de plutones de edad Cretácica en la Cordillera de la Costa.

5.1 Recomendaciones

Con el fin de continuar la exploración minera y la investigación en el Distrito Fortress, se recomiendan los siguientes trabajos:

1. Estudios de magnetometría: para determinar si las vetas de magnetita reconocidas en superficie desarrollan un cuerpo mineralizado a mayor profundidad. Los estudios de magnetometría son una alternativa económicamente accesible, y permitiría relacionar espacialmente anomalías magnéticas asociadas a la mineralización de magnetita, con los cuerpos mineralizados a profundidad (Servicios Geológicos Geodatos S.A.I.C).
2. Sondajes Diamantinos (DDH): si los resultados obtenidos de la magnetometría indican un cuerpo de magnetita en profundidad, se recomienda la realización de sondajes de diamantina con el fin de confeccionar un modelo geológico y determinar el potencial económico real del Distrito Fortress.

3. Ensayo tubo de Davis en muestras de sondaje: para determinar las concentraciones de Fe total y magnético, junto con la química mineral de elementos mayores (Anexo 1).
4. Estaciones de análisis cinemático: con el fin de complementar y discernir la cinemática de los sistemas estructurales que controla la mineralización en el distrito.

SOLO USO ACADÉMICO

5. Bibliografía

- Aguirre, L., & Egert, E. (1970). *Cuadrángulo Lambert (La Serena), Provincia de Coquimbo*. Retrieved from Instituto de Investigación Geológica.
- Allmendinger, R. W., Cardozo, N., & Fisher, D. (2012). *STRUCTURAL GEOLOGY ALGORITHMS*. Retrieved from <https://doi.org/10.1017/CBO9780511920202>
- Arévalo, C. V. (2005). *Carta Los Loros 1:100.000, Región de Atacama, Chile*. Retrieved from Servicio Nacional de geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología: <https://www.scribd.com/document/367395024/Carta-Los-Loros-Txt>
- Arévalo, C. V., Mourgues, F. A., & Chavez, R. (2009). *Geología del área Vallenar-Domeyko 1:100.000, Región de Atacama, Chile*. Retrieved from Subdirección Nacional de Geología: <https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/index.asp?param=o%AD%88%92bh%93%8Dqa&Op=3>
- Arévalo, C., & Creixell, C. (2009). *The Atacama Fault System and its role on the migration and deposition of Iron Oxide Copper Gold and Magnetite-Apatite ores: an evaluation from the Los Choros and Huasco valleys*. Retrieved from Colloquium on Latin American Geosciences.
- Arriagada, C., Mpodozis, C., Roperch, P., Yañez, G., & Farías, M. (2009). *Rotaciones Tectónicas en Chile Central: El Oroclino de Vallenar y el "Megakink" del Maipo*. Retrieved from XII Congreso Geológico Chileno.
- Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., & Palma, G. (2017). *Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach*. Retrieved from Ore Geology Reviews: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.016>
- Barton. (2014). *Iron Oxide(-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) Systems*. Retrieved from Treatise on Geochemistry: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01123-2>
- Barton, M. D., & Johnson, D. A. (1996). *Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization*. Retrieved from Geology.
- Barton, M. D., & Johnson, D. A. (2004). *Footprints of Fe-oxide (Cu-Au) systems*. Obtenido de University of Western Australia.

- Bernal, N., Gleenson, S., Smith, M., Barnes, J., & Pan, Y. (2017). *Evidence of multiple halogen source in scapolites from iron oxide-copper-gold (IOCG) deposit and regional Na Cl metasomatic alteration, Norrbotten Country, Sweden.*
- Bookstrom, A. (1977). *Magnetite deposits of El Romeral, Chile.* Retrieved from Economic Geology.
- Cahill, T., & Isacks, B. L. (1992). *Seismicity and shape of the subducted Nazca plate.* Retrieved from Journal of Geophysical Research: http://earthjay.com/earthquakes/20190105_brazil/cahill_isacks_1992_seismicity_shape_subducted_nazca_plate.pdf
- CAP. (2014). *Minería.* Retrieved from Anual Report: <http://www.capmineria.cl/wp-content/uploads/>
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. P. (2007). *Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile.* Retrieved from Geological Society London Special Publications: <https://www.researchgate.net/publication/279890158>
- Charrier, R., Farías, M., & Maksaev, V. (2009). *Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina.* Retrieved from Revista de la Asociación Geológica Argentina: <https://www.researchgate.net/publication/317539364>
- Chen, H. Y., Clark, A. H., & Kyser, T. K. (2011). *Contrasted hydrothermal fluids in the Mancora-Mina Justa iron-oxide Cu-Au-Ag deposits, south-central Perú.* Retrieved from Mineral Deposita.
- Chen, H., Clark, A. H., & Kyser, T. K. (2010). *The Mancora magnetite deposit, Ica, south-central Perú: a product of hydrous, iron oxide-rich melts?* Retrieved from Economic Geology.
- Childress, T., Simon, A., Reich, M., Barra, F., Arce, M., Lundstrom, C., & Bideman, I. (2020). *Formation of the Mantoverde iron oxide-copper-gold (IOCG) deposit, Chile: insights from Fe and O stable isotopes and comparisons with iron oxide-apatite (IOA) deposits.* Retrieved from Mineralium Deposita: <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00936-x>
- Chirif, L. H. (2010). *Microscopía Óptica de Minerales.* Retrieved from Instituto Geológico Minero y Metalurgico: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/379>

- Cochilco, C. G. (2021). *Informe de mercado del Hierro y el Acero. Prespectivas para el 2021-2022*. Retrieved from Cochilco.cl: <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20Mercado%20Hierro%20y%20Acero.pdf>
- Covacevich, V. (1980). *Antecedentes paleontológicos de una muestra procedente de Punta Mar Gruesa, IV Región*. Retrieved from Instituto de investigación Geológica.
- Creixell, C., Ortiz, M., & Arévalo, C. V. (2012). *Geología del área Carrizalillo-El Tofo 1:100.000, Región de Atacama y Coquimbo, Chile*. Retrieved from Subdirección Nacional de Geología: <https://www.researchgate.net/publication/288666120>
- Creixell, C., Fuentes, J., Bierma, H., & Salazar, E. (2020). *Tectonic setting of Cretaceous porphyry copper deposits of northern Chile (28°-30° S) and its relations with magmatic evolution and metallogeny*. Retrieved from Andean Geology: DOI: 10.5027/andgeoV47n3-3035
- Creixell, C., Labbé, M., Arévalo, C., & Salazar, E. (2013). *Geología del área Estación Chañar-Junta de Chingoles 1:100.000, Regiones de Atacama y Coquimbo, Chile*. Retrieved from Subdirección Nacional de geología: DOI: 10.13140/RG.2.1.4112.2160
- Dare, S., Barnes, S., & Beaudoin, G. (2014). *Did the massive magnetite “lava flows” of El Laco (Chile) form by magmatic or hydrothermal processes? New constraints from magnetite composition by LA-ICP-MS*. Retrieved from Miner Deposita: DOI 10.1007/s00126-014-0560-1
- Deditius, A., Reich, M., Simon, A., Suvorova, A., Knipping, J., Roberts, M., . . . Saunders, M. (2018). *Nanogeochemistry of hidrothermal magnetite*. Retrieved from Contributions to Mineralogy and Petrikigy: <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1474-1>
- del Real, I., Reich, M., Simon, A., Deditius, A., Barra, F., Rodríguez-Mustafa, M., . . . Roberts, M. (2021). *Formation of giant iron oxide-copper-gold deposits by superimposed, episodic hydrothermal pulses*. Retrieved from Communications earth and environment: <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00265-w>
- del Real, I., Thompson, J., & Carriedo, J. (2018). *Lithological and Structural Controls on the Genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile*. Retrieved from Ore Geology Reviews.

- del Rey, Á., Deckart, K., Arriagada, C., & Martínez, F. (2016). *Resolving the paradigm of the late Paleozoic–Triassic Chilean magmatism: Isotopic approach*. Retrieved from Gondwana Research: DOI: 10.1016/j.gr.2016.06.008
- Díaz, K. (2020). *Geología del depósitos IOCG La Higuera, Región de Coquimbo, Chile*. Obtenido de Universidad de Chile.
- Empanan, C., & Pineda, G. (2000). *Area La Serena-La Higuera 1:100.000, Región de coquimbo, Chile*. Retrieved from Subdirección Nacional de geología.
- Espinoza. (2000). *Estudio petrográfico del cuerpo Cerro Principal del distrito ferrífero El Romeral, IV región- La Serena, Chile*. Retrieved from Honours thesis, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Santiago, Chile.
- Espinoza, R. S., Véliz, G. H., Esquivel, L. J., Arias, F. J., & Moraga, B. A. (1996). *The cupriferous province of the Coastal Range, northern Chile: New Discoveries, Mineralization Styles and Metallogeny*. Retrieved from Society of Economic Geologist.
- Groves, D., Bierlein, F., Meinert, L., & Hitzman, M. (2010). *Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) Deposits through Earth History: Implications for Origin, Lithospheric Setting, and Distinction from Other Epigenetic Iron Oxide Deposits*. Retrieved from Economic Geology: DOI: 10.2113/gsecongeo.105.3.641
- Hitzman, M. W., Oreskes, N., & Einaudi, M. T. (1992). *Geological characteristics and tectonic setting of proterozoic iron oxide (Cu, U, Au, REE) deposits*. Retrieved from Precamb.
- Hofstetter, B., Fuenzalida, H., & Cecioni, G. (1957). *In Lexique Stratigraphique International*. Retrieved from Centre de Recherche Sciences.
- Investing. (abril de 2022). *Investing.com*. Obtenido de <https://es.investing.com/commodities/iron-ore-62-cfr-futures>
- Jofré, L. A. (2021, Septiembre). *Distrto Minero Fortress Chungungo*. Retrieved from Informe Técnico, Levantamiento Topográfico y Muestreo Depósitos Superficiales de Hierro, IV Región.

- Johnson, E., Wallace, P., Cashman, K., & Granados, H. (2010). *Degassing of volatiles (H₂O, CO₂, S, Cl) during ascent, crystallization an eruption at mafic monogenetic volcanoes in Central Mexico*.
- Jorquera, R., Pizarro, N., Vogel, S., Díaz, A., & Vivallo, W. (2011). *Yacimientos Metalíferos del área La Serena-La Higuera 1:100.000, Región de Coquimbo, Chile*. Retrieved from Subdirección Nacional de Geología.
- Knipping, J. L., Bilinker, L., Simon, A., Reich, M., Barra, F., Deditius, A., . . . Munizaga, R. (2015b). *Trace elements in magnetite from massive iron oxide-apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes*. Retrieved from Geochimica et Cosmochimica Acta: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2015.08.010>
- Knipping, J., Bilenker, L., Simon, A., Reich, M., Barra, F., Deditius, A., . . . Munizaga, R. (2015a). *Giant Kiruna-type deposits form by efficient flotation of magmatic magnetite suspensions*. Retrieved from Geological Society of America: doi:10.1130/G36650.1
- La Cruz, N. L., Ovalle, T., Simon, A., Konecke, B., Barra, F., Reich, M., . . . Childress, T. (2020). *The Geochemistry of Magnetite and Apatite from the El Laco Iron Oxide-Apatite Deposit, Chile: Implications for Ore Genesis*. Retrieved from Society of Economic Geologists, Inc: doi:10.5382/econgeo.4753; 30 p.
- La Cruz, N., Simon, A., Wolf, A., Reich, M., Barra, F., & Gagnon, J. (2019). *The geochemistry of apatite from the Los Colorados iron oxide-apatite deposit, Chile: implications for ore genesis*. Retrieved from Mineralium Deposita: <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00861-z>
- Maksaev, V., & Zentilli, M. (2002). *Chilean Strata-Bound Cu.Ag Deposits: An Overview*. Retrieved from Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Persperive; PGS Publishing.
- Martínez, F., Arriagada, C., Lopez, C., & Parra, M. (2019). *Tectonic evolution of the western "Pampean" flat segment (28°-30°S)*. Retrieved from Andean Tectonics: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816009-1.00019-8>

- Martínez, F., Arriagada, C., Mpodozis, C., & Peña, M. (2012). *The Lautaro Basin: A record of inversion tectonics in northern Chile*. Retrieved from Andean Geology: <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV39n2-a04>
- 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*. Retrieved from Journal of South American Earth Sciences: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.07.001>
- Menard, J. (1995). *Relationship between altered pyroxene diorite and the magnetite mineralization in the Chilean Iron Belt, with emphasis on the El Algarrobo iron deposits (Atacama region, Chile)*. Retrieved from Mineral. Deposita.
- Morales, H., Reich, M., Arancibia, G., & Barra, F. (2017). *Estudio de la paragénesis y química mineral en magnetitas del depósito tipo IOCG Dominga, IV región, Chile*. Retrieved from Universidad de Chile, Facultad de ciencias, físicas y matemáticas, Departamento de Geología.
- Mortimer, C. (1973). *The Cenozoic history of the southern Atacama Desert, Chile*. Retrieved from Geol. Soc. Lonf.
- Moscoso, R., Nasi, C., & Salinas, P. (1982). *Hoja de Vallenary parte norte de La Serena, Regiones de Atacama y Coquimbo*. Retrieved from Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Mumin, A. H., Corriveau, L., Somarin, A. K., & Ootes, L. (2007). *Iron oxide copper-gold-type polymetallic mineralization in the contact Lake Belt, Great Bear Magmatic zone, Northwest Territories, Canada*. Retrieved from Explor. Min. Geol.
- Naranjo, J. (1987). *Interpretación de la Actividad Cenozoica Superior a lo Largo de la Zona de Falla Atacama, Norte de Chile*. Retrieved from Revista Geológica de Chile Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Naslund, H. R., Henríquez, F., Nystrom, J. O., Vivallo, W., & Dobbs, F. M. (2002). *Magmatic Iron ores and associated mineralization examples from the Chilean high Andes and Coastal Cordillera*. Retrieved from Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: a global perspective.

- Nystrom, J. O., & Henriquez, F. (1994). *Magmatic Features of Iron Ores of the Kiruna Type in Chile and Sweden: Ore Textures and Magnetite Geochemistry*. Retrieved from Economic Geology: <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.89.4.820>
- Ovalle, T., La Cruz, N., Reich, M., Barra, F., Simon, A., Konecke, B., . . . Morata, D. (2018). *Formation of massive iron deposits linked to explosive volcanic eruptions*. Retrieved from Scientific Reports: DOI:10.1038/s41598-018-33206-3
- Oyarzun, R., Oyarzún, J., Ménard, J. J., & Lillo, J. (2003). *The Cretaceous iron belt of northern Chile: Role of oceanic plates, a superplume event, and a major shear zone*. Retrieved from Mineralium Deposita: DOI 10.1007/s00126-003-0359-y
- Palma, G., Barra, F., Reich, M., Simon, A., & Romero, R. (2020). *A review of magnetite geochemistry of Chilean iron oxide-apatite (IOA) deposits and its implications for ore-forming processes*. Retrieved from Ore Geology Reviews: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103748>
- Palma, G., Barra, F., Reich, M., Valencia, V., Simon, A., Vervoot, J., . . . Romero, R. (2019). *Halogens, trace element concentrations, and Sr-Nd isotopes in apatite from iron oxide-apatite (IOA) deposits in the Chilean iron belt: Evidence for magmatic and hydrothermal stages of mineralization*. Retrieved from Geochimica et Cosmochimica Acta: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.12.019>
- Palma, G., Reich, M., Barra, F., Ovalle, T., Del Real, I., & Simon, A. (2021). *Thermal evolution of Andean iron oxide-apatite (IOA) deposits as revealed by magnetite thermometry*. Retrieved from Scientific reports: <https://doi.org/10.1038/S41598-021-97883-3>
- Peña, M., Becerra, J., Martínez, F., & Arriagada, C. (2013). *Geología del área Yerbas Buenas-Tres Morros 1:100.000, Región de Atacama, Chile*. Retrieved from Subdirección Nacional de Geología.
- Perez, R. X., Melo, G., & Toledo, P. (2019). *IOCG System of the Carajás Province, Amazon Craton, Northern of Brazil*. Retrieved from Technical Report, Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira: <https://www.researchgate.net/publication/336287943>

- Pollard, P. J. (2006). *An intrusion-related origin for Cu-Au mineralization in iron oxide-copper-gold (IOCG) provinces*. Retrieved from Miner Deposita.
- Pollard, R. (2000). *Evidence of a magmatic fluid and metal source for Fe-oxide Cu-Au mineralization*. Retrieved from Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits.
- Raab. (2001). *Geology of the Cerro Negro Norte Fe-oxide (Cu-Au) District, Coastal Cordillera, northern Chile. MSc thesis, Oregon*. Retrieved from State University.
- Reich, M., Simon, A., Deditus, A., Barra, F., Chryssoults, S., Lagas, G., . . . Munizaga, R. (2016). *Trace element signature of pyrite from the Los Colorados iron oxide-apatite (IOA) deposits, Chile a missing link between Andean IOA and iron oxide copper gold systems?* Retrieved from Scientific Communications.
- Reich, Simon, A., Barra, F., Palma, G., Hou, T., & Bilenker, L. (2022). *Formation of Iron Oxide-Apatite Deposits*. Retrieved from Nature Reviews Earth and Environment: <https://doi.org/10.1038/>
- Reutter, K. J. (1974). *Entwicklung und Bauplan der chilenischen HochKordillere im Bereich 29°S sudicher Breite*. Retrieved from Neues Jahrbuch für Geologie und Palantologie.
- Rhodes, A. I., & Oreskes, N. (1999). *Oxygen isotope composition of magnetite deposits at El Laco, Chile: Evidences of formation from isotopically heavy fluids*. Retrieved from Geology and ore deposits of de Central Andes.
- Rhodes, A. L., & Oreskes, N. (1995). *Magnetite deposition at El Laco, Chile: implications for Fe-oxide formation in magmatic-hydrothermal systems. Gigant ore deposits.II Controls on the scale of orogenic magmatic-hydrothermal mineralization*. Obtenido de Queen´s university.
- Rieger, A., Marschik, R., Diaz, M., Holzl, S., Chiaradia, M., Akker, B., & Spangenberg, J. (2010). *The hypogene iron oxide copper-gold mineralization in the Mantoverde district. North Chile*. Retrieved from Economic Geology .
- Rieger, A., Marschik, R., Díaz, M., Holzl, S., Chiaradia, M., Akker, B., & Spangenberg, J. (2010). *The hypogene iron oxide copper-gold mineralization in the Mantoverde district. North Chile*. Retrieved from Econ. Geol.

- Rojas, P., Barra, F., Deditius, A., Reich, M., Simon, A., Roberts, M., & Rojo, M. (2018a). *New contributions to the understanding of Kiruna-type iron oxide-apatite deposits revealed by magnetite ore and gangue mineral geochemistry at the El Romeral desposit, Chile*. Retrieved from Ore Geology Review: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.003>
- Rojas, P., Barra, F., Reich, M., & Morata, D. (2017). *Genesis of the El Romeral iron ore: New contributions to the understanding of the iron oxide apatite deposits*. Retrieved from Universidad de Chile, Facultad de ciencias Físicas y Matematicas, Departamento de Geología: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/146513/Genesis-of-the-El-Romeral-iron-one-disposit-New-contributions-to-the-understanding.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rojas, P., Barra, F., Reich, M., Deditius, A., Simon, A., Uribe, F., . . . Rojo, M. (2018b). *A genetic link between magnetite mineralization and diorite intrusion at the El Romeral Iron oxide-apatite deposit, northern Chile*. Retrieved from Mineralium Deposita: <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0777-x>
- Rojo, M. (1991). *Geología y Recursos del Yacimiento de Hierro El Tofo, Región de Coquimbo, Chile*. Retrieved from VI Congreso Geológico Chileno, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Ruíz, C., Aguirre, L., Corvalán, J., Klohn, C., Klohn, E., & Levi, B. (1965). *Geología y yacimientos metalíferos de Chile*. Retrieved from Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago.
- Salazar, E., Barra, F., Reich, M., Simon, A., Leisen, M., Palma, G., . . . Rojo, M. (2020). *Trace element geochemistry of magnetite from the Cerro Negro Norte iron oxide-apatite deposit, northern Chile*. Retrieved from Mineralium Deposita: <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00879-3>
- Scheuber, E., & Andriessen, P. (1990). *he kinematic and geodynamic significance of the Atacama fault zone, northern Chile*. Retrieved from Journal of Structural Geology.
- Segerstrom, K. (1960). *Cuadrángulo Quebrada Paipote, Provincia de Atacama, Chile*. Retrieved from Instituto de Investigación Geológica de Santiago.
- Segerstrom, K., & Parker, R. L. (1959). *Cuadrángulo Cerrillos, Provincia de Atacama, Chile*. Retrieved from Instituto de Investigacion Geológica de Santiago.

- Segerstrom, K., & Ruiz, C. (1962). *Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama, Carta Geológica de Chile, Escala 1:50.000*. Retrieved from Instituto de Investigación de Geología de Santiago.
- Sillitoe. (2003). *Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view*. Retrieved from Mineralium Deposita: DOI 10.1007/s00126-003-0379-7
- Sillitoe, R., & Burrows, D. (2002). *New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, northern Chile*. Retrieved from Economic Geology.
- Simon, A., Knipping, J., Reich, M., Barra, F., Deditius, A., Bilenker, L., & Childress, T. (2018). *Kiruna-Type Iron Oxide-Apatite (IOA) and Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) Deposits Form by a Combination of Igneous and Magmatic-Hydrothermal Processes: Evidence from the Chilean Iron Belt*. Retrieved from Society of Economic Geologists, Inc.: doi: 10.5382/SP.21.06; 26 p.
- Streckeisen. (1976). *To each plutonic Rock its proper name*. Retrieved from Earth Science.
- Tornos, F., Velasco, F., & Hanchar, J. (2016). *Iron-rich melts, magmatic magnetite, and superheated hydrothermal systems: The El Laco deposit, Chile*. Retrieved from The Geological Society of America: doi:10.1130/G37705.1
- Tornos, F., Velasco, F., & Hanchar, J. (2017). *The magmatic to magmatic-hydrothermal evolution of the El Laco deposit (Chile) and its implications for the genesis of magnetite-apatite deposits*. Retrieved from Economic Geology: <https://doi.org/10.5382/econgeo.2017.4523>
- Van Der Pluijm, B., & Marshak, S. (2004). *Earth Structure*. Obtenido de Introduction to structural geology and tectonics.
- Velasco, F., Tornos, F., & Hanchar, J. (2016). *Immiscible iron- and silica-rich melts and magnetite geochemistry at the El Laco volcano (northern Chile): Evidence for a magmatic origin for the magnetite deposits*. Retrieved from Ore Geology Reviews: DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.06.007
- Veloso, E., Neira, S., Siña, A., Vivanco, M., Cembrano, J., Arancibia, G., . . . Garrido, I. (2015). *Etapas de Alteración/Mineralización en el Depósito de Dominga (Fe-Cu), Región de Coquimbo*. Retrieved from XIV Congreso Geológico Chileno.

- Vivallo, W. (2009). *Yacimientos de óxidos de Hierro-cobre-oro en Chile*. Retrieved from XII Congreso Geológico Chileno: https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/12993_v4_S11_060.pdf
- Vivallo, W., Díaz, F., & Jorquera, R. (2008). *Yacimientos metalíferos de la Región de Atacama*. Retrieved from Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Welkner, D., Arévalo, C., & Godoy, E. (2006). *Geología del área Freirina-El Morado 1:100.000, Región de Atacama, Chile*. Retrieved from Subdirección Nacional de Geología: <https://www.scribd.com/document/399400749/TMP000145-pdf>
- Westhues, A., Hanchar, J. M., Voise, C. R., Whitehouse, M. J., Rossman, G. R., & Wirth, R. (2017b). *Tracing the fluids evolution of the Kiruna iron oxide apatite deposits using zircon, monzonite, and whole rock trace elements and isotopic studies*. Retrieved from Chemical Geology.
- Westhues, A., Hanchar, J. M., Whitehouse, M. J., & LeMessurier, M. J. (2017a). *Evidence for hydrothermal alteration and source regions for the Kiruna iron oxide-apatite ore (northern Sweden) from zircon Hf and O isotopes*. Retrieved from Geology.
- Westhues, A., Hanchar, J. M., Whitehouse, M. J., & Martinsson, O. (2016). *New constraints on the timing of host-rock emplacement, hydrothermal alteration, an iron oxide-apatite mineralization in the Kiruna district, Norrbotten. Sweden*. Retrieved from Economic Geology.
- Williams, P., Barton, M., Johnson, D., Fontboté, L., De Haller, A., Mark, G., . . . Marschik, R. (2005). *Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Geology, Space-Time Distribution, and Possible Models of Origin*. Retrieved from Society of Economic Geologists Inc.: DOI: 10.5382/AV100.13

6. Anexos

Anexo 1. Certificado de análisis químico de muestras extraídas de los sectores interesantes de las plataformas ferroviarias. Análisis realizado por el Laboratorio Químico San Lorenzo mediante ensayo de tubo de Davis.



Fono: 51-2-616365 -
email: laboratoriosantorenzo@gmail.com
Barrio Industrial Sur, Lote 16 - Vallenar
www.laboratoriosantorenzovallepar.com

CERTIFICADO DE ANALISIS QUIMICO

Vallenar, Viernes 27 de Agosto del 2021.

CER-Fe OT 5577 - 2021

Señor
Roberto Lobos Olate
Inmobiliaria Inversiones y Constructora Lobos e Hijos Ltda
Presente

Adjunto Certificado de Análisis Químico de muestras

Nº	Folio	Id. Muestra	Cabeza									Concentrado		Ley Mag
			% Fe	% P	% S	% SiO2	% Al2O3	% V	% Na2O	% K2O	% Dtt	% Fedtt		
1	4454	X 08	65,96	0,349	0,028	2,12	0,468	0,172	0,027	0,011	67,4	69,31	46,71	
2	4455	X17	68,09	0,063	0,018	1,65	0,476	0,180	0,018	0,008	81,5	70,07	57,11	
3	4456	X 16	67,63	0,071	0,016	2,12	0,402	0,174	0,016	0,004	79,4	70,07	55,64	
4	4457	X 20	68,09	0,036	0,020	1,43	0,374	0,194	0,015	0,005	62,8	69,77	43,82	
5	4458	X 09	66,87	0,026	0,024	1,79	0,450	0,230	0,023	0,007	30,6	69,16	21,16	
6	4459	X 21	67,94	0,091	0,028	1,46	0,302	0,176	0,031	0,007	66,8	69,77	46,61	
7	4460	X 07	67,94	0,070	0,023	1,47	0,356	0,180	0,059	0,005	68,1	69,92	47,62	
8	4461	X 10	66,57	0,082	0,037	3,03	0,555	0,225	0,082	0,028	57,8	69,77	40,33	
9	4462	X 06	67,94	0,058	0,021	1,43	0,364	0,198	0,021	0,005	61,1	70,53	43,09	
10	4463	X 27	68,69	0,050	0,027	1,48	0,298	0,164	0,023	0,004	75,7	70,38	53,28	
11	4464	X 28	64,60	0,052	0,019	5,20	0,675	0,222	0,073	0,030	78,6	70,38	55,32	
12	4465	X 25	64,45	0,012	0,020	3,23	0,525	0,290	0,017	0,005	52,0	69,92	36,36	
13	4466	X 30	67,63	0,034	0,031	2,22	0,405	0,235	0,010	0,005	65,9	70,23	46,28	

Resultados de análisis válidos solo para las muestras proporcionadas por el cliente.

Anexo 2. Resumen de descripciones de muestras de rocas en el Distrito Fortress. Código de muestras correlativo a los puntos identificados en la Figura 6 que es de donde se extrajo cada roca. Abreviaturas: Act: actinolita, Alb: albita, Arc: arcillas blancas, Bt: biotita, Chl: clorita, Epi: epidota, Feld: Feldespato K, Goe: goetita, Hem: hematita, Hrb: hornblenda, Mgt: magnetita, OxMn: óxidos de manganeso, OxCu: óxidos de cobre, Pir: Pirolusita, Plg: plagioclasa, Py: pirita, Qz: Cuarzo, Ser: sericita, Tur: turmalina, ?: incierto.

Resumen descripciones macroscópicas del Distrito Fortress									
Muestra	UTM WGS 84			Minerales			Texturas	Alteración	Roca
	X	Y	Z	Primarios	Ganga	Mena			
FC002MA	278667	6739500	204	Plg-Hrb	-	-	Fanerítica	-	Diorita
FC004MA	278429	6739349	211	Hrb-Plg	Act	-	Fanerítica	Actinolita	Diorita
FC004MB	278429	6739349	211	Plg	Act-Arc	Hem-Goe-Mgt	Porfírica	Actinolita	Dique Andesítico
FC004MC	278429	6739349	211	-	Arc	Hem-Goe-Mgt	Obliterada	Sericita?	Diorita?
FC005MA	278435	6739347	212	Plg-Hrb	Act	-	Fanerítica	Actinolita	Diorita
FC006MA	278181	6739165	222	Plg-Hrb	-	-	Fanerítica	-	Diorita
FC007MA	278228	6737859	260	Plg-Hrb	Qz	-	Fanerítica	Silicificación	Diorita
FC007MB	278228	6737859	260	Plg	Qz-Arc	Hem-Goe-Mgt	Fanerítica	Silicificación	Diorita

FC007MC	278228	6737859	260	Plg	Qz-Arc-Ser?- Tur	Hem-Goe- Mgt	Obliterada	Silicificación	Diorita
FC010MA	278427	6739698	164	Hrb-Plg	Act-Ser	Mgt	Fanerítica	Actinolita	Diorita
FC011MA	278408	6739593	175	Plg-Hrb- Qz	Act	Hem-Goe	Fanerítica	Actinolita	Diorita
FC011MB	278408	6739593	175	-	Act-Qz	Hem-Goe	Vetilla	Actinolita	Vetilla Actinolita
FC012MA	277972	6739480	150	Hrb-Plg- Bt	Chl-Epi	-	Porfírica	Calcosódica Leve	Dique Diorítico
FC012MB	277972	6739480	150	Plg-Hrb	Act-Epi-Chl- Feld?	Hem-Goe	Fanerítica	Calcosódica	Diorita
FC012MC	277972	6739480	150	-	Act-Epi-Chl- Feld?-Qz-Bt	Mgt-Hem- Goe	Vetilla	Propilitica	Vetilla Feldespato K
FC013MA	277935	6739472	152	Plg	Qz-Alb-Chl- Bt-Feld?	-	Fanerítica	Calcosódica	Diorita
FC013MB	277935	6739472	152	Bt-Plg- Hrb	Act-Qz- Feld?-Chl	-	Porfírica	Propilitica	Dique Andesítico
FC014MA	277934	6739436	161	Plg-Hrb	-	-	Fanerítica	-	Diorita
FC015MA	277946	6739542	153	Plg-Hrb	Qz	-	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC015MB	277946	6739542	153	Plg-Hrb	Qz-Chl	Hem-Goe- Mgt	Fanerítica	Supérgena	Diorita
FC015' MA	277934	6739524	152	Plg	Qz-Alb-Bt- Feld?	-	Porfírica	Obliterado	Dique Andesítico
FC016MA	277865	6739459	110	Plg-Hrb	-	Mgt?	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC016MB	277865	6739459	110	Plg-Hrb	Act-Chl	Mgt?	Fanerítica	Actinolita	Dique Diorítico
FC017MA	277761	6739240	141	Plg-Hrb	Qz-Act	Hem-Goe- OxCu-Py	Porfírica	Supérgena	Dique Andesítico
FC018MA	277879	6739177	179	Plg-Hrb	Act-Qz	Hem	Fanerítica	Actinolita	Diorita
FC018MB	277879	6739177	179	Plg-Hrb	Act	Mgt?	Porfírica	Actinolita	Dique Andesítico
FC018' MA	277880	6739050	165	Plg	-	Mgt?	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC019MA	277702	6739107	142	Hrb-Plg	-	-	Fanerítica	-	Diorita
FC019MB	277702	6739107	142	-	Feld?-Act- Chl-Qz-Epi	Mgt	Vetilla	Calcosódica	Vetilla Magnetita
FC019MC	277702	6739107	142	-	Act-Ser- Feld?	Mgt-Hem- Goe	Vetilla	Actinolita Sericitita?	Vetillas Actinolita- Sericitita
FC021MA	277516	6739141	136	Plg-Hrb	-	Mgt?	Fanerítica	-	Diorita
FC021MB	277516	6739141	136	Plg	-	-	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC022MA	277580	6739513	125	Plg-Hrb	Act	Hem-Goe	Fanerítica	Actinolita	Diorita
FC022MB	277580	6739513	125	Plg	-	-	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC024MA	279514	6738021	465	Hrb-Plg	Qz	-	Fanerítica	Silicificación	Diorita
FC024MB	279514	6738021	465	Plg	Qz-Act-Epi	-	Obliterada	Silicificación Actinolita	Diorita
FC024MC	279514	6738021	465	-	Qz-Act-Epi	Mgt-Hem- Goe-OxMn	Obliterada	Silicificación Actinolita	Diorita?
FC025MA	279539	6738327	497	Plg	Qz	Hem-Goe- Mgt	Obliterada	Silicificación	Diorita
FC025MB	279539	6738327	497	-	Act-Arc-Chl	Hem-Goe	Obliterada	Actinolita Silicificación	Diorita?
FC026MA	279544	6738409	497	Plg	Pirolusita	Hem-Goe	Porfírica	Supérgena	Dique Andesítico
FC026MB	279544	6738409	497	-	Qz-Act-Chl	OxMn- Hem-Goe	Obliterada	Silicificación Supérgena	Diorita?

FC026MC	279544	6738409	497	-	-	Mgt-Hem-Goe-OxMn	Veta	Silicificación Actinolita Supérgena	Veta de Magnetita
FC027MA	279628	6738615	506	Plg	-	-	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC027MB	279628	6738615	506	Plg	Qz	OxMn-Fe	Porfírica	Silicificación	Dique Andesítico
FC027MC	279628	6738615	506	-	Chl-Act-Epi-Qz	Mgt-Hem-Goe-OxMn	Veta	Actinolita Silicificación	Veta de Magnetita
FC028MA	279539	6738327	497	Plg	Qz	Hem-Goe-OxMn	Obliterada	Silicificación Supérgena	Diorita
FC028MB	279539	6738327	497	Plg	Act	Hem-Goe-Mgt-OxMn	Porfírica	Actinolita Supérgena	Dique Andesítico
FC028MC	279539	6738327	497	-	Arc	Hem-Mgt-Goe-OxMn	Veta	Supérgena	Veta de Magnetita
FC029MA	278596	6737691	402	Plg-Hrb	Qz	-	Fanerítica	Silicificación	Diorita
FC030MA	278548	6737806	427	Plg-Hrb	Qz	Mgt?	Fanerítica	Silicificación	Diorita
FC031MA	278524	6737895	431	Plg-Hrb	Qz	-	Fanerítica	Silicificación	Diorita
FC031MA	278526	6737945	436	-	Qz-Tur-Arc	Mgt-Hem-Goe-OxMn	Veta	Silicificación	Veta de Magnetita
FC032MA	278583	6738037	441	Plg-Hrb	Qz	-	Fanerítica	Silicificación	Diorita
FC032MA	278615	6738070	443	Plg	-	Hem-Goe-OxMn	Porfírica	Supérgena	Dique Andesítico
FC032MB	278615	6738070	443	Plg	-	-	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC034MA	278680	6738347	450	Plg-Hrb	Qz	-	Fanerítica	Silicificación	Diorita
FC035MA	278674	6738495	456	Plg-Hrb	Qz	-	Fanerítica	Silicificación	Diorita
FC035MB	278674	6738495	456	-	Act-Chl-Arc	Hem-Goe-Mgt	Obliterada	Supérgena Sericita? Actinolita	Diorita?
FC036MA	278689	6738587	460	Plg	-	Hem-Goe	Obliterada	Silicificación Supérgena	Diorita?
FC037MA	278925	6738699	469	Plg-Hrb	Qz	Hem-Goe-OxMn	Fanerítica	Silicificación Supérgena	Diorita
FC038MA	279061	6738535	472	Plg-Hrb	Qz	Hem-Goe	Fanerítica	Silicificación Supérgena	Diorita
FC039MA	279102	6738446	477	-	Qz	Hem-Goe-OxMn	Obliterada	Silicificación Supérgena	Diorita?
FC039MB	279102	6738446	477	Plg	Alb-Epi	OxMn-Hem-Goe	Porfírica	Supérgena	Dique Andesítico
FC040MA	279147	6738414	479	Plg-Hrb	Qz	Hem-Goe	Fanerítica	Silicificación Supérgena	Diorita
FC040MB	279147	6738414	479	Plg	Alb-Epi	OxMn-Hem-Goe	Porfírica	Supérgena	Dique Andesítico
FC041MA	279289	6738268	483	Plg-Hrb	Qz	Hem-Goe-Mgt-OxMn	Fanerítica	Silicificación Supérgena	Diorita
FC041MB	279289	6738268	483	-	Act	OxMn-Hem-Goe-Mgt	Obliterada Vetilla	Supérgena	Dique?
FC042MA	279389	6738165	490	-	Qz-Act	Mgt-Hem-Goe-OxMn	Obliterada Veta	Silicificación Supérgena	Veta de Magnetita
FC043MA	277350	6738047	196	Hrb-Plg	-	-	Fanerítica	-	Diorita
FC043MB	277350	6738047	196	Plg	Act-Qz	Mgt	Porfírica	Actinolita	Dique Andesítico
FC044MA	277233	6738091	206	Plg	-	Mgt	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC045MA	277207	6738013	226	Hrb-Plg	-	-	Fanerítica	-	Diorita
FC046MA	276993	6738178	188	Plg-Hrb	-	-	Fanerítica	-	Diorita
FC046MB	276993	6738178	188	Plg	-	-	Porfírica	-	Dique Andesítico

FC047MA	276940	6738198	191	Plg-Hrb	-	Mgt	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC048MA	276903	6738131	197	Hrb-Plg	Act	Mgt	Fanerítica	Actinolita	Diorita
FC049MA	276905	6738131	197	Plg	-	-	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC050MA	276984	6738079	218	Plg-Hrb	-	Mgt	Fanerítica	-	Diorita
FC051MA	277150	6738412	200	Hrb-Plg	-	Mgt	Fanerítica	-	Diorita
FC051MB	277150	6738412	200	Plg-Hrb	-	Mgt	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC053MA	277103	6738463	190	Hrb-Plg	-	Mgt	Fanerítica	-	Diorita
FC053MB	277103	6738463	190	Plg-Hrb	-	Mgt	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC054MA	277076	6738520	182	Plg-Hrb	-	Mgt	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC055MA	277047	6738520	182	Plg-Hrb	-	Mgt	Fanerítica	-	Diorita
FC055MB	277047	6738520	182	Plg-Hrb	-	Mgt	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC056MA	276989	6738629	181	Plg-Hrb	-	Mgt	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC057MA	276906	6738668	167	Plg-Hrb	-	Mgt	Fanerítica	-	Diorita
FC058MA	276920	6738680	165	Plg-Hrb	-	Mgt	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC059MA	277028	6739635	43	Plg-Hrb	-	Mgt	Fanerítica	-	Diorita
FC060MA	277169	6739573	68	Plg-Hrb	-	Mgt	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC061MA	277187	6739543	75	Plg-Hrb	-	-	Porfírica	-	Dique Andesítico
FC063MA	279717	6739472	280	Plg-Hrb	Qz	Mgt-Hem-Goe-OxMn	Fanerítica	Silicificación Supérgena	Diorita
FC064MA	278110	6738686	194	Plg-Hrb	-	Mgt	Fanerítica	-	Diorita
FC064MB	278123	6738656	195	Plg	-	Mgt	Porfírica	-	Dique Andesítico

Anexo 3. Resumen de descripciones de cortes petro-calcográficos en el Distrito Fortress. Código de muestras correlativo a los puntos identificados en la Figura 6 que es de donde se extrajo cada roca. Abreviaturas: Act: actinolita, Ab: albita, Arc: arcillas blancas, Bt: biotita, Chl: clorita, Cpx: Clinopiroxeno, Epi: epidota, Esc: escapolita, Feld: Feldespato K, Goe: goetita, Hem: hematita, Hrb: hornblenda, Id: iddingsita, Mgt: magnetita, Ol: olivino, Opx: ortopiroxeno, OxMn: óxidos de manganeso, OxCu: óxidos de cobre, Pir: Pirolusita, Plg: plagioclasa, Py: pirita, Qz: Cuarzo, Rt: rutilo, Ser: sericita, Ti: titanita, Tur: turmalina, Zr: Zircón.

Resumen descripciones microscópicas del Distrito Fortress									
Muestra	Coordenadas UTM			Minerales			Texturas	Alteración	Roca
	X	Y	Z	Primarios	Ganga	Mena			
FC004TA	278429	6739349	211	Plg(32%)- Bt(15%)- Qz(5%)- Zr(1%)	Ser(15%)- Act(12%)- Qz(5%)- Chl(3%)- Ti(1%)- Rt(1%)	Hem(6%)- Mgt(3%)- Py(1%)	Fanerítica- vetillas	Actinolita	Cuarzodiorita
FC007TB	278228	6737859	260	Plg(30%)- Qz(5%)- Zr(1%)	Qz(25%)- Ser(15%)- Epi(10%)- Chl(5%)- Ti(1%)	Mgt(5%)- Hem(3%)	Fanerítica- obliterada	Silicificación	Cuarzodiorita

FC007TC	278228	6737859	260	Plg(25%)- Qz(5%)- Zr(1%)	Qz(20%)- Ser(12%)- Ab(10%)- Epi(7%)- Chl(6%)- Ti(3%)- Rt(1%)	Mgt(6%)- Hem(4%)	Fanerítica- obliterada	Silicificación	Cuarzodiorita
FC012TA	277972	6739480	150	Plg(35%)- Hrb(15%)- Bt(10%)- Qz(5%)	Act(15%)- Epi(8%)- Chl(5%)- Ser(2%)	Hem(3%)- Mgt(2%)	Porfírica	Calcosódica	Dique cuarzodiorítico
FC012TB	277972	6739480	150	Plg(25%)- Bt(15%)- Hrb(5%)- Qz(5%)	Ser- Arc(20%)- Chl(10%)- Act(5%)- Qz(5%)	Mgt(6%)- Hem(4%)	Fanerítica	Calcosódica	Cuarzodiorita
FC016TB	277865	6739459	110	Plg(28%)- Bt(13%)- Hrb(9%)	Ser(8%)- Act(6%)- Ab(6%)- Epi(3%)- Chl(3%)	Mgt(6%)- Hem(3%)	Fanerítica- Porfírica	Calcosódica	Contacto dique-diorita
FC019TB	277702	6739107	142	-	Act(24%)- Tur(13%)- Ser(12%)- Esc(7%)- Qz(6%)- Ab(3%)- Chl(3%)- Epi(2%)	Mgt(20%)- Hem(9%)- Py(1%)	Vetillas	Calcosódica	Vetillas de magnetita- actinolita- turmalina
FC024TA	279514	6738021	465	Plg(35%)- Bt(20%)- Qz(5%)- Zr(1%)	Ser(15%)- Act(6%)- Qz(5%)- Epi(3%)- Ti(2%)	Mgt(5%)- Hem(3%)	Fanerítica	Calcosódica	Cuarzodiorita
FC024TC	279514	6738021	465	-	Act(35%)- Epi(20%)- Ab(15%)- Bt(7%)- Ti(3%)	Mgt(14%)- Hem(5%)- Py(1%)	Masiva	Calcosódica	Vetas actinolita
FC025TB	279539	6738327	497	-	Arc(35%)- Ser(25%)- Qz(20%)-	Mgt(10%)- Hem(5%)- Goe(5%)	Obliterado	Silicificación Supérgeno	Vetillas de magnetita
FC026TC	279544	6738409	497	-	Qz(10%)	Mgt(45%)- Hem(35%)- Goe(10%)	Veta	Silicificación	Veta de magnetita
FC027TB	279628	6738615	506	Plg(20%)	Qz(15%)- Act(13%)- Ab(7%)- Epi(5%)- Esc(5%)	Mgt(3%)- Hem(2%)	Porfírica	Silicificación- Calcosódica	Dique Andesítico
FC028TC	279539	6738327	497	-	Qz(25%)- Epi(14%)- Ti(1%)	Mgt(30%)- Hem(20%)- Goe(10%)	Veta	Silicificación	Veta Magnetita
FC035TA	278674	6738495	456	Plg(40%)- Hrb(6%)- Qz(4%)- Opx(4%)- Cpx(1%)	Qz(15%)- Ser(10%)- Act(6%)- Chl(2%)- Ti(2%)	Mgt(6%)- Hem(4%)	Fanerítica	Silicificación	Diorita

FC040TA	279147	6738414	479	Plg(30%)- Hrb(6%)- Bt(3%)- Opx(1%)	Qz(20%)- Ser- Acr(15%)- Epi(6%)- Act(3%)- Chl(3%)- Ti(3%)	Mgt(7%)- Hem(3%)	Fanerítica	Silicificación	Diorita
FC044TA	277233	6738091	206	Plg(43%)- Hrb(12%)- Bt(5%)	Ser(15%)- Act(10%)- Chl(5%)	Mgt(6%)- Hem(4%)	Porfírica	Calcosódica	Dique diorítico
FC051TA	277150	6738412	200	Plg(25%)- Hrb(12%)- Qz(5%)- Opx(3%)- Cpx(2%)	Ser- Arc(20%)- Act(10%)- Chl(5%)	Hem(7%)- Mgt(3%)	Fanerítica	Calcosódica	Cuarzodiorita
FC059TA	277028	6739635	43	Plg(30%)- Opx(10%)- Cpx(10%)- Qz(5%)- Bt(5%)- Hrb(3%)- Ol(2%)	Ser- Arc(15%)- Chl(5%)- Act(4%)- Id(1%)	Mgt(7%)- Hem(3%)	Fanerítica	Calcosódica	Cuarzodiorita
FC061TA	277187	6739543	75	Plg(31%)- Opx(14%)- Cpx(13%)- Hrb(7%)	Ser- Arc(15%)- Chl(7%)- Act(3%)	Mgt(6%)- Hem(4%)	Porfírica	Calcosódica	Dique diorítico
FC063TA	279717	6739472	280	Plg(30%)	Qz(30%)- Ser- Arc(15%)- Bt(7%)- Chl(5%)- Act(3%)	Mgt(6%)- Hem(4%)	Fanerítica- obliterada	Silicificación	Diorita

Anexo 4. Tabla de datos estructurales medidos en el Distrito Fortress. Códigos correlativos con los puntos de control en la Figura 6.

Datos estructurales del Distrito Fortress							
Código	UTM WGS 84			Rumbo	Dip	Dip Dir	Tipo
	X	Y	Z				
FC001	278678	6739505	205	192	40	282	Fractura
FC001	278678	6739505	205	182	37	272	Fractura
FC001	278678	6739505	205	180	35	270	Fractura
FC001	278678	6739505	205	205	60	295	Fractura
FC001	278678	6739505	205	315	43	45	Fractura
FC002	278667	6739500	204	20	82	110	Fractura
FC002	278667	6739500	204	205	75	295	Fractura
FC002	278667	6739500	204	204	80	294	Fractura
FC002	278667	6739500	204	195	80	285	Fractura
FC002	278667	6739500	204	165	30	255	Fractura
FC002	278667	6739500	204	175	35	265	Fractura
FC003	278639	6739485	206	350	90	80	Fractura
FC003	278639	6739485	206	0	90	90	Fractura

FC003	278639	6739485	206	186	30	276	Fractura
FC004	278429	6739349	211	202	55	292	Fractura
FC004	278429	6739349	211	193	53	283	Fractura
FC004	278429	6739349	211	190	70	280	Fractura
FC004	278429	6739349	211	295	70	25	Vetilla Limolita
FC004	278429	6739349	211	334	84	64	Vetilla Actinolita
FC004	278429	6739349	211	204	60	294	Fractura
FC004	278429	6739349	211	322	80	52	Dique
FC004	278429	6739349	211	208	70	298	Fractura
FC006	278181	6739165	222	140	70	230	Fractura
FC006	278181	6739165	222	185	70	275	Fractura
FC006	278181	6739165	222	170	71	260	Fractura
FC006	278181	6739165	222	40	45	130	Fractura
FC006	278181	6739165	222	41	58	131	Fractura
FC006	278181	6739165	222	33	56	123	Fractura
FC007	278228	6737859	260	133	75	223	Fractura
FC007	278228	6737859	260	124	75	214	Fractura
FC007	278228	6737859	260	120	70	210	Fractura
FC007	278228	6737859	260	134	68	224	Fractura
FC007	278228	6737859	260	125	70	215	Fractura
FC007	278228	6737859	260	115	70	205	Fractura
FC010	278427	6739698	164	270	85	0	Fractura
FC010	278427	6739698	164	206	80	296	Fractura
FC010	278427	6739698	164	275	82	5	Fractura
FC010	278427	6739698	164	244	80	334	Fractura
FC010	278427	6739698	164	204	80	294	Fractura
FC010	278427	6739698	164	310	89	40	Fractura
FC010	278427	6739698	164	105	85	195	Fractura
FC010	278427	6739698	164	205	80	295	Fractura
FC010	278427	6739698	164	155	80	245	Vetillas Sericita
FC010	278427	6739698	164	165	78	255	Vetillas Sericita
FC010	278427	6739698	164	150	74	240	Vetillas Sericita
FC010	278427	6739698	164	125	79	215	Dique
FC010	278427	6739698	164	135	85	225	Dique
FC010	278427	6739698	164	290	80	20	Dique
FC010	278427	6739698	164	120	85	210	Dique
FC011	278408	6739593	175	0	80	90	Vetilla Actinolita
FC011	278408	6739593	175	5	85	95	Vetilla Actinolita
FC011	278408	6739593	175	353	85	83	Vetilla Actinolita
FC011	278408	6739593	175	280	70	10	Vetilla Cuarzo
FC011	278408	6739593	175	20	90	110	Vetilla Actinolita

FC011	278408	6739593	175	350	90	80	Vetilla Actinolita
FC012	277972	6739480	150	180	80	270	Fractura
FC012	277972	6739480	150	170	80	260	Fractura
FC012	277972	6739480	150	172	80	262	Fractura
FC012	277972	6739480	150	183	78	273	Fractura
FC012	277972	6739480	150	163	75	253	Fractura
FC012	277972	6739480	150	162	82	252	Dique
FC012	277972	6739480	150	155	70	245	Dique
FC012	277972	6739480	150	175	60	265	Vetilla Feldespato?
FC013	277935	6739472	152	175	72	265	Dique
FC013	277935	6739472	152	145	78	235	Dique
FC013	277935	6739472	152	168	75	258	Dique
FC013	277935	6739472	152	166	76	256	Dique
FC013	277935	6739472	152	150	74	240	Dique
FC013	277935	6739472	152	172	77	262	Dique
FC014	277934	6739436	161	280	89	10	Fractura
FC014	277934	6739436	161	285	88	15	Fractura
FC014	277934	6739436	161	285	89	15	Fractura
FC014	277934	6739436	161	275	83	5	Fractura
FC014	277934	6739436	161	285	90	15	Fractura
FC014	277934	6739436	161	175	77	265	Fractura
FC014	277934	6739436	161	176	80	266	Fractura
FC014	277934	6739436	161	174	75	264	Fractura
FC014	277934	6739436	161	180	79	270	Fractura
FC014	277934	6739436	161	170	82	260	Fractura
FC015	277946	6739542	153	183	78	273	Fractura
FC015	277946	6739542	153	174	79	264	Fractura
FC015	277946	6739542	153	177	58	267	Fractura
FC015	277946	6739542	153	177	72	267	Fractura
FC015	277946	6739542	153	275	86	5	Fractura
FC015	277946	6739542	153	260	88	350	Fractura
FC015	277946	6739542	153	255	85	345	Fractura
FC015	277946	6739542	153	254	80	344	Fractura
FC016	277865	6739459	110	231	89	321	Fractura
FC016	277865	6739459	110	165	78	255	Fractura
FC016	277865	6739459	110	166	70	256	Fractura
FC016	277865	6739459	110	275	90	5	Fractura
FC016	277865	6739459	110	240	90	330	Fractura
FC016	277865	6739459	110	160	70	250	Fractura
FC016	277865	6739459	110	175	78	265	Fractura
FC016	277865	6739459	110	255	84	345	Fractura

FC016	277865	6739459	110	161	73	251	Vetilla Actinolita
FC016	277865	6739459	110	155	70	245	Vetilla Actinolita
FC016	277865	6739459	110	290	90		Dique
FC016	277865	6739459	110	110	90		Dique
FC017	277761	6739240	141	250	68	340	Fractura
FC017	277761	6739240	141	253	65	343	Fractura
FC017	277761	6739240	141	240	65	330	Fractura
FC017	277761	6739240	141	240	60	330	Fractura
FC017	277761	6739240	141	90	70	180	Fractura
FC017	277761	6739240	141	80	70	170	Fractura
FC017	277761	6739240	141	93	71	183	Fractura
FC017	277761	6739240	141	95	70	185	Fractura
FC017'	277761	6739240	141	140	60	230	Vetilla de sericita magnetita
FC017'	277761	6739240	141	70	72	160	Vetilla de sericita magnetita
FC017'	277761	6739240	141	180	69	270	Vetilla cuarzo epidota
FC017'	277761	6739240	141	200	82	290	Vetilla Magnetita
FC018	277879	6739177	179	150	82	240	Fractura
FC018	277879	6739177	179	153	76	243	Fractura
FC018	277879	6739177	179	155	72	245	Fractura
FC018	277879	6739177	179	152	78	242	Fractura
FC018	277879	6739177	179	80	88	170	Fractura
FC018	277879	6739177	179	180	90	270	Fractura
FC018	277879	6739177	179	350	86	80	Fractura
FC018	277879	6739177	179	160	80	250	Fractura
FC018	277879	6739177	179	160	84	250	Fractura
FC018	277879	6739177	179	125	80	215	Dique
FC020	277575	6739143	154	160	86	250	Dique
FC021	277516	6739141	136	170	82	260	Fractura
FC021	277516	6739141	136	160	75	250	Fractura
FC022	277580	6739513	125	125	50	215	Dique
FC022	277580	6739513	125	93	88	183	Fractura
FC022	277580	6739513	125	25	89	115	Fractura
FC022	277580	6739513	125	185	80	275	Fractura
FC022	277580	6739513	125	184	79	274	Fractura
FC022	277580	6739513	125	275	88	5	Fractura
FC022	277580	6739513	125	115	86	205	Fractura
FC022	277580	6739513	125	287	89	17	Fractura
FC022	277580	6739513	125	288	80	18	Fractura
FC024	279514	6738021	465	120	66	210	Fractura
FC024	279514	6738021	465	180	50	270	Fractura

FC024	279514	6738021	465	124	54	214	Fractura
FC024	279514	6738021	465	170	45	260	Fractura
FC024	279514	6738021	465	177	65	267	Fractura
FC024	279514	6738021	465	174	60	264	Fractura
FC024	279514	6738021	465	125	52	215	Fractura
FC024	279514	6738021	465	115	60	205	Fractura
FC024	279514	6738021	465	180	40	270	Fractura
FC024	279514	6738021	465	170	45	260	Fractura
FC024	279514	6738021	465	162	48	252	Fractura
FC024	279514	6738021	465	160	44	250	Fractura
FC024	279514	6738021	465	110	70	200	Fractura
FC024	279514	6738021	465	225	67	315	Fractura
FC024	279514	6738021	465	222	70	312	Fractura
FC024	279514	6738021	465	210	60	300	Fractura
FC024	279514	6738021	465	220	68	310	Fractura
FC024	279514	6738021	465	186	60	276	Fractura
FC024	279514	6738021	465	165	60	255	Fractura
FC024	279514	6738021	465	152	55	242	Falla
FC024	279514	6738021	465	150	58	240	Falla
FC024	279514	6738021	465	140	75	230	Vetilla Actinolita
FC025	279539	6738327	497	133	80	223	Vetilla Actinolita
FC025	279539	6738327	497	130	82	220	Vetilla Actinolita
FC025	279539	6738327	497	132	85	222	Vetilla Actinolita
FC025	279539	6738327	497	287	86	17	Vetilla Actinolita
FC025	279539	6738327	497	110	86	200	Vetilla Actinolita
FC025	279539	6738327	497	131	79	221	Vetilla Actinolita
FC025	279539	6738327	497	310	80	40	Vetilla Actinolita
FC027	279628	6738615	506	330	77	60	Falla
FC027	279628	6738615	506	325	78	55	Falla
FC027	279628	6738615	506	326	80	56	Falla
FC027	279628	6738615	506	320	80	50	Falla
FC028	279700	6738862	516	330	90	60	Falla
FC028	279700	6738862	516	150	90	240	Falla
FC028	279700	6738862	516	240	86	330	Falla
FC028	279700	6738862	516	150	63	240	Dique
FC028	279700	6738862	516	200	34	290	Fractura
FC028	279700	6738862	516	150	63	240	Fractura
FC029	278596	6737691	402	140	37	230	Fractura
FC029	278596	6737691	402	141	40	231	Fractura
FC029	278596	6737691	402	10	54	100	Fractura
FC029	278596	6737691	402	7	50	97	Fractura

FC030	278548	6737806	427	145	41	235	Fractura
FC030	278548	6737806	427	105	44	195	Fractura
FC030	278548	6737806	427	80	25	170	Fractura
FC030	278548	6737806	427	85	49	175	Fractura
FC031	278524	6737895	431	285	84	15	Fractura
FC031	278524	6737895	431	240	89	330	Fractura
FC031	278524	6737895	431	250	67	340	Fractura
FC031	278524	6737895	431	260	60	350	Fractura
FC031	278524	6737895	431	250	68	340	Falla
FC031	278524	6737895	431	235	60	325	Falla
FC031´	278526	6737945	436	355	30	85	Vetilla Magnetita
FC031´	278521	6737959	438	345	38	75	Vetilla Magnetita
FC032´	278615	6738070	443	330	62	60	Vetilla Magnetita
FC032´	278615	6738070	443	30	78	120	Vetilla Magnetita
FC032´	278615	6738070	443	354	70	84	Falla
FC032´	278615	6738070	443	7	80	97	Falla
FC033	278699	6738181	443	350	54	80	Fractura
FC033	278699	6738181	443	345	35	75	Fractura
FC033	278699	6738181	443	270	65	0	Fractura
FC033	278699	6738181	443	255	66	345	Fractura
FC033	278699	6738181	443	328	62	58	Fractura
FC033	278699	6738181	443	300	40	30	Fractura
FC033	278699	6738181	443	310	45	40	Dique
FC033	278699	6738181	443	305	75	35	Dique
FC035	278674	6738495	456	270	20	0	Falla
FC035	278674	6738495	456	295	36	25	Falla
FC035	278674	6738495	456	255	22	345	Falla
FC036	278689	6738587	460	25	60	115	Fractura
FC036	278689	6738587	460	3	68	93	Fractura
FC037	278925	6738699	469	115	40	205	Fractura
FC037	278925	6738699	469	120	50	210	Fractura
FC037	278925	6738699	469	114	50	204	Fractura
FC037	278925	6738699	469	115	42	205	Fractura
FC038	279061	6738535	472	85	60	175	Fractura
FC038	279061	6738535	472	86	65	176	Fractura
FC038	279061	6738535	472	185	61	275	Fractura
FC039	279102	6738446	477	186	50	276	Dique
FC039	279102	6738446	477	205	55	295	Dique
FC039	279102	6738446	477	186	51	276	Dique
FC042	279389	6738165	490	178	50	268	Dique
FC042	279389	6738165	490	160	70	250	Dique

FC042	279389	6738165	490	158	51	248	Dique
FC042	279389	6738165	490	145	52	235	Dique
FC043	277350	6738047	196	142	70	232	Dique
FC043	277350	6738047	196	123	86	213	Dique
FC043	277350	6738047	196	95	82	185	Vetilla Actinolita
FC043	277350	6738047	196	93	48	183	Vetilla Actinolita
FC043	277350	6738047	196	77	70	167	Vetilla Actinolita
FC043	277350	6738047	196	95	50	185	Vetilla Actinolita
FC043	277350	6738047	196	325	74	55	Vetilla Actinolita
FC043	277350	6738047	196	154	63	244	Vetilla Actinolita
FC045	277207	6738013	226	140	82	230	Vetilla Actinolita
FC045	277207	6738013	226	147	83	237	Vetilla Actinolita
FC045	277207	6738013	226	148	82	238	Vetilla Actinolita
FC045	277207	6738013	226	140	80	230	Vetilla Actinolita
FC045	277207	6738013	226	150	79	240	Vetilla Actinolita
FC045	277207	6738013	226	145	80	235	Vetilla Actinolita
FC046	276993	6738178	188	180	75	270	Dique
FC046	276993	6738178	188	190	88	280	Dique
FC046	276993	6738178	188	192	70	282	Dique
FC046	276993	6738178	188	200	72	290	Dique
FC046	276993	6738178	188	189	68	279	Dique
FC046	276993	6738178	188	204	72	294	Dique
FC046	276993	6738178	188	205	80	295	Dique
FC048	276903	6738131	197	165	80	255	Vetilla Actinolita
FC048	276903	6738131	197	160	80	250	Vetilla Actinolita
FC048	276903	6738131	197	155	79	245	Vetilla Actinolita
FC049	276905	6738131	197	94	84	184	Dique
FC049	276905	6738131	197	95	77	185	Dique
FC053	277103	6738463	190	13	86	103	Dique
FC053	277103	6738463	190	5	82	95	Dique
FC053	277103	6738463	190	15	88	105	Dique
FC063	279717	6739472	280	135	72	225	Fractura
FC063	279717	6739472	280	100	78	190	Fractura
FC064´	278123	6738656	195	20	69	110	Fractura
FC064´	278123	6738656	195	20	65	110	Fractura
FC064´	278123	6738656	195	25	70	115	Fractura