

Pontificia Universidad Catolica de Chile

Escuela de Ingenieria

## GÉNESIS DE DEPÓSITOS MINERALES DE Cu Y Au DE LA FRANJA METALOGÉNICA CRETÁCICA DE CHILE CENTRAL: DISTRITO MINERO TILTIL

### **ROCIO AMNERIS RUDLOFF DEL VILLAR**

Tesis para optar al grado de

Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:

### **CARLOS MARQUARDT ROMÁN**

Santiago de Chile, Septiembre de 2021

© 2020, Rocio Rudloff Del Villar



Pontificia Universidad Catolica de Chile

Escuela de Ingenieria

## GÉNESIS DE DEPÓSITOS MINERALES DE Cu Y Au DE LA FRANJA METALOGÉNICA CRETÁCICA DE CHILE CENTRAL: DISTRITO MINERO TILTIL

### **ROCIO AMNERIS RUDLOFF DEL VILLAR**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**CARLOS MARQUARDT** PEDRO CORDEIRO Jest Liperodeiro JOSÉ JOAQUÍN JARA ANDRÉS PAVÉZ **CRISTIÁN TEJOS** Justice lego flung

Para completar las exigencias del grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Septiembre de 2021

A mi sobrino León y sobrina Olivia, ojalá en sus vidas nunca falte la geociencias y el valor por la naturaleza que nos rodea

#### AGRADECIMIENTOS

A mis padres Mauricio Rudloff y Maria Luisa Del Villar por darme el apoyo necesario durante toda la etapa universitaria y magister e incentivar a cumplir mis metas y sueños, sin ellos esto no hubiera sido posible. A mi hermano y cuñada, Ignacio Rudloff y María Angélica Bálmaceda, por darme la mejor energía en el proceso final de este trabajo trayendo al mundo al mejor sobrino y ahijado León y la próxima que viene en camino. Agradezco sobre todo el soporte que tuvieron frente a todo el proceso final que fue esta etapa.

A mis geo-amigas maravillosas Macarena Morgado, Pamela Sepúlveda y Rocío Núñez y amigos Felipe Benimelis, Gonzalo Castro y Giovanni Osses por hacer que esta etapa universitaria pasara un poco más rápido de lo que fue, por compartir nuestro amor por la geociencias que hizo que viviéramos experiencias inolvidables en terreno, paseos y jornadas de estudio. A mis grandes amigas de la infancia y colegio Marcela Vidal, Karina Flores, Isidora Gutierrez, Rocío Gómez, Gabriela Zavala y Belén Rozas porque aunque nunca han entendido lo que hago y estudio siempre han estado ahí en las buenas y en las malas, apoyándome y motivándome para no caer. A mi partner de la vida Alonso Matamoros por compartir este gustito por el planeta tierra desde distintos enfoques y por siempre confiar e incentivar mis capacidades más que yo misma.

A mi profesor supervisor Carlos Marquardt, por guiarme de la mejor forma posible, por la confianza, optimismo y sabiduría que me entregó en todo este proceso, siempre incentivando a ir más allá de mis capacidades e inspirando el verdadero porqué de esta investigación y de la geociencias. A los profesores integrantes de la comisión Andrés Pavez por todas las discusiones y conversaciones que ayudaron a mejorar este trabajo, y a Pedro Cordeiro y José Joaquín Jara por todos sus consejos y apoyo al ser parte de esta investigación.

A mis compañeros, colegas y profesores, por acompañarme a terreno y/o ser partes del gran proceso de aprendizaje de esta investigación, Hector Ramos, Dominique Vadivia, Nicolás Bustos, Felipe del Valle, José Cembrano, Javiera Salazar, Tomás Swaneck, Juan Carlos Marquardt, Sebastián Molina, Felix del Pozo, Patricio Faundez, Matías Clunes, Pamela Supúlveda y Felipe Benimelis. Al grupo de Geociencias, Departamento de Minería y Laboratorio de microscopía (Julio Díaz y Maurcicio Ureta) por darme un espacio de trabajo y las herramientas necesarias para hacer este trabajo posible.

Al proyecto FIC-Regional Metropolitano 2017 (N°10) que facilitó e hizo posible el desarrollo de esta investigación con el propósito de fomentar el desarrollo sustentable de la pequeña minería. A los mineros de Tiltil por facilitar el ingreso a sus propiedades Eduardo Tobar, Rosamel Gozález, Julio Contreras, Jorge Jofré y Jorge Geldres.

### **INDICE GENERAL**

Pág.
DEDICATORIAiii
AGRADECIMIENTOSiv
INDICE DE TABLASxi
INDICE DE FIGURAS xii
RESUMENxiv
ABSTRACTxv
1. Introducción1
1.1. Planteamiento del Problema1
1.1.1. Antecedentes generales1
1.1.2. Vacío del Conocimiento
1.1.3. Problema y Relevancia
1.1.4. Pregunta de Investigación4
1.1.5. Caso de Estudio4
1.1.6. Aporte de trabajo7
1.2. Hipótesis7
1.3. Objetivos
1.4. Metodologías8
1.4.1. Revisión Bibliográfica de Estudios realizados en la zona de estudio8

		1.4.2.	Realización de Mapa Geológico-Estructural de superficie de Distrito Tilt	il
			a escala 1:25.000 y Mapas Geológico-Estructurales de detalle de	4
			yacimientos	9
		1.4.3.	Realización de campaña de sondajes y posterior caracterización de ellos.	9
		1.4.4.	Análisis petrográfico y calcográfico de muestras obtenidas de superficie	у
			de sondajes1	1
		1.4.5.	Análisis de estructuras distrital1	1
		1.4.6.	Análisis geoquímico: ICP-MS de muestras obtenidas de superficie y d	le
			sondajes1	3
		1.4.7.	Realización de tablas paragenéticas1	3
		1.4.8.	Realización de Modelos 3D de los yacimientos descritos: Softwar	e
			Leapfrog1	4
2.	Marc	o Tectó	nico y Metalogénico1	5
	2.1.	Modelo	os de Yacimientos1	7
3.	2.1. Geol	Modelo ogía Dis	os de Yacimientos1 strital2	7 3
3.	<ul><li>2.1.</li><li>Geol</li><li>3.1.</li></ul>	Modelo ogía Dis Unidad	os de Yacimientos	7 .3 3
3.	<ol> <li>2.1.</li> <li>Geol</li> <li>3.1.</li> <li>3.2.</li> </ol>	Modelo ogía Dis Unidad Unidad	os de Yacimientos	7 .3 .3
3.	<ol> <li>2.1.</li> <li>Geol</li> <li>3.1.</li> <li>3.2.</li> <li>3.3.</li> </ol>	Modelo ogía Dis Unidad Unidad Unidad	os de Yacimientos	7 .3 .3 .5 6
3.	<ol> <li>2.1.</li> <li>Geol</li> <li>3.1.</li> <li>3.2.</li> <li>3.3.</li> <li>Geol</li> </ol>	Modelo ogía Dis Unidad Unidad Unidad ogía Est	os de Yacimientos	7 .3 .5 .5 0
3.	<ol> <li>2.1.</li> <li>Geol</li> <li>3.1.</li> <li>3.2.</li> <li>3.3.</li> <li>Geol</li> <li>4.1.</li> </ol>	Modelo ogía Dis Unidad Unidad Ogía Est Estruct	os de Yacimientos	7 3 .3 .5 .6 0 0
3.	<ol> <li>2.1.</li> <li>Geol</li> <li>3.1.</li> <li>3.2.</li> <li>3.3.</li> <li>Geol</li> <li>4.1.</li> <li>4.2.</li> </ol>	Modelo ogía Dis Unidad Unidad Ogía Est Estruct Estruct	os de Yacimientos	7 3 .3 .5 0 0 2

5.	Alter	ación y Mineralización Magmática-Hidrotermal40
	5.1.	Depósitos en Vetas: Mina El Huracán41
	5.2.	Depósitos en Brechas Tardimagmáticas-Hidrotermales: Mina San Aurelio49
	5.3.	Depósitos en Zonas Miloníticas: Mina La Despreciada54
	5.4.	Depósitos en Mantos: Mina Cóndor
6.	Discu	usiones64
	6.1.	Eventos de deformación y regímenes tectónicos relacionados
	6.2.	Eventos de alteración y mineralización65
	6.3.	Modelos de yacimientos
7.	Conc	lusiones73
BIBI	LIOGR	AFIA74
8.	AN	E X O S
Anex	ko A: T	Cabla de Descripción de cortes transparentes y pulidos
Anex	ko B: T	abla de análisis de anomalías geoquímicas91
Anex	to C-1:	Tabla de mapeo de sondajes: Litologías96
Anex	ko C-2:	Tabla de mapeo de sondajes: Alteraciones101
Anex	ko C-3:	Tabla de mapeo de sondajes: Mineralización105
Anex	ko C-4:	Tabla de mapeo de sondajes: Vetillas110
Anex	to C-5:	Tabla de mapeo de sondajes: Estructuras114

Anex	to D: 1	Publicación: Genesis of Cu and Au deposits in the Cretaceous belt of Central Chile:
	Tilti	1 Mining District
Abst	ract	120
Resu	men	121
I.	Intro	oduction122
II.	Dist	rict-scale Geology125
	a)	Stratigraphic Units: Western flank of the lower Lower Cretaceous (Kib)125
	b)	Stratigraphic Units: Eastern flank of the upper Lower Cretaceous (Kia)127
	c)	Intrusive Units: central flank of the middle Cretaceous (Km)128
	d)	Major structures
	e)	Secondary structures
	a)	Chronology of deformation
III.	Mag	matic-hydrotermal alteration and mineralization139
	a)	Deposits in veins: El Huracan mine140
	b)	Deposits in late magmatic-hydrotermal breccias: The San Aurelio mine148
	c)	Deposits in mylonitic areas: La Despreciada mine154
	d)	Deposits in stratiform bodies: the Condor mine158
IV.	Disc	cussion161
	a)	Deformation events and related tectonic regimes161
	b)	Alteration and mineralization events

	c) Theorical metallogenic models	164
V.	Conclusions	169
Ackn	owledgments	171
Refer	ences	172

#### **INDICE DE TABLAS**

Pág.

Tabla I-1: Ubicación y orientación de sondajes de Distrito Tiltil	10
Tabla IV-1: Mediciones de rumbo y manteos preferencial y densidad de dato estratificación para las unidades Kia y Kib.	os de planos de 31
Tabla IV-2: Mediciones de rumbo preferencial y dirección de acortamient estructura y sector.	to por tipo de 36
Tabla V-1: Paragénesis Mina El Huracán	47
Tabla V-2: Paragénesis Mina San Aurelio	53
Tabla V-3: Paragénesis Mina La Despreciada	58

#### **INDICE DE FIGURAS**

Pág.

Figura 1-1: Distribución de las franjas metalogénicas y principales yacimientos del Jurásico al Paleoceno-Eoceno Inferior
Figura 1-2: Análisis de sentidos de acortamiento por tipo de estructura12
Figura 2-1: Modelo esquemático que ilustra la evolución tectono-magmática del margen del Norte-Centro de Chile entre los 25° y los 34°S durante el Cretácico hasta la actualidad
Figura 2-2: Modelo conceptual de modelo de yacimiento tipo IOCG,
Figura 2-3: Modelo conceptual de modelo de yacimiento tipo Estratoligado de Cu-(Ag)21
Figura 3-1: Mapa de litologías y estructuras mayores del Distrito Minero Tiltil, escala de mapeo 1:25.000
Figura 4-1: Mapa de litologías y estructuras del Distrito Minero Tiltil
Figura 4-2: Imágenes de relación de corte entre estructuras
Figura 5-1: Mapa Geológico y Modelo 3D de la Mina El Huracán44
Figura 5-2: Imágenes de cortes transparentes, cortes pulidos y muestras de sondajes de la Mina El Huracán
Figura 5-3: Imágenes de cortes transparentes y pulidos y muestras macroscópicas de sondajes de sector El Huracán47
Figura 5-4: Mapa Geológico y sección de Modelo 3D de Mina San Aurelio51
Figura 5-5: Imágenes de cortes transparentes, cortes pulidos y muestras de sondajes de la Mina San Aurelio

Figura 5-6: Mapa Geológico y sección de Modelo 3D de Mina La Despreciada56
Figura 5-7: Imágenes de corte transparente y pulido y muestra macroscópica de sondaje de sector La Despreciada
Figura 5-8: Mapa Geológico y Modelo 3D de mantos de la Mina Cóndor61
Figura 5-9: Imágenes de terreno en sector Cóndor62
Figura 5-10: Microfotografía de corte transparente de sondaje de sector Cóndor63
Figura 6-1: Modelo esquemático de cuerpos mineralizados estudiados en el Distrito Minero
Tiltil

#### RESUMEN

A lo largo de la Cordillera de la Costa de los Andes Centrales se han descrito depósitos de tipo IOCG, IOA, estratoligados de Cu-(Ag) y pórfidos cupríferos, los cuales se asocian a las franjas metalogénicas desarrolladas en los períodos Jurásico y Cretácico. Durante gran parte de este período la placa sudamericana estuvo sometida a un régimen tectónico extensional a transtensional que a partir de la transición del Cretácico Inferior al Superior cambia a uno predominantemente transpresional a compresional. A pesar de este marco referencial, aún son numerosos los yacimientos y distritos mineros de esta franja cuya génesis y edad de formación no son conocidas o son materia de discusión. Este estudio busca entender el contexto geológico regional para el desarrollo de distritos mineros, la génesis de sus depósitos minerales y la continuidad a lo largo de la franja metalogénica. El objetivo de este trabajo es estudiar la geología del Distrito Minero Tiltil, comprender la geología de los cuerpos mineralizados de orígen magmático-hidrotermal más característicos, sus distintas etapas de alteración y mineralización, y la relación espacial y temporal de estos. La metodología utilizada para ello consiste en: (1) mapeo geológico del distrito, de minas y de sondajes, (2) análisis geoquímicos y mineralógicos de muestras de los cuerpos mineralizados, (3) elaboración de modelos geológicos 3D y (4) confección de tablas paragenéticas de los depósitos más característicos del distrito. Se propone que estos depósitos minerales están genéticamente relacionados con la evolución tardimagmática del Plutón Caleu (~94 Ma) y que las etapas de alteración hidrotermal reconocidas en la mayoría de estos son: 1) alteración potásica temprana, de baja ley; 2) alteración albita-actinolita intermedia, estéril; 3) alteración sericítica y clorita-epidota con mineralización de pirita-calcopirita (menor bornita), cuarzo-hematita (especularita), turmalina, y en ocasiones magnetita; y 4) alteración tardía de calcita-cuarzo, estéril. Los resultados indican que en este distrito ocurren dos tipos de depósitos minerales de origen magmático-hidrotermal: (1) de tipo IOCG, principalmente en cuerpos vetiformes y brechas con contenidos de Au, Cu y Fe asociados a sulfuros, hematita y cuarzo, y (2) de tipo estratoligados de Cu-(Ag), principalmente en cuerpos mantiformes con bajos contenidos de Fe.

**Palabras Claves:** Franja Metalogénica Cretácica Au-Cu, IOCG, Estratoligados de Cu-(Ag), Sistema Magmático-Hidrotermal, Cordillera de la Costa de los Andes Centrales.

#### ABSTRACT

Along the Coastal Cordillera of North-Central Chile it has been described IOCG, IOA, stratabound Cu-(Ag) and porphyry copper deposits, which are associated to metallogenic belts developed in Jurassic to Cretaceous ages. During these periods the tectonic regime along the margin of South America was characterized by an extensional to transtensional setting. However, in the transition from Early to Late Cretaceous the tectonic regime changed to a transpressional to compressional continental margin. Despite this tectonic setting, there is a substantial amount of deposits and mining districts related to this ore belts which their genetic models and formation ages are unknown or are matter of discussion. In this study we document research to understand the regional geology setting to development mining districts, the genetic of their ore deposits and the continuity along the metallogenic belt. The objective of this research is to study the district geology setting, to understand the genetic models of the magmatic-hydrothermal deposits, their various alteration and mineralization stages, and the spatial and temporal relationship of the ore bodies. The methodology used consist of: surface, mines and drill mapping, geochemical and mineralogical analysis of samples, and preparation of paragenetic tables. With all this information 3D geological models are produced to help to characterize the distribution and geometry of the ore bodies and the different alteration and mineralization stages. We present this ore deposits are associated with the tardimagmatic Pluton Caleu evolution (~94 Ma). The hydrothermal alteration stages recognized in the most ore bodies are: 1) low copper grade early potassic alteration, 2) intermediate sterile albite-actinolite alteration, 3) main sericitic and chlorite-epidote alteration with pyrite-chalcopyrite (minor bornite), quartz-hematite (specularite), tourmaline and occasionally magnetite in veins, vesicles and ductile deformation zones, and 4) sterile late alteration of calcite-quartz veins. The results indicate that two types of mineral deposits of magmatic-hydrothermal origin occur in this district: (1) IOCG type, mainly in veins and breccias associated with contents of Au, Cu and Fe in sulfides, hematite and quartz, and (2) Stratabound Cu-(Ag) type, mainly in stratiform bodys with low Fe contents.

**Keywords**: Au-Cu Cretaceous belt, Iron oxide-copper gold deposits IOCG, Strata-bound Cu-(Ag) deposits, Magmatic hidrotermal system, Coastal Cordillera of North-Central Chile.

#### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Planteamiento del Problema

#### 1.1.1. Antecedentes generales

A lo largo de la Cordillera de la Costa de Perú y Chile (Figura 1-1) se han descrito depósitos minerales de tipo óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG por sus siglas en inglés), hierro apatito (IOA por sus siglas en inglés), estratoligados de Cu-(Ag) y pórfidos cupríferos, entre otros depósitos de tipo magmático-hidrotermal, que forman parte de las Franjas Metalogénicas del Jurásico y Cretácico (Sillitoe y Perelló, 2005, Maksaev et al., 2007; Sillitoe, 2012; Hermosilla et al., 2015; Cochilco, 2016; Richards et al., 2017; Yáñez & Rivera, 2019; Creixell et al., 2020). Las evidencias regionales indican que entre el Jurásico y Cretácico medio estas franjas metalogénicas se habrían formado bajo un régimen tectónico transtensional a extensional, el cual habría cambiado a un régimen tectónico de transición (transtensivo-transpresivo) entre los ~125 Ma y ~115 Ma, y luego a uno predominantemente transpresional a compresional en el Cretácico Superior (Sillitoe, 2003; Charrier et al., 2007; Mpodozis & Cornejo, 2012; Veloso et al., 2016; Richards et al., 2017; Creixell et al., 2020; Jara et al., 2021). A pesar de este marco regional, la geometría y continuidad de estas Franjas Metalogénica, así como los tipos de depósitos minerales que contienen y su relación con la geología regional, aún son materia de estudio (e.g. Maksaev et al., 2007; 2010; Barra et al., 2017; Arredondo et al., 2017; Yáñez & Rivera, 2019).

Un tema de nuestro interés es la extensión sur de la Franja Metalogénica Cretácica en la Cordillera de la Costa de Chile Central (Gröpper, 2011). Aquí destacan yacimientos de tipo estratoligados de Cu-(Ag) como El Soldado (~200 mt @1.35% Cu-eq, ~103 Ma) y Lo Aguirre (~11 mt @2.14% Cu-eq, ~102 Ma); y de tipo IOCG como La Africana (~3.3 mt @2.5% Cu, edad similar a Lo Aguirre) y El Espino (145 mt @0.6% Cu-eq, ~93-86 Ma) (Maksaev & Zentilli, 2002; Sillitoe, 2003; Richards et al., 2017). Adicionalmente, en esta franja se han reconocido pequeños cuerpos mineralizados agrupados en distritos mineros, donde la información sobre la génesis y potencial de exploración de yacimientos es escasa (Sernageomin, 2012). Este es el caso del Distrito Minero Tiltil ubicado a 50 km al noroeste de Santiago y uno de los más antiguos de Chile Central (Guerrero, 1959; Cuadra & Arenas, 2013).

El Distrito Minero Tiltil se localiza en el flanco oriental de la Cordillera de la Costa, alcanzando alturas de hasta 2.000 m.s.n.m., y abarcando un área aproximada de 9x25 km<sup>2</sup> (Figura 3-1). En él se han explotado de manera esporádica pequeños yacimientos de tipo magmático-hidrotermal de Cu, Au y polimetálicos de Cu, Au, Ag, Pb y Zn, además de lavaderos o placeres de oro (Guerrero, 1959; Cabello, 1977; Zeballos, 2007; Sernageomin, 2012; Cuadra & Arenas, 2013; Muñoz, 2017; Faundez et al., 2020). En el distrito afloran rocas predominantemente volcánicas y sedimentarias del Cretácico Inferior, las que son intruidas por plutones con edades de emplazamiento de 100 a 94 Ma y edades de exhumación muy cercanas a su emplazamiento entre 94 y 90 Ma (Thomas, 1958; Aguirre et al., 1999; Wall et al., 1999; Parada et al., 2005; Charrier et al., 2007, 2015; Molina, 2014; Boyce et al., 2020). Las estructuras principales consisten en sistemas de fallas locales de dirección NNE-SSW a NNW-SSE y N-S con pequeños desplazamientos en el rumbo (Wall et al., 1999; Gana & Zentilli, 2000).

Para comprender la génesis de los yacimientos en una franja metalogénica y de un distrito minero en particular es necesario observar distintos depósitos e intentar responder algunas de las siguientes preguntas fundamentales: ¿Cómo se relacionan las distintas ocurrencias y estilos de mineralización? ¿Cuántos eventos de mineralización suceden y a qué periodo de tiempo se relacionan? ¿Cómo se relacionan estos eventos con los procesos geológicos regionales (i.e. tectónicos, estructurales, magmáticos y metamórficos)? Para esto es fundamental conocer tanto la geología regional como la del distrito, y comprender la génesis de los depósitos minerales que ocurren, no solo para saber cuál es el control de la mineralización (rocas y/o estructuras), sino que también para entender la relación espacial y temporal entre los distintos cuerpos mineralizados a escala distrital y regional. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es (1) estudiar la geología a escala regional y distrital del Distrito Minero Tiltil, (2) determinar los tipos de cuerpos mineralizados y eventos de alteración-mineralización que ocurren en este distrito minero y (3) comprender el control que ejercen las rocas y estructuras tanto regionales como locales sobre los mismos y su relación con los modelos de yacimientos teóricos conocidos.

Para cumplir con estos objetivos se realizó un mapeo de litologías, estructuras, alteraciones y mineralizaciones del distrito a una escala 1:25.000, acompañado de un catastro de los depósitos minerales de tipo magmático-hidrotermal que ocurren. Finalmente se seleccionó y se realizó un mapeo de detalle a escala 1:1.000 de los depósitos minerales más representativos del distrito.

Adicionalmente, para estudiar en profundidad la mineralización hipógena de los yacimientos seleccionados, se realizó una campaña de sondajes de tipo diamantino (DDH). Para estos depósitos, se realizaron además análisis geoquímicos (ICP-MS de elementos menores de Cu, Ag, Fe y Co, y traza, y análisis de Au a fuego), petrográficos y calcográficos de muestras seleccionadas. A partir del análisis de los resultados, para estos depósitos se construyeron tablas paragenéticas y un modelo geológico 3D utilizando el Software Leapfrog Geo de Seequent Ltda. (2019).

#### 1.1.2. Vacío del Conocimiento

Aunque existen bastantes autores que han discutido sobre la relación entre la mineralización y las estructuras geológicas de la corteza superior, aún el tópico no es completamente entendido. En la zona de la Cordillera de la Costa de Chile Central existen escasos trabajos acerca de los tipos de mineralización y la formación de los distintos cuerpos minerales presentes. Se desconoce la relación que podrían tener estos cuerpos entre ellos, si es que se generaron por uno o más episodios, pues las edades relativas y absolutas de las mineralizaciones son desconocidas hasta ahora. Además a pesar de conocer el contexto tectónico en que estos cuerpos se podrían haber generado, la relación de estos con la franja metalogénica, particularmente del Cretácico, es incierta. Esto genera incertidumbre respecto al control y génesis de estos yacimientos y también respecto a la extensión que podría tener esta franja metalogénica.

#### 1.1.3. Problema y Relevancia

El entendimiento de la génesis y edad de formación de los depósitos minerales correspondientes a una franja metalogénica es clave para comprender la fuente de la mineralización, si es que tiene un control estructural y el potencial de exploración que podrían tener yacimientos encontrados en esta misma franja.

Además en forma práctica, la falta de información respecto a la geometría y continuidad de los cuerpos minerales genera que se desarrollen malas prácticas en la pequeña y mediana minería. En

primer lugar, no se desarrollan etapas de exploración, y en segundo lugar, la explotación de los cuerpos minerales se realiza de manera insegura e ineficiente. Por esta razón, es relevante comprender el proceso de génesis de los cuerpos mineralizados, por ejemplo de Oro y Plata-Cobre, y el rol que juegan las estructuras (vetas, vetas-fallas, diques, mantos, y brechas) en su formación, ya que se generaría un aporte a los modelos geológicos de exploración y explotación, haciéndolos más efectivos y seguros.

#### 1.1.4. Pregunta de Investigación

A partir de la discusión anterior se desprenden las siguientes preguntas de investigación:

- P1: ¿Cómo se relacionan las distintas ocurrencias y estilos de mineralización de un mismo distrito?
- P2: ¿Es un mismo episodio el que genera la mineralización en todos los cuerpos minerales o son distintos episodios relacionables entre sí?
- P3: ¿Cuántos eventos de mineralización suceden y a qué periodo de tiempo se relacionan?

#### 1.1.5. Caso de Estudio

Con una historia extensa, el Distrito Minero Tiltil se ha caracterizado por trabajos de lavaderos de oro en las Quebradas El Atajo y Las Maritatas (Zeballos, 2000; Cuadra & Arenas, 2013; Muñoz, 2017). Actualmente, dentro de la comuna de Tiltil existen 62 faenas mineras las cuales corresponden a yacimientos de Cobre, Oro, Cobre-Plata, Cobre-Oro, Plomo-Plata-Oro y Plomo-Zinc, donde 15 se encuentran abandonadas, 40 con trabajos intermitentes, 1 paralizada y 6 activas (correspondientes a depósitos no metálicos), y dentro de la comuna de Lampa existen 15 faenas mineras las cuales corresponden a yacimientos de Oro, Oro-Zinc, Sulfuros de Cobre, Óxidos de Cobre, Cobre-Oro y Caliza donde 4 se encuentran abandonadas, 10 con trabajos intermitentes y 1 activa (Sernageomin, 2012; Muñoz, 2017). Los depósitos minerales de oro, cobre y/o plata están espacialmente asociados a unidades litológicas mesozoicas de Chile Central y recientemente se han distinguido distintos estilos de mineralización: cuerpos de diques mineralizados con vetas y

brechas periféricas, depósitos de brechas mineralizadas, vetas mesotermales o vetas-fallas y estratoligados asociados a vetas (Guerrero, 1959; Zeballos, 2000; Faundez et al., 2020).

Debido a estas características y a que existe una relativa buena exposición de afloramientos y disponibilidad de estudios geológicos en los alrededores de esta zona se ha escogido este distrito como caso de estudio.

El Distrito Minero Tiltil, ubicado en el flanco oriental de la Cordillera de la Costa a 51 km al noroeste de Santiago de Chile, se encuentra entre el sector norte de la comuna de Lampa y el límite norte de la Región Metropolitana (Sernageomin, 2012), abarca un área de 9x25 km2 y aflora parte de la franja metalogénica del Cretácico (Figura 1-1). Hasta la fecha, la documentación sobre dicho distrito solo se basa en información descriptiva somera de cada mina, separadas según el tipo de mena y ocurrencia sin que se reconozca el modelo metalogénico local. La figura 3-1 muestra los 4 yacimientos escogidos para la caracterización de los estilos de mineralización, geometría y génesis. Estas 4 áreas se escogieron debido a sus diferentes estilos de mineralización observados preliminarmente y también por sus ubicaciones representativas del distrito. Los 4 yacimientos escogidos son: en la zona Norte Proyecto Huracán, en la zona centro Mina San Aurelio y en la zona sur Mina Cóndor y Mina La Despreciada (Figura 3-1).



Figura 1-1: Distribución de las franjas metalogénicas y principales yacimientos del Jurásico al Paleoceno-Eoceno Inferior, desde el sur de Perú hasta la zona central de Chile (modificado de Maksaev & Zentilli, 2002; Sillitoe, 2003, 2012; Gröpper, 2011; Del Real et al., 2018). En rectángulo rojo se indica la ubicación aproximada del área de estudio.

#### 1.1.6. Aporte de trabajo

Este estudio ayudará a comprender los modelos genéticos de distintos depósitos de un mismo distrito y cómo se relacionan con yacimientos tipo IOCG y estratoligado de Cu-(Ag), y también a entender la relación entre distintos estilos de mineralización, las etapas de alteración y mineralización, y cómo se pueden asociar con la franja metalogénica del Cretácico, y así llegar a una mejor caracterización de esta franja.

De forma práctica será un aporte al mejoramiento de los modelos geológicos usados en la exploración y explotación de yacimientos de tipo: Vetas, Vetas-Fallas, Mantos, Diques y Brechas, en particular aportará al Distrito Minero de Tiltil a reconocer los cuerpos minerales de la zona y a determinar de mejor forma la distribución y orientación de sus cuerpos minerales.

#### 1.2. Hipótesis

Se desprenden dos hipótesis principales:

- La mineralización de los distintos cuerpos minerales del Distrito Tiltil se produjo a partir de un episodio en el tiempo, el cual se expresa de distintas formas debido al contexto en que se desarrolla el transporte de fluidos.
- Los cuerpos mineralizados del Distrito Tiltil se desarrollaron en la etapa tardimagmática del emplazamiento del Plutón Caleu asociado a un ambiente de transición de un régimen tectónico extensional a uno compresional en el Cretácico medio.

#### 1.3. Objetivos

Como objetivo general de este trabajo se propone comprender la geología regional y los tipos de yacimientos que existen en el Distrito Minero Tiltil, con énfasis en estudiar la génesis y relación con su evolución estructural y magmática-hidrotermal.

Luego como objetivos específicos se tiene:

- 1) Estudiar la geología regional del Distrito Minero Tiltil.
- Establecer y comprender la distribución espacial, geometría y génesis de los cuerpos mineralizados de origen magmático-hidrotermal del Distrito Minero Tiltil y los eventos de alteración-mineralización que ocurren en ellos.
- Comprender el control que ejercen las rocas y estructuras tanto regionales como locales en la formación de los depósitos minerales y la relación con los modelos de yacimientos teóricos de estos.

#### 1.4. Metodologías

Se realizaron las siguientes metodologías para la resolución de los objetivos planteados:

1.4.1. Revisión Bibliográfica de Estudios realizados en la zona de estudio.

En primer lugar, previo a cualquier otro trabajo, se recuperaron y revisaron investigaciones de ámbito geológico y/o minero que abarcaran o estuvieran cerca del área de estudio. A través de comunicación oral con los mineros de la zona, se pudieron rescatar ciertos informes con información de mapas confidenciales geológicos y geoquímicos. La compilación de estos documentos ayudó a una caracterización preliminar del área de estudio previo al trabajo de terreno.

También se desarrolló una revisión bibliográfica respecto al marco tectónico asociado a las unidades litológicas presentes en el área de estudio, con el objetivo de relacionar esta información con la franja metalogénica del Cretácico y con los resultados obtenidos de orientación de estructuras y de los cuerpos mineralizados.

1.4.2. Realización de Mapa Geológico-Estructural de superficie de Distrito Tiltil a escala 1:25.000 y Mapas Geológico-Estructurales de detalle de 4 yacimientos.

Luego de la revisión y estudio bibliográfico de la zona, se procedió a realizar la campaña de terreno para la confección del mapa geológico-estructural distrital a escala 1:25.000, la cual consistió en la descripción de litologías, estructuras, mineralizaciones y alteraciones, se plasmaban en libretas de terreno y planchetas de mapeo. Cuando era necesario se extraían muestras de rocas para descripciones posteriores más detalladas de las mineralizaciones o litologías difíciles de reconocer.

Una vez obtenido el mapa distrital, se escogieron 4 zonas correspondientes a 4 yacimientos: El Huracán, San Aurelio, La Despreciada y Cóndor. Estos se escogieron debido a su potencial de exploración, la buena exposición de afloramientos, la representatividad espacial de los yacimientos del distrito y los diferentes estilos de mineralización reconocidos a gran escala.

Previo a los mapeos de detalle se obtuvieron imágenes de alta resolución a través de vuelos de *Drone*, lo que permitió realizar el trabajo con mayor precisión y además obtener el modelo de elevación digital para el trabajo en 3 dimensiones. Así se realizaron los mapas geológico-estructurales de detalle a escala 1:1000 de estas 4 zonas, desarrollando el mismo tipo de trabajo mencionado para el mapa distrital.

Finalmente con toda la información georreferenciada obtenida de los trabajos de campo se pudo analizar y digitalizar a través de la plataforma ArcGis (ESRI, 2017), generando 5 mapas geológico-estructurales: 1 mapa distrital de Escala 1:25.000 y 4 mapas de detalle de Escala 1:1.000.

# 1.4.3. Realización de campaña de sondajes y posterior caracterización de ellos.

A partir de los mapas de detalle de los 4 yacimientos, se escogieron los puntos de perforación para la campaña de sondajes para cada uno de los 4 yacimientos. Las perforaciones se realizaron con la maquina Boart Longyear LF-90D, generando testigos de diámetro 85 mm. En total se realizaron 8 sondajes, en la tabla I-1 se puede observar la ubicación, largo y orientación de estos.

		UTM E	UTM N				
POZO	YACIMIENTO	WGS84	WGS84	СОТА	DIP	AZIMUTH	LARGO
ST-01	San Aurelio	316,963	6,336,172	801	-60	345	70
ST-02	San Aurelio	316,968	6,336,118	788	-50	165	61
ST-03	Huracán	320,125	6,343,594	645	-50	182	50
ST-04	Cóndor V	315,045	6,319,658	1,552	-45	285	21
ST-05	Cóndor V	315,033	6,319,683	1,554	-55	285	22
ST-06	Cóndor V	315,023	6,319,672	1,554	-55	285	40
ST-07	Cóndor V	314,979	6,320,019	1,507	-80	225	17
ST-08	Despreciada	315,618	6,319,837	1,215	-60	235	131

Tabla I-1: Ubicación y orientación de sondajes de Distrito Tiltil.

La ubicación y orientación de cada uno de los sondajes fue escogida de manera de interceptar en profundidad las estructuras o cuerpos mineralizados observados en superficie.

Luego de la campaña de perforación de sondajes, se procedió a caracterizar los testigos de roca obtenidos, describiendo los siguientes parámetros: (Anexo C)

- Litologías (Tipo de Roca)
- Alteración (Tipo, Ocurrencias e Intensidad)

- Mineralización (Tipo, Ocurrencias e Intensidad)
- Vetillas (Relleno, Forma y Geometría)
- Estructuras (Tipo y Relleno)

# 1.4.4. Análisis petrográfico y calcográfico de muestras obtenidas de superficie y de sondajes

Se seleccionaron muestras de superficie y de sondajes para realizar la descripción mineralógica de cortes transparentes y pulidos. (Anexo A)

Las muestras obtenidas de superficie se seleccionaron con el fin de confirmar las litologías descritas deforma macroscópica, de estas se obtuvieron 14 muestras a las cuales se les realizó solo corte transparente.

Con el objetivo de determinar las asociaciones mineralógicas, relaciones de corte y alteraciones de los diferentes yacimientos, se seleccionaron tramos de los sondajes para el análisis petrográfico de cortes transparentes y cortes pulidos (en casos de minerales metálicos). En total se realizaron 23 cortes transparentes de muestras obtenidas de sondajes, donde 11 también tienen corte pulido.

El análisis petrográfico permite determinar los distintos episodios de mineralización y alteración a través de relaciones de corte como por ejemplo entre vetas mineralizadas o superposición de alteraciones. Además según los distintos tipos de alteración se infieren las temperaturas y profundidades aproximadas de los episodios de transporte de fluidos hidrotermales.

#### 1.4.5. Análisis de estructuras distrital

A partir de las mediciones de las actitudes de estructuras del distrito, principalmente rumbo y manteo, se obtienen las orientaciones preferenciales de estas. Luego se determinan los sentidos de acortamiento de cada estructura utilizando el análisis de compresión y extensión por tipo de

estructura indicado en la figura 1-2. Este análisis se realiza con el propósito de comparar y relacionar los distintos tipos de estructuras a partir de qué campos de estrés son controladas, y además es posible relacionarlas con los distintos regímenes tectónicos del margen de convergencia.

Por otro lado a través de relaciones de corte entre distintos tipos de estructuras se determina la temporalidad relativa entre las estructuras que se pudieron observar.



Figura 1-2: Análisis de sentidos de acortamiento por tipo de estructura.

## 1.4.6. Análisis geoquímico: ICP-MS de muestras obtenidas de superficie y de sondajes

Con el objetivo de determinar anomalías y leyes de los elementos principales de Au, Ag y Cu, y otros elementos, se realizó un análisis de espectroscopía de masas de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) el cual consiste en cuantificar (hasta ppm) los elementos presentes en una muestra.

De superficie se obtuvieron 52 muestras, las cuales se seleccionaron debido a la presencia de mineralización en los distintos lugares del distrito. Luego de los sondajes realizados, se seleccionaron los tramos mineralizados de estos y se obtuvieron 63 muestras para analizar químicamente.

Luego para realizar la geoquímica por elemento, se calculan las medias y desviaciones estándar para todas las muestras, así se definen como: 1) anomalía débil: cuando se está por sobre la media más la desviación estándar, 2) anomalía media: cuando se está por sobre la media más dos veces la desviación estándar, y 3) anomalía fuerte: cuando se está por sobre la media más 3 veces la desviación estándar, bajo estos parámetros se considerará que no hay anomalía y solo hay presencia del elemento. (Anexo B)

#### 1.4.7. Realización de tablas paragenéticas

A partir de la descripción de alteraciones y mineralizaciones observadas en superficie, en el mapeo de sondajes y los cortes transparentes y pulidos, se determinaron distintas etapas de ocurrencias para cada mineral presente por cada yacimiento estudiado. Esto fue posible debido a las relaciones de corte presentes entre vetillas y/o alteraciones, y también a la relación de temperaturas y presiones de formación entre ciertos minerales. Por otro lado, estas tablas paragenéticas también indican la abundancia relativa de los minerales en esos depósitos.

# 1.4.8. Realización de Modelos 3D de los yacimientos descritos: Software Leapfrog.

A partir de toda la información producida: mapas superficiales, modelos de elevación digital, mapeos de sondajes, análisis petrográficos y análisis químicos, se desarrolla un modelo 3D de cada uno de los yacimientos. El Software Leapfrog permite compilar toda esta información y realizar la interpretación correspondiente para cada modelo.

Luego de determinar cada modelo de yacimiento en tres dimensiones y discutir sus diferentes estilos de mineralización, se plantea un modelo de mineralización global en donde estos distintos estilos se relacionan entre sí en un mismo distrito: Distrito Tiltil.

#### 2. MARCO TECTÓNICO Y METALOGÉNICO

A lo largo del tiempo, el margen continental de Sudamérica ha atravesado una compleja evolución tectónica, donde a través de diferentes regímenes tectónicos se ha formado la actual geomorfología de Chile la que se compone principalmente, de Oeste a Este, de la Cordillera de la Costa, la Depresión Central y la Cordillera Principal. Esta morfología refleja la evolución del margen activo del oeste de Gondwana y Sudamérica durante la separación de continentes, y que luego con una reactivación de la subducción en el Jurásico Temprano, se inicia el ciclo andino generando el arco magmático observado en la actualidad (Mpodozis & Ramos, 1989; Charrier et al., 2007; Boyce et al., 2020).

Desde el Jurásico hasta el Cretácico Temprano hubo un ambiente extensional a transtensional, con una subducción tipo Mariana, donde se generó magmatismo y cuencas de trasarco (Mpodozis & Ramos, 1989; Charrier et al., 2007; Veloso et al., 2016; Richards et al., 2017; Jara et al., 2021) (Figura 2-1(A)) y también fallas profundas extensionales, las que controlarían la arquitectura de deformación de los periodos posteriores (Boyce et al., 2020). Luego en el Cretácico medio (a partir de los 105 Ma) se genera una inversión tectónica donde por un corto periodo existe un ambiente de transtensión (Richards et al., 2017; Boyce et al., 2020) (Figura 2-1(B)) y en el Cretácico Superior predomina un ambiente compresional con una subducción tipo Chilena, generando una migración del arco magmático hacia el Este (Richards et al., 2017; Charrier et al., 2007) (Figura 2-1(C)) y la inversión de las fallas extensionales mencionadas que acomodarían las unidades volcanosedimentarias depositadas (Fm. Veta Negra) y las por depositar (Fm. Las Chilcas) (Boyce et al., 2020). En particular Boyce et al. (2020) define dos fallas principales de orientación nortesur, la falla Los Perros y la falla El Sauce, las cuales serían responsables de la acomodación y deformación de las unidades estratigráficas.



Figura 2-1: Modelo esquemático que ilustra la evolución tectono-magmática del margen del Norte-Centro de Chile entre los 25° y los 34°S durante el Cretácico hasta la actualidad. Además muestra la relación

espacial y magmática de los depósitos de IOCG y Pórfidos de Cu. Modificado de Richards et al. (2017) y Boyce et al. (2020).

#### 2.1. Modelos de Yacimientos

Depósitos importantes ocurren en el cinturón de rocas volcánicas de la Cordillera de la Costa, desde el norte de Chile hasta Chile Central. Desde el Mesozoico medio al tardío, debido al régimen extensional, se genera adelgazamiento de la corteza, alto flujo de calor y abundancia de magmatismo basáltico a intermedio, siendo éstas, condiciones óptimas para la formación de yacimientos de tipo IOCG y estratoligados de cobre (Sillitoe & Perelló, 2005). Además se definen dos períodos predominantes para la génesis de estos depósitos: Jurásico Superior, el cual aflora entre las latitudes 22°-26°S y Cretácico temprano, que aflora entre las latitudes 30°-34°S (Maksaev & Zentilli, 2002), sin embargo se observan depósitos datados del Cretácico superior correspondientes a IOCGs y pórfidos cupríferos aflorando a lo largo de la misma franja entre las latitudes 27°-32°S (Richards et al., 2017).

Los depósitos minerales que se encuentran en la Cordillera de la Costa de Chile Central corresponden a distintos tipos: IOCG, estratoligado de Cu-(Ag) y sistemas de vetas principalmente. Estos yacimientos, al estar ubicados en el cordón de rocas de la Cordillera de la Costa, se les asocia, espacial y temporalmente, con los pulsos de intrusión del Batolito del Cretácico inferior y también a movimientos transtensionales de fallas mayores de cinemática normal paralelas y oblicuas al arco (Sawkins, 1972; Maksaev & Zentilli, 2002; Sillitoe, 2003; Sillitoe & Perelló, 2005; Richards et al., 2017). Cabe destacar que estas fallas normales serían invertidas en la inversión de régimen extensional a compresional (régimen de transpresión) generado al final del Cretácico Temprano (Mpodozis & Ramos, 1990; Lara & Godoy, 1998; Benavides-Cáceres, 1999; Sillitoe & Perelló, 2005).

#### • IOCG

En el cordón oriental de la Cordillera de la Costa de Chile, una provincia de yacimientos de IOCG es desarrollada entre las latitudes 25°S y 34°S, por un lado se los relaciona temporalmente con la culminación del periodo extensional en el Cretácico Medio (Oyarzún et al., 1999; Grocott and

Taylor, 2002; Sillitoe, 2003; Richards et al., 2017) o también con el inicio de la inversión tectónica (Chen et al., 2013; Richards et al., 2017); por otro lado se los relaciona con procesos de intrusión de los batolitos mesozoicos y movimientos de fallas mayores paralelas al arco (Sillitoe, 2003). Esto se refleja conceptualmente en los modelos propuestos por Groves et al. (2010) y Pirajno & Bagas (2008) para yacimientos de IOCG formados en cuencas de trasarco por un ambiente extensional y un magmatismo producido por la subducción del margen continental. (Figura 2-1).

En general los depósitos minerales de IOCG, de origen magmático hidrotermal, se definen por la presencia metálica de hierro, cobre y oro, con asociaciones mineralógicas de magnetita, hematita, calcopirita, bornita y calcosina (Richards & Mumin, 2013a). Existen varios autores que discuten sobre el modelo genético de este tipo de yacimiento. Sillitoe (2003) y Barra et al. (2017) relacionan estos cuerpos minerales a procesos magmáticos hidrotermales, específicamente a intrusiones de plutones dioríticos en rocas de caja volcánicas. En general estos tipos de yacimientos se asocian con una ocurrencia mineral en cuerpos de vetas (en zonas hipógenas) y brechas tectónicas hidrotermales (en zonas supérgenas) (Sillitoe, 2003; Pirajno & Bagas, 2008; Barra et al., 2017).

Por otro lado Pirajno & Bagas (2008) proponen un modelo donde la roca de caja corresponde a una de tipo sedimentaria carbonatada, y la mineralización está más cerca de la superficie que de la intrusión magmática, pero igual que los otros autores la mineralización puede ocurrir en fracturas y stockworks de cuarzo-pirita-calcopirita, depósitos de mantos y brechas. Luego Barra et al. (2017) plantea un modelo, con una zonación vertical, donde en profundidad ocurre una mineralización diseminada de pirita y calcopirita relacionada a diques con magnetita y un halo de alteración de actinolita y apatito. Sobre este sector existe una zona de transición donde se empieza a visualizar la roca de caja volcánica en conjunto con el intrusivo, luego hacia la superficie se encuentra una zona enriquecida en magnetita y mineralización diseminada y masiva de calcopirita y bornita-pirita en vetas (en roca intrusiva) y/o en mantos (dentro de las rocas volcánicas). Por último, y ya más cercano a la superficie, se encuentra una zona enriquecida en hematita donde también existe mineralización de calcopirita-pirita pero asociada a brechas tectónicas hidrotermales y fallas. (Figura 2-2).



Figura 2-2: Modelo conceptual de modelo de yacimiento tipo IOCG, modificado de Barra et al., 2017. Cpy: calcopirita, Py: pirita, Bo: bornita, Hem: hematita, Esp: especularita, IOA Iron Oxide Apatite, IOCG: Iron Oxide Copper Gold.

#### • Estratoligados

Los depósitos de estratoligados de Cu-(Ag) del cretácico están considerados como la tercera fuente de producción de cobre de Chile, donde en primer lugar se consideran los pórfidos cupríferos del Cenozoico, y en segundo lugar los depósitos de óxidos de hierro, cobre y oro (IOCG) del Cretácico inferior (Maksaev & Zentilli, 2002).

Estos tipos de depósitos se encuentran a lo largo de la Cordillera de la Costa desde el norte hasta Chile Central, alojados en rocas volcánicas y volcanosedimentarias del Cretácico inferior (Elgueta et al., 1990), y cabe destacar que hacia el final de este período ocurre una transtensión tectónica debilitando zonas frágiles facilitando la circulación de fluidos hidrotermales (Maksaev & Zentilli, 2002; Águila, 2019). En particular, los depósitos estrato-ligados de Cu-(Ag) de Chile Central (30°S-34°S) ocurren en intercalaciones de lavas máficas con rocas marinas clásticas y carbonatadas, y la mineralización se asocia a emplazamiento de plutones de tipo dioríticos a granodioríticos (Rivano et al., 1993; Maksaev & Zentilli, 2002), esta idea se complementa con mecanismos de precipitación condicionados por el contacto con zonas de abundante materia orgánica y actividad biogénica (Wilson y Zentilli, 1999; Boric et al., 2002, Aguila, 2019) o también como mezcla de fluidos al entrar en contacto con aguas meteóricas (Maksaev y Zentilli; 2002).

La mineralización de este tipo de yacimientos se genera por la circulación de fluidos a través de canales o estructuras como fallas (Águila, 2019), donde luego se puede concentrar en zonas permeables como lo son partes superiores brechizadas de flujos de lavas basálticas (Elgueta et al., 1990). También son característicos por las ocurrencias irregulares de mineralización en forma de vetas, brechas magmáticas-hidrotermales y mantos (Figura 2-3), la mineralización de estos depósitos suele ser calcopirita, bornita, calcosina, pirita y menor digenita y covelina, los minerales de alteración que suelen ocurrir son cuarzo, epidota, calcita, albita, sericita, hematita, magnetita, clorita y menos comúnmente feldespato potásico, turmalina, actinolita, ceolita, titanita y rutilo (Maksaev & Zentilli, 2002; Boric et al., 2002; Toledo, 2003; Salgado, 2004; Cornejo et al., 2006; Tristá-Aguilera et al., 2006; Ramirez, 2006; 2008; Townley et al., 2007; Oliveros et al., 2008b; Kojima et al., 2009; Abarca, 2010; Gröpper, 2011; Carrillo Rosua et al., 2014; Águila, 2019).

Existen varios autores que discuten la relación de estos depósitos con los yacimientos tipo IOCG y algunos los consideran como una variante superficial de los depósitos IOCG (Vivallo & Henríquez, 1998; Hayne, 2000; Orrego et al., 2000; Sillitoe & Perelló, 2005). En general, los depósitos estrato-ligados de Cu-(Ag) se ubican en zonas periféricas de los plutones emplazados, en zonas más lejanas que los yacimientos tipo IOCG, pero en ambos tipos se asocia su mineralización a la movilización de fluidos hidrotermales por la intrusión de estos batolitos (Maksaev & Zentilli, 2002; Barra et al., 2017; Águila, 2019) generando comúnmente alteraciones ricas en albita, calcita y menor hematita (Sillitoe & Perelló, 2005).



Figura 2-3: Modelo conceptual de modelo de yacimiento tipo Estratoligado de Cu-(Ag), adaptado de secciones de yacimientos de El Soldado, Michilla, Lice-Estefanía (Boric et al., 2002; Tristá-Aguilera et
al., 2006; Townley et al., 2007; Oliveros et al., 2008b). Cpy: calcopirita, Py: pirita, Bo: bornita, Cc: calcosina, Hem: hematita.

## • Sistemas Vetiformes

Los sistemas de vetas hidrotermales se generan por procesos de transporte de fluidos hidrotermales donde puede ocurrir reemplazo o crecimiento de cristales en cavidades o fracturas abiertas; generalmente estos espacios abiertos están asociados a zonas de fragilidad como fallas, y se pueden generar vetas, vetas-fallas y/o brechas hidrotermales (Sibson et al., 1975).

En Chile no se conocen depósitos vetiformes de oro importantes. Sillitoe (2003) menciona un cinturón de este tipo de depósitos al norte del cinturón de IOCG, desde el centro al norte de Perú (intraarco de Cañete), los cuales corresponderían a depósitos formados en el Cretácico temprano y los diferencia de los yacimientos tipo IOCG por la deficiencia de minerales de magnetita y hematita.

Groves et al. (1998) habla sobre los depósitos mesotermales de oro, los cuales asocia a rocas de caja deformadas (metamórficas) mayoritariamente, pero igual que Dill (2010) que no asocia una litología específica a este tipo de yacimiento, afirma que estos depósitos de oro se generan por procesos orogénicos en un ambiente de trasarco con rocas volcano-plutónicas. Los sistemas vetiformes de oro presentan un gran control estructural de todo tipo de fallas, zonas de fracturamiento (stockworks y brechas hidrotermales) y zonas foliadas, donde la mineralización puede ocurrir durante o después del desplazamiento, syn o post mineralización (Groves et al., 1998; Dill, 2010).

Como características generales de estos depósitos se ha observado una predominancia de vetas de cuarzo con mineralización de 3% a 5% de sulfuros como pirita, pirrotina y/o arsenopirita, y 5% a 15% de carbonatos como ankerita, dolomita y/o calcita, y también otros minerales de alteración como albita, micas blancas, clorita, scheelita, turmalina y sericita (Groves et al., 1998).

# **3.** GEOLOGÍA DISTRITAL

El mapa geológico actualizado del Distrito Minero Tiltil (Figura 3-1), realizado en el marco de este trabajo, muestra dos unidades de rocas volcánicas y sedimentarias bien estratificadas del Cretácico Inferior y tres pulsos de intrusivos con edades de ~100 Ma, que en la parte norte del distrito forman roof-pendant con las unidades estratificadas. Junto con estas unidades geológicas, se indican las principales estructuras, donde destaca un gran monoclinal de rumbo general N-S y manteos al este que forman las rocas estratificadas, y una falla inversa de primer orden que pone en contacto las dos unidades estratificadas y que se infiere canaliza y favorece el emplazamiento de los cuerpos plutónicos. En este mapa se indica, además, la ubicación de los principales depósitos minerales de origen magmático-hidrotermal del distrito.

# 3.1. Unidades Estratigráficas: franja occidental del Cretácico Inferior bajo (Kib)

En el flanco occidental del distrito aflora una sucesión de rocas principalmente volcánicas andesíticas con algunas intercalaciones de rocas volcano-sedimentarias y sedimentarias, estas dos últimas con afloramientos más abundantes en la parte suroeste del distrito. Las rocas volcánicas están formadas por lavas andesíticas de piroxenos a basálticas con olivino que presentan texturas afaníticas a porfídicas, estas últimas generalmente con grandes fenocristales de plagioclasa de hasta 2 cm de largo (ocoítas). También afloran tobas de cenizas y brechas piroclásticas grisáceas a rojizas de composición dacíticas a daci-andesíticas de piroxeno y anfíbola. Las rocas volcanosedimentarias corresponden a brechas con fragmentos andesíticos de matriz litoarenítica. Las rocas sedimentarias corresponden a areniscas grisáceas y lutitas negras en parte calcáreas, que en general forman estratos de hasta 2 m de potencia. Se observaron algunos diques y sills de composiciones andesíticas y dioríticas intruyendo a esta unidad, los cuales podrían ser contemporáneos con esta unidad volcánica.

Thomas (1958) y Wall et al. (1999) describen esta unidad y correlacionan estos afloramientos con la Formación Veta Negra, cuyo rango estratigráfico comprende entre el Barremiano y el Albiano (~129 a ~110 Ma). Esta unidad ha sido descrita como una sucesión de ~3 km de espesor de rocas volcánicas a subvolcánicas andesíticas con intercalaciones menores de rocas volcanosedimentarias continentales y sedimentarias marinas - litorales (e.g. Sellés & Gana, 2001;

Fuentes et al., 2005; Severino, 2017; Boyce et al., 2020). Además, esta unidad ha sido dividida en dos miembros, de base a techo: (1) Miembro Purehue, formado por rocas volcánicas, principalmente piroclásticas, con intercalaciones sedimentarias litorales; y (2) Miembro Ocoa, formado principalmente por lavas ocoíticas continentales (Thomas, 1958; Wall et al., 1999).

Fuera del área de estudio esta unidad sobreyace concordantemente a la Formación Lo Prado (Berriasiano – Hauteriviano), e infrayace concordantemente a la Formación Cerro Morado del Cretácico Inferior alto y en discordancia angular a la Formación Las Chilcas del Cretácico mediosuperior (Carter & Aliste, 1962; Piracés & Maksaev, 1977; Arévalo, 1992; Sellés & Gana, 2001; Boyce et al., 2020). Sin embargo, en el área de estudio Thomas (1958) y Wall et al. (1999) proponen que esta unidad es concordante con la Formación Las Chilcas. En el marco de este estudio, no se encontró evidencia de tal concordancia y se propone que el contacto entre la Formación Veta Negra con unidades volcánica cretácicas más jóvenes, es a través de una falla inversa (Figura 3-1).

Fuera del área de estudio la Formación Veta Negra tiene dos edades Ar/Ar en plagioclasas de ~119 Ma, ambas interpretadas como edades del volcanismo (Aguirre et al., 1999; Fuentes et al., 2005). Y al norte del distrito Boric & Munizaga (1994) obtuvieron una edad Ar/Ar en plagioclasa de 122,7 $\pm$ 1,1 Ma (Aptiano) en un dique ocoítico, el cual probablemente representa la edad del magmatismo característico de la Formación Veta Negra. Otras edades obtenidas en esta unidad al sur del distrito, con valores entre 102 y 92 Ma, han sido interpretadas como edades de minerales secundarios (Aberg et al., 1984; Morata et al., 1997; Aguirre et al., 1999). Estos minerales secundarios podrían estar asociados con los siguientes eventos geológicos: (1) metamorfismo de enterramiento de muy bajo grado (facie de prehnita-pumpellyita), (2) metamorfismo de contacto, o (3) hidrotermalismo asociados con mineralización de Cu (e.g. Fuentes et al., 2005; Oliveros et al., 2008a). En el área de estudio y sus inmediaciones, la Formación Veta Negra esta intruída por plutones que presentan edades entre 100 y 94 Ma (Wall et al., 1999; Sellés & Gana, 2001; Parada et al., 2005; Molina, 2014; Boyce et al., 2020), dando soporte a las dos últimas interpretaciones para dichas edades. Resumiendo, se interpreta que la Formación Veta Negra representa un arco volcánico y cuencas de intra-arco en subsidencia del Cretácico Inferior (Barremiano-Aptiano), generado en un régimen tectónico extensional (Vergara et al., 1995; Jaillard et al., 2000; Ramos & Alemán, 2000).

## 3.2. Unidades Estratigráficas: franja occidental del Cretácico Inferior alto (Kia)

En el flanco oriental del distrito aflora una sucesión de rocas principalmente volcánicas daciandesíticas con intercalaciones de rocas volcano-sedimentarias y sedimentarias (Figura 3-1). Los niveles volcánicos corresponden principalmente a rocas piroclásticas dacíticas y en menor proporción riolíticas, con intercalaciones de lavas daci-andesíticas a andesíticas. En los niveles sedimentarios se reconocen (1) calizas y limolitas fosilíferas marinas y (2) areniscas, brechas y conglomerados continentales.

En las inmediaciones del área de estudio esta unidad tiene edades U-Pb en circón entre 116 y 106 Ma que se consideran edades del volcanismo (Wall et al., 1999; Sellés & Gana, 2001; Boyce et al., 2020). Está intruída, además, por plutones con edades de 100 a 94 Ma (Wall et al., 1999; Sellés & Gana, 2001; Parada et al., 2005; Molina, 2014; Boyce et al., 2020). Edades K-Ar en roca total y en plagioclasa de ca. 100 Ma obtenidas por Wall et al. (1999) indicarían probablemente edades de metamorfismo de contacto en estas rocas.

Thomas (1958) y Wall et al. (1999) correlacionan estas rocas con la Formación Las Chilcas, asignada por estos autores al rango Aptiano-Albiano. Sin embargo, esta asignación es discutible, ya que estudios recientes realizados por Boyce et al. (2020) sugieren correlacionar este tipo de rocas y en este rango de edad (116 a 106 Ma) con la Formación Cerro Morado (Carter & Aliste, 1962). Esta última unidad ha sido asignada al Albiano y posee una edad U-Pb en circón de ~112 Ma (Boyce et al., 2020). La Formación Cerro Morado subyace en discordancia angular al Miembro Pitipeumo (~105 a ~100 Ma), que es el miembro basal de la Formación Las Chilcas (Espinoza, 1969; Viteri, 1970; Arévalo, 1992; Boyce et al., 2020).

Se propone que la Formación Cerro Morado representa el arco volcánico del Albiano formado en un periodo de transición entre un régimen tectónico extensional-transtensional y uno transpresional-compresional, mientras que la Formación Las Chilcas representa a la cuenca de trasarco formada bajo un régimen compresional (e.g. Richards et al., 2017; Boyce et al., 2020).

# 3.3. Unidades Intrusivas: franja central del Cretácico medio (Km)

A lo largo del eje central NS del distrito y en su extremo norte (Figura 3-1), afloran rocas plutónicas de distinta composición que intruyen a las rocas volcánicas descritas anteriormente. Se reconocieron tres unidades intrusivas principales:

- (Kdg) Gabros de Dos Piroxenos, contienen además minerales accesorios como augita y labradorita, son de grano grueso, con cristales de hasta 5 mm, y de textura equigranular. Son cortados por vetas de cuarzo y diques aplíticos sinuosos. Intruye a la Formación Veta Negra.
- 2) (Kmm) Dioritas a Monzodioritas Cuarcíferas de Anfíbola, ocasionalmente se observan con biotita, presentan texturas que varían de inequigranular (con cristales de plagioclasas de 1 a 4 mm), a equigranular de grano fino. Intruyen a ambas unidades volcánicas y a la unidad de gabros. Son cortadas por diques aplíticos sinuosos y diques andesíticos rectos;
- 3) (Kmd) Dioritas a Dioritas Cuarcíferas de Piroxeno, presentan proporciones variables de anfíbola y biotita, y menor piroxeno, texturas microfaneríticas y equigranulares a inequigranulares con plagioclasas de hasta 0.5 mm. Intruyen a la franja occidental de rocas volcánicas, formando en la parte norte del distrito roof-pendant. Son cortadas por diques andesíticos, dacíticos y aplíticos.

Parada et al. (2005) y Molina (2014) agrupan a estos intrusivos en la unidad Plutón Caleu, y describen a esta unidad como cuatro pulsos magmáticos de composición gabrodiorítica a monzogranítica y determinan para cada uno de ellos edades U-Pb en circones entre 100 y 94 Ma. Estos pulsos se pueden correlacionar con las unidades del Distrito Tiltil de la siguiente manera: (i) la unidad Kmd se correlaciona con la unidad cuarzo monzodiorítica o la unidad monzogranítica con edades  $94.7 \pm 0.7$  y  $96.8 \pm 0.9$  Ma respectivamente; (ii) la unidad Kmm se correlaciona con la

unidad granodiorítica con edad 96.8  $\pm$  1.1 Ma, y (iii) Kdg se correlaciona con la unidad gabrodiorítica con edad de 99.7  $\pm$  0.9 Ma.

Basado en edades "plateau" reportadas de <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar en biotita, anfíboles y plagioclasa, se interpretó un evento de exhumación rápida para este plutón a los 94.9 a 93.2 Ma, y basándose en estudios de trazas de fisión en apatita, se interpreta una exhumación entre los 94 y 90 Ma (Gana & Zentilli 2000; Parada et al., 2005).

A lo largo de la parte central del distrito y en su extremo norte, las rocas volcánicas cretácicas forman roof-pendant sobre el Plutón Caleu, como ha sido reconocido por varios autores en esta parte de la Cordillera de la Costa (e.g. Wall et al., 1999; Parada et al., 2005; Molina, 2014; Boyce et al., 2020).Otros cuerpos intrusivos del distrito están representados por una gran variedad de sistemas de diques de variada composición y texturas, tales como (a) diques andesíticos afaníticos a porfídicos, (b) diques dioríticos microcristalinos, (c) diques dacíticos porfídicos y (d) diques aplíticos.



Figura 3-1: Mapa de litologías y estructuras mayores del Distrito Minero Tiltil, escala de mapeo 1:25.000 (Modificado de Wall et al., 1999). Se indica catastro de minas y depósitos escogidos para estudio de detalle. Se usa hillshade como fondo de la geología. Se indica sección AA', donde se sugiere que los

intrusivos se emplazan a lo largo del contacto por falla entre las dos unidades de rocas volcánicas del distrito (inspirado en Boyce et al., 2020).

# 4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Las estructuras geológicas mayores del distrito son las siguientes (Figura 3-1 y 4-1): (a) monoclinal que afecta a la unidad Kib, (b) sinclinal de arrastre que afecta a la unidad Kia y (c) falla inversa que pone en contacto la unidad Kib sobre la unidad Kia. Adicionalmente, en la figura 4-1 se observan estructuras geológicas locales o secundarias, como también las nueve zonas de levantamiento estructural y los distintos tipos de estructuras estudiadas en terreno. Algunas de estas tienen un rol fundamental como canalizadoras de la mineralización (por ejemplo, ciertos diques y vetas), y en otros casos interrumpiendo o cortando la mineralización (por ejemplo, fallas post minerales). Para estas nueve zonas de levantamiento estructural, se realiza un análisis cuyos resultados se muestran en la Tabla IV-2. En ella se observan las medidas de rumbo y manteo de las estructuras estudiadas (fallas, vetas y diques), así como la densidad de medidas y las direcciones preferenciales. En la figura 4-2 se observan evidencias de terreno de las relaciones de corte entre algunas de las estructuras estudiadas en el distrito, las cuales se discuten a continuación.

## 4.1. Estructuras Mayores

Una de las estructuras mayores del distrito está formada por un gran **monoclinal** de rumbo general NNW-SSE y manteos de hasta 70°E (Figuras 3-1 y 4-1, Tabla IV-1), que afecta a las unidades estratificadas volcánicas del Cretácico Inferior bajo (Kib).

Las rocas volcánicas y volcano-sedimentarias de la unidad del Cretácico Inferior alto (Kia), también presentan pliegues, pero de eje de rumbo NE-SW (Figuras 3-1 y 4-1, Tabla IV-1). Al oriente del distrito, en general esta unidad presenta suaves manteos al este, entre 10° a 20°E, pero a medida que nos acercamos al centro del distrito y hacia el contacto con las otras unidades volcánicas de Kib y plutónicas, sus manteos se hacen más pronunciados, pasando gradualmente a zonas con manteos de 45°E y finalmente a zonas con manteos de 60°E. Consideramos esta estructura como un pliegue de tipo **sinclinal** asimétrico con plano axial inclinado al oeste, el cual probablemente representa un sinclinal de arrastre asociado a la falla inversa que pone en contacto Kia con Kib, y que se describe a continuación.

Una de las **fallas mayores** del distrito corresponde a una zona de daño que pone en contacto a la unidad Kib con Kia. Esto se observa en la parte central del distrito (zona 8-Figura 4-1), donde se reconocen sistemas discretos de planos de fallas inversas de rumbo general NW-SE, con valores entre N15°W a N100° W y fuerte manteo al suroeste con valores de 40 a 90° tanto al oeste como al este (Tabla IV-2). Este sistema de fallas inversas hace cabalgar la unidad Kib, más antigua, sobre la más joven, Kia, y, además, corta a los plutones de la unidad Kmm con un desplazamiento en el rumbo siniestral de ~1 km. Proponemos que este sistema de falla mayor es polifásico, al menos actuando como cabalgamiento en una primera instancia y luego cortando a los plutones con menores desplazamientos. Dado que, en general, los plutones del distrito se emplazan a lo largo del contacto entre ambas unidades volcánicas, se propone que estos intrusivos se emplazan a lo largo de este tipo de fallas mayores, como sugiere Boyce et al. (2020) más al norte. Este sistema de fallas no sería el responsable de la exhumación de los intrusivos, como si lo es, por ejemplo, la Falla Los Perros ubicada también hacia el norte (Boyce et al., 2020). Como también lo proponen estos autores, las fallas mayores habrían actuado previamente como fallas normales, limitando las cuencas extensionales del Cretácico Inferior (Cuenca de Veta Negra), reactivándose como inversas en la transición a regímenes transpresionales-compresionales en el Cretácico medio y actuando como conductos para el emplazamiento de los intrusivos (emplazamiento sintectónico).



Tabla IV-1: Mediciones de rumbo y manteos preferencial y densidad de datos de planos de estratificación para las unidades Kia y Kib.

#### 4.2. Estructuras Secundarias

Se considera en el análisis estructural del distrito los distintos sistemas de fallas correspondientes a trazas de fallas locales con desplazamientos relativos de metros a decenas de metros. Estas fueron estudiadas en las nueve zonas indicadas en la figura 4-1. En ellas se pudo medir la actitud de los planos de fallas y determinar la cinemática a partir de la observación de marcadores locales de desplazamiento, como niveles guía deformados, y también a través del estudio de indicadores cinemáticos como estrías y escalones rellenos en planos de fallas. Se considera, además, en este análisis estructural los distintos sistemas de vetas y diques, los que según observaciones de terreno se habrían formado a partir de sistemas de fracturas tensionales.

Sets de **fallas inversas secundarias**, con desplazamientos métricos a decamétricos, afloran en las zonas 6 y 9. Las de la primera zona, ubicadas en la parte central del distrito, tienen rumbos que varían de N40°W a N10°E y manteos entre 20 a 89° al W. Estas medidas se concentran en dos direcciones de rumbo preferencial NNW-SSE y NNE-SSW. Estos sets cortan y pliegan localmente a la unidad de rocas volcánicas del Cretácico Inferior alto (Kia) y parte de la unidad intrusiva Kmm. Al sur del distrito, en el sector de la Mina Cóndor (zona 9), se observa un set de fallas inversas de rumbo N20°E a N10°W con manteos de 35° a 85° E con un rumbo preferencial NNW-SSE, que cortan las rocas volcánicas de Cretácico Inferior bajo (Kib) (Tabla IV-2). Éstas generan, además, pliegues en las rocas de tipo sinclinal y anticlinal apretados con vergencia al este.

Otros sistemas de fallas secundarias, que se observaron en gran parte del distrito, son **fallas transtensivas** que presentan desplazamientos de algunos metros a decenas de metros, de cinemática **normal a normal-dextral** o **normal-siniestral**, y que afectan principalmente a las unidades de rocas volcánicas (Kib y Kia). Las fallas con cinemática cercana a la normal "pura" (algunos planos con estrías subverticales o marcadores de fallas normales), observadas en la zona 6, presentan rumbos variados que van de N70°E a N110°E, pero con una densidad mayor en la dirección EW. En la zona 4 se observaron también fallas normales de rumbo N20°E a N40°E con una dirección preferencial NE-SW, exceptuando por una medida de rumbo NW-SE. Las fallas normal-siniestral observadas en el distrito afloran en la zona 9 (sector Cóndor) y zona 1 (sector El Huracán), en ambos sectores se tiene una dirección preferencial NE-SW. En la zona 9 los rumbos van de N40°E a N70°E, y en la zona 1 de N30°E a N40°E. Por último, el sistema de falla normal-

dextral de la zona 7 presenta variaciones de rumbo que van de N70°W a N90°W, pero las medidas tienen una mayor densidad en el rumbo WNW-ESE (Tabla IV-2).

Los **sistemas de vetas** del distrito en su mayoría representan fracturas con relleno hidrotermal, algunas con mena aurífera, otras cupríferas y también mixtas de oro-cobre. Debido a la menor cantidad de medidas obtenidas, las vetas cupríferas se analizaron en conjunto para las zonas 6 y 7. A pesar de presentar una alta variación de medidas de rumbo, que van de N30°W a N80°E, éstas presentan dos direcciones preferenciales: una NW-SE, con mayor concentración de medidas, y una secundaria ENE-WSW menos abundantes. Las vetas mixtas de la zona 1 (sector El Huracán) presentan medidas de rumbo que van de N60°W a N100°W, y ciertas medidas que van en la dirección NE-SW, pero en general se concentran en el rumbo preferencial WNW-ESE. En el caso de las vetas de Oro-Cobre de las zonas 2 y 5, existe una menor cantidad de mediciones; no obstante, en ambos sectores se observa una dirección de rumbo preferencial NW-SE. Por otro lado, las vetas de oro de la zona 3 tienen una gran variación en los rumbos medidos, pero en general se concentran en los rumbos medidos, pero en general se concentran en los direcciones: (i) NW-SE con la mayor concentración de medidas que van de N20°W a N50°W; y (ii) NE-SW con menor concentración de medidas con rumbos entre N40°E a N50°E. En su mayoría las mediciones de las vetas presentan un rumbo preferencial principal que varía de NNW-SSE a WNW-ESE (Tabla IV-2).

De igual manera se consideraron en el análisis estructural los distintos **sistemas de diques**, también asociados a fracturas de tipo tensional, y con composiciones que van de andesíticos a aplíticos. Respecto a los diques de tipo andesítico, estos afloran en las zonas 1 y 6, y a pesar de la alta variación en las direcciones de rumbo, en la zona 6 la mayor densidad de medidas se concentra en la dirección NW-SE con rumbos que van de N40°W a N90°W. Por otro lado, debido a la falta de datos no se puede determinar una dirección preferencial para estos diques en la zona 1. En las zonas 3 y 8 también afloran diques aplíticos, los cuales tienen una baja cantidad de mediciones, pero se observan al menos dos rumbos preferenciales en la dirección NW-SE y en la dirección NE-SW. Para los diques daci-andesíticos y dacíticos que afloran en las zonas 8 y 9, y a pesar de las pocas mediciones, se observa un rumbo preferencial claro en la dirección NW-SE.

A partir de estos resultados, las vetas, diques andesíticos (zona 6), diques daci-andesíticos y diques dacíticos, podría indicarse una dirección de rumbo preferencial WNW-ESE a NW-SE, más allá de

las variaciones observadas. Respecto a las fallas inversas, éstas presentan rumbos preferenciales en la dirección NNW-SSE y NNE-SSW. Por su parte, la mayoría de las fallas transtensionales tienen un rumbo preferencial NE-SW, a excepción de las fallas normales de la zona 6 con un rumbo preferencial EW y las fallas normal-dextrales de la zona 7 con un rumbo preferencial WNW-ESE.

Respecto a los pliegues presentes en las unidades estratigráficas, localmente se reconocen pliegues anticlinales y sinclinales en ambas unidades, y en particular en Kib estos se encuentran apretados e inclinados al este y asociados a fallas inversas (Figuras 3-1 y 4-1).



Figura 4-1: Mapa de litologías y estructuras del Distrito Minero Tiltil (Modificado de Wall et al., 1999). Líneas continuas indican estructuras observadas y líneas segmentadas indican estructuras inferidas. En los rectángulos se indican las zonas donde se realizaron los levantamientos estructurales.

Tabla IV-2: Mediciones de rumbo y manteos preferencial y densidad de datos, por tipo de estructura y según la zona de estudio (Figura 4-1). \*Sistema de fallas inversas mayores, contacto entre Kia y Kib.

Tipo de Estructura	Rumbo Preferencial	Mediciones por Zona
Vetas Cu	NW-SE	6y7
Vetas Au Cu	NW-SE a WNW- ESE	
Vetas Au	NW-SE	
Diques Andesíticos	Sin Orientación preferencial	
Diques Aplíticos	Sin Orientación preferencial	
Diques Daci- andesíticos	NW-SE	
Diques Dacíticos	NW-SE	
Fallas Inversas	NNE-SSW a NNW-SSE	
Fallas Normales	NE-SW a EW	
Fallas Normal- Siniestrales	NE-SW	
Fallas Normal- Dextrales	WNW-ESE	

# 4.3. Cronología de la deformación

En la zona norte del distrito (zona 2) se observó que tanto diques andesíticos como vetas de cuarzo cortan a diques aplíticos (Figura 4-2-A, B).

En el sector de El Huracán (zona 1), las vetas de cuarzo mineralizadas con especularita, pirita, calcopirita y menor bornita son cortadas por fallas normales-siniestrales de rumbo NNE-SSW (Tabla IV-2). En muestras de sondajes realizados en este sector se observa que los diques andesíticos son cortados por este tipo de vetas y vetillas de pirita-calcopirita cortarían a las vetas de cuarzo (Figura 4-2-C).

En el sector de San Aurelio (zona 6) se observaron diques daci-andesíticos con mineralización diseminada intruyendo a brechas tardimagmáticas también mineralizadas.

En la zona de La Despreciada (zona 9) la mineralización ocurre como un diseminado a lo largo de la zona de falla dúctil que pone en contacto rocas volcánicas con rocas intrusivas. Esta zona de milonitas presenta características de ser sin-plutónicas (bandas de deformación que genera alineación de minerales primarios de los plutones), indicando presumiblemente que la mineralización ocurriría sincrónica a la intrusión.

A escala del mapeo distrital, se pudo observar otras relaciones de corte entre fallas como: fallas siniestrales ENE-WSW cortan a fallas inversas NS al sur del distrito (zona 9) y fallas normales EW cortan fallas inversas NS y falla dextral NNW-SSE al centro del distrito (zona 6 y 7).



Figura 4-2: Imágenes de relación de corte entre estructuras. A) Dique andesítico cortando dique aplítico sector Cuesta la Dormida B) Veta de cuarzo cortando y desplazando levemente dique aplítico sector Cuesta la Dormida. C) Dique andesítico de sector El Huracán cortado por vetilla de cuarzo la cual está cortada por vetilla de pirita-calcopirita.

# 5. ALTERACIÓN Y MINERALIZACIÓN MAGMÁTICA-HIDROTERMAL

Durante el mapeo geológico regional y el catastro de minas del distrito, se realizó un levantamiento de la ocurrencia de la mineralización y alteración de carácter magmático-hidrotermal, donde se reconocen los siguientes tipos de cuerpos mineralizados:

- Vetas de Au y Au-Cu con rellenos hidrotermales de cuarzo, especularita, pirita y calcopirita (zona 1 a 5, Figura 4-1). En general estas vetas se emplazan en los cuerpos intrusivos o en rocas volcánicas ubicadas en el contacto con los plutones.
- Brechas tardimagmáticas-hidrotermales mineralizadas predominantemente con pirita y calcopirita en su matriz (zona 4 y 6, Figura 4-1).
- **Diques daci-andesíticos** con mineralización diseminada de pirita y calcopirita tanto en su interior como en sus halos proximales (zonas 1, 6 y 8, Figura 4-1). En general estos diques presentan textura porfídica a inequigranular, con amígdalas y cavidades miarolíticas donde suele acumularse la mineralización. Estas texturas pueden ser evidencias de que estos diques se forman en el ápice o bordes de intrusivos.
- Mantos mineralizados correspondiente a niveles estratigráficos con mineralización de pirita-calcopirita diseminado y en vetillas restringidos a los mantos más permeable o favorables geoquímicamente (zona 9 y al SE de zona 8, Figura 4-1).
- Zonas de falla dúctil desarrollados en el contacto entre intrusivos y roca de caja volcánica (fallamiento sinplutónico), mineralizadas predominantemente con pirita y calcopirita a lo largo de la zona de falla (zona 9, Figura 4-1).

En superficie estos cuerpos mineralizados desarrollan un perfil de alteración supérgena que tiene en general 2 a 3 metros de potencia pero que localmente pueden superar los 20 m. En este perfil supérgeno se produce principalmente oxidación *in-situ* de sulfuros y otros minerales. Un ejemplo son las vetas cupríferas de las zonas 6 y 7 (Figura 4-1), que presentan oxidados de cobre tales como crisocola, malaquita, azurita y, en menor medida, cobre nativo. En estos perfiles supérgenos que afectan a las vetas también puede ocurrir lixiviación de sulfuros, esto está evidenciado por la presencia ocasional de calcosina y covelina secundaria. En la mayoría de estos cuerpos mineralizados se reconoce de manera preliminar una alteración hipógena de tipo potásica con halo propilítico, a las cuales se sobrepone una alteración de tipo sericítica y zonas albitizadas y silicificadas. Sin embargo, se consideraron cuatro áreas con yacimientos representativos de los cinco tipos de mineralización descritos, con el objetivo de estudiar más en detalle el control de la mineralización y los tipos de alteración magmático-hidrotermal. Las zonas escogidas son: en la zona Norte del distrito la Mina El Huracán, en la zona centro la Mina San Aurelio y en la zona sur las minas Cóndor y La Despreciada (Figura 3-1).

## 5.1. Depósitos en Vetas: Mina El Huracán

Los cuerpos mineralizados en este depósito se presentan a lo largo de siete vetas de cuarzo con anomalías de oro, cobre y fierro, las que presentan hasta medio metro de potencia y tienen una orientación predominante WNW-ESE con manteos de ~60° al norte (Figura 5-1). Estas vetas, localmente, pueden derivar en zonas con stockworks o pequeñas zonas de brechas hidrotermales. La roca de caja de estas vetas está formada por una diorita cuarcífera de anfíbola y piroxeno de grano medio que es parte de la Unidad Plutón Caleu (Kmd en figuras 3-1 y 4-1). El relleno hidrotermal de las vetas en la zona hipógena está formado por cuarzo, especularita, turmalina, epidota, pirita, calcopirita, bornita y trazas de rutilo y ceolita. Estas vetas presentan un halo de alteración hidrotermal que puede alcanzar un metro de potencia, representado por la ocurrencia de los siguientes minerales: clorita, sericita, albita y actinolita.

Al microscopio se observa que la roca de caja presenta alteración de fondo de biotita fina y sobreimposición de alteración de actinolita (Figura 5-2-B) y albita (Figura 5-2-C). La actinolita presente se observa cortada por cristales de turmalina (Figura 5-2-D), la cual también se desarrolla en fracturas (Figura 5-2-C). Por otro lado, en la roca de caja también se reconoce magnetita diseminada y alteraciones de clorita, sericita (en plagioclasas) y cuarzo, las cuales son cortadas por vetillas de cuarzo (Figura 5-2-E). La clorita se observó como desarrollo intersticial entre minerales de turmalina (Figura 5-2-F) y entre agregados/vetillas de cuarzo-especularita (Figura 5-2-G). En general se observaron vetas o brechas hidrotermales con rellenos de cuarzo, especularita, turmalina y epidota (Figura 5-2-H), donde se reconoció que, asociada a estos agregados de cuarzo (Figura 5-3-A), existe mineralización de pirita con calcopirita intersticial y desarrollo de agregados

de tennantita (rutilo) (Figura 5-3-B). La epidota se reconoce en vetillas y también alterando fragmentos de las brechas hidrotermales, se asocia a la formación de ceolita, y ambas se observan cortando la alteración de clorita (Figura 5-3-C). Como eventos finales se reconocen vetas de epidota-cuarzo cortando agregados de cuarzo (Figura 5-3-D), vetillas de cuarzo-calcita cortando agregados de cuarzo, turmalina y epidota (Figura 5-3-E), vetillas de calcita cortando agregados de cuarzo, y también suturas de calcita en vetillas de cuarzo (Figura 5-3-F).

En superficie, estas rocas y vetas presentan alteración supérgena, formadas por el desarrollo de un perfil de oxidación y lixiviación, de 1 a 5 m de potencia aproximada, y que está controlada por estructuras que afecta principalmente a los sulfuros de cobre y hierro. En la zona supérgena los sulfuros están reemplazados por crisocola, malaquita, calcosina supérgena y limonitas (hematita, goethita y menos jarosita), los que ocurren en patinas, vetas, brechas hidrotermales, planos de fracturas y fallas. En este perfil se produce la destrucción de feldespatos, los cuales forman arcillas como la caolinita.

Además, en este sector se reconocen sistemas de diques aplíticos, andesíticos y pegmatíticos sin orientación preferencial. Los diques andesíticos suelen ser sinuosos y pueden presentar variaciones texturales y composicionales a diques microdioríticos cuarcíferos o diques daciandesíticos. Algunos de estos diques, observados al interior del túnel de la mina, presentan mineralización diseminada con sulfuros de cobre (pirita-calcopirita). En algunos sondajes que cortan diques pegmatíticos de feldespato potásico, en sus halos es posible observar mineralización de pirita-calcopirita y, en menor medida, magnetita; esta última ocurre de manera diseminada y en cúmulos (Figura 5-2-A). La mineralización diseminada de cobre en diques puede indicar que ellos son la fuente de la mineralización, y que las vetas probablemente nacen de ellos actuando como canales para que circulen las fases fluidas exsueltas a partir del enfriamiento de los magmas que formaron los diques.

A partir de estas observaciones, en la Tabla V-1 se propone una tabla paragenética de minerales de alteración y mineralización de la mina El Huracán. En ella se define un evento temprano de mineralización diseminada y en cúmulos de pirita-calcopirita asociado a diques pegmatíticos de feldespato potásico (etapa pegmatítica), el cual se asocia a una alteración potásica de biotita secundaria y a magnetita diseminada encontrada en la roca de caja, esta última suele asociarse a

temperaturas altas de formación mayores a 500°C (Sillitoe, 2003; Del Real et al., 2018). Luego se produce una primera etapa de alteración hidrotermal estéril (Etapa 1), que afecta a la roca de caja y que está representada por la asociación albita-actinolita. El evento de mineralización principal se concentra en las vetas de cuarzo auríferas de orientación preferencial WNW-ESE y manteo fuerte al norte (Etapa 2). El relleno hidrotermal de estas vetas corresponde principalmente a cuarzo, especularita y turmalina, y con mineralización de pirita, calcopirita y menor bornita; además, en este evento se presentan minerales traza como la tennantita y ceolita. Los resultados de los análisis químicos indican valores de leves medias de Cu de 2.5% y presencia anómala de Ag (0.9-7.7 g/t) y Au (3 g/t promedio), donde la mineralización de plata posiblemente está contenida en los sulfuros de cobre y hierro, y el oro como partículas de oro nativo en el cuarzo y/o en la pirita. Se obtuvieron, además, valores promedio de contenido de Fe de 12.2% (máximo de 27.2%) y anomalías de Co de 47.3 ppm promedio (máximo de 149.7 ppm). En particular la epidota se observa principalmente como un relleno hidrotermal de estas brechas y vetas, y la alteración de clorita se desarrolla intersticialmente entre agregados de turmalina. Como evento residual a la mineralización principal de la etapa 2 se observan vetas subsidiarias de hierro (hematitaespecularita), donde además persiste la alteración de clorita-epidota y cuarzo hidrotermal. La última etapa de alteración hidrotermal hipógena (Etapa 3), está representada por la ocurrencia de vetillas de cuarzo-calcita y calcita, y por silicificación moderada de la roca de caja.



Figura 5-1: Mapa Geológico y Modelo 3D de la Mina El Huracán. A: Mapa geológico de la Mina El Huracán indicando ubicación de vetas y diques. Se indica, además, collar y dirección de inclinación de sondajes, y traza de Sección A-A'. B: Vista al SE del Modelo 3D de las 7 vetas del proyecto, cortadas por sistema de falla de rumbo N10E. C: Sección A-A' Norte-Sur vista hacia el Este de vetas en profundidad.



Figura 5-2: Imágenes de cortes transparentes, cortes pulidos y muestras de sondajes de la Mina El Huracán. Cpy: calcopirita, Fk: feldespato potásico, Act: actinolita, Tur: turmalina, Qz: cuarzo, Ser: sericita, Cl: clorita, Esp: especularita, Ep: epidota, Px: piroxeno. A) Imagen macroscópica de sondaje de diques finos de feldespato potásico mineralizados. B) Microfotografía en nicoles cruzados de Plg fresca y Px con reemplazo intenso por Act y desarrollo de Bt secundaria. C) Microfotografía en nicoles cruzados

de Act cortada por cristales de Tur. D) Microfotografía en nicoles cruzados de Plg fracturada parcialmente albitizada y desarrollo de Tur en fracturas. E) Microfotografía en nicoles cruzados de roca alterada de Cl, Qz y Ser cortada por vetilla de Qz. F) Microfotografía en nicoles cruzados de agregados aciculares de Tur

con desarrollo de Cl intersticial. G) Microfotografía en nicoles paralelos de agregado de Qz-Esp y desarrollo de Cl intersticial. H) Microfotografía en nicoles cruzados de brecha hidrotermal con matriz de Qz, Tur y Esp y fragmentos de Ep fina y Qz.



Figura 5-3: Imágenes de cortes transparentes y pulidos y muestras macroscópicas de sondajes de sector El Huracán. Cpy: calcopirita, Py: pirita, Tn: tennantita, Tur: turmalina, Qz: cuarzo, Cl: clorita, Ep: epidota, Ceo: ceolita, Cal: calcita. A) Microfotografía de corte pulido en nicoles paralelos de entrecrecimiento de Py euhedral y Cpy. B) Microfotografía en nicoles paralelos de cristales de Py con Cpy intersticial y desarrollo de agregado de Tn. C) Microfotografía en nicoles cruzados de agregado de Ceo con Ep (tipo alanita) en roca cloritizada. D) Microfotografía en nicoles cruzados de vetilla de Qz cortada por microvenilla de Ep. E) Microfotografía en nicoles cruzados de parte de fragmento de Ep y parte de matriz

con Tur y Qz, ambas cortadas por microvetilla de Cal y Qz. F) Microfotografía en nicoles cruzados de vetilla de Qz con sutura central de Cal cortando a microvenilla de Qz-Cal.

Tabla V-1: Paragénesis Mina El Huracán. Resumen de minerales de alteración y mineralización presentes en cada uno de los eventos de alteración y mineralización magmático hidrotermal, basado en relaciones de corte de vetas y brechas y superposición de alteraciones. Grosor de líneas representa la abundancia relativa de los minerales. Líneas discontinuas indica presencia inferida en esa etapa del mineral.

Mineral	Etapa Pegmatítica	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Cuarzo				
Biotita				
Sericita				
Albita				
Clorita				
Epidota				
Turmalina				
Calcita			I	
Actinolita			l.	
Tennantita		   		
Hematita (Especularita)				
Magnetita				
Bornita				
Calcopirita				
Pirita				
Ceolita				
	Alteración	Alteración	Alteración	Alteración
	Potásica (Bt	Sódica-	Sericítica (Ser	de Cal-Oz en
	secundaria) v	Cálcica. Alb v	y Cl).	vetillas.
	posible Mt	act en	Mineralización	Silicificación
Observaciones etapas y	diseminada en	plagioclasas.	de Py-Cpy (Bo)	de la roca.
eventos	roca de caja.		en vetas de Qz-	
	Mineralización		Esp, Tur y Ep.	
	de Py-Cpy		Presencia de	
			rutilo y ceolita	
L	1	1	1	1

#### 5.2. Depósitos en Brechas Tardimagmáticas-Hidrotermales: Mina San Aurelio

En el sector de la mina San Aurelio afloran dioritas de anfíbola a monzodioritas cuarcíferas de anfíbola y biotita de la unidad distrital Kmm (Figuras 3-1 y 4-1), que intruyen a rocas volcánicas de la unidad Kia (Figura 5-4). Brechas tardimagmáticas-hidrotermales (Kbtm) con clastos de las rocas de caja de 1 a 20 cm de diámetro que están inmersos en una matriz magmática de composición andesítica o diorítica intruyen a estas rocas. Estas brechas ocasionalmente presentan texturas de flujo formadas por fenocristales de plagioclasas orientados y amígdalas elongadas rellenas con clorita, sílice y sulfuros de hierro y cobre. La mineralización hipógena presente consiste en pirita, calcopirita y bornita, y ocurre tanto en relleno de amígdalas y vetillas como en cúmulos y diseminados finos desarrollados en la matriz y los clastos de las brechas (Figura 5-5-F). La alteración hidrotermal que afecta a las rocas de caja está formada por minerales como cuarzo, sericita, albita, clorita, epidota, turmalina, especularita, magnetita y calcita, los que se presentan con distinta intensidad.

Al microscopio la roca de caja plutónica, tanto en los afloramientos como en los clastos de las brechas, se encuentra mayormente sericitizada y silicificada. Sin embargo, se reconoce una alteración de fondo representada por plagioclasas parcialmente albitizadas (Figura 5-5-A) y descalcificadas (desarrollo de pequeños agregados de calcita a su alrededor). Las amígdalas se observan con relleno de clorita, pirita, calcopirita, bornita y agregados de magnetita-especularita, todos entrecrecidos (Figura 5-5-E, C, F). Un segundo evento de relleno de estas amígdalas está dado por la presencia de calcedonia y clorita. La clorita, además, se observa diseminada en los clastos formando agregados junto con cristales finos de turmalina (Figura 5-5-D). Las alteraciones mencionadas están cortadas por vetillas de calcita que presentan contenidos variables de cuarzo (Figura 5-5-B, G, H).

En base a estas observaciones se propone la siguiente tabla paragenética para la Mina San Aurelio (Tabla V-2). Los primeros eventos de alteración de la roca de caja (Etapa 1) son estériles y están relacionados con el desarrollo de clorita en vetillas y amígdalas, y descalcificación de plagioclasas produciendo calcita y albita. Este evento puede ser previo al desarrollo de las brechas tardimagmáticas-hidrotermales. Posteriormente se reconoce el evento de mineralización principal relacionado con la formación de pirita, calcopirita y menor bornita (Etapa 2) que ocurre principalmente en las brechas (Kbtm)como relleno de amígdalas, en cúmulos y diseminado fino

tanto en matriz como en clastos. La mineralización también ocurre como relleno en vetillas junto con cuarzo, clorita, epidota, turmalina, hematita y magnetita. Los análisis químicos para las brechas tardimagmática-hidrotermal en la zona hipógena indican leyes medias de 0.4% Cu (máximo de 7%), valores variables de Ag (0.05 a 0.6 g/t) y contenidos promedio de Fe de 6.3% (máximo de 9.4%). Luego, como eventos tardíos de alteración hipógena (Etapa 3) se reconoce: (1) clorita junto a cuarzo (calcedonia), ocurriendo diseminados y en cúmulos, amígdalas y vetillas; y (2) calcita, calcita-cuarzo y posible albita, ocurriendo principalmente en vetillas.

Las brechas tardimagmáticas-hidrotermales (Kbtm) se encuentran cortadas por sets de diques andesíticos a daci-andesíticos y dacíticos (Figura 5-4). Los primeros presentan una textura porfídica fina con una masa fundamental negro verduzco y ocasionales amígdalas rellenas de epidota, y presentan orientaciones de rumbo de N40° a 90°W y manteos que varían de subverticales a 30° SW. Los segundos (Khd) tienen textura porfídica fina y presentan ocasionales ojos de cuarzo y fantasmas de anfíbola; con una orientación EW y manteos subverticales. En uno de los sondajes se reconoce mineralización diseminada y en cúmulos de pirita-calcopirita en uno de estos diques daci-andesíticos, e indican leyes medias de 0.2% Cu y 0.05 g/t Ag.

Desde superficie hasta varios metros en profundidad (5 a 20 m, según control estructural), se desarrolla un perfil de alteración supérgena debido a oxidación y lixiviación de sulfuros de hierro y cobre. Aquí se reconoce una zona con crisocola, malaquita, azurita y calcosina supérgena, acompañada con limonitas (jarosita y goethita). Estos minerales ocurren principalmente en patinas a lo largo de fracturas y planos de falla con leyes de hasta ~7% Cu. En esta zona de alteración supérgena ocurre, además, la destrucción de feldespatos en minerales de arcilla (probablemente Caolinita).



Figura 5-4: Mapa Geológico y sección de Modelo 3D de Mina San Aurelio. A) Mapa de litologías y cuerpos mineralizados y proyección de sondajes Mina San Aurelio, sección B-B'. B) Sección B-B' NNE-SSW de modelo 3D.



Figura 5-5: Imágenes de cortes transparentes, cortes pulidos y muestras de sondajes de la Mina San Aurelio. Ser: sericita, Tur: turmalina, Plg: plagioclasa, Ep: epidota, Qz: cuarzo, Cl: clorita, Cal: calcita,
Cpy: calcopirita, Mg: magnetita, Hm: hematita. A) Microfotografía en nicoles cruzados de roca seritizada y paracilamente albitizada (en Plg) y Tur en cavidades. B) Microfotografía en nicoles cruzados de veta de Qz, Ep y Cl, cortada por microvenilla de Cal y menor Qz. C) Microfotografía en nicoles cruzados de amígdala rellena con calcedonia y Cl. D) Microfotografía en nicoles cruzados de Cl con

desarrollo de cristales finos de Tur. E) Microfotografía de corte pulido en nicoles paralelos de entrecrecimiento de Hm-Mg con burbujas de Cpy. F) Imagen macroscópica de sondaje de brecha tardimagmática-hidrotermal, en clasto se observan amígdalas mineralizadas con Py-Cpy y rellenas de Cl.
G) Microfotografía en nicoles cruzados de microvenilla de Qz y Cal cortando alteración sericítica. H) Microfotografía en nicoles cruzados de microvenilla de Cal cortando alteración sericítica y desarrollo de Tur en cúmulos.

Tabla V-2: Paragénesis Mina San Aurelio. Resumen de minerales de alteración y mineralización presentes en cada uno de los eventos de alteración y mineralización magmático-hidrotermal, basado en relaciones de corte de vetas y brechas y superposición de alteraciones. Grosor de líneas representa la abundancia relativa de los minerales. Líneas discontinuas indica presencia inferida en esa etapa del mineral.



# 5.3. Depósitos en Zonas Miloníticas: Mina La Despreciada

En esta mina la mineralización principal de cobre ocurre a lo largo de una zona de milonitas que pone en contacto la franja occidental de rocas volcánicas (Kib) con las monzodioritas cuarcíferas de anfíbolas y biotitas (Kmm) (Figuras 3-1 y 4-1 y 5-6). En el contacto las rocas volcánicas se encuentran plegadas y presentan un halo de metamorfismo de contacto representado por el

desarrollo de un hornfeld de biotita magnetita que hace presumir que la milonita es sincrónica con el emplazamiento del Plutón. La zona de cizalle dúctil está formada por una roca foliada que presenta biotita secundaria, alteraciones de clorita-epidota y mineralización de pirita, calcopirita, bornita, hematita y magnetita. Las medidas de foliación en superficie indican que la milonita en superficie tiene una orientación predominante N25°W y manteo subvertical a 75°SW.

Al microscopio, la milonita está formada por bandas de biotita secundaria, posibles fantasmas de actinolita, magnetita y plagioclasa recristalizada a las cuales se sobrepone una alteración hidrotermal de cuarzo, sericita, albita, clorita, epidota y rutilo. La mineralización hipógena que acompaña a estos minerales de alteración es de pirita, calcopirita, bornita y hematita (Figura 5-7-A). La clorita fina es la que reemplaza a la biotita secundaria (Figura 5-7-B). Se observan intercalaciones de bandas de magnetita con reemplazo parcial por hematita (Figura 5-7-C). Se reconocen eventos tardíos de vetillas y amígdalas de calcita a calcita-cuarzo, y vetas de cuarzo con halo de albita-epidota que son posteriores a la alteración que afecta a las milonitas (Figura 5-7-D, E). Algunas de las vetas de cuarzo se encuentran cizalladas o deformadas (Figura 5-7-F), esto indicaría que la zona de falla representada por la milonita tendría reactivaciones menores postminerales o contemporáneas al desarrollo de la alteración hidrotermal, evidencia de una mineralización sintectónica y sinmagmática.

Se mapeo un sondaje realizado con el objetivo de cortar en profundidad esta milonita mineralizada como se indica en la figura 5-6. El objetivo del sondaje no se cumplió y se puede mapear a lo largo de él cómo la monzodiorita cuarcífera (unidad Kmm) presenta variaciones composicionales a monzodioritas y gabros en profundidad como se interpreta en la figura 5-6-B. A lo largo de gran parte del sondaje se reconoció una mineralización de baja ley diseminada, en cúmulos y en vetillas de pirita-calcopirita con halos de sericita-epidota que pueden representar el halo mineralizado de la milonita, lo que permite interpretar que el manteo de la milonita disminuye haciéndose más horizontal (Figura 5-6-B).

La tabla paragenética de la mina La Despreciada (Tabla V-3) indica un evento temprano asociado al metamorfismo de contacto y dinámico, ambos sincrónicos, con formación de biotita secundaria, magnetita y posiblemente actinolita en bandas. Como evento de la mineralización principal se reconoce una etapa (etapa 1) correspondiente a mineralización de pirita-calcopirita, menor bornita

y hematita con alteraciones de cuarzo, albita, clorita, epidota, sericita y rutilo. La etapa 2, estéril, está representada por vetillas de calcita y cuarzo-calcita que puede desarrollar halos de albitaepidota.

La alteración supérgena, observada en superficie, genera oxidados de cobre como crisocola y malaquita, y limonitas. Además, se reconocen cuerpos mineralizados de distintos tipos periféricos a las milonitas formados por mantos mineralizados de cobre de rumbo NNW-SSE que corresponden a medidas de estratificación de las rocas volcánicas y volcanosedimentarias de Kib.



Figura 5-6: Mapa Geológico y sección de Modelo 3D de Mina La Despreciada. A) Mapa geológico de la Mina La Despreciada, proyección de sondaje ST-08 y sección C-C'. B) Sección C-C' SW-NE de modelo 3D más proyección de sondaje.



Figura 5-7: Imágenes de corte transparente y pulido y muestra macroscópica de sondaje de sector La Despreciada. Plg: plagioclasa, Fk: feldespato potásico, Py: pirita, Cpy: calcopirita, Cl: clorita, Mg:
magnetita, Hm: hematita, Cal: calcita. A) Imagen de muestra macroscópica, bandas de cizallamiento dúctil con mineralización de Py-Cpy. B) Microfotografía en nicoles paralelos de presencia de Cl en bandas subparalelas y como reemplazo parcial de Bt secundaria. C) Microfotografía de corte pulido en nicoles paralelos de Mg con reemplazo parcial de Hm. D) Microfotografía en nicoles cruzados de banda irregular y sinuosa con desarrollo de Cal. E) Imagen de muestra macroscópica de sondaje, veta de cuarzo con desarrollo de borde de albita. F) Imagen de muestra macroscópica de sondaje, veta de cuarzo cizallada.
Tabla V-3: Paragénesis Mina La Despreciada. Resumen de minerales de alteración y mineralización presentes en cada uno de los eventos de alteración y mineralización magmático hidrotermal, basado en relaciones de corte de vetas y brechas y superposición de alteraciones. Grosor de líneas representa la abundancia relativa de los minerales. Líneas discontinuas indica presencia inferida en esa etapa del mineral.

Mineral	Etapa Metamorfismo de Contacto	Etapa 1	Etapa 2
Cuarzo Biotita Sericita Albita			
Clorita			
Calcita			
Actinolita			
Hematita			
Magnetita			
Calcopirita			
Pirita		1	
Observaciones etapas	Alteración Potásica. Desarrollo de Bt secundaria y Mt en bandas.	Alteración Sericítica. En halos de vetas y diseminada de Cl, Ep, Ser y Hm; mineralización de Py-Cpy (Bo)	Alteración de Cal-Qz en vetillas rectas de Cal, Qz y Alb

## 5.4. Depósitos en Mantos: Mina Cóndor

En esta mina afloran rocas estratificadas volcánicas y volcanosedimentarias (Kib) de la franja occidental (Figuras 3-1 y 4-1). En la figura 5-8-A se pueden observar los tres tipos de rocas que se reconocen dentro de la unidad: (1) Kib(s): unidad sedimentaria (lutitas calcáreas negras), (2) Kib(vs): unidad volcanosedimentaria (brechas sedimentarias con alto componente volcánico) y (3) Kib(v): unidad volcánica (lavas y piroclastos). Los estratos de esta unidad forman un monoclinal inclinado al este y localmente presenta pliegues anticlinales con eje de rumbo NNW-SSE, asociados a fallas inversas discretas con vergencia al este. Las medidas de estratificación indican orientaciones de rumbo que varían de N05°E a N35°W y manteos entre 45° y 86° al este (Fig. 5-8-B).

En este sector se reconocen hasta 11 mantos mineralizados con óxidos de Cu en superficie. La mineralización ocurre en el contacto entre las capas de rocas volcánicas (Kib(v)) y los estratos de rocas sedimentarias (Kib(s)), concentrándose el mineral en las rocas sedimentarias (Figura 5-9) con anchos promedio de 0,5 m y máximos de 1,5 m. La mineralización de los mantos en la zona hipógena corresponde a pirita-calcopirita. Los minerales de alteración que afectan a estas rocas, y en particular en los mantos mineralizados, corresponden a biotita secundaria, clorita, epidota, sericita, cuarzo y actinolita.

En microscopio se observa que los mantos presentan una alteración de tipo potásica marcada por la presencia de biotita secundaria, la que afecta tanto a la matriz como a los clastos de las rocas sedimentarias (Figura 5-10-A, B). Sobre el evento anterior (alteración potásica), se desarrollaría una mineralización de pirita-calcopirita en mantos, asociada a la alteración de sericita, clorita, epidota y actinolita (Figura 5-10-C, D); en particular, en este evento la epidota ocurre en cúmulos que en parte altera a los clastos de la roca sedimentaria.

En superficie, en la zona supérgena que alcanza un par de metros de potencia, se observa crisocola, malaquita y sulfuros supérgenos como calcosina y covelina. Se reconocen, además, óxidos de manganeso en pátinas a lo largo de fracturas, limonitas y arcillas (Figura 5-9-A).

Los mantos de cobre en superficie presentan leyes medias de Cu de 8.9% (máximo de 20%), un promedio de Ag de 39 g/t (máximo de 72.8 g/t), anomalías de Au (0.06 a 0.2 g/t) y contenidos promedio de Fe de 4.2% (máximo de 5.3%).



Figura 5-8: Mapa Geológico y Modelo 3D de mantos de la Mina Cóndor. A) Mapa geológico de detalle de sector Cóndor, proyección de sondajes perforados y área de bloque de modelo 3D. (s): estrato

sedimentario, (vs) estrato volcano-seidmentario, (v) estrato volcánico. B) Vista en perspectiva hacia el suroeste de modelo de mantos 3D, sector Sur.



Figura 5-9: Imágenes de terreno en sector Cóndor. A) Contacto de estrato sedimentario mineralizado (manto) con estrato volcánico. B) Relación de manto mineralizado con falla inversa con mineralización.



Figura 5-10: Microfotografía de corte transparente de sondaje de sector Cóndor. Bt: biotita, Ep: epidota,
Act: actinolita. A) Abundante Bt secundaria fina (posible esmectita, mezcla de filosilicatos arcillosos)
como parte de la matriz, nicoles cruzados. B) Agregado de Bt secundaria como parte de fragmento,
nicoles paralelos. C) Agregado de Ep como parte de fragmento en granulometría más gruesa, nicoles
cruzados. D) Bt como parte de fragmentos y presencia de Act, nicoles cruzados.

# 6. **DISCUSIONES**

# 6.1. Eventos de deformación y regímenes tectónicos relacionados

Respecto a las actitudes de los distintos tipos de estructuras del distrito (Tabla IV-2), estas pueden indicar la dirección de deformación local o regional en el momento de su formación y permiten relacionarlas con el régimen tectónico durante ese periodo de tiempo (e.g. Muñoz-Saez et al., 2014; Piquer et al., 2021). Además, las relaciones de corte permiten determinar la temporalidad relativa de formación de estas estructuras.

## • Eventos previos o sincrónicos con el emplazamiento del Plutón Caleu

Las fallas inversas mayores o de primer orden son previas o sincrónicas al emplazamiento del Plutón Caleu (100 a 94 Ma) y tienen una dirección de rumbo preferencial NW-SE, que indicarían un acortamiento en dirección NE-SW a E-W. Este grupo de fallas puede estar relacionadas con la inversión de la cuenca Veta Negra, las cuales previamente pudieron haber actuado como fallas normales reactivándose como fallas inversas (Boyce et al., 2020). Esto es coherente con las evidencias regionales que indican una transición a un régimen de transpresión a compresión en el límite Cretácico Inferior - Cretácico Superior (e.g. Veloso et al., 2016; Richards et al., 2017; Boyce et al., 2020).

## Eventos sinminerales o tardimagmáticos del Plutón Caleu

Las vetas y los diques tienen una dirección de rumbo preferencial NW-SE y presentan características de fracturas tensionales. Estas fracturas probablemente representan un acortamiento en la misma dirección ocurrida durante la etapa tardimagmática del plutón, ocurrida aproximadamente a los 94 Ma (Molina et al., 2015). En consecuencia, las vetas y diques mencionados se formaron bajo un mismo régimen tectónico de dirección de acortamiento NW-SE, lo cual es coherente con las evidencias regionales que indican una transpresión siniestral durante la transición del Cretácico Inferior al Cretácico Superior (e.g. Mpodozis & Allmendinger, 1993; Richards et al., 2017).

## • Eventos postminerales

Las fallas inversas secundarias son post minerales y por lo tanto posteriores a la etapa tardimagmática del Plutón Caleu, tienen una dirección de rumbo preferencial NNW-SSE, e indicarían un acortamiento en dirección WSW-ENE.

Los otros sistemas de fallas secundarias y post-minerales corresponden a: (1) fallas normales con dos direcciones de rumbo preferencial, E-W y NE-SW; (2) fallas normales-siniestrales de rumbo preferencial NE-SW; y (3) fallas normales-dextrales de rumbo preferencial WNW-ESE. Consideramos que todas estas fallas podrían representar una última etapa de deformación, con acortamiento en dirección E-W a NE-SW para las fallas normales y normales-siniestrales, y dirección WNW-ESE para las fallas normales-dextrales. Esta deformación no necesariamente representa condiciones regionales y podrían obedecer a ajustes locales donde las fallas normales, normales-siniestrales y normales-dextrales actuarían como fallas de transferencia de la deformación desarrollada a lo largo de las fallas inversas, como las que se observan en la mina Cóndor (Figura 5-8).

## 6.2. Eventos de alteración y mineralización

A partir de las tablas paragenéticas obtenidas para cada depósito se puede observar que, a pesar de que la mineralización ocurre de diferentes formas, la mayoría de estos presentan la misma secuencia general de etapas de alteración y mineralización. Los eventos de mineralización y alteración hidrotermal que se describen en la mayoría de los depósitos del distrito son, desde el más temprano al más tardío:

#### Etapa de Alteración Potásica, baja ley

Se reconocen en superficie como zonas rosáceas por la presencia de feldespato potásico, y también, zonas ennegrecidas por la presencia de biotita secundaria y magnetita con trazas de pirita y calcopirita diseminada. En la mina El Huracán ocurre en cúmulos que alteran la roca de caja y diseminado en diques pegmatíticos y en su halo proximal. En la mina La Despreciada se observa el desarrollo de biotita secundaria con trazas de pirita y calcopirita asociado al emplazamiento sintectónico de intrusivos. En la mina Cóndor también se observa desarrollo de biotita secundaria, como alteración potásica, en fragmentos y matriz de la roca de caja sedimentaria.

Esta alteración se relaciona con una etapa de alta temperatura (>500°C) (Sillitoe, 2003; Del Real et al., 2018) durante el desarrollo de enfriamiento tardimagmático del Plutón Caleu.

Es importante destacar que este evento de alteración podría confundirse con zonas de metamorfismo o aureolas de contacto (hornfels de biotita) estériles que se generan en las rocas volcánicas y volcano-sedimentarias que actúan como roca de caja de rocas plutónicas (Aberg et al., 1984; Morata et al., 1997; Aguirre et al., 1999; Fuentes et al., 2005; Oliveros et al., 2008b). Un elemento importante de diferenciación es la presencia de mineralización de baja ley, la que se encuentra ausente en los hornfels de biotita.

# • Etapa de Alteración Albita-Actinolita (Sódica), estéril

Previo a la mineralización principal, en El Huracán, San Aurelio y La Despreciada se reconocen alteraciones de albita, clorita y actinolita relacionada con una etapa prograda de aumento de temperatura. En particular las alteraciones de albita y actinolita no se observaron asociadas a minerales metálicos como sulfuros de cobre, a diferencia de la alteración de clorita que, si se asocia a minerales como pirita y calcopirita, pero en una etapa más tardía.

# • Etapa de Alteración Sericítica, mineralización principal

La mayoría de los depósitos minerales estudiados presentan una etapa de alteración y mineralización caracterizada por vetas de cuarzo, hematita, pirita, calcopirita, menor bornita y turmalina, con halos de clorita, epidota y sericita. En particular se reconocen minerales accesorios como rutilo en la mina San Aurelio y El Huracán y actinolita en El Huracán y Cóndor. Es importante notar que la mineralización de pirita-calcopirita de la mina Cóndor se asocia a las alteraciones mencionadas pero no a la hematita ni turmalina, característica diferenciadora de los demás depósitos.

Se propone que esta etapa de alteración está relacionada con la formación de vetas durante una fase hidrotermal de menor temperatura dentro de la evolución tardimagmática del Plutón Caleu, ya que la precipitación de sulfuros como pirita y calcopirita suele ocurrir luego de la evolución y enfriamiento de la etapa de alta temperatura donde se formó la magnetita (Sillitoe, 2003; Del Real et al., 2018).

• Etapa de Alteración Cuarzo-Calcita, estéril

En todos ellos, excepto en la mina Cóndor, como etapas tardías de alteración hipógena se observa un evento final de alteración diseminada y/o en vetillas de cuarzo-calcita y calcita, y en algunos depósitos silicificación de la roca de caja y menor albita.

## 6.3. Modelos de yacimientos

En la figura 6-1 se presenta una sección esquemática de los cinco estilos de mineralización estudiados (Capítulo 4) y cómo se relacionan con la geología distrital. En general los estilos de mineralización del Distrito Minero Tiltil se asemejan a lo definido en yacimientos de tipo IOCG y/o estratoligados de Cu-(Ag) reconocidos a lo largo de la Cordillera de la Costa de los Andes Centrales, los cuales se asocian con la circulación de fluidos magmáticos e hidrotermales relacionados con plutones dioríticos a granodioríticos de la franja metalogénica Cretácica (Rivano et al., 1993; Maksaev & Zentilli, 2002; Barra et al., 2017; Águila, 2019), provenientes de magmas primitivos, pobres en azufre y de fuente mantélica, (Sillitoe, 2003; Del Real et al., 2018), que se generan en regímenes tectónicos transtensivos a transpresivos (Heuser et al., 2015), en torno al cual se desarrollan los depósitos minerales del Distrito Minero Tiltil, que se habrían emplazado durante la transición de un régimen tectónico extensional a uno compresional durante el Cretácico medio.

En los yacimientos IOCG se suele observar mineralización de calcopirita y subordinada pirita y en pocos casos bornita, principalmente en vetas o brechas hidrotermales con hematita-magnetita (Sillitoe, 2003; Barra et al., 2017; Heuser et al., 2020) donde la mineralización de Cu está contenida en la calcopirita y la de Au en el cuarzo y/o en la pirita. En los estratoligados de Cu-(Ag) la mineralización es de calcopirita, bornita, calcosina, pirita y menor digenita y covelina; la que suele presentarse en cuerpos de vetas, en brechas magmáticas-hidrotermales y en capas o mantos de litologías permeables (Boric et al., 2002; Tristá-Aguilera et al., 2006; Townley et al., 2007; Oliveros et al., 2008), donde la mena de Ag suele estar contenida en los sulfuros de cobre (e.g. bornita, calcosina) (González, 2018).

Al analizar las asociaciones de minerales de mena observados en los depósitos del Distrito Minero Tiltil, podemos observar que los depósitos El Huracán, San Aurelio y La Despreciada, donde la mineralización de pirita-calcopirita (menor bornita) está asociada con hematita y/o magnetita, es muy a fin a la presente en depósitos de tipo IOCG, como por ejemplo Manto Verde (Rieger et al., 2010). Esto es diferente a lo que ocurre en el depósito de Cóndor donde no se observa que los sulfuros de cobre (e.g. calcopirita) estén asociados con hematita ni magnetita. En este último lugar no se encontró evidencia de calcosina primaria o hipógena en superficie, sin embargo, no se puede descartar su presencia en profundidad como ocurre comúnmente en los yacimientos de tipo estratoligados de Cu-(Ag).

A pesar de que en el depósito de la mina Cóndor no se han observado minerales como calcosina hipógena, digenita y covelina, por las características descritas, de bajos contenidos de Fe (4.15% promedio), altos contenidos de Cu (8.9% promedio) y Ag (39 g/t promedio), y su geometría de mantos, se acercaría a un depósito tipo estratoligado de Cu-(Ag). En los depósitos de San Aurelio y La Despreciada, sus características indican que la mineralización es principalmente de Cu y los bajos contenidos de Fe (6.3% promedio) en San Aurelio permiten definirlos como parte de la raíz de un sistema de tipo estratoligado de Cu-(Ag) o como una variante superficial de un sistema IOCG (Vivallo & Henríquez, 1998; Haynes, 2000; Orrego et al., 2000; Sillitoe & Perelló, 2005). Sin embargo, la misma cámara magmática asociada con el Plutón Caleu, genera magmas que permiten formar ambos tipos de depósitos minerales, como lo sería El Huracán, el cual por sus altos contenidos de Fe (12.2% promedio), y su tipo de ocurrencias minerales en forma de vetas y brechas hidrotermales de cuarzo-especularita se acercaría a un yacimiento tipo IOCG.

Respecto a los minerales de alteración observados en los depósitos del distrito (mayoritariamente en El Huracán, San Aurelio y La Despreciada), estos presentan variados minerales de los que suelen observarse en depósitos tipo IOCG como Dominga, Candelaria o Manto Verde. Algunos de estos corresponden a sericita, clorita, albita, actinolita, biotita, epidota, cuarzo, turmalina, calcita, rutilo o tennantita, ceolita, hematita y magnetita, luego los minerales que no se observaron en el distrito pero que son comunes a este tipo de depósitos corresponden a feldespato potásico, pirrotina, anhidrita, mushketovita, allanita, ilmenita, molibdenita, escapolita y apatito (Rieger et al., 2010; Veloso et al., 2016; Del Real et al., 2018; Heuser et al., 2020). Por otro lado, si

comparamos con lo observado en depósitos tipo estratoligado de Cu-(Ag) como El Soldado o Lo Aguirre, los minerales comúnmente observados en estos depósitos y que también se observaron en el distrito son calcita, albita, clorita, epidota, rutilo, sericita, cuarzo, turmalina, actinolita, ceolita, hematita y magnetita (estos últimos dos en menor concentración que la encontrada en los IOCG), luego los minerales de alteración que no se observan en el distrito pero que suelen estar en este tipo de yacimiento es la titanita y el feldespato potásico (Boric et al., 2002; Cornejo et al., 2006; Ramirez, 2006; 2008; Townley et al., 2007; Oliveros et al., 2008; Kojima et al., 2009).

En particular a las etapas de alteración definidas, se ha observado ciertas similitudes con depósitos tipo IOCG (e.g. Candelaria, Dominga y Manto Verde), una de estas es la etapa temprana de alta temperatura de biotita secundaria y magnetita que antecede a la etapa de mineralización principal y generación de sulfuros como pirita y calcopirita (e.g. Del Real et al., 2018), tal como se observa en las minas de La Despreciada y El Huracán. También los IOCGs suelen presentar etapas tardías o de baja temperatura de cuarzo y calcita, como lo sucedido en todos los depósitos del distrito exceptuando la mina Cóndor, con la particularidad que estas etapas suelen presentar mineralización de pirita-calcopirita (Rieger et al., 2010; Veloso et al. 2016; Del Real et al., 2018; Heuser et al., 2020), lo cual no ocurre según lo observado en el distrito.

La distribución espacial de los yacimientos muestra un grupo de depósitos localizados en los cuerpos plutónicos o muy cerca de sus contactos, en cambio hay otros que se desarrollan en la periferia de los plutones, en la roca de caja volcánica de los intrusivos (Figura 6-1). En general los yacimientos de tipo estratoligados de Cu-(Ag) se ubican en zonas periféricas, a cientos de metros, de los plutones emplazados, en zonas más distales que los yacimientos tipo IOCG (Maksaev & Zentilli, 2002; Sillitoe, 2003; Oliveros et al., 2008b; Barra et al., 2017; Águila, 2019).

Los localizados en los plutones, por ejemplo, los cuerpos mineralizados de la mina El Huracán, se asemejan a lo ocurrido en Manto Verde donde la mineralización, a diferencia de otros yacimientos tipo IOCG donde existe un control estratigráfico mayor (e.g. Candelaria), ocurre principalmente en cuerpos intrusivos (Rieger et al., 2010). Luego en los casos de las minas San Aurelio y La Despreciada, la mineralización también se aloja principalmente en la roca intrusiva, pero cercanas al contacto con la roca de caja volcánica-sedimentaria, más similar a lo descrito en Candelaria (Del Real et al., 2018). En cambio, los depósitos minerales ubicados en la periferia, alejados de

los contactos con los plutones, como por ejemplo la Mina Cóndor con mantos mineralizados ubicados aproximadamente entre 100 m y 700 m de la unidad intrusiva, presentan características de estratoligados de Cu-(Ag), donde la mineralización ocurre en la intercalación de estratos en la roca de caja volcano-sedimentaria cloritizada, muy similar a lo que ha sido descrito por Boric et al. (2002) en la mina El Soldado. En particular este último tipo de yacimiento suele ocurrir en intercalaciones de lavas básicas con rocas sedimentarias carbonatadas (Maksaev & Zentilli, 2002).



Figura 6-1: Modelo esquemático de cuerpos mineralizados estudiados en el Distrito Minero Tiltil. Asociaciones y ocurrencias de mineralizaciones y alteraciones. En el distrito se reconocen cinco tipos de cuerpos mineralizados (y ocurrencia), sistemas de vetas de Au y Au-Cu (relleno hidrotermal), diques daci-

andesíticos (diseminado en su interior y halo), brechas hidrotermales-tardimagmáticas (en matriz), zonas de falla dúctil o contactos cizallados (diseminado a lo largo de la zona de falla) y mantos mineralizados (diseminado y en vetillas en los mantos).

# 7. CONCLUSIONES

En el Distrito Minero Tiltil se reconocen cinco tipos de cuerpos mineralizados de tipo magmáticohidrotermal: (1) vetas de Au y Au-Cu; (2) diques daci-andesíticos mineralizados; (3) brechas hidrotermales-tardimagmáticas, (4) zonas de falla dúctil y (5) mantos mineralizados.

La mineralización y alteración hipógena desarrollada en es estos yacimientos corresponde, en términos generales, a la sobre imposición de los siguientes eventos: 1) alteración potásica temprana de biotita-magnetita con mineralización de pirita-calcopirita; 2) alteración calco-sódica estéril con clorita, albita y actinolita; 3) alteración principal sericítica con cuarzo, turmalina, clorita, epidota y albita con mineralización de pirita-calcopirita y menor bornita contenida en especularita/hematita o magnetita. Todas ellas cortadas por un evento tardío y estéril de vetillas de calcita, cuarzo-calcita y en ocasiones silicificación de la roca. La secuencia de etapas de alteración es muy similar a la observada en yacimientos de tipo IOCG.

Se sobrepone a los eventos de mineralización hipógena una alteración y mineralización supérgena con desarrollo de un perfil de oxidación y lixiviación, de 5 a 20 m de potencia, donde se reconocen oxidados de cobre (malaquita, brocantita, azurita y Cu nativo) y sulfuros secundarios (calcosina y covelina).

Los estilos de mineralización y alteración magmático hidrotermal desarrollados en el Distrito Minero Tiltil presentan similitudes (ocurrencia mineral desarrollada en vetas y brechas hidrotermales, secuencia de etapas de alteración, mineralización de pirita-calcopirita y menor bornita; asociada a minerales de hematita-magnetita y altos contenidos de Fe, Ay y Cu) con depósitos de tipo IOCG (mina El Huracán) y similitudes (ocurrencia mineral desarrollada en mantos, bajos contenidos de Fe y altos contenidos de Ag) con depósitos estratoligado de Cu-(Ag) (Mina Cóndor).

Debido a la proximidad espacial y al contexto estructural en que se desarrollan los cuerpos mineralizados, se propone que estos fueron formados en un período de tiempo acotado a la evolución tardimagmática del Plutón Caleu a los ~94 Ma, periodo en el cual se desarrollaría un ambiente de transición de un régimen tectónico de transpresión a uno de compresión. Esto permite extender la franja metalogénica de IOCG y estratoligados de Chile Central al Cretácico Superior.

# **BIBLIOGRAFIA**

Águila, B. (2019). Alteración y Mineralización Distrito Minero Quitalcura, Región de Valparaíso, Chile: Implicancias en la génesis de depósitos estratoligados Cu-(Ag). Memoria de Titulo (Inédito), Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento Ciencias de La Tierra.

Aguirre, L., Féraud, G., Morata, D., Vergara, M., & Robinson, D. (1999). Time interval between volcanism and burial metamorphism and rate of basin subsidence in a Cretaceous Andean extensional setting. *Tectonophysics*, *313*(4), 433–447. <u>https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00217-6</u>

Aberg, G., Aguirre, L., Levi, B., & Nystrfm, J.O. (1984). Spreading subsidence and generation of ensialic marginal basins: an example from early Cretaceous of central Chile. In: Kokelaar, *B.P., Howells, M.F. (Eds.), Volcanic and Associated Sedimentary and Tectonic Processes in Modern and Ancient Marginal Basins. Special Publication - Geological Society of London, Vol. 16*, pp. 185–193.

Arévalo, C. (1992). Facies ambientes de depositación y paleogeografía del miembro Pitipeumo (Formación Las Chilcas) V Región. BSc thesis. Universidad de Chile, Departamento de Geología.

Arredondo, C., Moscoso, R., Prieto, X., Ortega, R., Carrasco, R., Vivallo, W., Mateo, L., Pantoja, G., Ulloa, M., Ercilla, O., & Ridelle, E. (2017). Depósitos Minerales de la Región de Coquimbo.
Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile. *Serie de Recursos Minerales y Energéticos 35*, 134 p., 2 mapas escala 1:500.000, 1 CD con anexos. Santiago.

Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., & Palma, G. (2017). Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach. *Ore Geology Reviews,* 81(October 2016), 62–78. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.016

Boric, R., & Munizaga, F. (1994). Geocronología Ar-Ar y Rb-Sr del depósito estratoligado de cobre El Soldado (Chile Central). Universidad de Chile, Departamento de Geología, Comunicaciones, No. 45, p. 135-148. Santiago.

Boric, R., Holmgren, C., Wilson, N. S. F., & Zentilli, M. (2002). THE GEOLOGY OF THE EL SOLDADO MANTO TYPE Cu ( Ag ) DEPOSIT, CENTRAL CHILE Manto Type Copper Deposits. *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, 2, 163–184.

Boyce, D., Charrier, R., & Farías, M. (2020). The First Andean Compressive Tectonic Phase: Sedimentologic and Structural Analysis of Mid-Cretaceous Deposits in the Coastal Cordillera, Central Chile (32°50'S). *Tectonics*, *39*(2), 1–24. <u>https://doi.org/10.1029/2019tc005825</u>

Cabello, J. (1977). Antecedentes preliminares del proyecto Tiltil-Rungue-Montenegro, área Metropolitana. Departamento de Minería, Subgerencia Ingeniería Minera. Empresa Nacional de Minería Chile (ENAMI). 25 p.

Carrillo-Rosúa, J., Boyce, A. J., Morales-Ruano, S., Morata, D., Roberts, S., Munizaga, F., & Moreno-Rodríguez, V. (2014). Extremely negative and inhomogeneous sulfur isotope signatures in Cretaceous Chilean manto-type Cu-(Ag) deposits, Coastal Range of central Chile. *Ore Geology Reviews*, *56*, 13–24. <u>https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.06.013</u>

Carter, W., & Aliste, N. (1962). Geology of the ore deposits of the Nilhue Quadrangle, Aconcagua province (unpublished report). *Instituto de Investigaciones Geológicas, IIG (current Sernageomin),* Chile.

Charrier, R., Pinto, L., & Rodrígues, M.P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *In: MORENO, T. & GIBBONS, W. (eds) The Geology of Chile. The Geological Society, London*, 21–114.

Charrier, R., Ramos, V. A., Tapia, F., & Sagripanti, L. (2015). Tectono-stratigraphic evolution of the Andean Orogen between 31 and 37° S (Chile and Western Argentina). *Geological Society, London, Special Publications, 399*.

Chen, H., Cooke, D.R., & Baker, M.J. (2013). Mesozoic iron oxide coppergold mineralization in the Central Andes and the Gondwana Supercontinent breakup: *Economic Geology*, *108*, 37–44.

Cochilco. (2016). Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera. Comisión Chilena del Cobre.

Cornejo, P., Latorre, J. J., Matthews, S., & Marquardt, C. (2006). U / Pb and 40 Ar / 39 Ar Geochronology of volcanic and intrusive events at the Mantos Blancos copper deposit, II Region, Chile. *XI Congreso Geológico Chileno, Antofagasta. Actas, Geología Económica,* Vol. 2.

Creixell, C., Parada, M. Á., Morata, D., Vásquez, P., de Arce, C. P., & Arriagada, C. (2011). Middle-Late Jurassic to early Cretaceous transtension and transpression during arc building in central Chile: Evidence from mafic dike swarms. *Andean Geology*, *38*(1), 37–63. https://doi.org/10.5027/andgeoV38n1-a04

Cuadra, W., & Arenas, M. (2013). De Margamarga a Colliguay: Minería aurífera colonial en Santiago de la nueva Extremadura. *Chile: Editorial Ediciones Msp.* 121 p.

Del Real, I., Thompson, J. F. H., & Carriedo, J. (2018). Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile. *Ore Geology Reviews*, *102* (September), 106–153. <u>https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.08.034</u>

Dill, H. G. (2010). Earth-Science Reviews The "chessboard" classification scheme of mineral deposits : Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth Science Reviews*, *100*(1–4), 1–420. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.011

Elgueta, S., Hodgkin, A., Rodriguez, E., & Schneider, A. (1990). The Cerro Negro Mine, Chile: Manto-Type Copper Mineralization in a Volcanoclastic Environment. *Stratabound Ore Deposits in the Andes*.

Espinoza, W. (1969). *Geología del distrito cuprífero de Cerro Negro; Provincia de Aconcagua*. BSc thesis. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Faúndez, P., Marquardt, C., Jara, J. J., & Guzmán, J. I. (2020). Valuation and Prioritizaction of Early-Stage Exploration Projects: a Case Study of Cu-Ag and Au-Mineralized Systems in the Tiltil Mining District, Chile. *Natural Resources Research*.

Fuentes, F., Feraud, B., Aguirre, L., & Morata, D. (2005). Ar-40/Ar-39 dating of volcanism and subsequent very low-grade metamorphism in a subsiding basin: Example of the Cretaceous lava series from central Chile. *Chemical Geology*, *214*, 157–177.

Gana, P., & Zenttilli, M. (2000). Historia termal y exhumación de intrusivos de la Cordillera de la Costa de Chile Central. *Congreso Geológico Chileno, No. 9, Actas,* Vol. 2, p. 664-668. Puerto Varas.

González, J. (2018). *Mineralogía y Geoquímica de las vetas de Cu-(Ag) de la Mina 21 de Mayo, Distrito Talcuna, Región de coquimbo*. Memoria de Título. Universidad de Chile.

Grocott, J., & Taylor, G.K. (2002). Magmatic arc fault systems, deformation partitioning and emplacement of granitic complexes in the Coastal Cordillera, north Chilean Andes (25°30'S to 27°00'S). *Journal of the Geological Society, London, 159*, 425–442.

Gröpper, J. (2011). *Franjas Metalogénicas de Edad Jurásica y Cretácica en la Cordillera de la Costa de Chile Central, entre los 32° y los 35°20' de Latitud Sur*. Memoria de Título. Universidad de Chile.

Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., & Robert, F. (1998). Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Review*, *13*, 7–27.

Guerrero, R. (1959). *La pequeña minería en la zona de la Cordillera de la Costa de la Provincia de Santiago*. Memoria de Título, Instituto Pedagógico, Universidad de Chile. 175 pag.

Haynes, D.W. (2000). Iron oxide copper (-gold) deposits: Their position in the ore deposit spectrum and modes of origin. *In Porter, T.M., ed., Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective: Adelaide, Australian Mineral Foundation,* 71–90.

Hermosilla, J., Marquardt, J.C., & Barra, F. (2015). Geología del distrito Puntillas-Galenosa, ejemplo de núcleo estéril en sistemas de pórfidos de cobre, Cordillera de la Costa, Región de Antofagasta, Chile. *Congreso Geológico Chileno XIV*, II, 191-194.

Heuser, G., Arancibia, G., Veloso, E. E., Cembrano, J., Cordeiro, P. F. O., Nehler, M., & Bracke, R. (2020). The evolution of the Dominga Fe-Cu deposit (northern Chile): Insights from mineral textures and micro-CT analysis. *Ore Geology Reviews*, 119. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103316

Jaillard, E., Hérali, G., Monfret, T., Díaz-Martínez, E., Baby, P., Lavenu, A., & Dumont, J. F. (2000). Tectonic Evolution of The Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and Northernmost Chile. *Tectonic Evolution of South America. Sociedade Brasileira de Geología 31st International Geological Congress.* Rio de Janeiro.

Jara, J. J., Barra, F., Reich, M., Leisen, M., Romero, R., & Morata, D. (2021). Episodic construction of the early Andean. *Nature Communications*, 1–8. <u>https://doi.org/10.1038/s41467-021-25232-z</u>

Kojima, S., Trista-Aguilera, D., & Hayashi, K. I. (2009). Genetic aspects of the manto-type copper deposits based on geochemical studies of North Chilean deposits. *Resource Geology*, *59*(1), 87–98. https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00081.x

Maksaev, V., & Zentilli, M. (2002). CHILEAN STRATA-BOUND Cu- (Ag) DEPOSITS: AN OVERVIEW. In Porter, T.M. (Ed.), Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective. PGC Publishing, 2, 185–205.

Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C., & Camus, F. (2007). Metallic ore deposits. *In: Moreno, T. & Gibbons, W. (eds) The Geology of Chile. The Geological Society, London*, 179-200.

Maksaev, V., Almonacid, T. A., Munizaga, F., Valencia, V., McWilliams, M., & Barra, F. (2010). Geochronological and thermochronological constraints on porphyry copper mineralization in the Domeyko alteration zone, northern Chile. *Andean Geology*, 37(1), 144–176. https://doi.org/10.4067/s0718-71062010000100007

Molina, P. (2014). *Geocronología y Condiciones de cristalización de Circones del Plutón Caleu: Evidencia de su prolongada evolución tardimagmática*. Memoria de Titulo. Universidad de Chile. <u>https://doi.org/10.1177/1742766510373715</u>

Molina, P., Parada, M.A., Gutiérrez, F., Ma, Ch., Li, J., Yuanyuan, L., Reich, R., & Aravena, A. (2015). Protracted late magmatic stage of the Caleu pluton (central Chile) as a consequence of heat redistribution by diking: Insights from zircon data and thermal modeling. *Lithos, 227, 255-268, ISSN 0024-4937.* <u>https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.04.008</u>.

Mpodozis, C., & Allmendinger, R. (1992). Extensión cretácica a gran escala en el Norte de Chile (Puquios- Sierra Fraga, 27 0 S): significado para la evolución tectónica de los Andes. *Revista Geologica de Chile*, 19(2).

Mpodozis, C., & Cornejo, P. (2012). Cenozoic Tectonics and Porphyry Copper Systems of the Chilean Andes. *Society of Economic Geologists*, 329–360.

Mpodozis, C., & Ramos, V. (1989). The Andes of Chile and Argentina. *Geology of the Andes and Its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources: Houston, Texas, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Sciences Series, 11, 59–90.*  Muñoz, G. (2017). *Estudio Del Relave Abandonado Anita, Comuna De Tiltil Y Sus Posibles Implicancias a La Comunidad*. Memoria de Título, Universidad Andrés Bello.

Muñoz-Sáez, C., Pinto, L., Charrier, R., & Nalpas, T. (2014). Influence of depositional load on the development of a shortcut fault system during the inversion of an extensional basin: The Eocene-Oligocene Abanico Basin case, central Chile Andes (33°-35°S). *Andean Geology*, *41*(1), 1–28. <u>https://doi.org/10.5027/andgeoV41n1-a01</u>

Morata, D., Aguirre, L., Ruzziconi, Y., Féraud, G., Vergara, M., Puga, E., & Díaz de Federico, A. (1997). Feldspar chemistry and preliminary Ar/Ar data on the lower Cretaceous basic lavas from the Coastal Range of Central Chile: petrogenetic implications. *VIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, T-II.*, pp. 1385 – 1388.

Oliveros, V., Féraud, G., Aguirre, L., Ramírez, L., Fornari, M., Palacios, C., & Parada, M. (2007). Detailed 40Ar/39Ar dating of geologic events associated with the Mantos Blancos copper deposit, northern Chile. *Mineralium Deposita*, 43(3), 281–293. <u>https://doi.org/10.1007/s00126-007-0146-</u>2

Oliveros, V., Aguirre Le-Bert, L., Morata Céspedes, D., Simonetti, A., Vergara Martínez, M., Belmar Urbina, M., & Calderón, S. (2008) (a). *Geochronology of very low-grade Mesozoic Andean metabasites; an approach through the K–Ar, 40Ar/39Ar and U–Pb LA-MC-ICP-MS methods*. In: <u>http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/125058</u>

Oliveros, V., Tristá-Aguilera, D., Féraud, G., Morata, D., Aguirre, L., Kojima, S., & Ferraris, F. (2008) (b). Time relationships between volcanism-plutonism-alteration-mineralization in Custratabound ore deposits from the Michilla mining district, northern Chile: A 40Ar/39Ar geochronological approach. *Mineralium Deposita*, *43*(1), 61–78. https://doi.org/10.1007/s00126-007-0147-1

Orrego, M., Robles, W., Sanhueza, A., Zamora, R., & Infanta, J. (2000). Mantos Blancos y Mantoverde: depósitos del tipo Fe-Cu-Au? Una comparación con implicancias en la exploración. *Congreso Geológico Chileno, 9th, Puerto Varas, 2000, Actas, 2*, 145–149.

Oyarzún, R., Rodriguez, M., Pincheira, M., Doblas, M., & Helle, S. (1999). The Candelaria (Cu-Fe-Au) and Punta del Cobre (Cu-Fe) deposits (Copiapó, Chile): A case for extension-related granitoid emplacement and mineralization processes?. *Mineralium Deposita*, *34*, 799–801.

Parada, M. A., Féraud, G., Fuentes, F., Aguirre, L., Morata, D., & Larrondo, P. (2005). Ages and cooling history of the Early Cretaceous Caleu pluton: Testimony of a switch from a rifted to a compressional continental margin in central Chile. *Journal of the Geological Society*, *162*(2), 273–287. <u>https://doi.org/10.1144/0016-764903-173</u>

Pirajno, F., & Bagas, L. (2008). A review of Australia's Proterozoic mineral systems and geneticmodels.*PrecambrianResearch*,166(1–4),54–80.https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.05.008

Piracés, R., & Maksaev, V. (1977). Geología de la hoja Quillota, escala 1:250.000, IV y V región. Santiago, Chile. *IIG (actual Sernageomin), CCHEN*. 140 p. 1 mapa.

Ramírez, L. E., Palacios, C., Townley, B., Parada, M. A., Sial, A. N., Fernandez-Turiel, J. L., Gimeno, D., Garcia-Valles, M., & Lehmann, B. (2006). The Mantos Blancos copper deposit: An upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the Coastal Range of Northern Chile. *Mineralium Deposita*, *41*(3), 246–258. https://doi.org/10.1007/s00126-006-0055-9

Ramírez, L. E., Parada, M. A., Palacios, C., & Wittenbrink, J. (2008). Magmatic evolution of the Mantos Blancos copper deposit, Coastal Range of northern Chile: Insight from Sr-Nd isotope, geochemical data and silicate melt inclusions. *Resource Geology*, *58*(2), 124–142. https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00049.x Ramos, V., & Alemán, A. 2000. Tectonic evolution of the Andes. *In: Cordani, U.J. Milani, E.J., Thomaz Filho, A. y Campos, D.A. (eds.) Tectonic evolution of South America, 31° International Geological Congress,* 635-685, Río de Janeiro.

Richards, J. P., López, G. P., Zhu, J. J., Creaser, R. A., Locock, A. J., & Mumin, A. H. (2017). Contrasting tectonic settings and sulfur contents of magmas associated with cretaceous porphyry  $Cu \pm Mo \pm Au$  and intrusion-related iron oxide Cu-Au deposits in northern Chile. *Economic Geology*, *112*(2), 295–318. <u>https://doi.org/10.2113/econgeo.112.2.295</u>

Richards, J. P., & Mumin, A. H. (2013). Magmatic-hydrothermal processes within an evolving Earth: Iron oxide-copper-gold and porphyry  $Cu \pm Mo \pm Au$  deposits. *Geology*, 41(7), 767–770. <u>https://doi.org/10.1130/G34275.1</u>

Rivano, S., Sepúlveda, P., Boric, R., & Espiñeira, D. (1993). Hojas Quillota y Portillo (Carta Geológica de Chile, v. 73, 1: 250.000). SERNAGEOMIN.

Rivera, N., & Aroca, P. (2014). Escalas de producción en economías mineras. El caso de Chile en su dimensión regional. *Eure*, 40(121), 145–155. <u>https://doi.org/10.4067/s0250-71612014000300012</u>

Salgado, C. (2004). El sistema estructural de los yacimientos del Distrito Minero de Talcuna, Provincia del Elqui, IV región de Coquimbo. Chile. Memoria de Título. Universidad de Concepción.

Sawkins, F. (1972). Sulfide ore deposits in relation top late tectonics. *The journal of Geology*, 80, 377-397.

Seequent Limited. (2019). Leapfrog (Versión 5.0.1). Leapfrog Geo.

Sellés, D., & Gana, P. 2001. Geología del Area Talagante-San Francisco de Mostazal, Regiones Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica, No. 74, 30 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago. SERNAGEOMIN (2012). Atlas de Faenas Mineras, Regiones de Valparaíso, del Libertador General Bernardo O'Higgins y Metropolitana de Santiago (Versión Actualizada). *Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas y Estadísticas de Faenas Mineras de Chile Santiago*.

Severino, S. (2017). Estratigrafía Y Paleontología Del Cretácico Inferior al Sureste de Colliguay entre los 33°11'50''-33°15'50'', Regiones de Valparaíso y Metropolitana. Memoria de Título, Universidad Santo Tomás, Facultad de ingeniería, Escuela de Geología.

Seymour, N. M., Singleton, J. S., Mavor, S. P., Gomila, R., Stockli, D. F., Heuser, G., & Arancibia, G. (2020). The Relationship Between Magmatism and Deformation Along the Intra-arc Strike-Slip Atacama Fault System, Northern Chile. *Tectonics*, 39(3). <u>https://doi.org/10.1029/2019TC005702</u>

Sillitoe, R. H. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7), 787–812. <u>https://doi.org/10.1007/s00126-003-0379-7</u>

Sillitoe, R., & Perelló, J. (2005). Andean copper province: tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. *Economic Geology*, *100th Anni*, 845–890. Retrieved from <u>http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Andean+Copper+Province+:+</u> <u>Tectonomagmatic+Settings+,+Deposit+Types+,+Metallogeny+,+Exploration+,+and+Discovery</u> #0

Sillitoe, R. H. (2012). Copper Provinces. *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World*, 1–18. <u>https://doi.org/10.5382/sp.16.01</u>

Thomas, H (1958). Geología de la Cordillera de la Costa, entre el Valle de La Ligua y a Cuesta Barriga. Instituto de investigaciones Geológicas. Boletín N°2. Santiago de Chile.

Toledo, A. (2003). Estudio geológico estructural, con aplicación a la actividad minera, en las minas Coca Cola I y II. Distrito Minero Talcuna IV Región de Coquimbo, Chile. Memoria de Título. Universidad de Concepción.

Townley, B., Roperch, P., Oliveros, V., Tassara, A., & Arriagada, C. (2007). Hydrothermal alteration and magnetic properties of rocks in the Carolina de Michilla stratabound copper district, northern Chile. *Mineralium Deposita*, *42*(7), 771–789. https://doi.org/10.1007/s00126-007-0134-6

Tristá-Aguilera, D., Barra, F., Ruiz, J., Morata, D., Talavera-Mendoza, O., Kojima, S., & Ferraris, F. (2006). Re-Os isotope systematics for the Lince-Estefanía deposit: Constraints on the timing and source of copper mineralization in a stratabound copper deposit, Coastal Cordillera of Northern Chile. *Mineralium Deposita*, *41*(1), 99–105. <u>https://doi.org/10.1007/s00126-006-0048-8</u>

Veloso, E., Cembrano, J., Arancibia, G., Heuser, G., Neira, S., Siña, A., Garrido, I., Vermeesch, P., & Selby, D. (2017). Tectono-metallogenetic evolution of the Fe–Cu deposit of Dominga, northern Chile. *Mineralium Deposita*, 52(4), 595–620. <u>https://doi.org/10.1007/s00126-016-0682-8</u>

Vergara, M., Levi, B., Nyström, J. O., & Cancino, A. (1995). Jurassic and Early Cretaceous island arc volcanism, extension, and subsidence in the Coast Range of central Chile. *Geological Society of America Bulletin, 107*, 1427–1440.

Viteri, E. (1970). *Estudio geológico de la región de los Cerros Negros y Portales. Provincia de Aconcagua*. BSc Thesis. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Vivallo, W., & Henríquez, F. (1998). Génesis común de los yacimientos estratoligados y vetiformes de cobre del Jurásico Medio a Superior en la Cordillera de la Costa, Región de Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, *25*, 199–228.

Wall, R., Sellés, D., & Gana, P. (1999). Área Tiltil-Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Mapas Geológicos, No.11, 1 mapa escala 1:100.000, 1 anexo, Santiago.

Yáñez Carrizo, G., & Rivera, O. R. (2019). Crustal dense blocks in the fore-arc and arc region of Chilean ranges and their role in the magma ascent and composition: Breaking paradigms in the Andean metallogeny. *Journal of South American Earth Sciences*, *93*(October 2018), 51–66. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.04.006

Zeballos, J. (2007). Informe Geológico Distrito Minero Tiltil, Región Metropolitana, Provincia e Chacabuco – Comuna de Tiltil. *Programa de estudios distritales. Empresa Nacional de Minería*. https://www.enami.cl/api/descarga?f=/Lists/Estudios%20Geolgicos%20Distritales/Attachments/ 12/Informe%20Geol%25C3%25B3gico%20Distrito%20Til%20Ti\_pub.pdf ANEXOS

ANEXO A: TABLA DE DESCRIPCIÓN DE CORTES TRANSPARENTES Y PULIDOS

Sector	Muestra	Tipo de muestra	Coordenada Este UTM (m)	Coordenada Norte UTM (m)	Altura (m.s.n.m)	Desde (m)	Hasta (m)	Tipo de Roca (corregido)	Minerales de alteración o relleno hidrotermal (corregido)	Minerales de mena (corregido)	Estructuras y relaciones de corte (Corregido)
Mogote	TFD-0226-05	Superficial	317821	6332233	870			Monzodiorita cuarcifera de anfíbola y biotita			
Lophan	TCM-0228-016	Superficial	316743	6332809	856			Microsienogranito	Turmalina, calcita, sericita, limonitas y agregados muy finos de caolinita		Textura microfanerítica: Emplazamiento hipabisal
Los Placeres	TCM-0228-017C	Superficial	315878	6337723	1029			Andesita	Calcita, epidota, sericita, clorita, escasa turmalina, y actinolita en andesita y en vetillas	4	Masa fundamental microlítica afieltrada. Vetillas de cuarzo, calcita, epidota y actinolita cortan masa fundamental.
El Muro	TCM-0301-018	Superficial	316519	6335431	807			Sienogramito	Epidota, turmalina, sericita y biotita secundaria (alteración potásica incipiente (FOTO))		
Santa María y El Muro	TCM-0301-022	Superficial	315959	6335371	1044			Monzonita cuarcífera de seudomorfos de piroxeno,	Clorita y esmectitas reemplazando máficos, epidota, sericita y limonitas		Vetilla de 1,5 mm, con relleno de epidota y escaso cuarzo
Bajo San Padro	TCM-0301-023	Superficial	314251	6334117	1378			nornblenda y blouta Dique andesítico de piroveno y homblenda	Calcita y clorita reemplzando piroxeno y homhlanda saricita		
Este de San Aurelio	TCM-0301-24	Superficial	318018	6336441	688			Monzodiorita de anfíbola y seudomorfos de anfíbola	Abundante actinolita reempizando máfricos, clorita escasa, sericita		
La Clarita	TCM-0301-025	Superficial	315696	6338611	942			Diorita de piroxeno y seudomorfos de homblando	Biotita secundaria fina, sericita, clorita, limonitas		Biotita como reemplazo de máficos y relleno de fracturas (FOTO)
El Huracán	TCM-0307-029	Superficial	320078	6343516	684			Institution Brecha de polvo de roca: Matriz de clorita y fragmentos de cuarzo tarmaño polvo de roca; fragmentos de posible rx volcánica (andesita?).	Agregados de clorita-esmectita, hematita, limonitas	-	vetilla de 4 mm con relleno de cuarzo, especularita y geutitia que corta a la brecha, tanto a fragmentos como a la matriz.
El Huracán	TCM-0703-031	Superficial	320283	6343504	676			Monzonita cuarcífera de j piroxeno	Sericita (alteración principal) en plagioclasas, actinolita en piroxeno, clorita, epidota, limonitas. Minerales accesorios: circón y apatito. Titanita-Rutilo (FOTO)		
La Despreciada	HR-0728-01a	Superficial	315618	6319837	1215			Roca metasedimentaria	Biotita secundaria fina, epidota, clorita, calcita	Calcopirita, magnetita, hematita, escaso rutilo	Plagockasa recristalizada y bandas con biotita y clorita muy finas. Magnetia en bandas con reemplazo los to por benatia. Bandas con abundante biotita secundaria reemplizada por clorita. Calcia cono releto de microverlias y
San Aurelio	SA-01	Superficial	316977	6336158	784			Andesita con brechización, masa fundamental afieltrada	Clorita, epidota, albita, cuarzo		oquedades, posteior a clorita. Matriz de clorita y epidota y fragmentos de andesita. Plegioclasas con fuerte ablitización. Antigatalas rellemas de cuarzo y epidota
San Aurelio	SA-02	Superficial	316977	6336158	784			Andesita con brechización	Clorita, epidota, sericita, turmalina		Matriz de clorita y epidota y fragmentos de andesita. Plagioclasas con fuerte seriticización y
San Aurelio	SA-03	Superficial	316977	6336158	784			Andesita, brecha hidrotermal	Clorita, epidota, cuarzo, clorita, albita, sericita		con mussions de turnaman accutar inta Matriz de chrita y epidota y fregmentos de andesta. Amigalatas relenas de cuarzo y escasa choria. Plagioclasus fuertemente albitizadas y débilmente seritizadas.
San Aurelio	ST01-01	Sondaje	31 6963	6336172	801	35	35.1	Andesita amigdaloidal	Albita (altertación principal), agregados aciculares de turmalina, calcita, epidota	Abundante magnetita y hematita, cakopirita en trazas	Máfreos reemplazados por epidota y calcita. Abhización en fenocristales y masa fundamental. Magnetita y hematita diseminada y localmente entrecrecida. Burbujas de calcio, cloria y hematia. Veillas discominada e calcita, cloria y prina cortan la masa fundamental. Prán- calcopiria en centro de amígdalas rellenas por
San Aurelio	ST01-02	Sondaje	316963	6336172	801	4	44.1	Andesita autobrechizada	Albita debil a moderada, epidota, clorita y culcita	Pirita, calcopirita diseminadas, agregados de hematita y magnetita	clorita, epidota y cakita. Misrovetilas de cakita y cuarzo cortua a vetilas trregulares y sinuosas de clorita, epidota y cuarzo. Vetilas recta y sinuosas de cakita. Cakopiria, pirita en cavidades.

Sector	Muestra	Tipo de	Coordenada Este UTM	Coordenada Norte UTM	Altura	Desde (m)	Hasta (m)	Tipo de Roca (corregido)	Minerales de alteración o relleno	Minerales de mena	Estructuras v relaciones de corte (Corregido)
San Aurelio	ST01-03	Sondaje	( <b>m</b> ) 316963	( <b>m</b> ) 6336172	801	50.5	50.6	Andesita parcialmente autobrechizada	Abundante clorita, epidota y cuarzo; moderada albita; muy escasa turmalina	(00160100)	Microvenillas subparalelas con relleno de calcita. Vetilas de calcita cortan roca de caja y
San Aurelio	ST02-01	Sondaje	316968	6336118	788	23.6	23.7	Posible Lati-andesita,masa fundamental microfélsica con plagioclasa y ortoclasa	muy inua, sericita, calcita Sericita-calcita, amígtlalas rellenas de calcedonia-clorita, cuarzo posiblemente secundario		anteraciones. I turnatina junto a cortra y cuarzos. Sericia-cakita reemplazando plagoclasis, anígidais y agregados lenticulares con desarrolo de cuarzo, calcedonia, clorita y cakita.
San Aurelio	ST02-02	Sondaje	316968	6336118	788	25	25.1	Traquiandesita, masa fundamental microfélsica débilmente fluidal	Sericita moderada, escasa calcita y albita, agregados lenticulares amígdalas con calcita, sericita, cuarzo(calcedonia), clorita		Plagioclasas reemplazadas por sericita, calcita y escasa albita. Vetillas de sericita sinuosas. Cavidades rellenas por cuarzo y clorita. Vetilla de calcita y con halo de calcita conta alteración
San Aurelio	ST02-03	Sondaje	316968	6336118	788	38.2	38.3	Roca vokánica (posible lava) con fenocristales de plagoclasa	Sericita y silicificación de masa fundamental (alteración principal), clorita, calcita, albita		Cavidades irregulares con abundante sericita en bordes. Vetillas delgadas de sericita y vetilla de clorita y opacos.
San Aurelio	ST02-04	Sondaje	316968	6336118	788	40	40.1	Roca vokánica intensamente alterada	Sericita y silicifación (alteración principal), agregados finos de clorita y escasa turmalina		Cavidades irregulares con abundante clorita en bordes y localmente relenandolas con turmalina. Veillas sinosais y rectas de calcita. Verillas rectas de sercita. Microvenilla de calcita cortando alteración sercitas. Turmalina en pequeños agegados incluídos en seudomorfos de plagioclasa.
San Aurelio	ST02-05	Sondaje	316968	6336118	788	42	42.1	Roca volcánica (posible lava)	Sericita (alteración principal), calcita, sericita y silicificación en masa fundamental y en bandas lenticulares		Cuarzo en cavidades. Microvenilla con relleno de cuarzo y calcita cortando altenación sericítica de la roca.
San Aurelio	ST02-06	Sondaje	316968	6336118	788	44	44.1	Roca volcánica (posible lava)	Fuerte silicificación, moderada sericita y desarrollo de agregados de clorita, epidota v muv escasa turmalina, calcita		Microvenillas y fracturas rellenas con sericita y calcita. Microvenilla con relleno de calcita cortando fenocristales v masa fundamental.
San Aurelio	ST02-07	Sondaje	316968	6336118	788	56	56.1	Andesita fuertemente alterada	Sericita y calcita moderada, sericita, parcial silicificación, escasa turmalina local, clorita		Clorita y opacos como relleno de agregados lenticulares y fracturas. Parcial albitización de plagociasas.
El Huracán	ST03-01	Sondaje	320125	6343594	645	0	0.5	Andesita, masa fundamental intersertal con microlitos de plagioclasa	Debil a moderada albita como alteración metasomática de plagioclasa, epidota, clorita, cuarzo		Epidota intersticial. Microvenilla de cuarzo y epidota cortan masa fundamental y plagochasas. Localmente epidota junto a vetas de cuarzo. Vesieulas de forma irregular. Epidota y cuarzo
El Huracán	ST03-02	Sondaje	320125	6343594	645	4.7	ŝ	Contacto entre cuarzonouzodiorita de cinopiroxeno con granido de feldespato potísico hololeucocrático (microdique pegmatítico)	Débil sericita, local clorita, biotita y actinolita, epidota, calcita, cuarzo	Abundante magnetita asociada a cuarzomonzodiorita, trazas de cakopirita diseminada	Entrecrectimient en cavatace telespato con seasa plagioclasa debilmente albitizada. Sericita en plagoclasas; chrita, biotita y actinolita en máricos. Plagoclasa fresca y proveno con teemplazo intenso por actinolita (tranifización, producto de hidratación y posterior alteración a actinolita) y desarrollo de biotita secundaria de origen
El Huracán	ST03-03	Sondaje	320125	6343594	645	13.4	14.4	Cuarzodiorita de piroxeno	Albia (alteración principal moderada); localmente actinolita, chrita, cakita y epúlota; sericita débit, cuarzo y turmalina en vetillas; esteno	Rutilo, trazas de calcopirita diseminada	Turmalina asociada a veta de cuarzo, sericita en plagioclasas. Se observa cizallamiento. Plagioclasa parcialmente albitzada y con fuerte fracturamiento y deformación debido a cizallamiento. Plagioclasa parcialmente albitzada con fracturamiento, presentando desarrollo de turmalina en fracturas. Parte de vetila de cuarzo contada por microvenilla de aveitos.
El Huracán	ST03-04	Sondaje	320125	6343594	645	14.4	15.5	Veta hidrotermal de cuarzo- turmalina	Desarrollo local de calcita y actinolíta; escasa clorita; esfeno, epidota	Diseminación de rutilo asociado a titanita, especularita y escasa calcopirita local	oc optoca: Actinolita cortada por cristales de turmalina. Turmalina y epidota superpuestas en cúmulos al cuarzo hidrotermal.

ctor	Muestra	Tipo de muestra	Coordenada Este UTM (m)	1 Coordenada Norte UTM (m)	Altura (m.s.n.m)	Desde (m)	Hasta (m)	Tipo de Roca (corregido)	Minerales de alteración o relleno hidrotermal (corregido)	Minerales de mena (corregido)	Estructuras y relaciones de corte (Corregido)
ıcán	ST03-06	Sondaje	320125	6343594	645	25.5	26.5	Veta de cuarzo	Cuarzo (interdigitado), calcita, epidota, clorita, turmalina, sericita	Especularita, escaso rutilo	Veta de cuarzo hidrotermal cortado por vetilla de epidota y cuarzo.
acán	ST03-07	Sondaje	320125	6343594	645	26.5	26.6	Agregado de granos de cionta-epidora; escasa ceolita	Epidota (altanita), ceolita, clorita	Pirita, calcopirita, tennantita (FOTO), especularita, magnetita	Collar entre argendos de clorati (más turdía). Cristalas de pinta com catelopinta intenstrai J y destarrollo de agregados de temantita. Agregado de coltar con cristal de epidota arcociado a lámim. Magnetia desminada en roca de coja. Epidota- turmalina entrecrecidas y por sobre alteración de
acán	ST03-08	Sondaje	320125	6343594	645	8	6	Brecha hidrotermal de matriz cuarzo-turmalina y fragmentos en agregados de epidota y cuarzo	Epidota, turmalina, cuarzo, calcita y chorita	Hematita(especularita )	Todo se encuentra corrado por vetilida de cuarzo- turmalina. Espectanta asociada namirto y vetilia cuarzo-turmalina. Brecha hidroternal con matriz de cuarzo, turmalina y septadarta y fragmentos y suzzo fragmental. Vetila con relieno de cuarzo y sepecularía (secasa turmalina local) cortando brecha hidroternal. Vetila con relieno de cuarzo brecha hidroterna. Vetila de epidoa cortando cuarzo hidroternales.
acán	ST03-09	Sondaje	320125	6343594	645	19.7	19.2	Roca ignea intrusiva cortada por veta de cuazo	Epidota, elorita, cuarzo, calcita, turmalina essasa; roca de caja albitzada	Ruilo diseminado y trazas de calcopirita (FOTO), predomina la espeularita	Curzos y plugioclasis de roca de caja intensamente ablizadas cortados por microvenila de curazo. Agregado de epidota y parte da matriz de brecha hidrotermal conformada por tumanina y curazo. ambas contradas por microveilla de calcita y curazo. minas contadas por microveilla de calcita y parte de matiră d curzo. Uratales prismidicos microvenila de curzo. Cistales prismidicos aciculares de turzmálina cortada por aciculares de turzo mendra por aciculares de turzo mendra por aciculares de turzo fisades prismidicos aciculares de turzo mendras muy finos de epidota y cloria intesticial (entre cristales de turnalina y curzo). Espeudrata predominante acompañando
acán	ST03-10	Sondaje	320125	6343594	645	32.4	33.5	Brecha hidrotermal de cuarzo	Cuarzo, calcita, clorita	Hematita(especularita ), calcopirita, pirita	cuarso hidrotement. Agregado compacto de cuarzo hidrotermal corado por veilidas con cuarzo-especubiaria. Jocalmente clorita en forma intersticial y calcita en agregados. Veilida de calcia corta aregado de cuarzo hidrotemal. Calcopiñt y prine an exvidades junto a hematia.
acán	ST03-13	Sondaje	320125	6343594	645	41	42.5	Andesita con fenocristales de plagioclasa sertitizada y masa fundamental con plagioclasas sertitizadas	Clorita, sericita, cuarzo, calcita	Magnetita diseminada en roca, especularita en vetillas, pirita eubedral en vetillas (FOTO) y escasa cakcopirita en vetillas	Clorita interstical y cuarzo hidrotermal infiltrado. Sericita, clorita y cuarzo en roca de cuja cortuda por vetilla de cuarzo; todo cortado por microvenillas de cuarzo con sutura central de calcita cortando por relieno de cuarzo. Calcopirta junto a vellas de cuarzo.
acán	ST03-14	Sondaje	320125	6343594	645	46.6	46.7	Roca obliterada por intensa alteración, textura porfídica probable	Cuarzo, calcita, clorita, sericita	Pirita euhedral y cakopirita intersticial (FOTO)	Emrecrecimiento de printa ethedual y calcopinia. Verilla de calcita cortando cuarzo de veta. Pirita y calcopirta intercrecidas con cuarzo. Microvenilla recta con relleno de epidota cortada por microvenilla sintosa con relleno de cuarzo.
ıcán	ST03-14(2)	Sondaje	320125	6343594	645	46.6		Dique de composición andesítica a microdorítica portídica con plagioclasas	Clorita, epidota, cuarzo secundario, calcita y sericita		epidon. Plugoclasas sertizadas, clorita en máricos y cuarzo secundario interistada. Edorita en máricos diserminda y conno relleno de verilhas. Roca alteranda intensamente a sercita, clorita, epidota y escaso cuarzo hidrotermal contrada por microvenilla de epidota cortada as av ze por microvenilla con calcin y cuarzo.
ä	ST04-02	Sondaje	315045	6319658	1552	19.5	21.4	Contacto entre arenita muy fina (wacka) y arena gruesa posiblemente epiclástica	Clorita, sericita, arcillas, escasa biotita en algunos fragmentos		En el nivel con material más grueso se observa biotita secundaria con clorita y actinolita incluidas en fragmentos (son fragmentos con minerales de aleración)

# ANEXO B: TABLA DE ANÁLISIS DE ANOMALÍAS GEOQUÍMICAS

							_							_	_																																	
Zn (ppm)	20.00	192.00	13.00	76.00	98.00	110.00	1034.00	108.00	36.00	134.00	98.00	199.00	416.00	118.00	541.00	127.00	90.06	218.00	1/.00	5.00 63.00	200																											
(mqq) ac	0.40	2.00	1.90	1.40	0.60	1.10	1.70	0.60	5.50	0.60	0.30	0.40	3.50	1.40	0.80	3.60	1.40	1.20	01.1	1 00	3.54	2.94	6.97	4.56	3.46	4.92	2.61	2.81	3.40	2.35	3.07	3.83	2.02	7.47	5.01	1.56	1.48	4.57	1.27	12.6	61.1	2.06	1.35	2.71	5.53	0.48	3.06	1.91
	33.00	44.00	42.00	28.00	65.00	28.00	33.00	28.00	34.00	44.00	39.00	136.00	189.00	170.00	77.00	58.00	37.00	41.00	1/.00	73.00	2.48	3.88	9.68	11.84	3.89	10.70	2.78	1.79	3.56	4.50	3.73 26.44	11.04	6.73	8.25	65.83	3.92	2.89	7.65	0.49	10.04	12.24	9.03	5.17	11.85	3.68	3.50	4.75	8.55 6.18
	0.05	4.90	1.00	0.05	0.05	0.05	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.50	0.05	0.05	0.10	0.10	0.10	c0.0	0.20																												
	0.05	06.0	15.20	0.10	0.30	0.05	0.05	0.05	0.40	0.10	0.05	0.30	0.20	0.60	0.60	0.10	0.05	1.90	01.0	010																												
	0.50	43.00	65.00	32.00	8.00	8.00	16.00	3.00	53.00	7.00	16.00	6.00	26.00	52.00	31.00	22.00	41.00	299.00	00.012	00.95	0																											
	0.50	7.00	19.00	3.00	0.50	1.00	2.00	0.50	12.00	0.50	2.00	3.00	3.00	00'6	0.50	2.00	2.00	0.50	21.00	3.00	2.23	4.63	3.14	3.35	1.84	5.85	1.78	0.65	0.92	2.13	1.68	5.25	1.31	1.33	3.73	1.06	3.14	2.09	0.60	0.08	cr:c	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	3.70	90.40	20.30	33.40	32.30	41.40	46.00	36.70	19.40	51.00	33.30	21.50	30.60	30.50	149.70	7.20	63.10	76.00	12.20	12.80	10.24	8.62	7.87	9.28	12.49	9.08	9.83	10.42	12.86	15.77	12.42	11.62	11.65	10.64	12.13	9.52	9.67	8.96	7.82	25.09	17.07	9.56	3.73	6.41	8.07	214.53	12.93	87.49 20.77
	29.00	3945.00	6299.00	1561.00	15315.00	1104.00	602.00	2487.00	7140.00	5610.00	445.00	20000.00	19596.00	20000.00	20000.00	353.00	6069.00	2352.00	00712	0367.00	1000.000	11600.00	4733.33	1500.00	18633.33	1500.00	1100.00	200.00	300.00	100.00	20866.67 9400.00	15500.00	8433.33	14066.67	733.33	12833.33	4966.67	600.00	1100.00	5255.55	00.00200	500.00	19166.67	200.00	8200.00	13866.67	29833.33	1700.00 466.67
	0.05	1.90	2.20	06.0	1.80	1.10	1.30	0.60	0.40	0.80	0.30	72.80	48.20	06.0	7.70	0.30	06.0	0.40	0.80	05.5	2																			1								
	0.00	0.01	0.01	0.08	0.19	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.06	0.17	0.42	0.05	0.08	0.13	1.89	C8.2	60.0	0																											
( <b>m.s.n.</b> m)	LLL	850	848	963	778	1174	1197	1197	806	66L	1110	1503	1672	695	653	1072	1072	890	C111	600 008	860	860	860	860	860	860	860	860	860	738	738	738	738	738	738	738	738	800	800	800	800	800	800	800	1072	784	953	953 953
Norte UTM (m)	6333539	6333041	6333030	6336439	6335711	6332890	6332749	6332749	6333022	6332780	6334787	6320031	6319511	6343504	6343596	6330474	6330474	6338591	62398/8 6222026	02022020	6336270	6336270	6336270	6336270	6336270	6336270	6336270	6336270	6336270	6335852	6335852 6335852	6335852	6335852	6335852	6335852	6335852	6335852	6335879	6335879	0235870	6/00000	6335879	6335879	6335879	6335301	6336158	6335477	6335477 6335477
Este UTM (m)	317340	317038	317070	314821	317311	314678	314638	314638	316345	316407	315844	314985	314951	320135	320101	319088	319088	315783	5155 /4	316740	316531	316531	316531	316531	316531	316531	316531	316531	31 65 31	317279	317279 317279	317279	317279	317279	317279	317279	317279	317178	317178	31/1/8	317178	317178	317178	317178	314907	316977	314538	314538 314538
nnonn an adr	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial	Superficial
r phenty	IRR-0116-14	RR-0116-20C	IRR-0116-22	IRR-0124-17	IRR-0122-15	INB-0115-06	NB-0115-07A	NB-0115-07B	IDV-0115-03	INB-0116-17	RR-0117-10A	CM-0306-026	CM-0306-028	CM-0307-030	CM-0307-032	RR-0109-05A	RR-0129-05A	HR-0129-06C	HK-0130-05C	10-1221-01 TT-626	PAN01-lim	PAN01-ox	PAN01-fr	PAN02-lim	PAN02-ox	PAN03-lim	PAN03-ox	PAN03-fr	PAN04-fr	MUR01-fr	MUR02-0X MUR03-0X	MUR04-ox	MUR04-lim	MUR05-lim	MUR05-fr	MUR06-ox	MUR07-lim	MUR08-lim	MUA01-lim	MUAUZ-IIM	SAND1-04	SAN02-lim	SAN03-ox	SAN04-alt	MA-01	M-SP-SAN	LC-1	LC-2
	Lophan-Lujan	Lujan T	Lujan .	San Jorge	El Muro	Cerro La Planchada	Cerro La Planchada 1	Cerro La Planchada T	Lophan Norte	Lophan	Contacto Kivn y Kmm 7	Condor T	Condor-La Cuarta T	Huracan 1	Huracan 1	La Chinchineta 1	La Chinchineta 1	La Clarita 1	Vetas de La Dormida I	Lujan I a Poza	Panal	ElMuro	ElMuro FilMuro	ElMuro	EIMUro	San Aurolio	San Aurelio	San Aurelio	San Aurelio	Santa Maria Alto	San Aurelio Stockpile	La Cobra	La Cobra La Cobra															

Zn (ppm	92	142	226	165	210	222	78	145	223	235	105	134	136	90	11	72	70	70	80	62	59	65	<u>4</u>	46	48	51	4	48	47	4	58	LL	47	58	70	66	811	2	83	52	67	43	107	70	93	75	67	95	67	88	80 128
Sb (ppm)	2.2	0.4	2.0	1.4	0.9	1.9	1.7	1.2	0.7	1.1	0.8	0.9	1.4	1.3	1.8	1.6	1.8	1.1	1.1	1.4	1.3	1.4	1.1	0.9	0.6	0.4	0.4	0.6	0.9	0.6	0.5	0.5	0.5	0.9	2.7	3.6	4.3	<u>.</u>	1.8	1.0	1.3	1.5	1.0	1.3	1.2	1.2	1.1	1.9	0.9	1.3	4 61
Pb (ppm)	21	24	27	20	21	24	31	32	31	23	42	59	53	25	26	21	23	23	26	28	37	26	23	19	20	23	23	21	19	20	18	24	18	23	27	21	21	28	29	30	27	24	27	22	19	26	25	33	21	23	26 24
Cd (ppm)	0.2	0.1	0.2	0.1	0.05	0.05	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.05	0.05	0.05	0.02	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.05
Bi (ppm)	0.1	0.05	0.05	0.6	0.3	0.1	0.05	0.05	0.1	0.3	0.6	0.3	0.9	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
As (ppm)	7	3	11	7	4	4	Ξ	2	6	9	9	5	6	9	9	5	5	5	5	5	9	5	4	4	2	2	4	5	7	5	5	33	4	×	12	12	21	10	Ξ	12	15	12	10	6	6	17	16	19	×	∞ ç	9
(mqq) oM	5	4	2	52	23	9	9	4	12	13	ę	5	4	7	7	ę	e	7	ŝ	4	ю	ę	с	3	4	ŝ	7	2	4	S	4	7	ę	e	7	7		4	4	e	6		e		-	e	e	6	ę	61 6	0 0
Co (ppm)	14.4	23.6	20.2	6.69	61.0	45.0	11.9	17.6	37.9	86.1	12.8	31.7	24.8	14.5	20.3	18.9	20.2	36.2	32.1	24.1	22.5	19.7	15.3	6.6	6.9	6.7	12.4	10.1	21.8	15.9	12.6	12.8	15.4	19.3	20.1	24.7	26.3	17.0	36.3	63.5	108.7	68.4	56.2	43.8	57.4	57.5	70.2	58.9	41.9	36.0	30.2 38.9
Cu (ppm)	69	104	76	245	1293	166	46	120	493	1416	5018	30000	15678	1913	643	785	140	2405	4030	7054	1516	908	2020	1856	1785	364	236	688	303	529	98	116	113	196	226	81	8	545	1594	22	256	1188	50	27	115	382	399	121	18	30	91 81
Au (g/t) Ag (ppm) (	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.4	0.3	17.8	28.8	27.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.4	0.6	0.5	0.3	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.1	0.05	0.05	0.05	0.02	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Hasta (m)	14.4	15.5	26.5	19	20.3	33.5	34.5	36.2	42.5	46.6	15.6	10.8	21.4	18.2	20	21	22.3	24.7	25.7	26.7	27.7	28.7	29.7	30.7	31.7	32.7	33.7	34.7	35.7	36.7	37.7	38.7	39.7	40.7	41.7	42.7	43.7	1.4	45.7	46.7	47.7	48.7	49.7	50.7	51.7	52.7	53.7	54.7	55.7	56.7	57.7
Desde (m)	13.4	14.4	25.5	18	19.3	32.4	33.5	35.2	41	42.5	14.4	9.3	19.5	17.2	19	20	21.3	23.7	24.7	25.7	26.7	27.7	28.7	29.7	30.7	31.7	32.7	33.7	34.7	35.7	36.7	37.7	38.7	39.7	40.7	41.7	42.7	43.7	44.7	45.7	46.7	47.7	48.7	49.7	50.7	51.7	52.7	53.7	54.7	55.7	56.7
Altura m.s.n.m)	645	645	645	645	645	645	645	645	645	645	1552	1552	1552	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801
Coordenada Norte UTM (m)	6343594	6343594	6343594	6343594	6343594	6343594	6343594	6343594	6343594	6343594	6319658	6319658	6319658	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172 6336172
Coordenada Este UTM (m)	320125	320125	320125	320125	320125	320125	320125	320125	320125	320125	315045	315045	315045	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963 316963
Tipo de muestra	Sondaje	Sondaje Sondaje																																																	
Muestra	ST-03-08ICP	ST-03-12ICP	ST-03-04ICP	ST-03-111CP	ST-03-10ICP	ST-03-06ICP	ST-03-09ICP	ST-03-03ICP	ST-03-14ICP	ST-03-13ICP	ST-07-011CP	ST-04-02ICP	ST-04-011CP	ST-01-04ICP	ST-01-05ICP	ST-01-06ICP	ST-01-07ICP	ST-01-08ICP	ST-01-09ICP	ST-01-10ICP	ST-01-11CT	ST-01-12CT	ST-01-13CT	ST-01-14ICP	ST-01-15ICP	ST-01-16ICP	ST-01-17ICP	ST-01-18ICP	ST-01-19ICP	ST-01-20ICP	ST-01-211CP	ST-01-22ICP	ST-01-23ICP	ST-01-24ICP	ST-01-25ICP	ST-01-26ICP	ST-01-27ICP	SI-01-28ICP	ST-01-29ICP	ST-01-30ICP	ST-01-311CP	ST-01-32ICP	ST-01-33ICP	ST-01-34ICP	ST-01-35ICP	ST-01-36ICP	ST-01-37ICP	ST-01-38ICP	ST-01-39ICP	ST-01-40ICP	ST-01-41ICP ST-01-42ICP
Sector	El Huracán	Cóndor	Cóndor	Cóndor	San Aurelio	San Aurelio San Aurelio																																													
(mmn) 7n (mmn)	(mdd) wr (mdd)	1.6 108	1.6 109	1.3 66	1.1 148	1.2 136	1.5 115	0.7 114	0.9 272	0.9 78	1.1 62	1.1 64	117.55	3.00 3.00	7.79 1034.00	57 129.20	3.47 246.75	5.03 375.94																																	
-----------------	----------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	---------	-----------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------	--------------																																
Ph (mmn) Sh	ac (mdd) a	26	24	24	34	26	31	34	28	24	28	24	27.46	0.49	189.00	27.00	54.46	81.45																																	
Cd (mmm) 1		0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.05	4.90	0.54	0.68	1.22																																	
) Ri (nnm)		0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.33	0.05	15.20	1.66	1.99	3.65																																	
Ac (nnm		7	7	10	6	∞	6	7	9	5	5	9	17.64	0.50	299.00	40.28	57.92	98.20																																	
) Mo (nnn	ndd) or o	2	33	-	-	2	2	-	2	-	0.5	1	3.77	0.15	52.00	6.23	10.00	16.23																																	
Co (nnm	mdd) oo (	33.0	35.5	42.0	57.3	47.3	52.4	52.3	33.7	54.6	29.5	38.3	31.66	3.70	214.53	29.83	61.49	91.31																																	
) Cu (mm		150	19	22	161	371	233	248	795	1802	847	1452	4256.65	16.00	36200.00	7217.26	11473.91	18691.16																																	
) Ag (nnm		0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	2.78	0.05	72.80	10.40	13.18	23.57																																	
An Colt	B) nu												0.29	0.00	2.85	0.71	1.00	1.72																																	
Hacta (m)		59.7	60.7	61.7	62.7	63.7	64.7	65.7	66.7	67.7	68.7	69.7	Media	Mínima	Máxima	acion estándar	+ Media (1*)	2 Media (2*)	VACA - T-AKC																																
Desde (m)		58.7	59.7	60.7	61.7	62.7	63.7	64.7	65.7	66.7	67.7	68.7				Desvia	Desv. Est.	Desv. Est. +	, ,																																
Altura	(m.s.n.m)	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801	801																																							
Coordenada	Norte UTM (m)	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172	6336172			uerte $(>3^*)$	nedia (2*-3*)	lébil (1*-2*)	ialía (< 1*)																																	
Coordenada	Este UTM (m)	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963	316963			Anomalía f	Anomalía n	Anomalía e	Sin Anon																																	
Tino de muestra	meanin an adri	Sondaje		MBOLOGÍAS	rincipales	bles	2																																												
Muestra	BIICONTA	ST-01-43ICP	ST-01-44ICP	ST-01-45ICP	ST-01-46ICP	ST-01-47ICP	ST-01-48ICP	ST-01-49ICP	ST-01-50ICP	ST-01-511CP	ST-01-52ICP	ST-01-53ICP		SI	Comercializables p	ntos Comercializat	nentos Penalizable																																		
Sector	10000	San Aurelio			Elementos C	Elemen	Elen																																												

Pozo	Desde	Hasta	Codigo Lito	Observaciones Litología		
ST-01	0.00	9.90	RELL			
ST-01	9.90	14.80	DIO	Textura porfídica. Diorita de anfíbola		
ST-01	14.80	15.58	BxHt	Relleno de Sílice y Cal.		
ST-01	15.58	17.30	DIO	Textura porfídica. Diorita de anfíbola		
ST-01	17.30	19.20	MONZ	Monzonita de anfíbola y biotita. Brechización desde el 19-22.3m?		
ST-01	19.20	23.70	DIO	Textura porfídica. Diorita de anfíbola. Brechización desde el 19-22.3m?		
ST-01	23.70	42.20	DIO	Textura porfídica. Diorita de anfíbola. Entre el 25 al 30.3 m Brechización?		
ST-01	42.20	43.30	DAND	Masa fundamental de color negro verduzco		
ST-01	43.30	44.70	BxTm	Clastos de 1 a 3 cm de composición diorítica y masa fundamental afanítica.		
ST-01	44.70	45.30	DAND	Dique riolítico. Mineralizado con Cp-Py.		
ST-01	45.30	53.30	DIO	Textura porfídica.		
				Dique pórfido andesítico. Metro 60-60.2 amigdalas de		
ST-01	53.30	63.30	DAND	0.5-1 cm rellenas por Qz-Py-Cpy. Alteración de Ep leve		
				a moderada.		
ST-01	63.30	70.00	DIO	Textura fanerítica.		
				Clastos de 1 a 3 cm de composición andesítica. 21.8 -		
CT 03	0.00	22.60	Data	23.6 m se observan amigdalas rellenas de sílice y textur		
51-02	0.00	25.00	DXIIII	de flujo (amígdalas elongadas). En la masa se observan		
				cristales orientados de Plg, Qz en una masa de Feld-k.		
				27.1-29.1 m Pórfido con cristales de Plg de anhedrales a		
ST-02	23.60	29.10	PGd	subhedrales, anfibol alterado parcialmente a Cl, Feld-k		
				Qz.		
				Fenocristales de plg euhedrales a subehuedrales de 1 a		
ST-02	29.10	30.55	AND	2mm, 1% de amígdalas rellenas con Ep. Masa		
				fundamental pardo rojiza.		
ST-02	30.55	34.90	PGd	Caja 15 sin taco		
ST-02	34.90	35.50	BxTm			

ANEXO C-1: TABLA DE MAPEO DE SONDAJES: LITOLOGÍAS

ST-02	35.50	37.90	PGd	Varía a Porfido monzonítico			
ST-02	37.90	43.65	AND				
ST-02	43.65	45.00	PGd	Varía a diorítico.			
ST-02	45.00	45.26	PGd	Varía a granodiorítico			
ST-02	45.26	46.37	AND	Contacto observado, Andesita amigdaloidal			
ST-02	46.37	52.70	PGd	Granodiorítico.			
ST-02	52.70	60.70	PGd	Varía a monzonítico.			
				Amígdalas de 0.5 a 1 cm rellenas con Ep y Qz. Masa			
ST-03	0.00	2.15	DAND	fundamental afanítica con fx de subeuhedrales a			
				euhedrales alterados levemente a Ep de 3 a 5 mm.			
Pozo	Desde	Hasta	Codigo Lito	Observaciones Litología			
				Contacto con intrusivo granítico. Granito de textura			
ST 02	2.15	7.60	CDAN	fanerítica de grano grueso (0.5 a 0.8 cm). Máficos de			
51-05	2.13	7.00	GRAN	anfíboles alterados parcialmente a Cl. Presenta textura			
				gráfica. 5% de Mg.			
ST-03	7.60	17.80	GRAN				
ST-03	17.80	25.40	GRAN	Brecha Hidrotermal			
ST-03	25.40	28.20	GRAN				
ST-03	28.20	33.50	GRAN	Brecha Hidrotermal			
ST-03	33.50	35.10	GRAN	33.8-34 m Qz oqueroso. Brecha Hidrotermal			
ST-03	35.10	41.60	GRAN	Brechización rellena con Esp (2mm) (mineralización de			
				Cpy)			
ST-03	41.60	45.24	DAND	Fx de 1 a 2 mm de Plg, textura porfídica.			
ST-03	45.24	50.00	GRAN				
ST-04	0.00	2.60	LIM				
ST-04	2.60	2.90	ARC	Arcilla como suelo			
ST-04	2.90	7.10	LIM				
ST-04	7.10	7.85	ARE				
ST-04	7.85	8.00	AND	Andesita afanítica			
ST-04	8.00	8.10	AND	Andesita porfídica			
ST-04	8 10	10.80	BXVn	Clastos subangulosos a subredondeados de 0.5 cm a 1.5			
SI UT	0.10	10.00	271 11	cm de composición volcánica.			
ST-04	10.80	12.70	ARE	Arcosa			
ST-04	12.70	15.90	AND	Andesita porfídica			

15.90	16.80	AND	Andesita amigdaloidal			
16.80	16.90	AND	Andesita afanítica			
16.90	21.40	ARE				
0.00	1.50	RELL				
1.50	5.10	BXVn	Del 0 al 10.5 m Roca meteorizada parcialmente.			
5.10	5.70	ARE	Arenisca volcánica			
5.70	11.07	AND	Andesita porfídica			
11.07	14.20		Andesita porfídica amigdaloidal, amígdalas de 1 a 3			
11.07	14.50	AND	mm.			
14.30	17.38	AND	Andesita porfídica (Ocoita)			
17 29	22.00	DVVn	En el 17.38-17.48 amígdalas de 2 a 6 mm rellenas por			
17.38	22.00	DAVII	Ep.			
0.00	2.10	RELL				
2.10	14.70	BXVn				
14.70	18.10	BXVn				
18.1	18.9	AND	Andesita porfídica			
18.9	22.35	AND	Andesita amigdaloidal			
22.35	31.9	AND	Andesita porfídica			
31.9	35.45	BXVn				
31.9 35.45	35.45 40.00	BXVn AND	Andesita (Ocoita)			
31.9 35.45 0.00	35.45 40.00 3.10	BXVn AND RELL	Andesita (Ocoita)			
31.9 35.45 0.00 <b>Desde</b>	35.45 40.00 3.10 Hasta	BXVn AND RELL Codigo Lito	Andesita (Ocoita) Observaciones Litología			
31.9 35.45 0.00 <b>Desde</b> 3.10	35.45 40.00 3.10 Hasta 5.20	BXVn AND RELL Codigo Lito ARE	Andesita (Ocoita) Observaciones Litología			
31.9 35.45 0.00 <b>Desde</b> 3.10	35.45 40.00 3.10 Hasta 5.20	BXVn AND RELL Codigo Lito ARE	Andesita (Ocoita) Observaciones Litología Clastos de 0.5 a 3 cm subangulosos a subredondeados,			
31.9 35.45 0.00 <b>Desde</b> 3.10 5.20	35.45 40.00 3.10 Hasta 5.20 12.00	BXVn AND RELL Codigo Lito ARE BXSed	Andesita (Ocoita) Observaciones Litología Clastos de 0.5 a 3 cm subangulosos a subredondeados, polimíctico, matriz de arena y cuarzo media. Color gris			
31.9 35.45 0.00 <b>Desde</b> 3.10 5.20	35.45 40.00 3.10 Hasta 5.20 12.00	BXVn AND RELL Codigo Lito ARE BXSed	Andesita (Ocoita) Observaciones Litología Clastos de 0.5 a 3 cm subangulosos a subredondeados, polimíctico, matriz de arena y cuarzo media. Color gris verduzco. Matriz silicea.			
31.9 35.45 0.00 <b>Desde</b> 3.10 5.20	35.45 40.00 3.10 Hasta 5.20 12.00	BXVn AND RELL Codigo Lito ARE BXSed	Andesita (Ocoita) Observaciones Litología Clastos de 0.5 a 3 cm subangulosos a subredondeados, polimíctico, matriz de arena y cuarzo media. Color gris verduzco. Matriz silicea.			
31.9 35.45 0.00 <b>Desde</b> 3.10 5.20	35.45 40.00 3.10 Hasta 5.20 12.00	BXVn AND RELL Codigo Lito ARE BXSed	Andesita (Ocoita) Observaciones Litología Clastos de 0.5 a 3 cm subangulosos a subredondeados, polimíctico, matriz de arena y cuarzo media. Color gris verduzco. Matriz silicea.			
31.9 35.45 0.00 <b>Desde</b> 3.10 5.20	35.45 40.00 3.10 Hasta 5.20 12.00	BXVn AND RELL Codigo Lito ARE BXSed	Andesita (Ocoita) Observaciones Litología Clastos de 0.5 a 3 cm subangulosos a subredondeados, polimíctico, matriz de arena y cuarzo media. Color gris verduzco. Matriz silicea. Clastos de otra arenisca, rocas volcánicas, cuarzo y			
31.9 35.45 0.00 <b>Desde</b> 3.10 5.20	35.45 40.00 3.10 Hasta 5.20 12.00	BXVn AND RELL ARE BXSed	Andesita (Ocoita) Observaciones Litología Clastos de 0.5 a 3 cm subangulosos a subredondeados, polimíctico, matriz de arena y cuarzo media. Color gris verduzco. Matriz silicea. Clastos de otra arenisca, rocas volcánicas, cuarzo y plagioclasa.			
31.9 35.45 0.00 <b>Desde</b> 3.10 5.20 12.00	35.45 40.00 3.10 Hasta 5.20 12.00 13.20 1.65	BXVn AND RELL ARE BXSed BXSed	Andesita (Ocoita)         Observaciones Litología         Clastos de 0.5 a 3 cm subangulosos a subredondeados, polimíctico, matriz de arena y cuarzo media. Color gris verduzco. Matriz silicea.         Clastos de otra arenisca, rocas volcánicas, cuarzo y plagioclasa.			
	15.90 16.80 16.90 0.00 1.50 5.10 5.70 11.07 14.30 17.38 0.00 2.10 14.70 18.1 18.9 22.35	15.90       16.80         16.80       16.90         16.90       21.40         0.00       1.50         1.50       5.10         5.10       5.70         5.70       11.07         11.07       14.30         14.30       17.38         17.38       22.00         0.00       2.10         2.10       14.70         18.1       18.9         18.9       22.35         22.35       31.9	15.90       16.80       AND         16.80       16.90       AND         16.90       21.40       ARE         0.00       1.50       RELL         1.50       5.10       BXVn         5.10       5.70       ARE         5.70       11.07       AND         11.07       14.30       AND         14.30       17.38       AND         17.38       22.00       BXVn         0.00       2.10       RELL         2.10       14.70       BXVn         14.70       18.10       BXVn         18.1       18.9       AND         18.9       22.35       AND         22.35       31.9       AND			

ST-08	2.80	3 30	GPD	Vetillas de Feld-k con boxwork de Py (Cpy?) (3.05 al		
51-00	2.00	5.50	UKD	3.3)		
ST-08	3.30	5.20	MONZ	Enclaves de 3 cm		
ST-08	5.20	6.20	DIO	de Bt y Anf		
ST-08	6.20	14.20	MONZ	Vetillas de Py sinuosas de 1 mm.		
ST-08	14.20	17.20	MONZ	Más contenido de máficos y Plg más cálcicas		
				Enclaves de 7 cm (metro 18.4) mineralización de Bo		
ST-08	17.20	42.10	MONZ	(metro 17.2). Gran contenido de máficos. Py del metro		
				17.2 al 21.1		
ST-08	42.10	42.95	MONZ	42.1 A 42.30 vetilla FeldK		
ST-08	42.95	60.00	MONZ	55 a 55.3 m enclaves máficos. Contacto intrusivo		
ST-08	60.00	73.20	MONZ	Enclave a los 74.46 m de 0.5 m.		
ST-08	73.20	93.55	MONZ	Enclaves de 91.45 a 92.2 m.		
ST-08	93.55	96.20	MONZ	Vetillas Py-Cpy cortan intrusivos y enclaves		
ST-08	96.20	98.20	MONZ-DIO	Enclaves de 5 cm.		
ST-08	98.20	101.20	MONZ-DIO	100.4 al 100.9 m enclaves máficos de 1 a 4 cm.		
ST-08	101.20	115.00	MONZ-DIO	103.6 al 104.2 m enclaves máficos.		
ST-08	115.00	117.00	DIO	Cambio de composición transicional		
ST-08	117.00	131.20	GAB			

	Codigo	
Leyenda Litologías	LITO	Litología y Litoestratigrafía
	DAND	Dique Andesítico
	AND	Andesita
	ARC	Arcillas
	GRAN	Granito de anfíbola
	RELL	Relleno
	GAB	Gabro de Piroxenos, Biotita y Anfíbola
	ARE	Arenisca Tobacea
	BXSed	Brecha Sedimentaria
	MxDIO	Microdiorita de Biotita y Anfíbola
	GRD	Granodiorita de Biotita y Anfíbola
	BxTm	Brecha Tardimagmática
	LIM	Limolita
	DIO	Diorita
	PGd	Pórfido Granodiorítico
	BXVn	Brecha volcánica
	MONZ	Monzonita de Anfíbola y Biotita
	BxHt	Brecha Hidrotermal

Pozo	Desde	Hasta	Alteración	Observación
ST-01	9.90	17.00	Alteración Cl-Ep	
ST-01	17.00	17.30	Alteración a Ep intensa y seritización.	
ST-01	17.30	20.50	Alteración intensa a Ep	
ST-01	20.50	21.10	Alteración a Ep moderada	
ST-01	21.10	22.30	Alteración a Ep intensa y seritización.	
ST-01	22.30	23.70	Alteración a Ep leve a moderada	
ST-01	23.70	32.50	Alteración Cl-Ep	
ST 01	32 50	30.20	Seritización y alteración albítica y alteración	
51-01	52.50	39.20	potásica de leve a moderada. Alteración Cl-Ep	
ST-01	39.20	43.30	Alteración Cl-Ep	
ST-01	43.30	44.90	Silicificación. Alteración Cl-Ep	
ST-01	44.90	47.45	Alteración Cl-Ep	
ST-01	47.45	49.50	Alteración potásica. Alteración Cl-Ep	
ST-01	49.50	52.70	Alteración Cl-Ep	
ST-01	52.70	53.90	Alteración Cl-Ep	
ST-01	53.90	55.30	Alteración Ep intensa. Alteración Cl	
ST-01	55.30	59.60	Alteración Cl-Ep	
ST-01	59.60	60.00	Alteración Cl. Alteración Ep moderada	
ST-01	60.00	63.10	Alteración Cl-Ep	
ST-01	63.10	64.30	Alteración Ep intensa y Cl	
ST-01	64.30	66.60	Alteración Cl-Ep	
ST-01	66.60	68.00	Alteración Ep intensa y alteración potásica	
ST-01	68.00	70.00	Alteración Cl-Ep	
ST-02	0.00	5.00	Alteración a Cl-Ep y sericítica	
ST-02	5.00	8.10	Alteración Cl-Ep	
ST-02	8.10	9.20	Alteración a Cl-Ep y sericítica	
ST-02	9.20	9.60	Brecha hidrotermal (silicificado), Alteración Cl-Ep	
ST-02	9.60	10.00	Alteración potásica y Cl-Ep	
ST-02	10.00	11.30	Alteración Cl-Ep	
ST-02	11.30	13.60	Alteración potásica intensa y Ser, Cl-Ep	
ST-02	13.60	14.80	Alteración Cl-Ep y Ser	

ANEXO C-2: TABLA DE MAPEO DE SONDAJES: ALTERACIONES

ST-02	14.80	15.50	Alteración sericítica, Cl-Ep
ST-02	15.50	21.80	Alteración Cl-Ep
ST 02	21.80	26.10	Silicificación intensa y alteración albitica. Posterior
51-02	21.60	20.10	Cl-Ep
ST-02	29.10	30.55	Alteración Cl-Ep
ST 03	22.80	28.00	Alteración sericítica leve, albitización moderada,
51-02	52.80	38.00	silicificación moderada
ST-02	39.00	42.00	Silicificación intensa
ST-02	42.00	43.00	Silicificación moderada
ST-02	43.65	45.00	Alteración a Ser leve

Pozo	Desde	Hasta	Alteración	Observación
ST-02	45.00	46 30	Alteración Cl-En	Observation
ST-02	45.00	46.60	Silicificación de leve a moderada y Ser leve	
ST-02	46.60	52.70	Alteración Cl-En leve	
51 02	10.00	52.70	Alteración leve de Feld-k y posterior alteración de	
ST-03	11.40	11.50	En	
			Lp	
			Alteración leve de Feld k y posterior alteración de	
ST-03	14.40	14.60	En	
ст 02	17 45	17.50	Ep Alternoión a En (5 am)	
SI-03	17.43	19.25	Alternation a Ep	
SI-03	10.07	10.23	Alteración de En en vetilles	1 o 2 mm
SI-03	10.23	10.00	Alteración de Ep en vermas	1 a 2 mm
51-U3 ST 02	18.04	18.08	Alteración a Ep	
51-03	18.68	19.30	Silicificación	
ST-03	19.72	19.84	Alteración leve de Feid-K y posterior alteración de	
	02.42	00.40	Ep	
ST-03	23.42	23.48	Alteración de Ep intensa	
ST-03	24.00	25.40	Alteración de Ep moderada y Cl leve.	
ST-03	25.70	25.94	Alteración deQz-Feld k	
ST-03	25.60	25.94	Alteración Ep y Cl en halo	
ST-03	30.26	30.50	Alteración potásica intensa	
				Brecha
ST-03	30.80	31.20	Alteración a En intensa y seritización	Hidrotermal con
51 00	20.00	01.20	Theracion a Lp intensa y serial action.	mineralización
				2% Esp.
ST-03	41.60	15 24	Alteración a En	En Dique
51-05	41.00	43.24	Alteración a Ep	andesítico
ST-03	49.27	49.60	Alteración de Cal	
ST-04	9.00	10.80	Silicificación	
ST-05	1.50	3.60	Alteración leve a Ep	
ST-05	8 10	9 10	Alteración a Cl leve y patinas de óxidos de	
51 00	0110	<i>,</i>	manganeso	
ST-06	38.90	40.00	Alteración a Cl	
ST-08	3.05	3.30	Alteración potásica, Ep y óxidos de hierro	s/alt
ST-08	7.90	9.50	Alteración de óxidos de hierro	
ST-08	16.90	17.20	Alteracíon de Ep	
ST-08	18.90	20.80	Alteración leve a alb y vetillas de alb de 1 mm	
ST-08	21.70	22.80	Oxidos de hierro, salbanda, Cal y Cl	
ST-08	23.00	23.30	Cal y óxidos de hierro	
ST-08	23.30	25.40	Alteración intensa a óxidos de hierro, limonitas	
ST-08	30.00	30.30	Alteración de Alb leve	
ST-08	32.30	32.60	Alteración leve a Cl	
ST-08	33.95	34.80	Alteración leve a Cl	
ST-08	40.75	41.75	Alteración Cl-Alb leve	
ST-08	42.10	42.95	Alteración leve a Cl	
ST-08	42.95	60.00	Alteración leve a Cl	
ST-08	62.30	62.90	Alteración Ep-Ser leve	
ST-08	63.30	64.10	Alteración moderada limonitas. En leve	
ST-08	65.20	66.50	Alteración leve Cl-Ep	
			······································	

Pozo	Desde	Hasta	Alteración	Observación
ST-08	66.50	70.70	Alteración leve Ser	
CT 49	72 10	72 (0	Alteración Moderada potásica. Alb moderada y Ep	
51-08	72.10	72.00	leve	
ST-08	72.60	73.20	Alteración leve a Cl	
ST-08	75.10	75.35	Alteración moderada a Ser	
ST-08	75.35	76.30	Alteración leve a Cl	
ST-08	76.30	78.90	Alteración leve a Cl	
ST-08	94.13	95.50	Alteración Ser moderada y Alb moderada	
ST-08	95.50	96.20	Alteración leve a Cl	
ST-08	96.20	101.20	Alteración leve a Cl	
ST-08	109.20	109.40	Alteración Potásica moderada	
ST-08	109.40	109.60	Alteración a Cl-Ep sobreimpuesta	
ST-08	112.50	112.80	Alteración a Alb leve	
ST-08	113.48	115.00	Alteración de limonitas	
ST-08	128.50	129.80	Alteración a Alb, Ep, Cl moderada	
ST-08	121.30	122.10	Alteración leve a Cl	

Pozo	Desde	Hasta	Código Zona Mineral	Ocurrencia Zona Mineral	Ley Visual de Cu(%)	OBSERVACIÓN
ST-01	17.00	20.50	Pirita-Calcopirita	Diseminada	05-0.8	
ST-01	20.50	23.70	Pirita	Diseminada	s/min	
ST-01	21.10	22.30	Calcopirita	En vetillas	< 0.5	
ST-01	23.40	24.20	Calcopirita	Diseminada y en vetillas	<0.5	
ST-01	23.70	34.70	Pirita-Calcopirita	Diseminada y en cumulos	0.5 a 0.8	Algunas en vetillas
ST-01	34.70	39.20	Pirita-Calcopirita	En cúmulos	1	
ST-01	39.20	41.20	Calcopirita-Pirita	En cúmulos	0.5	
ST-01	41.20	44.70	Pirita	Diseminada	s/min	
ST-01	44.70	45.30	Pirita-Calcopirita	En dique	1.5	
ST-01	45.30	47.45	Pirita	Diseminada	s/min	
ST-01	47.45	49.50	Calcopirita-Pirita	Diseminada y en vetillas	0.5-0.8	
ST-01	49.50	51.50	Pirita	Diseminada	s/min	<0.5%
ST-01	51.50	52.70	Calcopirita-Pirita	Diseminada y en vetillas	0.5-0.8	
ST-01	52.70	53.90	Calcopirita	Diseminada y en vetillas	0.5-0.8	
ST-01	53.90	55.30	Calcopirita	Diseminada y en vetillas	0.5-0.8	
ST-01	55.30	60.00	Pirita	Diseminada	s/min	<0.5%
ST-01	60.00	60.20	Calcopirita-Pirita	Amígdalas en dique	0.5-0.8	
ST-01	60.20	63.30	Pirita	Diseminada	s/min	<0.5%
ST-01	63.30	66.00	Calcopirita-Pirita	Diseminado	< 0.5	
ST-01	66.00	66.30	Calcopirita	En vetillas	1	
ST-01	66.30	70.00	Calcopirita-Pirita	Diseminado	<0.5	

ANEXO C-3: TABLA DE MAPEO DE SONDAJES: MINERALIZACIÓN

						Almagre,
ST-02	8.10	9.20	Oxidos de Cobre	En pátinas	<0.5	limonitas,
						crisocola
ST-02	34 60	34 80	Magnetita	En vetillas y	s/min	
	51.00	51.00	magnetitu	diseminada	5/11111	
						Óxidos de
ST-02	40.40	41.10	Oxidos de cobre	En falla	0.8-1.2	manganeso y
						limonitas
ST-03	2.30	2.31	Pirita	Vetillas	s/min	
ST-03	2.50	2.51	Pirita	Vetillas	s/min	
ST-03	3.40	3.42	Pirita-Calcopirita	Vetillas	< 0.5	
ST-03	4.40	4.41	Pirita	Vetillas	s/min	

Pozo	Desde	Hasta	Código Zona	Ocurrencia	Ley Visual	OBSERVACIÓN
1 020	Desue	Hasta	Mineral	Zona Mineral	de Cu(%)	ODSERVACION
ST-03	4.50	4.51	Pirita	Vetillas	s/min	
ST-03	4.90	5.14	Pirita	Vetillas	s/min	
ST-03	5.50	5.52	Pirita	Vetillas	s/min	
ST-03	2.15	7.60	Magnetita	Vetillas	s/min	5% de mg
ST-03	11.50	11.55	Pirita	Diseminada	s/min	Traza
ST-03	14.00	14.10	Calcopirita	Vetillas	0.5	
ST-03	15.00	15.25	Hematita	Vetillas y en		Alteración de
				cúmulos		epidota
ST-03	18.07	18.25	Especularita y	Brecha		Alteración de
CTT 0.2	10 44	10.60	Cuarzo	Hidrotermal	<i>,</i> .	epidota
ST-03	18.64	18.68	Especularita	En vetillas	s/min	
ST-03	24.20	24.22	Pirita	En vetillas	s/min	
<b>S1-03</b>	25.90	25.93	Especularita	En vetillas		2 cm de veta
ST-03	26.10	26.24	Especularita- Cuarzo	En vetillas	s/min	Especularita masiva
ST-03	26.34	26.46	Especularita- Calcopirita	En vetillas	7	Especularita masiva
ST-03	28.70	28.71	Pirita	Diseminada	s/min	
ST-03	30.80	31.20	Especularita- Epidota	Brecha hidrotermal	s/min	2% Especularita
ST-03	32.40	33.50	Especularita- Pirita-Calcopirita- Cuarzo	Brecha hidrotermal	7	<ul><li>35% Especularita.</li><li>7% Calcopirita.</li><li>5% Pirita. 12% Cuarzo</li></ul>
ST-03	33.50	34.50	Especularita- Pirita-Calcopirita- Cuarzo	Brecha hidrotermal	7	
ST-03	35.10	37.80	Calcopirita- Especularita	Diseminado y en cúmulos	<0.5	Traza, brechización más leve
ST-03	40.84	41.50	Calcopirita	En falla	< 0.5	
ST-03	42.00	42.25	Calcopirita-Pirita	En vetillas	3	
ST-03	42.25	44.00	Calcopirita-Pirita	En vetillas	1	
ST-03	44.50	44.60	Pirita-Calcopirita	Brecha hidrotermal	4	Pirita 12%. Clastos de 0.5 a 3 cm (fragmentos de dique y de veta)
ST-03	44.90	45.00	Pirita-Calcopirita- Especularita	En vetillas	<0.5	
ST-04	9.00	10.80	Óxidos de Cobre- óxidos de manganeso	En patinas	2.5	Crisocola principalmente
ST-04	18.10	21.40	Óxidos de Cobre	En patinas	3	Crisocola, Malaquita y Cobres negros

			Código Zona	Ocurrencia	Ley Visual	,
Pozo	Desde	Hasta	Mineral	Zona Mineral	de Cu(%)	OBSERVACION
	10.50	21.40		D: : 1	2	En conjunto con
ST-04	19.50	21.40	Calcopirita	Diseminado	3	óxidos ley del 3%
ST-06	2 10	14 10	Óvidos de Cobre	En natinas	26	Crisocola y
51-00	2.10	14.10	Oxidos de Cobie	En painas	2.0	Malaquita
ST-06	30.80	31.20	Óxidos de Cobre	En patinas	0.3-0.5	Crisocola
ST-06	38.90	40.00	Óxidos de Cobre	En patinas	1	Por pistoleo FRX
ST-07	8.00	8.20	Pirita	Diseminado	s/min	Trazas de pirita
ST-07	14.40	15.90	Óxidos de Cobre	En patinas	1.7	Crisocola
ST-08	1.65	3.05	Pirita	Vetillas	s/min	
				Vetillas con		
ST-08	3.05	3.30	Pirita	Boxwork de	<0.5	
				Pirita (Cpy?)		
CT 00	e 20	0.50	Dimito	Vetillas y	a /min	
51-08	8.20	9.50	Pinta	diseminado	S/11111	
CT 49	16.00	17.20	Domito Dirito	En cúmulos	<0.5	10. am
51-08	16.90	17.20	Bornita-Pirita	diseminado		10 cm
CT 49	17.20	21.10	Dimito	Diseminado	a /min	
51-08	17.20	21.10	Pirita	(0.5-1%)	S/mm	
ST-08	25.30	25.40	Óxidos de cobre	En patinas	0.8	
			Divita	Diaminata		Pirita (1%)
ST-08	29.50	29.80	Pirita -	(0.5, 10)	< 0.5	Calcopirita
			Calcopinta	(0.5-1%)		(<0.5%)
	21.50	21.75	Óxidos de Cobre		0.200/	Malaquita y
51-08	31.50	31.75	- pirita	En patinas	0.30%	Crisocola
ST-08	32.30	32.60	Pirita	Diseminado	s/min	
ST-08	55.00	55.30	Pirita	Vetillas	1	
CT 40	62.20	62.00	Dirita	Vetillas y	1	Calcopirita en
51-08	62.30	62.90	Pirita	cúmulos	1	trazas (<0.5%)
				Vetillas con		
ST-08	63.30	64.10	Pirita	Boxwork de		
				Pirita		
ST-08	65.00		Calcopirita	Diseminada	< 0.5	

						Alteración
ST-08	65.90	65.95	Pirita- Calcopirita	Vetillas		potásica con Halo alteración sobreimpuesta sericita-epidota.
						Vetilla 1mm ancho
ST-08	66.50	67.00	Pirita	Diseminada	<1%	
					1-1.5%	
ST-08	72.10	72.60	Pirita-Calcopirita	Diseminadas	Pirita y 0.5	
					% Cp	
						Vetillas sinuosas
ST-08	75.10	75.35	Pirita-Calcopirita	Diseminadas	1%	de cuarzo con
			Ĩ			feldespato
						potásico.5mm
Pozo	Desde	Hasta	Código Zona	Ocurrencia	Ley Visual	OBSERVACIÓN
1010	20040					0202110101010
			Mineral	Zona Mineral	de Cu(%)	
ST-08	77.60	77.70	Mineral Malaquita	En pátinas	de Cu(%)	
ST-08 ST-08	77.60 80.90	77.70 91.20	Mineral Malaquita Pirita- Calcopirita	En pátinas Vetillas	de Cu(%) 0.1-0.3 <0.5	
ST-08 ST-08 ST-08	77.60 80.90 84.00	77.70 91.20 84.10	Mineral Malaquita Pirita- Calcopirita Crisocola	En pátinas Vetillas En pátinas	de Cu(%) 0.1-0.3 <0.5 <0.5	
ST-08 ST-08 ST-08 ST-08	77.60 80.90 84.00 91.17	77.70 91.20 84.10 97.60	Mineral Malaquita Pirita- Calcopirita Crisocola Pirita- Calcopirita	Zona Mineral En pátinas Vetillas En pátinas Diseminado	de Cu(%) 0.1-0.3 <0.5 <0.5 <0.5	
ST-08 ST-08 ST-08 ST-08 ST-08	77.60 80.90 84.00 91.17 95.50	77.70 91.20 84.10 97.60 96.20	Mineral Malaquita Pirita- Calcopirita Crisocola Pirita- Calcopirita Pirita- Calcopirita	Zona Mineral En pátinas Vetillas En pátinas Diseminado Vetillas	de Cu(%) 0.1-0.3 <0.5 <0.5 <0.5 <0.5	
ST-08 ST-08 ST-08 ST-08 ST-08 ST-08	77.60 80.90 84.00 91.17 95.50 96.20	77.70 91.20 84.10 97.60 96.20 98.20	Mineral Malaquita Pirita- Calcopirita Crisocola Pirita- Calcopirita Pirita- Calcopirita Pirita-	Zona Mineral En pátinas Vetillas En pátinas Diseminado Vetillas Diseminada	de Cu(%) 0.1-0.3 <0.5 <0.5 <0.5 <0.5 <0.5	
ST-08 ST-08 ST-08 ST-08 ST-08 ST-08 ST-08	77.60 80.90 84.00 91.17 95.50 96.20 101.60	77.70 91.20 84.10 97.60 96.20 98.20 101.80	Mineral Malaquita Pirita- Calcopirita Crisocola Pirita- Calcopirita Pirita- Calcopirita Pirita- Pirita-Calcopirita Pirita	Zona Mineral En pátinas Vetillas En pátinas Diseminado Vetillas Diseminada Vetillas	de Cu(%) 0.1-0.3 <0.5 <0.5 <0.5 <0.5 <0.5 <0.5 s/min	
ST-08         ST-08         ST-08         ST-08         ST-08         ST-08         ST-08         ST-08         ST-08	77.60 80.90 84.00 91.17 95.50 96.20 101.60 113.60	77.70 91.20 84.10 97.60 96.20 98.20 101.80 113.68	Mineral Malaquita Pirita- Calcopirita Crisocola Pirita- Calcopirita Pirita- Calcopirita Pirita- Calcopirita Pirita Calcopirita	Zona Mineral En pátinas Vetillas En pátinas Diseminado Vetillas Diseminada Vetillas Diseminada	de Cu(%) 0.1-0.3 <0.5 <0.5 <0.5 <0.5 <0.5 s/min <0.5	
ST-08	77.60 80.90 84.00 91.17 95.50 96.20 101.60 113.60 105.65	77.70 91.20 84.10 97.60 96.20 98.20 101.80 113.68 105.68	Mineral Malaquita Pirita- Calcopirita Crisocola Pirita- Calcopirita Pirita- Calcopirita Pirita-Calcopirita Pirita Calcopirita Pirita Pirita	Zona Mineral En pátinas Vetillas En pátinas Diseminado Vetillas Diseminada Vetillas Diseminada Vetillas	de Cu(%) 0.1-0.3 <0.5 <0.5 <0.5 <0.5 <0.5 s/min <0.5 <0.5 <0.5	Sin halo de alteración
ST-08         ST-08	77.60 80.90 84.00 91.17 95.50 96.20 101.60 113.60 105.65 116.00	77.70 91.20 84.10 97.60 96.20 98.20 101.80 113.68 105.68 119.10	Mineral Malaquita Pirita- Calcopirita Crisocola Pirita- Calcopirita Pirita- Calcopirita Pirita-Calcopirita Pirita Calcopirita Pirita Pirita	Zona Mineral En pátinas Vetillas En pátinas Diseminado Vetillas Diseminada Vetillas Diseminada Vetillas Diseminada	de Cu(%) 0.1-0.3 <0.5 <0.5 <0.5 <0.5 s/min <0.5 <0.5 s/min	Sin halo de alteración Menor a 0.5%

Dogo	Doado	Hasta	Relleno	Observesiones
F 020	Desue	пазіа	hidrotermal	Obser vaciones
ST-01	30.70	30.75	Calcita	2 a 3 cm sinuosas
ST-01	30.90	31.10	Calcita	1 a 2 cm sinuosa y 0.5 a 1 cm recta
ST-01	31.50	31.60	Calcita	Recta de 3 cm
ST-01	31.80	31.86	Calcita	Recta de 3 cm
ST-01	34.20	34.30	Calcita	Recta de 2 cm
ST-01	45.70	45.80	Calcita	Sinuosa de 1 cm
ST 01	66.00	66 30	Cuarzo Calconirita	2 a 3 mm con Cpy. Mineralización de 1% de
51-01	00.00	00.30	Cuarzo-Calcopinta	Cu.
ST-02	6.40	6.41	Cuarzo	Sinuosa 2 mm
ST-02	20.90	21.80	Sílice	De 1 a 2 mm sinuosas
ST-02	34.60	34.80	Magnetita	
ST-02	42.00	42.30	Cuarzo	Sinuosas de 5 a 8 mm
ST-02	50.00	50.20	Calcita	Recta de 2 a 3 mm
ST-02	52.70	53.90	Calcita	Sinuosas de 2 a 4 mm
ST-03	2.30	2.31	Cuarzo-Feld k	1.5 cm sinuosas. Mineralización de Py.
ST-03	2.50	2.51	Cuarzo-Feld k	1.5 cm sinuosas. Mineralización de Py.
ST-03	3.40	3 12	Cuarzo-Feld k	Mineralización de Py y Cpy. 2 cm de ancho.
51-05	5.40	5.42	Cuarzo-i ciu k	Py 1%, Cpy <0.5%
ST-03	4.40	4.41	Cuarzo-Feld k	7 mm. Mineralización de Py
ST-03	4.50	4.51	Pirita	1 mm potencia. Halo de alteración de Ep.
ST-03	4 90	5 14	Cuarzo-Feld k	3 vetillas separadas por 4 cm entre
51-05	4.90	5.14	Cuarzo-i ciu k	ellas.Potencias de 3 a 4 cm. Rectas
ST-03	5.50	5.52	Cuarzo-Feld k	1 vetilla de 2 cm de potencia.
ST-03	13.38	13.40	Cuarzo-Feld k	2 cm rectas.
ST-03	14.00	14 10	Cuarzo-Feld k	Sinuosas con alteración de Ep y mineralizado
51-05	14.00	14.10		con Cpy (0.5%).
ST-03	14.40	14 60	Cuarzo-Feld k	Núcleo de Py <0.5%. Potencia 1.5 cm.
51-03	17.40	17.00		Alteración potásica y Ep sobreimpuesta.
ST-03	15.00	15.25	Hematita (Especularita)	25 cm Vetilla de Hem (Esp)

ANEXO C-4: TABLA DE MAPEO DE SONDAJES: VETILLAS

ST-03	17.45	17.50	Cuarzo	Alteración de Ep y núcleo de Anf.
ST-03	18.25	18.60	Epidota	Vetillas de alteración de Ep. 1 a 2 mm Rectas.
ST-03	18.64	18.68	Especularita	Alteración de Ep
ST-03	19.80	19.84	Cuarzo- Especularita	4 cm de potencia, sinuosa.
ST-03	23.00		Epidota	2mm
ST-03	23.36		Epidota	2 mm
ST-03	24.20	24.22	Cuarzo-pirita	1.5 cm sinuosa. Sin halo de alteración.

D	Deade	<b>TI</b> 4 -	Relleno					
POZO	Desde	Hasta	hidrotermal	Observaciones				
ST 02	25.00	25.02	Cuarzo-Feld k,	2 cm de potencia. Halo de alteración de				
51-05	23.90	23.95	Especularita	Cuarzo-Feld-k Ep y Cl.				
CT 03	06.10	26.24	Cuarzo-					
51-03	26.10	26.24	Especularita	Sinuosa de 14 cm y halo de alteración de Ep.				
			Especularita-					
ST-03	26.34	26.46	Calcopirita	Cpy (7%). Potencia de 12 cm y masiva.				
ST-03	39.80	39.90	Cuarzo-Feld k	1.5 cm de potencia. Sinuosa				
CT 02	12 00	10.05	Cuarzo-Pirita y	3% Cpy. 25 cm de potencia. Vetas cortan al				
51-03	42.00	42.25	Calcopirita	dique				
CT 02	10.05	44.00			44.00	44.00		Mineralización en vetillas de Cpy y Py.
51-03	42.25	44.00	Cuarzo	Oqueroso. Vetas cortan al dique				
			Cuarzo-Pirita-					
ST-03	44.90	45.00	Calcopirita-	10 cm de potencia. Vetas cortan al dique				
			Especularita					
ST-06	29.65	30.80	Epidota	Rectas y sinuosas de 1 a 2 mm				
ST 07	6 40	6.60	Cuerzo	2 a 4 mm de potencia. Recta. Con borde de				
51-07	0.40	0.00	Cuarzo	alteración de Ep.				
ST-07	12.12	12.13	Cuarzo-epidota	Recta de 2 a 4 mm.				
ST-08	1.65	3.05	Cuarzo-Calcopirita	Sinuosas de 5 mm				
ST-08	3.05	3.30	Feld-k	Feld-k de 2 mm con boxwork de Py				
ST-08	7.90		Pirita	Sinuosa de 1 mm				

ST-08	8.40		Pirita	Sinuosa de 1 mm
ST-08	14.35		Albita	Rectas de 1 mm
ST-08	14.63		Albita	Rectas de 1 mm
ST-08	20.80		Albita	Rectas de 1 mm
ST-08	26.66	26.67	Albita	Recta de 10 mm
ST-08	32.30	32.60	Albita	
ST-08	32.30	32.60	Biotita-Feldk	
ST-08	35.80	35.86	Calcita	Recta de 2 mm
ST-08	36.25	36.50	Biotita-Feldk	
ST-08	42.10	42.95	Biotita-Feldk	Sinuosas de 2mm
ST-08	44.60		Albita	Recta 1 mm
ST-08	44.80	44.90	Biotita-Feldk	Sinuosas 1mm
ST-08	46.40		Albita	Sinuosa 1 mm
ST-08	56.10		Biotita-Feldk	Solo feldk. 2mm sinuosa
ST-08	73.30	73.70	Calcita	Sinuosas 1 cm con halo alteración a Ep
ST-08	74.47	74.48	Albita	Sinuosas
ST-08	75.58		Calcita	Sinuosas 3mm
ST-08	76.60		Calcita	Recta 2mm
ST-08	82.40	82.80	Calcita	Recta 5mm
ST-08	83.20	83.60	Biotita-Feldk	Sinuosas 1 mm. Solo feldk
ST-08	85.84	86.00	Cuarzo	Solo cuarzo. Sinuosas
ST-08	88.24		Calcita y Feld k	Feldk y Cal
Pozo	Decde	Hacta	Relleno	Observaciones
1 020	Desue	Hasta	hidrotermal	observaciones
ST-08	88.70		Calcita	Sinuosa 2mm
ST-08	90.25		Feldk	Solo feld k
ST-08	95.50	96.20	Calcita	
ST-08	101.60	101.80	Cuazo-Feld-k	Sinuosas de 1 mm
ST-08	105.20	105.36	Calcita	Rectas de 1 mm
ST-08	105.65	105.68	Calcopirita-Pirita	Sinuosas de 1 mm
ST-08		107.00	Cuerzo	Sinuosas de 1 mm
01 00	107.01	107.02	Cuarzo	Sindosas de 1 mm
ST-08	107.01 110,2	107.02 110,5	Alunita	Veta alunita con halo alteracion Ep
ST-08 ST-08	107.01 110,2 113.30	107.02 110,5 113.48	Alunita Qz-Calcita	Veta alunita con halo alteracion Ep Sinuosa de 5 mm

ST-08	125.67	125.71	Cuarzo	Sinuosa de 1 mm
ST-08	125.90	126.10	Cuarzo-Pirita	Borde de reacción Feld-k, Sinuosa de 1 mm
ST-08	130.60	130.86	Cuarzo	Borde de reacción Feld-k, Sinuosa de 5 mm

Pozo	Dosdo	Hacta	Código	Obsarvación estructura
1 020	Desue	Hasta	Estructura	Observación estructura
ST-01	15.00	17.00	Fx	Relleno de limonitas
ST-01	18.40	19.00	Fx	Relleno de limonitas
ST-01	20.00	20.50	Fx	Relleno de óxidos de hierro
ST-01	58.30	58.80	Fx	Relleno con Cal y Ep
ST-01	60.40	60.60	Fa	Relleno con Cal y Cl
ST-02	20.90	21.80	Fx	Alteración de Ep
ST-02	32.50	32.80	Fx	Relleno de Ep
ST 02	40.40	41.10	Fo	Relleno de óxidos de manganeso, limonitas y óxidos
51-02	40.40	41.10	1 a	de cobre
ST-02	48.50	49.00	Fx	Pátinas de limonitas y óxidos de manganeso
ST-02	57.90	59.10	Fx	Sin relleno, pátinas de óxidos de manganeso
ST-03	6.50	7.60	Fa	Rellena con salbanda y Cal.
ST-03	27.20	28.20	Fx	Sin relleno
ST-03	30.50	30.80	Fx	Sin relleno
ST-03	34.50	37.00	Fx	Sin relleno
ST-03	40.84	41.50	Fa	Rellena con Cal, limonitas, Cl y Ep. Mx <0.5% de
51-05	-0.0-	41.50	1 a	Сру.
ST-03	44.00	44.60	Fx	Sin relleno
ST-04	0.00	5.50	Fx	
ST-04	9.30	10.80	Fa	Relleno con Salbanda
ST-04	12.00	12.80	Fa	Relleno de Arcillas
ST-04	12.80	14.00	Fx	Sin Relleno
ST-04	14.00	15.90	Fa	Relleno de Arcillas y Cal
ST-04	15.90	16.80	Fa	Sin Relleno
ST-04	18.10	21.40	Fa	Relleno de óxidos de cobre
ST-05	1.50	2.20	Fx	Sin Relleno
ST-05	2.20	3.60	Fx	Relleno de óxidos de manganeso y arcillas
ST-05	3.60	4.30	Fa	Relleno de arcilla y pátinas de limonitas
ST-05	4.30	4.80	Fx	Pátinas de óxidos de manganeso
ST-05	4.80	5.60	Fa	Relleno de arcillas

ANEXO C-5: TABLA DE MAPEO DE SONDAJES: ESTRUCTURAS

ST-05	5.60	7.10	Fx	Sin Relleno
ST-05	7.10	8.10	Fa	Relleno de arcillas
ST-05	8.10	9.10	Fx	Pátinas de óxidos de manganeso
ST-05	9.10	10.60	Fx	Sin Relleno
ST-05	11.07	11.45	Fa	Relleno con Salbanda
ST-05	11.45	12.00	Fx	Relleno de arcillas
ST-05	12.70	13.60	Fx	Relleno de arcillas
ST-05	13.65	14.30	Fx	Sin Relleno
ST-05	14.90	16.80	Fx	Relleno de óxidos de manganeso, limonitas y arcillas

Pozo	Desde	Hasta	Código Estructura	Observación estructura
ST-05	17.30	17.85	Fx	Relleno de óxidos de manganeso, limonitas y arcillas
ST-05	19.14	19.54	Fx	Relleno de óxidos de manganeso, limonitas y arcillas
ST-05	21.00	21.60	Fa	Relleno de óxidos de manganeso, limonitas y arcillas
ST-06	0.00	2.10	Fa	Relleno con arcillas, salbanda, limonitas, óxidos de manganeso y de cobre
ST-06	2.10	14.10	Fa	Relleno con arcillas, salbanda, limonitas, óxidos de manganeso y de cobre
ST-06	14.10	18.10	Fa	Relleno con arcillas, salbanda, limonitas, óxidos de manganeso
ST-06	18.10	20.35	Fx	Relleno de arcilla y limonitas
ST-06	21.65	23.30	Fx	Relleno de sílice
ST-06	25.00	25.80	Fx	Relleno de sílice
ST-06	25.80	26.50	Fx	Sin Relleno
ST-06	26.50	27.10	Fa	Relleno de óxidos de hierro
ST-06	27.10	28.00	Fx	Sin Relleno
ST-06	28.60	29.30	Fa	Relleno de óxidos de manganeso
ST-06	30.80	31.20	Fx	Sin Relleno
ST-06	31.90	32.60	Fa	Relleno de Salbanda
ST-06	34.65	35.45	Fa	Relleno de Ep, limonitas y arcillas

ST-06	38.70	38.90	Fa		Relleno de Cal, arcillas y Cl
ST-07	3.25	4.40	Fa		Relleno con Salbanda
ST-07	4.40	5.20	Fx		Sin Relleno
ST-07	5.20	6.40	Fx		Sin Relleno
ST-07	13.20	13.60	Fa		Relleno con Salbanda
ST-07	14.40	14.60	Fa	Re	lleno con Salbanda, óxidos de cobre
ST-07	15.60	16.50	Fx		Sin Relleno, óxidos de cobre
ST-08	6.30	6.65	FaFx	Falla cor	relleno de óxidos de hierro y manganeso?
ST-08	15.50	15.60	Fx	Rel	leno de óxidos de manganeso y Hem
ST-08	16.00	16.05	Fx	Rel	leno de óxidos de manganeso y Hem
ST-08	21.70	22.80	ZFa		Salbanda de falla y Cal
ST-08	23.00	23.30	ZFa	]	Rellena con Cal y óxidos de hierro
ST-08	23.30	25.80	ZFa		Limonitas
ST-08	25.30	25.40	Fa		Óxidos de cobre
ST-08	25.40	25.80	ZFa		Limonitas
ST-08	26.30	27.00	Fx		Rellenas de Cal
ST-08	28.00	28.30	Fa		Rellenas de Cal
ST-08	30.00	31.75	Fx		Rellenas de Cal
ST-08	30.90	31.00	Fa		Rellenas de Cal
ST-08	32.60		Fa	Rellena	con Cal y óxidos de manganeso (2 mm)
ST-08	33.95	34.35	Fx		Sin relleno
Pozo	Des	sde	Hasta	Código	Observación estructura
1 020	De	Juc	masta	Estructura	observación estructura
ST-08	34.	.35	34.80	Fa	Rellena con salbanda y óxidos de manganeso
ST-08	34.	.80	35.16	Fx	Sin relleno
ST-08	37.	10	37.60	Fa	Rellena con Cal
ST-08					Renena con car
	41.	75	42.10	Fx	Rellena con Cal
ST-08	41. 42.	75 10	42.10 42.95	Fx Fa	Rellena con Cal
ST-08 ST-08	41. 42. 42.	75 10 95	42.10 42.95 43.85	Fx Fa Fx	Rellena con Cal 43,2 falla rellena con Cal
ST-08 ST-08 ST-08	41. 42. 42. 49.	75 10 95 20	42.10 42.95 43.85 50.25	Fx Fa Fx Fa	Rellena con Cal 43,2 falla rellena con Cal Cal
ST-08 ST-08 ST-08 ST-08	41. 42. 42. 49. 49.	75 10 95 20 57	42.10 42.95 43.85 50.25	Fx Fa Fa Fa	Rellena con Cal 43,2 falla rellena con Cal Cal 10 cm rellena Cal y óxidos de manganeso
ST-08 ST-08 ST-08 ST-08 ST-08	41. 42. 42. 49. 49. 50.	75 10 95 20 57 94	42.10 42.95 43.85 50.25 51.70	Fx Fa Fa Fa Fa	Rellena con Cal 43,2 falla rellena con Cal Cal 10 cm rellena Cal y óxidos de manganeso Rellena limonitas, Cal
ST-08 ST-08 ST-08 ST-08 ST-08 ST-08	41. 42. 42. 49. 49. 50. 51.	75 10 95 20 57 94 70	42.10 42.95 43.85 50.25 51.70 52.50	Fx Fa Fa Fa Fa Fx	Rellena con Cal 43,2 falla rellena con Cal Cal 10 cm rellena Cal y óxidos de manganeso Rellena limonitas, Cal

ST-08	59.20	60.00	Fx	Sin relleno
ST-08	60.40	60.70	Fa	Rellena Cal 3 mm
ST-08	63.30	64.10	Fa	Relleno limonitas
ST-08	65.60	65.80	Fa	
ST-08	77.60	77.70	Fa	Pátinas malaquita. 0,1-0,3% ley visual
ST-08	84.00	84.10	Fa	Relleno de óxidos de cobre en pátinas <0.5 %
ST-08	88.24	88.30	Fa	
ST-08	88.24	90.45	Fx	Cal y Cl
ST-08	92.18	92.30	Fx	Relleno de malaquita (0.3-0.5%)
ST-08	102.60	102.90	Fx	Sin relleno
ST-08	105.20	105.34	Fx	Sin relleno
ST-08	110.50	112.50	Fx	Relleno de Cal, Ep y Cl
ST-08	113.48	115.00	Fx	Relleno de Cal y Ep
ST-08	121.30	122.10	Fx	Relleno de Cal

Levenda Estructuras	Código	ESTRUCTURA	
Leyenua Esti ucturas	Fa	Falla	
	Fx	Fracturamiento	
	ZFa	Zona de Falla	

## ANEXO D: PUBLICACIÓN: GENESIS OF CU AND AU DEPOSITS IN THE CRETACEOUS BELT OF CENTRAL CHILE: TILTIL MINING DISTRICT

# Genesis of Cu and Au deposits in the Cretaceous belt of Central Chile: the Tiltil Mining District

Rocío Rudlof f<sup>1,2</sup>, Carlos Marquardt<sup>1,2</sup>, Andrés Pavez<sup>3</sup>, Pedro Cordeiro<sup>1</sup>, Héctor Ramos<sup>1</sup>, José Joaquín Jara<sup>1</sup>

1: Department of Mining Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile.

2: Department of Structural and Geotechnical Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile.

3: GEO-3 Integral solutions in Geology, Geophysics and Geomatics, Camino Santa Rosa N°3040, Parcela 15, Lampa, Chile.

#### ABSTRACT

Along the Coastal Cordillera of North-Central Chile, iron-copper-gold oxides (IOCG), iron apatite (IOA), stratabound Cu-(Ag), and copper porphyry deposits have been described, which are associated with metallogenic belts developed in the Jurassic to Cretaceous. During these periods, the tectonic regime along the margin of South America was characterized by an extensional to transtensional setting. However, in the transition from the Early to Late Cretaceous, the tectonic regime changed to a transpressional-to-compressional continental margin. Despite this tectonic setting, there is a substantial amount of deposits and a large number of mining districts related to these ore belts, whose genetic models and formation ages are unknown or debated. In this study, we document the regional geological setting to infer the development of the mining districts, the genesis of their ore deposits, and the continuity of these deposits along the metallogenic belt. The objective is to study the district-scale geological setting and understand genetic models of the magmatic-hydrothermal deposits, their various alteration and mineralization stages, and the spatial and temporal relationships between the ore bodies. The methodology used consists of surface, mine, and drill mapping, geochemical and mineralogical analysis of samples, and the preparation of paragenetic tables. This information is used to produce 3D geological models to characterize the distribution and geometry of the ore bodies and their different alteration and mineralization stages. We find that the ore deposits are associated with the tardimagmatic evolution of the Caleu Pluton (~94 Ma). The hydrothermal alteration stages recognized in most ore bodies are as follows: (1) low-copper-grade early potassic alteration; (2) intermediate sterile albite-actinolite alteration; (3) main sericitic and chlorite-epidote alteration with pyrite-chalcopyrite (minor bornite), quartzhematite (specularite), tournaline, and occasionally magnetite in veins, vesicles, and ductile deformation zones; and (4) sterile late alteration of calcite-quartz veins. The results indicate that two types of mineral deposits of magmatic-hydrothermal origin occur in this district: (1) an IOCG type, mainly in veins and breccias associated with the contents of Au, Cu, and Fe in sulfides, hematite, and quartz; and (2) a stratabound Cu-(Ag) type, mainly in stratiform bodies with low Fe contents.

**Keywords**: Au-Cu Cretaceous belt, Iron oxide-copper gold deposits IOCG, Stratabound Cu-(Ag) deposits, Magmatic hydrothermal system, Coastal Cordillera of North-Central Chile.

#### **RESUMEN**

A lo largo de la Cordillera de la Costa de los Andes Centrales se han descrito depósitos de tipo IOCG, IOA, estratoligados de Cu-(Ag) y pórfidos cupríferos, los cuales se asocian a las franjas metalogénicas desarrolladas en los períodos Jurásico y Cretácico. Durante gran parte de este período la placa sudamericana estuvo sometida a un régimen tectónico extensional a transtensional que a partir de la transición del Cretácico Inferior al Superior cambia a uno predominantemente transpresional a compresional. A pesar de este marco referencial, aún son numerosos los yacimientos y distritos mineros de esta franja cuya génesis y edad de formación no son conocidas o son materia de discusión. Este estudio busca entender el contexto geológico regional para el desarrollo de distritos mineros, la génesis de sus depósitos minerales y la continuidad a lo largo de la franja metalogénica. El objetivo de este trabajo es estudiar la geología del Distrito Minero Tiltil, comprender la geología de los cuerpos mineralizados de orígen magmático-hidrotermal más característicos, sus distintas etapas de alteración y mineralización, y la relación espacial y temporal de estos. La metodología utilizada para ello consiste en: (1) mapeo geológico del distrito, de minas y de sondajes, (2) análisis geoquímicos y mineralógicos de muestras de los cuerpos mineralizados, (3) elaboración de modelos geológicos 3D y (4) confección de tablas paragenéticas de los depósitos más característicos del distrito. Se propone que estos depósitos minerales están genéticamente relacionados con la evolución tardimagmática del Plutón Caleu (~94 Ma) y que las etapas de alteración hidrotermal reconocidas en la mayoría de estos son: 1) alteración potásica temprana, de baja ley; 2) alteración albita-actinolita intermedia, estéril; 3) alteración sericítica y clorita-epidota con mineralización de pirita-calcopirita (menor bornita), cuarzo-hematita (especularita), turmalina, y en ocasiones magnetita; y 4) alteración tardía de calcita-cuarzo, estéril. Los resultados indican que en este distrito ocurren dos tipos de depósitos minerales de origen magmático-hidrotermal: (1) de tipo IOCG, principalmente en cuerpos vetiformes y brechas con contenidos de Au, Cu y Fe asociados a sulfuros, hematita y cuarzo, y (2) de tipo estratoligados de Cu-(Ag), principalmente en cuerpos mantiformes con bajos contenidos de Fe.

**Palabras Claves:** Franja Metalogénica Cretácica Au-Cu, IOCG, Estratoligados de Cu-(Ag), Sistema Magmático-Hidrotermal, Cordillera de la Costa de los Andes Centrales.

#### I. INTRODUCTION

Along the Coastal Cordillera of North-Central Chile and Southern Peru (Fig. 1), iron-copper-gold oxides (IOCG), iron apatite (IOA), stratabound Cu-(Ag), and copper porphyry, among other magmatic-hydrothermal deposits, have been described, which are part of a Jurassic and Cretaceous metallogenic belt (Sillitoe and Perelló, 2005, Maksaev et al., 2007; Sillitoe, 2012; Hermosilla et al., 2015; Cochilco, 2016; Richards et al., 2017; Yáñez & Rivera, 2019; Creixell et al., 2020). Regional evidence indicates that between the Jurassic and middle Cretaceous, metallogenic belts formed under a transtensional to extensional tectonic regime and that this regime changed to a transitional tectonic regime (transtensive-transpressive) between ~125 Ma and ~115 Ma and then to a predominantly transpressional to compressional regime during the Upper Cretaceous (Sillitoe, 2003; Charrier et al., 2007; Mpodozis & Cornejo, 2012; Veloso et al., 2016; Richards et al., 2017; Creixell et al., 2020; Jara et al., 2021). Despite this regional framework, the geometry and continuity of these ore belts, as well as the types of mineral deposits they contain and their relationship with the regional geology, are still debated (e.g. Maksaev et al., 2007; 2010; Barra et al., 2017; Richards et al., 2017; Arredondo et al., 2017; Yáñez & Rivera, 2019).

One of our areas of interest is the southern extension of the Cretaceous metallogenic belt in the Coastal Cordillera of Central Chile (Gröpper, 2011). Here, stratabound Cu-(Ag) deposits occur, such as the El Soldado (~200 mt @1.35% Cu-eq, ~ 103 Ma) and Lo Aguirre (~11 mt @ 2.14% Cu-eq, ~102 Ma) deposits, as do IOCG deposits such as the La Africana (~3.3 mt @2.5% Cu, age similar to Lo Aguirre) and El Espino (145 mt @ 0.6% Cu-eq, ~93–86 Ma) deposits (Maksaev & Zentilli, 2002; Sillitoe, 2003; Richards et al., 2017). Additionally, in this belt, small mineralized bodies grouped in mining districts have been recognized; however, information on the genesis and exploration potential of these bodies is scarce (Sernageomin, 2012). This is the case for the Tiltil Mining District, which is located 50 km to the northwest of Santiago and is one of the oldest mining districts in Central Chile (Guerrero, 1959; Cuadra & Arenas, 2013).

The Tiltil Mining District is located on the eastern flank of the Coastal Cordillera, reaching heights of up to 2,000 meters above sea level and covering an area of approximately 9x25 km<sup>2</sup> (Fig. 2). In this district, small magmatic-hydrothermal deposits of Cu, Au, and polymetallic Cu, Au, Ag, Pb, and Zn have been exploited sporadically, in addition to placer gold (Guerrero, 1959; Cabello, 1977; Zeballos, 2007; Sernageomin, 2012; Cuadra & Arenas, 2013; Muñoz, 2017; Faundez et al.,

2020). In this district, outcrops are predominantly Lower Cretaceous volcanic and sedimentary rocks, which are intruded by plutons aged between 100 and 94 Ma and with exhumation ages very close to those of the emplacement, namely, between 94 and 90 Ma (Thomas, 1958; Aguirre et al., 1999; Wall et al., 1999; Parada et al., 2005; Charrier et al., 2007, 2015; Molina, 2014; Boyce et al., 2020). The main structures consist of local NNE-SSW to NNW-SSE and NS striking fault systems with small displacements along the structure (Wall et al., 1999; Gana & Zentilli, 2000).

To understand the genesis of the deposits in metallogenic belts and mining districts, it is necessary to observe various deposits and try to answer some of the following fundamental questions: How are the occurrences and mineralization styles of the deposits related to each other? How many mineralization events occurred and in which periods did they occur? How are these mineralization events related to regional geological processes (i.e., tectonic, structural, magmatic, and metamorphic)? To answer these questions, it is essential to understand the regional and district-scale geology and the genesis of the mineral deposits, not only to determine the control of mineralization (rocks and/or structures) but also to understand the spatial and temporal relationships between the different mineralized bodies at the district and regional scale. Therefore, this paper aims to (1) study the geology of the Tiltil Mining District at the district and regional scale, (2) determine the types of ore bodies and alteration-mineralization events in this mining district, and (3) infer the control that regional and local rocks and structures exert over the ore bodies and the relationship between the ore bodies and known theoretical metallogenic models.

To achieve these objectives, a mapping of lithologies, structures, alterations, and mineralizations in the district was carried out at a scale of 1:25,000, accompanied by a survey of the magmatic-hydrothermal mineral deposits that occur in the district. Finally, the most representative mineral deposits of the district were selected and mapping was performed at a scale of 1:1,000. Additionally, to study the hypogene mineralization of the selected sites, diamond drilling (DDH) was conducted. For these deposits, geochemical (ICP-MS lower elements of Cu, Ag, Fe, and Co, and trace analysis of fire assay for gold), petrographic, and chalcographic analysis of selected samples was also performed. After these analyses, for each deposit, paragenetic tables were constructed and 3D geological models were constructed using the Leapfrog Geo Seequent software (2019).



FIG. 1. The distribution of metallogenic belts and main deposits of the Jurassic to the Paleocene-Eocene from Southern Peru to Central Chile (modified from Maksaev & Zentilli, 2002; Sillitoe, 2003, 2012, Gropper, 2011; De Real et al., 2018). The red rectangle indicates the approximate location of the study area.

### II. DISTRICT-SCALE GEOLOGY

The updated geological map of the Tiltil Mining District (Fig. 2) that was constructed in the framework of this research shows two Lower Cretaceous units of well-stratified volcanic and sedimentary rocks and three pulses of plutonic rocks with ages of ~100 Ma, which in the northern part of the district form a roof-pendant with the stratified units. This map also indicates the locations of the main mineral deposits of magmatic-hydrothermal origin in the district.

The main structures shown in the updated map are as follows (Figs. 2 and 3): (A) a monocline affecting the Kib unit with a NS axis direction and eastward-dipping stratification; (b) a drag syncline fold affecting the Kia unit; and (c) a reverse fault putting the Kib unit into contact with the Kia unit by emplacing the Kib unit above the Kia unit that is inferred to possibly act as a channel to guide pluton emplacement.

Additionally, figure 3 shows local or secondary geological structures as well as the nine areas (zones) of structural measurements and the different types of structures studied in the field. Some of these have a fundamental role as conduits of mineralization (e.g., certain dikes and veins) and in other cases interrupt or cut mineralization (e.g., post-mineral faults). Structural analysis was carried out in these nine areas, and the results are shown in Table 2; this table shows the strike and dip measurements of the studied structures (faults, veins, and dikes) and the density of measurements and preferential orientations. Figure 4 shows field evidence of the cross-cutting relationships between some of the structures studied in the district, which are discussed below.

#### a) Stratigraphic Units: Western flank of the lower Lower Cretaceous (Kib)

In the western flank of the district, there is a succession of mainly volcanic andesitic rocks with some intercalations of volcano-sedimentary and sedimentary rocks, with the latter two having more abundant outcrops in the southwestern part of the district. The volcanic rocks are pyroxene andesite to olivine basalt with aphanitic to porphyritic textures, with the latter usually having large plagioclase phenocrysts up to 2 cm in length (ocoites). Other outcrops are composed of gray-to-

reddish ash tuffs and pyroclastic breccias with pyroxene and an amphibole dacite to daci-andesite composition. Volcano-sedimentary rocks correspond to breccias with andesitic fragments of lithoarenitic matrix. The sedimentary rocks correspond to grayish sandstones and black, partly calcareous shales, which generally form strata up to 2 m in thickness. Some andesitic and dioritic dikes and sills have been observed intruding this unit, which could be contemporaneous with this volcanic unit.

Thomas (1958) and Wall et al. (1999) describe this unit and correlate these outcrops of Kib unit with the Veta Negra Formation, whose stratigraphy ranges in age between the Barremian and Albian (~129 to ~110 Ma). This unit has been described as a ~ 3 km thick succession of volcanic-to-subvolcanic andesitic rocks with minor interbedded continental volcano-sedimentary rocks and marine-coastal sedimentary rocks (e.g., Sellés & Gana, 2001; Fuentes et al., 2005; Severino, 2017; Boyce et al., 2020). Furthermore, this unit has been divided into the following two members, from base to ceiling: (1) the Purehue Member, formed by volcanic rocks (mainly pyroclastic) with littoral sedimentary intercalations; and (2) the Ocoa Member, mainly formed by continental ocoitic lavas (Thomas, 1958; Wall et al., 1999).

Outside the study area, the Kib unit concordantly overlies the Lo Prado Formation (Berriasian-Hauterivian) and concordantly underlies the Cerro Morado Formation of the upper Lower Cretaceous and in angular unconformity to the middle-to-Upper Cretaceous Las Chilcas Formation (Carter & Aliste, 1962; Piracés & Maksaev, 1977; Arévalo, 1992; Sellés & Gana, 2001; Boyce et al., 2020). However, in the study area, Thomas (1958) and Wall et al. (1999) propose that this unit is consistent with the Las Chilcas Formation. In the framework of this study, no evidence of such concordance was found, and it is proposed that the contact between the Veta Negra Formation and younger Cretaceous volcanic units occurs through a thrust fault (Fig. 2).

Outside the study area, the Veta Negra Formation has two Ar/Ar ages in plagioclase of ~119 Ma, both interpreted as an age of the volcanism (Aguirre et al., 1999; Fuentes et al., 2005). Additionally, in the north of the district, Boric and Munizaga (1994) obtained an Ar/Ar age in plagioclase of  $122.7 \pm 1.1$  Ma (Aptian) in an ocoitic dike, which probably represents the age of the characteristic magmatism of the Veta Negra Formation. Other ages obtained in this unit in the south of the district, with values between 102 and 92 Ma, have been interpreted as secondary mineral ages (Aberg et al., 1984; Morata et al., 1997; Aguirre et al., 1999). These secondary

minerals could be associated with the following geological events: (1) very low-grade burial metamorphism (prehnite-pumpellyite facies); (2) contact metamorphism; or (3) hydrothermalism associated with Cu mineralization (e.g., Fuentes et al., 2005; Oliveros et al., 2008a). In the study area and its surroundings, the Veta Negra Formation is intruded by plutons with ages between 100 and 94 Ma (Wall et al., 1999; Sellés & Gana, 2001; Parada et al., 2005; Molina, 2014; Boyce et al., 2020), supporting the last two interpretations for these ages.

In summary, the Veta Negra Formation is interpreted to represent a volcanic arc and subsidence intra-arc basins of the Lower Cretaceous (Barremian-Aptian) generated in an extensional tectonic regime (Vergara et al., 1995; Jaillard et al., 2000; Ramos & Alemán, 2000).

#### b) Stratigraphic Units: Eastern flank of the upper Lower Cretaceous (Kia)

In the eastern flank of the district, there is a succession of mainly volcanic daci-andesitic rocks with intercalations of volcano-sedimentary and sedimentary rocks (Fig. 2). The volcanic levels correspond mainly to dacitic pyroclastic rocks and to a lesser extent rhyolitic rocks, with intercalations of daci-andesitic to andesitic lavas. In the sedimentary levels, marine fossiliferous limestones and siltstones, as well as sandstones, breccias, and continental conglomerates are recognized.

Close to the study area, this unit has U-Pb ages in zircon between 116 and 106 Ma, which are considered to represent ages of volcanism (Wall et al., 1999; Sellés & Gana, 2001; Boyce et al., 2020). Here, the unit is also intruded by plutons with ages from 100 to 94 Ma (Wall et al., 1999; Sellés & Gana, 2001; Parada et al., 2005; Molina, 2014; Boyce et al., 2020). K-Ar ages in the whole-rock and plagioclase of ca. 100 Ma obtained by Wall et al. (1999) probably indicate ages of contact metamorphism in these rocks.

Thomas (1958) and Wall et al. (1999) correlate these rocks with the Las Chilcas Formation, which is assigned by these authors to the Aptian–Albian range. However, this interpretation is debatable, as Boyce et al. (2020) suggest correlating rocks of this type and age range (116 to 106 Ma) with the Cerro Morado Formation (Carter & Aliste, 1962). This latter unit has a U-Pb age in zircon of ~112 Ma and has been assigned to the Albian (Boyce et al., 2020). The Cerro Morado Formation underlies the Pitipeumo Member (~105 to ~100 Ma), which is the basal member of the Las Chilcas Formation (Espinoza, 1969; Viteri, 1970; Arévalo, 1992; Boyce et al., 2020).

It has been proposed that the Cerro Morado Formation represents the volcanic arc of the Albian period formed in the transition between an extensional-transtensional and a transpressional-compressional tectonic regime, while the Las Chilcas Formation represents the back-arc basin formed under a compressional tectonic regime (e.g., Richards et al., 2017; Boyce et al., 2020).

#### c) Intrusive Units: central flank of the middle Cretaceous (Km)

Along with the NS-oriented central axis of the district and the district's northern limit (Fig. 2), outcrops of plutonic rocks of different compositions intruding into the volcanic rocks described above occur. Three main intrusive units were recognized:

- (Kdg) Two-Pyroxene Gabbros containing accessory minerals such as augite and labradorite. These are coarse-grained, with crystals up to 5 mm in size and an equigranular texture, are cut by quartz veins and sinuous aplitic dikes, and intrude the Veta Negra Formation.
- 2) (Kmm) Amphibole Diorites to Quartz Monzodiorites, occasionally observed with biotite. These present textures that vary from inequigranular (with plagioclase crystals from 1 to 4 mm in size) to fine-grained equigranular, intrude both volcanic units and the gabbro unit (Kdg), and are cut by sinuous aplitic dikes and straight andesite dikes.
- 3) (Kmd) Pyroxene Diorites to Quartz Diorites with varying proportions of amphibole and biotite and less pyroxene, microphaneritic textures, and equigranular to inequigranular with plagioclase up to 0.5 mm in size. These intrude the volcanic rocks of the western side of the district and form a roof-pendant in the north of the district. These are cut by andesitic, dacitic, and aplitic dikes.

Parada et al. (2005) and Molina (2014) consider these intrusives as part of the Caleu Pluton. Additionally, they describe this unit as consisting of four magmatic pulses of gabrodioritic to monzogranitic composition and determine U-Pb ages in zircons between 100 and 94 Ma for each pulse. These pulses can be correlated with the units of the Tiltil District as follows: (i) the Kmd unit can be correlated with the monzodioritic quartz unit or the monzogranitic unit with ages of 94.7  $\pm$  0.7 and 96.8  $\pm$  0.9 Ma, respectively; (ii) the Kmm unit can be correlated with the

granodioritic unit with an age of 96.8  $\pm$  1.1 Ma; and (iii) the Kdg unit can be correlated with the gabbrodioritic unit with an age of 99.7  $\pm$  0.9 Ma.

Based on the "Plateu" <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar ages reported in biotite, amphibole, and plagioclase, a rapid exhumation event was interpreted for this pluton between 94.9 and 93.2 Ma and an exhumation between 94 and 90 Ma is interpreted based on studies of fission traces in apatite (Gana & Zentilli 2000; Parada et al., 2005).

Throughout the central part of the district and its northern end, the Cretaceous volcanic rocks form a roof-pendant over the Caleu Pluton, as has been recognized by several authors in this part of the Coastal Cordillera (e.g., Wall et al., 1999; Parada et al., 2005; Molina, 2014; Boyce et al., 2020). Other intrusive bodies in the district are represented by a wide variety of dike systems with different compositions and textures, such as (a) aphanitic to porphyry andesitic dikes, (b) microcrystalline dioritic dikes, (c) porphyry dacitic dikes, and (d) porphyry aplitic dikes.


FIG. 2. A map of the lithologies and major structures of the Tiltil Mining District with a mapping scale of 1:25,000 (Modified from Wall et al., 1999). The registry of mineral deposits and areas chosen for a detailed study are indicated. Hillshade is used as a background. Section AA' corresponds to an area where we suggest that the intrusives are located along the fault contact between the two volcanic rock units in the district (inspired by Boyce et al., 2020).

# d) Major structures

One of the largest structures in the district is formed by a large **monoclinal fold** with a NNW-SSE strike and 70°E dip (Figs. 2 and 3, Table 1), which affects the volcanic stratified rocks of the lower Lower Cretaceous units (Kib).

Volcanic and volcano-sedimentary rocks of the upper Lower Cretaceous unit (Kia) also have folds, but these folds have axes with a NE-SW strike (Figs. 2 and 3, Table 1). To the east of the district, this unit usually presents a low eastward dip between 10° and 20°E; however, closer to the center of the district and towards to the contact with the other units (Kib and Kmm), the dip becomes larger, gradually increasing to 45°E and finally to 60°E in some areas. We consider this structure as an asymmetric **syncline** fold with an axial plane inclined to the west, which probably represents a drag fold associated with the thrust fault that puts the Kia unit into contact with the Kib unit and which is described below.

One of the **major faults** in the district corresponds to a damage zone that puts the Kib unit into contact with the Kia unit. This is observed in the central part of the district (Zone 8; Fig. 3), where discrete systems of thrust fault planes with a preferential NW-SE strike are recognized, with value strikesbetween N15°W and N100°W, and a large south-west dip with values of 40 to 90° to the west and east (Table 2). This thrust fault system causes the oldest Kib unit to overlie the younger Kia unit and cuts the plutons of the Kmm unit with a left-lateral displacement of  $\sim 1$  km. We propose that this major fault system is polyphasic, at least acting as a thrust fault in the first instance and then cutting the plutons with smaller displacements. Since the plutons of the district are generally located along the contact between the two volcanic units (Kib and Kia), it is proposed that these intrusives are emplaced along major faults, as is suggested to occur further north by Boyce et al. (2020). This fault system cannot be responsible for the exhumation of the intrusives, as if it is, for example, Los Perros fault located also towards north (Boyce et al., 2020). These authors propose that the major faults previously acted as normal faults, limiting the extensional basins of the Lower Cretaceous (Veta Negra basin), reactivating as reverse faults in the transition to transpressional-compressional regimes in the middle Cretaceous and acting as conduits for the emplacement of the intrusives (syntectonic emplacement).



Table 1. Orientation data of stratifications and bedding planes and the density of preferential strike directions for the Kia and Kib units.

# e) Secondary structures

The structural analysis of the district considers the different fault systems corresponding to local fault traces with relative displacements of meters to tens of meters. These were studied in the nine areas indicated in figure 3. In these fault systems, it was possible to measure the attitudes of the fault planes and determine their kinematics from the observation of local displacement markers such as deformed guide levels and through the study of kinematic indicators such as slickensides and filled steps in fault planes. Additionally, this structural analysis considers different vein systems and dikes, which field observations indicate formed from tensile fracture systems.

Sets of **secondary thrust faults**, with metrical to decametrical displacements, emerge in zones 6 and 9. The thrust faults in the Zone 6, which is located in the central part of the district, have strikes that vary from N40°W to N10°E and dip westward at angles between 20 and 89°. These measurements have two preferential strikes, namely, NNW-SSE and NNE-SSW. These thrust faults cut and locally fold the upper Lower Cretaceous (Kia) volcanic rock unit and part of the Kmm intrusive unit. In the south of the district, in the Condor Mine sector (Zone 9), there is a set of thrust faults with strikes of N20°E to N10°W and dips of 35° to 85° E with a preferential NNW-SSE strike; these faults cut the volcanic rocks of the lower Cretaceous unit (Kib) (Table 2) and generate tight syncline and anticline folds in the rocks with vergence to the east.

Other secondary fault systems, which are observed in a large part of the district, are **transtensive faults** with displacements of a few meters to tens of meters and **normal to normal-dextral** or **normal-sinistral** kinematics and which mainly affect the volcanic rock units (Kib and Kia). The faults with kinematics close to "pure" normal (some planes with subvertical slickensides or normal fault markers), observed in Zone 6, present various strikes ranging from N70°E to N110°E, with a higher density having an EW strike. In Zone 4, normal faults are observed with strikes of N20°E to N40°E and a preferential NE-SW strike orientation, except for a NW-SE strike measurement. The normal-sinistral faults observed in the district appear in Zone 9 (Condor sector) and Zone 1 (El Huracan sector); in both of these zones, the faults have a preferential NE-SW strike direction. In Zone 9, the fault strikes range from N40°E to N70°E, and in Zone 1 they range from N30°E to N40°E. The normal-dextral fault system of Zone 7 presents strikes of N70°W to N90°W, with the highest density in the WNW-ESE direction (Table 2).

The **vein systems** in the district mostly represent fractures with hydrothermal fill, with gold ore, copper ore, or mixed gold-copper ore. Due to the smaller number of measurements obtained in zones 6 and 7, the copper veins in these zones were analyzed together. Despite presenting a large variation in strike, ranging from N30°W to N80°E, they present two preferential orientations: a NW-SE strike, with the highest concentration of measurements, and an ENE-WSW strike, with fewer measurements. The gold-copper veins in Zone 1 (El Huracan sector) present strikes ranging from N60°W to N100°W, with most having a WNW-ESE strike (although some measurements have a NE-SW strike). In the gold-copper veins in zones 2 and 5, there are fewer measurements; however, in both zones, a preferential NW-SE strike is observed. The gold veins of Zone 3 have a great variation in the measured attitudes, although they are generally concentrated in two orientations: (i) a NW-SE strike, with the highest concentration of measurements ranging from N20°W to N50°E and N50°E strike. Most of the veins present a main preferential strike between NNW-SSE and WNW-ESE (Table 2).

In the same way, the different **dyke systems**, which are also associated with tensional fractures and have compositions from andesitic to aplitic, were also considered in the structural analysis. The andesitic-type dikes outcrop in zones 1 and 6. These display a high variation in strike orientations; however, in Zone 6, the highest density of measurements is concentrated in the NW-

SE direction, with strikes ranging from N40°W to N90°W. Due to the lack of data, it is not possible to determine a preferential orientation for these dikes in Zone 1. In zones 3 and 8, aplitic dikes also appear, for which few measurements are available; however, at least two preferential strikes are observed, namely, NW-SE and NE-SW. For the daci-andesitic and dacitic dikes that outcrop in zones 8 and 9, despite the small number of measurements, a clear preferential NW-SE strike is observed.

Based on these results, the veins, andesitic dikes (Zone 6), daci-andesitic dikes, and dacitic dikes are concluded to have a preferential strike between WNW-ESE and NW-SE. Thrust faults present preferential NNW-SSE and NNE-SSW strikes. Most of the transtensional faults have a preferential NE-SW strike, with the exception of the normal faults in Zone 6, which have an EW preferential strike, and the normal-dextral faults in Zone 7, which have a WNW-ESE preferential strike.

Regarding the folds present in the stratigraphic units, locally anticlinal and synclinal folds are recognized in both units, in particular in Kib; these are tight and inclined to the east and are associated with thrust faults (Figs. 2 and 3).

# a) Chronology of deformation

In the north of the district (Zone 2), both andesitic dikes and quartz veins are observed to cut aplitic dikes (Fig. 4-A, B).

In the El Huracan sector (Zone 1), quartz veins mineralized with specularite, pyrite, chalcopyrite, and minor bornite are cut by normal-sinistral faults with a NNE-SSW strike (Table 2). In drillhole samples from this sector, it is observed that andesitic dikes are cut by this type of vein and that pyrite-chalcopyrite veinlets cut the quartz veins (Fig. 4-C).

In the San Aurelio sector (Zone 6), daci-andesitic dikes with disseminated mineralization are observed intruding into mineralized late magmatic breccias.

In the La Despreciada sector (Zone 9), mineralization occurs along the ductile fault zone that brings volcanic rocks into contact with intrusive rocks. This zone of mylonites presents characteristics of being syn-plutonic (deformation bands that generate alignment of the primary minerals of the plutons), indicating that the mineralization occurred synchronously with the intrusion.

On the district-scale map, other cross-cutting relationships are observed between faults, such as ENE-WSW-striking sinistral faults that cut the NS-striking thrust faults in the south of the district (Zone 9) and EW-striking normal faults that cut NS-striking thrust faults and NNW-SSE-striking dextral faults in the center of the district (zones 6 and 7).



FIG 3. A map of the lithologies and structures of the Tiltil Mining District (modified from Wall et al., 1999). Solid lines indicate observed structures and segmented lines indicate inferred structures. Rectangles indicate the areas where the structural surveys were carried out.

Table 2. Orientation data of the structural elements of the Tiltil Mining District and the density of preferential strike directions by type of structure and according to the different zones of the study area (Fig. 3). \* Major reverse fault system, contact between the Kia and Kib units.

Tipo de Estructura	Rumbo Preferencial	Mediciones por Zona				
Vetas Cu	NW-SE	6 y 7				
Vetas Au Cu	NW-SE a WNW- ESE					
Vetas Au	NW-SE					
Diques Andesíticos	Sin Orientación preferencial					
Diques Aplíticos	Sin Orientación preferencial					
Diques Daci- andesíticos	NW-SE					
Diques Dacíticos	NW-SE					
Fallas Inversas	NNE-SSW a NNW-SSE					
Fallas Normales	NE-SW a EW					
Fallas Normal- Siniestrales	NE-SW					
Fallas Normal- Dextrales	WNW-ESE					



FIG. 4. Images of the shear relationships between structures. A) An andesitic dike cutting an aplytic dike in the Cuesta la Dormida sector. B) A quartz vein cutting and slightly displacing an aplitic dike in the Cuesta la Dormida sector. C) An andesitic dike in the El Huracán sector cut by a quartz vein that itself is cut by a pyrite-chalcopyrite vein.

# III. MAGMATIC-HYDROTERMAL ALTERATION AND MINERALIZATION

During the regional geological mapping and the district-scale mine register, a survey of the occurrence of mineralization and alteration of a magmatic-hydrothermal character was performed, in which the following types of mineralized bodies were recognized:

- Au and Au-Cu veins with quartz, specularite, pyrite, and chalcopyrite hydrothermal fillers (zones 1–5, Fig. 3). These veins usually cut intrusive bodies or volcanic rocks that are in contact with the plutons.
- Late magmatic-hydrothermal breccias mineralized with pyrite and chalcopyrite, predominantly in the matrix (zones 4 and 6, Fig. 3).
- **Daci-andesite dikes** with disseminated pyrite and chalcopyrite mineralization in both the dike body and the proximal haloes (zones 1, 6, and 8; Fig. 3). These dikes present porphyritic and inequigranular textures, with amygdules and myarolytic cavities where mineralization tends to accumulate. These textures indicate that these dikes may have formed at the apex or edges of intrusive units.

- **Mineralized stratiform bodies** corresponding to stratigraphic levels with disseminated pyrite-chalcopyrite mineralization and in veinlets restricted to the most permeable or geochemically favorable layer (Zone 9 and the SE of Zone 8; Fig. 3).
- **Ductile fault zones** developed at the contact between intrusive rocks and volcanic host rocks (syn-plutonic faulting), predominantly mineralized with pyrite and chalcopyrite along the fault zone (Zone 9, Fig. 3).

At the surface, these mineralized bodies develop a supergene alteration profile that generally has a depth of 2 to 3 m but can locally exceed 20 m. In this supergene profile, the in-situ oxidation of sulfides and other minerals mainly occurs. An example is the copper veins of zones 6 and 7 (Fig. 3), which present oxidized copper such as chrysocolla, malachite, azurite, and to a lesser extent, native copper. In these supergene levels that affect veins, sulfide leaching can occur, as evidenced by the occasional presence of chalcosite and secondary covellite.

At first sight, in most of these ore bodies, a potassic alteration type surrounded by propylitic alteration—both of which are crosscut by a sericitic alteration type and albitized and silicified areas—is recognized as a hypogene profile. However, four areas with representative deposits of the five previously described ore body types were considered to perform a detailed study of the control of mineralization and the types of magmatic-hydrothermal alteration. The areas chosen are (1) the El Huracan mine in the north of the district, (2) the San Aurelio mine in the center of the district, and (3) the Condor mine and the La Despreciada mine in the south of the district (Fig. 2).

# a) Deposits in veins: El Huracan mine

The mineralized bodies in this deposit occur along seven quartz veins with anomalies of gold, copper, and iron, which are up to half a meter in thickness and have a predominant WNW-ESE strike and a northward dip of  $\sim 60^{\circ}$  (Fig. 5). Locally, these veins can form areas with stockworks or small areas of hydrothermal breccias. The host rock of these veins is a medium-grained amphibole and pyroxene quartz diorite that is part of the Caleu Pluton unit (Kmd in Figs. 2 and 3). The hydrothermal fill of the veins in the hypogene zone consists of quartz, specularite, tourmaline, epidote, pyrite, chalcopyrite, bornite, and traces of rutile and zeolite. These veins

present a halo of hydrothermal alteration that can reach one meter in thickness and is characterized by the occurrence of chlorite, sericite, albite, and actinolite.

Under the microscope, the host rock presents fine biotite alteration crosscut by actinolite (Fig. 6-B) and albite alteration (Fig. 6-C). The actinolite is cut by tourmaline crystals (Fig. 6-D), which also developed in fractures (Fig. 6-C). Additionally, disseminated magnetite and alterations of chlorite, sericite (in plagioclase), and quartz are recognized in the host rock, which are cut by quartz veinlets (Fig. 6-E). Chlorite is observed as interstitial development between tourmaline crystals (Fig. 6-F) and between quartz-specularite aggregates/veinlets (Fig. 6-G). Hydrothermal veins or breccias with quartz, specularite, tourmaline, and epidote fillings are widely observed (Fig. 6-H); in these veins and breccias, it is recognized that, associated with these quartz aggregates (Fig. 7-A), there is pyrite mineralization with interstitial chalcopyrite and the development of tennantite (rutile) aggregates (Fig. 7-B). Epidote is recognized in veinlets, also affects the hydrothermal breccia fragments, and is associated with the formation of zeolite, which both, epidote and zeolite, cut the chlorite alteration (Fig. 7-C). As final events, epidote-quartz veins cut quartz aggregates (Fig. 7-B), quartz-calcite veinlets cut aggregates of quartz, tourmaline, and epidote (Fig. 7-E), calcite veinlets cut aggregates of quartz-chlorite and quartz veins, and calcite sutures are observed in quartz veins (Fig. 7-F).

At the surface, these rocks and veins present supergene alteration, formed by the development of an oxidation and leaching profile, with an approximate depth of 1 to 5 m and which is controlled by structures that mainly affect copper and iron sulfides. In the supergene zone, sulfides are replaced by chrysocolla, malachite, supergene chalcosite, and supergene limonites (hematite, goethite, and minor jarosite), which occur in veins, hydrothermal breccias, fracture planes, and faults. In this profile, the destruction of feldspars occurs, which forms clays such as kaolinite.

Moreover, in this sector, aplitic, andesitic, and pegmatitic dike systems are recognized without preferential orientation. Andesitic dikes are usually sinuous and may present textural and compositional variations between quartz microdioritic dikes and daci-andesitic dikes. Some of these dikes, observed inside the mine tunnel, show disseminated mineralization with copper sulfides (pyrite-chalcopyrite). In some drillholes that cut pegmatitic K-feldspar dikes, in the dikes' halos, it is possible to observe mineralization of pyrite-chalcopyrite and, to a lesser extent, magnetite; the latter occurs in a disseminated display and in clusters (Fig. 6-A). The disseminated

copper mineralization of dikes indicates that they may be the source of mineralization that and veins probably arise from them, acting as channels to circulate the fluid exsolution phases generated by the cooling of the magma that formed the dikes.

Based on these observations, a paragenesis of the mineral alteration and mineralization of the El Huracan mine is proposed, as shown in Table 3. This defines an early event of pyrite-chalcopyrite mineralization, disseminated and in clusters, associated with pegmatitic K-feldspar dikes (pegmatitic stage). This mineralization event is also associated with a potassic alteration of secondary biotite and disseminated magnetite found in the host rock, with the magnetite being related with high temperatures of over 500 °C (Sillitoe, 2003; Del Real et al., 2018). Subsequently, a first stage of sterile hydrothermal alteration occurs (Stage 1), which affects the host rock and is represented by the albite-actinolite association. The main mineralization event is concentrated in gold-bearing quartz veins with a preferential WNW-ESE strike and a preferential northward dip (Stage 2). The hydrothermal fill of these veins mainly corresponds to quartz, specularite, and tourmaline, with pyrite, chalcopyrite, and minor bornite mineralization. In this event, trace minerals such as tennantite and zeolite are also present. The chemical analysis indicates an average Cu grade of 2.5% (maximum of 2%) and the anomalous presence of Ag (0.9–7.7 g/t) and average Au grade of 3 g/t (0.05-0.08 g/t), where the mineralization of silver is possibly contained in copper and iron sulfides, and gold mineralization occurs as native gold particles in quartz and/or pyrite. Average Fe contents of 12.2% (maximum 27.2%) and average Co anomalies of 47.3 ppm (maximum 149.7 ppm) were obtained. Epidote is observed mainly as a hydrothermal filling of these breccias and veins, and chlorite alteration develops interstitially between tourmaline aggregates. As a residual event of the main mineralization of Stage 2, subsidiary veins of iron (hematite-specularite) are observed, where the alteration of chlorite-epidote and hydrothermal quartz occurs. The last stage of hypogene hydrothermal alteration (Stage 3) is sterile and is represented by the occurrence of quartz-calcite and calcite veinlets and the moderate silicification of the host rock.



FIG. 5. A) A geological map of the El Huracan Mine indicating the locations of veins and dikes, the collar and direction of the inclination dip of drilling, and the trace of Section A-A'. B) A SE view of the 3D model of the seven veins of the El Huracan deposit cut by the N10°E-striking fault system. C) Section A-A' (north-south)-



FIG. 6. Images of transparent sections, polished sections, and drillhole samples from the El Huracan Mine. Cpy: chalcopyrite, Fk: K-feldspar, Act: actinolite, Tour: tourmaline, Qtz: quartz, Ser: sericite, Chl: chlorite, Spe: specularite, Ep: epidote, Px: pyroxene. A) A macroscopic image of a drilling sample of mineralized fine K-feldspar dikes. B) A photomicrograph (crossed nicols) of fresh Plg and Px with intense replacement by Act and the development of secondary Bt. C) A photomicrograph (crossed nicols) of Act cut by Tour crystals. D) A photomicrograph (crossed nicols) of altered rock with Chl, Qtz, and Ser cut by Qtz veins. F) A photomicrograph (crossed nicols) of acicular aggregates of Tour with the development of interstitial Chl. G) A photomicrograph (crossed nicols) of Qtz-Spe aggregate and the development of interstitial Chl. H) A microphotograph (crossed nicols) of hydrothermal breccia with a matrix of Qtz, Tour, and Spe and fragments of fine Ep and Qtz.



FIG. 7. Images of transparent and polished sections and macroscopic samples of drilling samples from the El Huracan sector. Cpy: chalcopyrite, Py: pyrite, Tn: tennantite, Tour: tourmaline, Qtz: quartz, Chl: chlorite, Ep: epidote, Ceo: zeolite, Cal: calcite. A) A photomicrograph (parallel nicols) of a polished section showing euhedral Py and Cpy intergrowth. B) A photomicrograph (parallel nicols) of Py crystals with interstitial Cpy and the development of Tn aggregate. C) A photomicrograph (crossed nicols) of Ceo aggregate with Ep (alanite type) in chloritized rock. D) A photomicrograph (crossed nicols) of a Qtz vein cross-cut by an Ep microvein. E) A photomicrograph (crossed nicols) of part of a fragment of Ep and matrix with Tour and Qtz, both cut by Cal and Qtz microveins. F) A photomicrograph (crossed nicols) of a Qtz vein with central Cal suture cutting a Qtz-Cal microvein.

Table 3. The paragenesis of the El Huracan mine. A summary of the alteration and mineralization minerals present in each of the hydrothermal magmatic mineralization and alteration events based on vein and breccia shear relationships and alteration superposition. The line thickness represents the relative abundance of minerals and dashed lines indicate inferred presence at that stage of the mineral.

Mineral	Etapa Pegmatítica	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
		1		$\rightarrow$
Cuarzo				
Biotita				
Sericita				
Albita				
Clorita				
Epidota				
Turmalina				
Calcita			I	
Actinolita			l.	
Tennantita				
Hematita (Especularita)		 		
Magnetita				
Bornita				
Calcopirita				
Pirita				
Ceolita		   		
	Alteración	Alteración	Alteración	Alteración
	Potasica (Bt	Sodica-	Sericitica (Ser	de Cal-Qz en
	secundaria) y	Cálcica. Alb y	y Cl).	vetillas.
Observaciones etanas y	posible Mt	act en	Mineralización	Siliciticación
overtes	aiseminada en	plagioclasas.	ae Py-Cpy (Bo)	de la roca.
eventos	roca de caja. Minoralización		Eco Tury Ec	
			Esp, iui y Ep. Presencia de	
	uciy cpy		rutilo y ceolita	

### b) Deposits in late magmatic-hydrotermal breccias: The San Aurelio mine

In the San Aurelio mine, there are outcrops of amphibole diorites to amphibole and biotite quartz monzodiorites of the Kmm unit (Figs. 2 and 3) which intruded volcanic rocks of the Kia unit (Fig. 8). These rocks of the Kmm unit are intruded by late magmatic-hydrothermal breccias (Kbtm) in which host rock clasts with diameters of 1–20 cm are embedded in a magmatic matrix with an andesitic or dioritic composition. These breccias occasionally present flow textures formed by oriented plagioclase phenocrysts and elongated amygdules filled with chlorite, silica, and iron and copper sulfides. The hypogene mineralization consists of pyrite, chalcopyrite, and bornite and occurs in amygdules and vein-fill as well as in clusters and fine disseminates developed in the matrix and breccia clasts (Fig. 9-F). The hydrothermal alteration that affects the host rocks consists of minerals such as quartz, sericite, albite, chlorite, epidote, tourmaline, specularite, magnetite, and calcite, which occur in different abundances.

Under the microscope, the plutonic host rock, both in the outcrops and the breccia clasts, is mostly sericitized and silicified. However, a background alteration is recognized that is represented by partially albitized (Fig. 9-A) and decalcified plagioclase phenocrysts (with the development of small calcite aggregates around them). The amygdules are seen with fillings of chlorite, pyrite, chalcopyrite, bornite, and magnetite-specularite aggregates, all intergrown (Fig. 9-E, C, F). A second filling event of these amygdules is represented by the presence of chalcedony and chlorite. Chlorite is also disseminated in the clasts, forming aggregates together with fine tourmaline crystals (Fig. 9-D). The mentioned alterations are cut by calcite veinlets with variable quartz contents (Fig. 9-B, G, H).

Based on these observations, a paragenetic table is proposed for the San Aurelio mine (Table 4). The first alteration event of the host rock (Stage 1) is sterile and related to the development of chlorite in veinlets and amygdules and the decalcification of plagioclase producing calcite and albite. This event may have occurred prior to the development of the late magmatic-hydrothermal breccias. Subsequently, the main mineralization event is recognized, which is related to the formation of pyrite, chalcopyrite, and minor bornite (Stage 2) that occur mainly in breccias (Kbtm) as vesicle fill, in clusters and finely disseminated in both matrix and clasts. Mineralization also occurs as vein fill with quartz, chlorite, epidote, tourmaline, hematite, and magnetite. The chemical analysis of the late magmatic-hydrothermal breccias in the hypogene zone indicate average Cu

grades of 0.4% (maximum of 7%), variable Ag contents (0.05–0.6 g/t), and average Fe contents of 6.3% (maximum of 9.4%). Then, as late events of hypogene alteration (Stage 3), the following are recognized: (1) chlorite with quartz (chalcedony), disseminated and in clusters, amygdules, and veinlets; and (2) calcite, calcite-quartz, and possible albite, occurring mainly in veinlets.

Late magmatic-hydrothermal breccias (Kbtm) are cut by sets of andesitic to daci-andesitic and dacitic dikes (Fig. 8). The andesitic to daci-andesitic dikes have a fine porphyritic texture with a greenish-black groundmass and occasional epidote-filled amygdules and have strikes of N40° to 90°W and subvertical to 30°SW dips. The dacitic dikes (Khd) have a fine porphyritic texture, present occasional quartz eyes and amphibole ghosts, and have an EW strike and subvertical dips. In one of the drill holes, disseminated mineralization and pyrite-chalcopyrite accumulations are recognized in one of the daci-andesitic dikes, with an average Cu grade of 0.2% and an average Ag content of 0.05 g/t.

From the surface to several meters in depth (5 to 20 m, depending on the structural control), a supergene alteration profile develops due to the oxidation and leaching of iron and copper sulfides. Here, an area with chrysocolla, malachite, azurite, and supergene chalcosite is recognized, accompanied by limonites (jarosite and goethite). These minerals mainly occur along fractures and fault planes with Cu grades of up to  $\sim$ 7%. In this zone of supergene alteration, the destruction of feldspars in clay minerals (probably kaolinite) is also observed.



FIG. 8. A) A map of the lithologies and mineralized bodies, the projection of drillholes, and the location of section B-B', in the San Aurelio mine area. B) A 3D model of Section B-B', NNE-SSW strike.



FIG. 9. Images of transparent sections, polished sections, and drilling samples from the San Aurelio mine. Ser: sericite, Tour: tourmaline, Plg: plagioclase, Ep: epidote, Qtz: quartz, Chl: chlorite, Cal: calcite, Cpy: chalcopyrite, Mt: magnetite, Hm: hematite. A) A photomicrograph (crossed nicols) of seritized and partially albitized rock (in Plg) and Tour in cavities. B) A photomicrograph (crossed nicols) of veins of Qtz, Ep, and Chl cut by microveins of Cal and minor Qtz. C) A photomicrograph (crossed nicols) of amygdule filled with chalcedony and Chl. D) A photomicrograph (crossed nicols) of a polished section of Hm-Mt intergrowth with Cpy bubbles. F) A macroscopic image of a drilling sample of late magmatic-hydrothermal breccia, in the clasts of which mineralized amygdules with Py-Cpy and Chl are observed. G) A photomicrograph (crossed nicols) of a microvein of Qtz and Cal cutting sericitic alteration. H) A photomicrograph (crossed nicols) of a microvein of Qtz and Cal cutting sericitic alteration. H) A photomicrograph (crossed nicols) of a microvein of Qtz and Cal cutting sericitic alteration. H) A photomicrograph (crossed nicols) of a microvein of Qtz and Cal cutting sericitic alteration. H) A photomicrograph (crossed nicols) of a microvein of Qtz and Cal cutting sericitic alteration. H) A photomicrograph (crossed nicols) of a microvein of Qtz and Cal cutting sericitic alteration. H) A photomicrograph (crossed nicols) of a microvein of Qtz and Cal cutting sericitic alteration. H) A photomicrograph (crossed nicols) of a Cal microvein cutting sericitic alteration and Tour development in clusters.

Table 4. The paragenesis of the San Aurelio mine. A summary of the alteration and mineralization minerals present in each of the magmatic-hydrothermal alteration and mineralization events based on vein and breccia shear relationships and alteration superposition. The line thickness represents the relative abundance of minerals and dashed lines indicate inferred presence at that stage of the mineral.

Mineral	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Cuarzo			
Sericita			
Albita			
Clorita			
Epidota			
Turmalina			
Calcita		•	
Hematita			
Magnetita			
Bornita			
Calcopirita			
Pirita			
	Alteración de Sódica- Cálcica (Cl). Cal y Alb por	Alteración Sericítica. Cl, Ep, Tur y Qz- Ser disemina-	<b>Alteración</b> <b>de Cal-Qz</b> . Cal, Qz y Alb en vetillas
Observaciones etapas	descalcifica- ción de plagioclasas	relleno de cavidades. Mineralización Hm-Mt con burbujas de Py- Cpy (Bo) en cavidades	

#### c) Deposits in mylonitic areas: La Despreciada mine

In the La Despreciada mine, the main copper mineralization occurs along a zone of mylonites that connects the western edge of volcanic rocks (Kib) with amphibole and biotite quartz monzodiorites (Kmm) (Figs. 2, 3, and 10). The volcanic rocks are folded and present a halo of contact metamorphism represented by the development of a magnetite biotite hornfeld, which suggests the mylonite is synchronous with the emplacement of the intrusive unit. A ductile shear zone is formed by a foliated rock that presents secondary biotite and chlorite-epidote alterations and mineralization of pyrite, chalcopyrite, bornite, hematite, and magnetite. Surface foliation measurements indicate that the mylonite has a preferential strike of N25°W and a preferential subvertical dip of 75°SW.

Under the microscope, the mylonite is seen to be composed of bands of secondary biotite, and possible ghosts of actinolite, magnetite, and recrystallized plagioclase, which are crosscut by hydrothermal alteration of quartz, sericite, albite, chlorite, epidote, and rutile. The hypogene mineralization that accompanies these alteration minerals is pyrite, chalcopyrite, bornite, and hematite (Fig. 11-A). The secondary biotite is replaced by fine chlorite (Fig. 11-B). Intercalations of magnetite bands with partial replacement by hematite are observed (Fig. 11-C). Late events of calcite to calcite-quartz veinlets and amygdules, and quartz veins with albite-epidote haloes are recognized that formed subsequent to the alteration that affects the mylonite (Fig. 11-D, E). Some of the quartz veins are sheared or deformed (Fig. 11-F), which indicates that the fault zone represented by the mylonite has minor reactivations that are post-mineral or contemporaneous with the development of the hydrothermal alteration, which is evidence of syntectonic and synmagmatic mineralization.

A drilling mapping was performed to cut this mineralized mylonite at depth, as indicated in figure 10. However, this aim was not fulfilled, and along the drillhole, only the quartz monzodiorite unit (Kmm) was mapped and this unit presents compositional variations from monzodiorite to gabbro in depth as shown in figure 10-B. Throughout much of the drillhole, a disseminated low-grade mineralization was recognized in clusters and veinlets of pyrite-chalcopyrite with sericite-epidote haloes that may represent the mineralized halo of the mylonite, which allows us to interpret that the mylonite dips decrease, becoming more horizontal (Fig. 10-B).

The paragenetic table of the La Despreciada mine (Table 5) indicates an early event associated with synchronous contact and dynamic metamorphism with the formation of secondary biotite, magnetite, and possibly actinolite in bands. As the main mineralization event, a stage (Stage 1) corresponding to the mineralization of pyrite-chalcopyrite and minor bornite associate with hematite with alterations of quartz, albite, chlorite, epidote, sericite, and rutile is recognized. Stage 2, which is sterile, is represented by calcite and quartz-calcite veinlets that can develop albite-epidote haloes.

The supergene alteration, observed at the surface, generates copper oxides such as chrysocolla and malachite, and iron oxides such as limonites. Additionally, mineralized bodies of different types, peripheral to the mylonites, are recognized as mineralized copper stratiform bodies striking NNW-SSE that correspond to the stratification measurements of the volcanic and volcano-sedimentary rocks of Kib unit.



FIG. 10. A) A geological map of the La Despreciada Mine, including the projection of drillhole ST-08 and section C-C'. B) A 3D model of section C-C', SW-NE strike, including the projection of drillhole ST-08.



FIG. 11. Images of transparent and polished sections and macroscopic samples from the La Despreciada sector. Plg: plagioclase, Fk: K-feldspar, Py: pyrite, Cpy: chalcopyrite, Chl: chlorite, Mt: magnetite, Hm: hematite, Cal: calcite. A) An image of a macroscopic sample showing ductile shear bands with Py-Cpy mineralization. B) A photomicrograph (parallel nicols) showing the presence of Chl in subparallel bands and as partial replacement for secondary Bt. C) A photomicrograph (parallel nicols) of a polished section showing Mt with partial replacement of Hm. D) A photomicrograph (crossed nicols) showing irregular and sinuous bands with the development of Cal. E) An image of a macroscopic drillhole sample showing a Qtz vein with the development of an albite edge. F) An image of a macroscopic drillhole sample with a sheared quartz vein.

Table 5. The paragenesis of the La Despreciada mine. A summary of the alteration and mineralization minerals present in each of the hydrothermal magmatic mineralization and alteration events based on vein and breccia shear relationships and alteration superposition. The line thickness represents the relative abundance of minerals and dashed lines indicate inferred presence at that stage of the mineral.

Mineral	Etapa Metamorfismo de Contacto	Etapa 1	Etapa 2
Cuarzo			
Biotita			
Sericita			
Albita			
Clorita			
Epidota			
Calcita			
Actinolita			
Rutilo			I
Hematita			
Magnetita		     	
Bornita			
Calcopirita			
Pirita			
	Alteración	Alteración	Alteración
Observaciones etapas	<b>Potásica.</b> Desarrollo de Bt secundaria y Mt en bandas.	Sericítica. En halos de vetas y diseminada de Cl, Ep, Ser y Hm; mineralización de Py-Cpy (Bo)	<b>de Cal-Qz</b> en vetillas rectas de Cal, Qz y Alb

## d) Deposits in stratiform bodies: the Condor mine

Stratified volcanic and volcano-sedimentary rocks (Kib) tha outcrop in the western side of the district, in the Condor mine sector (Figs. 2 and 3). Figure 12-A shows the three types of rocks that are recognized within the Kib unit: (1) Kib(s): a sedimentary unit (black calcareous shales); (2) Kib(vs): a volcanic-sedimentary unit (sedimentary breccias with a large volcanic component); and (3) Kib(v): a volcanic unit (lavas and pyroclastic rocks). The strata of this unit form a monocline inclined to the east and locally present anticline folds with a NNW-SSE strike axis associated with discrete thrust faults with similar strikes verging to the east. Stratification measurements indicate strikes ranging from N05°E to N35°W and dips between 45° and 86° to the east (Fig. 12-B).

In this sector, up to 11 mineralized stratiform bodies with Cu oxides are recognized at the surface. Mineralization occurs at the contact between layers of volcanic rocks (Kib (v)) and sedimentary rocks (Kib (s)), spreading the most part of the mineral in the sedimentary layers (Fig. 13) with average widths of 0.5 m and maximum widths of 1.5 m. The hypogene mineralization of the stratiform bodies corresponds to pyrite-chalcopyrite. The alteration minerals affecting the host rocks, and in particular mineralized stratiform bodies, consist of secondary biotite, chlorite, epidote, sericite, quartz, and actinolite.

Under the microscope, the stratiform bodies present potassic-type alteration marked by the presence of secondary biotite, which affects both the matrix and the clasts of sedimentary rocks (Fig. 14-A, B). After the potassic alteration event, a pyrite-chalcopyrite mineralization developed in layers, associated with the alteration of sericite, chlorite, epidote, and actinolite (Fig. 14-C, D); in this event, epidote also occurs in clusters that in part affect the clasts of the sedimentary rock.

At the surface, in the supergene zone, which reaches around five meters in depth, chrysocolla, malachite, and supergene sulfides such as chalcosite and covellite are observed. Manganese oxides along fractures, as well as limonites and clays, are also recognized (Fig. 13-A).

At the surface, the copper stratiform bodies present an average Cu grade of 8.9% (maximum of 20%), an average Ag content of 39 g/t (maximum of 72.8 g/t), Au anomalies of 0.06–0.2 g/t, and an average Fe content of 4.2% (maximum of 5.3%).



FIG. 12. A) A detailed geological map of the Condor sector showing the projection of drillholes and the area of the 3D model. (s): sedimentary strata; (vs): volcano-sedimentary strata; (v): volcanic strata. B) A 3D model of a perspective view towards the southwest of the mineralized stratiform bodies, in the south of the Condor sector.



FIG. 13. Field images in the Condor sector. A) A contact between a mineralized sedimentary layer (mineralized stratiform body) and a volcanic layer. B) The relationship between a mineralized stratiform body and a thrust fault with mineralization.



FIG. 14. Photomicrographs of transparent sections of the Condor sector drilling samples. Bt: biotite, Ep: epidote, Act: actinolite. A) A photomicrograph (crossed nicols) of abundant fine secondary Bt (possible smectite, mixture of clay phyllosilicates) as part of the matrix. B) A photomicrograph (parallel nicols) of an aggregate of secondary Bt as part of a fragment. C) A photomicrograph (crossed nicols) of an aggregate of Ep as part of a fragment in coarser granulometry. D) A photomicrograph (crossed nicols) of Bt as part of fragments and presence of Act, crossed nicols.

# IV. DISCUSSION

#### a) Deformation events and related tectonic regimes

The attitudes of the different types of structures (Table 2) can indicate the orientation of the local or regional deformation at the time of their formation and can therefore be used to infer the tectonic regime at that time (e.g., Muñoz-Saez et al., 2014; Piquer et al., 2021). Furthermore, the cross-cutting relationships allow the relative formation ages of these structures to be determined.

# - Previous or synchronous events to the emplacement of the Caleu Pluton

Major or first-order thrust faults were formed prior to or synchronous with the emplacement of the Caleu Pluton (100 to 94 Ma) and have a NW-SE preferential strike, which indicates shortening in the NE-SW to E-W direction. This group of faults may be related to the inversion of the Veta

Negra basin and may have previously acted as normal faults and reactivated as reverse faults (Boyce et al., 2020). This is consistent with regional evidence indicating a transition to a transpressive-compressive regime at the Lower Cretaceous–Upper Cretaceous boundary (e.g., Veloso et al., 2016; Richards et al., 2017; Boyce et al., 2020; Seymour et al., 2020).

#### - Syn-mineral or late magmatic events in the formation of the Caleu Pluton

The veins and dikes have a NW-SE preferential strike and exhibit tensile fracture characteristics. These fractures probably represent shortening in the same direction as that which occurred during the late magmatic stage of the pluton at approximately 94 Ma (Molina et al., 2015). This suggests that these veins and dikes were formed under the same tectonic regime with a NW-SE shortening direction, which is consistent with regional evidence indicating transpression (sinistral) during the Lower Cretaceous to Upper Cretaceous transition (e.g., Mpodozis & Allmendinger, 1993; Richards et al., 2017).

#### - Post-mineral events

The secondary thrust faults are post-mineral and therefore subsequent to the late magmatic stage of the Caleu Pluton. They have a preferential NNW-SSE strike and indicate shortening in the WSW-ENE direction.

The other secondary and post-mineral fault systems correspond to (1) normal faults with EW and NE-SW preferential strikes, (2) normal-sinistral faults with a NE-SW preferential strike, and (3) normal-dextral faults with a WNW-ESE preferential strike. We consider that all these faults may represent a final stage of deformation with EW to NE-SW shortening directions for normal and normal-sinistral faults and a WNW-ESE shortening direction for normal-dextral faults. This deformation does not necessarily represent regional conditions and could reflect settings where local normal, normal-dextral, and normal-sinistral faults act as transfer faults developed along the thrust faults, such as those observed in the Condor mine (Fig. 12).

# b) Alteration and mineralization events

From the paragenetic tables produced for each deposit, it can be observed that, although mineralization occurs in different ways, most presents the same general sequence of alteration and

mineralization stages. The mineralization and hydrothermal alteration events described in most deposits in the district are given as follows, from the earliest to the latest:

## - Potassic alteration stage, low grade

This mineralization is recognized at the surface as pinkish areas, due to the presence of K-feldspar, and blackened areas, due to the presence of secondary biotite and magnetite with traces of pyrite and disseminated chalcopyrite. At the El Huracan mine, this mineralization occurs in accumulations that affect the host rock and spread throughout pegmatite dikes and their proximal halos. At the La Despreciada mine, the development of secondary biotite with traces of pyrite and chalcopyrite is observed, associated with syntectonic intrusive emplacement. In the Condor mine, the development of secondary biotite is also observed (e.g., potassic alteration) in the fragments and matrix of the sedimentary host rock.

This alteration is related to a high-temperature stage (> 500  $^{\circ}$ C) (Sillitoe, 2003; Del Real et al., 2018) during the late magmatic cooling of the Caleu Pluton.

This alteration event could be confused with sterile areas of metamorphism or contact aureoles (biotite hornfels) that are generated in volcanic and volcano-sedimentary rocks that act as the host rock of plutonic rocks (Aberg et al., 1984; Morata et al., 1997; Aguirre et al., 1999; Fuentes et al., 2005; Oliveros et al., 2008b). An important element of differentiation is the presence of low-grade mineralization, which is absent in biotite hornfels.

## - Albite-actinolite alteration stage (sodic), sterile

Before the main mineralization, in the El Huracan, San Aurelio, and La Despreciada mines, there are alterations of albite, chlorite, and actinolite related to a prograde stage of temperature increase. Albite and actinolite alterations were not observed to be associated with metallic minerals such as copper sulfides, unlike chlorite alteration, which is associated with minerals such as pyrite and chalcopyrite, although at a later stage.

### - Sericite alteration stage, main mineralization

Most of the studied ore deposits present a main alteration and mineralization stage characterized by veins of quartz, hematite, pyrite, chalcopyrite, and minor bornite and tourmaline, with haloes of chlorite, epidote, and sericite. Additionally, accessory minerals such as rutile are recognized at the San Aurelio and El Huracan mines and accessory minerals such as actinolite are observed at the El Huracan and Condor mines. The pyrite-chalcopyrite mineralization at the Condor mine is associated with the mentioned alterations but does not include hematite or tourmaline, a characteristic that differentiates it from the other deposits.

It is proposed that this alteration stage is related to the formation of veins during a lowertemperature hydrothermal phase within the late magmatic evolution of the Caleu Pluton as the precipitation of sulfides such as pyrite and chalcopyrite usually occurs after the evolution and cooling of the high-temperature stage when magnetite was formed (Sillitoe, 2003; Del Real et al., 2018).

# - Quartz-calcite alteration stage, sterile

In all the mines except the Condor mine, as late stages of hypogene alteration, a final alteration event of quartz-calcite and calcite in veinlets and/or disseminated is observed, and in some deposits silicification of the host rock and minor albite are also observed.

#### c) Theorical metallogenic models

Figure 15 shows a schematic section of the five styles of mineralization studied (Chapter 4) and how these styles relate to the district-scale geology. The mineralization styles of the Tiltil Mining District generally resemble those defined in IOCG and/or stratabound Cu-(Ag) type deposits recognized along the Coastal Cordillera of the Central Andes, which are associated with the circulation of magmatic and hydrothermal fluids related to dioritic to granodioritic plutons of the Cretaceous metallogenic belt (Rivano et al., 1993; Maksaev & Zentilli , 2002; Barra et al., 2017; Águila, 2019) originating from mantle source magmas that are primitive and S-poor (Sillitoe , 2003; Del Real et al., 2018) generated in transtensive to transpressive tectonic regimes (Heuser et al., 2020). These characteristics have been described for the Caleu Pluton (Parada et al., 2005; Molina et al., 2015), around which the mineral deposits of the Tiltil Mining District develop, which this pluton is interpreted to have been emplaced during the transition of an extensional to compressional tectonic regime during the middle Cretaceous.

In the IOCG deposits, mineralization of chalcopyrite and subordinate pyrite, and in a few cases bornite, is observed, mainly in veins or hydrothermal breccias with hematite-magnetite (Sillitoe, 2003; Barra et al., 2017; Heuser et al., 2020), where Cu mineralization is contained in chalcopyrite and Au is contained in quartz and/or pyrite. In the stratabound Cu-(Ag) deposits, the mineralization is chalcopyrite, bornite, chalcosite, pyrite, and minor digenite and covellite, which usually occurs in vein bodies, magmatic-hydrothermal breccias, and layers or stratiform bodies of permeable lithologies (Boric et al., 2002; Tristá-Aguilera et al., 2006; Townley et al., 2007; Oliveros et al., 2008) where the Ag ore is usually contained in copper sulfides (e.g., bornite or chalcosite) (González, 2018).

By analyzing the associations of ore minerals observed in the deposits of the Tiltil Mining District, we can observe that the El Huracan, San Aurelio, and La Despreciada deposits, where pyritechalcopyrite mineralization (minor bornite) is associated with hematite and/or magnetite, is very close to the mineral association present in IOCG-type deposits, such as the Manto Verde deposit (Rieger et al., 2010). This is different from what occurs in the Condor deposit, where copper sulfides (e.g., chalcopyrite) are not observed to be associated with hematite or magnetite. In the Condor deposit, no evidence of hypogene chalcocite was found; however, its presence at depth cannot be ruled out as this commonly occurs in the stratabound Cu-(Ag) reservoir type.

Although minerals such as hypogene chalcosite, digenite, and covellite have not been observed in the Condor mine deposit, due to this deposit's described characteristics of low Fe content (4.15% average) and high Cu (8.9% average) and Ag (39 g/t average) grades, and the stratiform geometry of its ore bodies, it can be concluded to be close to a stratabound Cu-(Ag)-type deposit. Meanwhile, the characteristics of the San Aurelio and La Despreciada deposits indicate that their mineralization is mainly Cu, and the low Fe contents (6.3% average in the San Aurelio deposit) allow these deposits to be defined as part of the root of a stratabound Cu-(Ag) system or as a superficial variant of an IOCG system (Vivallo & Henríquez, 1998; Haynes, 2000; Orrego et al., 2000; Sillitoe & Perelló, 2005). However, the same magma chamber associated with the Caleu Pluton generates magmas that allow the formation of both types of mineral deposits (IOCG and stratabound Cu-(Ag)), such as the El Huracán deposit, which, due to its high Fe content (12.2% average), anomalous contents of Cu (2.5% average), Au (3 g/t average), and Co (47.3 ppm average), and its mineral occurrences in the form of veins and hydrothermal breccias of quartz-specularite, indicate that this deposit is close to an IOCG-type deposit.
Regarding the alteration minerals observed in the district's deposits (mainly the El Huracan, San Aurelio, and La Despreciada deposits), these present various minerals that are usually observed in IOCG-type deposits such as the Dominga, Candelaria, or Manto Verde deposits. Some of these correspond to sericite, chlorite, albite, actinolite, biotite, epidote, quartz, tourmaline, calcite, rutile, or tennantite, zeolite, hematite, and magnetite. The minerals that were not observed in the district but that are usually observed in IOCG-type deposits are K-feldspar, pyrrhotin, anhydrite, mushketovite, allanite, ilmenite, molybdenite, scapolite, and apatite (Rieger et al., 2010; Veloso et al., 2016; Del Real et al., 2018; Heuser et al., 2020). If we compare the Tiltil deposits with what is observed in stratabound Cu-(Ag) deposits such as the El Soldado and Lo Aguirre deposits, the minerals that are commonly observed in these deposits and that were also observed in the district are calcite, albite, chlorite, epidote, rutile, sericite, quartz, tourmaline, actinolite, zeolite, hematite, and magnetite (the latter two at lower concentrations than that found in the IOCGs), then the alteration minerals that are not observed in the district but are usually present in this type of deposit are titanite and K-feldspar (Boric et al., 2002; Cornejo et al., 2006; Ramirez, 2006; 2008; Townley et al., 2007; Oliveros et al., 2008; Kojima et al., 2009).

Regarding the defined alteration stages, similarities have been observed with the alteration stages of IOCG-type deposits (e.g., Candelaria, Dominga, and Manto Verde). One of these is the early high-temperature stage of secondary biotite and magnetite that precedes the stage of main mineralization and the generation of sulfides such as pyrite and chalcopyrite (e.g., Del Real et al., 2018), as observed in the La Despreciada and El Huracan mines. IOCGs also tend to present late or low-temperature quartz and calcite alteration stages, as occurred in all deposits in the district except those in the Condor mine, with the particularity that in the IOCGs, these stages usually present pyrite-chalcopyrite mineralization (Rieger et al., 2010; Veloso et al. 2016; Del Real et al., 2018; Heuser et al., 2020), which is not observed to occur in the Tiltil Mining District.

The spatial distribution of the deposits shows a group of deposits located in the plutonic units or very close to the contacts with these units; however, other deposits are developed in the peripheries of the plutons, in the volcanic host rock of the intrusives (Fig. 15). The stratabound Cu-(Ag) deposits are generally located in peripheral areas, hundreds of meters from the emplaced plutons, in more distal areas than the IOCG-type deposits (Maksaev & Zentilli, 2002; Sillitoe, 2003; Oliveros et al., 2008b; Barra et al., 2017; Águila, 2019).

The deposits located in the plutons (e.g., the mineralized bodies of the El Huracan mine) resemble the Manto Verde deposit, where mineralization occurs mainly in intrusive bodies (Rieger et al., 2010); this is unlike other IOCG-type deposits where there is greater the stratigraphic control (e.g., Candelaria). Then, in the San Aurelio and La Despreciada mines, the mineralization mainly occurs within the intrusive rock, close to the contact with the volcano-sedimentary host rock, which is similar to the mineralization described in the Candelaria deposit (Del Real et al., 2018). Instead, mineral deposits on the periphery of the intrusive unit, away from the contacts with plutons (e.g., the Condor deposit, which has mineralized stratiform bodies located between approximately 100 m and 700 m from the intrusive unit), have characteristics of stratabound Cu-(Ag), with mineralization described by Boric et al. (2002) at the El Soldado mine. The stratabound Cu-(Ag)-type reservoir usually occurs in intercalations of basic lavas with carbonate sedimentary rocks (Maksaev & Zentilli, 2002).



FIG. 15. A schematic model of mineral bodies studied in the Tiltil Mining District. Associations and occurrences of mineralizations and alterations are shown. Five types of mineralized bodies are recognized in the district (and occurrence): Au and Au-Cu vein systems (hydrothermal fill), daci-andesitic dikes (disseminated in their interior and halos), late magmatic-hydrothermal breccias (in matrix), ductile fault zones or shear contacts (spread throughout the fault zone), and mineralized stratiform bodies (spread and veined in the ore bodies).

## V. CONCLUSIONS

Five types of magmatic-hydrothermal mineralized bodies are recognized in the Tiltil Mining District: (1) Au and Au-Cu veins; (2) mineralized daci-andesitic dikes; (3) late magmatic-hydrothermal breccias, (4) ductile fault zones, and (5) mineralized stratiform bodies.

The hypogene mineralization and alteration developed in most deposits of the district generally corresponds to the cross-cutting of the following events: 1) early potassic alteration of biotite-magnetite with pyrite-chalcopyrite mineralization; 2) sterile sodic alteration with chlorite, albite, and actinolite; 3) main sericitic alteration with quartz, tourmaline, chlorite, epidote, and albite with pyrite-chalcopyrite and minor bornite mineralization contained in specularite/hematite or magnetite. All of these alteration events are cut by a late and sterile event of calcite and quartz-calcite veinlets, and sometimes silicification of the rock. The sequence of alteration stages is very similar to those observed in IOCG-type deposits in the district and corresponds mostly to the El Huracan, San Aurelio, and La Despreciada mines.

Hypogene mineralization events are crosscut by a supergene alteration and mineralization with the development of an oxidation and leaching profile, from 5–20 m depth from the surface, where copper oxides (malachite, brocanthite, azurite, and native Cu) and secondary sulfides (chalcosite and covellite) are recognized.

The styles of mineralization and hydrothermal magmatic alteration developed in the Tiltil Mining District present similarities (mineral occurrence developed in veins and hydrothermal breccias, sequence of alteration stages, mineralization of pyrite-chalcopyrite and minor bornite associated with minerals of hematite-magnetite, and high Fe, Au and Cu contents) to IOCG-type deposits in the district (the El Huracán mine) and similarities (mineral occurrence developed in stratiform bodies,low Fe contents and high Ag contents) with stratabound Cu-(Ag) deposits in the district (Condor mine).

Due to the spatial proximity and the structural setting in which the mineralized bodies develop, it is proposed that these were formed in a period of time limited to the late magmatic evolution of the Caleu Pluton at ~94 Ma, when the tectonic environment is thought to have been in a stage of transition from a tectonic regime of transpression to one of compression. This allows the metallogenic belt of IOCG and stratabound Cu-(Ag) of Central Chile to be extended to the the Upper Cretaceous.

## ACKNOWLEDGMENTS

This study was developed and financed through the FIC-Regional Metropolitano 2017 project (No. 10) with the purpose of promoting the sustainable development of small-scale mining in the region. We appreciate the field and office work of the PUC geosciences students Dominique Valdivia, Felipe del Valle, Nicolás Bustos, Sebastián Molina, Patricio Faúndez, Félix del Pozo, Pamela Sepúlveda, Felipe Benimelis, and Matías Clunes.

## REFERENCES

- Águila, B. (2019). Alteración y Mineralización Distrito Minero Quitalcura, Región de Valparaíso, Chile: Implicancias en la génesis de depósitos estratoligados Cu-(Ag). Memoria de Titulo (Inédito), Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento Ciencias de La Tierra.
- Aguirre, L., Féraud, G., Morata, D., Vergara, M., & Robinson, D. (1999). Time interval between volcanism and burial metamorphism and rate of basin subsidence in a Cretaceous Andean extensional setting. *Tectonophysics*, 313(4), 433–447. <u>https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00217-6</u>
- Aberg, G., Aguirre, L., Levi, B., & Nystrfm, J.O. (1984). Spreading subsidence and generation of ensialic marginal basins: an example from early Cretaceous of central Chile. In: Kokelaar, B.P., Howells, M.F. (Eds.), Volcanic and Associated Sedimentary and Tectonic Processes in Modern and Ancient Marginal Basins. Special Publication - Geological Society of London, Vol. 16, pp. 185–193.
- Arévalo, C. (1992). Facies ambientes de depositación y paleogeografía del miembro Pitipeumo (Formación Las Chilcas) V Región. BSc thesis. Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Arredondo, C., Moscoso, R., Prieto, X., Ortega, R., Carrasco, R., Vivallo, W., Mateo, L., Pantoja, G., Ulloa, M., Ercilla, O., & Ridelle, E. (2017). Depósitos Minerales de la Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile. *Serie de Recursos Minerales y Energéticos 35*, 134 p., 2 mapas escala 1:500.000, 1 CD con anexos. Santiago.
- Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., & Palma, G. (2017). Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach. *Ore Geology Reviews*, 81 (October 2016), 62–78. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.016
- Boric, R., & Munizaga, F. (1994). Geocronología Ar-Ar y Rb-Sr del depósito estratoligado de cobre El Soldado (Chile Central). Universidad de Chile, Departamento de Geología, Comunicaciones, No. 45, p. 135-148. Santiago.
- Boric, R., Holmgren, C., Wilson, N. S. F., & Zentilli, M. (2002). The Geology of The El Soldado Manto Type Cu (Ag) Deposit, Central Chile Manto Type Copper Deposits. *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, 2, 163–184.
- Boyce, D., Charrier, R., & Farías, M. (2020). The First Andean Compressive Tectonic Phase: Sedimentologic and Structural Analysis of Mid-Cretaceous Deposits in the Coastal Cordillera, Central Chile (32°50'S). *Tectonics*, 39(2), 1–24. <u>https://doi.org/10.1029/2019tc005825</u>
- Cabello, J. (1977). Antecedentes preliminares del proyecto Tiltil-Rungue-Montenegro, área Metropolitana. Departamento de Minería, Subgerencia Ingeniería Minera. Empresa Nacional de Minería Chile (ENAMI). 25 p.
- Carter, W., & Aliste, N. (1962). Geology of the ore deposits of the Nilhue Quadrangle, Aconcagua province (unpublished report). *Instituto de Investigaciones Geológicas, IIG (current Sernageomin),* Chile.
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodrígues, M.P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *In: MORENO, T. & GIBBONS, W. (eds) The Geology of Chile. The Geological Society, London*, 21–114.

- Charrier, R., Ramos, V. A., Tapia, F., & Sagripanti, L. (2015). Tectono-stratigraphic evolution of the Andean Orogen between 31 and 37° S (Chile and Western Argentina). *Geological Society, London, Special Publications, 399.*
- Cochilco. (2016). *Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera*. Comisión Chilena del Cobre.
- Cornejo, P., Latorre, J. J., Matthews, S., & Marquardt, C. (2006). U / Pb and 40 Ar / 39 Ar Geochronology of volcanic and intrusive events at the Mantos Blancos copper deposit, II Region, Chile. *XI Congreso Geológico Chileno, Antofagasta. Actas, Geología Económica,* Vol. 2.
- Creixell, C., Parada, M. Á., Morata, D., Vásquez, P., de Arce, C. P., & Arriagada, C. (2011). Middle-Late Jurassic to early Cretaceous transtension and transpression during arc building in central Chile: Evidence from mafic dike swarms. *Andean Geology*, 38(1), 37–63. <u>https://doi.org/10.5027/andgeoV38n1-a04</u>
- Cuadra, W., & Arenas, M. (2013). De Margamarga a Colliguay: Minería aurífera colonial en Santiago de la nueva Extremadura. *Chile: Editorial Ediciones Msp.* 121 p.
- Del Real, I., Thompson, J. F. H., & Carriedo, J. (2018). Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile. Ore Geology Reviews, 102 (September), 106–153. <u>https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.08.034</u>
- Espinoza, W. (1969). *Geología del distrito cuprífero de Cerro Negro; Provincia de Aconcagua*. BSc thesis. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Faúndez, P., Marquardt, C., Jara, J. J., & Guzmán, J. I. (2020). Valuation and Prioritizaction of Early-Stage Exploration Projects: a Case Study of Cu-Ag and Au-Mineralized Systems in the Tiltil Mining District, Chile. *Natural Resources Research*.
- Fuentes, F., Feraud, B., Aguirre, L., & Morata, D. (2005). Ar-40/Ar-39 dating of volcanism and subsequent very low-grade metamorphism in a subsiding basin: Example of the Cretaceous lava series from central Chile. *Chemical Geology*, 214, 157–177.
- Gana, P., & Zenttilli, M. (2000). Historia termal y exhumación de intrusivos de la Cordillera de la Costa de Chile Central. *Congreso Geológico Chileno, No. 9, Actas,* Vol. 2, p. 664-668. Puerto Varas.
- González, J. (2018). *Mineralogía y Geoquímica de las vetas de Cu-(Ag) de la Mina 21 de Mayo, Distrito Talcuna, Región de coquimbo*. Memoria de Título. Universidad de Chile.
- Gröpper, J. (2011). Franjas Metalogénicas de Edad Jurásica y Cretácica en la Cordillera de la Costa de Chile Central, entre los 32° y los 35°20' de Latitud Sur. Memoria de Título. Universidad de Chile.
- Guerrero, R. (1959). *La pequeña minería en la zona de la Cordillera de la Costa de la Provincia de Santiago*. Memoria de Título, Instituto Pedagógico, Universidad de Chile. 175 pag.
- Haynes, D.W. (2000). Iron oxide copper (-gold) deposits: Their position in the ore deposit spectrum and modes of origin. In Porter, T.M., ed., *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective: Adelaide, Australian Mineral Foundation*, 71–90.

- Hermosilla, J., Marquardt, J.C., & Barra, F. (2015). Geología del distrito Puntillas-Galenosa, ejemplo de núcleo estéril en sistemas de pórfidos de cobre, Cordillera de la Costa, Región de Antofagasta, Chile. *Congreso Geológico Chileno XIV*, II, 191-194.
- Heuser, G., Arancibia, G., Veloso, E. E., Cembrano, J., Cordeiro, P. F. O., Nehler, M., & Bracke, R. (2020). The evolution of the Dominga Fe-Cu deposit (northern Chile): Insights from mineral textures and micro-CT analysis. *Ore Geology Reviews*, 119. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103316
- Jaillard, E., Hérali, G., Monfret, T., Díaz-Martínez, E., Baby, P., Lavenu, A., & Dumont, J. F. (2000). Tectonic Evolution of The Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and Northernmost Chile. *Tectonic Evolution of South America. Sociedade Brasileira de Geología 31st International Geological Congress*. Rio de Janeiro.
- Jara, J. J., Barra, F., Reich, M., Leisen, M., Romero, R., & Morata, D. (2021). Episodic construction of the early Andean. *Nature Communications*, 1–8. <u>https://doi.org/10.1038/s41467-021-25232-z</u>
- Kojima, S., Trista-Aguilera, D., & Hayashi, K. I. (2009). Genetic aspects of the manto-type copper deposits based on geochemical studies of North Chilean deposits. *Resource Geology*, 59(1), 87–98. https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00081.x
- Maksaev, V., & Zentilli, M. (2002). CHILEAN STRATA-BOUND Cu- (Ag) DEPOSITS: AN OVERVIEW. In Porter, T.M. (Ed.), Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective. PGC Publishing, 2, 185–205.
- Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C., & Camus, F. (2007). Metallic ore deposits. *In: Moreno, T. & Gibbons, W. (eds) The Geology of Chile. The Geological Society, London*, 179-200.
- Maksaev, V., Almonacid, T. A., Munizaga, F., Valencia, V., McWilliams, M., & Barra, F. (2010). Geochronological and thermochronological constraints on porphyry copper mineralization in the Domeyko alteration zone, northern Chile. *Andean Geology*, 37(1), 144–176. <u>https://doi.org/10.4067/s0718-71062010000100007</u>
- Molina, P. (2014). Geocronología y Condiciones de cristalización de Circones del Plutón Caleu: Evidencia de su prolongada evolución tardimagmática. Memoria de Titulo. Universidad de Chile. https://doi.org/10.1177/1742766510373715
- Molina, P., Parada, M.A., Gutiérrez, F., Ma, Ch., Li, J., Yuanyuan, L., Reich, R., & Aravena, A. (2015). Protracted late magmatic stage of the Caleu pluton (central Chile) as a consequence of heat redistribution by diking: Insights from zircon data and thermal modeling. *Lithos*, 227, 255-268, ISSN 0024-4937. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.04.008.
- Mpodozis, C., & Allmendinger, R. (1992). Extensión cretácica a gran escala en el Norte de Chile (Puquios- Sierra Fraga, 27 0 S): significado para la evolución tectónica de los Andes. *Revista Geologica de Chile*, 19(2).
- Mpodozis, C., & Cornejo, P. (2012). Cenozoic Tectonics and Porphyry Copper Systems of the Chilean Andes. Society of Economic Geologists, 329–360.
- Muñoz, G. (2017). Estudio Del Relave Abandonado Anita, Comuna De Tiltil Y Sus Posibles Implicancias a La Comunidad. Memoria de Título, Universidad Andrés Bello.

- Muñoz-Sáez, C., Pinto, L., Charrier, R., & Nalpas, T. (2014). Influence of depositional load on the development of a shortcut fault system during the inversion of an extensional basin: The Eocene-Oligocene Abanico Basin case, central Chile Andes (33°-35°S). Andean Geology, 41(1), 1–28. <u>https://doi.org/10.5027/andgeoV41n1-a01</u>
- Morata, D., Aguirre, L., Ruzziconi, Y., Féraud, G., Vergara, M., Puga, E., & Díaz de Federico, A. (1997). Feldspar chemistry and preliminary Ar/Ar data on the lower Cretaceous basic lavas from the Coastal Range of Central Chile: petrogenetic implications. *VIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, T-II.*, pp. 1385 1388.
- Oliveros, V., Féraud, G., Aguirre, L., Ramírez, L., Fornari, M., Palacios, C., & Parada, M. (2007). Detailed 40Ar/39Ar dating of geologic events associated with the Mantos Blancos copper deposit, northern Chile. *Mineralium Deposita*, 43(3), 281–293. <u>https://doi.org/10.1007/s00126-007-0146-2</u>
- Oliveros, V., Aguirre Le-Bert, L., Morata Céspedes, D., Simonetti, A., Vergara Martínez, M., Belmar Urbina, M., & Calderón, S. (2008) (a). *Geochronology of very low-grade Mesozoic Andean metabasites; an approach through the K–Ar, 40Ar/39Ar and U–Pb LA-MC-ICP-MS methods.* In: http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/125058
- Oliveros, V., Tristá-Aguilera, D., Féraud, G., Morata, D., Aguirre, L., Kojima, S., & Ferraris, F. (2008) (b). Time relationships between volcanism-plutonism-alteration-mineralization in Cu-stratabound ore deposits from the Michilla mining district, northern Chile: A 40Ar/39Ar geochronological approach. *Mineralium Deposita*, 43(1), 61–78. <u>https://doi.org/10.1007/s00126-007-0147-1</u>
- Orrego, M., Robles, W., Sanhueza, A., Zamora, R., & Infanta, J. (2000). Mantos Blancos y Mantoverde: depósitos del tipo Fe-Cu-Au? Una comparación con implicancias en la exploración. *Congreso Geológico Chileno*, 9th, Puerto Varas, 2000, Actas, 2, 145–149.
- Parada, M. A., Féraud, G., Fuentes, F., Aguirre, L., Morata, D., & Larrondo, P. (2005). Ages and cooling history of the Early Cretaceous Caleu pluton: Testimony of a switch from a rifted to a compressional continental margin in central Chile. *Journal of the Geological Society*, 162(2), 273–287. <u>https://doi.org/10.1144/0016-764903-173</u>
- Piracés, R., & Maksaev, V. (1977). Geología de la hoja Quillota, escala 1:250.000, IV y V región. Santiago, Chile. IIG (actual Sernageomin), CCHEN. 140 p. 1 mapa.
- Ramírez, L. E., Palacios, C., Townley, B., Parada, M. A., Sial, A. N., Fernandez-Turiel, J. L., Gimeno, D., Garcia-Valles, M., & Lehmann, B. (2006). The Mantos Blancos copper deposit: An upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the Coastal Range of Northern Chile. *Mineralium Deposita*, 41(3), 246–258. https://doi.org/10.1007/s00126-006-0055-9
- Ramírez, L. E., Parada, M. A., Palacios, C., & Wittenbrink, J. (2008). Magmatic evolution of the Mantos Blancos copper deposit, Coastal Range of northern Chile: Insight from Sr-Nd isotope, geochemical data and silicate melt inclusions. *Resource Geology*, 58(2), 124–142. <u>https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00049.x</u>

- Ramos, V., & Alemán, A. 2000. Tectonic evolution of the Andes. In: Cordani, U.J. Milani, E.J., Thomaz Filho, A. y Campos, D.A. (eds.) Tectonic evolution of South America, 31° International Geological Congress, 635-685, Río de Janeiro.
- Richards, J. P., López, G. P., Zhu, J. J., Creaser, R. A., Locock, A. J., & Mumin, A. H. (2017). Contrasting tectonic settings and sulfur contents of magmas associated with cretaceous porphyry Cu ± Mo ± Au and intrusion-related iron oxide Cu-Au deposits in northern Chile. *Economic Geology*, *112*(2), 295–318. https://doi.org/10.2113/econgeo.112.2.295
- Rieger, A. A., Marschik, R., Díaz, M., Hölzl, S., Chiaradia, M., Akker, B., & Spangenberg, J. E. (2010). The hypogene iron oxide copper-gold mineralization in the Mantoverde district, northern Chile. *Economic Geology*, 105(7), 1271–1299. <u>https://doi.org/10.2113/econgeo.105.7.1271</u>
- Rivano, S., Sepúlveda, P., Boric, R., & Espiñeira, D. (1993). Hojas Quillota y Portillo (Carta Geológica de Chile, v. 73, 1: 250.000). SERNAGEOMIN.
- Rivera, N., & Aroca, P. (2014). Escalas de producción en economías mineras. El caso de Chile en su dimensión regional. *Eure*, 40(121), 145–155. <u>https://doi.org/10.4067/s0250-71612014000300012</u>
- Seequent Limited. (2019). Leapfrog (Versión 5.0.1). Leapfrog Geo.
- Sellés, D., & Gana, P. 2001. Geología del Area Talagante-San Francisco de Mostazal, Regiones Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica, No. 74, 30 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- SERNAGEOMIN (2012). Atlas de Faenas Mineras, Regiones de Valparaíso, del Libertador General Bernardo O'Higgins y Metropolitana de Santiago (Versión Actualizada). Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas y Estadísticas de Faenas Mineras de Chile Santiago.
- Severino, S. (2017). Estratigrafía Y Paleontología Del Cretácico Inferior al Sureste de Colliguay entre los 33°11'50''-33°15'50'', Regiones de Valparaíso y Metropolitana. Memoria de Título, Universidad Santo Tomás, Facultad de ingeniería, Escuela de Geología.
- Seymour, N. M., Singleton, J. S., Mavor, S. P., Gomila, R., Stockli, D. F., Heuser, G., & Arancibia, G. (2020). The Relationship Between Magmatism and Deformation Along the Intra-arc Strike-Slip Atacama Fault System, Northern Chile. *Tectonics*, 39(3). <u>https://doi.org/10.1029/2019TC005702</u>
- Sillitoe, R. H. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7), 787–812. https://doi.org/10.1007/s00126-003-0379-7
- Sillitoe, R., & Perelló, J. (2005). Andean copper province: tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. *Economic Geology*, *100th Anni*, 845–890. Retrieved from <u>http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Andean+Copper+Province+:+Tectonoma</u> <u>gmatic+Settings+,+Deposit+Types+,+Metallogeny+,+Exploration+,+and+Discovery#0</u>
- Sillitoe, R. H. (2012). Copper Provinces. *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World*, 1–18. <u>https://doi.org/10.5382/sp.16.01</u>

- Thomas, H (1958). Geología de la Cordillera de la Costa, entre el Valle de La Ligua y a Cuesta Barriga. Instituto de investigaciones Geológicas. Boletín N°2. Santiago de Chile.
- Townley, B., Roperch, P., Oliveros, V., Tassara, A., & Arriagada, C. (2007). Hydrothermal alteration and magnetic properties of rocks in the Carolina de Michilla stratabound copper district, northern Chile. *Mineralium Deposita*, 42(7), 771–789. <u>https://doi.org/10.1007/s00126-007-0134-6</u>
- Tristá-Aguilera, D., Barra, F., Ruiz, J., Morata, D., Talavera-Mendoza, O., Kojima, S., & Ferraris, F. (2006). Re-Os isotope systematics for the Lince-Estefanía deposit: Constraints on the timing and source of copper mineralization in a stratabound copper deposit, Coastal Cordillera of Northern Chile. *Mineralium Deposita*, 41(1), 99–105. <u>https://doi.org/10.1007/s00126-006-0048-8</u>
- Veloso, E., Cembrano, J., Arancibia, G., Heuser, G., Neira, S., Siña, A., Garrido, I., Vermeesch, P., & Selby, D. (2017). Tectono-metallogenetic evolution of the Fe–Cu deposit of Dominga, northern Chile. *Mineralium Deposita*, 52(4), 595–620. <u>https://doi.org/10.1007/s00126-016-0682-8</u>
- Vergara, M., Levi, B., Nyström, J. O., & Cancino, A. (1995). Jurassic and Early Cretaceous island arc volcanism, extension, and subsidence in the Coast Range of central Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 107, 1427–1440.
- Viteri, E. (1970). *Estudio geológico de la región de los Cerros Negros y Portales. Provincia de Aconcagua*. BSc Thesis. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Vivallo, W., & Henríquez, F. (1998). Génesis común de los yacimientos estratoligados y vetiformes de cobre del Jurásico Medio a Superior en la Cordillera de la Costa, Región de Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 25, 199–228.
- Wall, R., Sellés, D., & Gana, P. (1999). Área Tiltil-Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Mapas Geológicos, No.11, 1 mapa escala 1:100.000, 1 anexo, Santiago.
- Yáñez Carrizo, G., & Rivera, O. R. (2019). Crustal dense blocks in the fore-arc and arc region of Chilean ranges and their role in the magma ascent and composition: Breaking paradigms in the Andean metallogeny. *Journal* of South American Earth Sciences, 93(October 2018), 51–66. <u>https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.04.006</u>
- Zeballos, J. (2007). Informe Geológico Distrito Minero Tiltil, Región Metropolitana, Provincia e Chacabuco Comuna de Tiltil. *Programa de estudios distritales. Empresa Nacional de Minería*. <u>https://www.enami.cl/api/descarga?f=/Lists/Estudios%20Geolgicos%20Distritales/Attachments/12/Informe %20Geol%25C3%25B3gico%20Distrito%20Til%20Ti\_pub.pdf</u>