



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



Relación Petrográfica de las Menas de Hierro y su Impacto en los Procesos Metalúrgicos: Proyecto Alcaparra A, Región de Atacama.

Memoria para optar al Título de Geólogo

Ignacio Marcelo Torres Méndez

Profesor Patrocinante: MSc. Abraham Elías González Martínez

Profesores Comisión : Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

Dr. Luis Arturo Quinzio Sinn

Profesional Guía : Sr. Roberto Hugo Aguirre Maturana

Concepción, 2019

**A mis Padres
mi Hermana
mis Abuelos
y mis Amigos**



ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	3
1.2 Ubicación y Accesos	3
1.3 Formulación del Proyecto	4
1.4 Hipótesis de Trabajo	5
1.5 Metodología de Trabajo	5
1.5.1 Revisión y Compilación de Antecedentes Geológicos	5
1.5.2 Descripción de Muestras	5
1.5.3 Confección de Mapas y Modelo Geológico	5
1.6 Agradecimientos	6
2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	7
2.1 Generalidades	7
2.2 Rocas Estratificadas	10
2.2.1 Formación Punta del Cobre	10
2.2.2 Unidad Gravas de Atacama	11
2.3 Rocas Intrusivas	12
2.3.1 Complejo Plutónico Retamilla	12
2.3.2 Complejo Plutónico La Higuera	12
2.4 Depósitos No Consolidados	12
2.5 Geología Estructural	13
3. GEOLOGÍA LOCAL	15
3.1 Generalidades	15
3.2 Unidades Litológicas	15
3.2.1 Unidad Volcánica	15
3.2.2 Unidad Intrusiva	15
3.3 Depósitos No Consolidados	16
3.3.1 Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos	16
3.3.2 Depósitos Aluviales Actuales	16
3.4 Mineralización Depósito Alcaparra A	16
3.5 Estructuras	17
4. TEXTURAS DE LAS MENAS DE HIERRO	18
4.1 Generalidades	18
4.2 Tipos de Texturas	18
4.2.1 Textura Maciza	18
4.2.2 Textura Brechosa	19
4.2.3 Textura Diseminada	20

4.2.4 Textura en Guías	20
5. METALURGIA DEL HIERRO	21
5.1 Generalidades	21
6. RESULTADOS	23
6.1 Generalidades	23
6.2 Análisis Estadístico y Exploratorio de datos	24
6.2.1 Envoltentes depósito Alcaparra A	24
6.2.2 Texturas y Ley de Hierro	26
6.2.3 Leyes de Concentrado	29
6.2.4 Impurezas	31
6.3 Modelo de Mineralización	32
6.3.1 Modelo de Mineralización: Leyes de Hierro y Leyes de Concentrado	35
6.4 Modelo Textural	39
6.4.1 Modelo Textural: Leyes de Hierro y Leyes de Concentrado	41
6.5 Volumen y Tonelaje Depósito Alcaparra A	45
7. DISCUSIÓN	50
7.1 Generalidades	50
7.2 Mineralización Alcaparra A	50
7.3 Envoltentes Texturales	54
7.4 Influencia de la Mineralogía en las leyes de hierro del Concentrado (Fe DTT): Caso CNN	56
7.5 Isoleyes, Isotexturas y Leyes de Concentrado	58
8. CONCLUSIONES	61
9. RECOMENDACIONES	64
10. REFERENCIAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

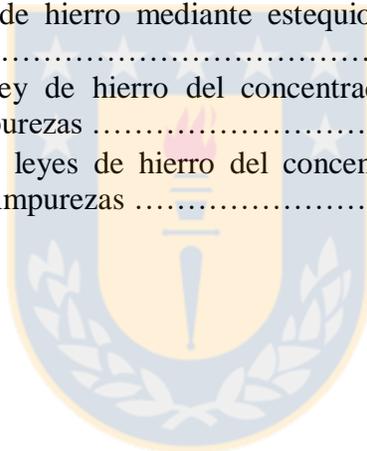
Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación y accesos del proyecto Alcaparra A	1
1. 2. Carreteras y accesos para proyecto Alcaparra A	4
2. 1. Distribución yacimientos de hierro Franja Ferrífera	8
2. 2. Mapa Geológico Zona Alcaparra A	9
2. 3. Ubicación de yacimientos pertenecientes a distrito El Algarrobo	10
2. 4. Segmentos Sistema de Falla de Atacama	14
4. 1. Magnetita con textura maciza	19
4. 2. Menas de hierro con textura brechosa	19
4. 3. Magnetita diseminada	20
4. 4. Guías de Magnetita	20
6. 1. Histograma de Leyes de Hierro Proyecto Alcaparra	24
6. 2. Gráfico probabilístico de leyes de hierro	25
6. 3. Gráfico probabilístico de leyes de hierro con cambios de pendiente	25
6. 4. Gráfico de %Fe DTT vs % Fe	26
6. 5. Histograma texturas de menas de hierro vs leyes de hierro	27
6. 6. Cuadro relación entre texturas y leyes de hierro	27
6. 7. Gráfico de distribución de datos según texturas	28
6. 8. Porcentaje ley de hierro total para las texturas de las menas de hierro ..	28
6. 9. Gráfico %Fe DTT vs % Fe	29
6. 10. Gráfico %Fe DTT y % Fe, para las texturas de las menas de hierro	30
6. 11. Gráfico Porcentaje de Fósforo vs % Fe, para texturas de las menas	31
6. 12. Gráfico Porcentaje de Azufre vs % Fe, para texturas de las menas	32
6. 13. Vista en planta Proyecto Alcaparra A	33
6. 14. Modelo geológico Alcaparra A	34
6. 15. Modelo geológico Alcaparra A Sur	35
6. 16. Gráfico Ley promedio de hierro para envolventes de ley	36
6. 17. Gráfico de leyes de concentrado (Fe DTT) vs Rangos de leyes	37
6. 18. Porcentaje de azufre vs Rangos de ley de hierro	38

6.	19.	Porcentaje de fósforo vs Rangos de ley de hierro	39
6.	20.	Vista en planta de las trazas de los perfiles geológicos de isotextura realizados en el sector sur del depósito Alcaparra A	40
6.	21.	Perfiles geológicos con envolventes de isotextura B-B' y C-C'	41
6.	22.	Gráfico % Fe para texturas de menas de hierro	42
6.	23.	FeDTT vs texturas de menas de hierro	43
6.	24.	Perfiles geológicos de isotextura	44
6.	25.	Contenido de fósforo sector sur Alcaparra A	45
6.	26.	Porcentaje ponderado del volumen de las envolventes de isoley Alcaparra A	46
6.	27.	Porcentaje en volumen del sector norte y sur de Alcaparra A	46
6.	28.	Porcentaje ponderado para el volumen de las envolventes del sector sur del depósito	47
6.	29.	Porcentaje ponderado para el volumen de las envolventes de isotextura	49
7.	1.	Gráfico de dispersión Fe vs Fe DTT	59
7.	2.	Gráfico de dispersión Fe vs FeDTT, agrupado en texturas	60



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
6.	1. Resumen de % FeDTT de las texturas de las menas de hierro	44
6.	2. Volumen y tonelaje calculado para las envolventes de ley mineral depósito Alcaparra A	45
6.	3. Volumen y tonelaje calculado para las envolventes de isotextura en el rango 10-23% Fe	47
6.	4. Volumen y tonelaje calculado para las envolventes de isotextura en el rango 23-35% Fe	48
6.	5. Volumen y tonelaje calculado para las envolventes de isotextura en el rango 35-50% Fe	48
6.	6. Volumen y tonelaje calculado para las envolventes de isotextura en el rango >50% Fe	48
7.	1. Ley de hierro, fórmula química y sistema cristalográfico de menas de hierro	56
7.	2. Cálculo de ley de hierro mediante estequiometría para muestra CNN	56
7.	3. Cálculo de la ley de hierro del concentrado sin considerar la presencia de impurezas	57
7.	4. Diferencia entre leyes de hierro del concentrado para caso con impurezas y sin impurezas	57



RESUMEN

En la Cordillera de la Costa, entre los 31° y 26° latitud Sur se encuentra una variedad de depósitos de hierro, los que conforman lo que se conoce como Franja Ferrífera Cretácica Chilena, la cual abarca desde la zona de Ovalle, hasta Taltal. Los yacimientos de mayor volumen y ley de hierro, como El Romeral, Los Colorados, Cerro Negro Norte se ubican en las trazas del Sistema de Falla de Atacama y la mineralización se encuentra albergada en rocas volcánicas del Cretácico Inferior asociadas a las Formaciones Punta del Cobre, La Negra y el Grupo Chañarcillo. Históricamente CAP Minería ha explotado estos yacimientos de hierro y ha desarrollado modelos geológicos para los cuerpos mineralizados utilizando solamente envoltentes de isoley de hierro. Sin embargo, en los últimos años el mineral de hierro de estos yacimientos no ha llegado al producto esperado, presentando inconvenientes técnico-económicos para la planificación minera a largo y corto plazo en las faenas activas. Esta situación ha derivado en diversos estudios que tratan de explicar el comportamiento metalúrgico que posee el mineral de hierro, para así lograr implementar un tipo de modelo geológico integrado, que logre disminuir los riesgos operacionales. En el presente estudio, se propuso analizar el impacto de las variables petrográficas referidas a la mineralogía y textura de las mena de hierro, en procesos metalúrgicos y así lograr la obtención de mineral con las características geometalúrgicas idóneas. Es decir, que se propone modelar los depósitos, utilizando envoltentes de isoley de hierro y complementar esta información con envoltentes texturales de las menas de hierro, de manera de poder establecer un modelo geológico integrado que permita delimitar sectores dentro del depósito con características geológicas de ley de hierro-textura de la mena idóneas para la producción. En este trabajo se utilizaron datos y muestras del Proyecto Alcaparra A, que se encuentra ubicado en la Región de Atacama, el cual es parte del distrito Algarrobo, en donde también se incluyen los depósitos Algarrobo, Alcaparra D, Ojos de Agua, entre otros. A nivel distrital afloran rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Punta del Cobre (Segerstrom y Ruiz, 1962) de edad Jurásico Superior-Hauteriviano Superior, que se encuentran intruídas por dioritas y granodioritas correspondientes al Complejo Plutónico Retamilla y afectadas por estructuras en dirección NE-SW que controlan la mineralización del depósito. Alcaparra A se compone de dos cuerpos de alta ley de hierro (50% Fe) que se diferencian por sus características mineralógicas, geometalúrgicas, leyes de hierro e impurezas, y que representan eventos de mineralización distintos, pero derivados de una misma cámara magmática parental. Tomando la información existente del Proyecto Alcaparra A, se realizó un análisis exploratorio de datos, en donde se identificaron las ocurrencias que tenían las texturas de las menas para las diferentes leyes de hierro, de forma de generar un modelo geológico integrado con envoltentes de isoley e isotextura, para luego calcular el volumen del depósito. Utilizando datos de pruebas D.T.T (Davis Tube Test) y observaciones geológicas, se plantea, en primer lugar, un modelo genético para el yacimiento, el cual, en conjunto de los ensayos metalúrgicos de laboratorio y envoltentes de isotextura-isoley, pueden entregar un primer acercamiento a la caracterización de zonas que posean rasgos geológicos y metalúrgicos distintivos, que puedan ser utilizados para definir y delimitar unidades geometalúrgicas dentro del depósito.

1. INTRODUCCIÓN

La actual demanda de mineral de hierro ha obligado a CAP Minería a iniciar operaciones en depósitos de cada vez menor tonelaje y menor ley de hierro. Sin embargo, el mineral que llega a las plantas metalúrgicas de hierro no cumple con las especificaciones requeridas para la elaboración de producto de alta calidad (ley de hierro $>68\%$ Fe). Esta situación ha derivado en el análisis geológico de las menas de hierro, específicamente en las características texturales de estos minerales, de manera de poder relacionar la variabilidad que presentan las menas de hierro con los procesos metalúrgicos llevados a cabo en plan. El presente estudio se centrará en el Proyecto Alcaparra A, el cual está ubicado en la Región de Atacama, y que considerando su paragénesis mineral, corresponde a un depósito tipo IOA (Iron Oxide-Apatite) o hierro-apatita, con ley promedio de hierro igual a 21,96% Fe (Figura 1.1).

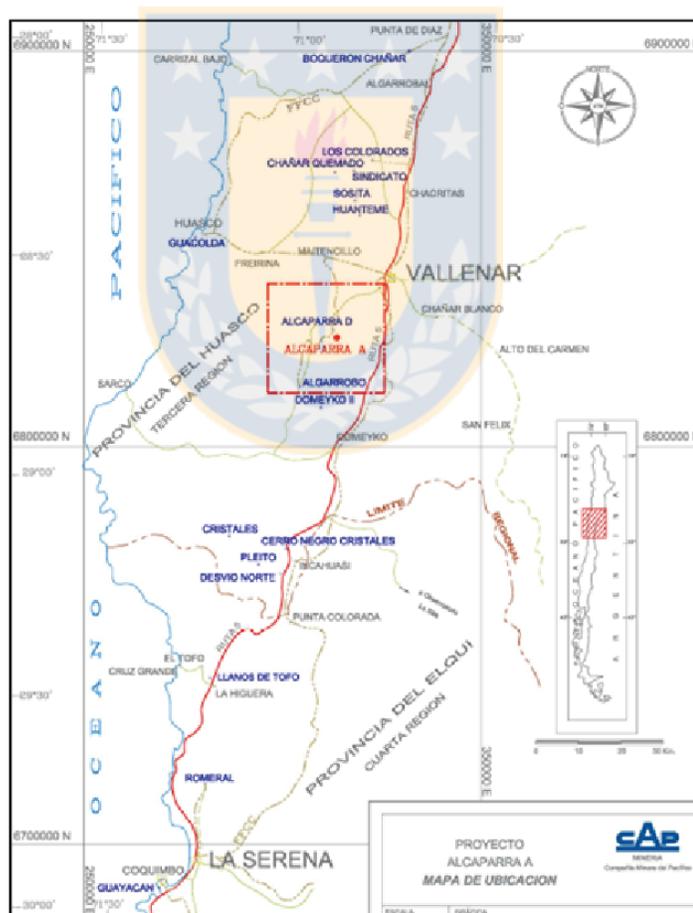


Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos del proyecto Alcaparra A.

Los depósitos IOA más importantes (El Algarrobo, Los Colorados, El Romeral) se distribuyen en la Cordillera de la Costa en lo que se conoce como Franja Ferrífera Cretácica Chilena (Oyarzún y Frutos, 1984; Menard, 1986) y su génesis ha sido relacionada a eventos magmáticos. Sin embargo, Knipping y otros (2015) proponen un origen magmático-hidrotermal para este tipo de depósitos.

Los yacimientos de hierro pertenecientes a la Franja Ferrífera Cretácica Chilena son la principal fuente de producción de mineral de hierro en Chile. Se encuentran emplazados mayoritariamente en rocas volcánicas de la Formación Bandurrias (Segestrom, 1968) y de la Formación Punta del Cobre (Segestrom y Ruíz, 1962), las cuales junto a cuerpos intrusivos calcoalcalinos de composición diorita-monzonita, son considerados como parte de un sistema arco magmático-cuenca de trasarco desarrollado en un contexto tectónico de subducción activa durante el Cretácico inferior (Vivallo, Henríquez y Espinoza, 1995).

Los depósitos hierro-apatita se encuentran formados por magnetita o hematita como menas de hierro, junto a apatita y actinolita como minerales de ganga. Por otro lado, las texturas que presentan las menas de hierro en este tipo de depósitos, varían entre maciza, generalmente asociada a cuerpos de alta ley de hierro (>50%), brechosa (ley media 40-50% Fe) y diseminada (baja ley <40% Fe).

En concreto, el Proyecto Alcaparra A pertenece a CAP minería y actualmente se encuentra en fase de exploración. Corresponde a un depósito “ciego” (no aflora en superficie), descubierto en 1961 mediante un levantamiento magnetométrico ejecutado por Philadelphia Aero Service Company, a petición de CAP minería en el contexto de un programa de exploración de las extensiones del Yacimiento Algarrobo

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Establecer un modelo geológico que considere envolventes de ley de hierro (isoley), envolventes de las texturas de las menas de hierro (isotextura) y granulometría de los cristales de la mena, para así obtener material de hierro que cumpla con las especificaciones mínimas requeridas para la comercialización.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Levantar información existente del Proyecto Alcaparra A, referida a la geología, descripción de sondajes, leyes de hierro, texturas de las menas de hierro, ensayos metalúrgicos de laboratorio y modelos geológicos del depósito.
- Actualizar la base de datos de sondajes del Proyecto Alcaparra A con observaciones respecto a las leyes y las texturas de las menas de hierro.
- Caracterizar petrográficamente las menas de hierro presentes en el depósito.
- Realizar envolventes de ley mineral de hierro (isoleyes) enfocadas a la obtención de producto elaborado por CAP Minería.
- Realizar envolventes de textura de las menas de hierro (isotexturas).
- Realizar una cubicación del yacimiento, a partir de un modelo de bloques, para obtener volumen de cada una de las envolventes de isoley e isotextura.

1.2 Ubicación y Accesos

El Proyecto Alcaparra A se ubica en la Región de Atacama, provincia de Huasco, comuna de Vallenar, a 26 kilómetros al SW de Vallenar, sobre la llanura aluvial de la Quebrada Maintencillo, a 14 kilómetros al sur del Río Huasco y a 660 kilómetros al norte de Santiago. Las coordenadas centrales de Alcaparra A son E 312.784,258 m, N 6.829.520,533 m (Datum PSAD56), con una elevación de 500 ms.n.m.

El acceso se realiza por la ruta C-472 que recorre la Quebrada Maintencillo, o alternativamente desde Vallenar por el camino que conduce a la Mina Algarrobo, al que se ingresa desde la ruta 5 Norte. En el kilómetro 660 se toma la ruta hacia el oeste para ingresar al camino regional C-486. Después de recorrer 16 km de camino de ripio, en el cruce con la ruta C-472 a Maintencillo, se recorre aproximadamente 1 km en dirección oeste hasta el lugar donde se ubica Alcaparra A (Figura 1.2).

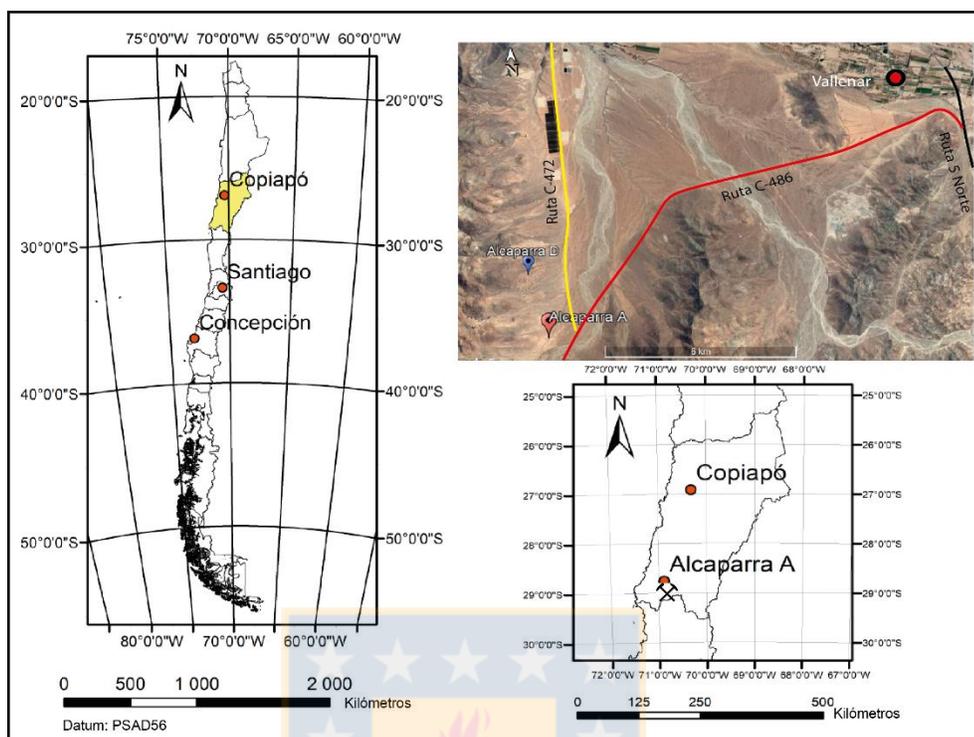


Figura 1.2: Carreteras y accesos para proyecto Alcaparra A.

1.3 Formulación del Proyecto

Debido a la actual situación de la minería del hierro en Chile, en donde se hace menos usual el descubrimiento de depósitos de alto tonelaje y alta ley de hierro, se ha optado por explotar depósitos de menor ley y tonelaje para lograr la obtención de mineral de hierro. No obstante, en algunas campañas de procesos en planta, el material derivado de estos depósitos no ha llegado a las especificaciones mínimas requeridas para la elaboración de pellet feed, lo que representa un problema en términos operacionales a nivel planta.

Este trabajo propone analizar el impacto petrográfico de las menas de hierro y establecer un modelo geológico del depósito que no solo incluya las leyes minerales de hierro (isoleyes), sino que también el criterio geológico de la variabilidad de texturas que presentan las menas de hierro en el depósito, en conjunto a la granulometría y forma de los cristales de la mena de hierro a nivel microscópico, para así lograr la obtención de material con las características geometalúrgicas idóneas para la elaboración de producto pellet feed.

1.4 Hipótesis de Trabajo

Los datos del Proyecto Alcaparra A muestran que gran parte del volumen del depósito se encuentra caracterizado por mineral con leyes de hierro menores a 35% Fe. Sin embargo, las pruebas metalúrgicas de laboratorio muestran que este material de ‘baja ley’ puede alcanzar leyes de hierro de concentrado superiores a 68% (Fe DTT). Esta situación prueba que la ley de hierro del concentrado no depende exclusivamente de la ley de hierro que tenga el mineral, sino que también puede haber otros factores de carácter geológico y/o metalúrgicos que influyen en esto. Por consiguiente, se propone que la ley de hierro del concentrado dependerá del conjunto de variables geológicas referidas a la petrografía de las menas de hierro menas de hierro, como su textura, ley mineral, mineralogía de mena, mineralogía de alteración y/o el tamaño y forma de los cristales de la mena a nivel microscópico.

1.5 Metodología de Trabajo

1.5.1 Revisión y Compilación de Antecedentes Geológicos

En la primera etapa del trabajo se recolectó información bibliográfica de la geología regional del sector de estudio. Para esto se utilizaron las cartas geológicas Vallenar-Domeyko (Arévalo y otros, 2009) y Freirina-El Morado (Welkner y otros, 2009). Además, se recolectó información bibliográfica académica disponible sobre los depósitos IOA pertenecientes a la Franja Ferrífera Cretácica Chilena. Luego, se reunió información sobre la geología local de Alcaparra A, utilizándose informes geológicos internos elaborados por CAP minería. Junto a estos informes fue revisada la información geológica de los sondajes realizados en la zona de Alcaparra A.

1.5.2 Descripción de Muestras.

Fueron visitadas las bodegas de Minas Algarrobo para actualizar y comprobar las descripciones de los tramos de sondaje que no presentaran descripción detallada de la mineralogía y textura.

1.5.3 Confección de Mapas y Modelo Geológico.

Los mapas de ubicación y accesos, geología regional, geología estructural y ubicación de sondajes se realizaron con el programa ArcGIS. Los datos para la confección del modelo geológico de isoley e isotextura se obtuvieron de las descripciones de mapeos de sondaje realizados por CAP Minería, en conjunto de la descripción macroscópica actualizada. En el software Leapfrog Geo 4.4 se realizó

el modelo geológico de isoclinas e isotaxias. Finalmente, se realizó un modelo de bloques para estimar el volumen de las envolventes de isoclinas e isotaxia.

1.6 Agradecimientos

En primer lugar, doy gracias al personal de la Unidad de Geología de CAP Minería, por la oportunidad de realizar mi memoria de título en la empresa y por su disposición durante el desarrollo de esta. En especial a Osvaldo Gómez por su constante apoyo y conversaciones que dieron origen a este trabajo, a Gerardo Ortega, por guiarme en el trabajo en terreno, a Waldo Vega por su constante ayuda en terreno.

Le doy gracias a todo el personal del Departamento Ciencias de la Tierra de la Universidad de Concepción por la ayuda y guía durante mis años universitarios. En especial a Arturo Quinzio, por ser una suerte de mentor durante mis años estudiando, a Abraham González, por ser el profesor guía de esta memoria y a Ramiro Bonilla, por ser parte de la comisión. Además, a la señorita Carolina Rojas, por su apoyo, consejo y siempre creer en lo que yo podía hacer, a don Raúl, por todas las mañanas en su oficina tomando desayuno y a don Pedro por su buena onda y ayuda en terrenos.

Finalmente, le doy gracias a mi papá y mi mamá, por enseñarme tantas cosas que no se aprenden en la universidad ni en el colegio y que gracias a todas ellas he logrado convertirme en el hombre que soy el día de hoy. A mi hermana, Camila, por ser el apoyo, amiga y compañera que tantas veces necesité durante todos estos años. A mi hermano, por su ayuda y a Luis Contreras, el hermano que nunca tuve, que siempre creyó en que todo esto podría lograrse.

A mis abuelos, Aurora y Emilio.

A mis amigos, Enzo, Cata, Pancho, Hugo, Claudio, Isi, Javi, Ernesto, Javier, Seba, Xime, Ale por todas las noches, tardes, días, lluvia, sol, terrenos, conversaciones y tiempo que compartimos durante estos años.

Y a todos,

Muchas gracias.

2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

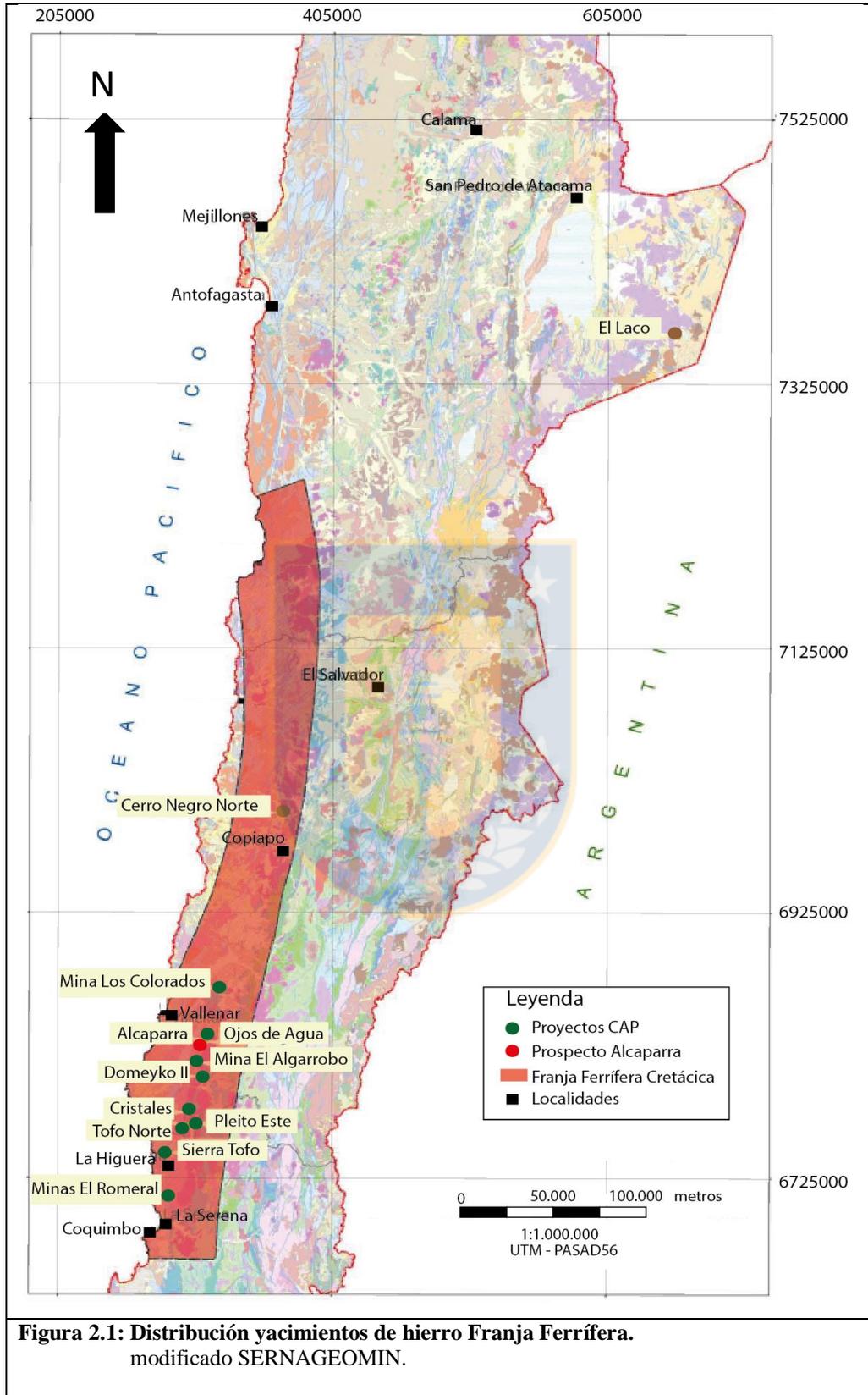
2.1 Generalidades

El depósito Alcaparra A se encuentra inserto en la Franja Ferrífera Cretácica Chilena (Frutos y Oyarzún, 1984; Menard, 1986), la que se extiende por 600 kilómetros a través de la Cordillera de la Costa, entre las latitudes 26° y 31° Sur, y que posee un ancho de al menos 30 kilómetros. Los cuerpos mineralizados que conforman la Franja Ferrífera se ubican en las trazas del Sistema de Falla de Atacama (SFA) (Brown y otros, 1993), en donde se encuentran grandes yacimientos como Los Colorados, Algarrobo y El Romeral (Espinoza, 1990) (Figura 2.1).

Los yacimientos tipo hierro-apatita pertenecientes a la Franja Ferrífera, constituyen generalmente cuerpos macizos de magnetita como principal mineral de mena, junto a apatita y actinolita como minerales de ganga y poseen formas lenticulares o de bolsones irregulares, mientras que algunos se aproximan a mantos o cuerpos vetiformes (Moscoso y otros, 1982).

En el área de estudio, las rocas ígneas se encuentran representadas por el Complejo Plutónico Retamilla y por el Complejo Plutónico La Higuera (Cretácico inferior) (Arévalo y Welkner, 2008), los que intruyen a rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Punta del Cobre, de edad Jurásico superior-Hauteriviano superior (Seegerstrom y Ruiz, 1962). Las rocas de la Formación Punta del Cobre, conforman un bloque estructural que se encuentra limitado al este por la Zona de Cizalle Algarrobo y al oeste por la Faja Plegada y Corrida Los Colorados (Arévalo y otros, 2003; Arévalo y otros, 2009) (Figura 2.2).

Alcaparra A es parte del Distrito Algarrobo, en donde se incluyen los prospectos Alcaparra D, Algarrobo Este, Domeyko, Ojos de agua, entre otros (Figura 2.3). La mineralización se encuentra hospedada en las rocas de la Formación Punta del Cobre. Sin embargo, este depósito se encuentra cubierto por la Unidad Gravas de Atacama del Mioceno (Mortimer, 1973) y por depósitos Cuaternarios de origen aluvial y coluvial (Arévalo y otros, 2009).



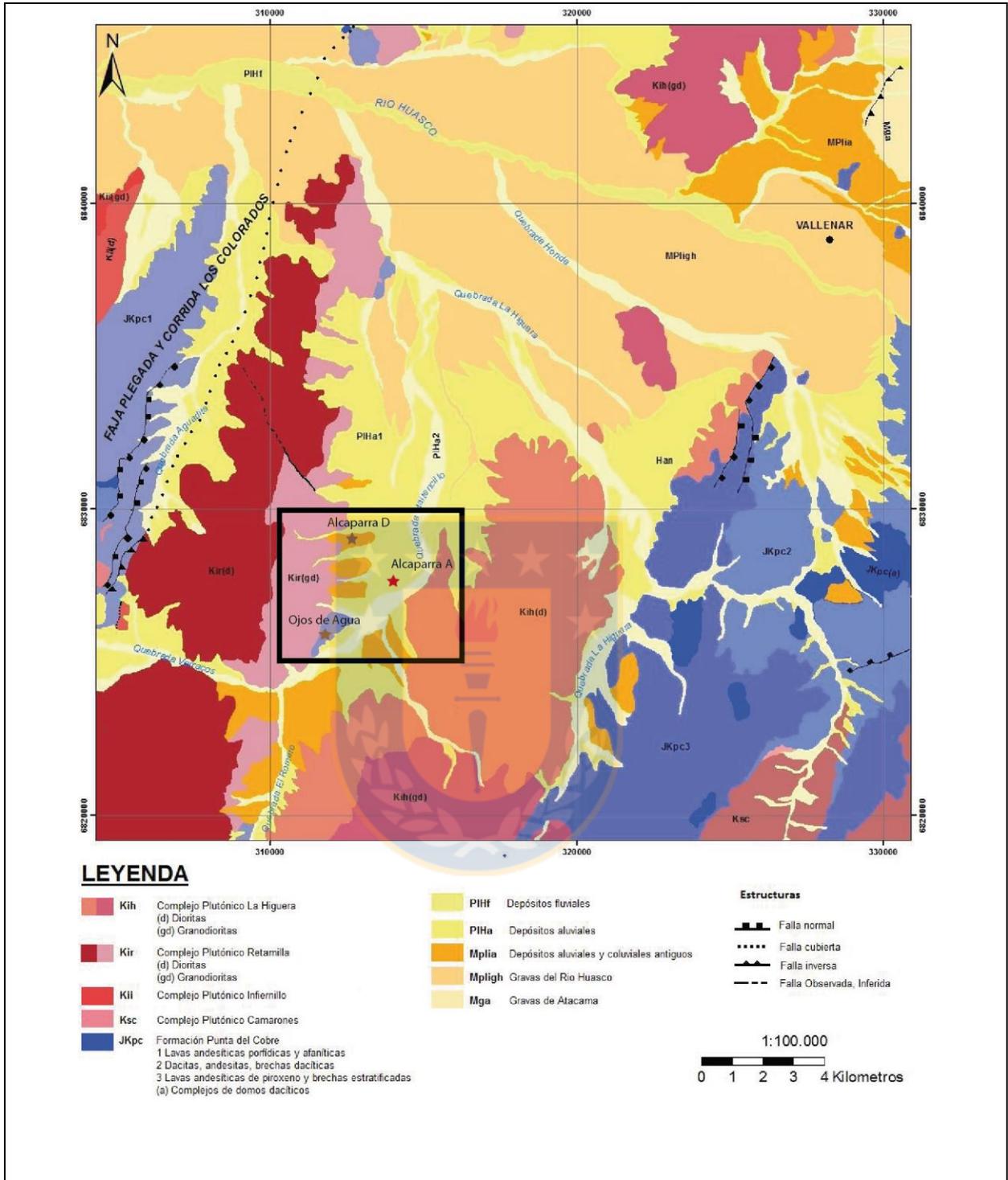


Figura 2. 2: Mapa Geológico Zona Alcaparra A. Modificado de Arévalo y otros, 2009.

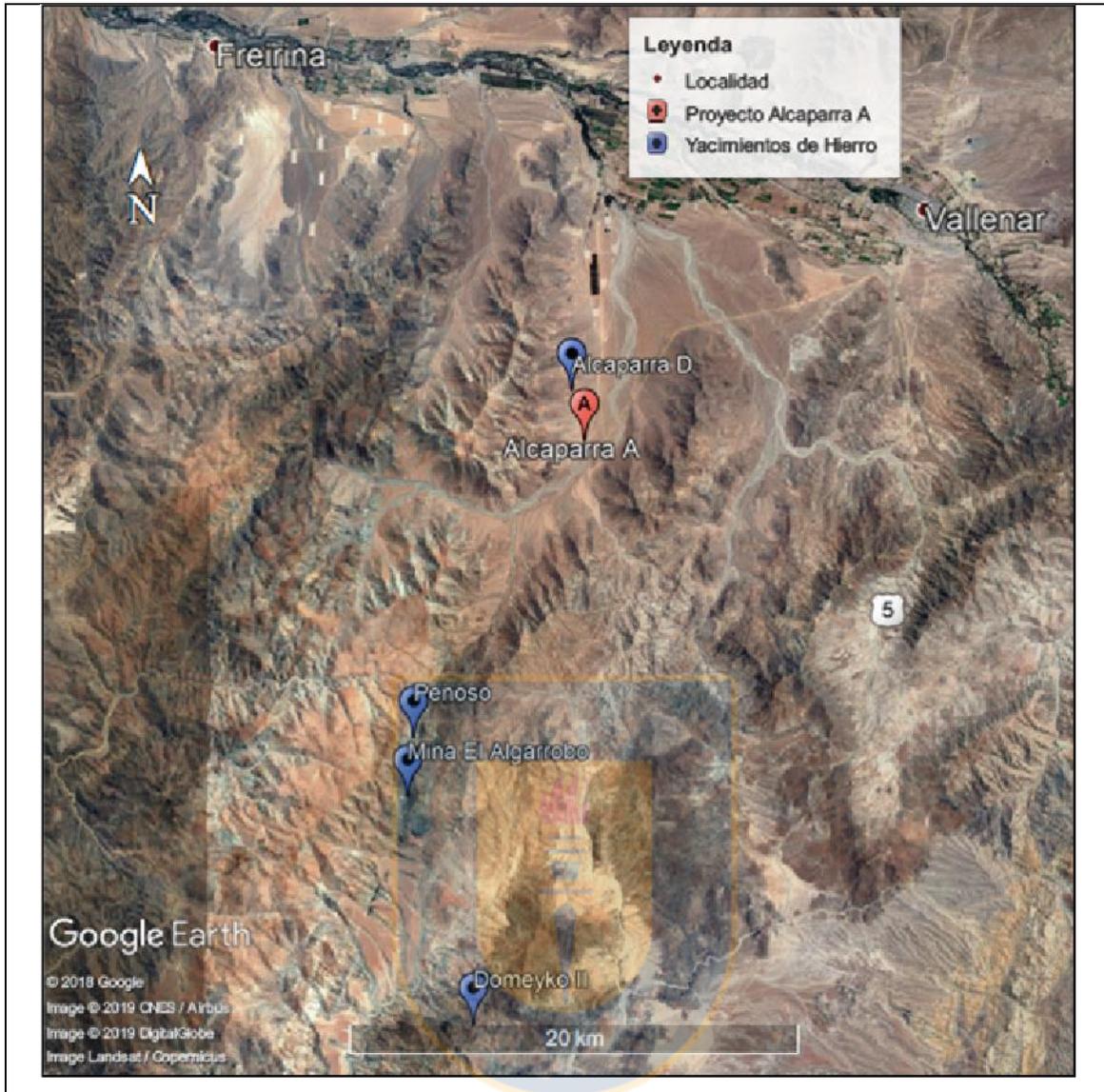


Figura 2. 1: Ubicación de yacimientos pertenecientes a distrito El Algarrobo. Imagen satelital extraída de Google Earth.

2.2 Rocas Estratificadas

2.2.1 Formación Punta del Cobre (Jurásico superior-Hauteriviano superior)

Las rocas estratificadas que afloran en el área de estudio corresponden a secuencias volcánicas y sedimentarias de la Formación Punta del Cobre (Segerstrom y Ruiz, 1962). En cuanto a sus relaciones de contacto, la formación subyace de manera concordante a la Formación Nantoco de edad Hauteriviano superior (Biese-Nickel en Hoffstetter y otros, 1957) y sobreyace concordante a las lavas de la Formación la Negra, de edad Pleinsbachiano-Jurásico Superior (García, 1967).

La litología corresponde a una secuencia volcánica y sedimentaria en la que se distinguen tres secciones (basal, intermedia, superior). La sección basal alcanza 2500 metros de espesor y corresponde a lavas andesíticas porfídicas y afaníticas de piroxeno y anfíbol, intercaladas con brechas, conglomerados, tobas y fangolitas calcáreas. La sección media consiste en una serie volcánica y volcanoclástica compuesta principalmente por dacitas, andesitas, brechas dacíticas y tobas bien estratificadas que alcanzan 400 metros de espesor. Finalmente, la sección superior, de 500 metros de espesor, incluye una serie volcánica compuesta por lavas andesíticas intercaladas con calcilitas y calcarenitas (Arévalo y otros, 2009).

La fauna fósil de la Formación Punta del Cobre, correspondiente a Ammonites, permite asignar una edad amplia Jurásico Superior-Hauteriviano Superior. Por otro lado, una datación U-Pb realizada en domos dacíticos emplazados en la sección superior de la formación, entrega una edad de $129 \pm 0,1$ Ma, la que es consistente con la edad relativa Hauteriviano Superior obtenida con fósiles (Arévalo y otros, 2009).

2.2.2 Unidad Gravas de Atacama (Mioceno medio)

Esta unidad corresponde a un conjunto de gravas polimícticas cubiertas por los Depósitos Aluviales y Coluviales antiguos registrados en la Carta Vallenar-Domeyko (Arévalo y otros, 2009).

Se compone principalmente por gravas, ripios y arenas polimícticas, mal a medianamente consolidadas. Los ripios y gravas forman clastos discoidales con dimensiones de 2 hasta 20 centímetros, que en algunos sectores, se intercalan con capas fangoarenosas que incluyen cenizas retrabajadas con biotita oxidada. El espesor de esta unidad varía entre los 40 y 70 metros, sin embargo, se ha registrado un espesor máximo de 100 metros hacia el sur del sector Llano del Totoral (Moscoso y otros, 1982).

No existen antecedentes geocronológicos directos para datar las gravas, no obstante, otros depósitos similares que se correlacionan con esta unidad contienen niveles de ceniza en donde se han obtenido edades K-Ar que varían entre 12 y 15 Ma (Matthews y otros, 2006). Otras edades K-Ar en ignimbritas ubicadas por sobre el nivel de pedimentación de las gravas, entregan un rango de 9 a 10 Ma (Arévalo y otros, 2009).

2.3 Rocas Intrusivas

2.3.1 Complejo Plutónico Retamilla (127-126 Ma)

En el sector occidental del área de estudio afloran rocas intrusivas félsicas definidas como Complejo Plutónico Retamilla, estas rocas intruyen a la Formación Punta del Cobre y se dividen en tres subunidades plutónicas. La unidad inferior es de composición granodiorítica a tonalítica, la intermedia diorítica y la superior es granítica. Para determinar la edad de esta unidad, se han obtenido dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de $127,1\pm 1,0$ Ma en anfíbol y de $126,2\pm 0,4$ Ma en biotita (Gipson y otros, 2003).

2.3.2 Complejo Plutónico La Higuera (124-122 Ma)

Corresponde a un complejo plutónico de composición granodiorítico-diorítico, expuesto en una franja de afloramientos de orientación NNE-SSW. Esta unidad, se encuentra intruyendo a las lavas andesíticas de la Formación Punta del Cobre, mientras que en el sector más occidental, el contacto con la sección basal de la formación está definido por una franja milonítica.

El complejo plutónico, en su base, se encuentra formado por una subunidad granodiorítica compuesta por granodioritas y tonalitas de anfíbol, biotita y piroxeno. Hacia techo se compone por una subunidad diorítica, formada por dioritas y dioritas cuarcíferas de piroxeno y anfíbol.

Para la subunidad granodiorítica se disponen de edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ realizadas en anfíbol de $124,3\pm 1,9$ Ma y $122,7\pm 1,5$ Ma (Valenzuela, 2002). Mientras que para la subunidad diorítica, se tienen edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de $123,7\pm 0,9$ Ma en biotita (Gipson y otros, 2003) y en anfíbol de $122,1\pm 1,3$ Ma (Arévalo y Welkner, 2008).

2.4 Depósitos No Consolidados (Mioceno-Holoceno)

Los depósitos de edad Cuaternario del área de estudio, quedan representados por la unidad Depósitos Aluviales y Coluviales no consolidados a medianamente consolidados. Estos depósitos consisten en gravas, arenas, ripios y limos no estratificados de pobre selección que forman niveles aterrazados que ocupan laderas y rellenan quebradas. Además, se reconocen depósitos de avalanchas generados por procesos gravitacionales que se ven favorecidos por precipitaciones ocasionales. Junto a estos depósitos, se encuentran la unidad depósitos Aluviales y Coluviales

actuales no consolidados, que representan actividad reciente producto de lluvias y procesos gravitacionales (Arévalo y otros, 2009).

2.5 Geología Estructural

A nivel regional, es posible distinguir tres divisiones geomorfológicas correspondientes a la Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal, el basamento que se exhibe para estas divisiones es metamórfico y granítico, mientras que la cobertura está conformada por rocas volcánicas y sedimentarias de edad Jurásico-Cretácico inferior, dispuestas en un pliegue sinclinal de amplia longitud de onda y observable a nivel regional (Moscoso y otros, 1982).

Uno de los rasgos estructurales más importantes corresponde a un sistema de fallas de orientación N-S a NNE-SSW ubicado en el borde más oriental del área. Este rasgo se relaciona al Sistema de Falla de Atacama, el cual es reconocido desde el sur de Iquique hasta el norte de La Serena, en la Cordillera de la Costa (Arévalo y otros, 2009) y que resulta de importancia, pues los yacimientos de hierro más grandes de la Franja Ferrífera se encuentran asociados a este sistema de fallas (El Romeral, Algarrobo, Los Colorados, El Tofo) (Moscoso y otros, 1982).

Según la segmentación propuesta por Brown y otros (1993) (Figura 2.4), Alcaparra A se encuentra en lo que se conoce como el segmento 'El Salado' del Sistema de Falla de Atacama, en donde se reconocen rasgos estructurales mayores, correspondientes a: La Faja Plegada y Corrida Los Colorados y la Zona de Cizalle Algarrobo.

La Faja Plegada y Corrida Los Colorados presenta cuerpos plutónicos sintectónicos correspondientes al Complejo Plutónico Retamilla, donde se observan pliegues de arrastre, que indicarían una fase extensiva con inicio de a lo menos 126 Ma (Arévalo y otros, 2003). Esta estructura, ha sido interpretada por Arévalo y otros (2003, 2008 y 2009) como un sistema de fallas con geometría de flor inversa, en donde los esfuerzos habrían generado desplazamiento transpresional de tipo siniestral.

La Zona de Cizalle Algarrobo, se expone como una franja milonítica subvertical, situada en el margen occidental del Plutón La Higuera y que presenta metamorfismo de bajo grado y deformación transpresiva de dirección regional N30°E (Arévalo y otros 2003). Ambos sistemas estructurales definen los límites de bloques estructurales que presentan desplazamientos relativos

verticales y horizontales. La distribución espacial existente entre los cuerpos mineralizados y las diferencias en su geometría pueden ser explicadas por este sistema de bloques (Fortín, 2013).

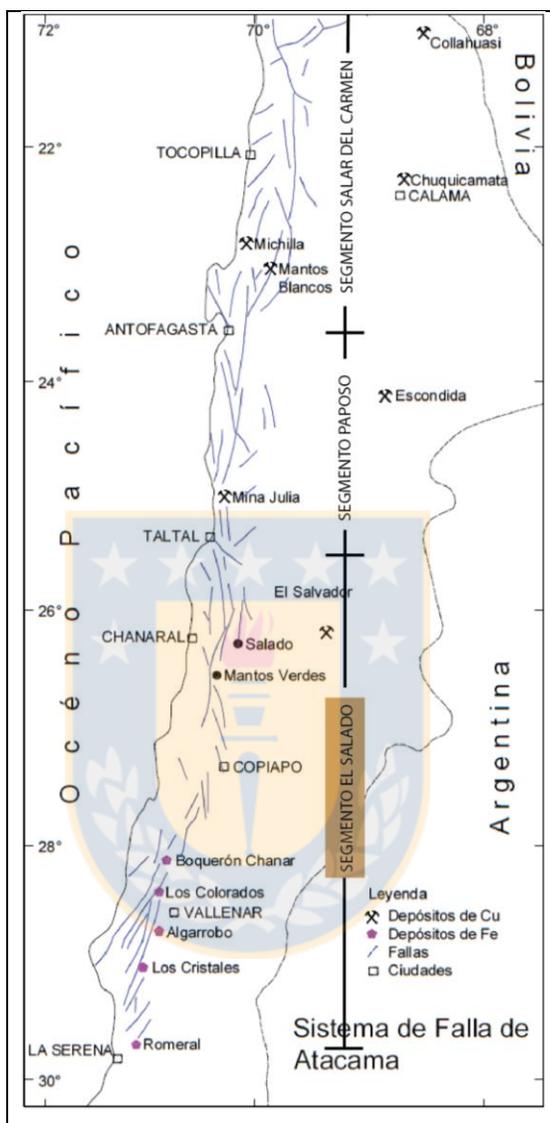


Figura 2. 4: Segmentos Sistema de Falla de Atacama.

3. GEOLOGÍA LOCAL

3.1 Generalidades

Alcaparra A es un depósito que no se encuentra expuesto en superficie, por lo cual ha sido evaluado por medio de métodos geofísicos, como gravimetría y magnetometría, lo que ha derivado en campañas de sondaje para poder estimar este depósito. La mineralización de hierro asociada a la anomalía magnética que hay en este sector se encuentra hospedada en rocas volcánicas y sedimentarias pertenecientes a la Formación Punta del Cobre, que se encuentran bajo la cubierta aluvial en el flanco oriental de la Quebrada Maitencillo (Cuadra, 2014). Las rocas intrusivas quedan representadas por el Complejo Plutónico Retamilla (127-126 Ma) que aflora en el sector más occidental del yacimiento y está compuesto principalmente por dioritas y granodioritas.

3.2 Unidades Litológicas

3.2.1 Unidad Volcánica

Esta unidad corresponde al miembro inferior de la Formación Punta del Cobre, el cual está formado por rocas volcánicas localmente afectadas por metamorfismo de contacto, con niveles de caliza subordinada. Las rocas volcánicas que afloran son andesitas alteradas a clorita y actinolita, junto a brechas volcánicas de composición andesítica. Esta unidad hospeda la mineralización de hierro del depósito Alcaparra A, la que consiste principalmente en magnetita que hacia superficie pasa a martita y hematita.

Las andesitas de esta unidad, poseen un rumbo N20°-40°E y un manteo de 30°-50°W y además se encuentran afectadas por tectónica asociada a la Zona de Cizalle Algarrobo.

3.2.2 Unidad Intrusiva

Las rocas intrusivas que afloran en el área de estudio están representadas por el Complejo Plutónico Retamilla, el cual está compuesto por dioritas, granodioritas y tonalitas de anfíbola y biotita de grano medio y textura equigranular.

Las dioritas presentan textura fanerítica y su mineralogía está compuesta principalmente por cuarzo, plagioclasas, feldespato potásico, anfíbol y piroxeno, de igual forma, se ha reconocido magnetita, la cual le da un leve magnetismo a estas rocas.

Por otro lado, las granodioritas presentan textura hipidiomórfica granular de grano medio y su mineralogía está compuesta por cuarzo, plagioclasas, feldespato potásico alterado levemente a sericita, el cual le da un color pardo a la litología (Cuadra, 2014).

3.3 Depósitos No Consolidados

3.3.1 Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos (Mioceno-Plioceno)

Corresponden a gravas polimícticas, mal a moderadamente consolidados y arenas que constituyen depósitos asociados a conos aluviales, adosados a zonas topográficamente altas. En sectores más proximales a estos depósitos, se exponen gravas y ripios mal consolidados

3.3.2 Depósitos Aluviales Actuales (Holoceno)

Esta unidad está constituida por ripios, gravas, arenas y sedimentos finos no consolidados derivados de la erosión actual. Estos depósitos se originaron por procesos de transporte de aguas superficiales y desborde de llanuras aluviales actuales.

3.4 Mineralización Depósito Alcaparra A

La mineralización del depósito está hospedada en rocas volcánicas y volcanoclásticas que forman parte de la sección inferior de la Formación Punta del Cobre (Fortín, 2014). La roca caja consiste principalmente en andesitas de textura porfídica a afanítica y brechas volcánicas andesíticas. El cuerpo mineralizado es descrito como un bloque de dimensiones de 1 km de ancho y al menos 2 km de largo, orientado en dirección N30°E y con un buzamiento hacia el oeste.

La mena de hierro consiste en magnetita con textura maciza y brechosa, la cual hacia superficie pasa a niveles de mineral martítico y hematítico. Se reporta la existencia de dos cuerpos de magnetita de alta ley de hierro (>50% Fe). El primero de ellos se ubica en el sector norte, a 300 m de profundidad y posee pirita como principal impureza, cuya ocurrencia y abundancia va disminuyendo hacia los bordes del cuerpo. Además, se ha reconocido clorita y actinolita como principales minerales de alteración.

Por otro lado, en el sector sur del depósito, se encuentra el otro cuerpo de alta ley de hierro, a una profundidad de 650 m. El principal mineral de alteración que se reconoce en este cuerpo corresponde a actinolita, la cual es derivada de la alteración de minerales ferromagnesianos como anfíbol, piroxeno ± biotita. La textura de las menas de hierro en este cuerpo varía entre

brechosa a maciza. No obstante, en los bordes del cuerpo, se presentan guías de magnetita con potencia de 1 a 6 cm. La mineralización del depósito Alcaparra A corresponde casi exclusivamente a magnetita, aunque se han reconocido algunos niveles superficiales con martita.

3.5 Estructuras

Las estructuras que se reconocen están asociadas a la Zona de Falla de Atacama; la más importante de ellas corresponde a la Zona de Cizalle Algarrobo, la cual cruza el extremo sureste del sector con una dirección N15°-30°E (Fortín, 2013).

En otros informes del área (Fortín, 2013; Cuadra, 2014) se reconocen fracturas y zonas de cataclasis de rumbo N15°-30°E verticales a subverticales. Estas estructuras definen bloques estructurales, cuyos desplazamientos y alzamientos serían los responsables de la distribución espacial de los cuerpos mineralizados de Alcaparra A y otros depósitos cercanos (Fortín 2013).



4. TEXTURAS DE LAS MENAS DE HIERRO

4.1 Generalidades

Para el estudio de los depósitos minerales de hierro es necesario considerar, entre otros factores, la descripción detallada de sondajes en cuanto a la textura de la mena magnética, en otras palabras, la descripción de los arreglos de la mineralogía metálica de hierro. Sobre esta base, es posible reconocer variados arreglos cristalinos y proporciones distintas de texturas en cada una de las unidades geológicas asociadas a envoltantes de isoleyes. Es decir, que para rangos de leyes de hierro establecidos para un depósito, existirá una componente de menas metálicas de hierro con textura maciza, brechosa, en guías y diseminada.

Desde el punto de vista metalúrgico, es posible precisar que variados depósitos de hierro de baja ley ($< 30\% \text{ Fe}$) elaboran producto pellet feed ($>68\% \text{ Fe}$). Sin embargo, en algunas campañas de procesos en planta no se ha llegado a las especificaciones comerciales mínimas requeridas (ley de hierro $> 68\%$). Esto ha hecho que algunos autores (Lamberg y otros, 2013; Lund y otros, 2015; Donskoi y otros, 2016) hayan estudiado el impacto que tienen las características petrográficas de las menas de hierro en las plantas de procesos metalúrgicos.

El actual estudio no solo busca explicar el impacto que tiene la textura en los procesos de la planta, sino que también busca integrar la variable petrográfica en cuanto al tamaño de los cristales de magnetita y a la forma que tienen estos cristales a nivel microscópico, ya que estos parámetros pueden tener un impacto aun mayor que la textura de las menas de hierro. Es decir que, según esta hipótesis, un mineral de hierro que ingrese a la planta metalúrgica y que posea un tamaño de grano grueso puede que tenga un mejor comportamiento metalúrgico que otro de grano fino para una determinada textura. Sobre esta base, en donde la textura y la petrografía parecieran influir en los procesos metalúrgicos de hierro, se precisarán algunas definiciones asociadas a las texturas de las menas de hierro.

4.2 Tipos de Texturas

4.2.1 Textura Maciza: Es la textura en la cual el mineral de hierro se encuentra casi totalmente puro y sin contenido significativo de impurezas. Se presenta como magnetita o hematita en forma de cristales cúbicos con apretado intercrecimiento entre ellos. Esta textura generalmente se

correlaciona a cuerpos o diques de magnetita de alta ley ($> 58\%$ Fe) que constituyen el sector principal de mineralización de hierro (Bookstrom, 1977) (Figura 4.1).



Figura 4.1: Magnetita con textura maciza.

4.2.2 Textura Brechosa: En esta textura el mineral de hierro se presenta como clastos de magnetita, martita o hematita en una matriz dominada por minerales de ganga como apatita, cuarzo o actinolita. También se presenta en guías gruesas (1 cm-5 cm) e irregulares con formas anastomosadas que concentran la mineralización de hierro, que dan un aspecto brechoso (Nyström y Henríquez, 1994). Habitualmente, esta textura se vincula a los bordes del cuerpo mineralizado de alta ley, en donde alcanza leyes de hierro entre 43%-58% Fe (Figura 4.2).

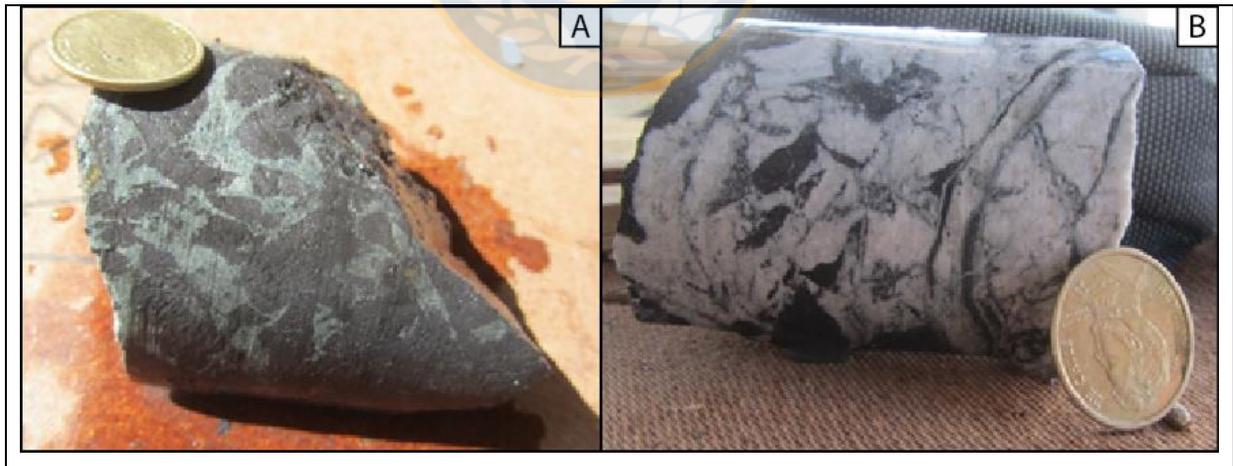


Figura 4.2: Menas de hierro con textura brechosa. En la figura A se observa mineral de hierro con textura brechosa, en donde la matriz corresponde a magnetita y los clastos a actinolita. En la figura B se observan clastos de angulosos de magnetita con un largo de 0,4 a 0,5 cm en una matriz de cuarzo-feldespato potásico.

4.2.3 Textura Diseminada: En la textura diseminada, la mena de hierro se encuentra distribuida irregularmente en cúmulos de mineral. Frecuentemente, esta textura se encuentra ligada a los márgenes del yacimiento, en zonas de baja ley (Figura 4.3).



Figura 4.3: Magnetita diseminada. Se observan guías de apatita y agregados cristalinos de cuarzo.

4.2.4 Textura en Guías: En esta textura, la mena de hierro se encuentra en guías de mineral que pueden ser rectas, curvas y/o polidireccionales o unidireccionales. Alcanzan espesores desde milimétricos a centimétricos y se encuentran distribuidas en zonas de alta, media y baja ley de hierro (Figura 4.4).

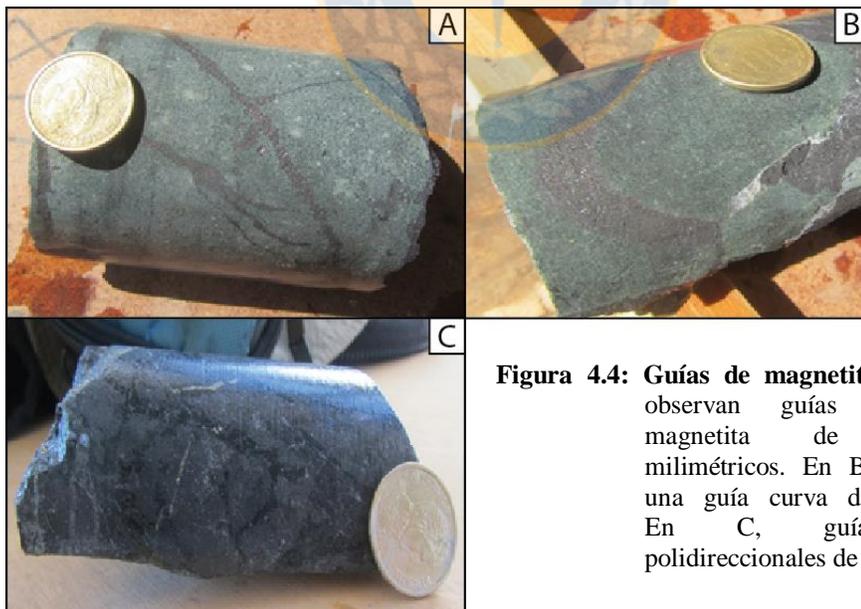


Figura 4.4: Guías de magnetita. En A, se observan guías rectas de magnetita de espesores milimétricos. En B se observa una guía curva de magnetita. En C, guías rectas polidireccionales de magnetita.

5. METALURGIA DEL HIERRO.

5.1 Generalidades

En CAP minería se utiliza una serie de conceptos para caracterizar parámetros asociados a pruebas metalúrgicas realizadas en laboratorio y a los productos que se obtienen en las operaciones en planta. Basado en informes internos de la empresa (Soto, 1977; Cuadra, 2014) serán definidos los conceptos relacionados a productos y pruebas de laboratorio más utilizados en este trabajo.

- **Concentrado:** Material obtenido por concentración magnética en húmedo, a través de un Tubo Davis. Su granulometría es de aproximadamente 44 μm (Malla Tyler 325#).
- **Finos:** Producto obtenido de la molienda del mineral en seco. Posee una ley de 65% Fe y su granulometría es aproximadamente de 10 mm.
- **Granzas:** Producto obtenido de la molienda del mineral en seco. Posee una ley de 63% Fe y su granulometría es de 10 a 30 mm.
- **Ley Magnética (% Fe Mag):** Es un parámetro que indica al porcentaje de minerales magnéticos en la muestra o mineral. Lo fundamental, es que solo cuantifica el hierro magnético recuperable por los procesos de concentración magnética. Se calcula como el producto del % DTT y % Fe DTT dividido por 100.

$$Ley Magnética = \frac{\%Fe DTT * \%DTT}{100}$$

- **Magnetismo:** Usado como un parámetro magnético que corresponde a la recuperación metalúrgica del concentrado obtenido en el Test del Tubo de Davis. Es calculado como el producto del % DTT con el cociente entre el % Fe DTT y Fe cabeza.

$$Magnetismo = \frac{(\%DTT * \%Fe DTT)}{\%Fe cabeza}$$

- **Pellet Feed:** Producto obtenido de la molienda y concentrado de mineral en húmedo, con una alta ley de hierro (>68%) y de un tamaño inferior a los 44 μm .
- **% DTT:** Es un parámetro magnético que corresponde a la recuperación en peso de mineral magnético obtenida en el Tubo de Davis. El % DTT se calcula como el cociente entre el peso del concentrado obtenido y el peso de la muestra.

$$\% DTT (RP) = \frac{C}{H} * 100$$

Rp: Recuperación en peso del concentrado.

C: Peso del concentrado magnético.

H: Peso de la muestra.

- **% Fe DTT:** Corresponde a la ley de hierro del concentrado magnético obtenido por ensayo de laboratorio en el Tubo de Davis.
- **Tubo de Davis:** Instrumento basado en un electroimán (4000 Gauss) adosado a un tubo de vidrio y que permite medir el contenido magnético en muestras que tienen minerales susceptibles al magnetismo (magnetita, pirrotina, ilmenita y otros). En el proceso, el tubo se inclina 45° y se le hace pasar un flujo de agua.

6. Resultados

6.1 Generalidades

Con base en la información que tiene CAP Minería de los depósitos de hierro que han sido estudiados y trabajados por la empresa, estos corresponden a depósitos de origen magmático que se distribuyen en lo que se conoce como Franja Ferrífera Cretácica Chilena, caracterizados por poseer magnetita o hematita como principales minerales de mena y por presentar en términos estadísticos histogramas de leyes de hierro con una distribución log normal, es decir, que según la frecuencia acumulada de los datos, es posible separar las leyes de hierro en poblaciones de datos. En relación a lo anterior, los depósitos de baja ley de hierro (ley promedio menor a 30% Fe) presentan histogramas de ley mineral que muestran una importante proporción de datos acumulados para leyes de Fe bajas, en consecuencia, la mayor cantidad del volumen de mineral que conforma estos depósitos posee bajas leyes de hierro.

Para los depósitos en los que hay un mayor volumen de material de baja ley que de alta ley, es necesario establecer envolventes de ley mineral de hierro (isoleyes) que consideren criterios estadísticos, geológicos y principalmente enfocados a la elaboración del producto que se quiera comercializar. No obstante, las envolventes de ley de hierro no aseguran el comportamiento que tendrá el material en la planta metalúrgica, por lo que complementar las envolventes de isoley con envolventes texturales de las menas de hierro, puede entregar un primer acercamiento al comportamiento que tendrá el mineral en la planta metalúrgica. De igual forma, existen otras variables geológicas que pueden tener un impacto directo en los procesos metalúrgicos de hierro, como la mineralogía de alteración (impurezas), dureza de la roca, especies minerales de hierro, granulometría y/o forma que tengan los cristales de la mena a nivel microscópico.

Lograr entender la relación que tienen estas variables geológicas en los procesos metalúrgicos de hierro, significa un reto en vista del actual contexto que se presenta en la minería, pues el descubrimiento de grandes depósitos de hierro como El Romeral, Algarrobo o Los Colorados es incierto, mientras que parece más común encontrar depósitos de baja ley como Alcaparra A. Por consiguiente, si es que se desea obtener una producción aceptable en términos de la elaboración de producto con las especificaciones requeridas para la

comercialización, habrá que tener un completo entendimiento del impacto que tienen las variables geológicas de las menas de hierro en los procesos metalúrgicos.

A continuación, serán presentados los resultados del presente estudio, referidos al análisis estadístico de las leyes de hierro, la distribución de texturas de las menas de hierro y la relación entre estas variables y la ley de concentrado (Fe DTT).

6.2 Análisis Estadístico y Exploratorio de Datos

6.2.1 Envoltentes Depósito Alcaparra A

La distribución estadística de las leyes de hierro del depósito Alcaparra A, es similar a la observada en otros depósitos de la Franja Ferrífera Cretácica Chilena estudiados por CAP Minería, pues el histograma de la Figura 6.1, presenta más de una población de datos, lo cual sugiere una distribución Log normal. Además, el histograma muestra una proporción importante de datos con leyes de hierro entre 5% a 35% Fe, mientras que una porción menor posee leyes superiores a 35% Fe.

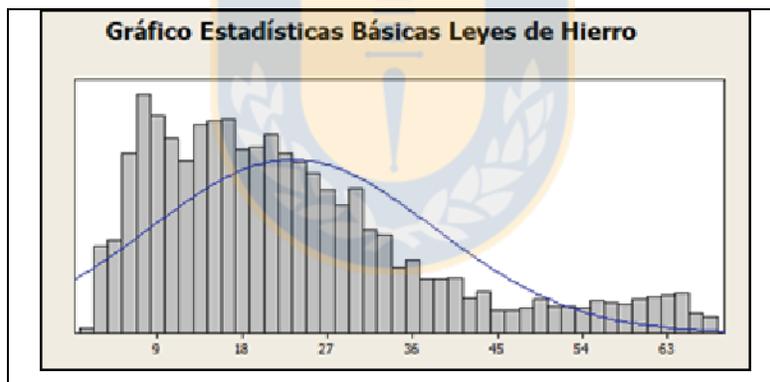


Figura 6.1: Histograma de Leyes de Hierro Proyecto Alcaparra A.

Para tener un primer criterio de selección de las envoltentes de ley de hierro del modelo geológico se utiliza una curva probabilística (Figura 6.2). En este gráfico se separan grupos de datos según los cambios de pendiente en la curva, estos cambios representan variaciones en la frecuencia acumulada de los datos analizados, distinguiéndose cinco familias de datos que representan a priori los rangos de leyes de hierro que se utilizarán para realizar el modelo geológico de isoleyes. Estos valores son: 0%-4% Fe, 4-10% Fe, 10-35% Fe, 35-60% Fe, >60 % Fe (Figura 6.3).

Estas poblaciones de datos son sugerentes de las leyes de hierro que se utilizarán como envolventes del modelo geológico. Sin embargo, es necesario considerar otros criterios que no solo sean estadísticos, sino que también incluyan variables geológicas y de elaboración de producto para seleccionar las envolventes de isoley.

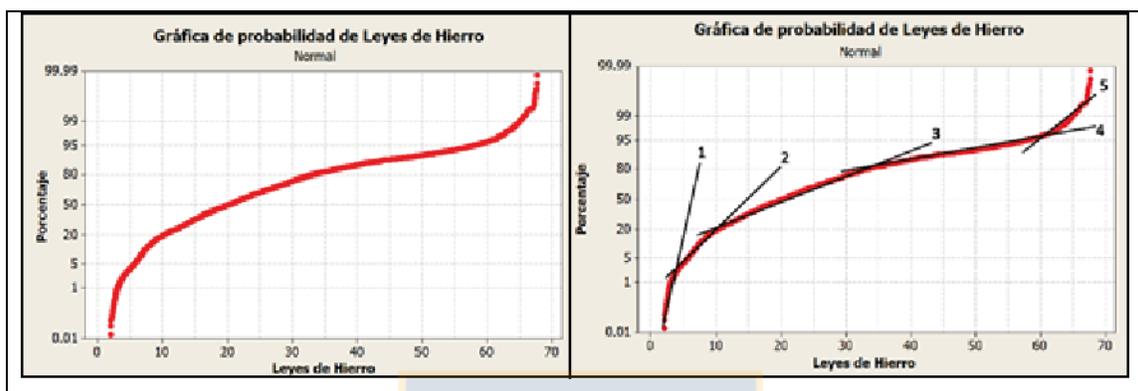


Figura 6.2: Gráfico probabilístico de leyes de hierro.

Figura 6.3: Gráfico probabilístico de leyes de hierro con los cambios de pendiente.

Si bien los métodos probabilísticos son útiles para poder analizar familias de datos y elegir envolventes de ley mineral, estos deben ser complementados por criterios geológicos enfocados en la elaboración de producto. Es entonces, que utilizando datos de leyes de hierro, ensayos metalúrgicos de laboratorio (Test Tubo de Davis) y leyes de hierro de los productos elaborados por CAP Minería, se seleccionaron las siguientes envolventes: $\geq 10\%$ Fe asociada a la aparición de hierro magnético y enfocado a la elaboración de granza (63% Fe DTT), $\geq 23\%$ Fe para la elaboración de finos (65% Fe DTT), y $\geq 35\%$ y $\geq 50\%$ Fe para la elaboración de Pellet Feed (68% Fe DTT) (Figura 6.4).

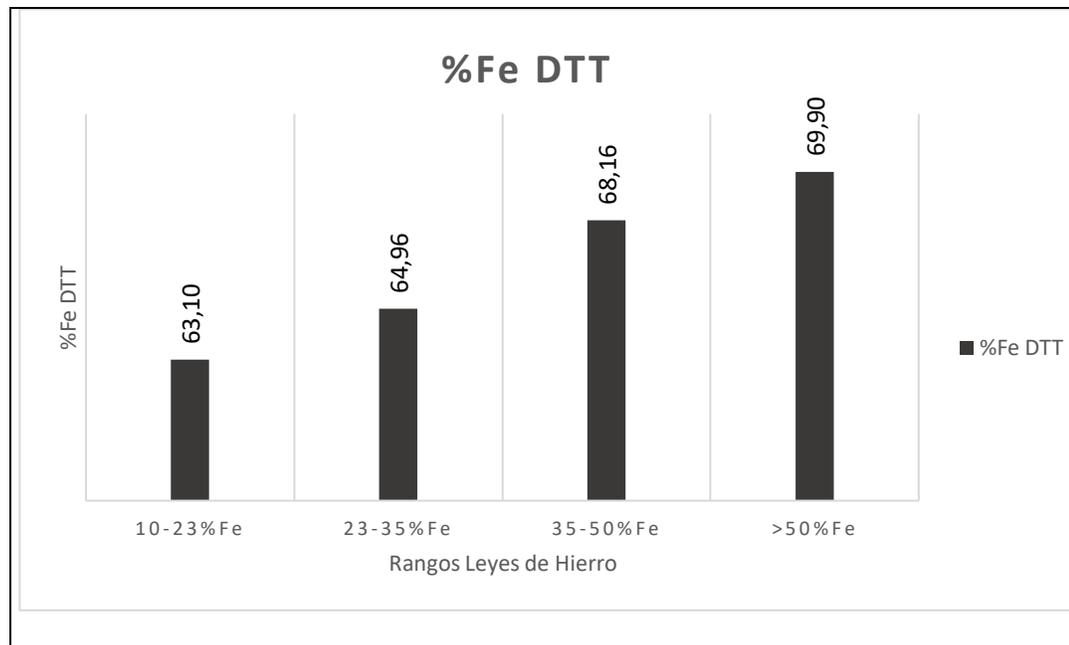


Figura 6.4: Gráfico de %Fe DTT vs % Fe (Obtenido por volumetría).

6.2.2 Texturas y Ley de Hierro

Con respecto a las texturas de las menas de hierro del Proyecto Alcaparra A, estas corresponden a las que usualmente han sido reconocidas en los depósitos estudiados por CAP Minería y en la Franja Ferrífera Cretácica Chilena, es decir, menas de mineral magnético con textura maciza, brechosa, diseminada y en guías. Por medio de un histograma, se relaciona la ocurrencia de las texturas de las menas de mineral de Fe con las leyes de hierro del depósito (Figura 6.5). Asimismo, este gráfico muestra que las diferentes texturas de la mena de hierro se encuentran coexistiendo para las envolventes de isoleyes de hierro, de modo que para un intervalo de ley mineral se pueden encontrar existiendo todas las texturas de las menas de hierro (maciza, brechosa, diseminada y en guías), pero en distinta proporción (Figura 6.6).

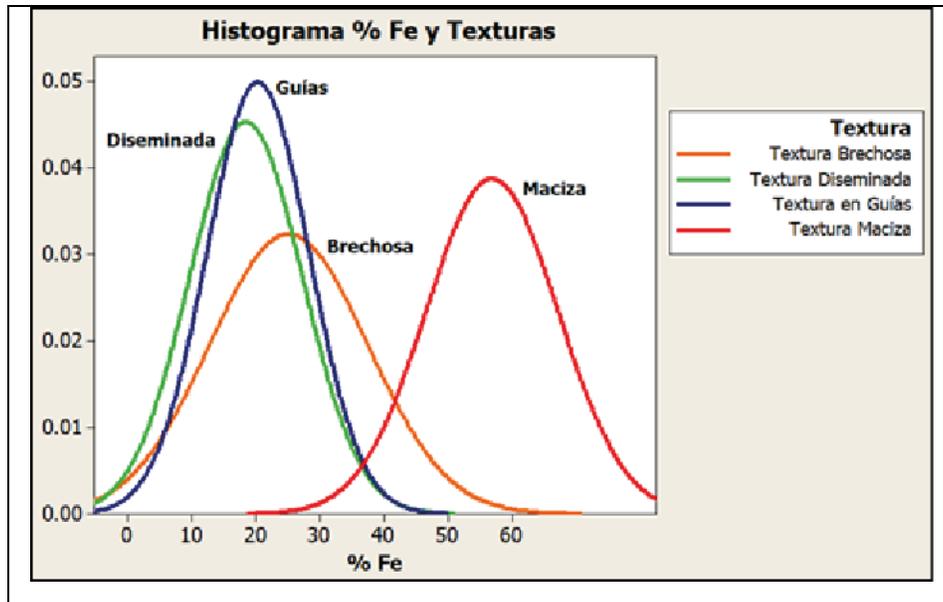


Figura 6.5: Histograma texturas de menas de hierro vs leyes de hierro.

Leyes de Hierro (% Fe)	10%	23%	35%	50%
Textura Diseminada	-----			
Textura Brechosa	-----			
Textura Maciza	-----			
Textura en Guías	-----			

Figura 6.6: Cuadro relación entre texturas y leyes de hierro.

Además de este análisis, se comparó la cantidad de muestras con estas características en la base de datos, esto se resume en el gráfico de la figura 6.7.

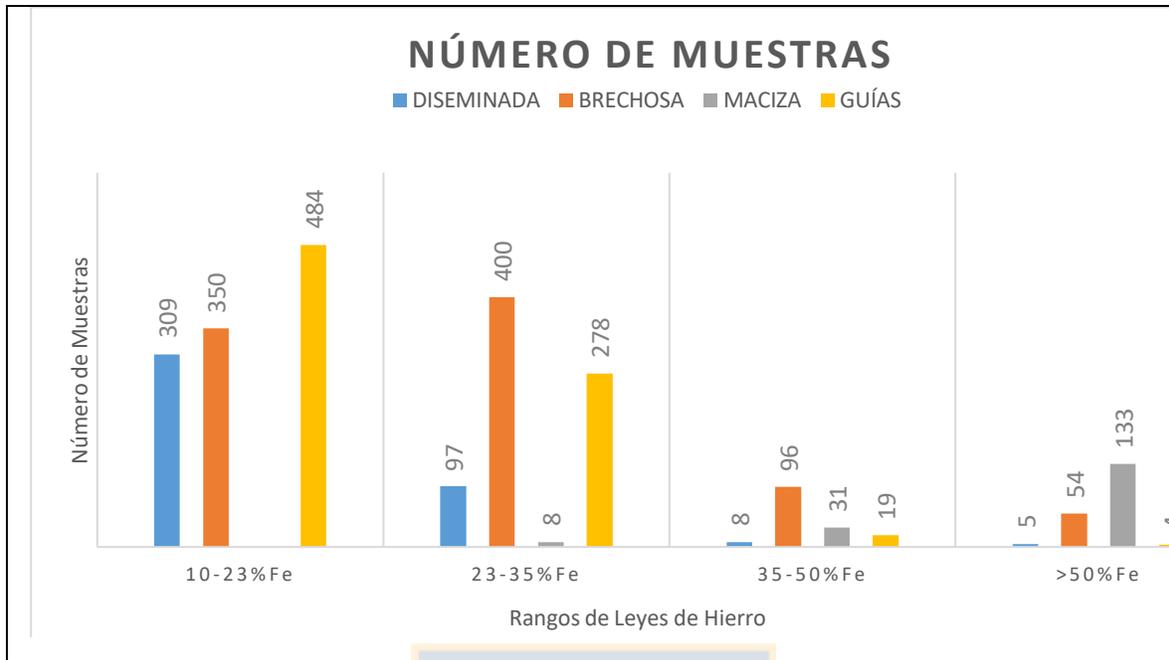


Figura 6.7: Gráfico de distribución de datos según texturas.

En el gráfico de la Figura 6.8, se relaciona el porcentaje de hierro promedio para cada una de las texturas de las menas en las isoleyes. En este gráfico, se observa que en general las menas con textura maciza son las que presentan mayor cantidad de hierro total, seguidas por las diseminadas, luego las brechosas y finalmente por las que tienen textura en guías. Esta diferencia se hace más notoria en rangos de leyes superiores a 50% Fe.

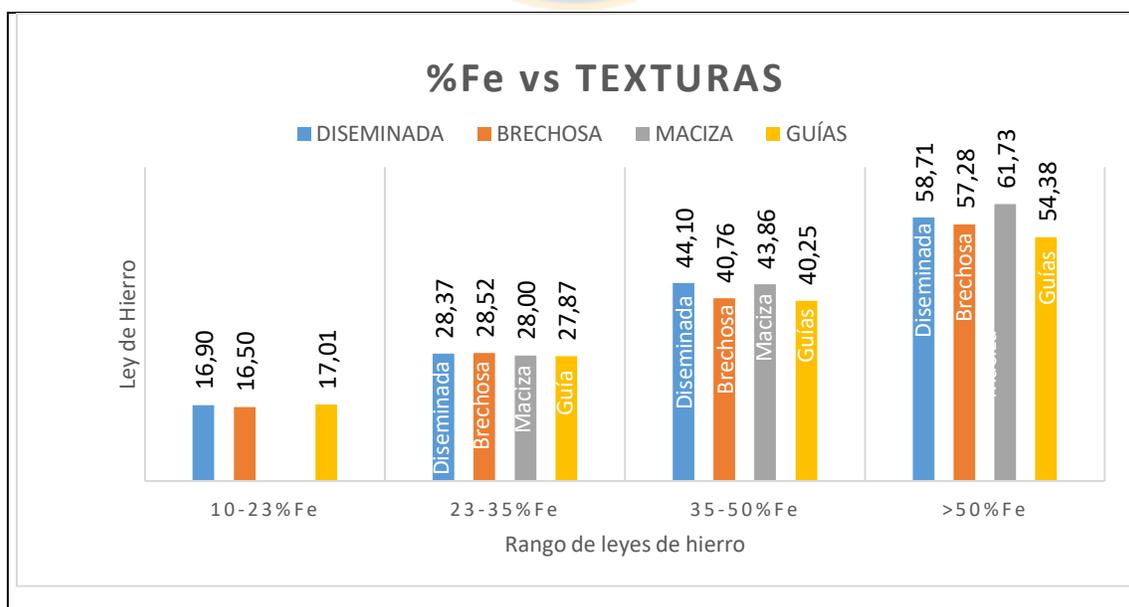


Figura 6.8: Porcentaje ley de hierro total para las texturas de las menas de hierro.

6.2.3 Leyes de concentrado.

Los análisis químicos de hierro total realizados a las muestras mediante volumetría son insuficientes para estimar el potencial económico que pueden tener los depósitos de hierro, pues el principio metalúrgico de concentración de minerales de hierro adoptado por CAP Minería, se basa en las propiedades magnéticas que tenga la mena de hierro, por consiguiente, para obtener un primer valor del hierro magnético (económico) se realiza una prueba de laboratorio llamada Test del Tubo de Davis (DTT), que consiste en un tubo de vidrio inclinado en 45° , en donde se analiza una muestra de 20 gramos con una granulometría de 80% bajo 325# Tyler ($44 \mu\text{m}$), mientras esta es agitada y sometida a un flujo de agua de $800 \text{ cm}^3/\text{min}$ y a un campo de intensidad magnética de entre 3500 a 4000 Gauss. Finalmente, el material magnético que queda en el tubo es analizado por volumetría para determinar su contenido de Fe, de este modo se determina la ley de hierro del concentrado (Fe DTT).

En la Figura 6.9 se grafica la ley de hierro del concentrado, para cada una de las envolventes del modelo geológico. Asimismo, se puede ver que el Fe DTT aumentará de manera proporcional a la cantidad de hierro total que tiene la muestra analizada.

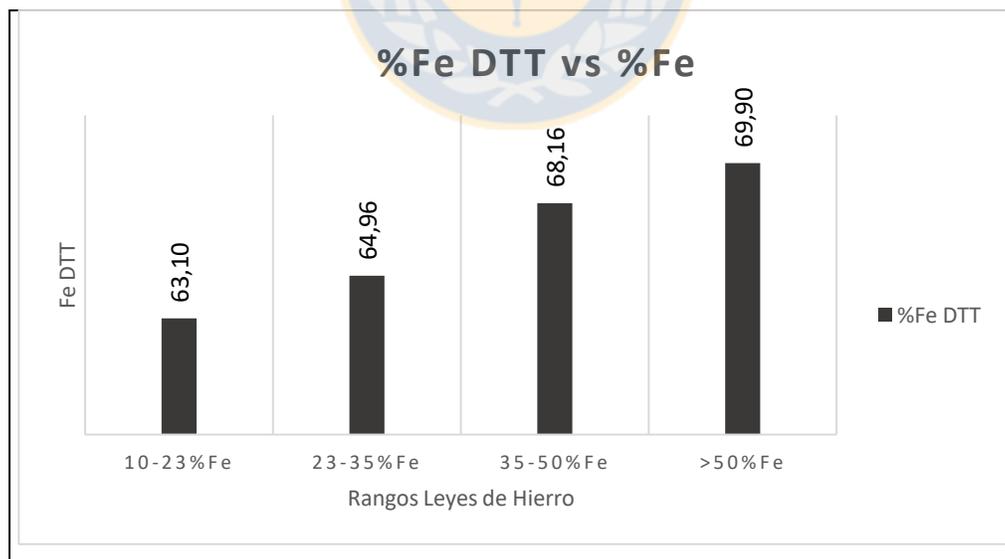


Figura 6.9: Gráfico %Fe DTT vs % Fe.

Para asegurar la obtención de producto con las especificaciones requeridas para la comercialización y disminuir riesgos operacionales en planta, se deben robustecer los modelos geológicos de leyes de hierro, integrando las variables geológicas que existen dentro de los depósitos (mineralogía de ganga, variabilidad textural de la mena, granulometría de los cristales de la mena o la dureza de la roca) y entender la influencia que estas variables tienen en las plantas metalúrgicas de hierro. Bajo esta última observación, se analiza la relación entre la ley de hierro del concentrado con las texturas de mineral magnético para cada una de las envolventes de isoley.

En el gráfico de la Figura 6.10, se observa que para leyes superiores a 35% Fe las menas de hierro con textura diseminada presentan mayores leyes de concentrado que el resto de las texturas reconocidas en el depósito, les siguen las menas metálicas con textura en guías, luego las macizas y finalmente las que poseen textura brechosa. A su vez, para rangos de ley de hierro menores a 35% Fe, las menas magnéticas con textura en guías presentan una ley de concentrado similar a las que poseen textura diseminada, siendo las menas con textura brechosa aquellas que alcanzan menor ley de concentrado para este rango. Se puede sugerir que las menas con textura brechosa no presentan potencial para la elaboración de pellet feed, pues las leyes de concentrado que alcanzan para los rangos menores a 50% Fe, se encuentran bajo las especificaciones requeridas para elaborar este producto (Fe DTT mayor a 68% Fe).

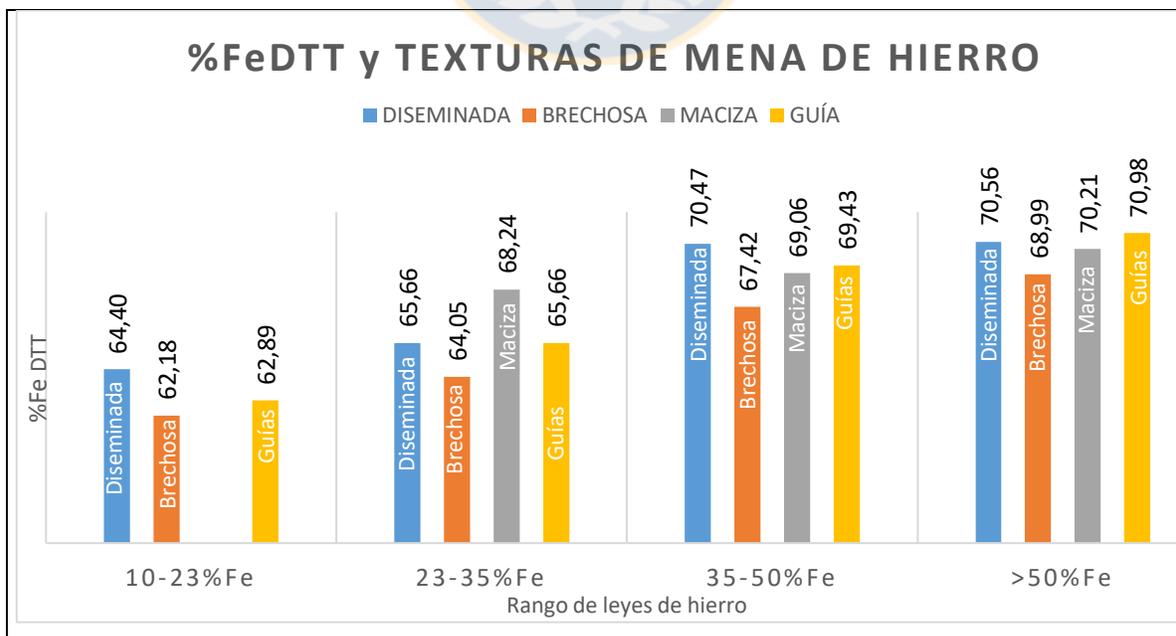


Figura 6.10: Gráfico %Fe DTT y % Fe, para las texturas de las menas de hierro.

6.2.4 Impurezas

Las impurezas más importantes presentes en el depósito Alcaparra A corresponden a fósforo y azufre, estos elementos están asociados a la ocurrencia de apatita y pirita. El gráfico de la Figura 6.11 muestra que las menas de hierro con textura brechosa poseen una mayor concentración de fósforo. No obstante, para el rango de ley de 23-35% Fe, las menas con textura maciza poseen mayor concentración de fósforo, les siguen las menas de hierro con textura brechosa, luego las diseminadas y finalmente las menas con textura en guías.

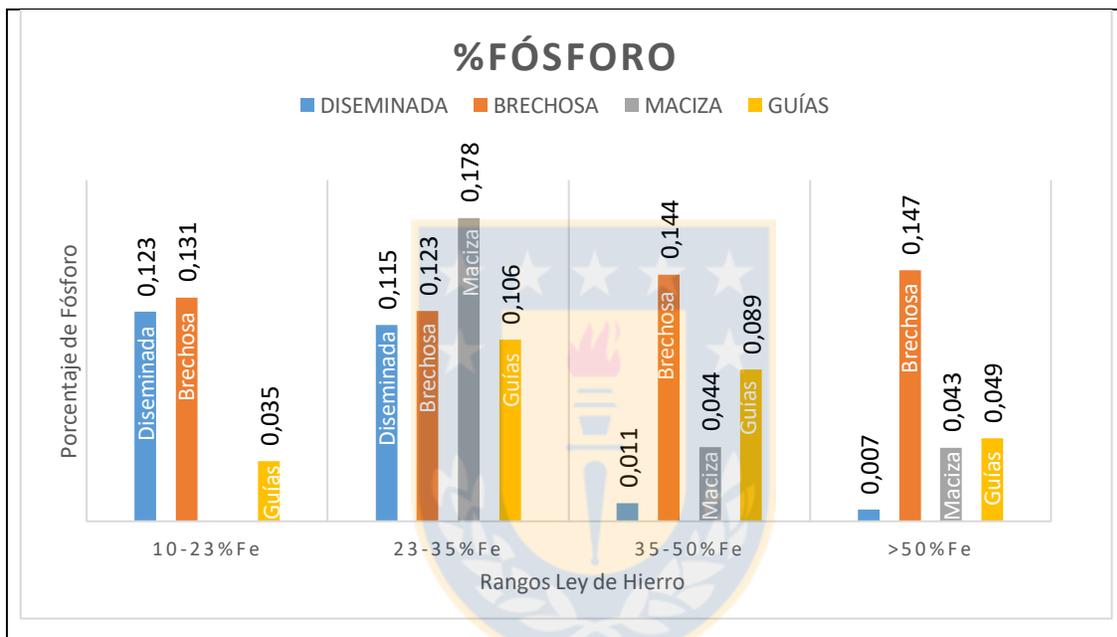


Figura 6.11: Gráfico Porcentaje de Fósforo vs % Fe, para texturas de las menas.

En el gráfico de la Figura 6.12, se muestra la concentración de azufre para cada una de las texturas de las menas de hierro. Por una parte, para leyes de hierro sobre 35% Fe, las menas con textura brechosa son las que poseen una mayor concentración de azufre. Para leyes inferiores a 35% Fe, las menas magnéticas con textura diseminada poseen mayor concentración de azufre. Finalmente, las menas con textura maciza no reportan concentraciones de azufre significativas, pues estas se encuentran por debajo del límite de detección.

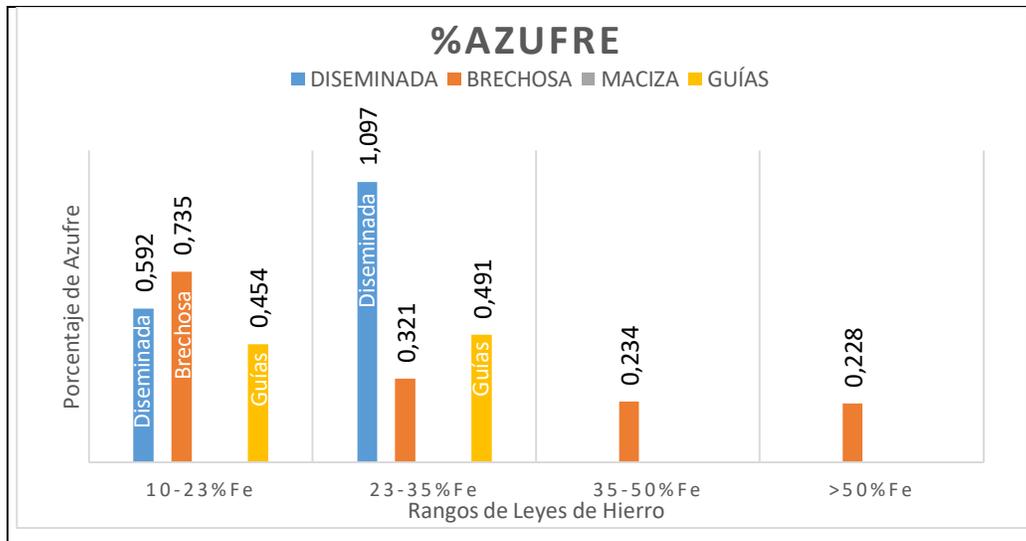


Figura 6.12: Gráfico Porcentaje de Azufre vs % Fe, para texturas de las menas.

6.3 Modelo de Mineralización (Isoleyes)

El depósito Alcaparra A reporta una ley promedio de hierro equivalente a 21,96% Fe y se reporta magnetita como principal mena de hierro.

Los perfiles geológicos realizados, revelan la existencia de dos cuerpos alargados con leyes superiores a 50% Fe, los cuales están orientados en dirección NNE-SSW, separados por aproximadamente 250 metros en la vertical y por 750 metros en la horizontal, los cuales se distinguen por su mineralogía de alteración, impurezas, leyes de hierro promedio, texturas de las menas de hierro y comportamiento metalúrgico (Figura 6.13).

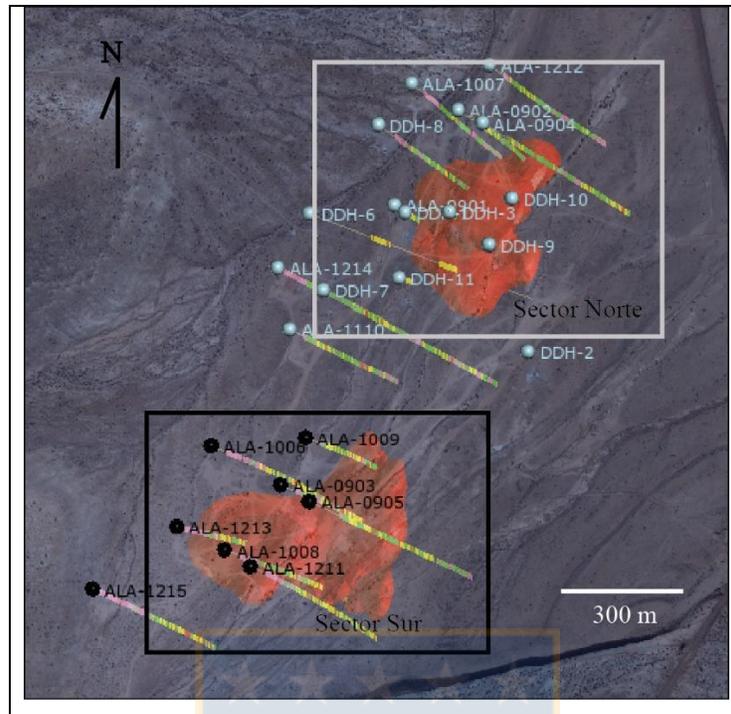


Figura 6.13: Vista en planta Proyecto Alcaparra A. Ubicación de los sondajes y los dos cuerpos de alta ley (en rojo).

El cuerpo de alta ley ubicado en el sector norte del depósito se encuentra a una profundidad de 530 metros y presenta una ley promedio equivalente a 48,54% Fe. Mientras que la mineralogía de ganga se encuentra formada por clorita, actinolita \pm epidota \pm calcita, además se reporta la ocurrencia de guías y diseminados de piritita, junto a guías de apatita como principales impurezas. Utilizando perfiles geológicos, interpretación geofísica magnetométrica y gravimétrica del sector e interpretación geológica, se determinó que el cuerpo presenta una orientación de 30° NE y una inclinación de $55-50^\circ$ hacia el oeste (Figura 6.14).

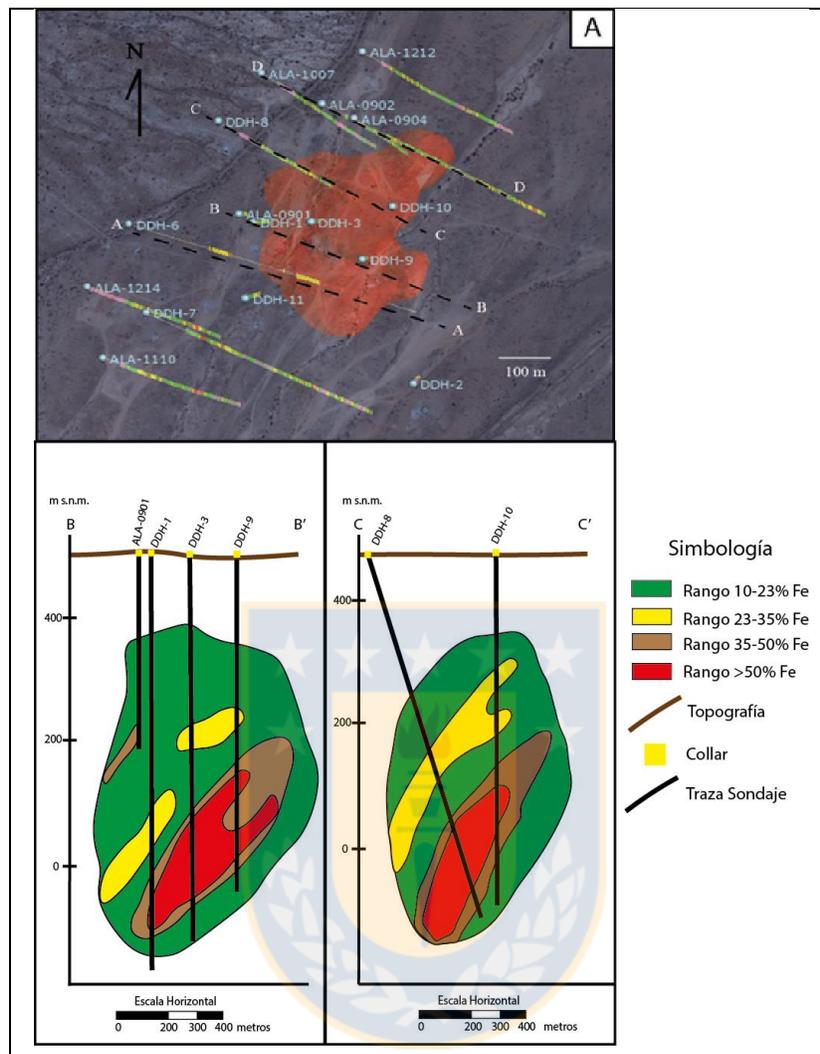


Figura 6.14: Modelo geológico Alcaparra A. A: vista en planta de las trazas de los perfiles geológicos realizados en el sector norte de Alcaparra A. B: Perfil geológico de isopleyes B-B. C: perfil geológico de isopleyes D-D.

En la zona sur del depósito y a 810 metros de profundidad, se ubica otro cuerpo de hierro con ley promedio equivalente a 51,42% Fe, con magnetita como mena de hierro. Además, se reconocen guías y diseminados de calcopirita localizados en el extremo oeste del cuerpo. La mineralogía de ganga del depósito está dominada por actinolita \pm cuarzo \pm pirita, esta última se encuentra localizada en el extremo oriental del sector. Al igual que el cuerpo norte, el cuerpo sur posee un rumbo aproximado de 30° NE y una inclinación de $60-65^\circ$ hacia el oeste (Figura 6.15).

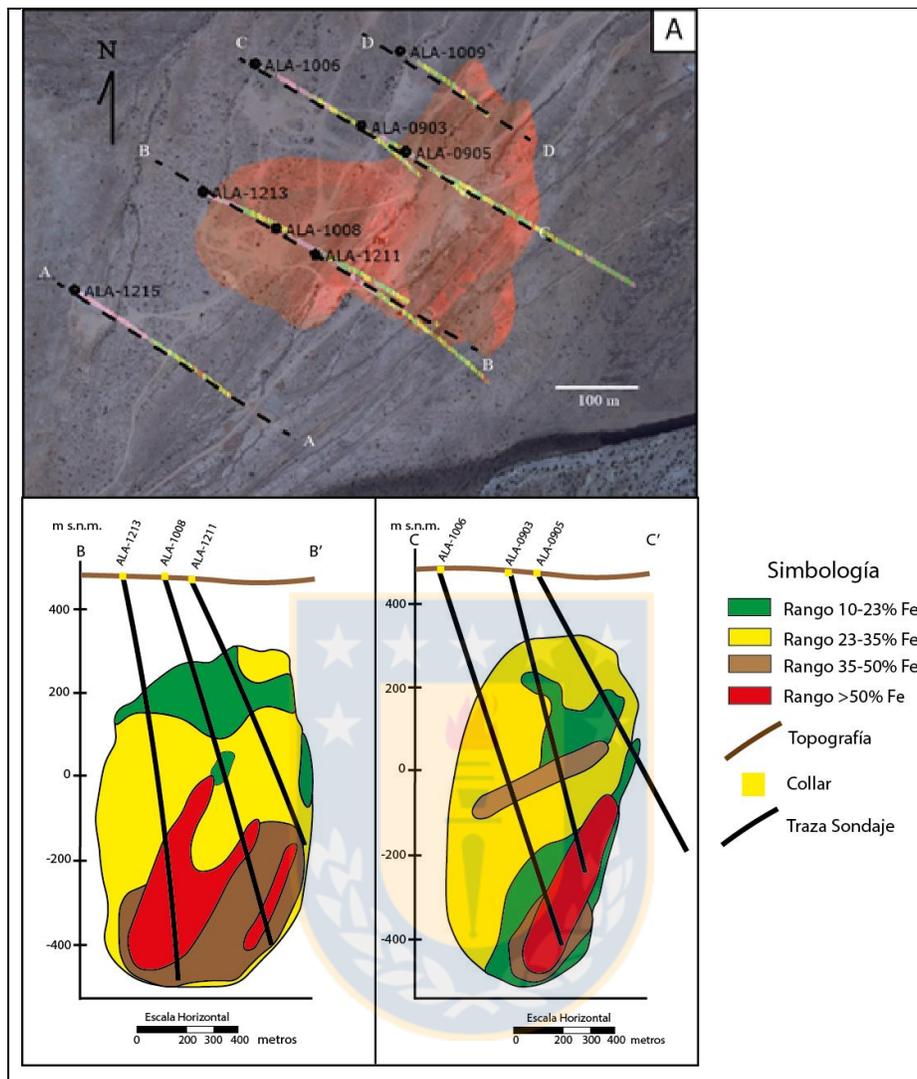


Figura 6.15: Modelo geológico Alcaparra A Sur. En A se observa la vista en planta de las trazas de los perfiles geológicos realizados en el sector sur del depósito Alcaparra A. En B se muestra el perfil geológico de isopleyes B-B. En C, se observa el perfil geológico de isopleyes C-C.

6.3.1 Modelo de Mineralización: Leyes de Hierro y Leyes de Concentrado

A partir de descripciones de los sondajes, la base de datos con leyes de hierro, pruebas metalúrgicas de laboratorio y la interpretación geológica realizada, se caracterizan los cuerpos del modelo de isopleyes.

El gráfico de la Figura 6.16, muestra la ley de hierro promedio para cada uno de los cuerpos generados con las envolventes de ley mineral, de esta forma se puede observar que los

cuerpos de hierro identificados en el sector sur del depósito poseen una mayor ley promedio que los cuerpos que se ubican al norte del depósito, habiendo una diferencia de 0,79% Fe entre los cuerpos con ley de hierro sobre 50% Fe del sector norte y sur, y de 2,09% Fe entre los cuerpos que presentan leyes entre 35-50% Fe. Los cuerpos con leyes de hierro entre 23-35% Fe presentan una ley promedio de 28,22% Fe y los de 10-23% Fe poseen una ley promedio de 20,04% Fe.

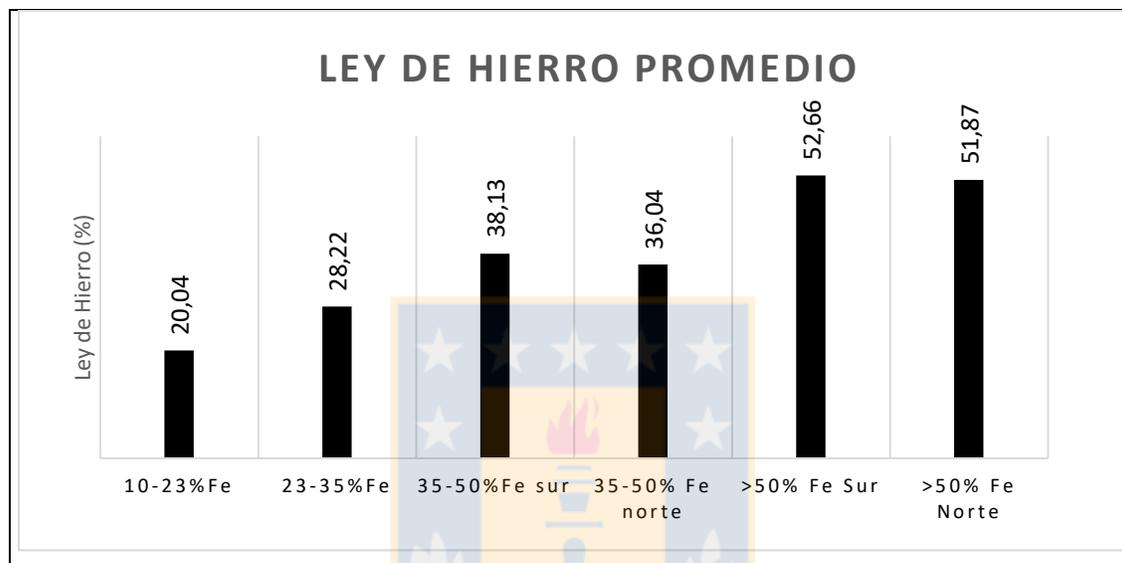


Figura 6.16: Gráfico Ley promedio de hierro para envoltentes de ley.

Asimismo, en el gráfico de la Figura 6.17, se observa que los cuerpos del sector norte presentan mejores leyes de concentrado que los del sector sur, marcando una diferencia de 1,34% Fe entre los cuerpos con leyes superiores al 50% Fe y de 0,47% Fe entre los cuerpos con leyes de hierro entre 35-50% Fe del sector norte y sur de Alcaparra A.

Al relacionar las leyes del concentrado con las leyes de hierro de los cuerpos mineralizados, se desprende que en el área norte, las leyes de hierro son más bajas que los del sur. Sin embargo, se observan valores de ley de concentrado más altas que en el sector sur, esto podría explicarse por la mineralogía de ambos cuerpos, ya que el área sur del depósito posee zonas localizadas con diseminados y guías de calcopirita, las que pueden elevar la cantidad de hierro obtenido en los análisis de volumetría. Mientras que en el sector norte del depósito, no ha sido reconocida la ocurrencia de calcopirita. No obstante, se propone una influencia petrográfica de las menas de hierro, en términos de especies minerales de

hierro, granulometría y forma de cristales a nivel microscópico, que influye en las leyes de concentrado obtenidas en estas pruebas. Además, los datos asociados al cuerpo norte no son del todo concluyentes, pues no han sido realizados suficientes ensayos metalúrgicos de laboratorio como para caracterizar las leyes de hierro de concentrado de este cuerpo.

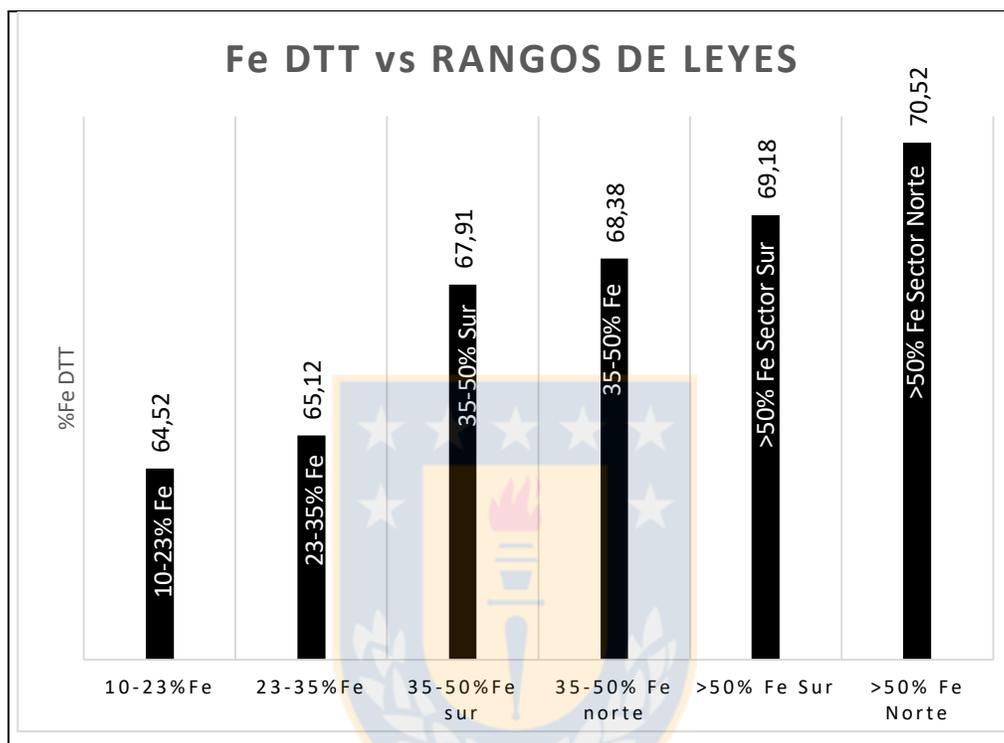


Figura 6.17: Gráfico de leyes de concentrado (Fe DTT) vs Rangos de leyes.

Los minerales que acompañan a las menas de hierro y que representan problemas debido a que son considerados como impurezas en los depósitos de hierro, son la apatita y pirita, ya que aportan fósforo y azufre respectivamente. Ambos elementos representan problemáticas en la metalurgia del hierro, pues disminuyen la tenacidad y aumentan la fragilidad del producto elaborado.

En el gráfico de la Figura 6.18 se observa que la mayor concentración de azufre se encuentra en el cuerpo de alta ley del sector sur de Alcaparra A. Sin embargo, al comparar estos datos con el modelo de isoleyes, se aprecia que la concentración de azufre en del sector, sur se encuentra localizada en el extremo sureste del cuerpo. Esta observación es consistente con las descripciones geológicas, ya que en esa zona hay una gran ocurrencia de pirita diseminada, la cual aporta con azufre.

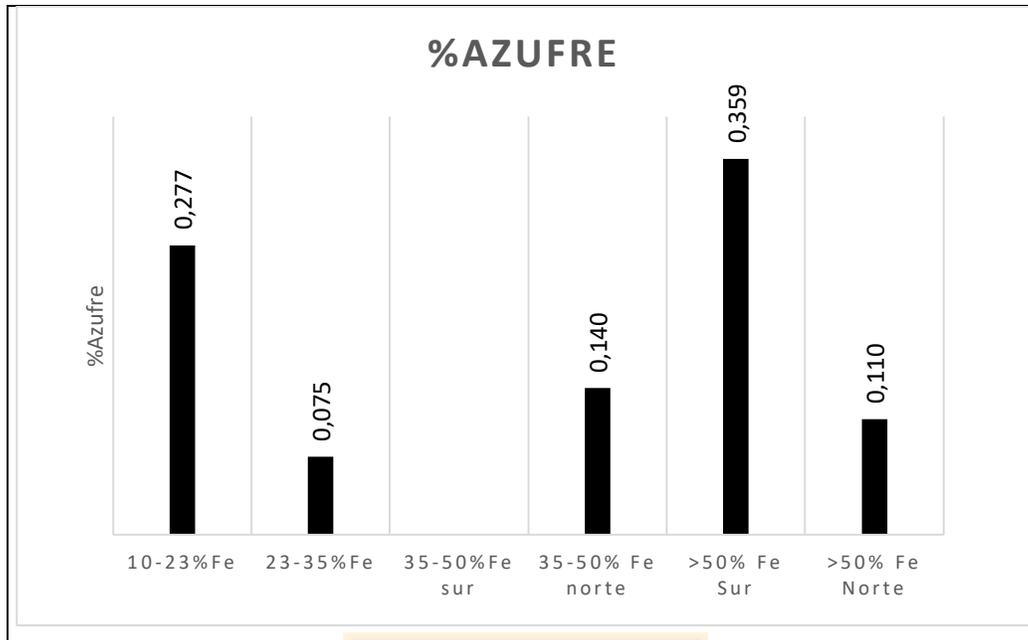


Figura 6.18: Porcentaje de azufre vs Rangos de ley de hierro.

En el sector norte de Alcaparra A existe una menor concentración de azufre, no obstante, en comparación al cuerpo sur, el valor obtenido es representativo para el cuerpo, ya que existe una mayor densidad de datos medidos por sobre el límite de detección en las pruebas de laboratorio, que además se condicen con la geología del sector, pues se reconoce una ocurrencia leve a moderada de pirita en todo el cuerpo de alta ley.

Las impurezas de fósforo del depósito se concentran en los cuerpos de baja ley (leyes de hierro menor a 35% Fe), mientras que para los cuerpos con leyes de hierro superiores a 35% Fe, el fósforo se concentra en el sector norte. Esto es similar a lo observado en el modelo geológico, ya que en esa zona hay una ocurrencia moderada de apatita en guías (Figura 6.19).

En general, el fósforo se encuentra en los sectores más superficiales del depósito, entre los 110-130 metros de profundidad, alcanzando concentraciones de 0,2%. En el sector sur el fósforo se encuentra localizado en los bordes del cuerpo de alta ley, mientras que para el sector norte el fósforo se encuentra distribuido más homogéneamente, lo que se relaciona con la ocurrencia de guías de apatita en el cuerpo mineralizado de mayor ley.

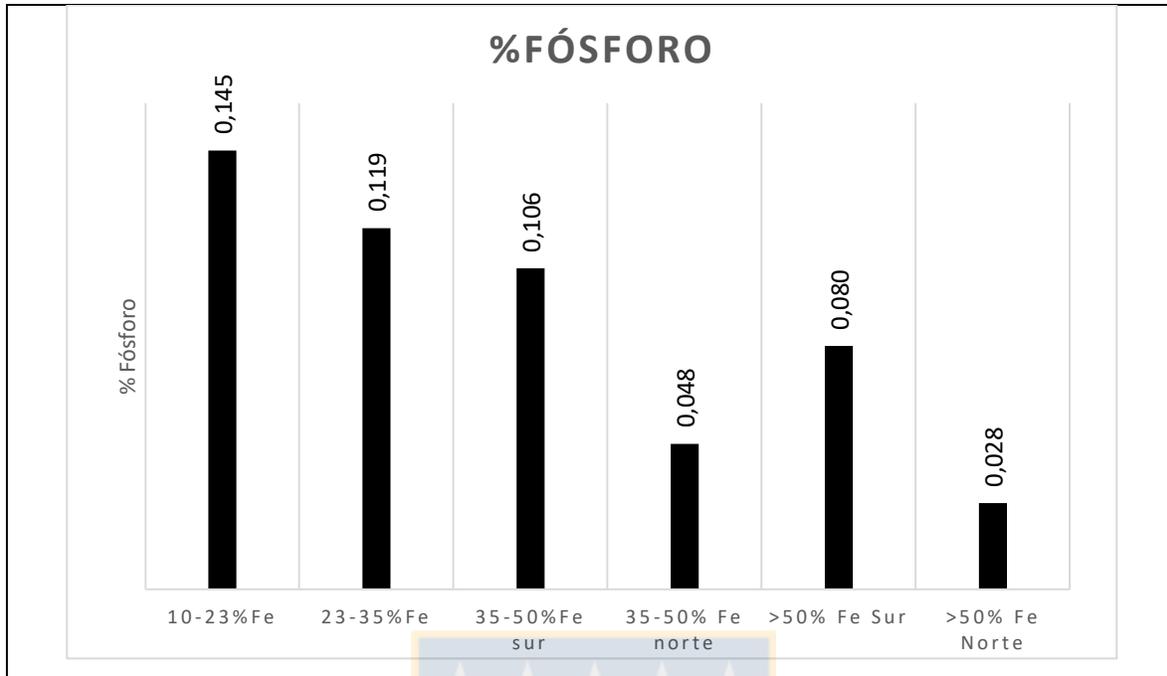


Figura 6.19: Porcentaje de fósforo vs Rangos de ley de hierro.

6.4 Modelo Textural

Al igual que los depósitos de hierro-apatita reconocidos por CAP minería e insertos en la Franja Ferrífera Cretácica, Alcaparra A presenta menas de hierro con textura maciza, brechosa, en guías y diseminada, que conforman a grandes rasgos un perfil de zonación textural, en donde se encuentra un núcleo de alta ley asociado a menas con textura maciza que gradan a brechosa y finalmente a guías y diseminados

Mediante un modelo geológico construido a partir de envolventes texturales de las menas de hierro, ha sido posible cuantificar e identificar la ocurrencia que estas tienen para cada una de las envolventes de isoleyes (Figura 6.20).

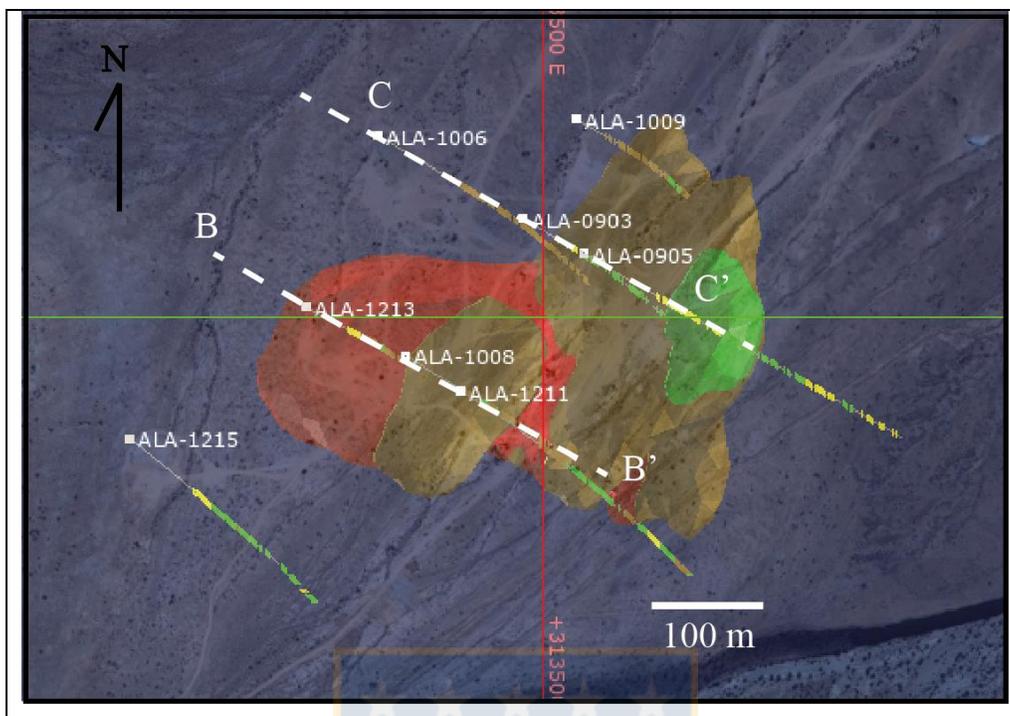


Figura 6.20: Vista en planta de las trazas de los perfiles geológicos de isotextura realizados en el sector sur del depósito Alcaparra A.

El perfil geológico B-B del sector sur de Alcaparra A muestra un núcleo profundo de hierro con textura maciza que gradúa a textura brechosa. Sin embargo, dentro del núcleo con textura maciza, se reconoce una zona donde las menas presentan textura brechosa. Hacia los bordes del depósito, las menas de hierro presentan principalmente textura brechosa, que pasan a menas con texturas en guías y finalmente diseminada. Esta zonación textural no es del todo estricta, pues el modelo geológico y los perfiles realizados revelan que las diferentes texturas de las menas de hierro se encuentran interrelacionadas en todo el cuerpo mineralizado, es decir, que las texturas se encuentran coexistiendo en distinta proporción en volumen para los diferentes rangos de leyes de hierro (Figura 6.21).

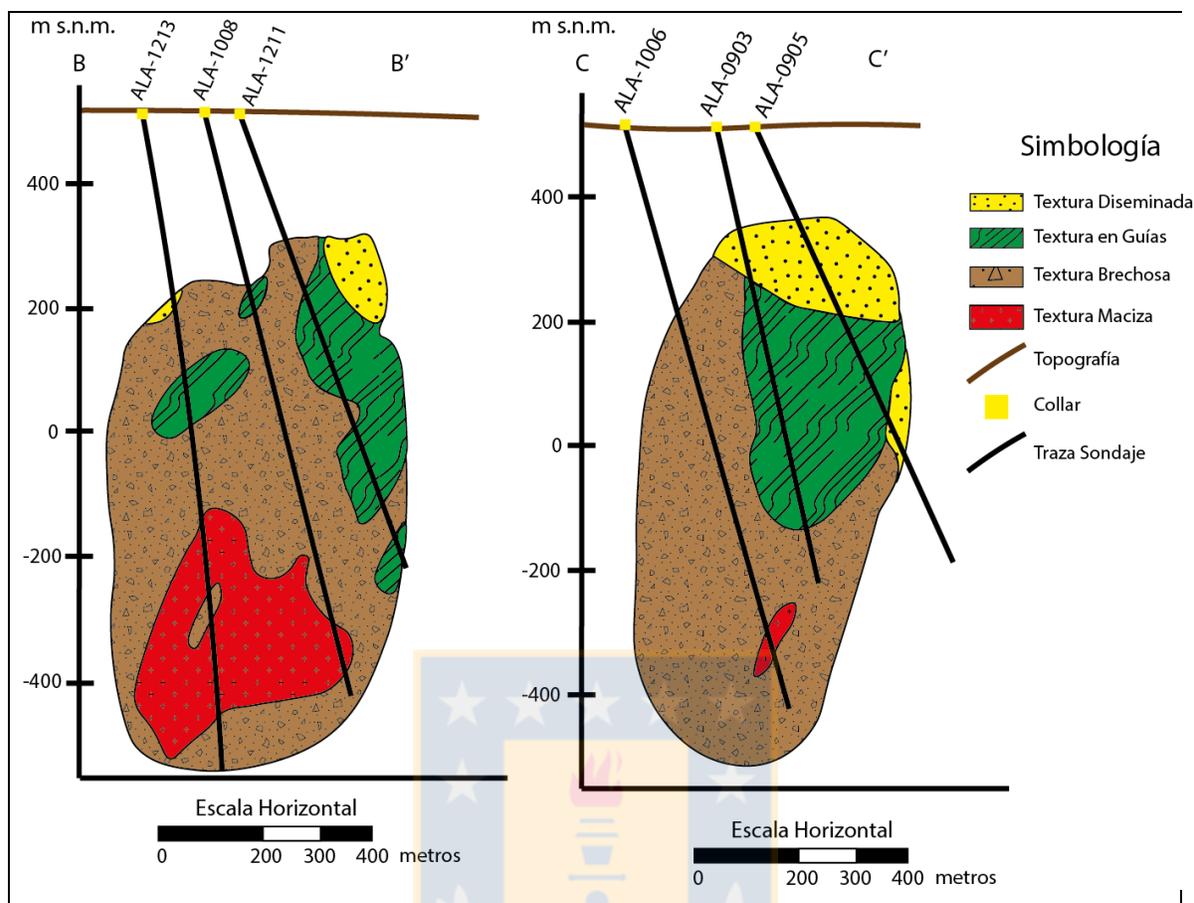


Figura 6.21: Perfiles geológicos con envolventes de isotextura B-B' y C-C'.

6.4.1 Modelo Textural: Leyes de Hierro y Leyes de Concentrado

A partir de las descripciones de los sondajes del depósito, leyes de hierro, pruebas metalúrgicas de laboratorio y la interpretación geológica realizada, se caracterizan los cuerpos generados con las envolventes de isoley e isotextura.

El gráfico de la Figura 6.22 muestra la ley de hierro promedio para cada una de las envolventes de isoley e isotextura. Asimismo, se puede observar que las menas de hierro con textura maciza son aquellas que poseen un mayor porcentaje de hierro total. Por una parte, para el cuerpo de 35-50% Fe existe una diferencia de 6,08% Fe entre las menas que poseen textura en guías y textura brechosa. En los cuerpos mineralizados con rangos de leyes inferiores a 35% Fe, la ley total se mantiene relativamente constante, existiendo poca diferencia de porcentaje entre las diferentes texturas de las menas.

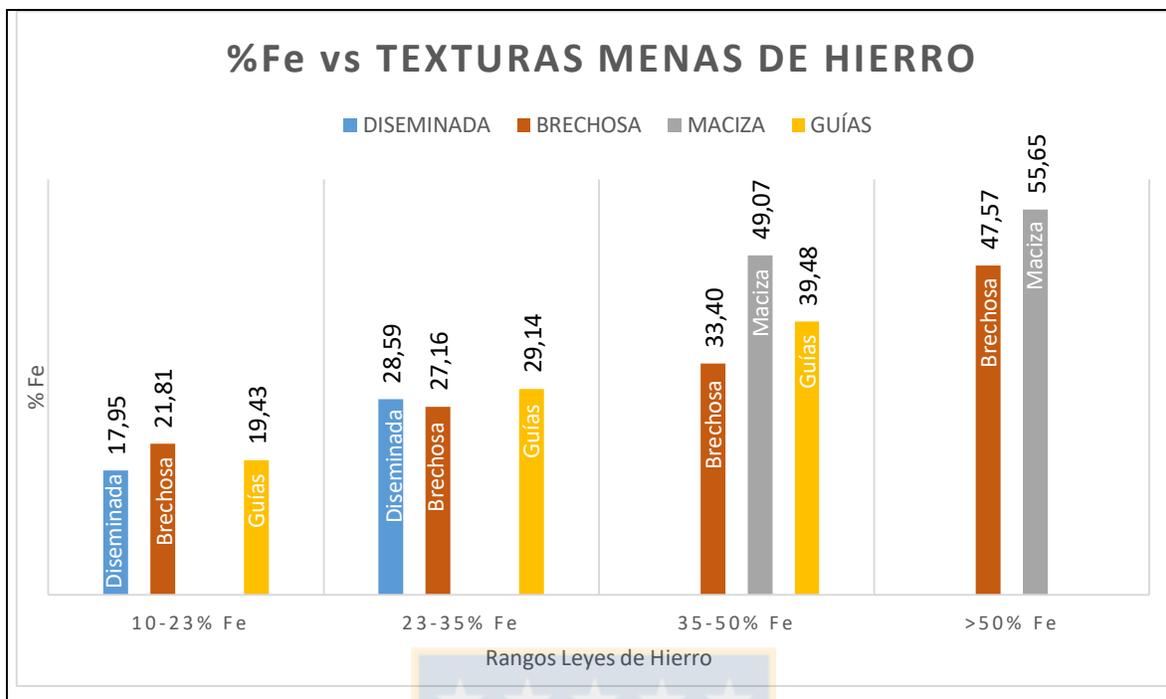


Figura 6.22: Gráfico % Fe para texturas de menas de hierro.

En la Figura 6.23, se observa la ley de hierro del concentrado (Fe DTT) según las texturas de las menas de hierro presentes en el depósito. De esta forma, para el rango de 35-50% Fe las menas magnéticas macizas presentan 69,01% de Fe DTT, seguidas por aquellas en guías (68,51% Fe DTT) y finalmente por las diseminadas. Esta diferencia resulta de importancia, pues para leyes de hierro total entre 35-50%Fe, los minerales con textura en guías presentan potencial para la elaboración de pellet feed.

Para el rango de leyes de 23-35%, las menas magnéticas brechosas presentan un Fe DTT de 63,33%, seguidas por las que poseen textura en guías (66,42% Fe DTT) y diseminada (67,57% Fe DTT). Estas últimas podrían representar potencial para elaborar pellet feed, mientras que la brechosa no, ya que la ley de hierro que alcanza el concentrado (Fe DTT) está por debajo del 68% Fe.

Finalmente, para leyes entre 10-23% Fe, se repite el mismo patrón para el Fe DTT que en el rango anterior, pues los valores de Fe DTT más bajos lo alcanza el mineral de magnetita brechoso, seguido del que se encuentra en guías y finalmente el diseminado. No obstante, la diferencia de Fe DTT entre texturas en este rango es menor.

En general, se tiene que las menas brechosas son las que poseen un menor Fe DTT para leyes de hierro superiores a 35%, esto se puede deber al contenido total de hierro que poseen las texturas, pues los minerales magnéticos brechosos poseen un menor porcentaje de hierro total. Para rangos menores a 35% Fe, las menas brechosas, poseen valores de hierro total relativamente similares, no obstante, presentan diferencias significativas en cuanto a la ley de hierro del concentrado (Fe DTT) (Tabla 6.1).

Aun así, en el modelo geológico, las distintas envolventes de isoley e isotextura presentan variaciones en el Fe DTT, en donde, si bien se encuentran sectores en donde se alcanzan valores de Fe DTT sobre 68%, también los hay en donde el Fe DTT es inferior a este valor, por lo cual considerar la textura como un criterio para delimitar zonas del depósito que lleguen a producto, no es del todo correcto, pues aparentemente parece no existir un control entre textura-leyes de hierro y el Fe DTT en rangos inferiores a 35% Fe (Figura 6.24).

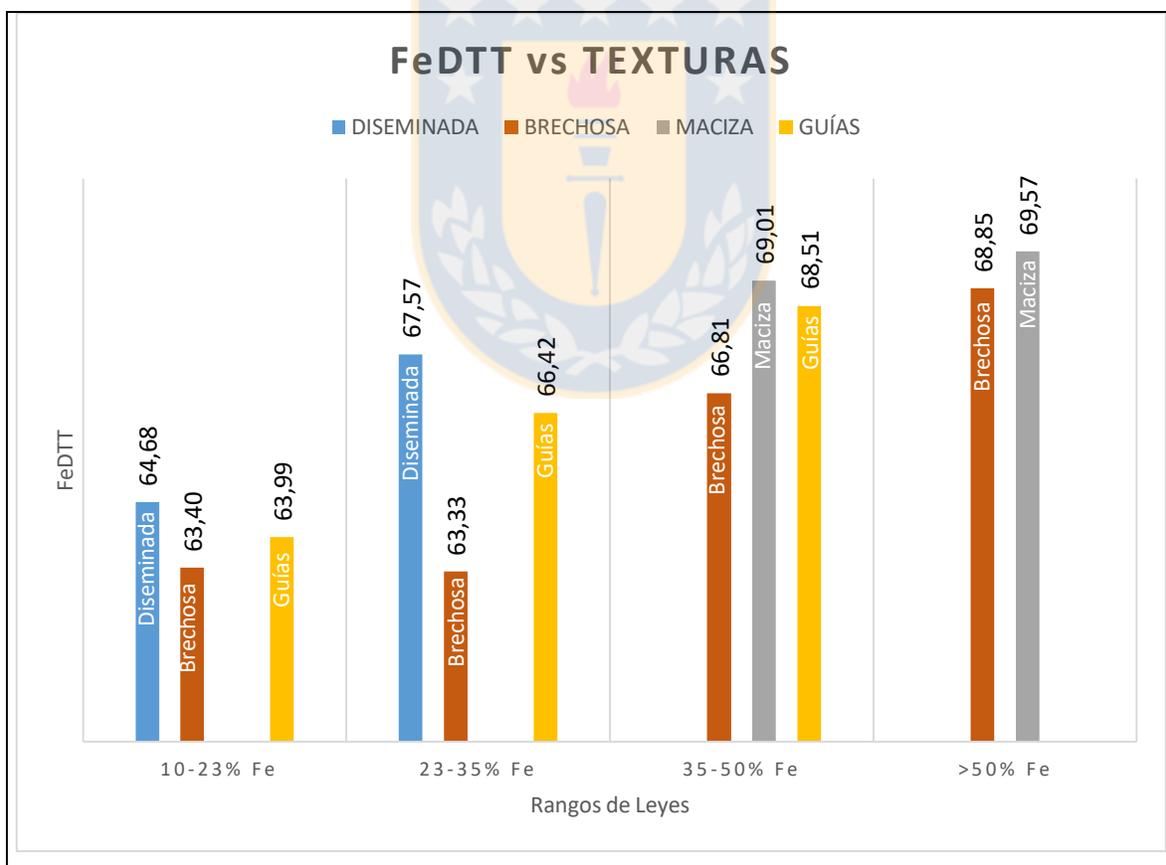


Figura 6.23: FeDTT vs texturas de menas de hierro.

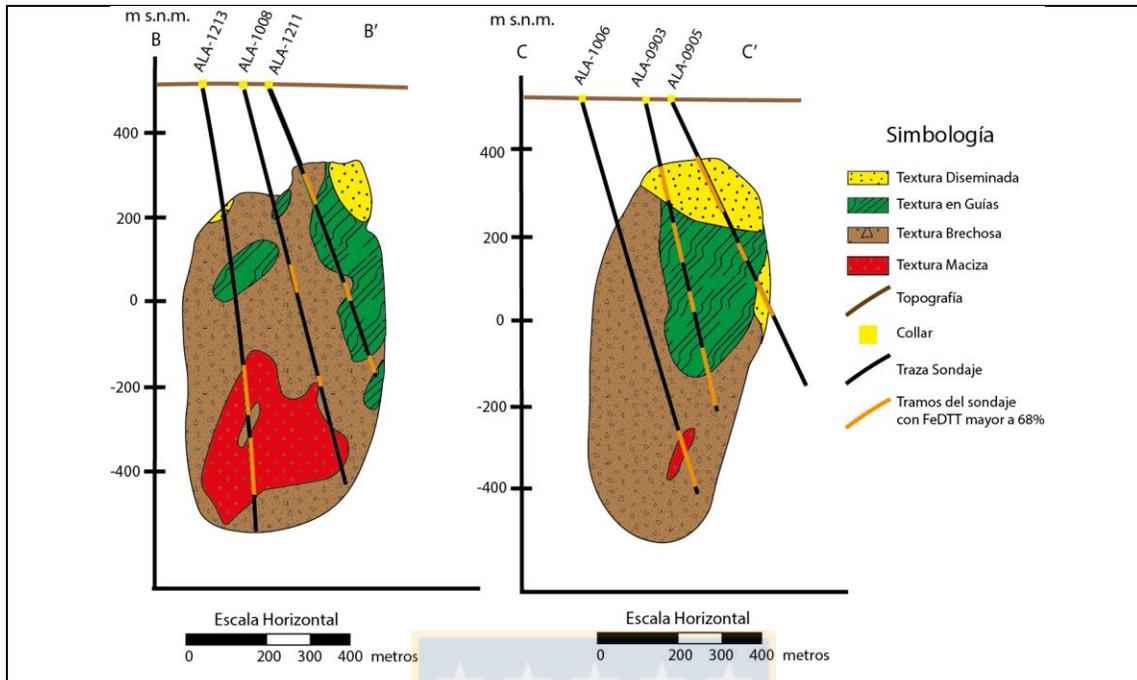


Figura 6.24: Perfiles geológicos de isotextura.

Rango ley de hierro (%Fe)	Textura mena de hierro	% Fe DTT
10-23 Fe	Diseminada	64,68
	Guías	63,99
	Brechosa	63,40
23-35 Fe	Diseminada	67,57
	Guías	66,42
	Brechosa	63,33
35-50 Fe	Guías	68,51
	Brechosa	66,81
	Maciza	69,01
>50 Fe	Brechosa	68,85
	Maciza	69,57

Tabla 6.1: Resumen de % FeDTT de las texturas de las menas de hierro.

Las impurezas reconocidas en el depósito, son similares a las que se encuentran en los depósitos de hierro de la Franja Ferrífera. En el caso del fósforo, para rangos superiores a 35% Fe, este elemento se concentra principalmente en las menas de hierro con textura

brechosa. Para rangos inferiores a 35% Fe, las menas con textura diseminada concentran mayor cantidad de fósforo, seguidas por las brechosas y finalmente por aquellas con textura en guías (Figura 6.25)

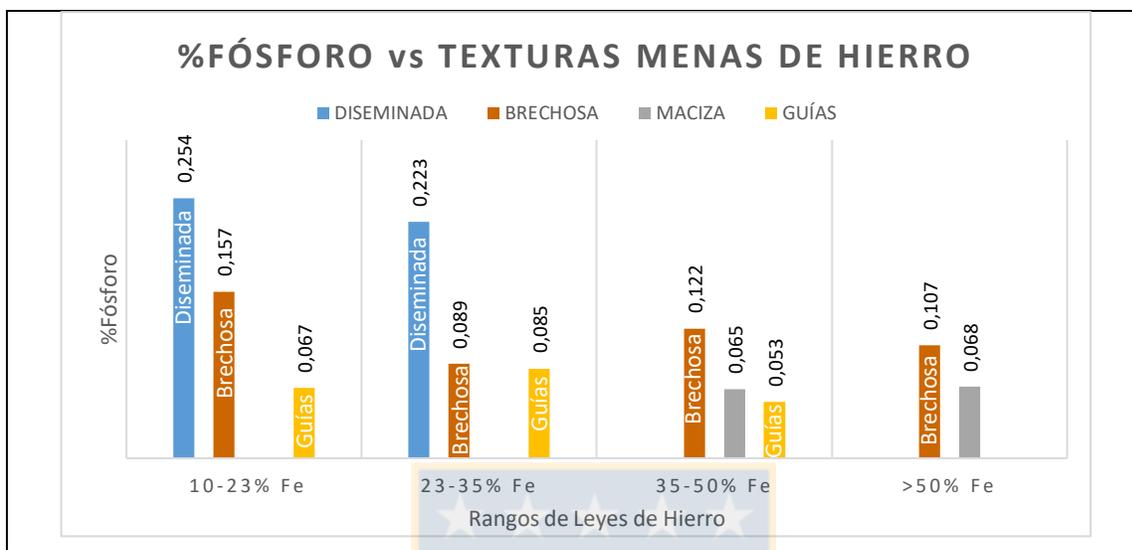


Figura 6.25: Contenido de fósforo sector sur Alcaparra A.

6.5 Volumen y Tonelaje Depósito Alcaparra A

Para el cálculo del volumen del depósito Alcaparra A se utilizó el software Leapfrog Geo 4.4. Para la cubicación realizada con el software se utilizaron cubos de 10x10x10 metros. La densidad se obtuvo a partir de la curva de densidad de Alcaparra A (Mardones y Delgado, 2014) y luego con estos datos fue calculado el tonelaje de cada una de las envolventes.

El volumen obtenido para cada una de las envolventes de ley mineral del depósito se resume en la tabla 1.1.

Rango de Ley de Hierro (%)	Volumen (m ³)	% Fe Promedio	Densidad (g/L)	Tonelaje (Ton)	%Fe DTT
10-23 Fe	127.990.000	20,04	3,029	387.796.855,9	64,52
23-35 Fe	103.791.000	28,22	3,249	337.223.679,7	65,12
35-50 Fe Norte	9.086.000	36,04	3,494	31.743.013,6	68,38
35-50 Fe Sur	15.252.000	38,13	3,565	54.369.986,9	67,91
50Fe Norte	5.873.000	51,87	4,094	24.041.082,8	70,52
50Fe Sur	16.365.000	52,66	4,127	67.540.089,2	69,18
TOTAL	278.357.000			902.714.708,1	

Tabla 6.2: Volumen y tonelaje calculado para las envolventes de ley mineral depósito Alcaparra A.

En el gráfico de la Figura 6.26 muestra que el 46% del material del depósito se concentra en el cuerpo de 10-23% Fe, seguido por el cuerpo de 23-35% Fe con un 37% del volumen, mientras que los cuerpos de alta ley de hierro (sobre 35% Fe) del sector norte y sur conforman entre ambos un 17% del depósito, del cual un 5% es del sector norte y un 12 del sector sur.

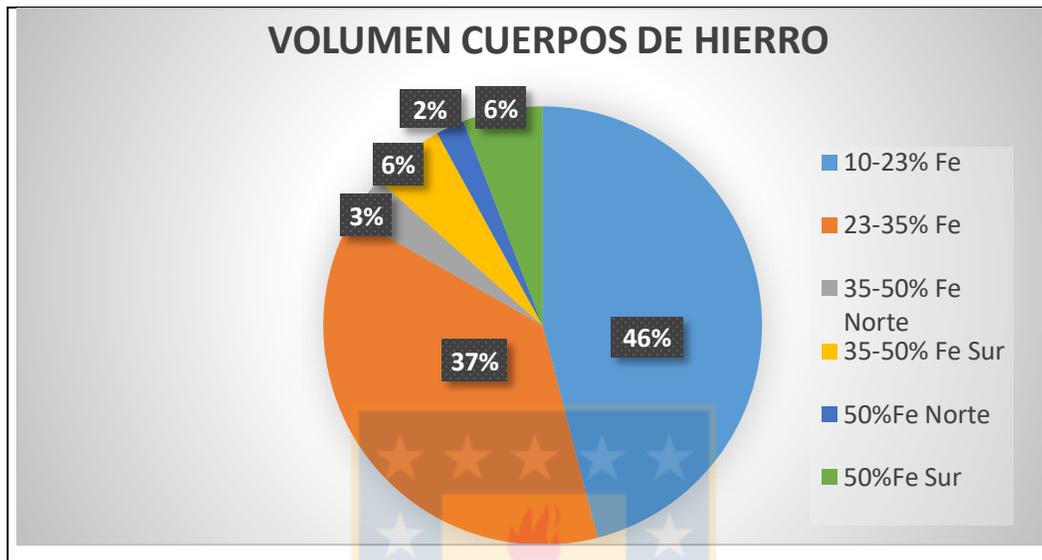


Figura 6.26: Porcentaje ponderado del volumen de las envolventes de isoley Alcaparra A.

Por otro lado, en relación al volumen total del depósito, el sector sur (51%) posee un mayor volumen de mineral de hierro que el sector norte (49%) (Figura 6.27)

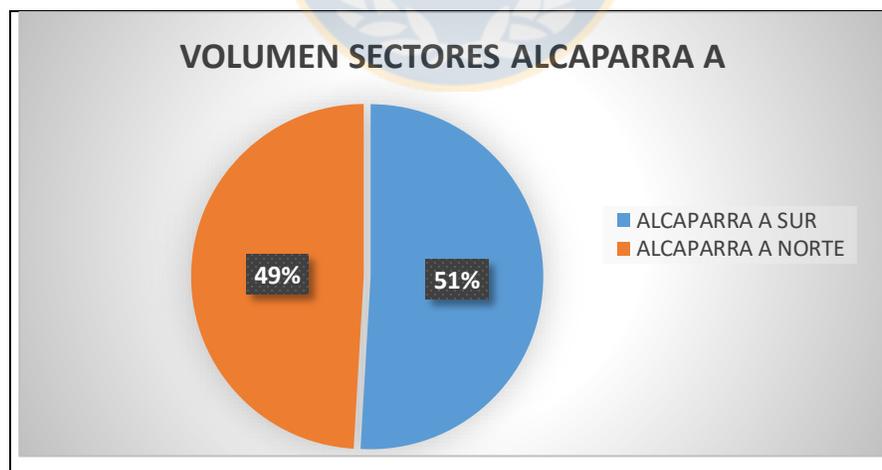


Figura 6.27: Porcentaje en volumen del sector norte y sur de Alcaparra A.

Dada la ausencia de datos de textura, mineralogía y pruebas metalúrgicas de laboratorio del sector norte de Alcaparra A, se realizan envolventes de isotextura y un análisis de leyes de hierro del concentrado sólo para el sector sur del depósito. De esta forma, se llega a que el

55% del volumen total del sector sur se concentra en el cuerpo de ley de hierro entre el 23-35%, seguido por el cuerpo de 10-23% Fe, que representa un 23% del depósito, mientras que el mineral con ley de hierro superior a 35% conforma el 22% del depósito (Figura 6.28).

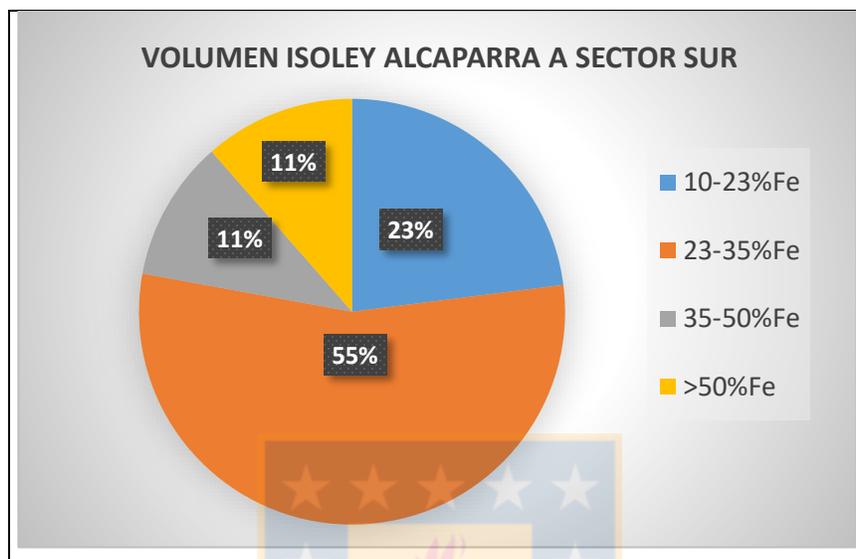


Figura 6.28: Porcentaje ponderado para el volumen de las envolventes del sector sur del depósito

De la misma forma que para el caso de las envolventes de isoleyes, se calcula el volumen de las envolventes de isotextura para cada uno de los rangos de leyes de hierro.

El volumen obtenido para cada una de las envolventes de isotextura del sector sur del depósito se resume en las siguientes tablas.

Rango de Ley de Hierro (%)	Textura	Volumen (m ³)	Ley de Fe Promedio (%)	Densidad (g/L)	Tonelaje (Ton)	%Fe DTT
10-23 Fe	Diseminada	6.606.000	17,95	2,979	19.685.303	63,39
	Brechosa	16.031.000	21,81	3,074	49.281.636	64,69
	Guías	13.643.000	19,43	3,015	41.134.428	63,99
Total		36.280.000			110.101.368	

Tabla 6.3: Volumen y tonelaje calculado para las envolventes de isotextura en el rango 10-23% Fe.

Rango de Ley de Hierro (%)	Textura	Volumen (m ³)	Ley de Fe Promedio (%)	Densidad (g/L)	Tonelaje (Ton)	%Fe DTT
23-35 Fe	Diseminada	6.061.000	28,29	3,251	19.704.928	63,33
	Brechosa	48.464.000	27,16	3,219	155.983.864	67,57
	Guías	24.517.000	29,74	3,294	80.756.990	66,44
Total		79.042.000			256.445.782	

Tabla 6.4: Volumen y tonelaje calculado para las envoltentes de isotextura en el rango 23-35% Fe.

Rango de Ley de Hierro (%)	Textura	Volumen (m ³)	Ley de Fe Promedio (%)	Densidad (g/L)	Tonelaje (Ton)	%Fe DTT
35-50 Fe	Brechosa	11.252.000	33,4	3,407	38.338.138,5	66,81
	Guías	1.105.000	39,48	3,612	3.991.306,5	68,52
	Maciza	2.967.000	49,07	3,977	11.800.268,7	69,01
Total		15.224.000			54.129.713,7	

Tabla 6.5: Volumen y tonelaje calculado para las envoltentes de isotextura en el rango 35-50% Fe.

Rango de Ley de Hierro (%)	Textura	Volumen (m ³)	Ley de Fe Promedio (%)	Densidad (g/L)	Tonelaje (Ton)	%Fe DTT
>50 Fe	Brechosa	7.606.000	47,57	3,917	29.790.138,6	68,85
	Guías	215.000				
	Maciza	8.515.000	55,65	4,258	36.252.529,9	69,57
Total		16.336.000			66.042.668,5	

Tabla 6.6: Volumen y tonelaje calculado para las envoltentes de isotextura en el rango >50% Fe.

En cuanto a la distribución de texturas del depósito Alcaparra A, se tiene que para cada una de las envoltentes de isoley coexisten estilos texturales de las menas de hierro que han sido reconocidos en otros depósitos de la Franja Ferrífera, es decir, que para una envoltente de isoley se pueden encontrar menas de hierro con textura diseminada, brechosa, maciza o en guías, en distinta proporción. En términos generales, se tiene que las menas de hierro de Alcaparra A poseen principalmente textura brechosa, seguidas por aquellas con textura en guías, mientras que las menas con textura maciza y diseminada se encuentran en la misma proporción en volumen en el depósito (Figura 6.29)

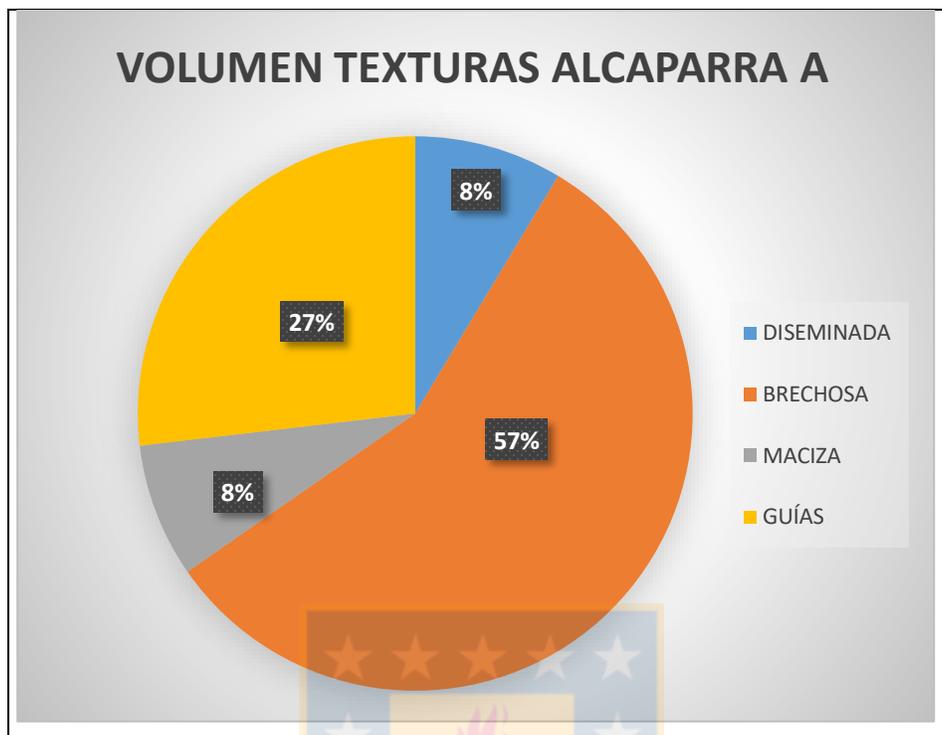


Figura 6.29: Porcentaje ponderado para el volumen de las envolventes de isotextura.

7. DISCUSIÓN

7.1 Generalidades

Los resultados obtenidos en relación a la distribución de las texturas de las menas de hierro en las envolventes de ley mineral, junto a la variabilidad que presentan las leyes de hierro del concentrado (Fe DTT) para cada una de las envolventes de isoley, y más aún, la diferencia que existe en las leyes de hierro del concentrado para cada una de las envolventes de isotextura, son parte de una problemática actual que no está clara en la geología y metalurgia del hierro, pues no se comprenden del todo los impactos que tienen las variables geológicas en los procesos metalúrgicos del hierro.

Relacionar los procesos geológicos que derivan en la formación de depósitos de hierro, referidos a los mecanismos de emplazamiento, geometría del cuerpo, relaciones espaciales de mineralización, distribución de texturas, entre otras, con el impacto que pueden llegar a tener en las plantas metalúrgicas de hierro, es un reto que se debe asumir y estudiar para dar solución a las problemáticas actuales, pues situaciones en yacimientos importantes, como Cerro Negro Norte, en donde el material de hierro no alcanza las leyes de concentrado requeridas (>68% Fe), pueden ser resueltas relacionando la geología del hierro con los procesos realizados en plantas metalúrgicas. Sobre esta base, se discutirán algunos de los aspectos relacionados al origen de Alcaparra A, su relación con otros depósitos de la Franja Ferrífera Cretácica y el impacto que tienen las características petrográficas de la mena de hierro en los procesos metalúrgicos de hierro.

7.1 Mineralización Alcaparra A

El origen de los depósitos de hierro ha sido un tema controversial, pues algunos autores (Bookstrom 1975, 1977; Menard, 1995, Sillitoe y Burrows, 2002) proponen una génesis hidrotermal para estos cuerpos, en donde a partir de un magma rico en hierro son exsuecidos fluidos, que por procesos de metasomatismo, reemplazan a la mineralogía de la roca de caja, formando este tipo de depósitos. Otros autores, en tanto, formulan una génesis magmática, en donde los cuerpos mineralizados de hierro son formados a partir del emplazamiento de un fundido inmiscible rico en hierro (Frutos y Oyarzún, 1975; Nyström y Henríquez, 1994; Naslund y otros, 2002). No obstante, estudios más recientes plantean un origen magmático-hidrotermal para los depósitos de hierro (Knipping y otros, 2015), en el modelo de estos

autores, la magnetita formada a partir de la cristalización del magma rico en hierro, es transportada en forma de complejos clorurados (FeCl_2) y luego re-precipitada como mineral de magnetita. La forma en que el hierro es transportado en este modelo, es similar al observado en los procesos de flotación en las plantas metalúrgicas. Por lo que ante este hecho, esta última hipótesis ha tomado gran importancia y validez en lo que respecta a la geología del hierro. Sin embargo, este modelo, más que explicar el origen de la mineralización, pareciera explicar de mejor forma los mecanismos por los cuales es transportado el hierro.

CAP Minería ha adoptado un modelo geológico magmático, en donde la acción conjunta de una intrusión de un magma rico en hierro, la exsolución de volátiles a partir de este magma y estructuras asociadas al Sistema de Falla de Atacama, serían los responsables de la formación y el emplazamiento de los depósitos de hierro insertos en la Franja Ferrífera Cretácica Chilena. En este modelo, los depósitos de baja ley de hierro, con gran variabilidad de texturas en las menas de hierro y de un carácter más bien hidrotermal, se asocian al emplazamiento de un cuerpo de alta ley de hierro y la posterior exsolución de un gran volumen de volátiles de este cuerpo. En este contexto, alguno de los depósitos de hierro como El Romeral, El Tofo, Cerro Negro Norte, Los Colorados y El Algarrobo, se encuentran geológicamente relacionados con intrusiones calcoalcalinas de composición intermedia (diorita, monzonita), rocas volcánicas continentales de composición andesita a andesita-basalto y a estructuras relacionadas al Sistema de Falla de Atacama.

Además, algunos estudios en el depósito El Laco (Henríquez y Martín, 1978), han demostrado características magmáticas reconocidas en otros depósitos de la Franja Ferrífera Cretácica Chilena. Estas características, referidas a la geoquímica y texturas de las menas de hierro observadas en El Laco, pueden servir como punto de comparación de este yacimiento, de edad Pleistoceno, con otros pertenecientes a la Franja Ferrífera Cretácica.

El caso de Alcaparra A es similar a lo expuesto anteriormente, pues tanto las afinidades químicas, mineralógicas y texturales referidas a las menas de hierro, las ocurrencias de intrusiones magmáticas de composición diorítica, de edad Cretácico inferior, y estructuras de dirección NE-SW relacionadas al Sistema de Falla de Atacama, son compartidas por este depósito con otros insertos en la Franja Ferrífera.

En efecto, el depósito Alcaparra A, presenta dos cuerpos de alta ley de hierro (>50% Fe), que constituyen núcleos de textura maciza-brechosa con orientación NE-SW, separados por al menos 300 metros en la vertical, 750 metros en la horizontal y con magnetita como principal mena de hierro, no obstante, la distribución de impurezas, mineralogía, química y profundidad de emplazamiento entre ambos cuerpos podrían ser sugerentes de una relación genética entre ellos.

El cuerpo de alta ley de hierro del sector sur del depósito se encuentra a 810 m de profundidad, tiene como principal mineral de mena magnetita y reporta ocurrencias leves de calcopirita diseminada y en guías, que se encuentran acompañadas por pirita diseminada. Los análisis químicos indican que los niveles de azufre para este sector se encuentran por debajo del límite de detección, mientras que para concentraciones de fósforo presentan valores del orden de los 0,032-0,118%.

Mientras que el cuerpo de hierro del sector norte está a 530 m de profundidad y presenta exclusivamente magnetita como mena, con ocurrencias leves de pirita y apatita en guías y diseminados, los cuales elevan los valores de azufre y fósforo en este sector.

Las diferencias espaciales y mineralógicas que presentan ambos cuerpos pueden sugerir relaciones genéticas en cuanto a la mineralización del depósito, de esta manera, se propone que ambos cuerpos pueden venir de una cámara magmática parental, en donde coexiste un magma con una fase fundida inmisible rica en hierro, la cual asciende favorecida por estructuras asociadas al Sistema de Falla de Atacama, y que dada la fuerza con la que asciende el cuerpo, este se emplaza en sectores más superficiales del depósito, una vez ahí se liberan volátiles ricos en Fe y otros elementos incompatibles, que producirían mineralización de hierro con características hidrotermales. Esta zona mineralizada presentaría leyes de hierro más bajas y una mayor variabilidad en volumen en las texturas de las menas de hierro. Toda esta serie de eventos queda representada por el cuerpo norte de Alcaparra A.

En cambio, el sector sur de Alcaparra A es interpretado como el segundo evento de mineralización, donde el remanente del fundido rico en hierro que se mantuvo en la cámara magmática después del primer pulso mineralizador, asciende por mecanismos similares al del primer evento, pero con menor fuerza, emplazándose a mayor profundidad que el primer cuerpo.

Esta hipótesis respecto a la mineralización del depósito, podría estar respaldada por la mineralogía de mena que presentan ambos cuerpos, pues en el sector norte se aprecia exclusivamente magnetita con ausencia de calcopirita, lo cual puede indicar características de un magma primitivo y enriquecido principalmente en hierro, mientras que la ocurrencia de calcopirita en el sector sur, daría indicios de un magma más diferenciado que el anterior, con enriquecimiento discreto en elementos incompatibles relacionados al cobre.

En términos regionales, Alcaparra A forma parte del distrito Algarrobo, donde destacan depósitos tipo hierro-apatita como El Algarrobo, Imán y Ojos del Agua, que responden a lineamientos estructurales a nivel regional con orientación NE-SW, asociados al Sistema de Falla de Atacama, y relacionados a eventos de mineralización de hierro. No obstante, en el Distrito Algarrobo también se encuentra el depósito Alcaparra D, que recientemente por medio de isótopos de azufre y relaciones mineralógicas, ha sido interpretado como un cuerpo transicional entre un IOA y un IOCG (Fredes, 2017). La orientación entre Alcaparra A y Alcaparra D indica una tendencia con dirección NW-SE, la que se asocia a estructuras y eventos relacionados a mineralización de cobre.

Al considerar la geología y mineralización de los depósitos pertenecientes al distrito Algarrobo, se tiene que Ojos de Agua es un depósito tipo hierro-apatita que aflora en superficie, que posee leyes de hierro superiores a 60% Fe y que tiene como principal mena mineral de magnetita. Mientras que Alcaparra A, se encuentra a 500 metros de profundidad, es de menor tonelaje que Ojos de Agua y se encuentra dividido en dos núcleos de hierro de alta ley con textura maciza y brechosa, que poseen magnetita como mineral de mena. Finalmente, Alcaparra D, presenta hematita como mena de hierro y calcopirita como mena de cobre, y según estudios recientes, ha sido interpretado como la transición entre un depósito tipo hierro-apatita y uno IOCG.

En definitiva, estos cuerpos mineralizados se encuentran espacialmente relacionados, están insertos dentro de la Franja Ferrífera Cretácica y poseen características geológicas distintivas que los caracterizan y relacionan entre sí, por lo que se podría sugerir una relación genética entre ellos, ya que, podrían derivar de una cámara magmática parental, que albergaría y permitiría la acumulación de magmas enriquecidos en hierro, que posteriormente por medio de estructuras, que facilitarían su ascenso, se emplazaría. Es decir, Ojos de Agua

representaría el primer pulso mineralizador, mientras que Alcaparra A sería parte del remanente de la cámara magmática que posteriormente ascendió, pero que no tuvo la suficiente fuerza para un emplazamiento en superficie, por lo que se encuentra en profundidad. Finalmente, Alcaparra D, representaría la transición entre estos depósitos tipo hierro-apatita y uno de características hidrotermales relacionado a un depósito IOCG.

7.2 Envoltentes Texturales

En relación a la distribución de texturas en los depósitos de hierro pertenecientes a la Franja Ferrífera Cretácica, tradicionalmente se toma una zonación espacial relacionada a las leyes de hierro en el depósito, es decir, que a las menas de hierro de alta ley (>50% Fe) se les asocia textura maciza, a las menas con leyes entre 45-50% Fe textura brechosa y a las menas de baja ley, textura diseminada. Sin embargo, los datos de Alcaparra A muestran que esta relación leyes-textura no se cumple del todo, pues como se vio anteriormente, se reportan ocurrencias de menas de hierro con textura diseminada y leyes superiores a 45% Fe y de menas con textura maciza y brechosa con leyes inferiores a 35% Fe.

En concreto, Alcaparra A presenta rasgos similares a otros depósitos de hierro pertenecientes a la Franja Ferrífera (Los Colorados, El Romeral, El Algarrobo), relacionados a leyes de hierro y texturas de las menas de hierro, pues se aprecian núcleos de alta ley de hierro con textura maciza-brechosa, que gradan a zonas de menor ley de hierro y en donde se encuentra una mayor variabilidad en volumen de las texturas de las menas de hierro.

A partir de leyes de hierro superiores a 35% Fe, las texturas del depósito presentan una ‘homogeneidad’, es decir, que estas son exclusivamente macizas y brechosas, con pequeñas componentes diseminadas y en guías que no son visibles a nivel de modelo geológico. Para la envoltente superior a 50% Fe, la textura de hierro pasa a ser casi exclusivamente maciza, con sectores localizados que presentan textura brechosa. En las envoltentes de hierro inferiores a 35% Fe, se reconoce gran variabilidad en volumen para las texturas de hierro, no existiendo un control ni algún perfil de zonación relacionado a la distribución de leyes, sino que más bien las texturas se encuentran coexistiendo y relacionándose entre sí.

La distribución de texturas para los cuerpos de hierro con leyes superiores a 35% Fe, puede entregar pistas de los procesos por los cuales el cuerpo de hierro se emplaza, ya que la

presencia de un núcleo de alta ley de Fe, con textura maciza-brechosa, se puede asociar a un fundido rico en hierro que se emplaza en profundidad, que habría tenido el suficiente tiempo de enfriamiento para la cristalización de magnetita. Sin embargo, en los bordes del cuerpo de hierro, los cristales de magnetita tendrían menor tamaño, debido a un rápido enfriamiento del fundido al ponerse en contacto con la roca caja, en consecuencia, los cristales de magnetita en este sector poseerían menor tamaño y formas anhedrales a subhedrales. Mientras que en el sector central del cuerpo, en donde el fundido habría tenido un mayor tiempo de cristalización, los cristales de magnetita poseerían mayor tamaño y formas euhedrales a subhedrales. La transición a una zona en donde domina la textura brechosa, sería sugerente de un emplazamiento violento del fundido de hierro con fractura de la roca caja, de esta forma parte del fundido habría aprovechado las fracturas para su emplazamiento y mineralización, generando sectores en donde existen menas de hierro con textura brechosa-maciza.

Para los cuerpos de hierro de leyes inferiores a 35% Fe, la distribución de texturas, aparentemente no sigue un patrón, pues estas se encuentran interrelacionadas y coexistiendo para todo este rango de leyes. No obstante, en este rango, hay una mayor ocurrencia de menas de hierro con textura diseminada, en guías y brechosa, lo cual, a priori, puede sugerir un origen de carácter más hidrotermal. Dicho en otras palabras, luego del emplazamiento del fundido rico en hierro, se exsuelve un gran volumen de volátiles con altas concentraciones de hierro y elementos incompatibles, que por medio de estructuras, fracturas y/o discontinuidades geológicas ascienden, y al ponerse en contacto con la roca caja, producen un reequilibrio en la mineralogía original, generando zonas con minerales estables en estas nuevas condiciones físico químicas llamadas zonas de alteración, las que son evidencia de la acción de procesos hidrotermales. Asimismo, los volátiles exsueルト, transportan hierro en forma de complejos clorurados (FeCl_2), que al ponerse en contacto con la roca caja, sufren una desestabilización físico-química (pH, Eh, temperatura, presión, $f\text{O}_2$, $f\text{S}$) y precipitan mineral de hierro en las porosidades o fracturas de la roca huésped.

7.4 Influencia de la mineralogía en leyes de hierro del concentrado (FeDTT): Caso CNN

En lo referente a la mineralogía del concentrado, en términos de las impurezas y de las especies minerales de hierro presentes, se analiza el caso de una muestra de concentrado de ley 64,52% Fe (Fe DTT) proveniente del Yacimiento Cerro Negro Norte, la cual fue sometida a análisis de mineralogía automatizada QUEMSCAN, para detallar la mineralogía modal de las menas de hierro e impurezas presentes.

En primer lugar, se calculó la ley de hierro de cada especie mineral de hierro presente en el concentrado (Tabla 7.1).

Mineral	Fórmula Química	%Fe en mineral (Estequiometría)	Sistema Cristalográfico
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$	72,36	Cúbico
Hematita	Fe_2O_3	69,94	Trigonal Hexagonal
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$	62,58	Ortorrómico
Limonita	$\text{FeO}(\text{OH}) * n \text{H}_2\text{O}$	52,30	Amorfo
Siderita	FeCO_3	48,20	Trigonal Hexagonal

Tabla 7.1: Ley de hierro, fórmula química y sistema cristalográfico de menas de hierro.

Luego, con la mineralogía modal entregada por el análisis QUEMSCAN, se calcula la ley del concentrado (Tabla 7.2).

Mineral	%Fe Mineral	Mineralogía Modal (%)	% Fe (Mineralogía Modal*%Fe Mineral)/100
Magnetita	72,36	42,02	30,39
Hematita	69,94	24,59	17,19
Goethita	62,58	1,69	1,06
Limonita	52,30	24,77	12,88
Siderita	48,20	6,22	2,99
Impurezas	0	0,71	0
Total Mineralogía		100,00	
		Total (Ley Fe Concentrado)	64,52

Tabla 7.2: Cálculo de ley de hierro mediante estequiometría para muestra CNN.

Al recalcular la ley de hierro del concentrado sin considerar las impurezas, se obtienen los siguientes resultados (Tabla 7.3 y Tabla 7.4).

Mineral	%Fe en el Mineral	Mineralogía Modal (%)	% Fe (Mineralogía Modal*%Fe Mineral)/100
Magnetita	72,36	42,32	30,62
Hematita	69,94	24,76	17,32
Goethita	62,58	1,70	1,07
Limonita	52,30	24,95	12,97
Siderita	48,20	6,27	3,02
Impurezas	0	0	0
Total Mineralogía		100,00	
		Total (Ley Fe Concentrado)	64,99

Tabla 7.3: Cálculo de la ley de hierro del concentrado sin considerar la presencia de impurezas.

Mineral	% Fe Con Impurezas (Mineralogía Modal*%Fe Mineral)/100	% Fe Sin Impurezas (Mineralogía Modal*%Fe Mineral)/100	Diferencia (%Fe Sin impureza - %Fe con impureza)
Magnetita	30,39	30,62	0,220
Hematita	17,19	17,32	0,125
Goethita	1,06	1,07	0,008
Limonita	12,88	12,97	0,094
Siderita	2,99	3,02	0,022
Impurezas	0	0	0
Total (Ley Fe Concentrado)	64,52	64,99	0,469

Tabla 7.4: Diferencia entre leyes de hierro del concentrado para caso con impurezas y sin impurezas.

La diferencia de la ley de hierro para el caso del concentrado libre de impurezas con el que posee impurezas es de apenas un 0,47% Fe, lo que demuestra que, al eliminar las impurezas, el impacto en la ley de concentrado no sería tan alta. Además, el análisis QUEMSCAN revela que cerca de un 32% de las especies minerales de hierro presentes en el concentrado, poseen leyes de hierro mineral por debajo del 63% Fe. En consecuencia, la presencia en esta proporción de estos minerales con baja ley de hierro mineral, disminuiría la ley de hierro del concentrado (Fe DTT). Asimismo, los métodos de concentración del hierro se basan en las propiedades magnéticas del mineral, no obstante, estas especies minerales poseen leve a nulo magnetismo, por lo que se esperaría que estuvieran en proporciones muy bajas en el concentrado o que no estuvieran. Sin embargo, esto no es consistente con los resultados del análisis, pues estos minerales están en una proporción del casi 32% en el concentrado, por lo

que se cree que deben haber sido incorporados producto de una alta intensidad del campo magnético y/o por arrastre de otros minerales de mayor magnetismo. Estudios recientes (García-Martínez y otros, 2011; Song y otros, 2014; López-Valdivieso y otros, 2018) han demostrado que en los procesos de concentración en los tambores magnéticos se generan aglomerados de mineral de hierro, que forman cadenas de mineral que magnetizan y posteriormente incorporan al concentrado minerales que no son susceptibles al magnetismo (minerales diamagnéticos y paramagnéticos) con leyes de hierro mineral bajas, en desmedro de la ley de hierro del concentrado (Fe DTT).

En vista de este análisis, se propone que el impacto de la mineralogía en la ley de hierro del concentrado, en este caso, no tendría tanta relación con las impurezas, sino más bien, con las especies minerales de hierro presentes en el concentrado, pues dependiendo de cuales sean estas y en la proporción que estén, pueden beneficiar o perjudicar los valores del Fe DTT obtenido. No obstante, las variables operacionales referidas a los procesos realizados en la concentración magnética, podrían ser responsables de la incorporación de minerales con baja ley de hierro al concentrado.

7.3 Isoleyes, Isotexturas y Leyes de Concentrado

En términos de mineralización, Alcaparra A presenta una zona con leyes de hierro superiores a 50% Fe, en donde las menas de Fe presentan textura maciza-brechosa, con características afines a un origen magmático, y otra zona de mayor volumen, con leyes de hierro más bajas, con mayor variabilidad en volumen de las menas de hierro y con rasgos geológicos relacionados a mineralización de carácter hidrotermal. En ensayos metalúrgicos de laboratorio (DTT), los cuerpos mineralizados con leyes superiores a 35% Fe, presentan por lo general, un buen comportamiento geometalúrgico, pues alcanzan valores de FeDTT superiores a 68%. Mientras que las menas de hierro con leyes menores a 35% Fe no presentan un comportamiento definido en las pruebas metalúrgicas de laboratorio, ya que hay muestras que llegan y que no llegan a producto (Fe DTT superior a 68%).

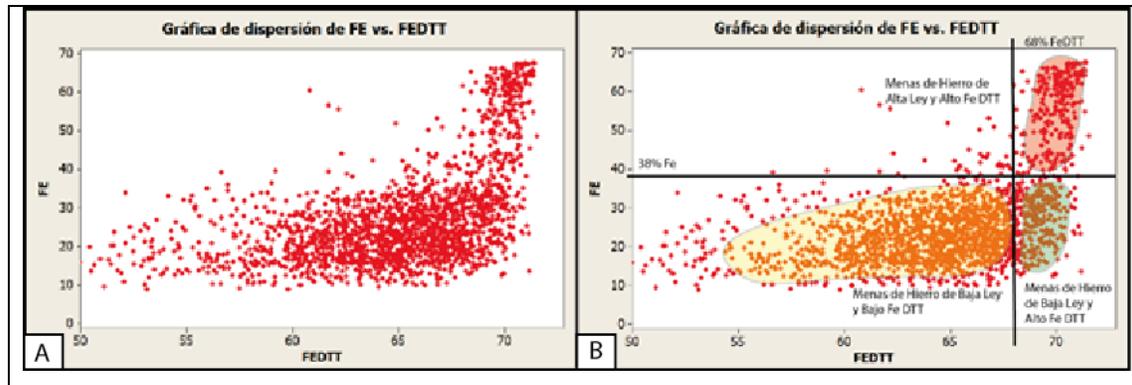


Figura 7.1: Gráfico de dispersión Fe vs Fe DTT. A: Gráfico de dispersión. En la lámina B, son separadas las muestras en grupos de ‘Menas de Baja Ley’ y ‘Alta Ley’.

De esta forma, en función del comportamiento geometalúrgico que tienen las menas de hierro en los ensayos de laboratorio, se hace la diferencia entre menas de ‘Alta Ley’, para las que poseen contenidos de hierro superiores a 35-40% Fe y que alcanzan Fe DTT superior a 68%, y en menas de ‘Baja Ley’, para las que poseen leyes de hierro inferiores a 35-40% Fe y que no aseguran leyes de concentrado que lleguen a producto.

Como se vio anteriormente, las menas de ‘baja ley’ conforman cerca de un 80% del volumen del depósito Alcaparra A, por lo que resulta importante entender el comportamiento geometalúrgico que tendrá este material en las plantas concentradoras y relacionar esto a variables y características geológicas de la mena de hierro.

De esta forma, al analizar la ocurrencia de las texturas que presentan las menas de hierro en el gráfico de dispersión Fe vs Fe DTT, se observa que para las menas de ‘baja ley’, las texturas se encuentran coexistiendo en distinta proporción y tienen poca correlación con el Fe DTT, mientras que las menas de ‘Alta Ley’ presentan principalmente textura maciza y brechosa, con una pequeña componente textural diseminada y en guías. Entonces, para las menas de ‘Baja Ley’, la relación con la textura no sería un indicador para predecir el comportamiento del material de hierro en las plantas metalúrgicas, pues no hay una buena correlación entre textura-leyes de hierro y Fe DTT. Para las menas de ‘Alta ley’, hay una buena correlación entre ley mineral-textura y Fe DTT, pues las menas de hierro con leyes sobre 35% Fe con textura maciza y brechosa llegan a producto. Aun así, se reportan ocurrencias de menas con textura diseminada para este rango de leyes que también llegan a producto (figura 7.2).

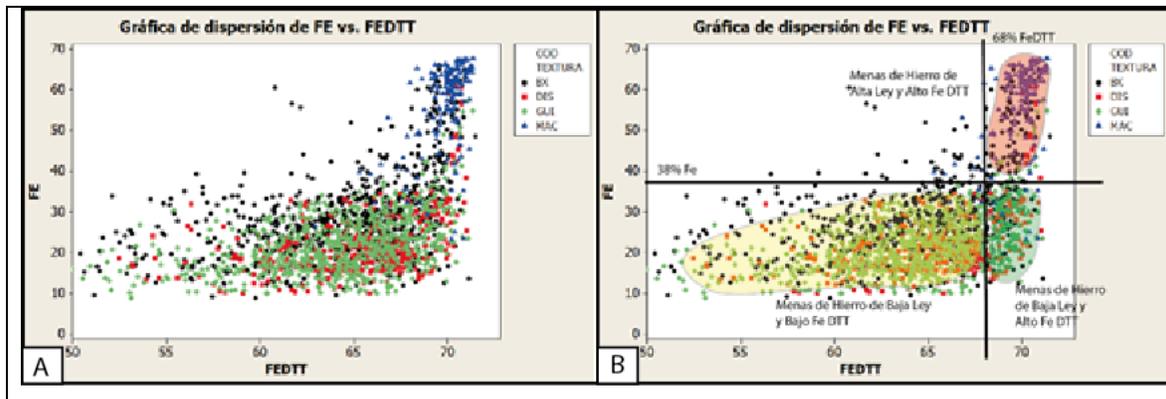


Figura 7.2: Gráfico de dispersión Fe vs FeDTT, agrupado en texturas. En la lámina de la Figura A, se observa el gráfico de dispersión Fe vs Fe DTT, con texturas de menas de hierro. En la lámina B, son separadas las muestras en grupos de ‘Menas de Baja Ley’ y ‘Alta Ley’.

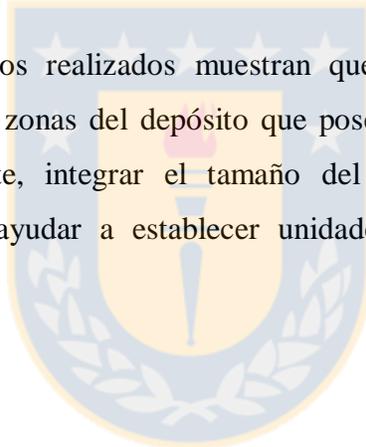


8. CONCLUSIONES

1. El análisis estadístico de las leyes de Alcaparra A, indican que este depósito posee una distribución estadística Log normal para sus leyes de hierro, la que es similar a otros depósitos estudiados y reconocidos por CAP Minería en la Franja Ferrífera Cretácica.
2. Alcaparra A es parte del distrito Algarrobo, en donde se incluyen los depósitos Ojos de Agua, Domeyko, Alcaparra D y Algarrobo, los que a su vez, forman parte de la Franja Ferrífera Cretácica. En relación a estos depósitos, Alcaparra A presenta una orientación en dirección NW-SE con Ojos de Agua y Algarrobo, la que se asocia a eventos mineralizadores de hierro. Mientras que con Alcaparra D, posee una orientación en dirección NE-SW, la que se asocia a eventos mineralizadores relacionados al cobre.
3. El modelo geológico adoptado por CAP Minería para la formación de los depósitos de hierro corresponde a uno magmático, en donde, a partir de un magma enriquecido en volátiles y/o la interacción con fluidos residuales, se generan yacimientos de magnetita-hematita. En vista de la edad de los depósitos y su ubicación geográfica, la génesis de la Franja Ferrífera está ligada al Sistema de Falla de Atacama y a intrusiones magmáticas calcoalcalinas de composición intermedia durante el Cretácico Inferior. Asociadas a estas zonas magmáticas, se desarrollaron extensas zonas de alteración hidrotermal de baja ley de hierro, las cuales presentan algunos núcleos menores de alta ley.
4. El Depósito Alcaparra A, se caracteriza por poseer dos cuerpos de hierro con leyes superiores a 50% Fe, que no afloran en superficie y que se encuentran separados tanto en la horizontal como en la vertical y que, se presume, representan eventos mineralizadores cronológicamente distintos, pero relacionados a una misma cámara magmática parental. A raíz de la distribución espacial de los cuerpos de hierro, estos se separan en Alcaparra Norte y Alcaparra Sur.

5. Las distintas texturas para las menas de hierro reconocidas en Alcaparra A y en el resto de los depósitos de hierro de la Franja Ferrífera Cretácica, se encuentran coexistiendo en distinta proporción en volumen para los diferentes rangos de leyes de hierro.
6. A partir de lo anterior, se reporta la ocurrencia de menas de hierro con textura diseminada, que poseen leyes superiores a 40% Fe, y que alcanzan incluso un mayor FeDTT que las menas de hierro con textura maciza, brechosa y en guías.
7. Las impurezas reconocidas en Alcaparra A corresponden a azufre y fósforo, las cuales se concentran, principalmente, en las menas de hierro con textura brechosa, las que además presentan bajos valores de Fe DTT y recuperación en peso.
8. La ausencia de ensayos metalúrgicos de laboratorio (DTT) para el cuerpo norte, no permite poder establecer algún tipo de diferencia para tratar el cuerpo sur y norte como unidades geometalúrgicas distintas.
9. El análisis del concentrado de hierro proveniente del Yacimiento Cerro Negro Norte, evidencia que el contenido de impurezas (azufre, aluminio, sílice, fósforo) no tiene mayor influencia en las leyes de hierro que alcance el concentrado, pues al calcular la ley de hierro que este alcanza, en el supuesto de que el concentrado quede libre de impurezas, aumenta en apenas un 0,47% Fe.
10. Además, en el mismo concentrado, cerca de un 32% de las especies minerales de hierro corresponden a limonita, goethita y siderita, las que poseen una ley mineral de hierro inferior a 63% Fe y un magnetismo leve a moderado. En consecuencia, la incorporación de estos minerales en dicha proporción disminuiría la ley que alcanza el concentrado.

11. La presencia de material fino en los procesos de concentración en tambores magnéticos permite la formación de aglomerados de mineral, que arrastran y magnetizan mineral de bajo magnetismo (y baja ley mineral de hierro) que es incorporado al concentrado, en desmedro de las leyes de hierro que este alcanza.
12. En relación a lo anterior y, considerando que el cuerpo macizo de hierro se comporta similar a un magma al momento de su emplazamiento, se esperaría que en los bordes de este cuerpo los cristales de magnetita tuvieran un tamaño de grano más pequeño en comparación a las zonas centrales del cuerpo de hierro. Estos sectores de grano fino serían más susceptibles a generar material fino en etapas de chancado y molienda, el cual al ser incorporado a los tambores magnéticos en etapas de concentración, favorecería a la formación de aglomerados minerales.
13. Los modelos geológicos realizados muestran que las envolventes de isoley e isotextura no aseguran zonas del depósito que posean características metalúrgicas distintivas, no obstante, integrar el tamaño del cristal de magnetita a nivel microscópico, podría ayudar a establecer unidades geometalúrgicas dentro del depósito.



9. RECOMENDACIONES

- Robustecer los modelos geológicos de isoleyes con observaciones referidas a características geológicas de las menas de hierro como la mineralogía, granulometría, forma de los cristales de la mena, por medio de técnicas analíticas como microscopía óptica, QUEMSCAN o difracción de rayos x.
- Verificar si las pruebas metalúrgicas de laboratorio (DTT), son buenos indicadores del potencial económico que puede tener el mineral de hierro que hay en un depósito. De manera de buscar otros métodos integrados, que ayuden a asegurar la obtención de material con las características geometalúrgicas idóneas para la producción.
- Realizar planes de extracción en base al comportamiento geometalúrgico que posean las unidades geológicas, ya que esto ayudaría a disminuir los riesgos operacionales en planta.
- Crear un equipo conformado por metalurgistas y geólogos para integrar la perspectiva de ambas disciplinas y así dar solución a problemáticas similares a las ocurridas en Cerro Negro Norte. Además, este equipo estaría encargado de desarrollar planes de explotación según el comportamiento geometalúrgico del material, logrando una mayor sustentabilidad del recurso explotado.
- Desarrollar estudios que permitan realizar extracción subterránea, pues al igual que Alcaparra A, existen depósitos como Chupete o Boquerón Chañar, que se encuentran en profundidad y que presentan potencial económico si llegasen a ser explotados.

10. REFERENCIAS

ARÉVALO, C.; GROCOTT, J. & WELKNER, D. 2003. The Atacama Fault System in the Huasco Province, Southern Atacama Desert, Chile. Congreso Geológico Chileno N° 10. Concepción.

ARÉVALO, C.; MOURGUES, F.A. & CHÁVEZ, R. 2009. Geología del Área Vallenar-Domeyko, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 120: 64 pp., Santiago.

ARÉVALO, C.; WELKNER, D. 2008. Geología del Área Carrizal Bajo-Chacritas, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 111: 50 pp., Santiago.

BOOKSTROM, A. 1977. Magnetite deposits of El Romeral, Chile. *Economic Geology*. Vol. **72**: 1101-1130.

BOOKSTROM, A. 1995. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: ore textures and magnetite geochemistry-a discussion. *Economic Geology*. Vol. **90**: 469-473.

BROWN, M.; DÍAZ, F. & GROCOTT, J. 1993. Displacement History of the Atacama Fault System, 25°00'S 27°00'S, Northern Chile. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. **105**: 1165-1174.

CUADRA, W. 2014. Certificación de la Información Base para la Estimación de los Recursos Geológicos del Yacimiento Alcaparra A. Informe técnico interno CAP Minería (Inédito): 80 pp., Vallenar.

ESPINOZA, S. 1990. The Atacama-Coquimbo Ferriferous Belt, Northern Chile. Stratabound Ore Deposits in the Andes. Special Publication N° 7. *Society for Geology Applied to Mineral Deposits*. Vol **8**: 353-364. Berlín.

FORTÍN, H. 2013. Geología Sector Alcaparra-Ojos de Agua. Reporte técnico interno CAP Minería (Inédito): 90 pp., La Serena.

FREDES, M.J. 2017. Geología del Prospecto IOCG Alcaparra D, Comuna de Huasco, Región de Atacama. Memoria para optar a Título de Geóloga (Inédito). Universidad de Chile. 80 pp., Santiago.

FRUTOS, J. & OYARZÚN, J. 1984. Tectonic and petrological frame of the Cretaceous iron deposits of north Chile. *Mining Geology*. Vol **34**: 21- 31.

GARCÍA, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. Simposio sobre el Geosinclinal Andino. Sociedad Geológica de Chile N° 3, 138 pp. Santiago.

GIPSON, M.; TAYLOR, G.K. & GROCCOTT, J. 2003. New palaeomagnetic results and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology from the Vallenar region (29°S), N. Chile. General Assembly of the European Geophysical Society, N° 27. Nice, France.

HENRÍQUEZ, F. & MARTIN, R. 1978: Crystal growth textures in magnetite flows and feeder dykes, El Laco, Chile. *Canadian Mineralogist*. Vol. **16**: 581-589.

HOFFSTETTER, R.; FUENZALIDA, H. & CECIONI, G. 1957. Lexique Stratigraphique International Amérique Latine. Centre National de la Recherche Scientifique Vol. 5 (7): 444 pp. Paris.

KNIPPING, J.L.; BILENKER, L.; SIMON, A.; REICH, M.; BARRA, F.; DEDITIUS, A.; LUNDSTROM, C.; BINDEMAN, I. & MUNIZAGA, R. 2015. Giant Kiruna-type deposits form by efficient flotation of magmatic magnetite suspensions. *Society of Economy Geology*, Vol. **43**, 591-594.

LAMBERG, P.; ROSENKRANZ, J.; WANHAINEN, C.; LUND, C.; MINZ, F.; MWANGA, A. & AMIRI PARIAN, M. 2013. Building a Geometallurgical Model in Iron Ores using a Mineralogical Approach with Liberation Data.

LUND, C.; LAMBERG, P. & LINDBERG, T. 2013. Practical way to quantify minerals from chemical assays at Malmberget iron ore operations – An important tool for the geometallurgical program. *Minerals Engineering*. Vol. **49**: 7-16.

MATTHEWS, S.; CORNEJO, P. & RIQUELME, R. 2006. Carta Inca de Oro, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 102: 72 pp., Santiago.

MÉNARD, J. 1986. Un modèle métasomatique pour les gisements de la Ceinture de fer du Chili. Académie de Sciences Comptes Rendus des Séances. Vol. **302**: 775-778.

MORTIMER, C. 1973. The Cenozoic history of the Southern Atacama Desert, Chile. *Journal of Geological Society of London*. Vol. **129**: 505-526.

MOSCOSO, R.; NASI, C. & SALINAS, P. 1982. Hoja Vallenar y Parte Norte de La Serena, Regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile 55: 100 pp., Santiago.

NASLUND, H.R., HENRIQUEZ, F., NYSTRÖM, J.O., VIVALLO, W. & DOBBS, F.M. 2002. Magmatic Iron Ores and Associated Mineralisation: Examples from the Chilean High Andes and Coastal Cordillera. PGC Publishing. Vol. **2**: 207-226.

NYSTRÖM, J.O. & HENRÍQUEZ, F. 1995. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: ore textures and magnetite geochemistry-a reply. *Economic Geology*. Vol. **90**: 473-475.

NYSTRÖM J. O. & HENRÍQUEZ F. 1994. Magmatic features of iron ores of the Kiruna-type in Chile and Sweden: ore textures and magnetite geochemistry. *Economic Geology*. Vol. **89**: 820–839.

SEGERSTROM, K. 1968. Geología de las Hojas de Copiapó y Ojos del Salado. Instituto de Investigaciones Geológicas. Bol. N° 24. Santiago. Chile.

SEGERSTROM, K. & RUIZ, C. 1962. Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 6: 115 pp., Santiago.

SILLITOE, R.H. & BURROWS, D.R. 2002, New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, northern Chile. *Economic Geology*. Vol. **97**: 1101–1109

SOTO, J. 1977. Algunos aspectos de las características magnéticas de los minerales en la evaluación de los depósitos de hierro. Reporte interno CAP Minería (Inédito): 50 pp., La Serena.

VALENZUELA, J. 2002. Caracterización, geocronología y mecanismos de emplazamiento del Batolito de la Costa en Vallenar (28°22'-28°41'S y 70°45'-71°7'W), III Región, Chile. Memoria para Optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción. Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito). 118 pp., Concepción.

VIVALLO, W.; ESPINOZA, S. & HENRÍQUEZ, F. 1994. Geología y Mineralización del Distrito Ferrífero Cerro Imán, Copiapó, Chile. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **21**: 197-212.

WELKNER, D.; ARÉVALO, C. & GODOY, E. 2006. Geología del Área Freirina-El Morado, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 100: 50 pp., Santiago.