



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



# **ESTUDIO DE LA MINERALIZACIÓN DE COBALTO EN LA ZONA NORTE DEL YACIMIENTO PANULCILLO. REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE.**

**Memoria para optar al Título de Geólogo**

**Javier Antonio Cuevas Stegmaier.**

**Profesor Patrocinante: Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado  
Profesional Guía: Sr. Pablo Tomás Bobadilla Osorio  
Profesores Comisión: MSc. Abraham Elías González Martínez  
Dra. María Verónica Pineda Mascayano**

**Concepción, 2019**

# ÍNDICE

## RESUMEN

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. FORMULACIÓN DE PROYECTO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
<b>1.3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>2</b>
1.3.1. Etapa de Gabinete I.....	2
1.3.2. Etapa de Terreno.....	3
1.3.3. Etapa Gabinete II.....	3
<b>1.4. UBICACIÓN Y ACCESOS</b> .....	<b>4</b>
<b>1.5. GEOMORFOLOGÍA</b> .....	<b>6</b>
<b>1.6. TRABAJOS ANTERIORES</b> .....	<b>7</b>
<b>1.7. AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>8</b>
<b>2. MARCO GEOLÓGICO LOCAL</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1. GENERALIDADES</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2. ROCAS ESTRATIFICADAS</b> .....	<b>10</b>
2.2.1. Complejo Volcánico Agua Salada.....	10
2.2.2. Formación Arqueros.....	11
<b>2.3. ROCAS INTRUSIVAS</b> .....	<b>12</b>
<b>2.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL</b> .....	<b>13</b>
<b>3. MARCO GEOLÓGICO DISTRITAL</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1. GENERALIDADES</b> .....	<b>14</b>
<b>3.2. UNIDADES LITOLÓGICAS</b> .....	<b>14</b>
<b>3.3. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL</b> .....	<b>17</b>
<b>3.4. MINERALIZACIÓN</b> .....	<b>18</b>
<b>3.5. ESTRUCTURAS</b> .....	<b>19</b>
<b>3.6. ANTECEDENTES GEOQUÍMICOS</b> .....	<b>21</b>
<b>4. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>24</b>
<b>4.1. COBALTO</b> .....	<b>24</b>
4.1.1. Generalidades.....	24
4.1.2. Metalogénesis.....	24
4.1.3. Minerales ricos en cobalto.....	26
4.1.4. Explotación.....	26
4.1.5. Principales Yacimientos Chilenos.....	27
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>28</b>
<b>5.1. UNIDADES LITOLÓGICAS SUBTERRÁNEAS</b> .....	<b>28</b>
5.1.2. Unidad Andesita.....	29
5.1.1. Unidad Toba.....	30
5.1.1.1. Toba Cristalina.....	31

5.1.1.2. Toba Lítica.....	32
<b>5.1.3. Unidad Brecha .....</b>	<b>33</b>
<b>5.1.4. Unidad Anfibolita .....</b>	<b>34</b>
<b>5.1.5. Unidad Skarn de Granate.....</b>	<b>36</b>
<b>5.2. ALTERACIÓN HIDROTERMAL .....</b>	<b>37</b>
<b>5.2.1. Asociación epidota-albita .....</b>	<b>38</b>
<b>5.2.2 Asociación actinolita-albita.....</b>	<b>40</b>
<b>5.2.3. Silicificación .....</b>	<b>43</b>
<b>5.2.4. Alteraciones menores .....</b>	<b>43</b>
5.2.4.1 Cloritización .....	44
5.2.4.2. Biotitización .....	44
5.2.4.3. Granatización.....	44
<b>5.3. MINERALIZACIÓN .....</b>	<b>45</b>
<b>5.3.1. Horizontes Mineralizados .....</b>	<b>45</b>
5.3.1.1. Horizonte A .....	45
5.3.2.2. Horizonte B .....	46
<b>5.3.2. Mineralización de Cobalto.....</b>	<b>48</b>
5.3.2.1. Distribución en sondajes.....	48
5.3.2.2. Ocurrencia .....	51
5.3.2.3. Descripción mineralógica microscópica.....	52
<b>5.3.3. Mineralización de Manganeso.....</b>	<b>55</b>
5.3.3.1. Distribución en sondajes.....	56
5.3.3.2. Ocurrencia .....	57
<b>6. DISCUSIÓN.....</b>	<b>58</b>
<b>6.1. PETROGÉNESIS .....</b>	<b>58</b>
<b>6.2. PROCESOS MINERALIZADORES .....</b>	<b>59</b>
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>8. REFERENCIAS .....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXOS. ....</b>	<b>73</b>

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO I. MAPEO DE SONDAJES.....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO II. DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA .....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO III. DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA MENA Y GANGA .....</b>	<b>92</b>

## INDICE DE FIGURAS

1.01. Mapa de ubicación y accesos .....	4
1.02. Mapa de ubicación de sondajes .....	5
1.03. Mapa de unidades fisiográficas, Region de Coquimbo .....	6
2.01. Mapa geológico local de la zona de estudio .....	9
3.01. Mapa litológico yacimiento Panulcillo .....	15
3.02. Mapa de estructuras Panulcillo.....	20
3.03. Mapa de distribución anomalías cobalto en Panulcillo.....	22
4.01. Franjas metalogénicas de yacimientos del Cretácico inferior .....	25
5.01. Unidades litológicas subterráneas.....	29
5.02. Unidad Tobas .....	31
5.03. Unidad Anfibolita. ....	35
5.04. Alteración epidota-albita .....	39
5.05. Alteración actinolita-albita .....	41
5.06. Silificación rosa en secuencia volcánica.....	43
5.07. Ocurrencia de mineralización en Horizonte A .....	46
5.08. Ocurrencia de mineralización en Horizonte B.....	47
5.09. Cobaltita observada en sector Rampa Caracoles .....	48
5.10. Distribución de la mineralización de cobalto en sondajes .....	49
5.11. Principales ocurrencias de cobaltita vista en sondajes .....	51
5.12. Hábitos de cobaltita vistos en sondajes.....	52
5.13. Pirolusita masiva y en dendritas en fracturas .....	56
6.01. Esquema general de mineralización, litología y alteración del área.....	61
6.02. Modelo paragenético propuesto .....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

1. Coordenada de sondajes estudiados .....	3
2. Valores de concentración de elementos de interés en Panulcillo .....	21

## INDICE DE MICROFOTOGRAFÍAS

1. Toba cristalina .....	32
2. Matriz volcánica de brecha.....	34
3. Anfibolita.....	35
4. Skarn de Granate .....	37
5. Asociación epidota-albita .....	40
6. Alteración actinolita-albita .....	42
7. Minerales de cobalto hipidiomórficos.....	53
8. Relictos de pirita en cobaltita .....	54
9. Pseudomorfismo de cobaltita en pirita .....	55
10. Pirolusita diseminada .....	57
11. Unidad volcánica donde coexisten minerales de etapa progradada y retrogradada .....	62
12. Relaciones de contacto entre minerales de mena.....	63



## RESUMEN

El Complejo minero Delta, propiedad de ENAMI, ubicado 15 km al norte de Ovalle, comprende una mina de sulfuros de cobre, llamada Panulcillo y dos plantas de tratamiento, distrito que durante más de un siglo no ha contemplado la explotación de otros elementos estratégicos. Sin embargo, en el contexto tecnológico actual, la masificación de baterías que requieren cobalto augura una creciente demanda de este metal, provocando el auge en su exploración. En Panulcillo, recientes antecedentes geoquímicos dan cuenta de anomalías superficiales de este elemento (Castellón, 2017), por lo que se ha realizado el presente estudio geológico para determinar si existe mineralización de cobalto en profundidad, en el cuerpo mineralizado principal y determinar las características geológicas de ésta.

Para ello, mediante el mapeo geológico de 2.053 m de testigos de rocas en seis sondajes y posterior análisis microscópico, se ha comprobado la existencia de cobaltita, un sulfuarseniuro de cobalto, en los dominios subterráneos de Panulcillo. Este mineral, al igual que gran parte de los metales, se distribuye en dos tramos, con espesores que varían entre 60 m a 100 m, definidos como “Horizonte mineralizado A” y “Horizonte mineralizado B”. El Horizonte A aflora en secciones más superficiales y está ligado espacial y genéticamente a la unidad Skarn de Granate con intercalaciones de tobas, las que manifiestan una pervasiva alteración de epidota y albita. El Horizonte B se localiza en porciones más profundas, circunscrito a la unidad metamórfica Anfibolitas, con intensa alteración de actinolita-albita y halos de epidota-albita.

Dentro del Horizonte A la cobaltita se concentra en dos segmentos de aproximadamente 20 m, denominados Zona 1 y Zona 2 y en el Horizonte B se concentra en un sector de semejantes características, definido como Zona 3. La ocurrencia de este mineral en las tres zonas mencionadas es similar, encontrándolo tanto diseminado -con cristales con un tamaño medio de 2 cm junto a pirita, que exhibe texturas de reemplazo e intercrecimiento y en menor proporción con calcopirita-, como en vetillas cuyo espesor varía entre 3 cm a 5 cm, compuestas de magnetita-epidota-pirita-cobaltita.

El modelo propuesto para la evolución de la mineralización corresponde al de un tipo skarn y según lo examinado, la cobaltita tendría estrecha relación con la alteración epidota-albita y actinolita-albita, por lo que se habría formado en la etapa hidrotermal de la evolución del skarn, dando génesis a las diseminaciones del mineral de cobalto. En esta misma etapa, pero tardíamente, se habrían originado las vetillas de epidota-magnetita-pirita-cobaltita, las que cortan la secuencia principal y constituyen un indicador de mineralización de cobalto en Panulcillo.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. FORMULACIÓN DE PROYECTO

El presente trabajo está enmarcado dentro de las necesidades actuales de ampliar la producción y oferta nacional de metales estratégicos. Actualmente se pronostica un auge en el uso de cobalto y manganeso debido a la masificación de tecnologías que necesitan de estos elementos, como la naciente industria de la electromovilidad que requiere baterías de litio-cobalto y litio-cobalto-manganeso para su funcionamiento, implicando una creciente demanda por estos metales.

El complejo minero Delta, propiedad de ENAMI, es parte del distrito minero Panulcillo, comprende dos plantas de tratamiento de mineral y una mina llamada Panulcillo, en la que se explotan sulfuros de cobre. El yacimiento Panulcillo se ubica en la franja metalogénica de la cordillera de la Costa de edad Cretácico inferior, ligada espacialmente y genéticamente con los distritos mineros donde se ha explotado cobalto. Townley y otros (2018) plantean que en esta franja se dispondrían de recursos potenciales de cobalto, el que podría ser explotado como producto, sub-producto del cobre o incluso recuperarse desde relaves. Por otro lado, en la investigación realizada por Castellón (2017), que se enfoca en la geología, geoquímica y estructuras del yacimiento Panulcillo, se determinaron anomalías cercanas a 1.000 ppm de cobalto.

De esta manera, con los antecedentes ya mencionados, este estudio mediante el mapeo geológico de sondajes y análisis microscópico, tiene como objetivo evaluar si existe mineralización de cobalto en profundidad y así determinar las características geológicas, la ocurrencia, la zonificación de ésta y establecer su vínculo con el cuerpo mineralizado principal, por lo que esta exploración constituye el primer acercamiento para evaluar el potencial de este metal en el yacimiento Panulcillo.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo general**

Determinar si en las rocas de profundidad de la zona norte del yacimiento Panulcillo existe mineralización de cobalto, estableciendo la ocurrencia de ésta, las características geológicas y potenciales zonas de interés donde se pueda encontrar este metal.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Describir y establecer la distribución de las unidades litológicas que se presentan en profundidad.
- Caracterizar mineralógicamente las unidades de rocas presentes en el distrito Panulcillo.
- Caracterizar la ocurrencia macroscópica y microscópica de la mineralización de cobalto.
- Determinar los potenciales minerales que puedan contener leyes de cobalto, manganeso, cobre y hierro.
- Proponer un modelo conceptual de cómo se relaciona la mineralización de cobalto con las alteraciones hidrotermales.

## **1.3. METODOLOGÍA**

### **1.3.1. Etapa de Gabinete I**

- Recopilación y revisión bibliográfica de trabajos anteriores realizados en la zona de estudio.
- Revisión de base de datos de ENAMI de análisis geoquímicos multielementales previos, con el fin de encontrar anomalías de cobalto.
- Preparación de material para terreno, revisión de: mapas geológicos, imágenes satelitales, fotografías aéreas, además de elaboración de cartilla para mapeo de sondajes.



### 1.3.2. Etapa de Terreno

- Terreno en superficie de reconocimiento geológico acompañado del geólogo de ENAMI Sr. Pablo Bobadilla, por los lugares y labores más importantes del yacimiento Panulcillo. Incluyó visita al sector de la rampa Caracoles (coordenadas: 6.628.002 m N, 286.813 m E UTM WGS 84), donde se habían detectado anomalías de cobalto previamente (Castellón, 2017). Se obtuvieron muestras para posterior análisis microscópico del mineral encontrado.
- Mapeo de 2.053 m de un total de seis sondajes, distribuidos en tres sondajes diamantinos correspondientes a: DDH-98125, DDH-98126, DDH-98127 y tres sondajes de aire reverso; PAN-00, PAN-01 y PAN-02 (Tabla 1.). Estos sondajes abarcan en su extensión el cuerpo mineralizado, por lo que permitieron conocer si en este sector existe mineralización de cobalto.

**Tabla 1. Coordenadas de sondajes estudiados. Sistema U.T.M. PSAD56.**

Nombre	Tipo	Coordenada E (m)	Coordenada N (m)	Cota (m)	Profundidad (m)
PAN 00	Aire reverso	287.071	6.628.812	607	336
PAN 01	Aire reverso	287.070	6.628.806	607	350
PAN 02	Aire reverso	287.094	6.628.740	611	320
DDH-98125	Diamantino	287.095	6.628.720	612	337
DDH-98126	Diamantino	287.095	6.628.720	612	350
DDH-98127	Diamantino	287.084	6.628.768	609	360

- En esta etapa se realizó mapeo geológico de los sondajes ya citados, el cual consistió en determinar y describir la litología, estructuras, alteraciones hidrotermales, mineralización y su distribución a largo de los sondajes, dando énfasis a la de cobalto.
- Se obtuvieron siete muestras de rocas, para posterior confección de cortes transparentes, y así comprobar las litologías y alteraciones visualizadas en terreno.
- Se recolectaron seis muestras, para posterior elaboración de cortes pulidos y evaluación de mineralización de cobalto y otros minerales.

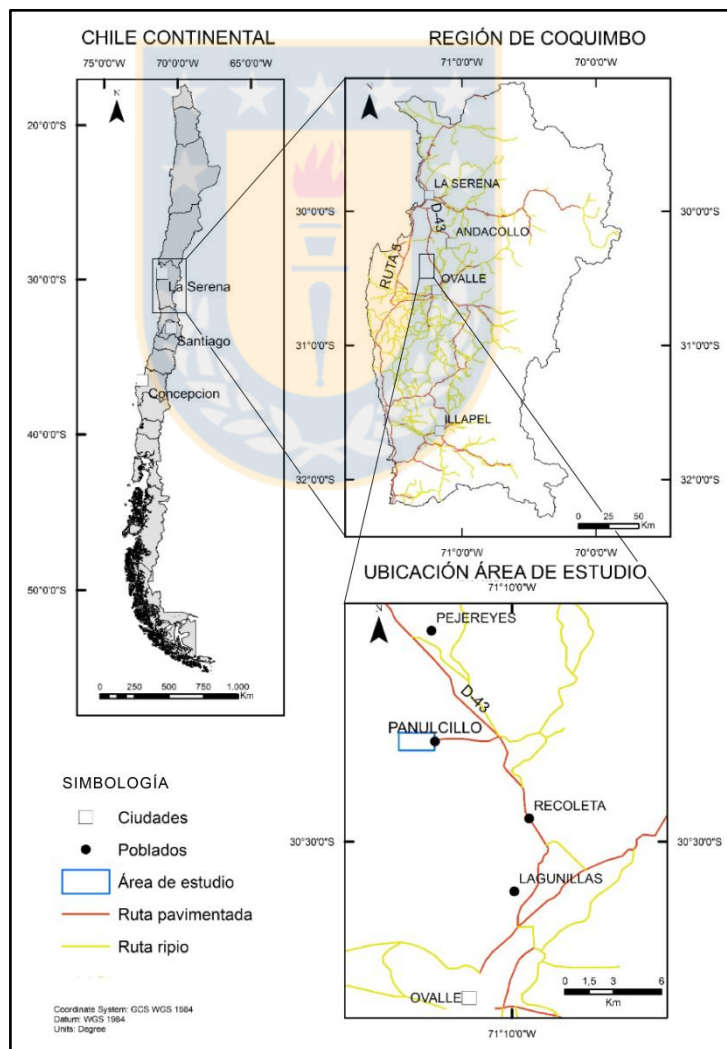
### 1.3.3. Etapa Gabinete II

- Descripción petrográfica y mineralógica de cortes transparentes y pulidos en laboratorio de Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Concepción.

- En esta etapa se continuó con la revisión bibliográfica, análisis de los resultados obtenidos en terreno y se escribió la memoria de título.

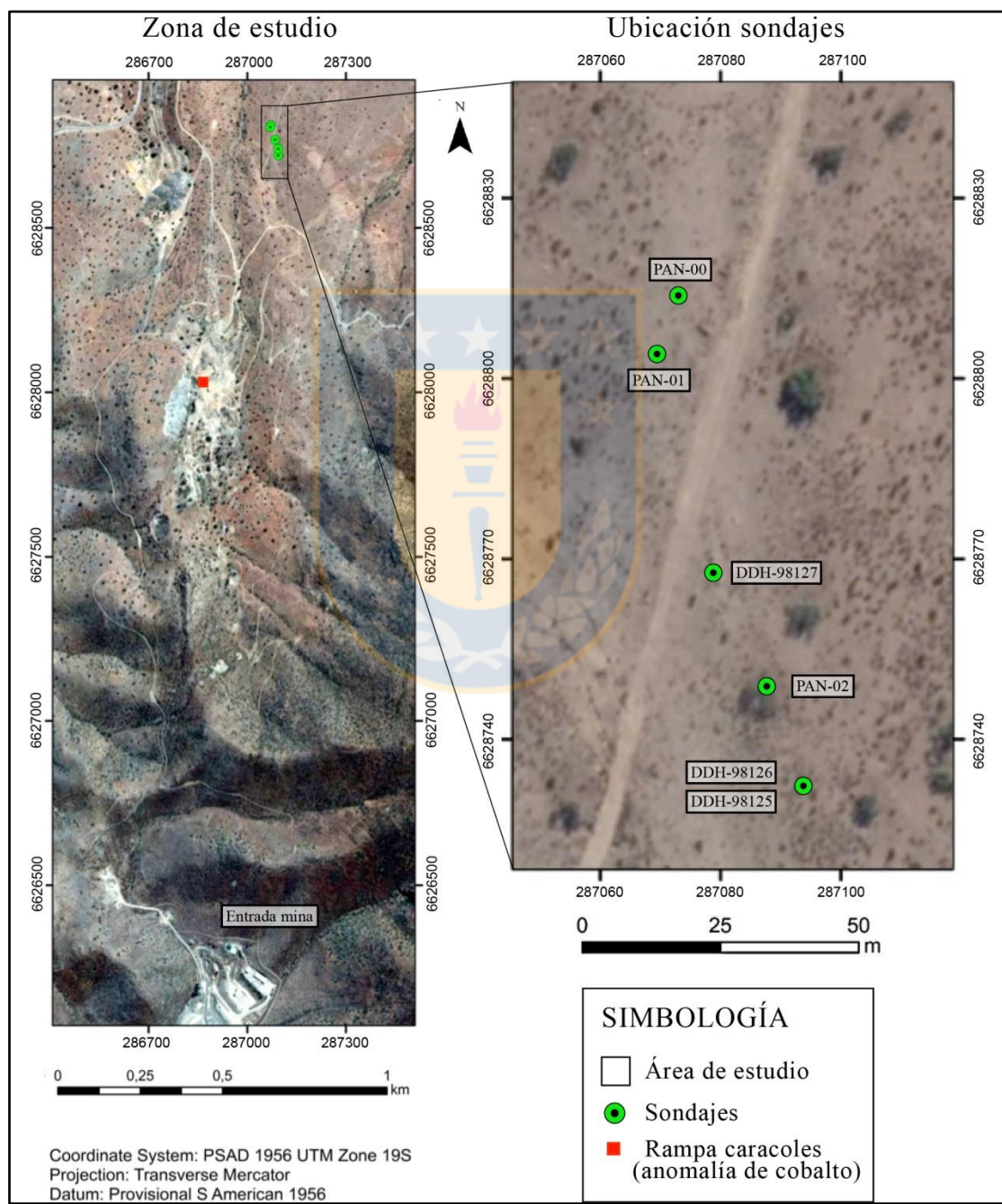
#### 1.4. UBICACIÓN Y ACCESOS

El Proyecto Delta se sitúa en la comuna de Ovalle, Provincia de Limarí, Región de Coquimbo, Chile. El acceso es a través de la ruta D-43 que une La Serena y Ovalle. A través de esa ruta, se debe llegar hasta el desvío hacia Panulcillo, en el paradero del mismo nombre, ubicado a 15 km al norte de Ovalle y a 70 km al sur de La Serena. Desde el desvío se debe recorrer 6 km en dirección oeste en un camino minero pavimentado (Figura 1.01.).



**Figura 1.01. Mapa ubicación y acceso zona de estudio. Datum WGS 84.**

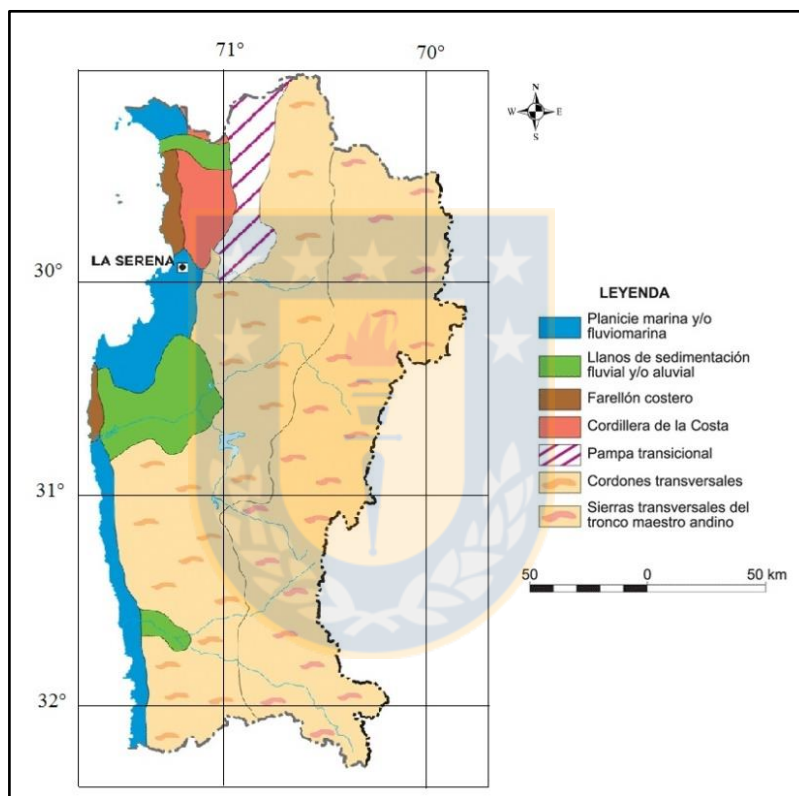
Las coordenadas centrales UTM del yacimiento son 6.628.100 m N y 287.000 m E (UTM PSAD 56). El área que abarca los sondajes estudiados crea un cuadrángulo con coordenadas UTM PSAD 56 que se extiende desde 6.628.720 m N a 6.628.812 m N y 287.084 m E a 287.096 m E (Figura 1.02.). Estos sondajes se ubican, en la zona norte del yacimiento, incluyen al cuerpo mineralizado y el avance de la mina desde el sur aún no ha llegado a ese sector (Agosto 2019).



**Figura 1.02.** Mapa ubicación de sondajes estudiados. Datum UTM PSAD56.

## 1.5. GEOMORFOLOGÍA

La Región de Coquimbo cuenta con las unidades fisiográficas primordiales del territorio chileno, que de oeste a este corresponden a: farellón Costero, planicies Litorales, cordillera de la Costa, depresión Intermedia y cordillera de los Andes (Figura 1.03.). Börgel (1983) define a esta región desde el punto de vista geomorfológico y climático como parte de la “Región del Complejo Montañoso Andino-Costero



**Figura 1.03. Mapa de unidades fisiográficas de la Región de Coquimbo.** (Modificado de Börgel, 1983). Datum WGS84

La cordillera de la Costa está interrumpida por los cordones transversales perdiendo continuidad de norte a sur. Estos cordones alcanzan alturas de 600 a 100 m s.n.m. y ocupan un ancho de 50 km, el alineamiento transversal con respecto a la alineación norte-sur del país se debe a la acción erosiva de quebradas y ríos. Entre el valle del río Elqui y el río Aconcagua se aprecian llanos de sedimentación fluvial, los que se emplazan en los cursos medios de los ríos Elqui, Limarí y Choapa. Al este de los cordones se ubican sierras y cordilleras en disposiciones oblicuas,

constituyendo el encadenamiento mayor de la cordillera de los Andes en esta región (Börgel, 1983).

El área de estudio se localiza en las laderas occidentales del cerro la Lucha. Esta morfoestructura es parte de las serranías costeras, las que se encuentran limitadas por la quebrada el Ingenio por el oriente y la quebrada Camarones por el poniente. Las serranías Costeras se extienden desde la quebrada Romeral, frente a la bahía de Tongoy por el norte, hasta el río Limarí por el sur (Narváez y Araya, 1998).

## **1.6. TRABAJOS ANTERIORES.**

De los trabajos realizados en el área destaca el de Narváez y Araya (1998), el cual representa un conjunto de resultados obtenidos en exploración minera, que incluyó mapeo en superficie y de sondajes. Presentó los antecedentes sobre el conocimiento geológico del yacimiento, así como de sus reservas. Este informe es de suma importancia en el distrito, ya que define grupos litológicos, alteraciones hidrotermales, estructuras y mineralización.

Sugaki y otros (2000), analizaron el depósito desde el punto de vista mineralógico, efectuando análisis químicos a la variación de minerales. Proponen un modelo tipo skarn para Panulcillo, especificando las etapas de evolución y confeccionaron un cuadro paragenético del yacimiento.

Río Tinto (2001), efectuó un estudio para determinar la calidad y el tamaño del depósito mediante un programa de exploración minera que incluyó: mapeo en superficie, mapeo de sondajes, levantamientos geofísicos y geoquímicos, estudios de geoestadística e interpretaciones y modelamiento de cuerpos mineralizados. Todos los resultados obtenidos permitieron definir litologías, alteraciones, estructuras, mineralización y proponer un modelo evolutivo para Panulcillo.

Díaz y Corvalán (2015), vincularon el modelo genético del yacimiento con los depósitos tipo IOCG y FE-P. Determinaron que según la mena, ganga y asociaciones de alteraciones, Panulcillo correspondería a un depósito tipo IOCG.

Por último, Castellón (2017) en su memoria de título contribuye a conocer el origen de la mineralización, el rol que cumplen las estructuras en la creación y progresión del depósito y la afinidad geoquímica de éste. Para este propósito trabajó en mapeos geológicos a escala 1:10.000, análisis petrográficos, geoquímicos y dataciones radiométricas.

## 1.7. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a ENAMI por permitir trabajar con ellos y desarrollar esta memoria de título. A mi profesora patrocinante, Fernanda Álvarez por su ayuda, consejos y gestión y al departamento Ciencias de la Tierra, por financiar la confección de los cortes transparentes.



## 2. MARCO GEOLÓGICO LOCAL

### 2.1. GENERALIDADES

El distrito minero Panulcillo se sitúa en la cordillera de la Costa, en una secuencia sedimentaria de edad Júrásico-Cretácico tanto: marina, continental y volcánica, que se dispone en franjas de rumbo NS-NNW con manteos al este. Estas rocas han sido intruídas por cuerpos ígneos de edad Cretácico, provocando metamorfismo de contacto y a la vez han sido afectadas por el sistema de fallas Romeral (Narváez y Araya, 1998) (Figura 2.01.).

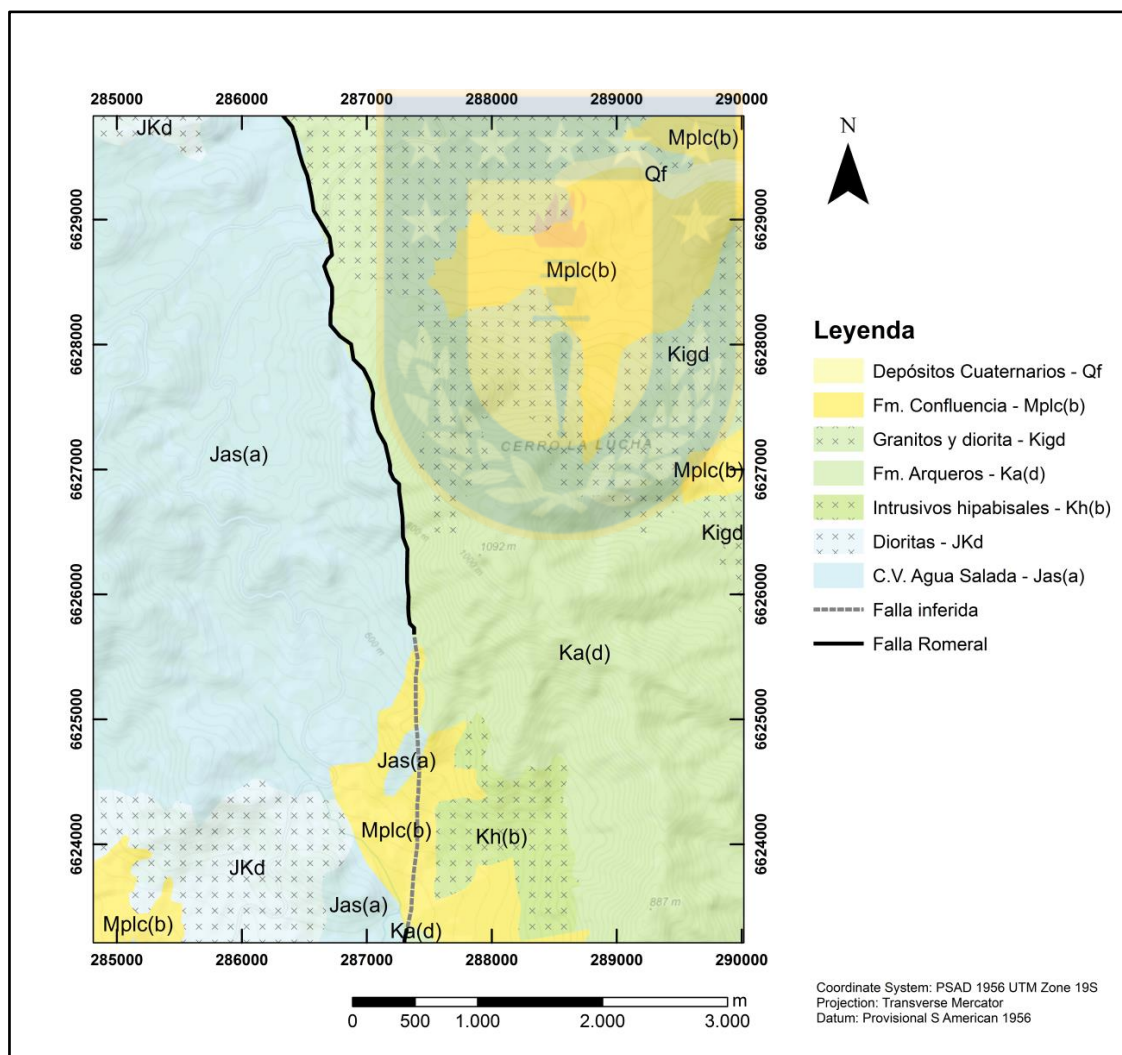


Figura 2.01. Mapa geológico local de la zona de estudio. (Modificado de Emparán y Pineda, 2006). Datum UTM PSAD 56.

## 2.2. ROCAS ESTRATIFICADAS

Regionalmente las rocas estratificadas podrían ser consideradas como una secuencia marina, continental y volcánica, que atestiguan periodos de gran volcanismo intercalados con sedimentos marinos debido a transgresiones, ambiente que posteriormente evolucionó a uno continental (Narváez y Araya, 1998). Destaca el Complejo Volcánico Agua Salada de edad Jurásico, que testifica el potente volcanismo de la época. Sobreyaciendo se han reconocido las rocas volcánicas de la Formación Arqueros (Cretácico inferior), las que muestran intercalaciones de rocas sedimentarias marinas y ostentan mineralización de interés económico (Emparán y Pineda, 2006). La Formación Quebrada Marquesa de edad Hauteriviano-Albiano, se encuentra estratigráficamente sobre la Formación Arqueros y corresponde a un conjunto de material sedimentario y volcánico. En los valles, quebradas y bajos topográficos se distribuye la Formación Confluencia de edad Mioceno-Plioceno, la que representa un ambiente continental que tuvo precipitaciones suficientes para erosionar, transportar y depositar fragmentos líticos gruesos. Los depósitos más recientes son gravas y arenas no consolidadas de acumulación fluvial pertenecientes a los Depósitos Cuaternarios (Emparán y Pineda, 2006).

A continuación se describen con mayor precisión las formaciones que se emplazan dentro del área de estudio de este trabajo.

### 2.2.1. Complejo Volcánico Agua Salada

Se define como un conjunto de material volcánico de edad Jurásico (143-162 Ma) compuesto por una alternancia de andesitas y tobas con escasas areniscas. Tiene una orientación general de rumbo NNW y manteo hacia el este (Emparán y Pineda, 2006). En el área de estudio abarca una gran parte de la fracción occidental, limitado al este por la falla Romeral la que lo pone en contacto con la Formación Arqueros (Castellón, 2017).

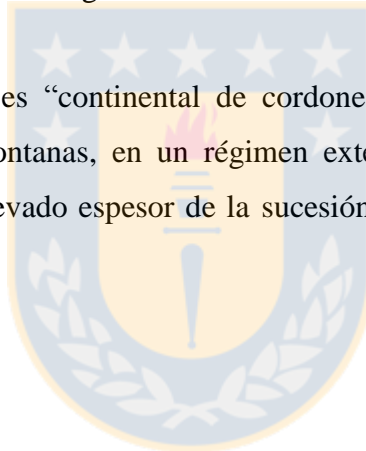
De acuerdo a Emparán y Pineda (2006) su espesor estimado es de 6.400 m, carece de base y techo expuesto. Según los mismos autores, se distinguen tres asociaciones litológicas de consideración: La *facies* basal está conformada por alternancia de andesitas y tobas, con



intercalaciones escasas de areniscas, calizas y lutitas. La *facies* intermedia que está constituida de ignimbritas grises claras con andesitas y localmente filones mantos andesíticos. Finalmente, hacia techo se reconocen intrusivos subvolcánicos compuestos de andesitas porfíricas (algunas ocoíticas), pórfidos dioríticos a andesíticos y diques de microdiorita. Las rocas de esta unidad han experimentado metamorfismo de contacto formando metatobas, metandesitas y hornfels, sumado a dinamometamorfismo debido a la acción de la falla Romeral, generando milonitas y cataclasitas.

Emparán y Pineda (2006) proponen una edad Jurásico para la depositación, la que se obtuvo mediante análisis radiométrico U-Pb de circón en ignimbritas de la *facies* intermedia. Dado sus características litológicas, edad y distribución es posible correlacionar el Complejo Volcánico Agua Salada con la Formación La Negra.

El ambiente de depositación es “continental de cordones volcánicos con discretos cauces y cuencas sedimentarias intramontanas, en un régimen extensivo de gran actividad volcánica”, registro de lo anterior es el elevado espesor de la sucesión volcánica y piroclástica (Emparán y Pineda, 2006).



### 2.2.2. Formación Arqueros

Definida por Aguirre y Egert (1965) como parte del Grupo Ovalle, fue descrita como una “secuencia de andesitas porfíricas y calizas marinas”. Carece de una base expuesta y subyace a la Formación Quebrada Marquesa. Está en contacto por falla con el Complejo Volcánico Agua Salada y es intruida por una unidad plutónica del Cretácico superior (Emparán y Pineda, 2006). Ocupa una considerable extensión hacia el sureste del área con un rumbo NS y un manteo general hacia el este (Río Tinto, 2001).

Está constituida por andesitas, basaltos, calizas, areniscas y depósitos piroclásticos sub-aéreos. Esta formación se caracteriza por una gran variación lateral de litologías. Emparán y Pineda (2006) han reconocido 6 *facies* distintivas para ésta, identificando de base a techo las siguientes: (1) andesitas y basaltos con intercalaciones de tobas, (2) andesitas con grandes fenocristales de

plagioclasas y máficos denominada “ocoitas”, (3) calizas y areniscas subordinadas con escasas intercalaciones de tobas, (4) pórfidos andesíticos de piroxeno que se disponen como diques, cortando las *facies* anteriores, (5) alternancia de lavas, preferentemente almohadillas y brechas, con areniscas y calizas, (6) tobas y brechas con alternancia de andesitas. Debido a la intrusión de cuerpos ígneos las rocas de esta unidad han sufrido metamorfismo termal provocando un extenso sector de hornfels contiguo al contacto con los intrusivos y *skarnificación* en porciones más distales. Conjuntamente se manifiestan cataclasitas, con característica atribuibles a eventos de deformación frágil y dúctil (Emparán y Pineda, 2006).

Se le ha asignado una edad de 123-131 Ma mediante datación radiométrica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en anfíboles de secciones inferiores y se puede correlacionar con la Formación Punta del Cobre hacia el norte y Lo Prado hacia el sur (Emparán y Pineda, 2006). Aberg y otros (1984) propusieron para el ambiente de depositación un sistema de *rift* con gran actividad volcánica, que mutó desde un magmatismo basáltico a andesítico, ocasionando uno más explosivo y con mayor cantidad de material piroclástico. Por otro lado, se desarrollaron cuencas donde se depositaron sedimentos marinos debido a transgresiones, lo que generó un engranaje lateral con las lavas.

### 2.3. ROCAS INTRUSIVAS

Los intrusivos se localizan en la parte noreste y suroeste del área. Éstos intruyen al conjunto volcanosedimentario del Jurásico y Cretácico y sus emplazamientos han resultado de suma importancia para la generación de mineralización de interés económico. Según Emparán y Pineda (2006), en el distrito Panulcillo es posible distinguir tres unidades ígneas. La primera de ellas es la unidad de Intrusivos Dioríticos del Jurásico-Cretácico inferior, que intruyen al Complejo Volcánico Agua Salada. Éstos están fuertemente alterados y afectados por la falla Romeral, observándose milonitas y cataclasitas. La segunda unidad ígnea son los “Intrusivos Graníticos a Dioríticos” del Cretácico inferior, ésta intruye a las rocas de la Formación Arqueros y a los intrusivos jurásicos, está en contacto por falla con el Complejo Volcánico Agua Salada y exhiben milonitas y cataclasitas imputables a la acción de la falla Romeral. Por último, surgen diques y stocks pertenecientes a la unidad “Intrusivos Hipoabisales Andesíticos Basálticos-Dioríticos”, los

que intruyen a la Formación Arqueros, Quebrada Marquesa y a los cuerpos ígneos referidos anteriormente. En el contacto con las rocas de cajas se visualizan oxidados de cobre y calcopirita.

## 2.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Una de las estructuras más relevantes de la cordillera de la Costa en el norte de Chile es el sistema de fallas de Atacama (SFA), el cual se extiende por más de 1.000 km desde Iquique hasta Ovalle. Este sistema de estructuras es paralelo a la fosa, de tipo transcurrente y posee un rumbo general NS y fallas subsidiarias de rumbo NW-SE (Charrier, 2007). Cembrano (2009) propone que la historia de este sistema comenzó entre el Jurásico y Cretácico, suscitando zonas de deformación frágil de más de 60 km debido a movimientos transcurrente sinistral. El mismo autor menciona que el SFA se originó durante el desarrollo del arco como un sistema de fallas transcurrentes sinistral ligado a la subducción, que acomodó una componente de cizalle producto de la subducción oblicua entre las placas Phoenix y Sudamericana.

El SFA ha sido dividido en cuatro segmentos, los que de norte a sur corresponden a: salar del Carmen, Paposo, El Salado-Vallenar y Romeral (Charrier, 2007), siendo éste último el que afecta al distrito Panulcillo.

El sistema de fallas Romeral (SFR) comprende la falla del mismo nombre, la cual se ha limitado desde el sur de Ovalle hasta el norte de La Serena, con una longitud aproximada de 100 km. Actúa sobre las rocas estratificadas e intrusivas de la región fracturándolas y desplazándolas, lo que dio origen a una franja de milonitas y cataclasitas. Separa el Complejo Volcánico Agua Salada de edad Jurásico hacia el oeste y a la Formación Arqueros de edad Cretácico hacia el este (Emparan y Pineda, 2006).

### 3. MARCO GEOLÓGICO DISTRITAL

#### 3.1. GENERALIDADES

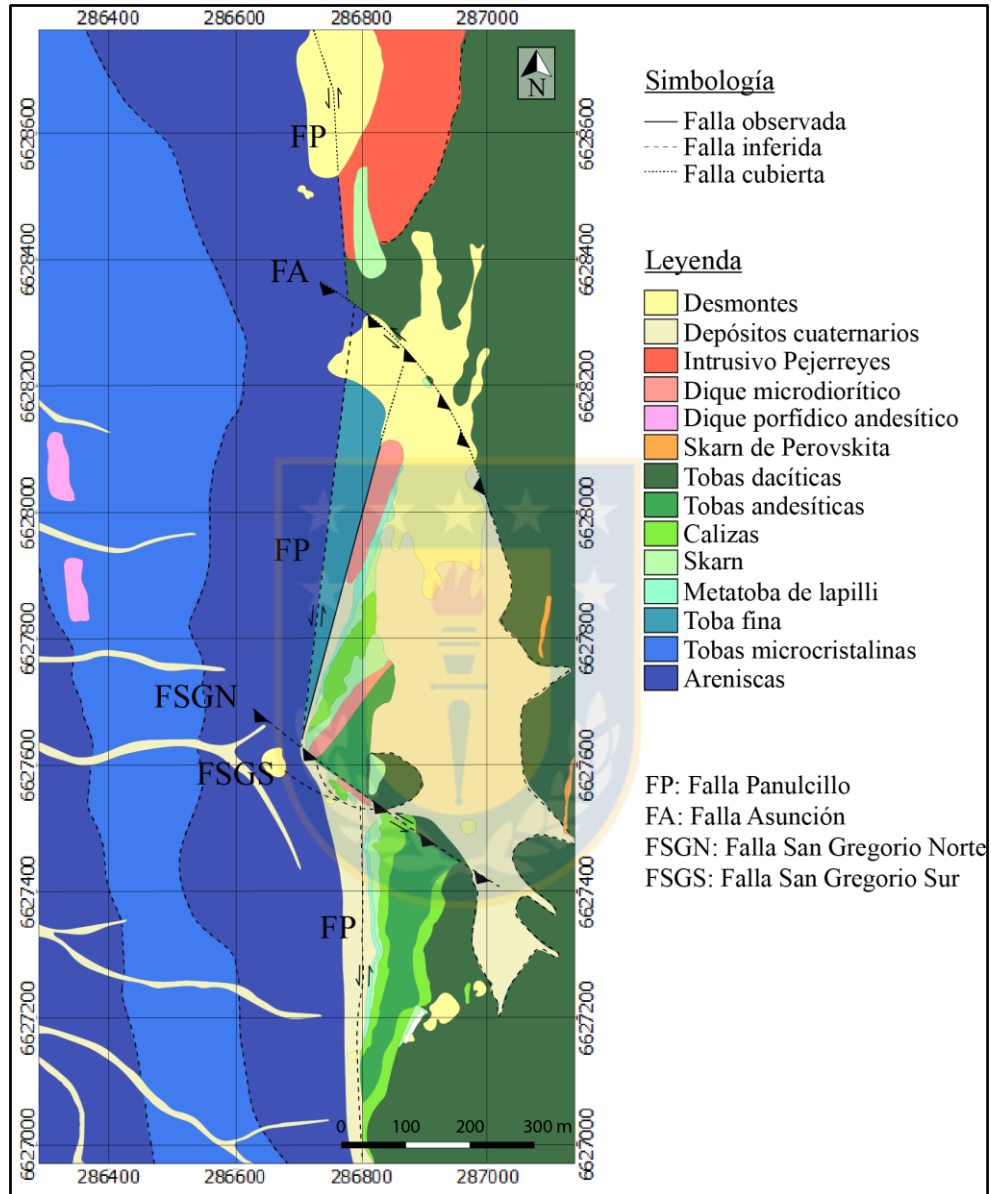
El distrito minero Panulcillo fue explotado por su mineralización de cobre por distintas compañías mineras desde fines del siglo XIX hasta mediados del siglo XX. La extracción era esencialmente en la mina San Gregorio obteniendo sulfuros de cobre y en la mina Asunción donde la producción principal era de oxidados de cobre. A raíz de la explotación se crearon varios rajos superficiales en la parte alta de la propiedad, los que se denominan: Rajo Caracoles, Mina Nueva y Rajo Rosario (Narváez y Araya, 1998). En 2009 se crea el complejo minero Delta, propiedad de ENAMI, el cual comprende dos plantas de tratamientos, una para sulfuros y otra para oxidados, una agencia de compra para la pequeña minería, además de una mina llamada Delta o Panulcillo. La planta es alimentada a una razón de 54.000 toneladas al mes con leyes cercanas al 1,17% de cobre total y la explotación es de calcopirita y bornita.

Las rocas del distrito Panulcillo comprenden tobas, andesitas, calizas e intrusivos. Debido a la intrusión de cuerpos magmáticos se generó metamorfismo de contacto, lo que gatilló procesos de *skarnificación* en las calizas (Narváez y Araya, 1998) y específicamente a causa de la intrusión de diques microdioríticos de edad 123-131 Ma, se originó mineralización de interés económico, destacando calcopirita, bornita y pirita (Castellón, 2017). Los grupos litológicos exhiben alteración, donde prevalecen minerales ricos en potasio, sodio y calcio, visualizándose clorita y epidota, feldespato potásico, granate, hematita y biotita. En la zona aflora la falla Panulcillo de orientación N10°W/85°W acompañada de distintas fallas de orientación NW/70°SW (Castellón, 2017) las que han jugado un rol preponderante en la génesis del depósito y en la cinemática del complejo.

#### 3.2. UNIDADES LITOLÓGICAS

Según la investigación de Castellón (2017) en las rocas de superficie de Panulcillo se identifican las siguientes unidades litológicas: Areniscas, Tobas Cristalinas, Toba Fina, Metatoba de Lapilli,

Skarn, Calizas, Tobas Andesíticas, Tobas Dacíticas, Diques Porfídicos Andesíticos y Diques Microdioríticos (Figura 3.01.).



**Figura 3.01. Mapa litológico yacimiento Panulcillo.** (Modificado de Castellón, 2017).  
 Datum UTM PSAD 56

Las primeras dos unidades citadas forman parte del Complejo Volcánico Agua Salada de edad Jurásico y afloran al oeste de la falla Panulcillo, muestran estratos intercalados de areniscas finas y tobas cristalinas. La unidad de Areniscas contiene clastos de tobas sumado a anfíboles, magnetita, hematita, granate, cuarzo y se encuentra foliada con planos de rumbo general NS -

N20°W y manteos de 80°W – 80°E (Castellón, 2017). La Toba Cristalina es una unidad de aproximadamente 100 m de espesor, la cual está compuesta de tobas andesíticas y afaníticas de color gris oscuro (Castellón, 2017). Narváez y Araya (1998) definen esta unidad como “rocas volcánicas andesíticas con alteración de biotita”, mientras que Río Tinto (2001) describe estos afloramientos como hornfels máficos. Diques microdioríticos intruyen a estas dos unidades en los cuales abundan plagioclasas (sobre 50%), biotitas y óxidos de hierro. La roca de caja de estos diques (toba cristalina) está brechizada (Castellón, 2017).

Al este de la falla Panulcillo afloran unidades litológicas pertenecientes a la Formación Arqueros y a cuerpos intrusivos. Integra la formación cretácica la unidad basal denominada Tobas Microafaníticas, la cual se caracteriza por una pervasiva alteración de hematita, manifestándose una intensa pigmentación en la matriz y nódulos de este mismo mineral, como constituyente de mayor tamaño (Castellón, 2017). Sobre este horizonte se sitúa la unidad de Calizas, donde Castellón (2017) define tres estratos de calizas distintos, a diferencia de Narváez y Araya (1998) y Río Tinto (2001). Los primeros autores citados, las describieron como “calizas de guijarros y calizas granatíferas” mientras que Río Tinto (2001) singularizó esta unidad como “mármol y skarn de granate”. El primer estrato de caliza descrito por Castellón (2017) se dispone sobre la unidad de Tobas Microafaníticas, posee un espesor de 30 m y tiene oxidados de cobre. En el contacto con diques, la caliza ha sido recristalizada en mármol con textura granoblástica y en skarn de grano fino hacia techo del estrato. El skarn se compone de granate, alterado en menor medida con actinolita, muscovita, biotita, tremolita y se observan menas de cobre (5%) como calcopirita, covelina y malaquita en zonas oxidadas. El segundo estrato de caliza es similar al descrito anteriormente, pero entre las dos litologías calcáreas aparece la unidad de Tobas Andesíticas, la que tiene gran cantidad de plagioclasas de hasta 2 mm. Sobre el segundo horizonte de calizas se dispone la unidad definida por Castellón (2017) como “Alternancia de Tobas Andesíticas y Dacíticas”, la que en Panulcillo presenta una potencia de hasta 600 m. La toba posee clastos en su matriz, los cuales contienen magnetita, ilmenita, pirita y trazas de calcopirita. En trabajos previos al de Castellón (2017) esta unidad era definida como “Andesitas Porfídicas” (Narváez y Araya, 1998) y “Hornfels Máficos” (Río Tinto, 2001). Sobre la alternancia de rocas volcánicas está ubicado el tercer estrato de caliza detallado por Castellón (2017), el cual se diferencia de los dos horizontes anteriores por su elevado contenido de calcita

con sulfuros de cobre. La misma autora define la unidad Skarn de Perovskita hacia el techo de la Formación Arqueros. El skarn es de aspecto tabular con orientación N-NE, consta de granos de perovskita (trióxido de titanio y calcio) y oxidados de cobre, se aprecia alteración de clorita, granate, epidota, hematita y jarosita.

La secuencia de la Formación Arqueros está intruida por distintos diques de composición microdiorítica mineralizados. Poseen espesores de 1 m a 20 m, los de mayor tamaño fueron explotados en los Rajos Caracoles, Mina Nueva y Rajo Rosario (Castellón, 2017). Los diques al intruir cerca de calizas, provocaron metamorfismo de contacto (mármol y skarn) y generalmente se hallan mineralizados. En el distrito se sitúa el intrusivo Pejerreyes (Emparán y Pineda, 2006), el cual está compuesto por dos unidades distintivas: una granodiorítica de textura fanerítica con grano fino y una diorítica de grano medio a grueso intruida por vetillas de feldespato potásico y cuarzo (Castellón, 2017). Narváez y Araya (1998) mencionan que este intrusivo sería el responsable de la mineralización y del metamorfismo ocasionado en el yacimiento Panulcillo, mientras que Castellón (2017) afirma que es estéril y no tiene nexo con los diques microdioríticos mineralizadores, ya que el plutón corta la sucesión estratigráfica de la Formación Arqueros y la mineralización.

### **3.3. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL**

Las rocas del distrito presentan los siguientes minerales de alteración: clorita y epidota; feldespato potásico, granate, hematita y biotita, entre otros. De acuerdo a Castellón (2017) las alteraciones de importancia en el área de estudio son:

- Zona oxidada con hematita, que afecta a las areniscas, diques andesíticos y brechas, manifestándose en la matriz de estas últimas y en nódulos de hasta 20 cm de diámetro.
- Asociación clorita epidota en las unidades tobáceas, donde la epidota exhibe hábito tabular, acicular, masivo y en nódulos de hasta 20 cm en conjunto a clorita.
- Zona de skarn con granate y menores cantidades de actinolita, epidota y biotita cloritizada que se sitúan en las rocas contiguas a intrusivos.
- Zona de biotita en las areniscas y en el intrusivo Pejerreyes, de manera diseminada y en vetillas.

Por otro lado, Narváez y Araya (1998) definen otros tipos de alteraciones vinculadas al modelo genético tipo skarn que establecieron para este depósito y que fueron reconocidas a través de mapeo de sondajes. Proponen que en la etapa retrogradante hidrotermal acontecería un evento de silicificación, que afectaría a las andesitas y calizas. Divide esta alteración en: maciza, bandeada y brechoidal. Otra alteración de relevancia que reportan en los sondajes es de una pervasiva cloritización en la masa fundamental de las rocas volcánicas.

Cabe mencionar que los diferentes tipos de alteraciones establecidas por Castellón (2017) y Narváez y Araya (1998) responden a la distintas metodologías utilizadas (mapeo en superficie y análisis de sondaje, respectivamente), al alcance y enfoque de cada trabajo.

### 3.4. MINERALIZACIÓN

El modelo genético del yacimiento Panulcillo es controversial. Históricamente ha sido considerado como un skarn de cobre (Narváez y Araya, 1998; Sugaki y otros, 2000; Río Tinto, 2001). Narváez y Araya (1998) han definido una evolución típica de skarn para el yacimiento, es decir, una primera *facies* progradante anhidra a causa de metamorfismo fundamentalmente calórico, con formación de granate sumado a pirrotina, pirita, calcopirita y magnetita. Una segunda *facies* es reconocida, ligada a procesos retrogradados hidrotermales con desarrollo de pirita, calcopirita y bornita. Sugaki y otros (2000) hacen un análisis mineralógico del depósito, definen una zona de endoskarn no mineralizada y un exoskarn, rico en magnesio y aluminio, el cual está compuesto por granate y flogopita junto a calcopirita, pirrotina, blenda, pirita y magnetita. Establecen una franja de enriquecimiento secundario con covelina. Los mismos autores sugieren que los sulfuros primarios cristalizaron de manera simultánea en un ambiente relativamente de baja sulfidación. Por su lado Río Tinto (2001), fundamenta que se aprecian dos estilos de mineralización para la calcopirita y la bornita; uno que sucede en la unidad Calizas, la cual debido a recristalización se ha transformado en mármol, apareciendo como disseminaciones y vetillas en rocas fracturadas y un segundo estilo donde los sulfuros de cobres se encuentran en disseminaciones en un halo con abundante magnetita. Mencionan además que el evento principal de mineralización está representado por la asociación de epidota, albita, calcopirita, pirita y



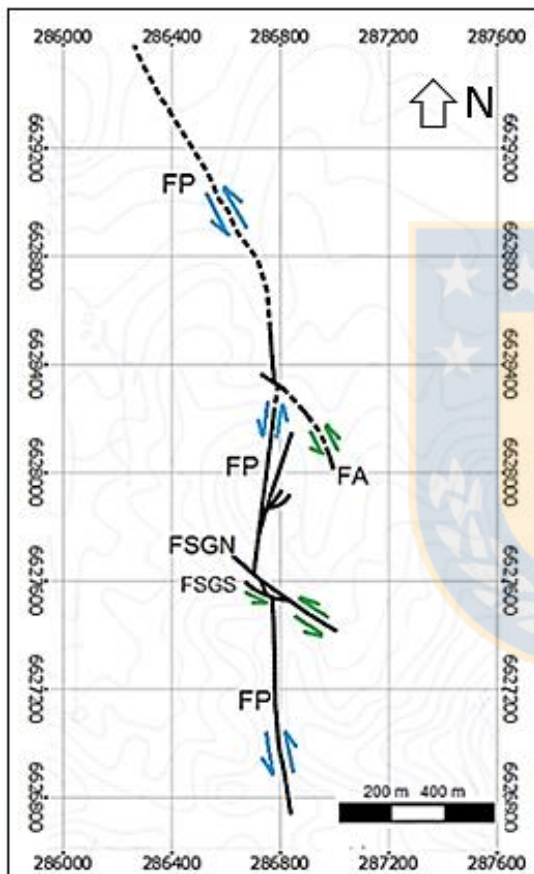
bornita y que la mayor cantidad de metales se concentra en cuerpos mantiformes y/o discordantes como brechas y diques.

Sin embargo, en el último tiempo, varios autores han propuesto que el yacimiento Panulcillo, en cuanto a su génesis, obedecería a un IOCG con un skarn asociado (Díaz y Corvalán, 2015; Castellón, 2017). Las razones que argumentan para atribuir a Panulcillo a un depósito tipo IOCG obedecen al marcado control estructural, el cual tiene estrecha relación con el origen de éste, la alteración pervasiva sódica, cálcica y potásica, las cuales son típica de estos depósitos, el contexto metalogénico del yacimiento y la distintiva mineralización de este tipos de depósitos con presencia de minerales de cobre, óxidos de hierro, entre otros. Castellón (2017) menciona que la mineralización se habría originado por la intrusión de diques mirodioríticos de edad 123-131 Ma. en la Formación Arqueros, lo que se contrapone a lo indicado por los autores previamente nombrados, ya que ellos afirman que el intrusivo Pejereyes era quien gatillaba la mineralización. Castellón (2017) afirma que este plutón sería estéril. Para la progresión de la mineralización propone que en primer lugar habría dado a lugar la alteración potásica, con cristalización de feldespato potásico, biotita y magnetita. Luego, concorde al modelo evolutivo de los IOCG, vendría una etapa donde cristalizaron: actinolita, turmalina, anfíbolita, clorita, epidota y sericita, en conjunto con la mineralización de calcopirita, bornita y pirita. Finalmente éstos se habrían oxidado generando una franja mixta entre sulfuros primarios y oxidados de cobre.

### 3.5. ESTRUCTURAS

De acuerdo a Castellón (2017) las estructuras más importantes corresponden a la falla Panulcillo, falla Asunción, falla San Gregorio Norte, falla San Gregorio Sur y un conjunto de fallas menores asociadas a la falla Panulcillo (Figura 3.02.). La falla Panulcillo es la estructura de mayor injerencia en el distrito, correspondería a la traza sur de la falla Romeral y su rumbo varía de N20°W a N10°E con un manteo general de 85°W. Carece de menas en su núcleo, pero sí exhibe una fuerte alteración de biotita. Limita la mineralización de cobre por el oeste, indicando que esta falla es más joven que los eventos mineralizadores. La acción de esta estructura habría jugado un rol importante en la cinemática del área, ya que ésta en algún momento tuvo movimientos inversos que levantaron el bloque oeste jurásico sobre el bloque cretácico y luego habría tenido

un movimiento de rumbo siniestral. El último movimiento de esta estructura habría tenido un movimiento de carácter normal, desplazando hacia abajo el bloque colgante ubicado al oeste de la falla. Existe un conjunto de fallas subsidiarias de la falla Panulcillo de orientación N10°-20°E/55°W cuyos últimos movimientos habrían tenido un carácter normal con desplazamiento final de hasta 4 m en la vertical. Se observa en estas fallas abundantes sulfuros de cobre, por lo que es probable que estas estructuras habrían actuado como canal para los fluidos mineralizadores (Castellón, 2017).



**Figura 3.02. Mapa de estructuras yacimiento Panulcillo.** (Castellón, 2017). FP: falla Panulcillo, FA: falla Asunción FSGN: falla San Gregorio norte FSGS: falla San Gregorio sur. *Datum* UTM PSAD56.

La falla Asunción y la falla San Gregorio norte, cortan y desplazan a la falla Panulcillo y a la mineralización de manera siniestral inversa, produciendo que la mineralización baje de cota hacia el norte. La falla Asunción tiene una orientación general de NNW/70°W y provoca un desplazamiento en la horizontal de unos 10 m a 20 m y en la vertical hasta 100 m, mientras que a la falla San Gregorio norte, se le adjudica un desplazamiento en la horizontal de hasta 100 m y en la vertical de hasta 20 m y una actitud general NW/70°W (Castellón, 2017).

Por último, la falla San Gregorio sur, tiene una orientación NW/80°W y tendría un movimiento sinistral. Nace en el extremo SE de la falla San Gregorio Norte y no se identifica un nexo entre esta estructura y la mineralización en profundidad (Castellón, 2017).

### 3.6. ANTECEDENTES GEOQUÍMICOS

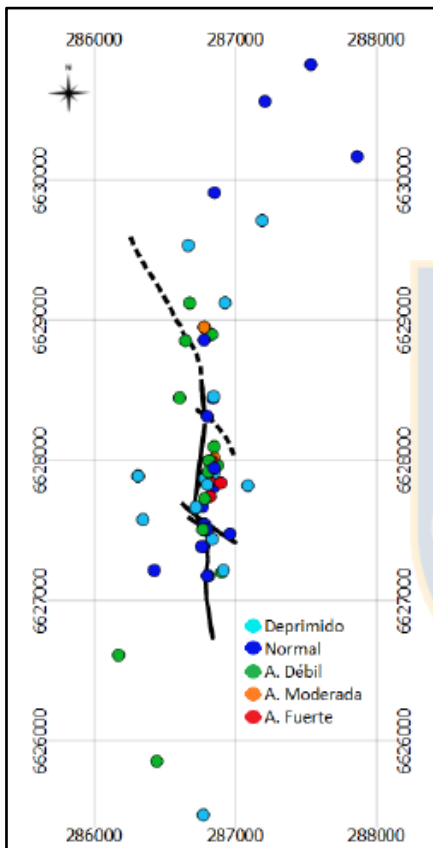
En el distrito minero Panulcillo se han efectuado dos estudios geoquímicos multielementales de relevancia. El primero de ellos fue realizado por Rio Tinto (2001) el que consistió en realizar análisis básicos para todo el distrito minero en una etapa de exploración. Por otro lado, en la investigación de Castellón (2017) se efectuaron nuevos análisis con el fin de determinar la afinidad geoquímica de la mineralización y así poder relacionarla con la génesis y evolución del yacimiento.

El presente trabajo tiene como objetivo principal determinar la existencia de mineralización de cobalto, por lo que a continuación se muestran los antecedentes geoquímicos disponibles referidos a este elemento y a otros elementos estratégicos que puedan suscitar interés, datos que sentaron las bases para la búsqueda de este metal en la etapa de terreno. Castellón (2017) hizo su estudio geoquímico de superficie en las coordenadas UTM centrales 6.628.100 m N y 287.000 m E, obteniendo la concentración de 49 distintos elementos para 57 muestras. Determinó los valores de las anomalías mediante gráficos de probabilidad acumuladas versus concentración de cada elemento y obtuvo los valores de límites de anomalías y *background* para cada elemento (Tabla 1)

**Tabla 1. Valores de concentración de elementos de interés en Panulcillo.** *Background* (límite inferior y superior), y de anomalías (moderada y fuerte) para cobalto y manganeso, además de elementos estratégicos; plata, níquel, cobre y hierro en yacimiento Panulcillo (Castellón, 2017).

Elemento	<i>Background</i> límite inferior	<i>Background</i> límite superior	Anomalía moderada, límite inferior	Anomalía fuerte, límite inferior
Cobalto (ppm)	12	25	73	190
Manganeso(ppm)	527	1.000	2.100	7.785
Plata (ppm)	0,055	0.07	0,130	0,800
Níquel(ppm)	18,6	75	160	500
Cobre(ppm)	14,3	55	220	1.000
Hierro (%)	4,4	6.700	11	15

Se obtuvo la variación espacial de elementos (Figura 3.03.) y anomalías por litología, concluyendo que hay una fuerte anomalía de manganeso en la unidad litológica Skarn, mientras que las anomalías de cobalto “débil” y “moderada” fueron vinculadas al Skarn de superficie y los diques mineralizados hipógenos, respectivamente. Castellón (2017) concluyó que en el Skarn la concentración de cobalto es mayor cuando hay mineralización de cobre y que los diques microdioríticos mineralizados al interior de la mina presentan un exceso de Mn.



**Figura 3.03. Mapa de distribución anomalías de cobalto en el Yacimiento.** (Castellón, 2017). Datum UTM PSAD 56.

Las mayores anomalías de cobalto se distinguen en el sector del rajo Caracoles (6.628.002 m N, 286.813 m E, UTM PSAD56) con valores que alcanzan los 1.015 ppm de cobalto. En las cercanías de la superficie de los sondajes estudiados se presentan anomalías débiles y moderadas sobre 73 ppm.

De los trabajos realizados por Río Tinto (2001), el que reviste mayor interés para este estudio son análisis químicos ICP-MS, realizados a 11 sondajes por 35 elementos. Dentro de estos sondajes,

existe uno que se ubica en las cercanías del área de estudio de este trabajo y tiene una profundidad de 242 m. Entrega información relevante de la que se puede concluir que en general, las concentraciones de cobalto son bajas, variando entre los 20 y 40 ppm y no se distingue una variación en profundidad, mientras que las concentraciones de manganeso son relativamente anómalas, con 5.000 ppm en superficie y 1.000 ppm a los 242 m, observándose una disminución de las concentraciones en profundidad. Cabe señalar que este sondaje no se encuentra en el cuerpo mineralizado, por lo que concorde a lo establecido por Castellón (2017), que menciona que la afinidad geoquímica del cobalto sería con el Skarn mineralizado, es de esperar que las concentraciones de cobalto sean bajas.



## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1. COBALTO**

El cobalto en el contexto minero chileno no representa un elemento convencional de la matriz minera, por lo que su exploración y producción ha sido acotada si se compara con las industrias del cobre o hierro. A continuación se detallan las principales características geológicas y genéticas de este metal, las que configuraron los precedentes, para establecer que Panulcillo podría ser un blanco potencial de mineralización de cobalto.

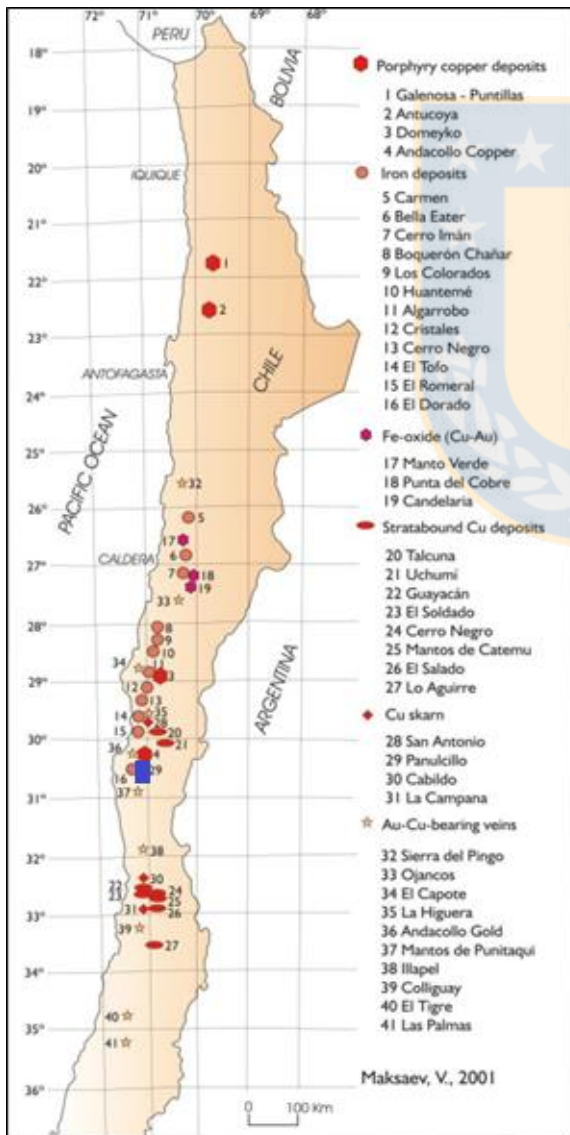
#### **4.1.1. Generalidades**

El cobalto es un elemento metálico perteneciente al grupo de los metales de transición, el cual se clasifica dentro de los minerales ferrosos (Ruiz y Peebles, 1988 en SERNAGEOMIN 2017). Su ley promedio en la corteza terrestre es de 25 ppm (SERNAGEOMIN, 2017). Es ampliamente utilizado para la preparación de aleaciones resistentes, fundiciones magnéticas, aceros para rodamientos e instrumentales, además de ser empleado en las industrias químicas, de la cerámica, del vidrio, de las lacas y pinturas (Vasallo, 2008). Actualmente la electromovilidad se ha instalado en la industria y augura un reemplazo progresivo de los vehículos convencionales contaminantes. Ante este escenario se proyecta una demanda creciente hacia baterías afines con este nuevo tipo de automóviles, predominando baterías en base a litio, típicamente del tipo Li-Co y Li-Co-Mn, lo que abre una puerta a la búsqueda de estos elementos (Townley y otros, 2018).

#### **4.1.2. Metalogénesis**

Los distritos donde se ha explotado cobalto en Chile están enmarcados espacial y temporalmente a la franja Ferrífera de la cordillera de la Costa (Figura 4.01.). Este dominio metalogénico está ligado a la evolución del arco magmático del Cretácico inferior, donde proliferaron yacimientos tipo IOCG e IOA relacionados al sistema de fallas de Atacama (Townley y otros, 2018). Este tipo de yacimiento se caracteriza por la presencia de minerales de oro, hierro y oxidados de cobre,

junto con elementos del grupo de las tierras raras, cobalto, uranio y torio, destacándose por la exigua aparición de fases sulfatadas y una impronta geoquímica de Fe-P (Lacassie y otros, 2015). Acorde a Townley y otros (2018), debido a la afinidad química entre el hierro, arsénico y el elemento de estudio, los yacimientos tipo IOCG e IOA podrían significar un potencial para la proliferación de cobalto. El mismo autor detalla que el ambiente geológico que propició el auge de yacimientos ricos en cobalto, está ligado con unidades volcanosedimentarias propias de cuencas de ante, intra y tras arco desarrolladas en Chile durante el Jurásico superior y Cretácico inferior. Estratigráficamente estos depósitos estarían hospedados en las Formaciones Arqueros y Quebrada Marquesa (Townley y otros, 2018).



**Figura 4.01. Franja metalogénica de yacimientos del Cretácico inferior (Maksaev, 2001). En rectángulo azul se indica área de estudio. Datum WGS 84.**

### 4.1.3. Minerales ricos en cobalto

Los minerales que han sido explotados en Chile por cobalto corresponden a cobaltita y eritrina. La cobaltita ( $S As (Co, Fe)$ ) es un sulfoarseniuro de cobalto que cristaliza en *pseudo* cubos, el cual se identifica por exhibir una apariencia similar a la pirita, pero con una coloración plateada tendiendo a tonos rojizos y una marcada exfoliación cúbica perfecta en (0,1,0) (Klein, 1997). Su génesis está sindicada a una acción conjunta de eventos mineralizadores tanto magmáticos e hidrotermales, donde el cobalto en las fases finales de la cristalización magmática se separa y es movilizado hacia los fluidos hidrotermales de alta temperatura (entre 300°C y 500°C), los que sirven como transporte para su posterior cristalización, así como también, se puede originar por reemplazos metasomáticos (D'Aubarede y otros, 1969).

La eritrina ( $(AsO_4)_2Co_3 \cdot 8 H_2O$ ) es un arsenato monoclinico de cobalto de color carmín a rosa, de dureza 1,5-2,5 en la escala de Mohs (Klein, 1997). Está definida como una mena secundaria relacionada a fenómenos de meteorización, oxidación y lixiviación o por una reconcentración de cobalto debido a acción de fluidos (D'Aubarede y otros, 1969).

El cobalto también puede aparecer con leyes interesantes en la pirita en depósitos tipo IOCG. En el trabajo de Lagas (2016), que consiste en un estudio de la química mineral de pirita en el yacimiento Los Colorados, se han reportado piritas con leyes de cobalto que alcanzan el 1%.

### 4.1.4. Explotación

La ocurrencia de minerales de cobalto en los yacimientos chilenos es primordialmente en cuerpos de vetas, brechas y mantos. El modo de explotación es a través de minas subterráneas y se extraen tantos minerales primarios de cobalto y secundarios. La extracción de cobaltita, ha sido acotada y normalmente está vinculada con minerales de cobre. Es común encontrar en estos yacimientos un horizonte superior oxidado, con eritrina de mayor ley. Las leyes de Co de yacimientos de sulfuros hidrotermales es de 0,1 %. De acuerdo a los antecedentes históricos de yacimientos chilenos sobre el 1 % en leyes de cobalto se puede considerar como potencialmente económico para ser recuperado como producto minero (Townley y otros, 2018). Para la cobaltita,



en distritos donde se ha explotado este mineral, se han reportado leyes entre el 1% y 2%, mientras, que los valores de leyes sindicadas a la eritrina han llegado incluso a un 7% (Townley y otros, 2018). Actualmente el principal productor de cobalto mundial es la República del Congo con una producción en el año 2017 de 64.000 toneladas métricas con una ley promedio de 3% (SERNAGEOMIN, 2017).

#### **4.1.5. Principales Yacimientos Chilenos**

Los yacimientos históricos donde se ha explotado cobalto se localizan entre la Región de Atacama y la Región de Coquimbo. En relación a la extracción de cobalto, ésta comenzó en el siglo XIX y duró hasta 1944. Solo en dos distritos se ha trabajado de manera relevante este elemento; San Juan y Tambillos. El distrito San Juan se ubica en la Región de Atacama en las cercanías de Huasco. Consta de mineralización de cobaltita en vetas y eritrina en un horizonte superior oxidado, con leyes medias que alcanzan hasta un 1,6% y 6% en cobalto respectivamente. Destaca en este distrito la faena La Cobaltera, siendo la productora de mayor importancia en el siglo pasado. El distrito Tambillos se ubica en la Región de Coquimbo, en la comuna de Andacollo a 43 km de Panulcillo. Se agrupan yacimientos en forma de mantos con cobaltita. Las leyes reportadas en 1942 variaban del 4% a 5% de Co. Las minas donde hubo mayor explotación corresponden a la mina el Buitre y mina Minilla con una ley media en torno al 1% (Townley y otros, 2018).

Por último, cabe señalar que a comienzos del 2018 se reactiva la exploración del cobalto a través de *Chilean Cobalt Corporation*, la cual inicia sus proyectos en el distrito San Juan y el distrito Carrizal Alto.

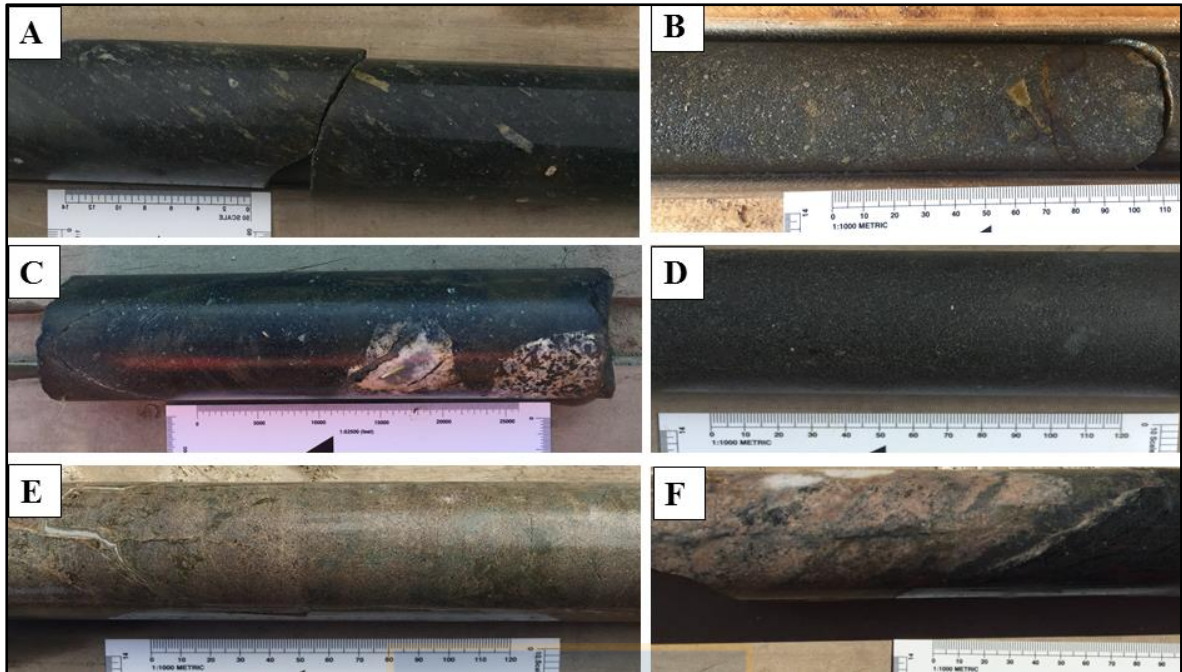
## 5. RESULTADOS

Las rocas subterráneas estudiadas de los testigos de los sondajes: PAN-00, PAN-01, PAN-02, DDH-98125, DDH-98126 y DDH-98127 integran la Formación Arqueros, definida por Aguirre y Egert (1965). Se pueden caracterizar como una secuencia volcánica interdigitada con material sedimentario, marino y calcáreo. Las sucesión de rocas a causa de la intrusión de cuerpos ígneos, ha sufrido fenómenos de metamorfismo de contacto (Narváez y Araya, 1998), provocando orientación en los minerales, recristalización y por ende, la creación de litologías metamórficas. Las calizas a raíz de la influencia termal del intrusivo se han transformado en skarn, mientras que parte de la secuencia volcánica constituyó el protolito que dio origen a un complejo metamórfico, donde el grupo litológico que domina es el de las anfibolitas. Tanto las rocas volcánicas como las metamórficas, muestran extensos halos de alteración que obliteran la textura y composición original. También, se distinguen dos horizontes mineralizados, sumado a fallas y fracturas que cortan la secuencia, con apariciones esporádicas de diques y vetas de diferentes composiciones, que aportan a enriquecer la mineralización.

### 5.1. UNIDADES LITOLÓGICAS SUBTERRÁNEAS

En este trabajo, en congruencia a lo detallado en el mapeo de sondajes (Anexo I) y considerando: la distribución, las relaciones de contacto y acorde a análisis petrográficos tanto macroscópicos como microscópicos (Anexo II), se han definido las siguientes unidades litológicas subterráneas: Toba Cristalina, Toba Lítica, Andesita y Brecha, las que son parte de una sucesión volcánica, junto a las unidades metamórficas Anfibolita y Skarn de Granate (Figura 5.01.).

A modo general, el conjunto de rocas estudiadas en el área se compone de la unidad de Andesitas aflorando en las franjas más superficiales. A medida que se profundiza en la columna aparece la unidad Tobas, parte de la secuencia volcánica que posteriormente se intercala e interdigita con la unidad Skarn de Granate. Finalmente, surge la unidad de Brechas las que sobreyacen la unidad metamórfica de Anfibolita, siendo esta última la que se presenta en dominios más profundos.



**Figura 5.01. Unidades litológicas subterráneas.** Testigos de sondajes representativos de los grupos litológicos observados en la zona de estudio, donde A) Andesita. B) Toba Cristalina. C) Toba Lítica. D) Anfibolita. E) Skarn de Granate. F) Brecha.

### 5.1.2. Unidad Andesita

Integra la parte superior de la sucesión volcánica, generalmente aflora en los primeros metros de sondaje entre los 0 m-70 m dependiendo del sondaje (Anexo I), sobreyaciendo a la unidad de Tobas e intercalada con la misma en dominios más profundos. Presenta una masa fundamental afanítica de color gris oscuro a verdoso en las secciones cloritizadas y fenocristales de: plagioclasas, biotitas y anfíboles. Acorde al porcentaje de plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico se clasifica como andesita, donde la plagioclasa excede el 60 % (Streckeisen, 1976), se encuentra en su mayoría albitizada, muestra una coloración blanca y tamaños variables, manifestando formas euhedrales con bordes bien definidos y hábito cristalino.

Para esta unidad se han descrito diferentes variedades texturales. En primer lugar, una porfídica con fenocristales entre 1 mm y 4 mm, con un porcentaje de masa fundamental entre el 70% y 80%. Otra variedad en la cual las plagioclasas tienen un mayor tamaño de hasta 1 cm y hay un porcentaje similar entre masa fundamental y fenocristales. Por último, una donde los cristales de albita tienen un tamaño medio de 2 cm y se encuentran orientados.

Las rocas más superficiales de esta unidad han sufrido intensa meteorización química, adquiriendo una textura jabonosa y arcillas. Fracturas y fallas se presentan con mineralización de óxidos de manganeso. La alteración que prevalece en esta esta unidad es albitización en los fenocristales, junto a cloritización en la masa fundamental. Se evidencia metamorfismo asociado, con orientación de las plagioclasas y de máficos.

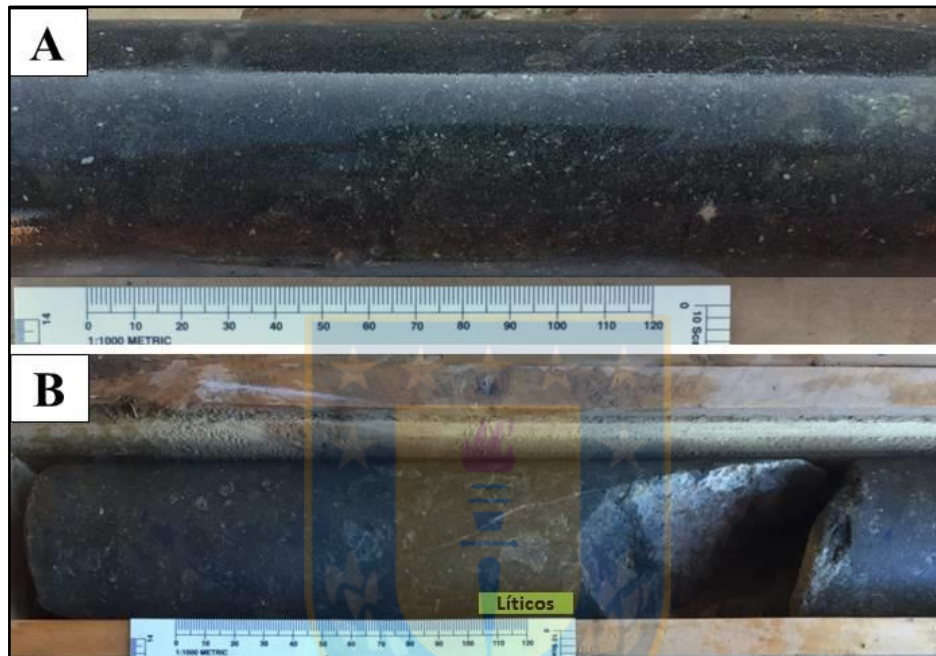
### **5.1.1. Unidad Toba**

Corresponde a un conjunto de tobas de composición andesítica, con coloración gris oscura a verde oscura. Los constituyentes de esta unidad ocupan una vasta extensión en los sondajes, apareciendo en la mayoría de los casos entre los 50 m y 200 m (Anexo I). Integra parte de una sucesión de rocas volcánicas estando en contacto con la unidad de Andesitas, sobreyaciendo las unidades de Brechas y Anfibolitas. Entre los 100 m-200 m, aparece intercalada e interdigitada con la unidad de Skarn (columna DDH-98125 A, Anexo I).

Presenta una matriz afanítica constituida de: plagioclasas, vidrio masivo, actinolita y clorita, siendo estos dos últimos minerales de alteración los que le dan la coloración verdosa a la roca. El porcentaje de matriz puede variar entre un 40% a un 80%, distinguiéndose variedades texturales en esta unidad; una con textura porfídica con una marcada variación entre el tamaño de la matriz y los componentes mayores y otra en la cual debido al reducido tamaño de sus cristales, pareciera exteriorizar una textura afanítica (columna DDH-98127 A, 63 m, Anexo I). Dentro de los componentes de mayor tamaño se observan fragmentos líticos y cristales, los cuales están quebrados y dispuestos de manera caótica en la matriz, desencadenando contactos puntuales entre los granos. Los minerales que más abundan en esta categoría son: plagioclasas, anfíboles y biotitas, donde las primeras aparecen albitizadas, anhedrales, de color blanquecino, con un tamaño modal entre 0,5 mm y 1 mm (aunque hay algunos de hasta 4 mm). Los integrantes de esta unidad en ciertas secciones exhiben una intensa coloración verdosa que varía de clara a oscura debido a alteración, asimismo, a raíz de eventos de silicificación ostentan alta dureza y competencia. Se han desarrollado zonaciones de alteración compuestas de albita, actinolita y epidota, las que han obliterado la textura y composición de las rocas de esta unidad (muestra

MC3, sondaje DDH-98126, Anexo II). Por otro lado, a causa del metamorfismo imperante en el distrito, se han formado metatobas.

De acuerdo al contenido de componentes líticos, cristales y vidrio volcánicos (Schdmid, 1981), las tobas de esta unidad se clasifican en cristalina y en lítica (Figura 5.02.).

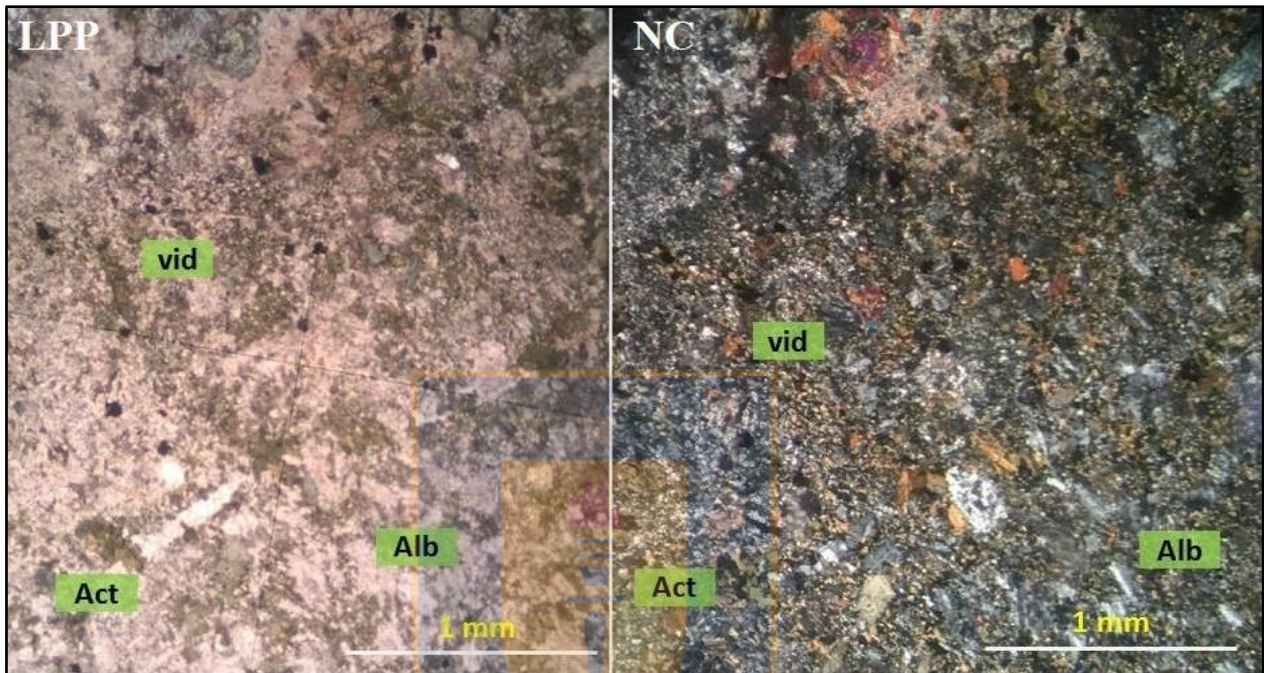


**Figura 5.02. Unidad de Tobas. A.** Toba Cristalina. (Sondaje DDH-98125, 179 m). **B.** Toba Lítica (Sondaje DDH-98125, 37 m).

#### 5.1.1.1. Toba Cristalina

Está constituida por un porcentaje de cristales superior al 50%, en relación al vidrio volcánico y fragmentos líticos, por lo que de acuerdo a la clasificación de Schdmid (1981) se categoriza como toba cristalina. Conforme al análisis petrográfico microscópico de la muestra MC2 (sondaje DDH-98126, Anexo II) (Microfotografía 1), estas rocas tienen como textura principal la fragmental y según el arreglo de los cristales porfídica, localmente intergranular a intersertal. Dentro de la matriz se observan: actinolita (25%) plagioclasas (20%), cuarzo (10%), y clorita (5%) anhedral, los que tienen un tamaño medio de 0,1 mm, junto a vidrio volcánico alterado en un porcentaje cercano al 10%. Como componentes de mayor tamaño abundan plagioclasas, fragmentos líticos accidentales, actinolita y biotita. Las plagioclasas exhiben una forma anhedral

característica de las tobas, así como euhedral con macla simple y de *carlsbad*, a causa de la posterior albitización que ha sufrido. Biotitas y actinolitas en su mayoría se encuentran quebradas y muestran una orientación junto a las plagioclasas debido a un metamorfismo incipiente. En esta unidad existe mineralización de calcopirita, pirita y magnetita diseminada.



**Microfotografía 1 Toba cristalina.** Izquierda luz polarizada plana, derecha nicoles cruzados. Ab:albita, Act: actinolita, vid; vidrio volcánico alterado. MC2 (Anexo II). (Sondaje DDH-98126, 170,45 m).

#### 5.1.1.2. Toba Lítica

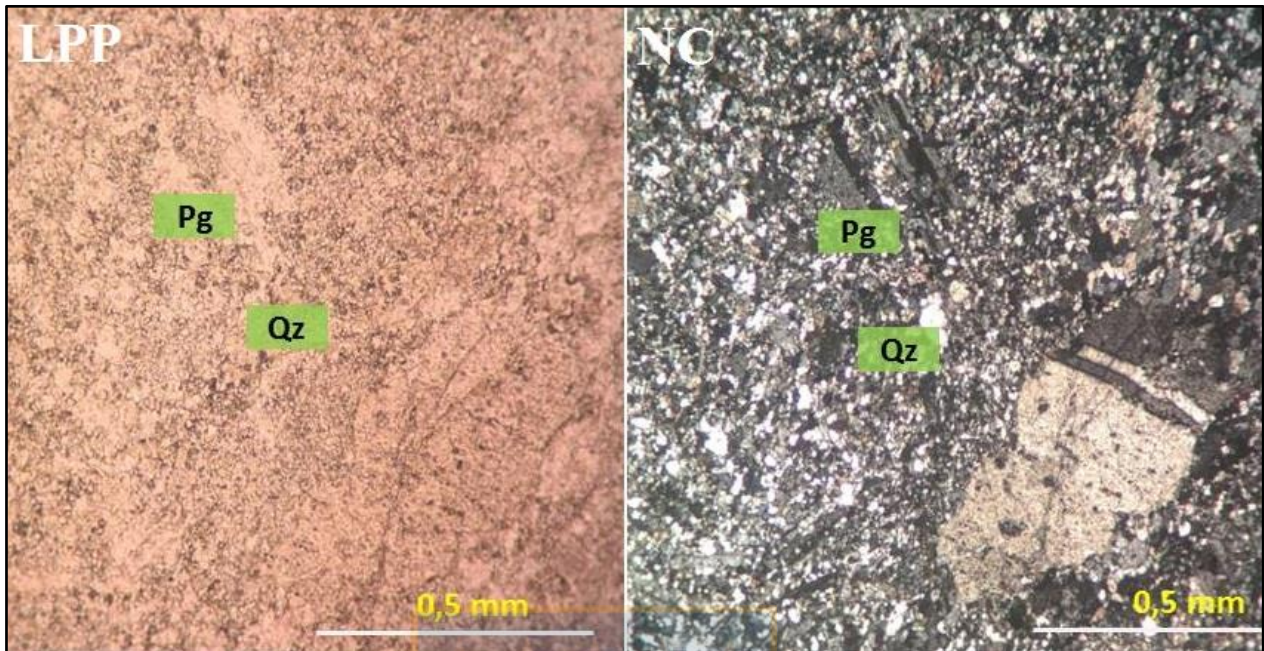
Consta de una composición similar a la Toba Cristalina, tanto en su matriz como en los componentes mayores, pero difiere en la cantidad de fragmentos líticos la cual sobrepasa el 50 % comparado al vidrio volcánico y cristales, por lo que de acuerdo a la clasificación de Schmid (1981) corresponde a una toba lítica. Se encuentra entre los 30 m y 75 m (columna DDH-98125, columna DDH-98126, columna DDH-98127, Anexo I) como parte de la unidad tobácea. Los fragmentos líticos son angulosos a sub-angulosos, con tamaños que varían desde un par de milímetros hasta clastos de 5 cm. Se distinguen fragmentos de intrusivos granodioríticos y andesitas.

### 5.1.3. Unidad Brecha

Rocas con una matriz volcánica de color gris verdoso a gris oscuro, de aspecto afanítico y alta competencia, con clastos y alteración de sílice rosa (muestra MC7, sondaje DDH-98125, Anexo II). Se aprecia entre: los 180 m- 270 m de profundidad en PAN-00, 180 m -235 m en PAN-01, 210 m-235 m en PAN-02 y entre los 200 m a 270 m en los sondajes DDH-98125 y DDH-98127(Anexo I). Sobreyace a la unidad metamórfica Anfibolita, por lo que funciona como un horizonte guía, ya que indica proximidad al horizonte mineralizado que se hospeda en la unidad Anfibolita.

Un rasgo distintivo es la presencia de sílice rosa a lo largo de toda la unidad, configurando una textura brechosa entre la matriz volcánica y ésta, donde a la vez se incluye como clastos dentro de la matriz. Además, se generan bandeamientos entre esta unidad y la sílice rosa. Del mismo modo, puede exhibir clastos centimétricos angulosos a subangulosos de feldespatos potásicos de coloración anaranjada

En concordancia al análisis microscópico de la muestra MC7 (sondaje DDH-98127, Anexo II), se puede especificar que la matriz volcánica es muy fina, con un tamaño medio de 30  $\mu\text{m}$  (Microfotografía 2). Está constituida por cuarzo que ocupa casi el 60% de la composición y feldespatos anhedrales, lo que se traduce macroscópicamente en una matriz muy dura y de aspecto vítreo. Destacan actinolita y clorita como parte ella, con porcentajes que no superan el 5%. Posee cristales de mayor envergadura de plagioclasas de 0.5 mm-1 mm, los cuales están quebrados y albitizados, además de fragmentos líticos angulosos a subangulosos y microvenillas de cuarzo. La alteración dominante en esta unidad es la de silicificación, pero en determinadas zonas exhibe alteración de epidota-albita y actinolita-albita en la matriz, lo que es común en las rocas pertenecientes a la secuencia volcánica.



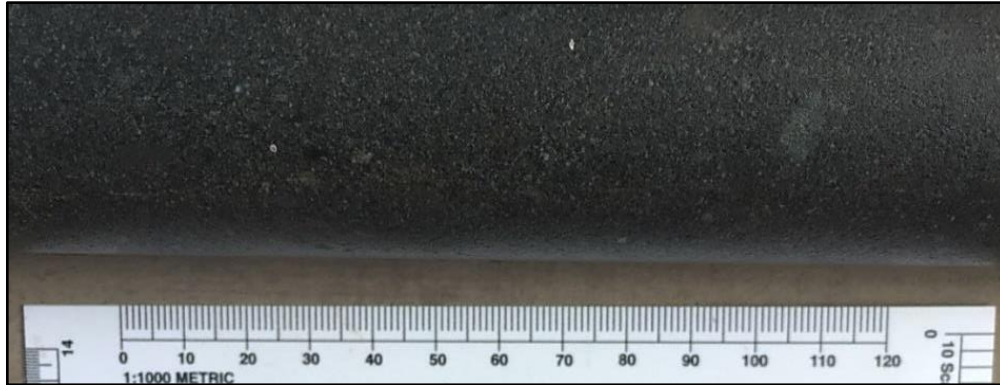
**Microfotografía 2** Matriz volcánica de Brecha. Izquierda luz polarizada plana, derecha nicol cruzados. Pg: plagioclasa, Qz: cuarzo. MC7 (Anexo II). (Sondaje DDH-98125, 231 m).

#### 5.1.4. Unidad Anfibolita

Corresponde a un conjunto de rocas metamórfica de coloración gris oscura, donde predominan anfibolitas intercaladas con otros productos metamórficos como metatobas y hornfels. En los sondajes de aire reverso, se identifica a partir de los 235 m, en contacto con la unidad de Brechas, formando una sucesión de hasta 100 m, donde se concentra mineralización de cobre y hierro en vetillas y diseminado (Anexo I). En los sondajes diamantinos estudiados, se visualizan a partir de los 230 m, subyaciendo a la unidad de Brechas y entre los 50 m a 150 m intercalada con la unidad de Tobas, lo que representaría una transición hacia un ambiente de mayor grado de metamorfismo (Anexo I).

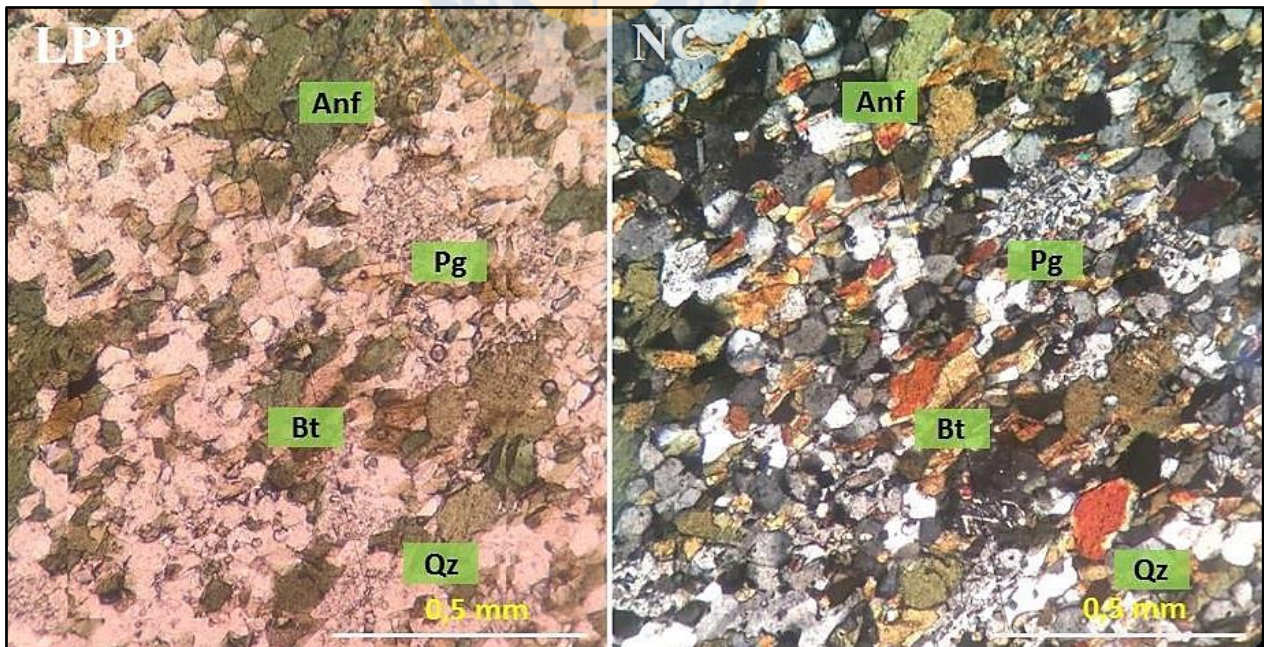
La anfibolita es la litología predominante de esta unidad, macroscópicamente se identifica por una apariencia fanerítica con cristales de tamaño uniforme entre 0,5 y 1 mm (Figura 5.03.), cualidad que la diferencia de las otras unidades donde esencialmente se aprecian texturas porfídicas. Otro rasgo macroscópico propio de esta litología es el elevado porcentaje de anfíbol, el que es completado por plagioclasas anhedrales a euhedrales, cuarzo, biotitas y epidota





**Figura 5.03.** Unidad de Anfibolitas. (Sondaje DDH-98126, 286,5 m).

Microscópicamente (muestra MC4, sondaje DDH-98126, Anexo II) la textura de las roca es granoblástica, localmente porfiroblástica con una matriz esencialmente de plagioclasas (Microfotografía 3). En general los cristales se presentan elongados y orientados. El componente que más abunda es la actinolita constituyendo entre el 30% al 40 % de la roca. Los cristales son de aspecto euédrico a subédrico. La biotita configura el 15% a 20% de la roca y posee un hábito tabular elongado. Existe cloritización que varía de incipiente a moderada en las actinolitas y pervasiva en las biotitas. Plagioclasas y cuarzo integran parte de esta roca, donde se evidencia cuarzo de recristalización producto de metamorfismo.



**Microfotografía 3** Anfibolita. Izquierda luz polarizada plana, derecha nicoles cruzados. Pg: plagioclase, Act: actinolite, Bt: biotite. MC4 (Anexo II). (Sondaje DDH-98126, 264,4 m).

Las rocas de esta secuencia, pueden manifestar alteración de actinolita, epidota, albita, clorita, silicificación y biotitización.

Por otro lado, esta unidad consta de productos metamórficos asociados como metatobas o metaandesitas (columna DDH 98127 B, columna DDH-98125 B, Anexo I), las que representan una transición entre los productos volcánicos y las anfibolitas, donde no existe una recristalización a gran escala, pero se exhibe una foliación y orientación de minerales como biotitas y anfíboles.

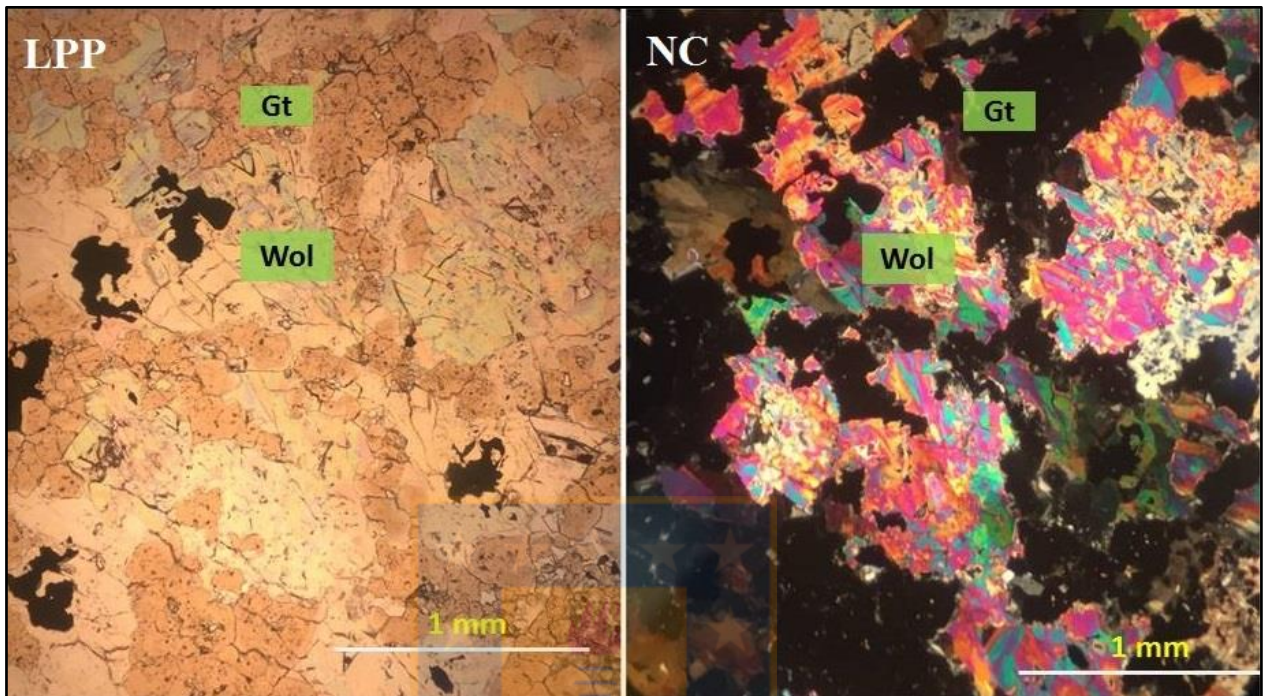
En porciones más restringidas, se manifiestan hornfels intercalados en el conjunto metamórfico (muestra MC6, sondaje DDH-98125, Anexo II), las cuales macroscópicamente muestran un aspecto afanítico con cristales superficiales de cuarzo. Microscópicamente tienen textura granoblástica, estructura homogénea en su fábrica la que está compuesta casi en su totalidad por cuarzo y plagioclasas. Esta litología ha sido incluida en la unidad anfibolitas, debido a que surgen en porciones muy puntuales dentro de esta sucesión y áreas muy acotadas, teniendo un origen común el cual está mancomunado a metamorfismo de contacto.

#### **5.1.5. Unidad Skarn de Granate**

Unidad metamórfica informalmente denominada como “granatita” (Narváez y Araya, 1998), la cual consta con un porcentaje de granate superior al 40% junto a minerales calcosilicatados. Se aprecia en los sondajes de aire reverso entre los 100 m y 200 m, mientras que en los diamantinos se puede ver entre los 170 m-240 m (Anexo I), subyaciendo la secuencia volcánica con un espesor medio de 40 m. Intercalada con esta unidad se reconoce la unidad de Tobas, la que posee una intensa alteración de albita, epidota y actinolita. Constituye un horizonte con mineralización de interés económico que incluye: calcopirita, bornita, cobaltita, pirita, magnetita.

Las rocas de esta unidad son compactas, de coloración parda, compuestas de granate, wollastonita, diópsido, calcita. Presenta porfiroblastos de granate, a los que se superponen halos de alteración de clorita, actinolita, epidota y albita. El granate es el mineral característico de esta unidad, se reconoce por su coloración café oscura a clara, en agregados granulares

sacaroidales. El tamaño de éste varía entre la escala milimétrica (Microfotografía 4) a centimétrica, con granos gruesos de este mineral.



**Microfotografía 4** Skarn de Granate. Izquierda luz polarizada plana, derecha nicoles cruzados. Gt: granate, Wol: wollastonita. MP4. (Anexo III). (Sondaje DDH-98126, 122 m).

Microscópicamente la textura es granoblástica y se visualiza granate, el cual es automorfo e isótropo junto a wollastonita, la que se distingue por su hábito acicular y altos colores de birrefringencia. En la muestra MP2, también se reconoce actinolita, epidota, calcita y diópsido microscópico.

## 5.2. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

Las rocas estudiadas en los sondajes del distrito Panulcillo muestran intensas y extensas zonas de alteración hidrotermal, las que se superponen al material preexistente, modifican la composición y obliteran la textura original, configurando un complejo sistema de alteraciones hidrotermales, en la que se presentan halos de distintas composiciones que se superponen unos a otros.

Los productos de alteración que se han reconocido corresponden a: albita, epidota, actinolita, clorita, biotita, granate, cuarzo, hidróxidos de hierro, calcita y feldespato potásico.

De acuerdo a la paragénesis de minerales, la pervasividad y la extensión que ocupan, se han definido tres asociaciones de minerales de alteración hidrotermal de consideración, las que revisten gran importancia en el área de estudio.

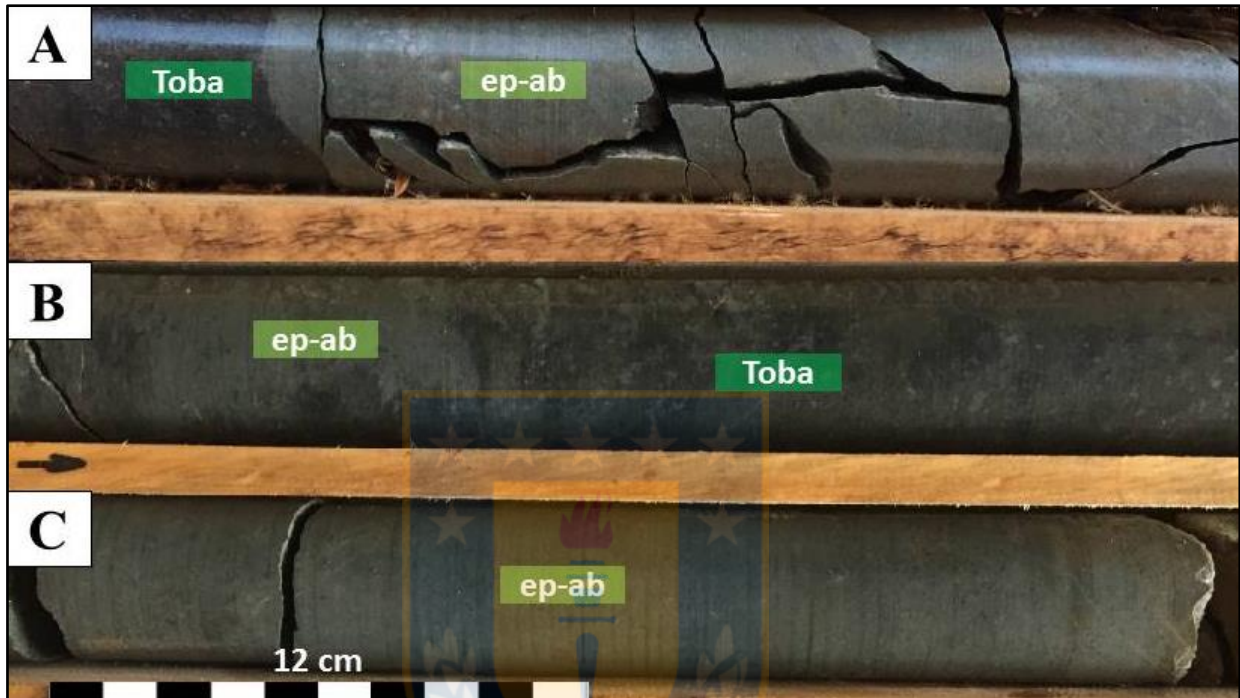
### **5.2.1. Asociación epidota-albita**

Asociación pervasiva de epidota, acompañada en menor medida de albita y de manera subordinada clorita y actinolita. Afecta mayoritariamente a las rocas tobáceas y parte de las unidades metamórficas de Skarn y Anfibolita. El conjunto de minerales principales le otorga una coloración gris verdosa clara a las rocas, dándole una signatura distintiva.

Ocupa una amplia distribución, visualizándose en los sondajes de manera continua a partir de los 100 m aproximadamente, sobre la unidad de Tobas y a la intercalación de la misma con la unidad de Skarn. Se genera una zona de alteración con diferentes manifestaciones de esta agrupación, la que logra extenderse hasta por 100 m (Anexo I). Puede manifestarse en la unidad de Brechas aunque de manera más acotada. En las secciones más profundas se observa esporádicamente en la unidad de Anfibolitas, en conjunto a la asociación actinolita-albita, donde esta última es la que prima.

La asociación epidota-albita al ser producida por la interacción fluido-roca en distintos eventos de alteración hidrotermal, no se definen contactos netos que separen de modo claro las unidades litológicas y el producto de alteración, surgiendo este último intercalado en la secuencia y sin una distribución definida. Consecuente a lo anterior, la asociación de minerales de alteración puede aparecer de manera abrupta y pervasiva sobre las unidades litológicas, creando contactos curvos y sinuosos (Figura 5.04.A.), dando lugar a extensos tramos de alteración, así como también de menor proporción (un par de centímetros) que afloran irregularmente en los sondajes. Por otra parte, este conjunto puede sobreponerse en sectores junto a otras agrupaciones de minerales de alteración, como actinolita-albita y/o clorita generando halos de alteración, los que exhiben

bordes difusos e irregulares (Figura 5.04.B.). En ciertas franjas la alteración es tan pervasiva que la asociación de minerales se extiende continuamente hasta por 40 m (columna DDH-98126, 120 m, Anexo I), dándole la característica coloración verdosa y obliterando completamente el aspecto original de la roca (Figura 5.04.C.).

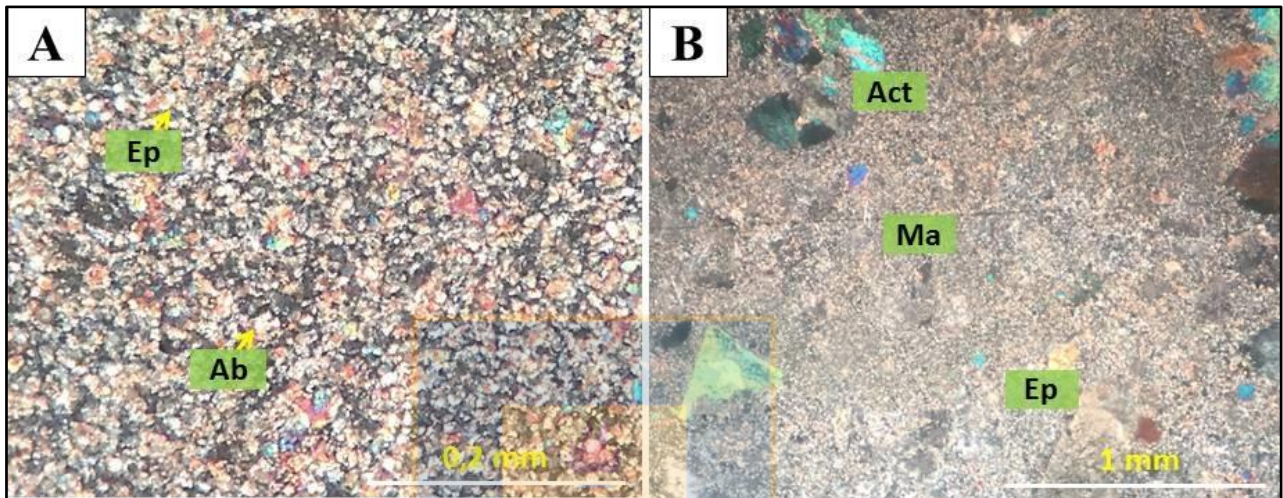


**Figura 5.04.** Alteración epidota-albita. Ep-ab: Alteración epidota-albita. (Sondaje DDH-98127, 118, m) **A.** Contacto entre Toba y asociación epidota-albita. **B.** Halos de alteración epidota-albita. **C.** Alteración pervasiva de epidota-albita.

Las rocas afectadas por este tipo de alteración adquieren un aspecto masivo, similar al de una roca córnea, observándose una masa afanítica con agregados granulares irregulares o vítreos de epidota, albita y sílice. La matriz tiene un color verde claro, es dura, competente y compacta. Los fenocristales de plagioclasas distinguibles obtienen una coloración blanquecina debido a la albitización.

Para analizar de modo exhaustivo este tipo de alteración, se obtuvieron dos muestras (MC1 y MC3) pertenecientes a la unidad Tobas, que fueron analizadas microscópicamente (Anexo II). De la descripción de estas muestras se pudo concluir que en la matriz de la roca, ocurre una extrema epidotización y albitización, conformándose de: epidota primordialmente, la que configura cerca del 50 % de la matriz, acompañada de plagioclasas albitizadas (Microfotografía 5.A.). La acción

conjunta de estos dos minerales, es la responsable de la característica coloración atribuida a los efectos de esta alteración. El resto de la matriz consta de cuarzo, clorita y actinolita. Los cristales son en su mayoría anhedrales y de tamaño homogéneo entre 20  $\mu\text{m}$  y 50  $\mu\text{m}$ . Además, es posible apreciar cristales de mayor envergadura de actinolita con tamaños medios de 0,2 mm, epidota y albita, los que en su mayoría se encuentran quebrados (Microfotografía 5.B.).



**Microfotografía 5** Alteración epidota-albita. Ep: epidota, Ab: albita, Act: actinolita, Ma: matriz. **A.** Matriz de toba con alteración epidota-albita. Vista en nicoles cruzados. MC3 (Anexo II). (Sondaje DDH-98126). **B.** Componentes mayores y matriz de toba con alteración epidota-albita. Vista en nicoles cruzados. MC1 (Anexo II). (Sondaje DDH-98126).

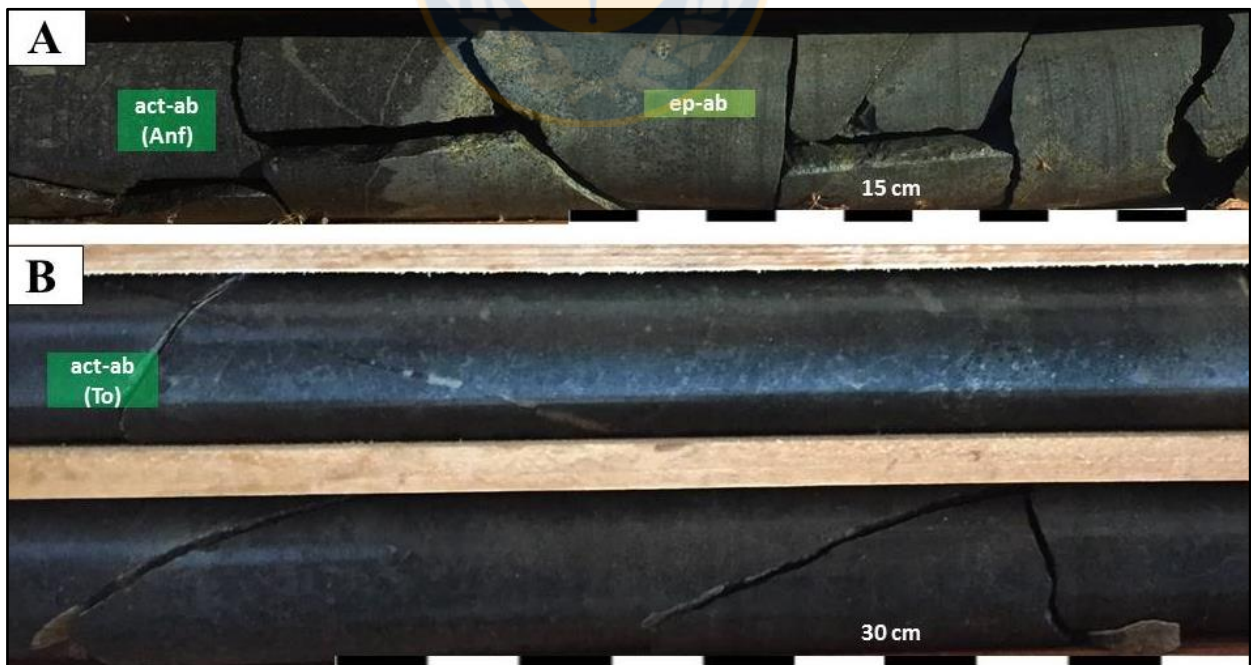
Por otro lado, esta alteración hidrotermal (junto a actinolita-albita) desde el punto de vista económico es de gran relevancia en la zona de estudio, ya que se reconoce pervasivamente en los sectores de mayor concentración de metales surgiendo vetas, vetillas y diseminaciones de calcopirita, cobaltita, piritita, bornita y magnetita en las intercalaciones de las unidades de Skarn y Tobas y en parte de la Anfibolitas.

### 5.2.2 Asociación actinolita-albita

Constituye un grupo de minerales de alteración, con una preponderante participación de actinolita, que puede presentarse con albita, cuarzo y clorita en menor proporción. Debido a la formación de esta asociación de minerales las unidades adquieren una coloración verde oscura a gris oscura y blanqueamiento de los cristales de plagioclasa. Macroscópicamente este conjunto se distingue por su coloración verde oscura. Texturalmente es parecida a los productos generados

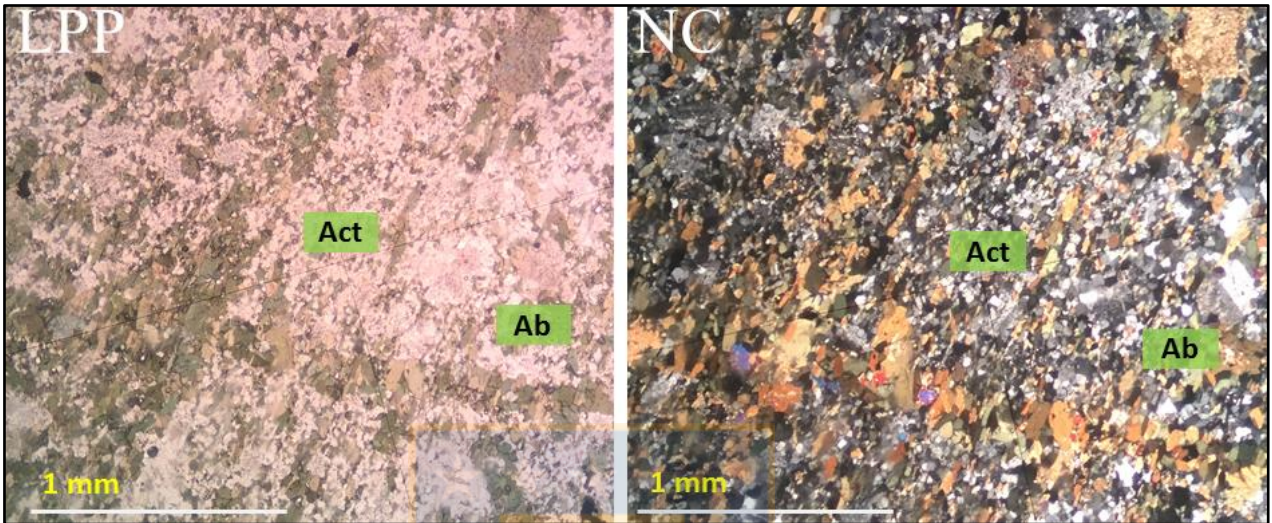
por la asociación epidota-albita, conformando una masa afanítica compacta y oscura, que posee agregados granulares superficiales de albita, actinolita y sílice. Por su lado, los fenocristales de plagioclasa se advierten totalmente albitizados. En relación a la proporción de albita y actinolita presente, se puede generar variaciones en el color y textura, como es observado en los sondajes Pan-00, Pan-01 y Pan-02, donde en la unidad de Brechas, esta asociación se muestra con un color verde intenso, lo que se debe al gran porcentaje de actinolita en comparación a la albita.

Las unidades litológicas que han sido modificadas mayoritariamente por esta alteración corresponden a la de Anfibolitas, Brechas y la unidad tobácea. Surge en las fracciones más profundas en la unidad de Anfibolitas (sobre los 200 m), definiendo un tramo de hasta 70 m (Anexo I). Si se compara con el intervalo de alteración epidota-albita observado en las unidades de Skarn y Tobas, esta agrupación posee menor continuidad y uniformidad, apareciendo intermitentemente la asociación de epidota-albita sobre la secuencia metamórfica y la asociación actinolita-albita, generando zonas con halos de alteración (Figura 5.05.A.). La unidad de Brechas, también exhibe esta alteración en un tramo que puede tener un espesor de 50 m, distinguiéndose en la matriz volcánica. En la unidad de Tobas (100 m-140 m) se muestra en halos generando un entramado con distintos minerales de alteración (Figura 5.05.B.).



**Figura 5.05.** Alteración Actinolita-albita. Act-ab: alteración actinolita-albita, ep-ab: alteración epidota-albita, Anf: Anfibolita, To: Toba. **A.** Anfibolita con alteración actinolita-albita. (DDH-98126, 316 m). **B.** Alteración actinolita-albita sobre unidad de Tobas con halos de alteración (DDH-98127, 133,4 m).

De acuerdo al análisis microscópico de la muestra MC4 (sondaje DDH-98126), correspondiente a una anfibolita, se advierte que esta alteración provoca aparición de actinolita, reconocida por su coloración verdosa en luz polarizada plana y albitización de las plagioclasas (Microfotografía 6).



**Microfotografía 6** Alteración actinolita-albita. Izquierda luz polarizada plana, derecha nicosoles cruzados. Act: actinolita, Ab:albita. MC4 (Anexo II). (Sondaje DDH-98126, 264,4 m).

Por otro lado, de acuerdo al análisis microscópico de la muestra MC5 (sondaje DDH-98126, Anexo II) correspondiente a una toba, esta alteración provoca que la matriz de la roca quede constituida casi en su totalidad por actinolita y plagioclasas, en la que gran parte de ellas están albitizadas. Lo anterior se traduce también en los componentes de mayor tamaño, los cuales corresponden a los mismos minerales junto a fragmentos líticos. Los dos minerales principales representan cerca del 75% de la roca, el resto de composición es complementada por cuarzo, epidota, fragmentos líticos y clorita, donde esta última aparece rellenando intersticios, así como también, reemplazando cristales de anfíboles.

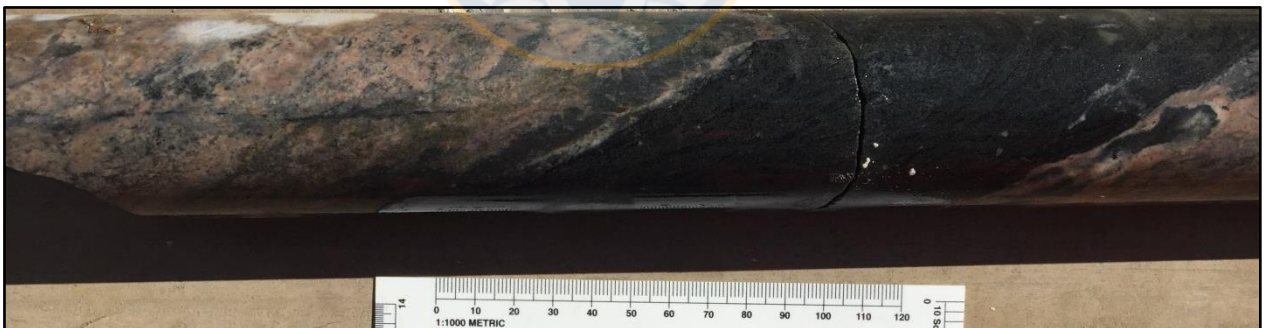
Esta asociación de minerales es considerada de suma importancia, debido a que se distribuye extensa y penetrativamente en las rocas y enlazada a este tipo de alteración junto a la asociación epidota-albita, se concentra la mineralización de interés económico en la unidad Anfibolita en los dominios más profundos de las secciones estudiadas.



### 5.2.3. Silicificación

Este tipo de alteración se presenta a lo largo de todos los sondajes, ya sea como sílice rosa en la unidad de Brechas o como cuarzo microgranular en la secuencia volcánica y metamórfica. En los sondajes estudiados, la silicificación de coloración rosa sirve como guía para la mineralización de metálicos que se encuentra en sectores más profundos, encontrándose espacialmente sobre ellos.

Se visualiza comúnmente en profundidades sobre los 200 m, en la unidad litológica de Brechas, constituyendo un tramo en que su espesor fluctúa entre 40 m a 80 m. En esta unidad la sílice rosa se puede manifestar bandeada con la matriz volcánica, en estructuras que pueden ser de un par de centímetros, hasta un par de metros (Figura 5.06.). Debido a fracturamiento se origina una textura brechosa entre la sucesión volcánica y este mineral de alteración, evidenciándose clastos angulosos de sílice rosa, los que son contenidos dentro de la matriz, la cual también presenta silicificación (muestra MC7, sondaje DDH-98125, Anexo II). Por otro lado, afecta a parte de la unidad de Tobas y Anfibolitas, otorgándole mayor dureza y competencia a las rocas, adquiriendo un aspecto vítreo. Se ha reconocido cuarzo microcristalino (muestra MC3, sondaje DDH-98126, Anexo II) en la matriz de las litologías volcánicas y existen secciones donde la roca está casi en su totalidad reemplazada por sílice (muestra MC6, sondaje DDH-98125, Anexo II).



**Figura 5.06.** Silicificación rosa en Secuencia Volcánica. (Sondaje, DDH-98126, 200 m).

### 5.2.4. Alteraciones menores

2

Las asociaciones de epidota-albita, actinolita-albita y silicificación corresponden a las alteraciones de mayor relevancia vistas en el área de estudio. A continuación se detallan otros tipos de minerales de alteración, que pueden o no tener dependencia genética y espacial con las

ya mencionadas. Éstas a pesar que pueden manifestarse en volúmenes considerables en las rocas, su aparición no modifica sustancialmente la textura ni la composición de la roca, diferenciándose así del grupo de alteraciones principales.

#### 5.2.4.1 Cloritización

Este mineral puede visualizarse a lo largo de los sondajes (columna PAN-00 A, 45 m-87m, Anexo I) como: vetillas de un par de centímetros de un color negro verdoso, clorita microgranular en la matriz y reemplazando a los componentes de mayor tamaño. Acompaña a los minerales principales en las asociaciones epidota-albita y actinolita-albita, ya sea de apariencia anhedral, rellenando intersticios en la matriz o en microvenillas, con tamaños del orden de los micrones. En estas agrupaciones, el contenido de clorita no supera el 10% en relación a los minerales de alteración. En los componentes de mayor tamaño de las rocas volcánicas y en la unidad de Anfibolita, reemplaza a anfíboles o biotitas de manera moderada a pervasiva.

#### 5.2.4.2. Biotitización

La biotita secundaria está a lo largo de las unidades litológicas Anfibolitas y Tobas (columna DDH-98126 B, 260 m- 350 m, Anexo I). Puede representar entre el 5-10% de la composición de la roca, exhiben hábito tabular subhedral a anhedral. Donde mejor se expresa esta alteración es en los dominios más profundos, que tienen conexión con la Unidad Anfibolita, lo que estaría relacionado a una alteración potásica de mayor temperatura.

#### 5.2.4.3. Granatización

El granate puede presentarse junto a las zonas de alteración epidota-albita y albita-actinolita. No está restringido solamente a la unidad de Skarn, ya que, se ha distinguido granate en la unidad de Tobas (muestra MP3, sondaje DDH-98126, Anexo III). Surge en intervalos donde hay una pervasiva alteración epidota-albita y actinolita-albita, cercano a la mineralización de la unidad de Skarn, del mismo modo, puede manifestarse en dominios más profundos, conectado siempre al mismo grupo de alteraciones.

## 5.3. MINERALIZACIÓN

### 5.3.1. Horizontes Mineralizados

Concorde a lo observado en el mapeo de sondajes, la mineralización metálica en el área de estudio se compone de: calcopirita, pirita, magnetita, bornita, cobaltita, hematita, pirrotina y oxidados de cobre. Estos metales se concentran en dos localidades a lo largo de los sondajes, definiendo así dos horizontes mineralizados, el “Horizonte A” y el “Horizonte B”, los que se sitúan en las unidades metamórficas.

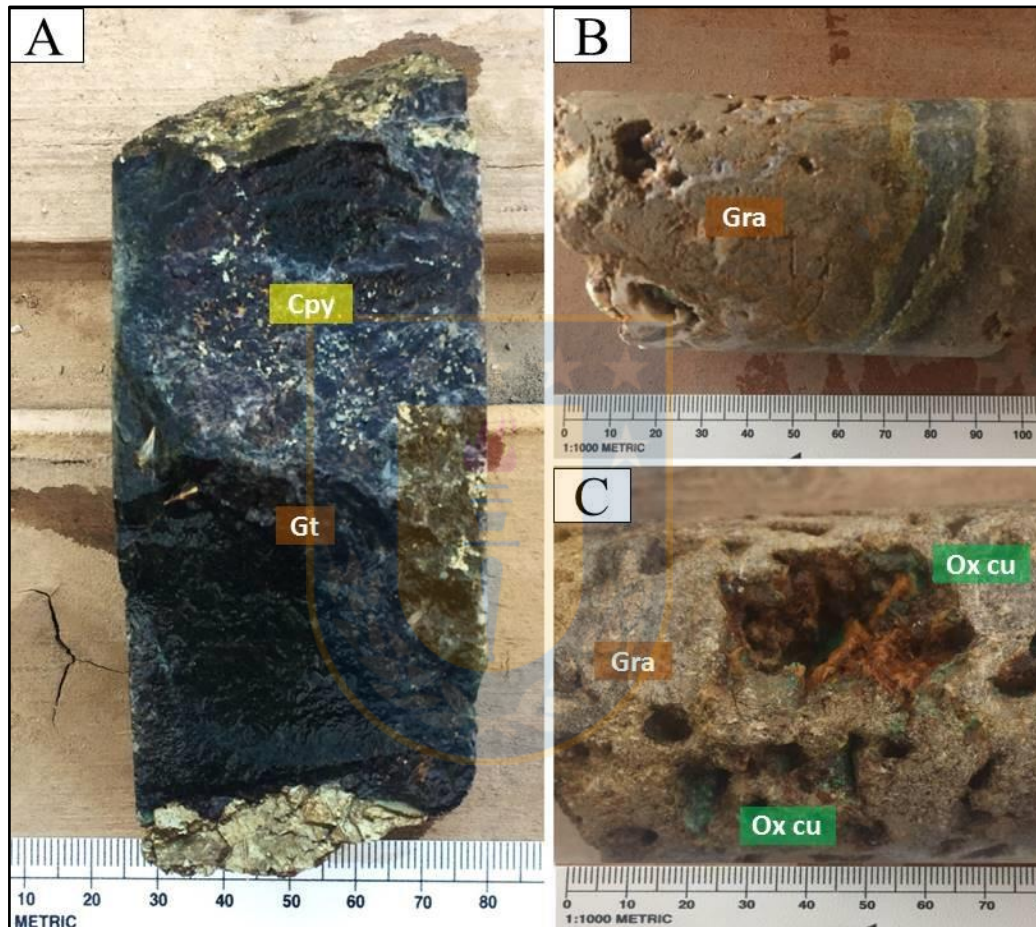
Existe pirita y calcopirita muy fina diseminada fuera de los márgenes de los horizontes referidos previamente, que se ubican en la sucesión volcánica propiamente tal, pero debido a la proporción de éstas no revisten mayor interés económico.

#### 5.3.1.1. Horizonte A

El Horizonte A se ubica en zonas más superficiales y constituye un espacio continuo de mineralización con un espesor que varía entre 60 m a 80 m. Está espacialmente restringido a la intercalación de la unidad Skarn de Granate y parte de la secuencia volcánica, con alteración pervasiva de epidota-albita. Se aprecia fundamentalmente entre en los 100 m-160 m. La mayor cantidad de mena se agrupa en la parte central del horizonte en las rocas de skarn, mientras que en las fracciones más distales la cantidad disminuye.

La mineralización tiene lugar en diseminaciones y a través de vetillas de espesores de 1 cm a 5 cm, donde dominan magnetita, calcopirita y pirita. Cuando la ocurrencia es diseminada, los sulfuros referidos previamente pueden aparecer en conjunto o independientemente, así como también, en paragénesis con bornita y pirrotina en cristales de 1 cm a 2 cm, los que se superponen a los cristales de granate y a la matriz que exhibe una pervasiva alteración de epidota-albita y actinolita (Figura 5.07.A.). La magnetita por su lado, está diseminada en la matriz otorgándole magnetismo a la roca. En el caso de las vetillas pueden estar constituidas del conjunto calcopirita-pirita-magnetita (Figura 5.07.B.), en la cual los minerales tienden al

automorfismo, así como en vetillas monomineral donde destacan las de calcopirita por el interés económico que suscitan. Estructuras compuestas de pirita-cobaltita-epidota-magnetita suceden en este tramo. Crisocola y malaquita se visualizan relleno de cavidades junto a óxidos de hierro en la unidad de Skarn de Granate, demostrando una porción oxidada la cual se manifiesta intermitentemente en este horizonte (Figura 5.07.C.).



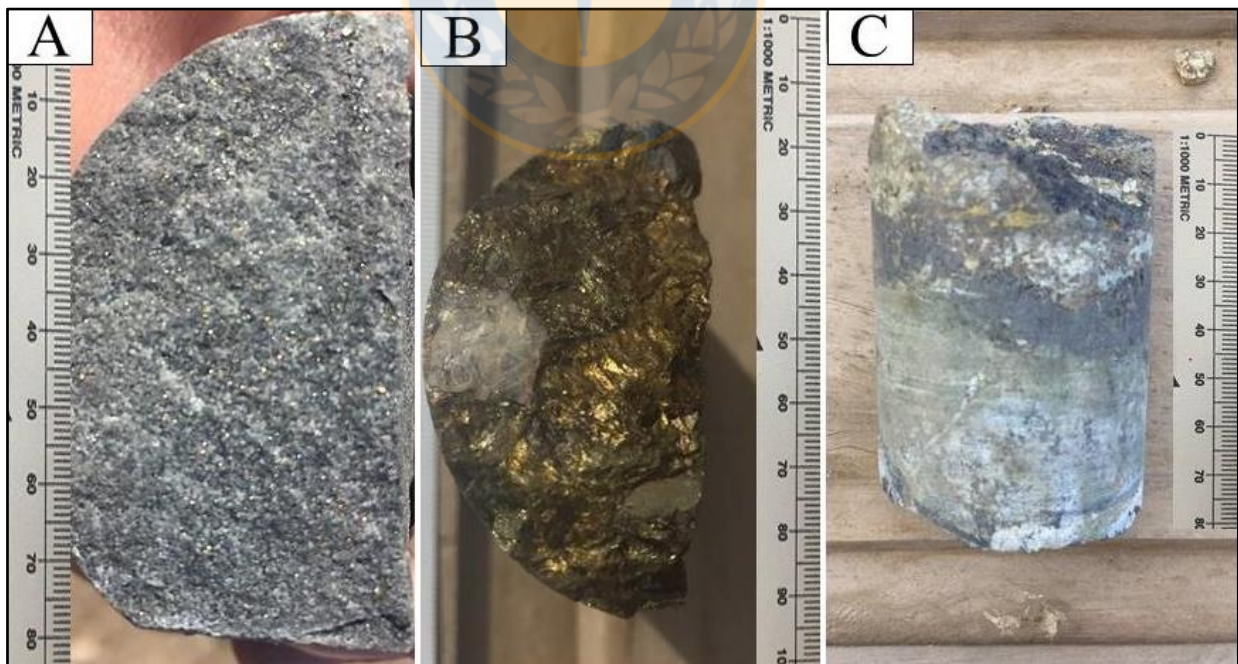
**Figura 5.07. Ocurrencia de mineralización en Horizonte A.** Cpy: calcopirita, Gt: granate, Gra: Skarn de Granate, Ox cu: oxidados de cobre. **A.** Calcopirita diseminada y en vetillas junto a pirita sobre unidad de Skarn. (sondaje DDH-98125, 140 m) **B.** Vetilla de magnetita-pirita calcopirita (sondaje DDH-98127, 146,45 m). **C.** Oxidados de cobre en Skarn de Granate(sondaje DDH-98127, 145 m)..

### 5.3.2.2. Horizonte B

El Horizonte B se localiza en las porciones profundas asociado a la unidad litológica Anfibolitas, distribuyéndose en 70 metros (Anexo I). Exhibe halos de alteración de actinolita-albita, epidota-albita, granates residuales y está limitado en el techo por la unidad de Brechas con sílice rosa. A

pesar de que predomina la alteración actinolita-albita, se ha observado que donde hay mayor mineralización coincide con halos de epidota-albita.

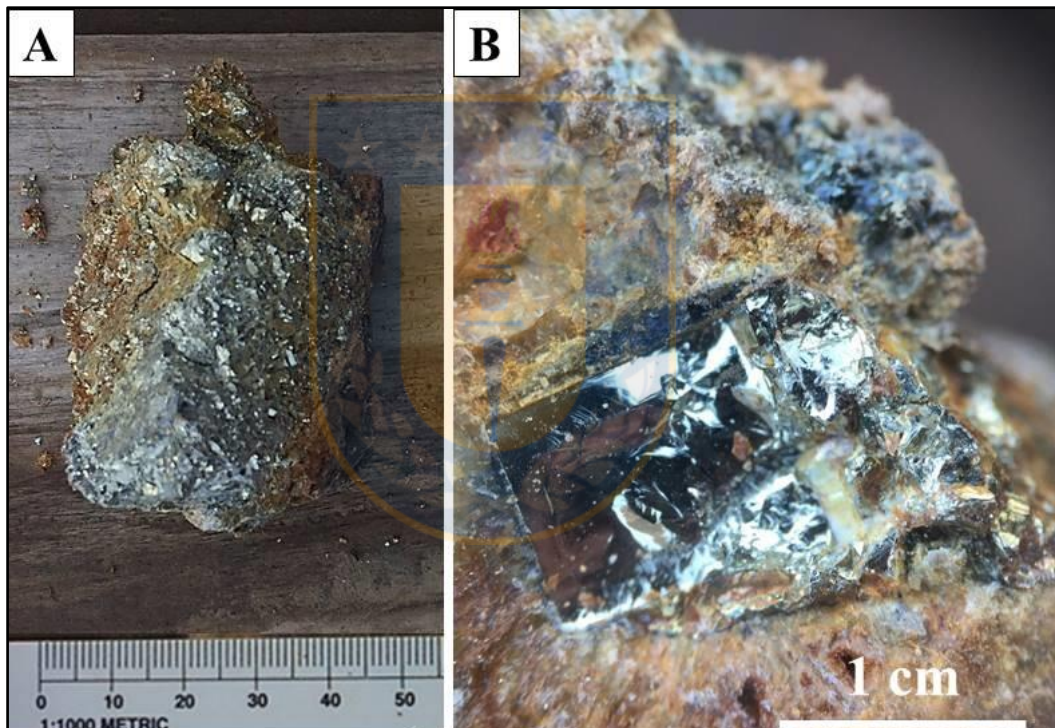
Tal como en el Horizonte A, los metálicos que más abundan son calcopirita, pirita y magnetita. La ocurrencia de los minerales es diseminada en cristales muy finos (de un par de milímetros a décimas de milímetros) y/o en vetillas. En el primer de los casos, la calcopirita es microgranular (Figura 5.08.A.) pudiendo estar acompañada de bornita, donde este conjunto paragenético llega a formar cúmulos de sulfuros de cobre de hasta 2 cm. En cuanto a las estructuras, éstas pueden ser de 3-4 cm de espesor o también venillas de 1 mm a 1 cm. Existen vetillas que están conformadas en su mayoría por calcopirita (70% de la composición de la vetilla), en paragénesis con magnetita, pirita y cuarzo (Figura 5.08.B.) y otras que constan de magnetita, pirita, calcopirita y pirrotina (Figura 5.08.C.). Se desarrollan zonas con gran potencial económico con continuidad entre 20 m-40 m, con numerosas vetillas de calcopirita, magnetita-calcopirita-pirita y epidota-magnetita-pirita-cobaltita, sumado a venillas milimétricas de bornita, pirita, pirrotina, calcopirita y magnetita. Al igual que en el Horizonte A, existe un tramo de 10 m aproximadamente de mineralización de oxidados de cobre, los que se superponen a los sulfuros primarios.



**Figura 5.08. Ocurrencia de mineralización en Horizonte B. A.** Calcopirita diseminada en unidad metamórfica. (DDH-98125, 256,6 m). **B.** Vetilla de calcopirita (DDH-98126, 336 m) **C.** Vetillas de magnetita-calcopirita-pirita cortando secuencia metamórfica. (DDH-98127, 284 m).

### 5.3.2. Mineralización de Cobalto

Como resultado del terreno realizado en sector de rampa Caracoles (coordenadas: 6.628.002 m N, 286.813 m E UTM WGS 84), lugar donde en la investigación de Castellón (2017) se constataron anomalías de cobalto (cercano a 1.000 ppm), se ha reconocido una fase mineral de color plateado, brillo metálico intenso, exfoliación perfecta, raya de color negro y dureza entre 5,5-6 en la escala de Mohs. De acuerdo al análisis macroscópico y microscópico (Anexo III, MP6) del mineral se ha concluido que correspondería a cobaltita ((S As (Co, Fe)), un sulfuarseniuro de cobalto (Figura 5.09.).



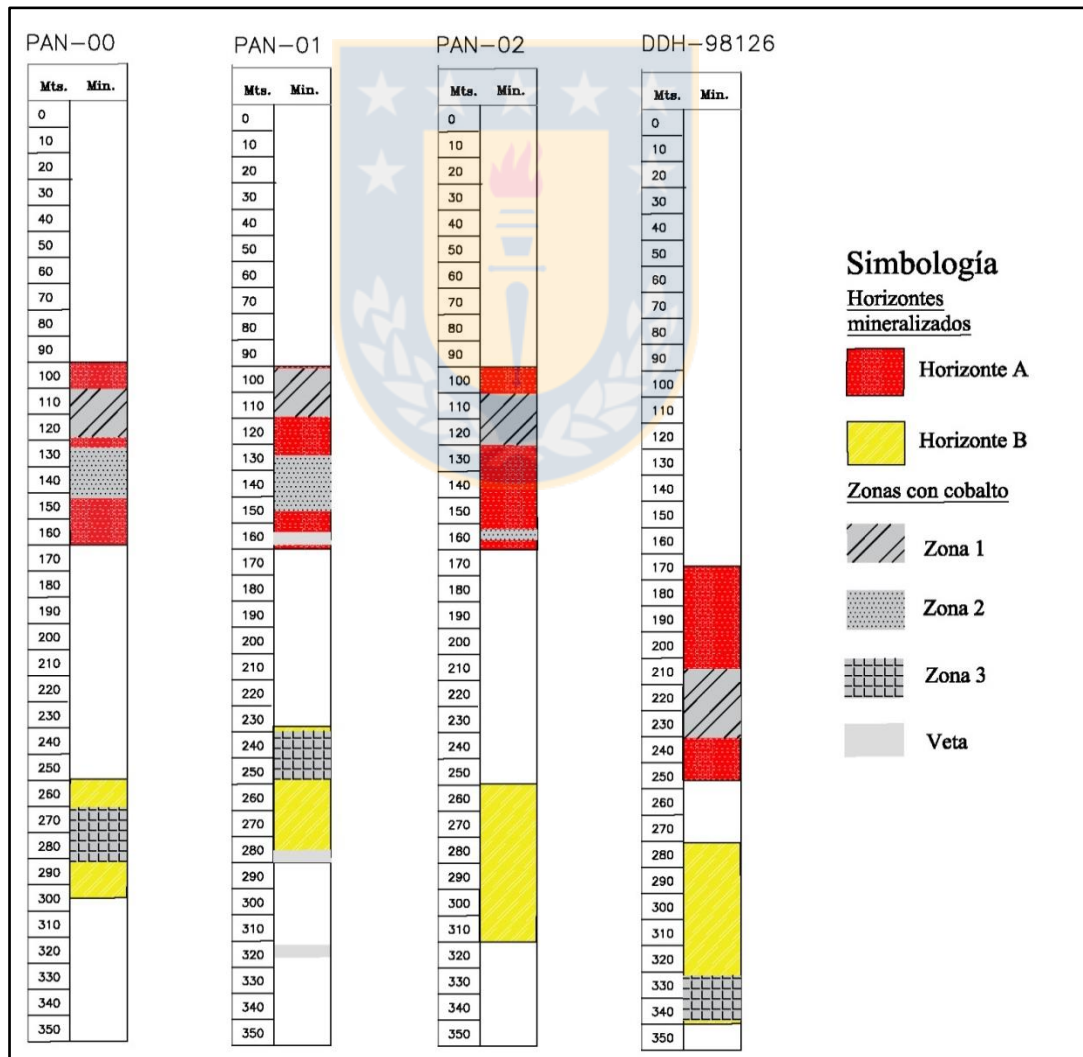
**Figura 5.09.** Cobaltita observada en Sector Rampa Caracoles A. Vetilla de Cobaltita. B. Cobaltita con hábito cristalino (Vista con lupa aumento 14 x).

#### 5.3.2.1. Distribución en sondajes

Establecer en primer lugar, si existe mineralización de cobalto en profundidad en el área norte del yacimiento Panulcillo y posteriormente detallar la ocurrencia y zonas donde se observa cobaltita, constituye parte del objetivo primordial de este trabajo. En consecuencia a lo anterior, mediante

el mapeo de testigos de sondajes se ha determinado la presencia de cobaltita en los sondajes Pan-00, Pan-01, Pan-02, DDH-98125 y DDH-98126.

Específicamente, en los sondajes de aire reverso (Pan-00, Pan-01 y Pan-02), este mineral surge tanto en el Horizonte A (100 m-180 m de profundidad) como el Horizonte B (240 m- 310 m de profundidad) y en vetillas que no tienen conexión con los grupos anteriormente señalados. En el Horizonte A, la cobaltita no se extiende por toda el área mineralizada, sino que se concentra en dos secciones con una presencia discreta: una que comprende 20 m y puede estar ubicada dependiendo del sondaje, entre los 100 m a 130 m (Zona 1) y otra en la que su espesor varía entre los 5 m a 20 m y se puede encontrar entre los 140 m a 170 m (Zona 2) (Figura 5.10.).



**Figura 5.10.** Distribución de la mineralización de cobalto en los sondajes. PAN-00, PAN-01, PAN-02 y DDH-98126

En la Zona 1, la cobaltita está restringida a la unidad de Skarn de granate con alteración de albita, clorita, epidota y actinolita. Se visualiza en vetillas de epidota-magnetita-pirita-cobaltita y diseminada en paragénesis con calcopirita, pirita y magnetita, a los que en algunos sectores se superponen oxidados de cobre. En general, la mineralización de cobalto es continua en esta porción, constituyendo un 5 % aproximado de los fragmentos de roca estudiados, por lo que este intervalo constituirá un área de interés para evaluar ante una eventual explotación. La Zona 2 del Horizonte A en sondajes como Pan-00 y Pan-01 alcanza casi 20 m, mientras que en Pan-02 se extiende solo por 5 m, la manera en que se presenta la mineralización de cobalto es análoga a la de la Zona 1, pero la aparición de ésta no es tan abundante (inferior a 5% de los fragmentos) .

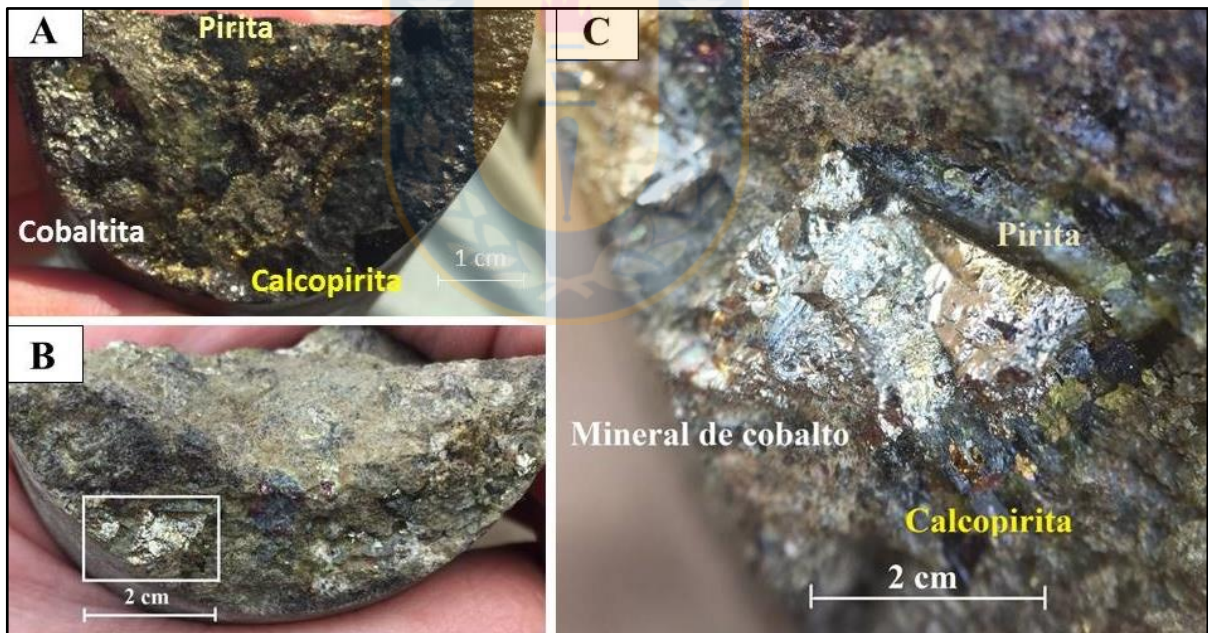
En el Horizonte B la cobaltita se concentra en 20 m definiendo la Zona 3, la cual está asociada a la unidad Anfibolitas y a pervasiva alteración de actinolita-albita y epidota-albita. La ocurrencia es diseminada y en vetillas junto a epidota-pirita-magnetita.

En los sondajes diamantinos (DDH-98125, DDH-98126,) aparece de manera clara y extendida en el sondaje DDH-98126. Si bien en el sondaje DDH-98125 se reconocen vetillas con este mineral, no tiene mayor extensión ni continuidad. La cobaltita se distribuye entre los 215 m y 242 m de profundidad en la unidad Skarn intercaladas con la unidad de Tobas, con alteración de epidota-albita y crecimiento de cuantiosas vetillas con este mineral, acompañado de: pirita, magnetita, epidota y en algunos casos calcopirita. Debido a la ocurrencia de la cobaltita, la unidad que la contiene y la alteración, esta sección sería homologable a la Zona 1 definida para los sondajes de Aire Reverso. Las profundidades distintas en las que se presenta se deben a la inclinación con la que se realizó este sondaje y al manto de las capas que contiene la mineralización. Por otro lado, en este tipo de sondajes se puede apreciar de manera más detallada la ocurrencia y cantidad de cobaltita presente, la que cuando está diseminada en la roca puede integrar entre un 2% a 5% de la composición de la roca, y en las vetillas compone el 10% de la estructura, las que están espaciadas desde un par de centímetros hasta un metro. Entre los 325 m y 345 m en la unidad Anfibolitas con alteración actinolita-albita y granate se identifica cobaltita, mayoritariamente en vetillas con epidota, magnetita y pirita, porción que se correlaciona con la Zona 3 definida para los sondajes de Aire reverso.



### 5.3.2.2. Ocurrencia

La cobaltita observada en los sondajes de Panulcillo, macroscópicamente se distingue por su coloración plateada, con un brillo metálico muy intenso. Esta característica la diferencia de la pirita, donde ésta última, en las secciones estudiadas tiene un color amarillo latón pálido variando a amarillo latón y además es más dura y resistente que el sulfuarseniuro de cobalto. La ocurrencia de este mineral puede ser diseminada, donde en la unidad Skarn se sobrepone a los granates y a los productos de alteración. Se manifiesta en cristales granulares de un par de mm hasta 1 cm, los que pueden formar agregados de cobaltita de mayor envergadura (1 cm a 3 cm). Estas diseminaciones suceden la mayoría de los veces acompañada de pirita y calcopirita subordinada (Figura 5.11.A.). Asimismo, una parte importante de la mineralización se muestra en vetillas de 3 cm-5 cm, donde destacan las de epidota-magnetita-pirita-cobaltita (Figura 5.11. B. y C.).

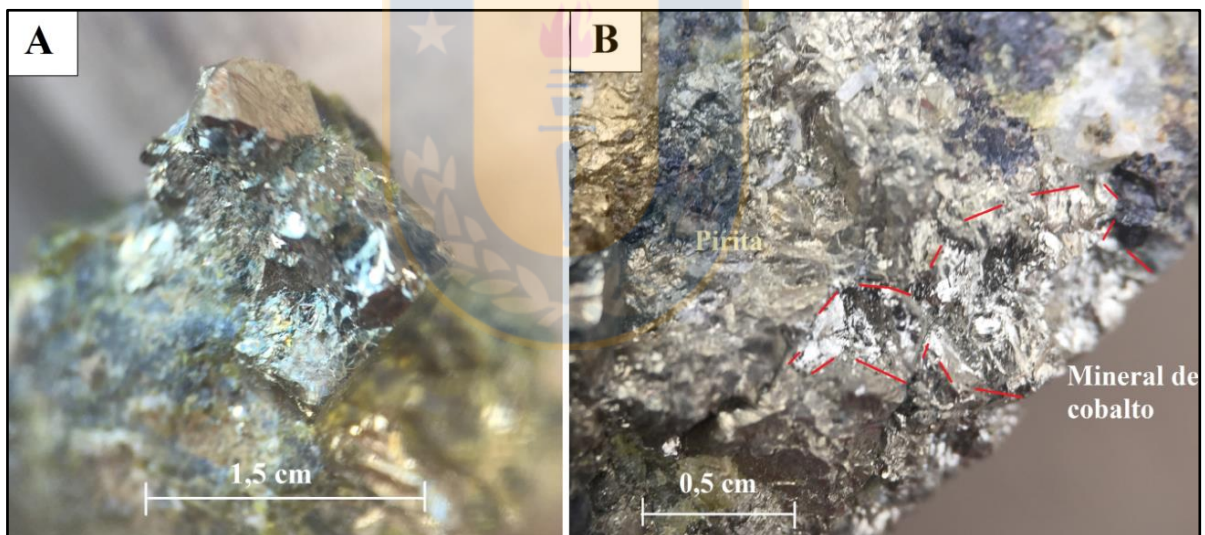


**Figura 5.11. Principales Ocurrencias de cobaltita vistas en sondajes.** A. Diseminada con pirita y calcopirita, en la unidad Skarn. (DDH-98126, 220,8 m). B. Vetilla de epidota-pirita-magnetita-cobaltita. Cobaltita indicada en rectángulo blanco. (DDH-98126, 241,9 m). C. Mineral de cobalto de vetilla visto con lupa (aumento 14 x). Cobaltita en paragénesis con calcopirita y pirita. (DDH-98126, 241,9 m).

Estas estructuras se concentran en las tres zonas de cobalto y también se han observado en dominios marginales (columna PAN-01, 288 m, 320 m, Anexo I). Se caracterizan por la

presencia de abundante epidota masiva y prismática, la que integra casi el 60 % de la vetilla el resto de la composición se completa con magnetita (20%), pirita (10%) y cobaltita (5 % -10%), puede poseer calcopirita en cantidades accesorias. La coloración verde que domina en estas vetillas, a causa del exceso de epidota y la paragénesis característica, permite un fácil reconocimiento de estas estructuras, constituyendo un indicador de posible existencia de cobalto en el área de estudio. El vínculo genético entre los procesos mineralizadores, las alteraciones y las ocurrencias de cobaltita referidas, se discuten de manera detallada en el capítulo 6.2.

Por otro lado, la cobaltita puede exhibir hábito cristalino donde generalmente se muestra una cara del mineral, con marcada exfoliación y también pueden apreciarse *pseudo* cubos de aproximadamente 2 cm, que fundamentalmente se manifiesta en las vetillas. Además sucede en agregados con una apariencia masiva, usualmente en paragénesis con pirita en texturas de reemplazo y/o intercrecimiento con el mismo mineral (Figura 5.12.)



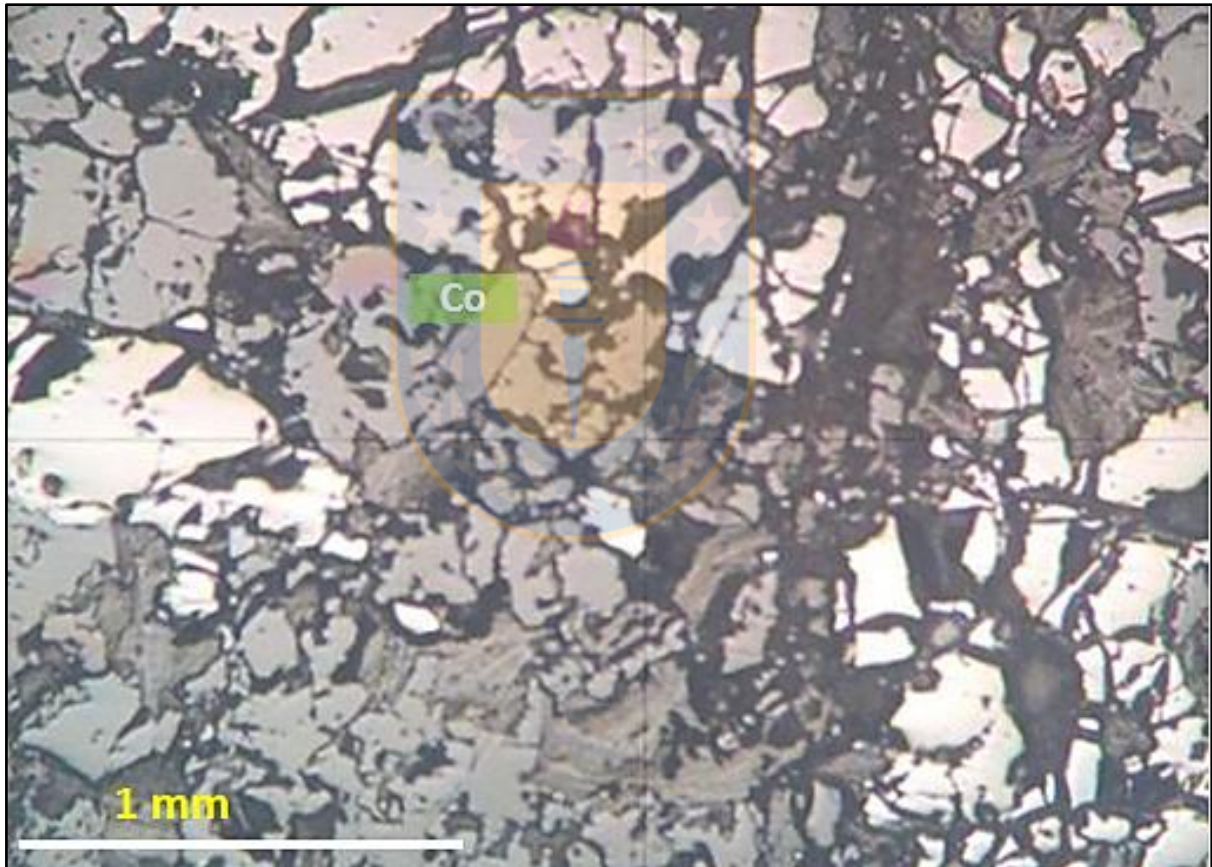
**Figura 5.12.** Hábitos de cobaltita vistos en sondajes **A.** Hábito cristalino en *pseudo* cubo, en vetilla epidota-magnetita-pirita-cobaltita. (DDH-98126, 243 m). **B.** Hábito masivo cobaltita junto a pirita, sobre unidad Anfibolita. (DDH-98126, 287,5 m).

### 5.3.2.3. Descripción mineralógica microscópica

Para analizar y comprobar la existencia de la mineralización de cobalto, se obtuvo una muestra que fue extraída en el sector de rampa Caracoles (MP6) y cuatro muestras del sondaje diamantino

DDH-98126 (MP2, MP3, MP4, MP5), a las que se les efectuaron cortes pulidos para realizar una descripción mineralógica microscópica (Anexo III).

Microscópicamente el mineral de cobalto se distingue por: su coloración blanca con tinción rosa, su bireflectancia, la que varía de un color crema rosáceo a uno más plateado, la anisotropía escasa, una reflectividad alta de 50% (Collao, 2008) y la elevada dureza que ostenta, lo que se traduce en un marcado relieve. Los cristales se presentan con una fuerte tendencia al automorfismo, con caras cristalinas bien desarrolladas y agregados idiomórficos, observándose bordes rectos bien definidos (Microfotografía 7).



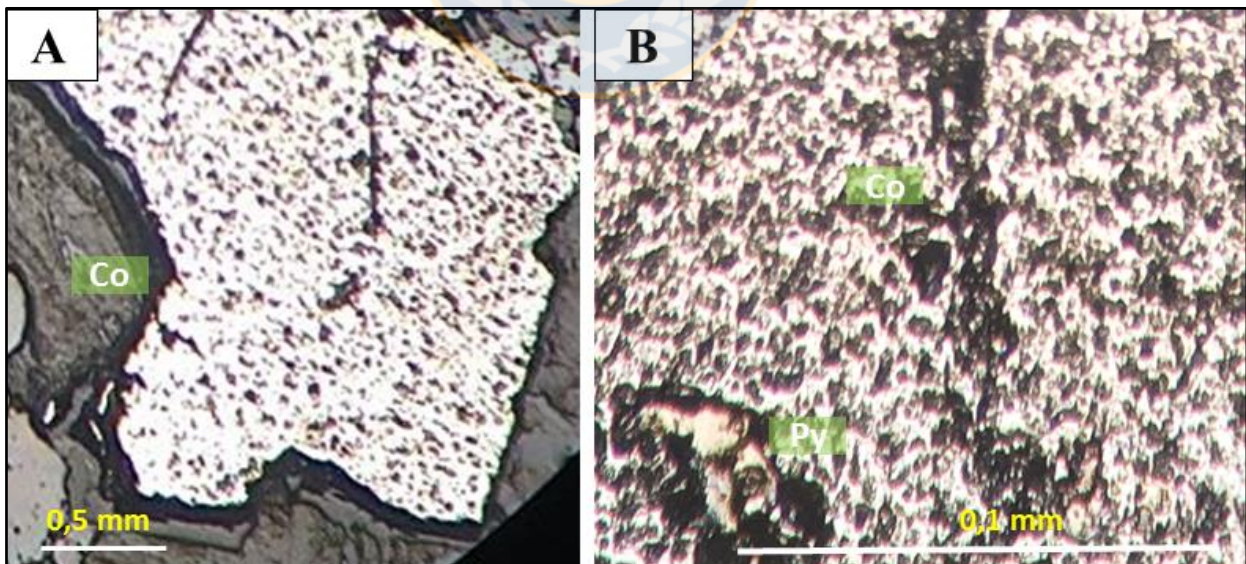
**Microfotografía 7** **Minerales de cobalto hipidomórficos.** En vetilla epidota-magnetita-pirita-cobaltita. Vista en luz polarizada plana. Co: cobaltita. MP5 (Anexo III). (Sondaje DDH-98126, 218 m).

Cuando la mineralización de cobaltita se presenta en vetillas de epidota-magnetita-pirita-cobaltita (muestras MP4 y MP5, sondaje DDH-98126, Anexo III) el mineral cobaltífero exhibe una apariencia idiomórfica con cristales de gran tamaño (hasta 1 cm), asimismo, puede visualizarse

en cristales de menor tamaño sobreimponiéndose a mineralización de pirita. En estas estructuras, la cobaltita ocupa entre un 5% a un 10% de la composición de la vetilla.

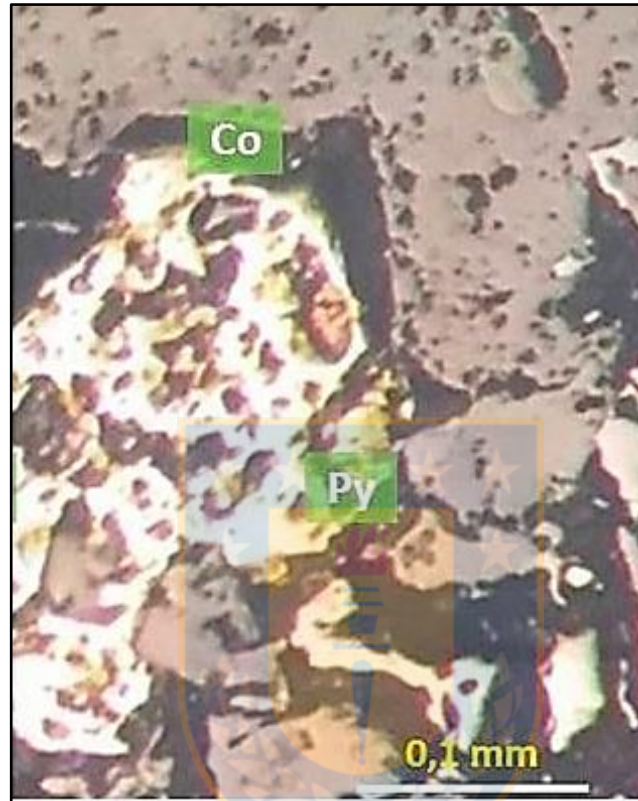
Por otro lado, cuando la ocurrencia de la cobaltita es disseminada (muestra MP3, sondaje DDH-98126, Anexo III), aparece en cristales idiomórficos (0,1 mm a 2 mm) sobreimponiéndose a la mineralización de calcopirita y pirita e igualmente en masas irregulares y en microvenillas.

Tanto la cobaltita como la pirita, manifiestan un marcado relieve, pero el mineral de hierro presenta una coloración blanquecina amarillenta pálida, que la diferencia del mineral de cobalto. Debido a la estrecha relación espacial y genética entre estos dos minerales, se generan distintas texturas y estructuras. Dentro de los cristales de cobaltita de mayor tamaño, es común apreciar abundantes inclusiones anhedrales de pirita de tamaños del orden de micrones que debido al alto relieve y la coloración de este mineral, obliteran parcialmente la coloración de la cobaltita otorgándole una tinción más oscura y amarillenta (Microfotografía 8). El fenómeno anteriormente mencionado acreditaría mecanismos de reemplazos, conocido como “islas de mineral huésped” (Maksaev, 2001), en el cual el cristal huésped no fue sustituido en su totalidad, permaneciendo cristales de pirita dentro de la cobaltita.



**Microfotografía 8** **Relictos de-pirita en cobaltita.** Vista en luz polarizada plana. Co: cobaltita, Py: pirita. **A** Vista general de cristal de cobaltita con relictos de pirita. MP3. (Anexo III B). (Columna DDH-98126, 220,5 m). **B.** Cristal de cobaltita donde se aprecian los relictos de pirita Aumento 10 x. MP5 (Anexo III B). (Sondaje DDH-98126, 218 m).

Otra textura de reemplazo reconocida corresponden a *pseudomorfismos*, en la que el mineral de cobalto ha reemplazado parcialmente a la pirita, donde se ha conservado la forma cristalina de ésta última (Microfotografía 9).



**Microfotografía 9** Pseudomorfismo de cobaltita en pirita. Vista en Luz polarizada plana. Co: cobaltita, Py: pirita Cobaltita de color blanquecino reemplaza parcialmente a pirita de coloración amarilla pálida. MP5. (Anexo III B). (Sondaje DDH-98126, 218 m).

En cuanto a la calcopirita, no se han identificado texturas de reemplazo, pero sí sobreposición del mineral de cobalto sobre el sulfuro de cobre.

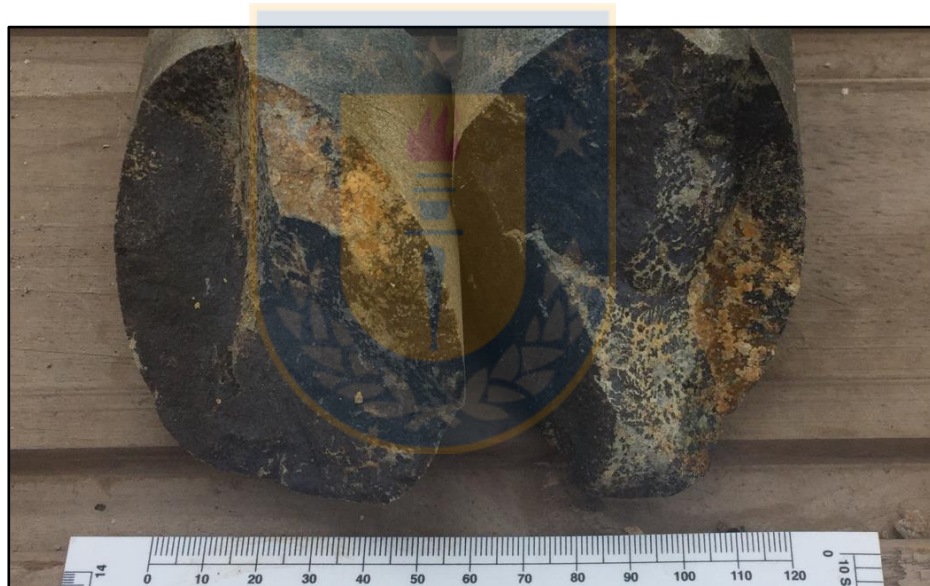
### 5.3.3. Mineralización de Manganeso

En Panulcillo, a nivel distrital existe un enriquecimiento en mineralización de manganeso, lo que se pudo constatar en el terreno en superficie, donde se evidencia un horizonte oxidado con su

presencia. Evaluar la distribución a través de los sondajes y las características geológicas de este metal configura parte de este trabajo, debido al valor que representa en la industria de la electromovilidad (Townley y otros, 2018).

### 5.3.3.1. Distribución en sondajes

La mineralización de manganeso se distribuye en una fracción que no tiene una conexión genética directa, ni espacial con los horizontes mineralizados A y B. En todos los sondajes estudiados está presente este tipo de mineralización (Figura 5.13.), dando origen a un horizonte de gran continuidad con óxidos de manganeso, el cual dependiendo del sondaje tiene una extensión entre los 40 m a 70 m.



**Figura 5.13.** Pirolusita masiva y en dendritas en fractura (Sondaje DDH-98125, 14,6 m).

Conforme a lo visto en terreno, la mineralización de manganeso solo estaría limitada a los metros superficiales de los sondajes. Las unidades que contienen este horizonte corresponden a la de Andesitas y Tobas, en la que ha dado lugar una fuerte alteración superficial con abundantes fallas y fracturas, participación de arcillas y de meteorización química, manifestándose un material disgregable, frágil y jabonoso al tacto. Se aprecia como tendencia que se concentra donde hay mayor cantidad de estructuras, y del mismo modo, aumenta la cantidad de óxidos en los dominios

más superficiales (5-40 m) y disminuye en tramos más profundos (40 m-70 m), donde la presencia de éstos es más restringida.

### 5.3.3.2. Ocurrencia

Surge esencialmente en planos de fracturas y fallas. De acuerdo al análisis microscópico de la muestra MP1 (Microfotografía 10) el mineral de manganeso visto, correspondería a pirolusita, la que puede lucir masiva y como dendritas. Este mineral es de color negro con reflejos azulados, posee brillo metálico, raya negra y dureza cercana a 5 en la escala de Mohs, aunque en ciertas porciones debido a los procesos de meteorización que ha sufrido, muestra un aspecto terroso y una dureza muy baja, lo que provoca que al tacto tiña los dedos.



**Microfotografía 10** **Pirolusita diseminada.** Vista en Luz polarizada plana. MP1. (Anexo III). ( Sondaje DDH-98125, 22 m).

La ocurrencia de este mineral es diseminada, tanto en los planos de debilidad como en la matriz de la roca. Existen intervalos donde la mineralización de manganeso es tan intensa que no se logra distinguir la roca contenedora, donde ocupa entre un 20%-30 % de la composición (columna DDH-98126, 26 m, Anexo I).

## 6. DISCUSIÓN

### 6.1. PETROGÉNESIS

En este trabajo se han identificado cinco grupos litológicos que de techo a base en la columna estratigráfica corresponden a: Andesita, Toba, Skarn de Granate, Brecha y Anfibolita, los cuales en general son concordantes y con manteos al este. Debido a la inclinación y el azimut con lo que fueron realizados los sondajes diamantinos y de aire reverso y la inclinación propia de las capas, se pueden percibir ciertas diferencias en cuanto a los espesores y el nivel de profundidad que aparecen las unidades litológicas y horizontes mineralizados entre estos dos grupos de sondajes (Anexo I).

Las unidades reconocidas en esta investigación se pueden dividir en una secuencia volcánica compuesta de andesitas, tobas y brechas y una secuencia metamórfica integrada por anfibolitas, skarn de granate y hornfels. Andesitas y tobas afloran en sectores más superficiales y a medida que se profundiza en la sección aparece la secuencia metamórfica. Debido al metamorfismo imperante en el área de estudio, gran parte de la secuencia volcánica exhibe metamorfismo incipiente a causa de la intrusión de cuerpos ígneos, desarrollándose metatobas las cuales también han experimentado procesos de alteración hidrotermal debido a la circulación de fluidos. Narváez y Araya (1998) reconocen las rocas de la unidad Anfibolitas y afirman que se formarían producto de metamorfismo de contacto en la secuencia volcánica, atribuible a una *facies* progradante anhidra del desarrollo de un skarn. Lo anterior es consistente con el análisis petrográfico realizado en este trabajo, donde la unidad metamórfica presenta mineralogía similar a la de las rocas efusivas con presencia de plagioclasas y anfíboles (muestras MC2, MC4, Anexo II), pero variaciones en la textura debido a los efectos propios del metamorfismo. En cuanto a la unidad Skarn de Granate, el protolito de ésta correspondería a calizas, pertenecientes a la Formación Arqueros. Acorde a lo señalado por Narváez y Araya (1998), el skarn se origina debido a la influencia termal y metasomática de un cuerpo intrusivo sobre calizas, mientras que Río Tinto (2001), menciona que se formaría en parte por reacciones bimetasomáticas entre las andesitas y calizas.



Las unidades litológicas que fueron definidas en este trabajo pueden enmarcarse dentro del contexto geológico regional de la Formación Arqueros definido por Emparán y Pineda (2006). Estos autores plantean que los componentes de esta secuencia constituyen una interdigitación entre una secuencia volcánica con material marino sedimentario, que posteriormente sufrieron metamorfismo de contacto, planteamiento que se ajusta a la génesis detalladas en este trabajo. En cuanto a los grupos litológicos definidos en superficie a nivel distrital para Panulcillo ocurre un caso similar, donde se han reconocido: tobas, andesitas, calizas, skarn, brechas y rocas metamórficas como anfibolita y hornfels (Narváez y Araya, 1998; Río Tinto, 2001; Castellón, 2017). Rocas como cataclasitas, milonitas, intrusivos dioríticos a granodioríticos y areniscas advertidas por los mismos autores no se han reconocido en los sondeos revisados, lo que se debe a que estos grupos litológicos afloran fuera del área de estudio de este trabajo.

## 6.2. PROCESOS MINERALIZADORES

En torno al yacimiento Panulcillo no existe un consenso sobre el modelo genético, existiendo dos posturas distintas que explican su origen.

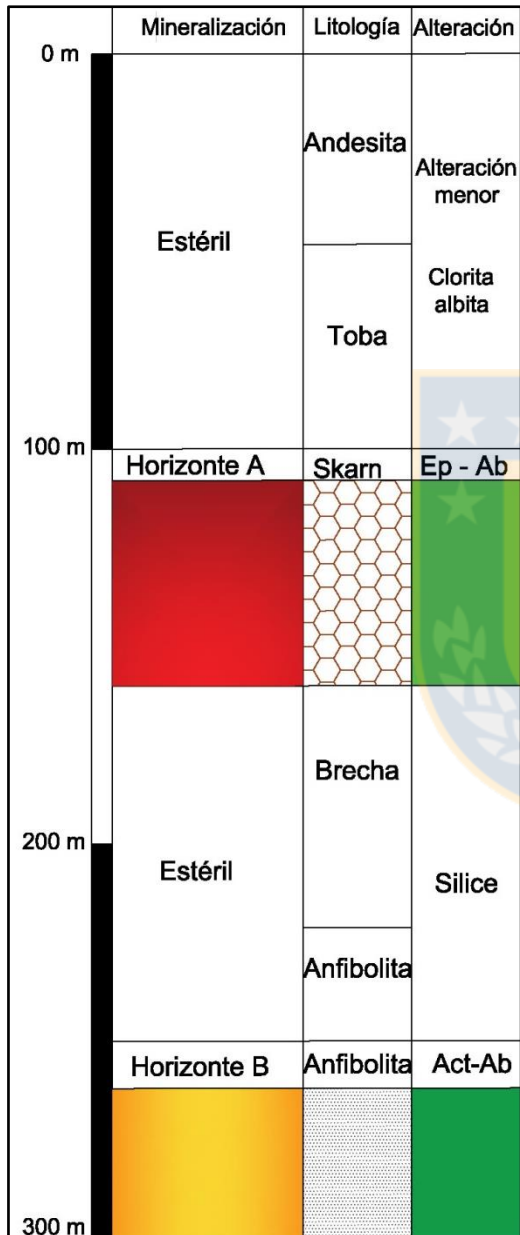
La primera de ellas, sugiere que correspondería a un depósito tipo skarn (Narváez y Araya, 1998; Sugaki y otros, 2000; Río Tinto, 2001), en la que se desarrollaron dos etapas mineralizadoras, asociadas a la progresión propia de este tipo de depósito. Se plantea que en primer lugar sobrevino una etapa progradante, debido a la intrusión de cuerpos magmáticos en la que aconteció metamorfismo de contacto. A esta etapa se le atribuye mineralización de: pirrotina, pirita, calcopirita y magnetita, con cristalizaciones *in situ* y exigua removilización y/o aporte externo. La segunda etapa es retrogradante hidrotermal, debido a la incorporación de aguas meteóricas al fluido, de donde derivan alteraciones y metasomatismo desarrollándose silicificación, biotitización y cloritización en las rocas. A causa de la acción hidrotermal existió removilización de los minerales metálicos preexistentes cercanos o distantes a su fuente, que incluyó pirita, calcopirita y bornita, lo que trajo consigo una acumulación mayor de minerales (Narváez y Araya, 1998).

Por otro lado Díaz y Corvalán, (2015) junto a Castellón (2017) aluden que Panulcillo sería un yacimiento tipo IOCG con un skarn asociado. Castellón (2017) aclara que existieron dos eventos mineralizadores primordiales. El primero de ellos a causa de la intrusión de diques microdioríticos responsable de la mineralización de Fe-Cu-Au y un segundo evento donde habría una componente hidrotermal involucrada, que transportó cobre junto a otros elementos, incluido el cobalto. Plantea que en primer lugar cristaliza magnetita junto a una alteración potásica, seguido de mineralización de calcopirita, pirita y bornita acompañada de alteración hidrotermal de: actinolita, turmalina, anfíbolita, clorita, epidota y sericita. Finalmente sugiere que los sulfuros se habrían oxidados dando origen a oxidados de cobre.

En la presente investigación se estudiaron sondajes que configuran la parte norte del cuerpo mineralizado principal de Panulcillo, en el que se definieron dos horizontes mineralizados, de los cuales se examinó su litología, mineralización, alteración hidrotermal preponderante y diversos aspectos texturales y composicionales, tanto macroscópicamente como microscópicamente, que permiten dar nuevos antecedentes sobre los procesos mineralizadores en Panulcillo y complementar lo ya referido.

Los dos horizontes mineralizados descritos anteriormente se pueden correlacionar en términos generales con tramos mineralizados definidos en el informe de Narváez y Araya (1998). El más superficial está espacialmente ligado a la unidad Skarn de Granate con intercalaciones importantes de la unidad tobácea (Figura 6.01.), lo que se puede enlazar con lo detallado por los autores citados, ya que ellos establecen una sección de características similares y lo atribuyen a la unidad de “Granatitas”, que se correlacionaría a la unidad Skarn de Granate. El segundo horizonte aparece en la unidad Anfíbolita, lo que difiere a lo señalado por los autores, pues a pesar que por espacialidad podrían corresponderse, afirman que este horizonte se sitúa en la unidad de “Andesitas Basales” y según lo visto en la etapa de terreno y posterior análisis microscópico (Anexo II MC4, MC6), las rocas de ese dominio comprenden un complejo metamórfico con protolito volcánico. Un rasgo distintivo del Horizonte A es la presencia de una pervasiva alteración de epidota-albita acompañado en menor grado de actinolita, lo que estaría vinculado a metasomatismo y alteración hidrotermal. Si bien este horizonte acorde a lo señalado por Narváez y Araya (1998), estaría enmarcado dentro de una etapa progradada con formación de

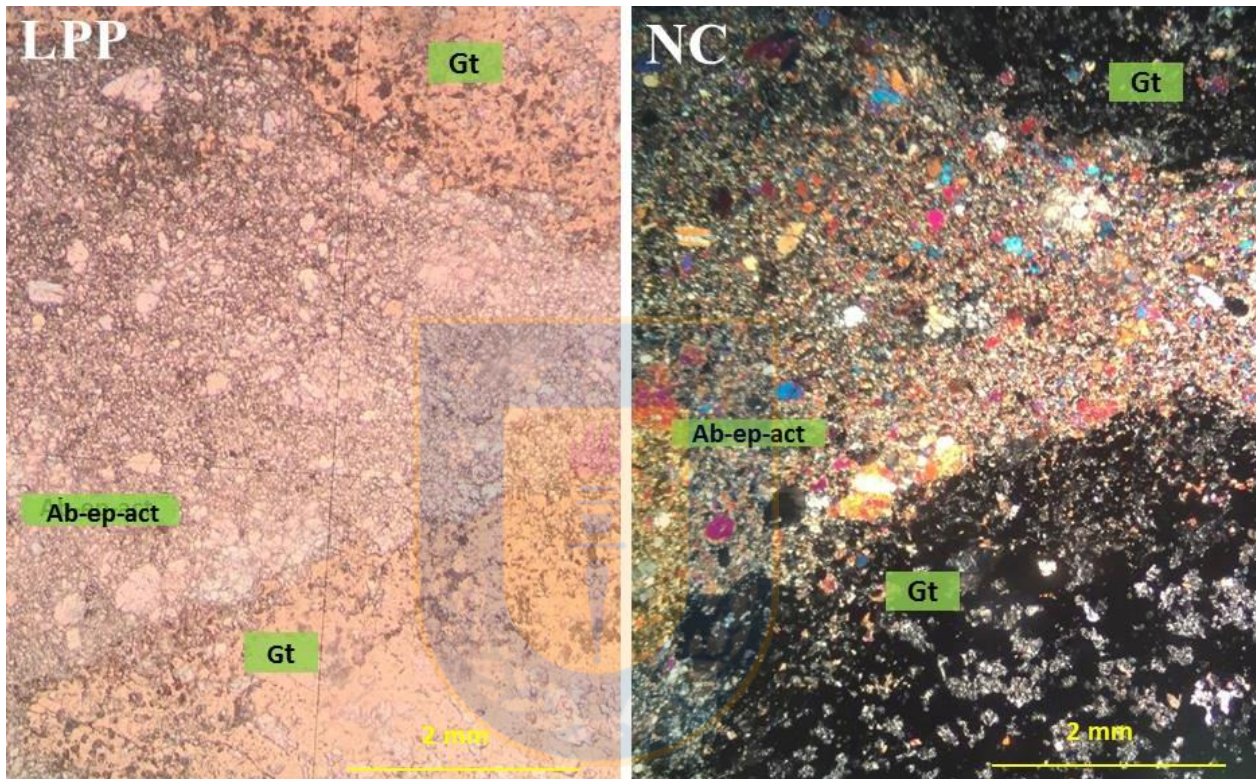
minerales de ganga anhidros como: granate, diópsido, wollastonita y mineralización *in situ*, aspectos texturales y composicionales insinúan que en este horizonte habría también una fuerte participación hidrotermal posterior, con mineralización de metálicos como calcopirita, pirita y cobaltita, acompañado de minerales hidratados como epidota y actinolita.



**Figura 6.01. Esquema general de mineralización, litología y alteración del área de estudio.** En color rojo se muestra ubicación de Horizonte A y en amarillo la del Horizonte B, con su litología y alteración hidrotermal dominante correspondiente. Ep-Ab: epidota-albita. Act-Ab: actinolita-albita.

Lo mencionado anteriormente puede evidenciarse en la Microfotografía 11 (muestra MP3, sondaje DDH-98126, Anexo III), la que incluye una sección del Horizonte mineralizado A. Esta muestra (MP3) está situada en la intercalación entre la unidad de Skarn y la unidad Tobácea con

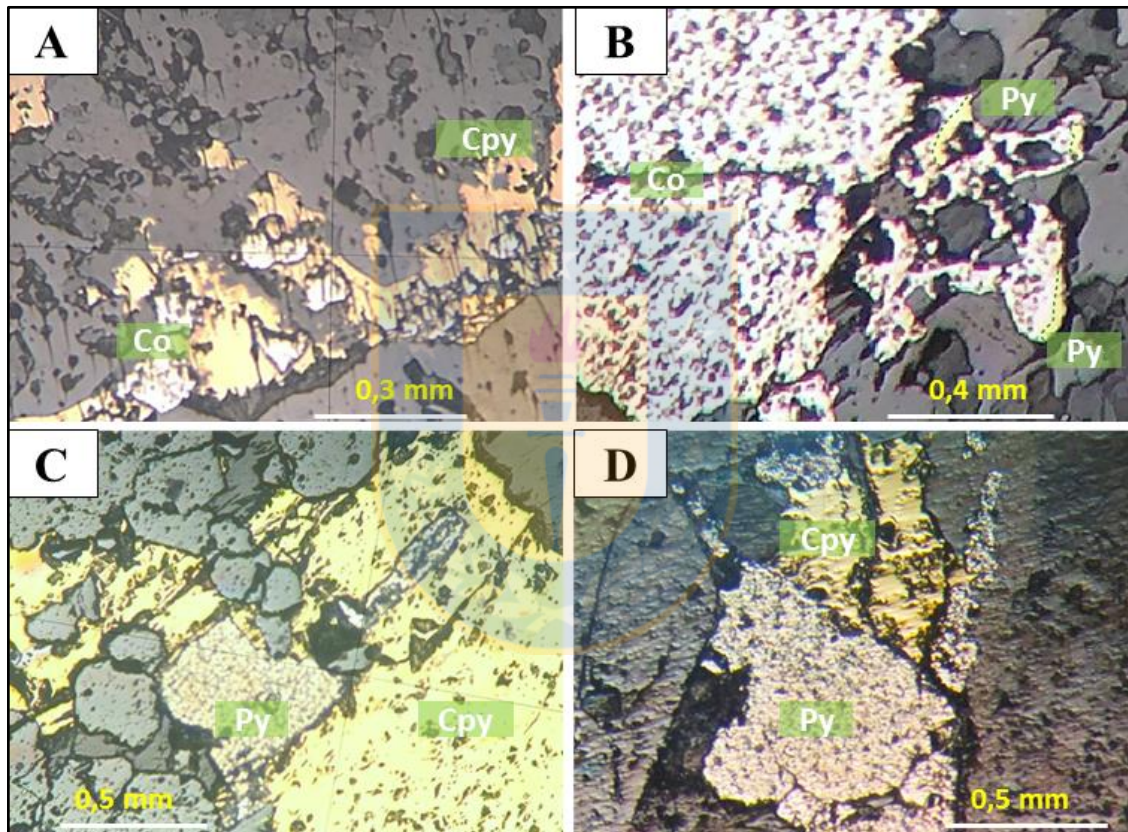
menas diseminadas de cobre, pero microscópicamente solo abarca la secuencia de tobas. En la microfotografía se aprecia granate, el cual se superpone a parte de la unidad volcánica, la que se aprecia inalterada en relación a albita-epidota-actinolita y está en contacto con una parte de la toba con pervasiva alteración de epidota y actinolita, que de acuerdo al modelo clásico de la progresión de un skarn, serían atribuibles a una etapa retrogradante (Einaudi, 1981).



**Microfotografía 11** Unidad volcánica donde coexisten minerales de etapa progradante y retrogradante. Izquierda luz polarizada plana, derecha nicoles cruzados. Gt: granate sobre secuencia volcánica, Ab-ep-act: asociación de albita-epidota-actinolita en unidad volcánica. MP3. (Anexo III). (Sondaje DDH-98126, 220,8).

En general, la mineralización diseminada en el Horizonte A se compone de calcopirita, pirita, magnetita y en menor medida cobaltita. Mediante revisión microscópica de muestras pertenecientes a este horizonte (muestras MP3, MP4, MP5, sondaje DDH-98126, Anexo III), se ha constatado que la calcopirita es el mineral que más abunda. En cuanto a la cobaltita en el Horizonte A se encuentra diseminada y en vetillas. Surge en los dominios de intenso metasomatismo y alteración acompañado de pirita y calcopirita. Cuando su ocurrencia es directamente diseminada se superpone a la calcopirita, lo que constata cristalización posterior a ella (Microfotografía 12.A.). También, se han identificado texturas de reemplazo e

intercrecimiento con pirita, en la que se observa *pseudomorfismo* de cobaltita en el sulfuro de hierro, además de relictos de pirita en la cobaltita neoformada (Microfotografía 12.B.). Estas texturas de reemplazo son el resultado de disolución y depositación capilar simultánea (Maksaev, 2001), en el cual el nuevo mineral, en este caso cobaltita, crece sobre la pirita. La calcopirita por su lado se muestra en cristales pequeños (0,2.mm-0,3mm) en conjunto a magnetita. En ciertos sectores cristales de pirita crecen sobre el sulfuro de cobre, pero en otras secciones es la calcopirita la que se sobrepone a la pirita (Microfotografía 12. C. y D.).



**Microfotografía 12** Relaciones de contacto entre minerales de mena. Vista en Luz polarizada plana. Co: cobaltita, Cpy: calcopirita, Py: pirita. **A.** Cobaltita sobre calcopirita **B.** Relictos de pirita sobre cobaltita **C.** Pirita sobre calcopirita **D.** Reemplazo de calcopirita en pirita.

En base a las relaciones de contacto, es plausible atribuir que la mineralización metálica diseminada del Horizonte A no habría acontecido en tan solo un evento mineralizador, sino que en sucesivas etapas, lo que provoca sobreposición de minerales, texturas de reemplazo y la consecuente proliferación de halos de alteración, estando la aparición de cobaltita restringida a

una etapa con mayor participación hidrotermal, es decir, una retrogradante, mientras que la calcopirita estaría anexada a dos eventos distintos de mineralización en el mismo horizonte.

Entre los dos horizontes mineralizados deviene un extenso tramo de alteración que varía entre 50 m a 100 m dependiendo del sondaje, que incluye en las cercanías del Horizonte A, alteración pervasiva de epidota-albita, seguida de una intensa silificación donde hay halos de albita-epidota y actinolita. Hacia el Horizonte B la alteración que domina es la de actinolita-albita, con halos y nódulos de epidota-albita. El Horizonte B posee distintas ocurrencias para su mineralización, una porción donde domina la calcopirita diseminada, acompañada de bornita de menor ley, y otro sector de gran fertilidad de metales, que surgen esencialmente en vetillas y diseminaciones, la que está acompañada por una penetrante alteración de actinolita-albita y epidota, generándose un entramado con distintos productos metasomáticos que incluye granate, (mineral característico de etapa prograda) y biotita, que es un mineral enlazado a alteraciones de mayor temperatura, por lo que en este tramo, podría indicar una mayor cercanía al cuerpo intrusivo. En esta sección la cobaltita presenta una ocurrencia similar a la del Horizonte A, diseminada junto a pirita y calcopirita y en vetillas de epidota-magnetita-pirita. Estas estructuras se observan en las tres zonas de cobalto enunciadas en este estudio, cortan el cuerpo mineralizado incluyendo los lugares donde hay cobaltita diseminada y también aparecen en fracciones marginales (322 m PAN-02, 334 m, DDH-98126) aunque discretamente y sin mayor continuidad. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede inferir que estas estructuras se generaron posteriores a la cristalización de cobaltita diseminada.

En consecuencia a lo expuesto anteriormente se propone que el estilo y modelo de mineralización de la zona estudiada se relacionaría directamente con la evolución propia de un depósito tipo skarn (Meinert, 2005) (Figura 6.02.). En primer lugar, debido a la intrusión de cuerpos magmáticos, se genera metamorfismo isoquímico con recristalización, creando anfibolitas, metatobas y hornfels. A continuación vendría una etapa de bimetasomatismo entre la secuencia calcárea y las unidades de Tobas y Anfibolitas, donde se originaría granates en las dos últimas unidades mencionadas. Esta etapa concluiría con el desarrollo del skarn propiamente tal con aparición de minerales calcosilicatados anhidros en la unidad “Skarn de granate” y “Anfibolitas”, junto a mineralización temprana de magnetita y en menor medida calcopirita y pirita,

acompañada de biotita. Posteriormente, debido al enfriamiento del cuerpo intrusivo y por interacción del fluido con aguas meteóricas o metamórficas, se originarían fluidos hidrotermales que vuelven a nutrir el Horizonte A y B, con cristalización de cobaltita, pirita, bornita y calcopirita, los que se sobreponen a los metálicos previamente formados y se acompañan de alteración de epidota y actinolita. En cuanto a éstos últimos, se constata que la asociación albita-actinolita, es anterior a epidota-albita, siendo ésta última la que espacialmente está más asociada a la mineralización, por lo que sugiere un fuerte vínculo entre este grupo de alteración y la mineralización. Por su lado, las vetillas de epidota-magnetita-pirita-cobaltita estarían enlazadas a una etapa tardía de la etapa hidrotermal.

Etapa Mineral	Etapa Progradante			Etapa Retrogradante			Alteración Supérgena	
	Metamorfismo isoquímico	Metasomatismo anhidro	Evento mineralizador I	Alteración Hidrotermal	Evento mineralizador II	Evento mineralizador III (vetas)	Enriquecimiento secundario	Mineralización manganeso
cuarzo	—							
plagioclasa	—							
calcita	—							
granate		—						
wollastonita		—						
dióxido		—						
talco		—						
biotita			—					
magnetita			—					
calcopirita			—					
pirita			—					
actinolita				—				
albita				—				
clorita				—				
epidota				—				
cobaltita					—			
pirrotina					—			
bornita			—		—			
covelina							—	
malaquita							—	
atacamita							—	
crisocola							—	
hematita							—	
pirolusita								—
limonita								—
arcillas								—

**Figura 6.02. Modelo paragenético propuesto.** Líneas continuas en naranja indican participación preponderante del mineral en la etapa correspondiente. Líneas segmentadas indican participación menor del mineral en la etapa indicada.

Finalmente, ocurriría una etapa supérgena con oxidación de minerales formando malaquita, crisocola, atacamita y hematita. Además sucedería la mineralización de manganeso restringida a zonas más superficiales.

Cabe señalar que, a pesar de que en el mapeo geológico no se observaron intrusivos de gran envergadura, desde el punto de vista metalogénico éstos tienen gran injerencia en el área, ya que hacia el sur se han reconocido diques microdioríticos, que habrían gatillado el proceso mineralizador en Panulcillo (Castellón, 2017), los que podrían ubicarse a mayores profundidades de las columnas descritas. Hacia el norte se localiza el Plutón Pejerreyes que de acuerdo a Castellón (2017) sería estéril y cortaría la mineralización principal, pero debido a la cercanía con los sondeos estudiados, la aparición de este intrusivo puede haber propiciado nuevos procesos metasomáticos, nutriendo el entramado de productos de alteración.





## 7. CONCLUSIONES

La geología de la sección estudiada está fuertemente condicionada por procesos de metamorfismo de contacto, responsable de las litologías, alteraciones hidrotermales y mineralización de la zona.

Las rocas observadas se componen de una secuencia volcánica del Cretácico representada por las unidades litológicas Andesita, Tobas y Brecha que han servido de protolito para la formación de las rocas de la unidad Anfibolitas, donde esta última, junto a la unidad Skarn de Granate integran el grupo de rocas metamórficas de la zona.

La alteración de epidota-albita y actinolita-albita, obliteran totalmente la textura y composición de la roca. Se ha reconocido que en fracciones donde estas alteraciones son más pervasivas, coinciden espacialmente con los minerales de interés económico, especialmente la asociación epidota-albita, la que se dispone en halos sobre la asociación de actinolita.

La evolución de la mineralización se puede atribuir a la de un tipo skarn, con una etapa progradante y una etapa hidrotermal retrogradante, responsable de la mineralización de cobalto, la que se encuentra asociada a la pirita, interactuando en texturas de reemplazo e intercrecimiento. Las asociaciones de alteración epidota-albita y actinolita-albita están contextualizadas a la etapa hidrotermal del desarrollo de un skarn, con subsecuente mineralización de metálicos, por lo que se conectarían a una etapa de fertilidad metalogénica en el depósito y pueden constituir una herramienta ante futuras exploraciones de cobalto en el distrito, el que se concentra en estos sectores.

En el cuerpo mineralizado de Panulcillo existe mineralización de cobalto, la cual se presenta como un sulfuarseniuro denominado cobaltita. Este mineral ocurre en diseminaciones acompañado de pirita y calcopirita y en vetillas de 3 cm a 5 cm compuestas de epidota, magnetita y pirita. La cobaltita se distribuye a lo largo de dos horizontes mineralizados denominados Horizonte A y Horizonte B. El primero de ellos se emplaza en la unidad litológica

Skarn de Granate y la secuencia de tobas, mientras que el segundo se ubica en la unidad litológica Anfibolitas.

La ocurrencia de cobaltita en vetillas de epidota-magnetita-pirita-cobaltita comprende una forma importante de la aparición de este metal, por lo que la identificación de estas estructuras, las que se determinan por el elevado porcentaje de epidota, representa un indicador de presencia de cobalto en el yacimiento Panulcillo.

La mineralización de cobalto se concentra en tres zonas a lo largo de los sondajes, las dos primeras distribuidas en el Horizonte A y una en el Horizonte B. La manera en cómo se presenta la cobaltita en estas tres zonas es similar, pero la continuidad y extensión de cada porción difiere, siendo la Zona 1 el lugar como mayor cantidad de cobaltita, la cual aparece diseminada y en secciones puede llegar a integrar entre un 2% a 5% de la composición de la roca, y en vetillas en la que compone el 10% de la estructura, las que están espaciadas desde un par de centímetros hasta un metro.

A pesar que este estudio constituye un primer acercamiento a la mineralización de cobalto y está enfocado en los aspectos geológicos de ésta, comparando lo observado en Panulcillo con datos obtenidos en la literatura existente sobre yacimientos en que se ha explotado cobalto, donde las leyes superan el 1% de Co (Townley y otros, 2018), se puede constatar que la cantidad de cobaltita presente es más bien acotada y a pesar que en las tramos definidos existe mineralización de cobalto, el porcentaje de cobaltita estimada no superaría el 0,3% y sucede generalmente espaciada en intervalos, por lo que ante una eventual explotación, no podría ser recuperada como producto principal, si no que como sub-producto del cobre. De todos modos, este estudio debe ser complementado y respaldado con análisis químicos, para comprobar las leyes de cobalto y así poder determinar el verdadero potencial económico en Panulcillo.

## 8. REFERENCIAS

ABERG, G.; AGUIRRE, L. & NYSTRÖM, J.O. 1984. Spreading subsidence and generation of ensialic marginal basins: an example from the early Cretaceous of Central Chile. *Geological society of London, Special Publication*. No. **16**: 185-193.

AGUIRRE, L. & EGERT, E. 1962. Las Formaciones manganesíferas de la región Quebrada Marquesa, provincia de Coquimbo. *Revista Minerale*s. No. **76**: 25-37.

AGUIRRE, L. & EGERT, E. 1965. Cuadrángulo Quebrada Marquesa, Provincia de Coquimbo. Instituto investigación geológica, carta geológica de Chile No. **95**: 92 pp

BÖRGEL, R. 1983. Geomorfología de Chile. Instituto Geográfico Militar: 182 pp. Santiago.

CASTELLÓN, R. 2017. Geología del Yacimiento Panulcillo, características geoquímicas y control estructural de cuerpos mineralizados. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería. 190 pp.

CEMBRANO, J.; GARRIDO, I. & MARQUARDT, M. 2009. Tectonic settings of IOCG deposits in the Central Andes: Strike-Slip-dominated deformation. Actas XII Congreso Geológico Chileno, Santiago, Chile. 4 pp.

CHARRIER, R.; PINTO, L. & RODRÍGUEZ, M. 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. The Geology of Chile. MORENO, T. & GIBBONS, W. (Editores). *The Geological Society*: 21-114.

COLLAO, S. 2008. Características de los principales minerales metálicos y submetálicos mediante microscopía de luz reflejada. Apuntes de curso microscopía de menas. Universidad de Concepción, Chile.

D'AUBERDE, G. 1969. Evaluación de los conocimientos existentes sobre Cobalto, Manganeso y mercurio. Informe PNUD/CORFO/IIRN. 259 pp.

DIAZ, A. & CORVALÁN, M. 2015. Modelo genético preliminar de Mina Panulcillo y su relación con los depósitos de Fe-P y del tipo IOCG presentes en la Provincia Metalogénica de la Cordillera de la Costa (PMCC), Region de Coquimbo, norte de Chile. Actas XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena, Chile. 4pp.

EINAUDI, M.T.; MEINERT, L.D. & NEWBERRY, R.J. 1981. Skarn Deposits. *Economic Geology*. Vol **75** Aniversario: 317-391.

EMPARÁN, C. & PINEDA, G. 2006. Geología del área de Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, serie básica, No. **96**: 85 pp.

KLEIN, C. & HURLBUT, C. 1997. Manual de mineralogía (basado en la obra de J.D. Dana), 4ªed. Tomo II: 360-679.

LACASSIE, J.; DIAZ, A.; RUIZ, J. & VIVALLO, W. 2015. Geoquímica de yacimientos metálicos y de sedimentos, de las regiones de Atacama y Coquimbo, norte de Chile. Actas de XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena, Chile. 4 pp.

LAGAS, G. 2016. Estudio de la química mineral de la pirita del yacimiento magnetita-apatito de Los Colorados, Región de Atacama, Chile. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Chile. 118 pp.

MAKSAEV, V. 2001. Reseña metalogénica de Chile y los procesos que determinan la metalogénesis Andina. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

MAKSAEV, V. 2001. Depósitos tipo Skarn. Curso de metalogénesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

MEINERT, L.; DIPPLE, G. & NICOLESCU, S. 2005. World Skarn deposits. *Society of economic geologist, economic geology*. **100<sup>th</sup>** Anniversary Vol: 299-336.

NARVAÉZ, P.; ARAYA, M. & NAVARRO, J. 1998. Informe y evaluación de reservas yacimiento Panulcillo, Proyecto Delta- Ovalle, La Serena, Región de Coquimbo, Chile. Empresa Nacional de minería: 25 pp. (Inédito).

RÍO TINTO, & ENAMI 2001. Informe final Proyecto Delta. Empresa Nacional de Minería (Inédito).

SCHDMID, R. 1981. Descriptive nomenclature and classification of pyroclastics deposits and fragments: Recommendations of the IUSG Subcomissions on the systematic of Igneous rocks. *Geology*, No. **9**: 41-43.

SERNAGEOMIN, 2017. Anuario de la minería de Chile, Santiago, Chile. 274 pp.

STRECKEISEN, A. 1976. To each plutonick rock proper name. *Earth-science Reviews*. Vol. **12**: 1-33.

SUGAKI, A.; CAMPOS, E. & KOJIMA, S. 2000. Mineralogy of the Panulcillo skarn copper deposits, Coquimbo Region, Chile. *Revista geológica de Chile*. Vol. **27**, (2): 139-155.

TOWNLEY, B.; DIAZ, A. & LUCA R. 2018. Evaluación de potenciales recursos primarios o subproductos de Co y Mn en Chile. Informe CORFO. 117 pp.

VASALLO, L.F. 2008. Yacimientos minerales metálicos. Centro de Geociencias UNAM. México, **4<sup>a</sup>**ed: 138 pp.



## ANEXO I. MAPEO DE SONDAJES.

### Columna PAN 00 A (0-175 m)

Nombre	Tipo	Coordenada E	Coordenada N	Cota	Profundidad
PAN 00	Aire reverso	287.071 m	6.628.812 m	607 m	336 m




M	Lit.	Co	Min.	Alt.	Est.	Observaciones
0						Andesita con albitas euhedrales(3mm)
5						y mineralización de óxidos de manganeso
10						
15						16- 22 m falla, meteorización química.
20						
25						Material blanco producto de meteorización
30						
35						
40						
45						Toba cristalina, calcita en fracturas
50						
55						
60						
65						
70						
75						
80						
85						
90						Toba cristalina alteración extrema a (ep-ab)
95						Intercalación granatita toba cristalina(ep-ab)
100						Calcopirita diseminada y en venillas (Horizonte A)
105						Intercalación toba-skarn, domina skarn
110						Zona 1 de cobalto, abundante cobaltita diseminada
115						
120						
125						
130						
135						Zona 2 de cobalto,
140						
145						
150						zona de falla, sobreimposición oxidados de cobre
155						
160						mineralización diseminada
165						
170						
175						168 Aparece secuencia volcánica (alterada ep-ab)

#### SIMBOLOGÍA


##### Litología

-  Andesita
-  Toba cristalina
-  Toba litica
-  Skarn de granate
-  Brecha
-  Anfibolita

##### Alteración mayor

-  Epidota-albita
-  Actinolita-albita
-  Silice rosa

##### Alteración menor

-  Biotitización
-  Cloritización
-  Albitización
-  Silicificación

##### Mineralización

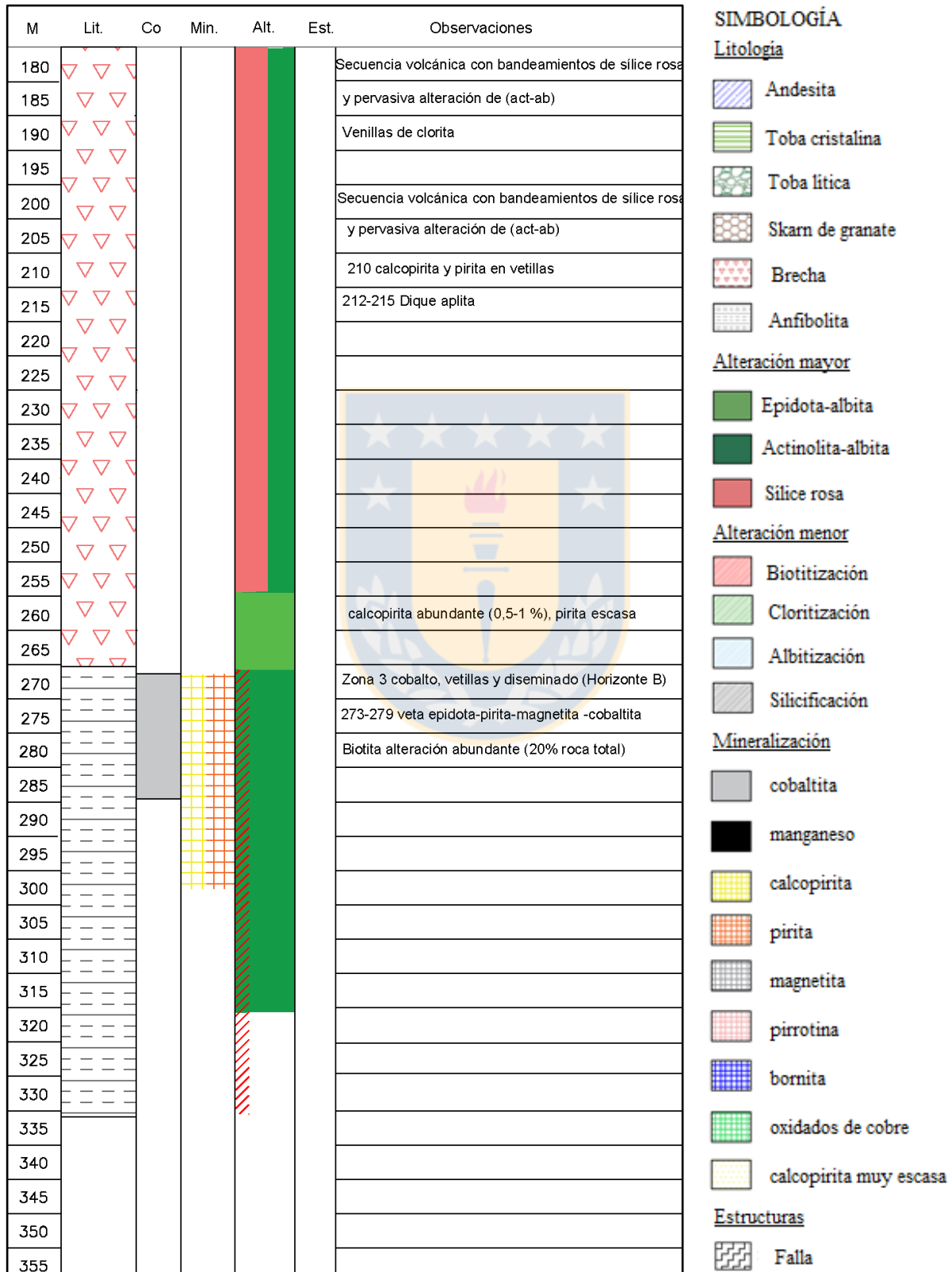
-  cobaltita
-  manganeso
-  calcopirita
-  pirita
-  magnetita
-  pirrotina
-  bornita
-  oxidados de cobre
-  calcopirita muy escasa

##### Estructuras

-  Falla

### Columna PAN 00 B (175 m- 336 m)

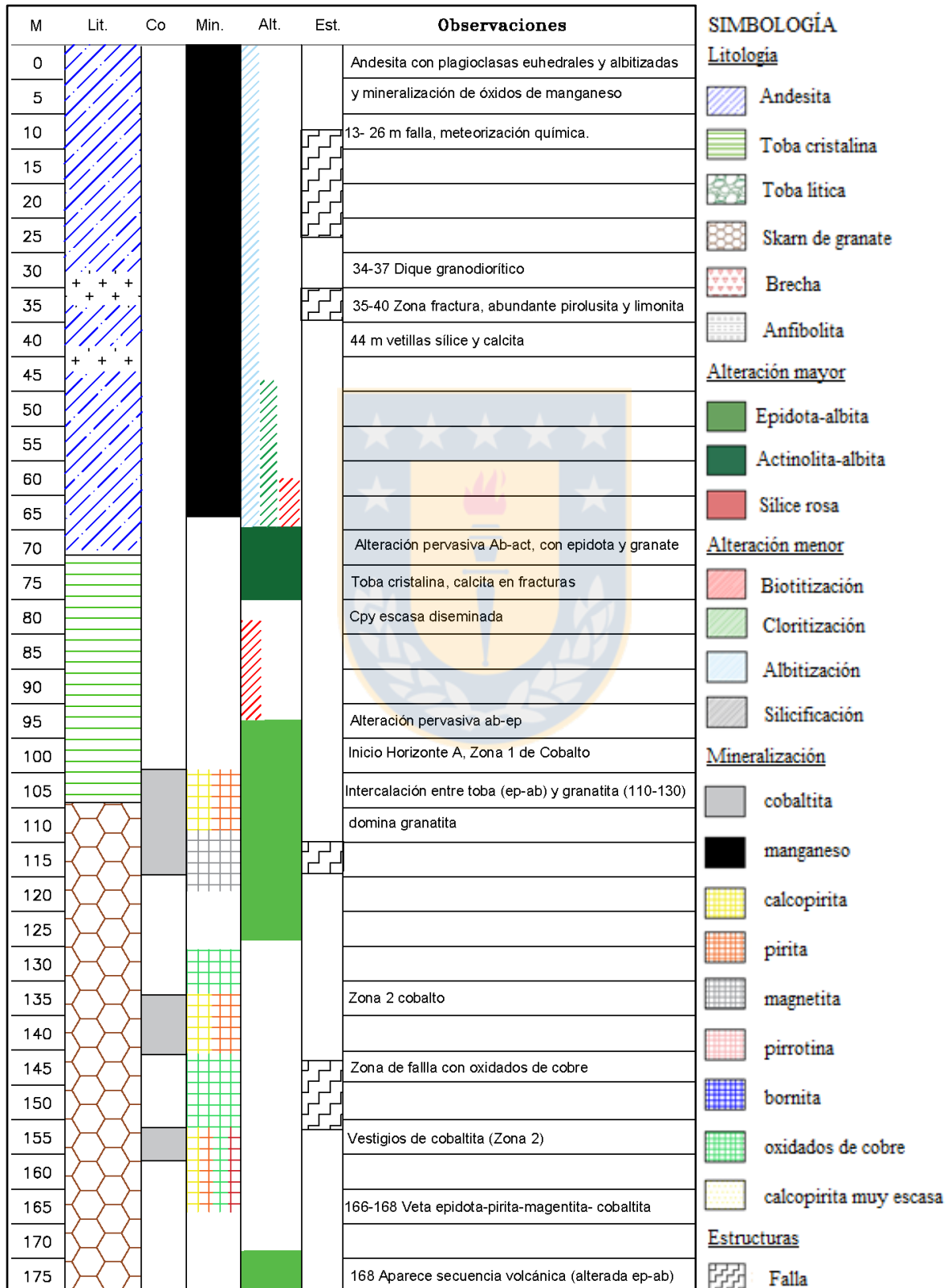
Nombre	Tipo	Coordenada E	Coordenada N	Cota	Profundidad
PAN 00	Aire reverso	287.071 m	6.628.812 m	607 m	336 m





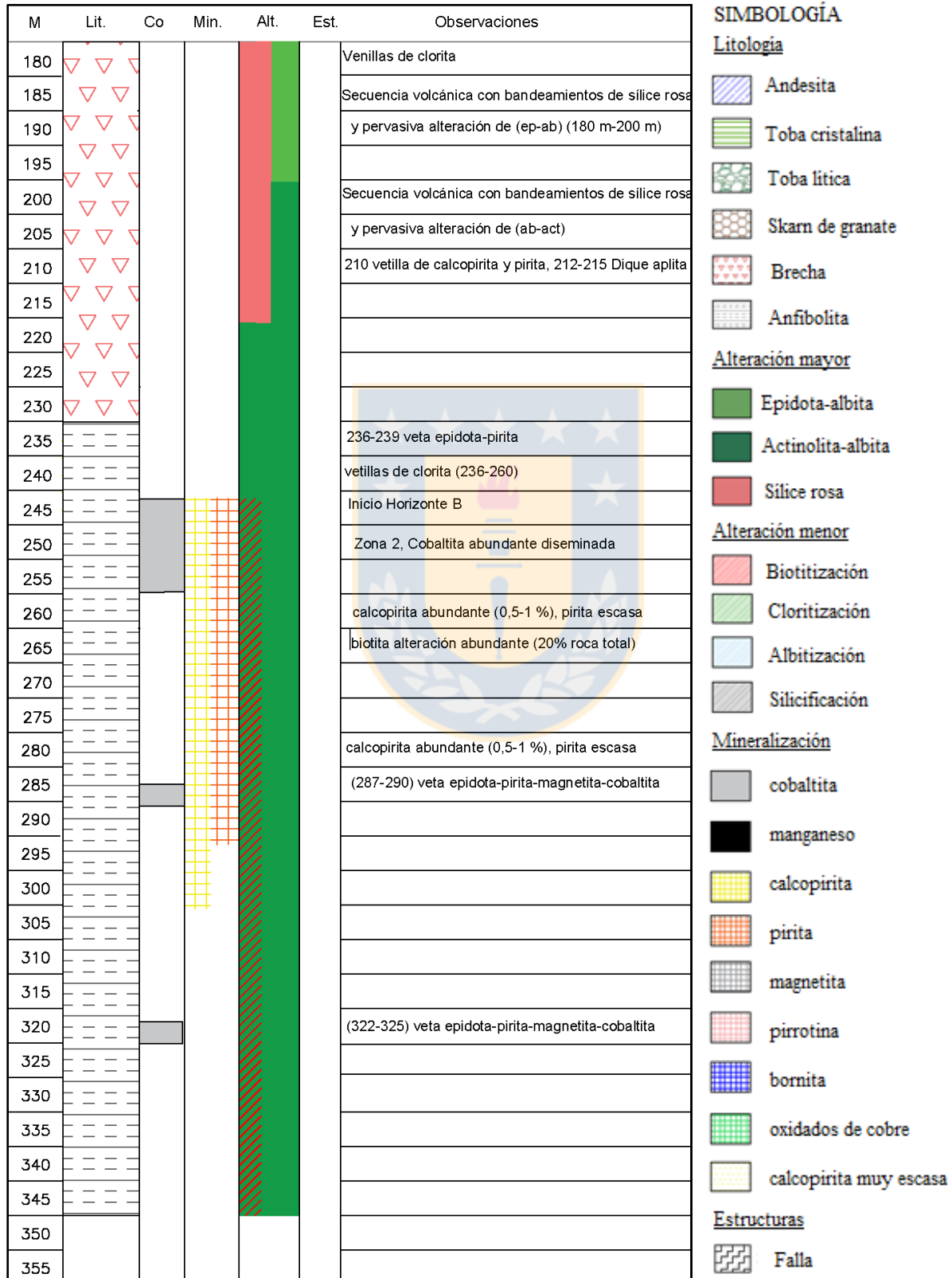
### Columna PAN 01 A (0 m-175 m)

Nombre	Tipo	Coordenada E	Coordenada N	Cota	Profundidad
PAN 01	Aire reverso	287.070 m	6.628.806 m	607 m	350 m



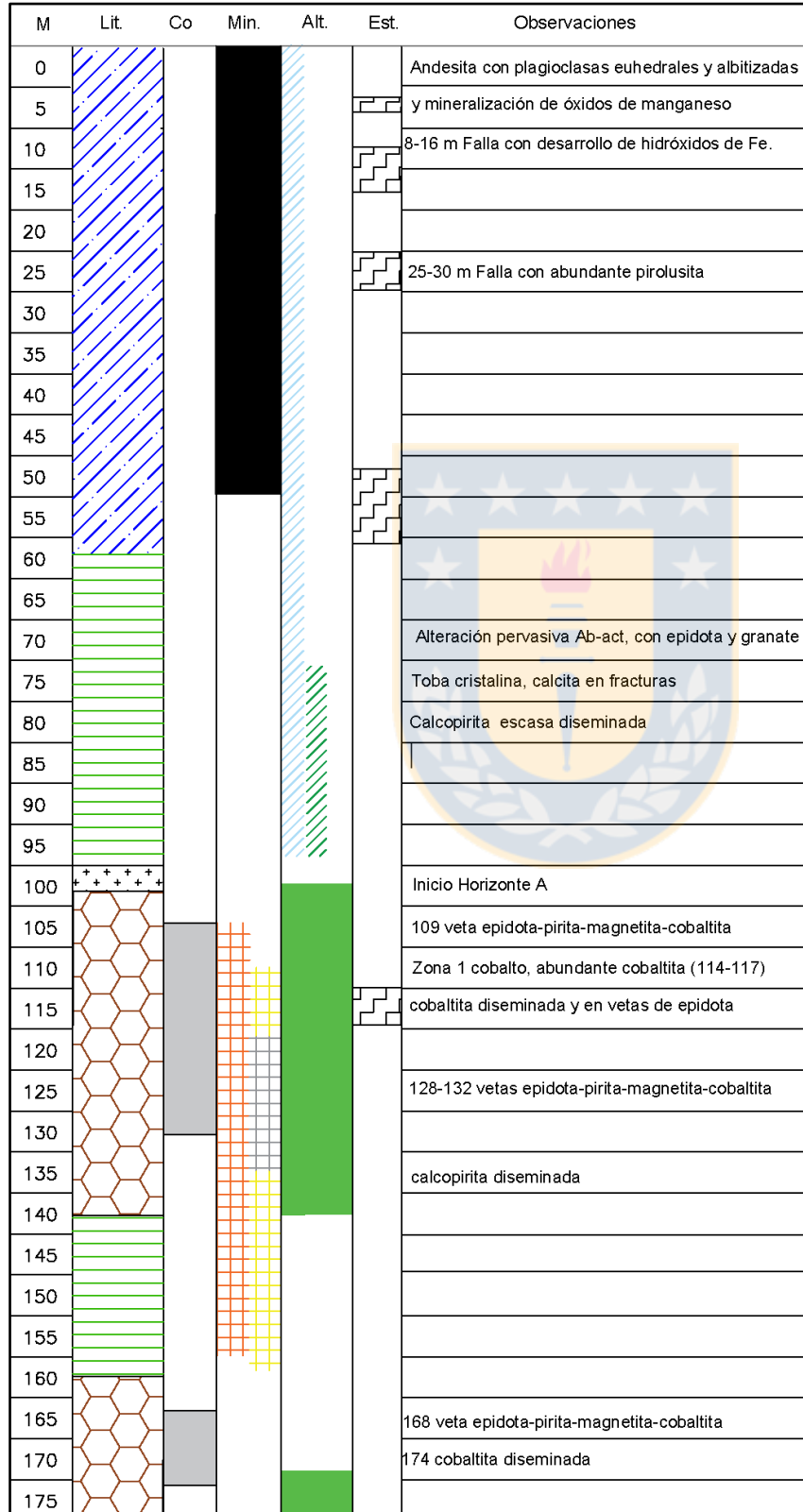
### Columna PAN 01 B (175 m-350 m)

Nombre	Tipo	Coordenada E	Coordenada N	Cota	Profundidad
PAN 01	Aire reverso	287.070 m	6.628.806 m	607 m	350 m



### Columna PAN 02 A (0 m-175 m)

Nombre	Tipo	Coordenada E	Coordenada N	Cota	Profundidad
PAN 02	Aire reverso	287.094 m	6.628.740 m	611 m	320 m






### Simbología

#### Unidades litológicas

-  Andesita
-  Toba Cristalina
-  Toba Lítica
-  Granatita
-  Brecha
-  Anfibolita









#### Alteración principal

-  Epidota-albita
-  Actinolita-albita
-  Sílice rosa


#### Alteraciones menores

-  Biotitización
-  Cloritización
-  Albitización
-  Silicificación

#### Mineralización

-  cobalto
-  manganeso
-  calcopirita
-  pirita
-  magnetita
-  pirrotina
-  bornita
-  oxidados de cobre
-  calcopirita muy escasa

#### Estructuras

-  falla

### Columna PAN 02 B (175 m-320 m)

Nombre	Tipo	Coordenada E	Coordenada N	Cota	Profundidad
PAN 02	Aire reverso	287.094 m	6.628.740 m	611 m	320 m




M	Lit.	Co	Min.	Alt.	Est.	Observaciones
180						
185						
190						(194) veta epidota-pirita
195						
200						
205						
210						Secuencia volcánica con bandeamientos de sílice rosa
215						y pervasiva alteración de (ep-ab) y (ab-act)
220						
225						
230						
235						
240						Disminuye alteración de sílice, domina (ab-act)
245						
250						
255						
260						
265						Biotita alteración abundante (20% roca total)
270						Inicio Horizonte B
275						Oxidados de cobre y calcopirita diseminada
280						calcopirita diseminada abundante (0,5-1 %)
285						(287-290) veta epidota-pirita-magnetita-cobaltita
290						
295						
300						calcopirita diseminada abundante y oxidados de cobre
305						
310						
315						calcopirita y bornita sobre 1%, vetillas de chl y ep
320						
325						
330						
335						

#### SIMBOLOGÍA





##### Litología

-  Andesita
-  Toba cristalina
-  Toba litica
-  Skarn de granate
-  Brecha
-  Anfibolita

##### Alteración mayor

-  Epidota-albita
-  Actinolita-albita
-  Sílice rosa

##### Alteración menor

-  Biotitización
-  Cloritización
-  Albitización
-  Silicificación

##### Mineralización

-  cobaltita
-  manganeso
-  calcopirita
-  pirita
-  magnetita
-  pirrotina
-  bornita
-  oxidados de cobre
-  calcopirita muy escasa

##### Estructuras

-  Falla

### Columna DDH-98125 A (0 m-175 m)

Nombre	Tipo	Coordenada E	Coordenada N	Cota	Profundidad
DDH-98125	Diamantino	287.095m	6.628.720 m	612 m	337 m

M	Litología	Cob	Min.	Alt.	Est.	Observaciones
0						Sobrecarga, testigo muy molido, se ve suelo
5						Zona de fallas, mineralización de mn
10						Secuencia Volcánica, intercalación toba y andesita
15						Meteorización química
20						23-25 Dique
25						
30						abundante % de líticos angulosos de granitoide
35						
40						
45						
50						
55						55-58 falla
60						
65						
70						
75						Roca con textura microfanerítica y elevado % de biotita
80						
85						
90						
95						
100						
105						Alteración extrema ab-ep, matriz "blanqueada"
110						Intercalación entre s. volcánica (ep-ab) y granatita
115						Halos alteracionales, sobreimpesición (ab-act), chl magnetita y pirrotina diseminada y en vetillas de 1 cm
120						calcopirita, pirita escasas y restringidas a zonas con epidota
125						
130						
135						Plagioclasas de hasta 1 cm orientados
140						Líticos de andesitas de hasta 4 cm
145						Halos alteracionales (clorita-epidota-albita)
150						Intercalación skam, granates y pirita escasa
155						
160						
165						
170						
175						Plagioclasas orientadas

#### SIMBOLOGÍA

##### Litología

- Andesita
- Toba cristalina
- Toba litica
- Skarn de granate
- Brecha
- Anfibolita

##### Alteración mayor

- Epidota-albita
- Actinolita-albita
- Silice rosa

##### Alteración menor

- Biotitización
- Cloritización
- Albitización
- Silicificación

##### Mineralización

- cobaltita
- manganeso
- calcopirita
- pirita
- magnetita
- pirrotina
- bornita
- oxidados de cobre
- calcopirita muy escasa

##### Estructuras

- Falla

### Columna DDH 98125 B (175 m- 337 m)

Nombre	Tipo	Coordenada E	Coordenada N	Cota	Profundidad
DDH-98125	Diamantino	287.095 m	6.628.720 m	612 m	337 m

M	Lit.	Co	Min.	Alt.	Est.	Observaciones
180						Transición entre secuencia volcánica (sil) y anfibolita
185						Indicios de calcopirita
190						
195						
200						Secuencia volcánica con bandeamientos de sílice rosa
205						
210						
215						
220						
225						
230						
235						
240						
245						Inicio Horizonte B
250						Calcopirita y bornita diseminada
255						magnetita y pirrotina diseminada y en vetas
260						epidota en nódulos, halo alteración (ab-act-chl-ep)
265						
270						
275						
280						
285						
290						
295						
300						
305						
310						
315						
320						biotitas orientadas
325						
330						
335						
340						
345						
350						
355						

#### SIMBOLOGÍA

##### Litología

- Andesita
- Toba cristalina
- Toba lítica
- Skarn de granate
- Brecha
- Anfibolita

##### Alteración mayor

- Epidota-albita
- Actinolita-albita
- Sílice rosa

##### Alteración menor

- Biotitización
- Cloritización
- Albitización
- Silicificación

##### Mineralización

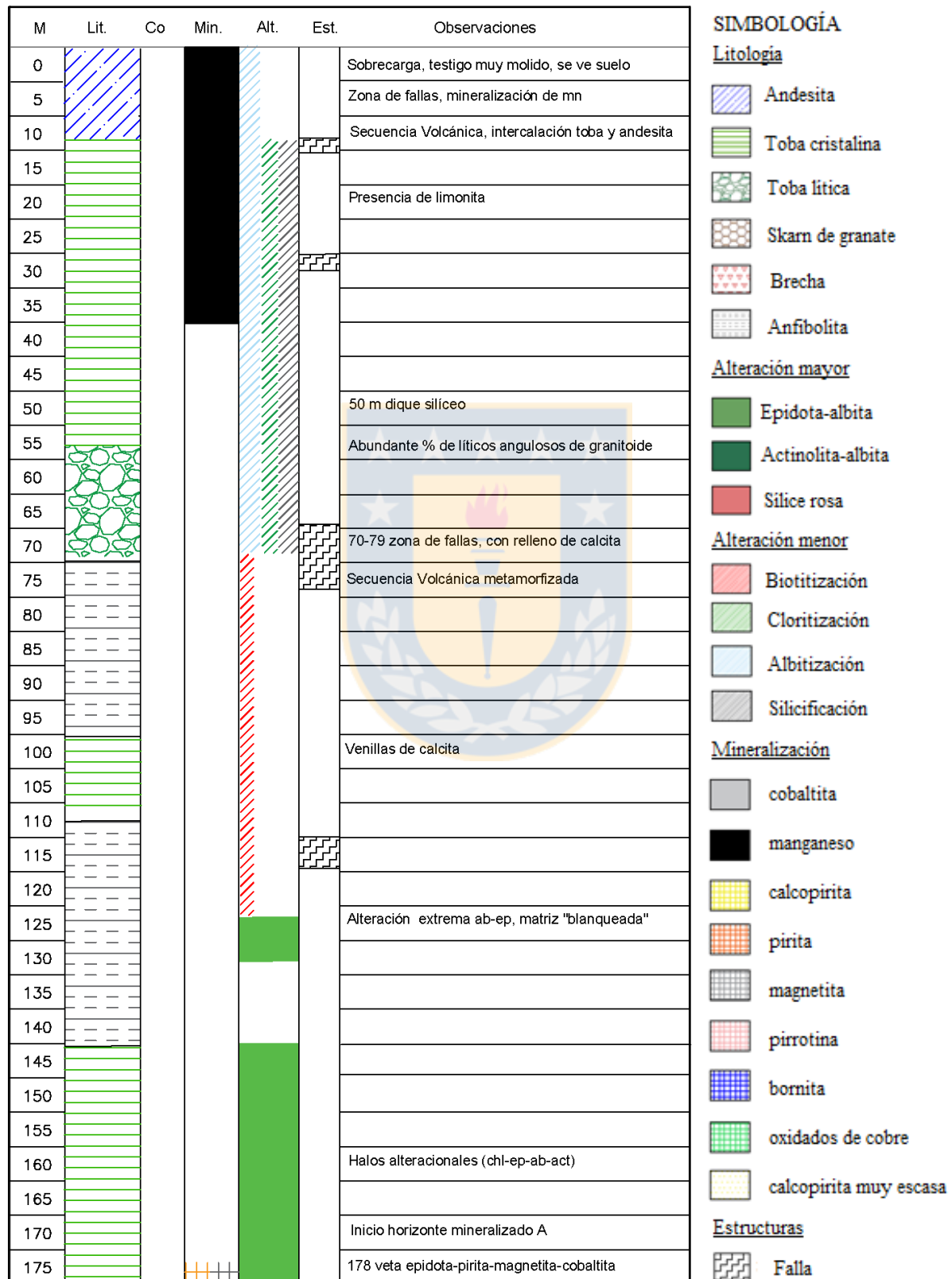
- cobaltita
- manganeso
- calcopirita
- pirita
- magnetita
- pirrotina
- bornita
- oxidados de cobre
- calcopirita muy escasa

##### Estructuras

- Falla

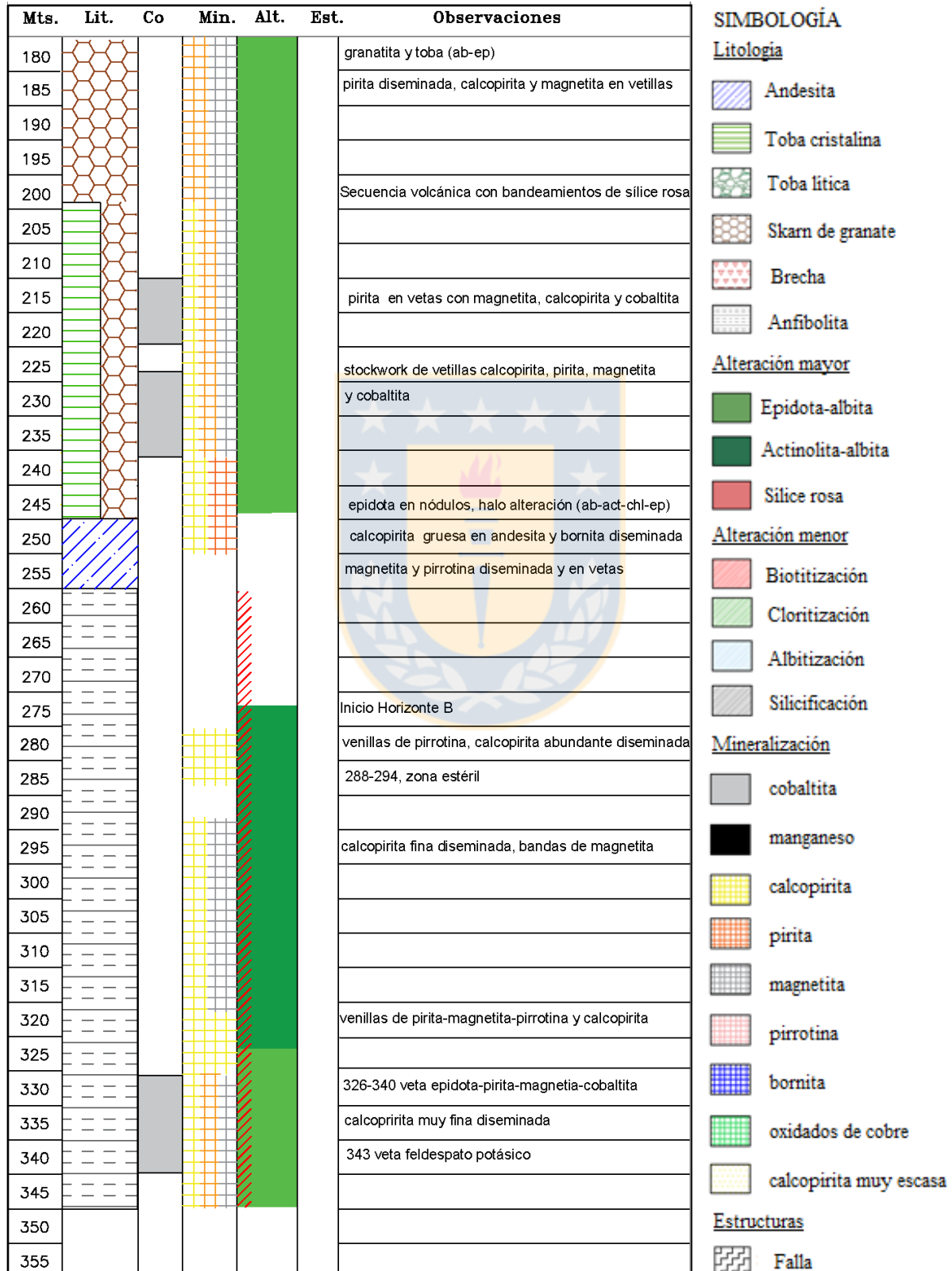
### Columna DDH-98126 A (0-175 m)

Nombre	Tipo	Coordenada E	Coordenada N	Cota	Profundidad
DDH-98126	Diamantino	287.095 m	6.628.720 m	612 m	350 m



### Columna DDH-98126 B (175 m-350 m)

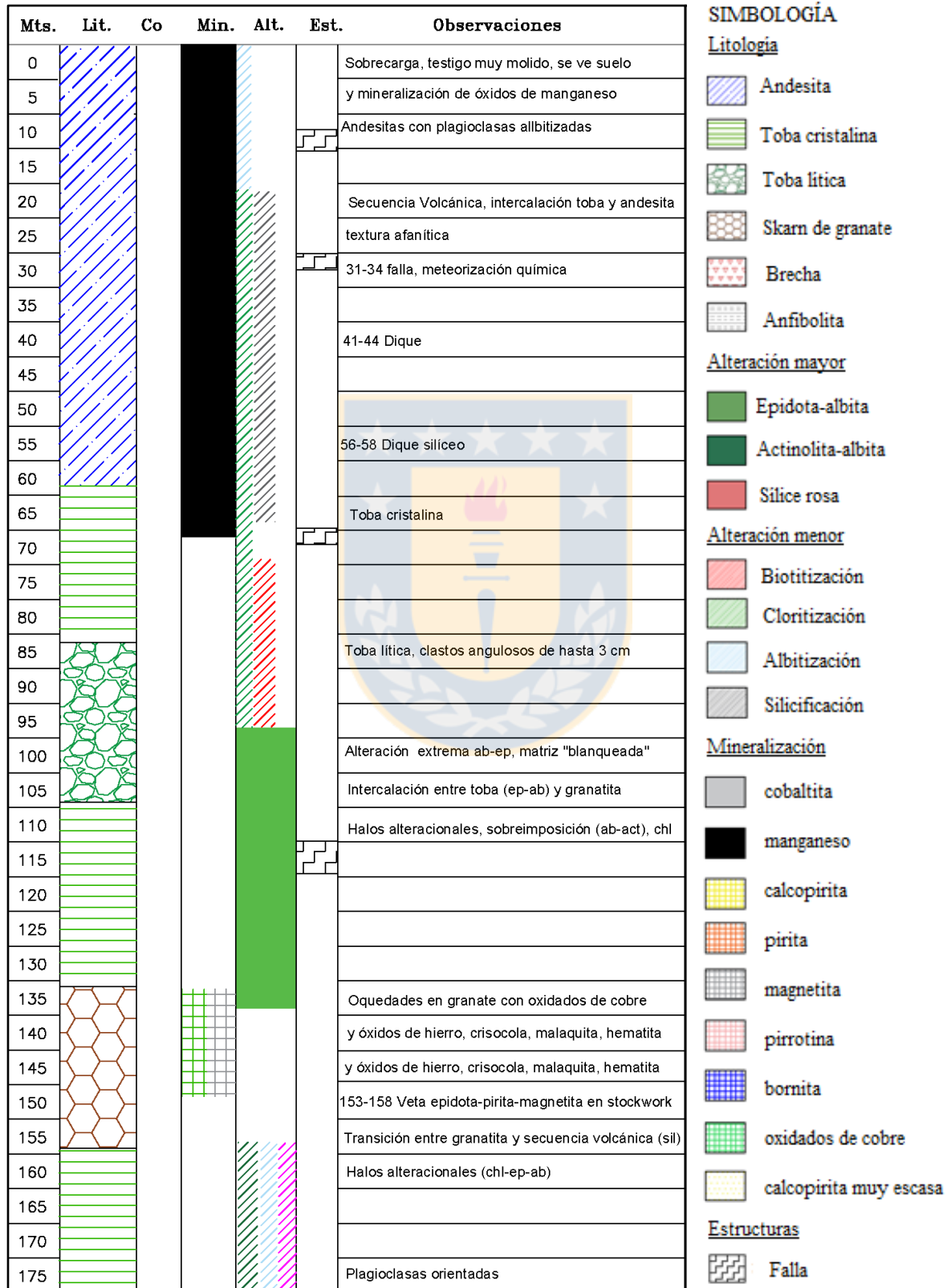
Nombre	Tipo	Coordenada E	Coordenada N	Cota	Profundidad
DDH-98126	Diamantino	287.095 m	6.628.720 m	612 m	350 m





### Columna DDH-98127 A (0 m-175 m)

Nombre	Tipo	Coordenada E	Coordenada N	Cota	Profundidad
DDH-98127	Diamantino	287.084 m	6.628.768 m	609 m	360 m



### Columna DDH-98127 B (175 m-360 m)

Nombre	Tipo	Coordenada E	Coordenada N	Cota	Profundidad
DDH-98127	Diamantino	287.084 m	6.628.768 m	609 m	360 m




M	Lit.	Co	Min.	Alt.	Est.	Observaciones
180						Venillas de clorita de 1-2 cms
185						Secuencia volcánica con bandeamientos de silice rosa
190						y pervasiva alteración de (ep-ab)
195						
200						Secuencia volcánica con bandeamientos de silice rosa
205						y pervasiva alteración de (ab-act)
210						
215						
220						
225						
230						
235						
240						
245						
250						
255						
260						
265						
270						Horizonte mineralizado B
275						
280						calcopirita diseminada abundante (0,5-1 %)
285						pirita escasa
290						
295						
300						
305						
310						
315						
320						(322-325) veta epidota-pirita-magnetita-cobaltita
325						
330						
335						
340						
345						
350						
355						

#### SIMBOLOGÍA




##### Litología

-  Andesita
-  Toba cristalina
-  Toba litica
-  Skarn de granate
-  Brecha
-  Anfibolita

##### Alteración mayor

-  Epidota-albita
-  Actinolita-albita
-  Silice rosa

##### Alteración menor

-  Biotitización
-  Cloritización
-  Albitización
-  Silicificación

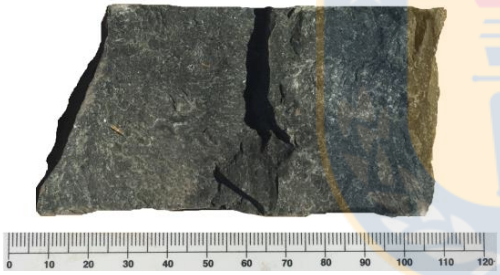
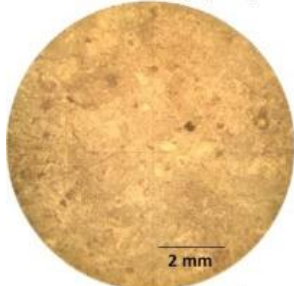

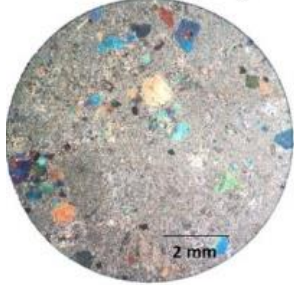
##### Mineralización


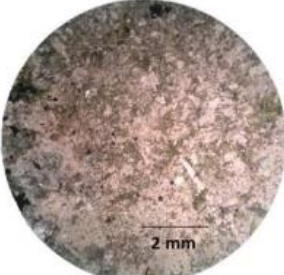

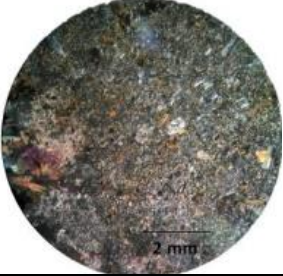
-  cobaltita
-  manganeso
-  calcopirita
-  pirita
-  magnetita
-  pirrotina
-  bornita
-  oxidados de cobre
-  calcopirita muy escasa


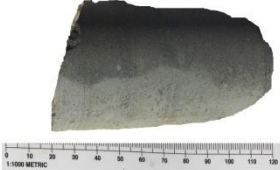
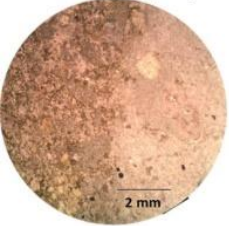
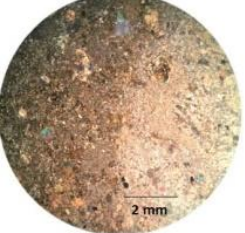
##### Estructuras


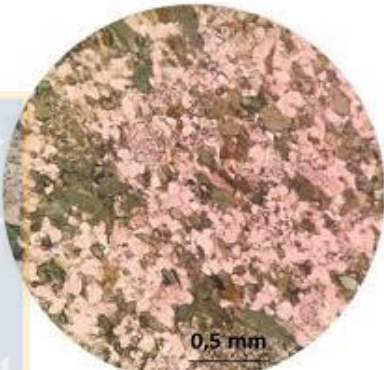

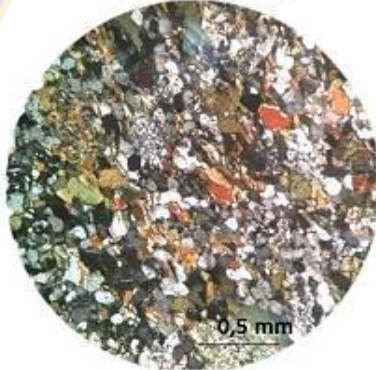
-  Falla



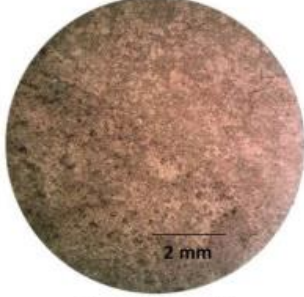
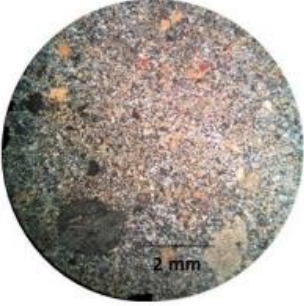
## ANEXO II. DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA


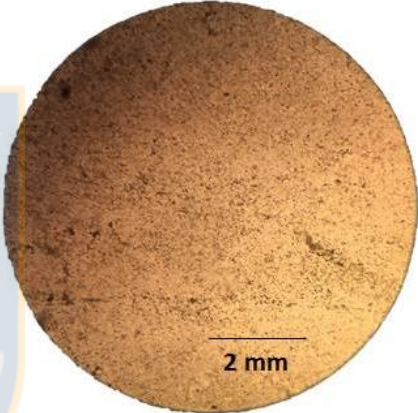
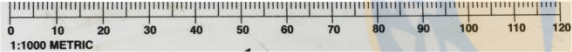


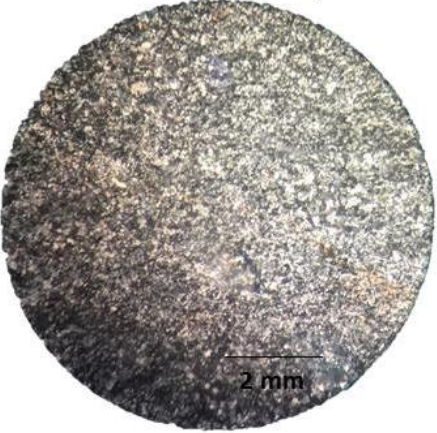
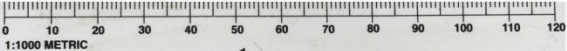

MC1 "Toba cristalina con pervasiva alteración epidota-albita"			
<b>Coordenadas (PSAD56)</b>	287.095(Este) 6.628.720 (Norte)		
<b>Sondaje</b>	DDH-98126		
<b>Metraje</b>	175,45 m.		
<b>Clasificación</b>	Toba cristalina		
<b>Unidad Litológica</b>	Toba		
<b>Alteración dominante</b>	Epidota-albita		
<b>Textura</b>	Fragmental, según arreglo de cristales se clasifica como: porfídica con matriz afanítica. Localmente glomeroporfídica		
<b>Composición</b>	<b>%</b>	<b>Tamaño medio</b>	<b>Forma</b>
<b>Matriz</b>	<b>70</b>	<b>80 um</b>	
plagioclasa (albita)	20	50 um	Anhedral
Epidota	27	50 um	Anhedral
Clorita	5	100 um	Anhedral
Actinolita	10	60 um	Anhedral
Cuarzo	8	50 um	Anhedral
<b>Componentes mayores</b>	<b>30</b>	<b>0,2-2 mm</b>	
plagioclasa (albitizada)	8	0,2 mm	euhedral
actinolita	8	0,2-0,5 mm	euhedral
Epidota	12	0,2 mm	anhedral
biotita (cloritizada)	2	0,2 mm	euhedral
<p><b>Visión Macroscópica</b> Vista Interna</p> 		<p><b>Visión microscópica</b> Vista LPP (2,5 X)</p> 	
<p>Vista Externa</p> 		<p>Vista NC (2,5 X)</p> 	
<p><b>Descripción macroscópica:</b> Masa afanítica compacta de color verde grisáceo y de alta competencia. Presenta una pervasiva alteración de albita-epidota. Posee agregados granulares superficiales de: albita epidota y sílice producto de alteración o una recrystalización.</p>			
<p><b>Descripción microscópica:</b> La matriz es afanítica y muy fina (80 um), en la que se distingue gran porcentaje de plagioclasas albitizadas, con forma anhedral y en algunos sectores con macla simple y de <i>carlsbad</i>, además de abundante epidota (27 %) y en menor grado actinolita y clorita, estos últimos 3 minerales de alteración se superponen a las plagioclasas y son los que le otorgan la coloración verde a esta unidad. Se observan fenocristales de plagioclasas, los cuales se encuentran albitizados, junto a actinolita y epidota. Se distinguen en ciertos sectores cúmulos con albita, epidota y actinolita, donde la primera se encuentra alterada a sericita.</p>			

MC2 "Toba cristalina"			
<b>Coordenadas (PSAD56)</b>	287.095(Este) 6.628.720 (Norte)		
<b>Sondaje</b>	DDH-98126		
<b>Metraje</b>	170,45 m.		
<b>Clasificación</b>	Toba cristalina		
<b>Unidad Litológica</b>	Toba		
<b>Alteración dominante</b>	Actinolita-albita		
<b>Textura</b>	Fragmental, según arreglo de cristales se clasifica como: porfídica con matriz afanítica. Localmente intergranular e intersertal.		
<b>Composición</b>	<b>%</b>	<b>Tamaño medio</b>	<b>Forma</b>
<b>Matriz</b>	<b>60</b>	<b>90 um</b>	
Vidrio volcánico	7	-	Masivo
Plagioclasa	18	90 um	Anhedral
Actinolita	25	100 um	Anhedral
Cuarzo	10	60 um	Anhedral
<b>Componentes mayores</b>	<b>40</b>	<b>0,2-2 mm</b>	
Líticos	8	1 cm	-
Plagioclasa (albita)	10	0,5 mm- 2 mm	Euhedral-anhedral
Actinolita	12	0,5 mm- 2 mm	Euhedral-anhedral
Biotita	6	1 mm	Anhedral
Opacos (calcopirita)	4	1 mm	Anhedral
<b>Visión Macroscópica</b> Vista Interna		<b>Visión microscópica</b> Vista LPP (2,5 X)	
			
<b>Vista Externa</b>		<b>Vista NC (2,5 X)</b>	
			
<p><b>Descripción macroscópica:</b> Roca volcánica con textura fragmental. Está compuesta de una matriz volcánica, fenocristales y fragmentos líticos, que se encuentran dispuestos de manera caótica y están quebrados. Además se observa biotita y actinolita, los que estarían relacionadas a procesos de alteración</p> <p><b>Descripción microscópica:</b> Matriz afanítica, con elevado porcentaje de actinolita, plagioclasa y vidrio volcánico, la disposición de los componentes mayores es caótica y se encuentran quebrados. Se observan fragmentos líticos de intrusivo (biotita, anfíbol, plagioclasa) con textura hipidiomórfica granular. Se aprecia alteración pervasiva de actinolita tanto en la matriz, donde se disponen en estructura de armazón, como en los fenocristales. Se presenta cuarzo en la matriz, probablemente debido a procesos de silicificación. Biotita y actinolita localmente cloritizados. Cristales de albita orientados, por metamorfismo incipiente.</p>			



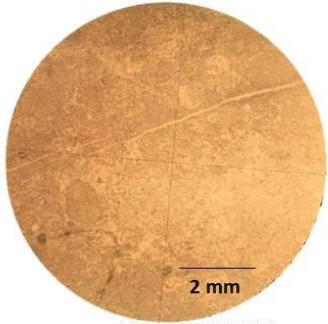

<b>MC3 “Contacto entre toba cristalina y alteración epidota-albita”</b>			
<b>Coordenadas (PSAD56)</b>	287.095(Este) 6.628.720 (Norte)		
<b>Sondaje</b>	DDH-98126		
<b>Metraje</b>	208,8		
<b>Clasificación</b>	Toba cristalina		
<b>Unidad Litológica</b>	Toba		
<b>Alteración dominante</b>	Epidota-albita /actinolita-albita(leve)		
<b>Textura</b>	Fragmental, según arreglo de cristales se clasifica como: porfídica con matriz afanática.		
<b>Toba cristalina(alteración actinolita)</b>			
<b>Composición</b>	<b>%</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Forma</b>
<b>Matriz</b>	<b>70</b>	<b>100 um</b>	
actinolita	35	100 um	Anhedral
plagioclasa	20	100 um	Anhedral
Biotita	6	100 um	Anhedral
Cuarzo	6	60 um	Anhedral
Vidrio	3	-	
<b>Fenocristales</b>	<b>30</b>	<b>0,2-2 mm</b>	
Plagioclasa (albitizada)	14	0,2 mm	Euhedral
actinolita	16	0,2-0,5 mm	Euhedral
<b>Toba cristalina (alteración extrema epidota-albita)</b>			
<b>Matriz</b>	<b>80</b>	<b>80 um</b>	
Epidota	35	80 um	Anhedral
Plagioclasa (albita)	27	80 um	Anhedral
actinolita	18	um	Anhedral
<b>Componentes mayores</b>	<b>20</b>	<b>0,2 mm</b>	
actinolita	5	0,2	Anhedral
Albita	5	0,2	Anhedral
Epidota	5	0,2	Anhedral
Opacos	5	0,1	Anhedral
<b>Visión Macroscópica</b>		<b>Visión microscópica</b>	
<p>Vista Interna</p>  <p>Vista Externa</p> 		<p>Vista LPP (2,5 X)</p>  <p>Vista NC (2,5 X)</p> 	
<b>Descripción macroscópica:</b> Contacto entre Toba cristalina con alteración de actinolita albita y alteración pervasiva de epidota-albita			

<b>MC4 "Anfibolita"</b>			
<b>Coordenadas (PSAD56)</b>	287.095(Este) 6.628.720 (Norte)		
<b>Sondaje</b>	DDH-98126		
<b>Metraje</b>	264,4 m		
<b>Clasificación</b>	Anfibolita		
<b>Unidad Litológica</b>	Anfibolita		
<b>Alteración dominante</b>	Actinolita		
<b>Textura</b>	Foliada, nematoblástica		
<b>Composición</b>	<b>%</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Forma</b>
Anfíbol (actinolita)	40	0,1-0,4 mm	Anhedral
Plagioclasa	15	0,1-0,4 mm	Anhedral
Cuarzo	15	0,1-0,4 mm	Anhedral
biotita	22	0,1-0,4 mm	Anhedral
epidota	8	0,1-0,4 mm	Anhedral
<b>Visión Macroscópica</b>		<b>Visión microscópica</b>	
<b>Vista Interna</b>		<b>Vista LPP (10 X)</b>	
			
<b>Vista Externa</b>		<b>Vista NC (10 X)</b>	
			
<p><b>Descripción macroscópica:</b> Roca de color gris oscuro, con un gran porcentaje de cristales describiendo una textura cristalina fanerítica. El tamaño de los cristales es en general homogéneo. Macroscópicamente se distinguen plagioclasas albitizadas, actinolita y biotita.</p> <p><b>Descripción microscópica:</b> Roca compuesta de anfíbol, cuarzo, biotita, plagioclasas, epidota y fragmentos líticos. Los cristales de anfíbol y biotita se encuentran orientados, formando foliaciones paralelas de estos minerales, generando una textura nematoblástica. El tamaño de los minerales es uniforme entre 0,1 mm y 0,3 mm. Las Biotitas corresponden a un origen secundario y junto a los anfíboles localmente se encuentran cloritizados. Microvenillas de actinolita cortan la sección.</p>			

"MC5 Toba cristalina con pervasiva alteración actinolita-albita"			
<b>Coordenadas (PSAD56)</b>	287.095(Este) 6.628.720(Norte)		
<b>Sondaje</b>	DDH-98126		
<b>Metraje</b>	282,5		
<b>Clasificación</b>	Metatoba cristalina		
<b>Unidad Litológica</b>	Anfibolita		
<b>Alteración dominante</b>	Actinolita-albita		
<b>Textura</b>	Fragmental, según arreglo de cristales porfídica con matriz afanítica		
<b>Composición</b>	<b>%</b>	<b>Tamaño medio</b>	<b>Forma</b>
<b>Matriz</b>	<b>70</b>	<b>75 um</b>	
Plagioclasa(albita)	28	75 um	Euhedral a anhedral
Anfíbol	20	75 um	Euhedral a anhedral
Epidota	2	75 um	Anhedral
Clorita	3	75 um	Anhedral
Cuarzo	17	75 um	Anhedral
<b>Componentes mayores</b>	<b>30</b>	-	
Albita	5	0,4-0,6 mm	euhedral
actinolita	10	0,4-0,6 mm	euhedral
Líticos	15	2 cm	
<p><b>Visión Macroscópica</b></p> <p>Vista Interna</p>  <p>Vista Externa</p> 		<p><b>Visión microscópica</b></p> <p>Vista LPP (2,5 X)</p>  <p>Vista NC (2,5 X)</p> 	
<p><b>Descripción macroscópica:</b> Masa afanítica compacta de color gris oscuro. Posee agregados granulares superficiales de, albita y sílice amorfo producto de alteración o una recrystalización. Es muy similar a unidad (MC1), pero no posee la coloración verde en su matriz y no se observan cristales de epidota.</p> <p><b>Descripción microscópica:</b> Matriz afanítica compuesta de plagioclasas, las que se encuentran albitizadas. Se superpone actinolita en la matriz, lo que estaría relacionado a procesos de alteración. Por su lado el porcentaje de clorita, vidrio masivo y epidota es muy bajo. Dentro de los componentes mayores se observa albita, actinolita euhedrales y líticos de skarn compuesto de wollastonita, granate y anfíbol. Esta muestra exhibe foliación y evidencias de recrystalización, por lo que correspondería a una toba, con un grado metamorfismo.</p>			

<b>MC6 "Hornfels"</b>			
<b>Coordenadas (PSAD56)</b>	287.094 (Este) 6.628.720 (Norte)		
<b>Sondaje</b>	DDH-98125		
<b>Metraje</b>	283.4		
<b>Clasificación</b>	Hornfels		
<b>Unidad Litológica</b>	Unidad metamófica Anfibolita		
<b>Alteración dominante</b>	-		
<b>Textura</b>	Granoblástica		
<b>Composición</b>	<b>%</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Forma</b>
plagioclasa	25	150 um-200 um	anhedral
cuarzo	50	100 um-300um	anhedral
epidota	5	220 um	anhedral
opacos (calcopirita)	15	200 um	anhedral
biotita	5	150 um	anhedral
<b>Visión Macroscópica</b>		<b>Visión microscópica</b>	
<b>Vista Interna</b>		<b>Vista LPP (2,5 X)</b>	
			
			
<b>Vista Externa</b>		<b>Vista NC (2,5 X)</b>	
			
			
<p><b>Descripción macroscópica:</b> Roca compacta de color gris oscuro, compuesta de una matriz afanítica y agregados granulares superficiales de sílice amorfo, es muy similar a MC5 (toba afanítica), pero en su composición se logra distinguir cuarzo.</p> <p><b>Descripción microscópica:</b> Está compuesta principalmente de cuarzo, acompañado de plagioclasa y en menor medida, epidota y biotita. El tamaño de los cristales es uniforme, entre 0,1 mm y 0,2 mm. Se evidencia recristalización, principalmente de cuarzo, atribuible a procesos metamórficos. Se presenta abundante calcopirita diseminada (15%)</p>			




MC7” Matriz volcánica de Brecha”			
<b>Coordenadas (PSAD56)</b>	287.095(Este) 6.628.720 (Norte)		
<b>Sondaje</b>	DDH-98125		
<b>Metraje</b>	231		
<b>Clasificación</b>	Brecha		
<b>Unidad Litológica</b>	Brecha		
<b>Alteración dominante</b>	Silicificación		
<b>Textura</b>	Brechosa (Roca total), Matriz volcánica: fragmental		
<b>Composición</b>	<b>%</b>	<b>Tamaño medio</b>	<b>Forma</b>
<b>Matriz</b>	<b>80</b>	<b>50 um</b>	
plagioclasa	20	30 um	Anhedral
actinolita	10	60 um	Anhedral
cuarzo	50	40 um	Anhedral
<b>Fenocristales</b>	<b>20</b>	-	
Plagioclasa (albita)	11	0,4-0,6 mm	Euhedral
Actinolita	5	0,4 mm	Anhedral
biotita	2	0,3 mm	Anhedral
líticos	2	1 cm	-
<b>Visión Macroscópica</b>		<b>Visión microscópica</b>	
<p><b>Vista Interna</b></p>  <p><b>Vista Externa</b></p> 		<p><b>Vista LPP (2,5 X)</b></p>  <p><b>Vista NC (2,5 X)</b></p> 	
<p><b>Descripción macroscópica:</b> Roca compacta de color gris oscuro, compuesta de una matriz afanítica con alteración de sílice rosa. Entre sílice rosa y matriz se genera textura brechosa y bandeamientos.</p> <p><b>Descripción microscópica:</b> Roca con textura fragmental y según arreglo de los cristales: porfídica con una matriz afanítica. Corte transparente realizado en la matriz de brecha, se comprueba que consta principalmente de cuarzo, producto de silicificación, Dentro de los componentes mayores se observan plagioclasas albitizadas, anfíbol y biotita, los que en general están quebrados y se encuentran cloritizados.</p>			

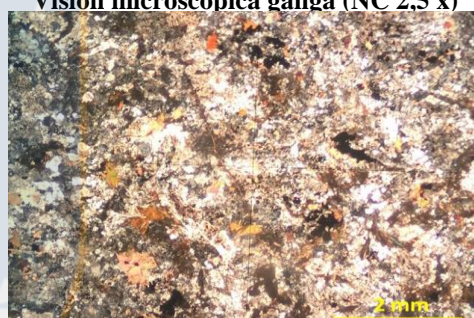
## ANEXO III. DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA MENA Y GANGA


<b>MPI "Pirolusita diseminada en Andesita"</b>	
<b>Coordenadas (PSAD56)</b>	287.095(Este) 6.628.720 (Norte)
<b>Sondaje</b>	DDH-98125
<b>Metraje</b>	22 m
<b>Unidad Litológica</b>	Andesita

<b>Descripción macroscópica</b>		
<b>Textura original</b>		
<b>Mena</b>	<b>Ocurrencia</b>	<b>%</b>
Pirolusita	En dendritas, diseminada masiva y rellenando planos de debilidad	<b>60</b>
<b>Ganga</b>	<b>Ocurrencia</b>	<b>%</b>
Limonita	Masiva	<b>20</b>
Arcillas	masiva	<b>20</b>
<b>Descripción</b>	Roca con pervasiva alteración superficial, café y disgregable, con elevado porcentaje de pirolusita	



<b>Descripción microscópica</b>		
<b>Textura original</b>	Porfídica con masa fundamental afanítica	
<b>Mena</b>	<b>Ocurrencia</b>	<b>%</b>
Pirolusita	Diseminada, masiva (0,1-0,2 mm)	<b>35</b>
<b>Ganga</b>	<b>Ocurrencia</b>	<b>%</b>
Biotita	anhedral	<b>8</b>
Epidota	Anhedral	<b>5</b>
Limonita	Anhedral	<b>10</b>
arcillas	Amorfa	<b>10</b>
Actinolita	Anhedral	<b>1</b>
Plagioclasa primaria	euhedral	<b>31</b>



<p style="text-align: center;"><b>Visión microscópica mena principal (LPP 10 x)</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Descripción microscópica:</b></p> <p>Roca volcánica con textura porfídica, con una matriz afanítica compuesta de plagioclasas y cuarzo, presenta fenocristales plagioclasa y alteración de: biotita, actinolita, arcillas e hidróxido de hierro. Posee elevado porcentaje de pirolusita los que se superponen en la matriz de la roca. Se distinguen por su alta reflectividad, en LPP presenta coloración crema, variando a blanco amarillento. En NC posee coloración gris.</p>
---	---

<b>Descripción paragenética</b>			
<b>Formación roca primaria</b>	<b>Alteración subordinada</b>	<b>Alteración dominante superficial</b>	<b>Evento mineralizador</b>
Se forma Andesita, desarrollo de plagioclasas primarias, cuarzo y máficos.	Ocurre alteración de los máficos, formándose, actinolita, epidota y biotita secundaria	Desarrollo pervasivo de arcillas e hidróxidos de hierro	Pirolusita posterior a hidróxidos de hierro, ya que pirolusita se superpone


<b>MP2”Mineralización de calcopirita, pirita, magnetita diseminada en Skarn (Progradante)”</b>	
<b>Coordenadas (PSAD56)</b>	287.095(Este) 6.628.720 (Norte)
<b>Sondaje</b>	DDH-98126
<b>Metraje</b>	247,5 m
<b>Unidad Litológica</b>	Skarn de granate

<b>Descripción macroscópica</b>		
<b>Textura original</b>	Obliterada	
<b>Mena</b>	<b>Ocurrencia</b>	<b>%</b>
cobaltita	Masiva y en cúmulos, intercrecimiento con pirita	5
pirita	Masiva y en cúmulos	10
calcopirita	Diseminada, agregados cristalinos de hasta 1 cm	50
magnetita	diseminada	15
<b>Ganga</b>	<b>Ocurrencia</b>	<b>%</b>
granate	Agregados sacaroidales	10
epidota	Masiva	5
calcita	Masiva y rellenando espacios	5
<b>Descripción</b>	Skarn con mineralización	



<b>Descripción microscópica</b>		
<b>Textura original</b>	Granoblástica	
<b>Mena</b>	<b>Ocurrencia</b>	<b>%</b>
cobaltita	Diseminada	2
pirita	Masiva y en cúmulos, automorfa	5
calcopirita	Diseminada, agregados cristalinos.	20
magnetita	diseminada	8
<b>Ganga</b>	<b>Ocurrencia</b>	<b>%</b>
granate	automorfos	30
wollastonita	Hábito acicular prismático	5
calcita	Anhedral	15
epidota	anhedral	10
actinolita	masiva	5

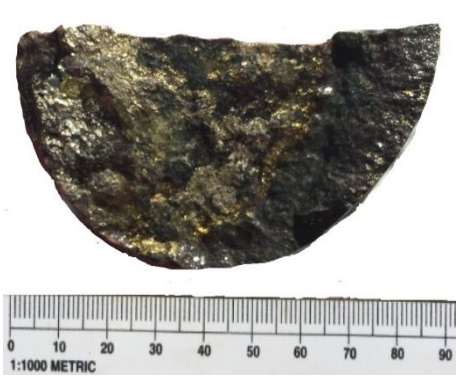


<b>Visión microscópica mena principal (LPP 10 x)</b>	<b>Descripción microscópica:</b>
	Matriz tipo Skarn, se sobreimpone mineralización de calcopirita, pirita y magnetita. Calcopirita es el mineral que más abunda, se diferencia de pirita por el bajo relieve y una coloración amarillenta más intensa, se observa crecimiento de calcosina en este mineral. Cobaltita en bajo porcentaje (2%) se reconocen texturas de reemplazo entre este mineral y pirita

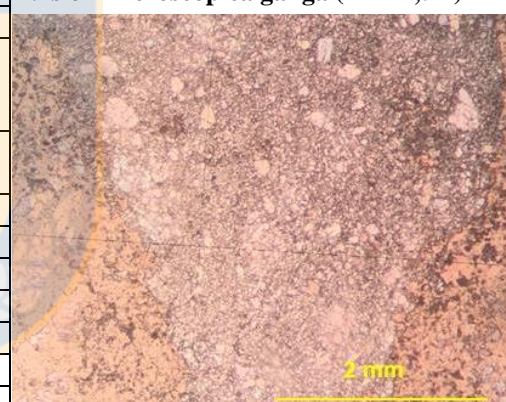
<b>Descripción paragenética</b>			
<b>Formación roca primaria</b>	<b>Formación Skarn</b>	<b>Etapas dominante progradante</b>	<b>Etapas retrogradante Subordinada</b>
Se forma roca calcárea,	Debido a metamorfismo de contacto, se genera unidad skarn (granate, wollastonita)	Mineralización principal de calcopirita y magnetita ( alteración principal)	Mineralización epidota-actinolita y cobaltita, poco desarrollo de esta etapa

<b>MP3”Mineralización diseminada de calcopirita, pirita y cobaltita en Skarn (retrogradante)”</b>	
<b>Coordenadas (PSAD56)</b>	287.095(Este) 6.628.720 (Norte)
<b>Sondaje</b>	DDH-98126
<b>Metraje</b>	220,5 m
<b>Unidad Litológica</b>	Toba cristalina

<b>Descripción macroscópica</b>		
<b>Textura original</b>	Obliterada	
<b>Mena</b>	<b>Ocurrencia</b>	<b>%</b>
cobaltita	Diseminada	10
pirita	Diseminada	35
calcopirita	Diseminada	15
<b>Ganga</b>	<b>Ocurrencia</b>	<b>%</b>
granate	Agregados granulares	20
epidota	Hábito prismático y diseminada	10
Actinolita	masiva	10
<b>Descripción</b>	Toba con presencia de minerales retrogradante con cobaltita, pirita y calcopirita diseminada.	



<b>Descripción microscópica</b>		
<b>Textura original</b>	Obliterada	
<b>Mena</b>	<b>Ocurrencia</b>	<b>%</b>
cobaltita	Diseminada, hipidiomórfica, intercrecimiento y reemplazo con pirita	5
pirita	Diseminada, reemplazo con cobaltita	9
calcopirita	Diseminada	4
<b>Ganga</b>	<b>Ocurrencia</b>	<b>%</b>
Plagioclasa 1 <sup>ra</sup>	Anhedral-euhedral	15
Epidota	masiva (100 um-200 um)	15
actinolita	Anhedral	7
Albita	Anhedral	10
granate	hipidiomórfico	35




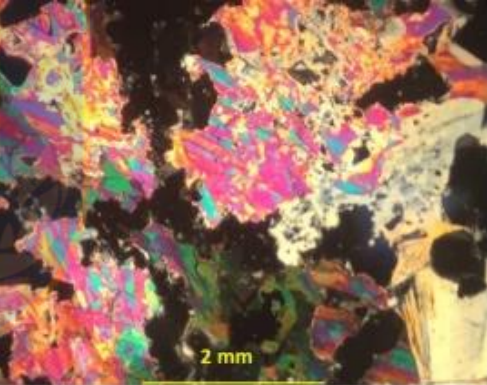
<b>Visión microscópica mena principal (LPP 10 x)</b>	<b>Descripción microscópica:</b>
	Roca volcánica afectada por alteración progradante, con desarrollo de skarn, que se sobreponen a matriz volcánica. En zonas también se exhibe pervasiva alteración de epidota, con desarrollo de mineralización de cobaltita, pirita y calcopirita. Texturas de intercrecimiento pirita y cobaltita, donde estos 2 minerales se sobreimponen a mineralización de calcopirita, evidenciando, cristalización posterior.


<b>Descripción paragenética</b>			
<b>Etapla progradante Alteración granate</b>	<b>Evento mineralizador progradante</b>	<b>Etapla retrogradante alteración epidota</b>	<b>Etapla retrogradante Mineralización</b>
Se forma granate, los que se sobreimponen en secuencia volcánica	Asociado a alteración progradante, desarrollo de calcopirita	Alteración dominante, debido a criculación de fluidos se forma epidota, albita y actinolita	Cristalización de cobaltita, pirita y calcopirita.

MP4” Contacto entre vetilla epidota-magnetita-pirita-cobaltita con skarn de granate”	
Coordenadas (PSAD56)	287.095(Este) 6.628.720 (Norte)
Sondaje	DDH-98126
Metraje	243 m
Unidad Litológica	Skarn de granate

Descripción macroscópica		
Textura original	Obliterada	
Mena	Ocurrencia	%
cobaltita	Diseminada en cúmulos	8
pirita	Diseminada en cúmulos	8
magnetita	diseminada	32
Ganga	Ocurrencia	%
Epidota	Hábito prismático	35
calcita	masiva	9
granate	Agregados sacaroidales	8
Descripción	Composición corresponde contacto entre vetilla de epidota y unidad de skarn.	




Descripción microscópica			
Textura original	Obliterada	Visión microscópica ganga (NC 2,5 x)	
Mena	Ocurrencia		
cobaltita	Intercrecimiento con pirita, diseminada y en <i>pseudo</i> cubos, cristales en general automorfos		
pirita	Texturas de reemplazo con cobaltita		8
magnetita	Diseminada		4
Ganga	Ocurrencia		%
Granate	Hipidiomórfica granular		36
Wollastonita	Cristales aciculares		20
epidota	Como reemplazo y masivo		10
Calcita	Como relleno		2
Diópsido	hipidiomórfico		10

Visión microscópica mena principal (LPP 2,5 x)	Descripción microscópica:
	<p>Corte realizado en contacto entre vetilla y skarn, abarcando mayor parte de éste, por lo que composición no se condice con lo visto macroscópicamente. Se observa elevado porcentaje de cobaltita, con bireflectancia de rosa a crema, hábito cristalino bien desarrollado, fuerte tendencia al automorfismo en intercrecimiento y reemplazo con pirita, la que también aparece diseminada</p>

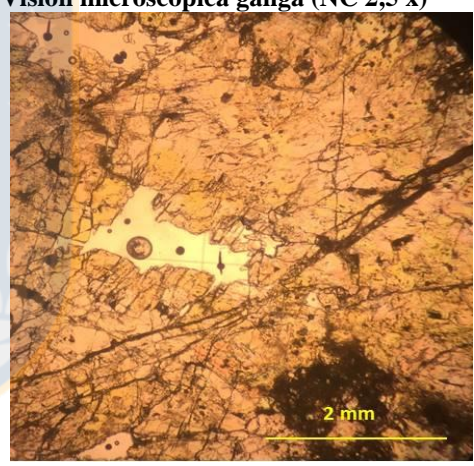
Descripción paragenética			
Etapa progradante Alteración dominante	Evento mineralizador progradante	Etapa retrogradante alteración epidota	Desarrollo vetilla epidota-magnetita
Se forma granate, wollastonita, diópsido y granate en secuencia calcárea	Asociado a alteración progradante, desarrollo de calcopirita	Alteración retrogradante en menor medida, desarrollo de epidota en skarn	Estructura corta la secuencia, desarrollo de cobaltita, pirita y magnetita


MP5” Vetilla epidota-magnetita-pirita-cobaltita”	
Coordenadas (PSAD56)	287.095(Este) 6.628.720 (Norte)
Sondaje	DDH-98126
Metraje	218 m
Unidad Litológica	Skarn de granate

Descripción macroscópica		
Textura original	Obliterada	
Mena	Ocurrencia	%
cobaltita	En veta, cristales de 0, 4 cm)	10
pirita	En veta, en agregados cristalinos	10
calcopirita	En veta, en agregados cristalinos	5
magnetita	En veta, en agregados cristalinos	30
Ganga	Ocurrencia	%
Epidota	Hábito prismático	30
calcita	Masiva	15
Observaciones	Descripción corresponde a veta	



Descripción microscópica		
Textura original	Obliterada	
Mena	Ocurrencia	%
cobaltita	Automorfismo, cristales bien desarrollados, intercrecimiento y reemplazo con pirita	8
pirita	Texturas de reemplazo con cobaltita y diseminada	8
magnetita	Diseminada en veta	20
calcopirita	Diseminada en veta	4
Ganga	Ocurrencia	%
Epidota (act?)	Diseminada en veta. automorfismo	40
calcita	Reemplazo y diseminada	10
clorita	Rellenado espacios	5
Hidróxido de Fe	En microvetillas	5



Visión microscópica mena principal (LPP 10 x)	Descripción microscópica:
	Corte realizado en contacto en veta, en la cual abunda la epidota. Las menas que se reconocen corresponden a cobaltita, pirita, magnetita y calcopirita, siendo la magnetita la que más abunda. La cobaltita se presenta diseminada, con tendencia al automorfismo, de coloración crema con bireflectancia rosácea, en intercrecimiento y en reemplazo con pirita

Descripción paragenética			
Etapas progradante	Evento mineralizador progradante	Etapas retrogradante	Desarrollo veta epidota-magnetita
Alteración dominante		alteración epidota	
Se forma granate, wollastonita, diópsido y granate en secuencia calcárea	Asociado a alteración progradante, desarrollo de calcopirita	Alteración retrogradante en menor medida, desarrollo de epidota en skarn	Estructura corta la secuencia, desarrollo de cobaltita, pirita y magnetita

<b>MP6- Cobaltita extraída de sector Rajo Caracoles</b>	
<b>Coordenadas (PSAD56)</b>	286813 Este, 6628002 Norte,
<b>Sector Rajo Caracoles</b>	DDH-98126
<b>Descripción</b>	<p>Se extrajo muestra de mineral cobaltita, del sector rajo Rosario, la cual se presentaba en paragénesis con pirita en vetas. Se realizó pulido a esta muestra para compararlas con las muestras extraídas de los sondajes. Macroscópicamente se identifica, por su color plateado, brillo metálico intenso, exfoliación perfecta, raya de color negro, dureza entre 5,5-6 y su marcado hábito cristalino.</p> <p>Microscópicamente presenta coloración blanca con tinción rosa y debido a su bireflectancia puede ostentar una coloración más plateada. La anisotropía es escasa, su reflectividad presenta un marcado relieve. Los cristales se presentan con una fuerte tendencia al automorfismo, con caras cristalinas bien desarrolladas y agregados euhedrales granulares, observándose bordes rectos bien definidos. Debido a que se genera reemplazo con pirita puede presentar una coloración más amarillenta.</p>

**Visión macroscópica cobaltita****Visión microscópica cobaltita 2,5 x. LPP.**