

**GEOLOGÍA DE LOS DEPÓSITOS Cu-Au CERRO DEL ORO Y LA  
COLINA (2), REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE**

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

DANISSA LIANETTE GAJARDO BARRERA

Profesora guía:

GISELLA PALMA LIRA

Miembros de la Comisión Evaluadora de Examen:

EDUARDO SALAZAR ARIAS

IGNACIO MAUREIRA JOFRÉ

SANTIAGO, CHILE

ENERO, 2024

## **GEOLOGÍA DE LOS DEPÓSITOS Cu-Au CERRO DEL ORO Y LA COLINA (2), REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE**

El depósito Cerro del Oro forma parte del cluster de pórfidos Cu-(Au-Mo) Llahuín, mientras que el depósito La Colina (2) se encuentra a una distancia de 7 km del Distrito IOCG El Espino. Ambos depósitos pertenecen a la franja metalogénica del Cretácico Superior y se localizan en la Región de Coquimbo. Esta franja metalogénica se caracteriza por la ocurrencia de depósitos IOCG y pórfidos Cu-(Au-Mo) con variables contenidos de Cu y Au.

El objetivo principal de esta tesis es caracterizar mineralógicamente la litología, alteración hidrotermal y la mineralización de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2), a través de la descripción macroscópica de rocas, estudios petro-calcográficos y microscopía electrónica de barrido (SEM). Ambos depósitos minerales se encuentran hospedados en rocas intrusivas de composición principalmente diorítica. Se identifican seis eventos de alteración hidrotermal/mineralización (Evento I al VI) que dieron lugar a la formación de ambos depósitos. Estos eventos incluyen las alteraciones sódica, potásica, propilítica, sericítica, argílica moderada y un último evento de carácter supérgeno.

En el caso del depósito Cerro del Oro, la mineralización de cobre (calcopirita) ocurre principalmente en vetillas de cuarzo y cuarzo-sericita junto con piritita, en forma de *stockworks* o *sheeted veins* asociados a las alteraciones potásica y sericítica. Además, presenta mineralización supérgena asociada a un evento más tardío caracterizado por óxidos e hidróxidos de hierro, así como oxidados de cobre. También, se determina que en el cluster de pórfidos Cu-(Au-Mo) Llahuín, Cerro del Oro y el Pórfido Central, representarían distintos niveles de erosión o exhumación. El Pórfido Central sería el cuerpo mineralizado más erodado o exhumado, consistente con una alteración potásica dominante y mayores contenidos de Cu-Mo, en comparación con Cerro del Oro que presenta mayor contenido de Au y se caracteriza por la sobreimposición de las alteraciones sericítica, argílica moderada y supérgena. Finalmente, el depósito La Colina (2) presenta características más afines con los yacimientos del tipo IOCG, ya que exhibe una abundante presencia de óxidos de hierro como magnetita, hematita y mushketovita, con mineralización de calcopirita, piritita y Au asociada a cuerpos vetiformes y brechas magmáticas-hidrotermales con matriz de magnetita.

SOLO USO ACADÉMICO

*“Dedico este trabajo con todo mi amor y cariño  
a mi familia”*

## Agradecimientos

A mi madre Jessica, por su apoyo y amor incondicional, quien a pesar de este largo camino nunca dejó de confiar y creer en mí. Gracias por el enorme esfuerzo que has hecho para darme educación y valores, aún en la adversidad, espero algún día, ser aunque sea la mitad, de lo bondadosa y amable que eres tú. Esta tesis es un regalo para ti, te amo.

También agradezco profundamente a mi profesora guía Gisella, por su entrega y apoyo incondicional, por acompañarme en este proceso de tesis y creer en mí. Tu pasión y vocación por la ciencia es el mejor regalo que me has dado y estoy muy agradecida de que lo hayas compartido conmigo. Eres una mujer admirable e inteligente que me guió y enseñó, hasta cuando a veces me equivocaba. Eres un ejemplo a seguir para mí, no solo en lo académico, sino también como persona.

A los miembros de la comisión Eduardo e Ignacio, por todo el tiempo dedicado y la buena disposición para resolver cualquier duda, gracias a sus comentarios mi trabajo pudo concluir de la mejor manera.

También, agradecer a los geólogos Don José y Eduardo Abarzúa, a cargo de los proyectos Llahuín y La Colina, por acompañarme en terreno y compartir su conocimiento conmigo, que a pesar de sus ocupadas labores me guiaron con la mejor de las voluntades, dandome *tips* y consejos para complementar el estudio. De igual modo, a *Southern Hemisphere Mining (SHM) Limited* por entregarme la oportunidad de realizar mi tesis en estos depósitos que tanto me maravillaron.

A mis amigos de la universidad, que sin su motivación e incontables momentos de risa no hubiera vivido esta experiencia de la misma forma, gracias por las maratones de estudio, los trabajos en grupo y los chistes en terreno, estuvimos en las buenas y en las malas, pero más que nada estuvimos aprendiendo juntos, por lo que su amistad y los recuerdos que creamos los atesoraré para siempre.

A mis panteritas Luna y Chopper, quienes me cuidaban y acompañaban mientras estudiaba, sus ronroneos siempre fueron mi mayor inspiración.

Finalmente, agradecer a mis profesores de la Escuela de Geología de la U. Mayor, por enseñarme lo hermosa que es la Geología. A mis compañeros/as, choferes de los buses, cocineros de terreno, funcionarios de la Universidad y a todos los que de alguna u otra forma aportaron en este hito de mi vida ¡Gracias!

## TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	11
1.1    Formulación y motivación del estudio propuesto.....	11
1.2    Objetivos.....	14
1.2.1    Objetivo General.....	14
1.2.2    Objetivos Específicos.....	15
1.3    Hipótesis.....	16
1.4    Metodología y análisis.....	16
1.4.1    Revisión de antecedentes geológicos disponibles.....	16
1.4.2    Trabajo de terreno.....	17
1.4.3    Descripción de las muestras y secciones transparentes-pulidas.....	18
1.5    Ubicación y vías de acceso.....	20
CAPÍTULO 2: MARCO GEOTECTÓNICO Y METALOGÉNICO.....	21
2.1    Depósitos de óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG).....	22
2.3    Relación entre los depósitos IOCG y pórfido Cu-(Au-Mo).....	26
CAPÍTULO 3: MARCO GEOLÓGICO.....	28
3.1    Geología Regional.....	28
3.1.1    Unidades Estratificadas.....	29
3.1.2    Unidades Intrusivas.....	33
3.2    Geología Local.....	35
3.2.1    Distrito El Espino.....	35
3.2.3    Distrito Llahuín.....	39
3.2.4    Proyecto La Colina.....	40
3.2.1    Estructuras.....	41
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	42
4.1    Litología.....	43
4.1.2    Depósito La Colina (2).....	50
4.2    Alteración hidrotermal.....	57
4.2.1    Albitización.....	57
4.2.2    Alteración Potásica.....	59
4.2.3    Alteración Sericítica.....	64

4.2.4 Alteración Propilítica .....	66
4.2.5 Alteración Argílica Moderada.....	67
4.3 Mineralogía sulfurada y óxidos/ hidróxidos de hierro y titanio .....	74
4.3.1 Alteración Potásica y Propilítica .....	75
4.3.2 Alteración Sericítica y Supérgena .....	78
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN.....	80
5.1 Caracterización litológica.....	80
5.2 Secuencia paragenética de alteración hidrotermal y mineralización.....	83
5.3 Zonación vertical de la alteración hidrotermal y mineralización .....	84
5.4 Asociación mineralógica del oro.....	88
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....	97

SOLO USO ACADÉMICO

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación de los depósitos tipo IOCG y pórfido Cu-(Au-Mo) de edad Cretácica entre las latitudes 26° y 33°S del centro-norte de Chile, además de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2) en los cuales se enfoca este estudio. Palma (no publicado), modificado de Richards et al. (2017).....	<b>12</b>
<b>Figura 2.</b> Imagen satelital con la ubicación de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2), las propiedades mineras y los sondajes utilizados en este estudio.....	<b>13</b>
<b>Figura 3.</b> Comparación de los recursos de Cu (%) y Au (g/t) de los depósitos Cu-Au de la Cordillera de la Costa: Cerro del Oro, La Colina (2), Llahuín (Pórfido Central), El Espino, Andacollo, Candelaria y Mantoverde ( <b>Figura 1</b> ). Fuente de datos: Informe Técnico de <i>Southern Hemisphere Mining Limited</i> (2012), Informe Técnico Proyecto exploratorio de sondajes La Colina por Minera Fuego Ltda. (2006) y Richards et al. (2017).....	<b>15</b>
<b>Figura 4.</b> Sondajes muestreados para los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2).....	<b>17</b>
<b>Figura 5.</b> Ubicación y vías de acceso hacia los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2), región de Coquimbo, Chile.....	<b>20</b>
<b>Figura 6.</b> Evolución tectonomagmática entre 25° y 34°S del norte de Chile durante el Cretácico y formación de depósitos tipo IOCG y pórfidos cupríferos. Modificado de Richards et al. (2017).....	<b>24</b>
<b>Figura 7.</b> Modelo esquemático para sistemas magmático-hidrotermales tipo IOCG (izquierda) y tipo pórfido Cu-(Au-Mo) (derecha). Richards y Mumin (2013).....	<b>26</b>
<b>Figura 8.</b> Mapa geológico regional de la zona de estudio entre los 31°S y 31°45'S. Las estrellas amarillas muestran la ubicación de los depósitos Cerro del Oro, La Colina (2), Llahuín y El Espino. Palma (no publicado), modificado de Rivano y Sepúlveda (1991) y López et al. (2014).....	<b>29</b>
<b>Figura 9.</b> Estratigrafía del Cretácico dentro del Distrito IOCG El Espino mostrando los intervalos estratigráficos de las áreas Espino, Romero y Llahuín. Modificado de López et al. (2014).....	<b>33</b>
<b>Figura 10.</b> Imagen satelital de los distritos mineros dentro de la zona de estudio entre los 31°S y 31°30'S. Se observa la mina IOCG El Espino y el sistema de pórfidos Cu-(Au-Mo) Llahuín. Obtenido de <i>SHM</i> (2013)....	<b>36</b>
<b>Figura 11.</b> Geología Regional del sector Illapel-Ovalle. López et al. (2014).....	<b>37</b>
<b>Figura 12.</b> Perfil esquemático de la alteración hidrotermal para los sistemas IOCG El Espino y pórfido Cu-Au Llahuín. Modificado de López et al. (2014).....	<b>38</b>
<b>Figura 13.</b> Imagen satelital del distrito Llahuín con la ubicación de los depósitos Pórfido Central y Cerro del Oro. Las líneas rojas indican la dirección preferencial de las vetillas, mientras que las líneas azules corresponden a fallas. Obtenida mediante Leapfrog Geo ( <i>Southern Hemisphere Mining Limited</i> ).....	<b>39</b>
<b>Figura 14.</b> Modelo estructural del Distrito El Espino. Modificado de López et al. (2014).....	<b>42</b>
<b>Figura 15.</b> Fotografías del depósito Cerro del Oro.....	<b>45</b>
<b>Figura 16.</b> Imágenes microscópicas a luz transmitida de la diorita del depósito Cerro del Oro.....	<b>46</b>

<b>Figura 17.</b> Fotografías de diques andesíticos del depósito Cerro del Oro.....	<b>47</b>
<b>Figura 18.</b> Imágenes microscópicas a luz transmitida del dique andesítico.....	<b>48</b>
<b>Figura 19.</b> Testigo y muestras del sondaje DDHLLA30 del depósito Cerro del Oro de los 44.60 m a los 46.10 metros de profundidad en donde se observa la brecha hidrotermal polimíctica.....	<b>49</b>
<b>Figura 20.</b> Imágenes microscópicas a luz transmitida en nícoles paralelos en aumento 4x de la brecha hidrotermal polimíctica del depósito Cerro del Oro.....	<b>50</b>
<b>Figura 21.</b> Fotografías del depósito La Colina (2).....	<b>51</b>
<b>Figura 22.</b> Fotografías de las muestras de mano de las distintas litologías del depósito La Colina (2).....	<b>52</b>
<b>Figura 23.</b> Imágenes microscópicas a luz transmitida del intrusivo diorítico-granodiorítico a nícoles paralelos .....	<b>53</b>
<b>Figura 24.</b> Imágenes microscópicas a luz transmitida en nícoles paralelos de las andesitas y autobrecha del depósito La Colina (2).....	<b>54</b>
<b>Figura 25.</b> Fotomicrográficas de las brechas magmáticas-hidrotermales del depósito La Colina (2).....	<b>56</b>
<b>Figura 26.</b> Imágenes macroscópicas de las litologías albitizadas en los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2).....	<b>58</b>
<b>Figura 27.</b> Imágenes microscópicas a luz transmitida de las litologías albitizadas en los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2).....	<b>59</b>
<b>Figura 28.</b> Imagen macroscópica y microscópica a 500 micras de la alteración potásica del depósito Cerro de Oro. Diorita de biotita con vetillas de cuarzo-hematita, diseminado de pirita y cúmulos de biotita secundaria.....	<b>61</b>
<b>Figura 29.</b> Imágenes macroscópicas y microscópicas a 500 micras de la alteración potásica del depósito La Colina (2). Granodiorita de biotita con vetilla de cuarzo, magnetita, calcopirita y pirita (izquierda) y mosaico equigranular con cristales de plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico y biotita.....	<b>62</b>
<b>Figura 30.</b> Imágenes microscópicas a luz transmitida de las litologías con alteración potásica de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2).....	<b>63</b>
<b>Figura 31.</b> Imágenes microscópicas a luz reflejada en nícoles paralelos 500 micras de la brecha magmática-hidrotermal con matriz de magnetita del depósito La Colina (2).....	<b>64</b>
<b>Figura 32.</b> Imagen macroscópica y microscópica en nícoles paralelos a 500 micras de la litología diorita de biotita del depósito La Colina (2). Muestra Col-04 del sondaje CLRD015. Vetilla de pirita con un halo de sericita proximal y cuarzo-sericita más distal.....	<b>65</b>
<b>Figura 33.</b> Imágenes microscópicas a luz transmitida de las rocas con alteración sericítica en los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2).....	<b>66</b>
<b>Figura 34.</b> Imágenes macroscópicas de las rocas con alteración propilítica (albita-epidota-clorita-esmectita-carbonatos) de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2).....	<b>68</b>

<b>Figura 35.</b> Imágenes microscópicas a luz transmitida a nícoles paralelos de las rocas con alteración propilítica (albita-epidota-clorita-esmectita-carbonatos-magnetita-pirita) de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2).	<b>69</b>
<b>Figura 36.</b> Imágenes microscópicas a luz transmitida a nícoles paralelos de vetillas asociadas a alteración propilítica (albita-epidota-clorita-esmectita-carbonatos) de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2).	<b>70</b>
<b>Figura 37.</b> Imágenes macroscópicas de las litologías con alteración argílica moderada y supérgena de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2), respectivamente.	<b>71</b>
<b>Figura 38.</b> Imágenes microscópicas a luz transmitida a nícoles paralelos en aumento 4x de las litologías con alteración argílica moderada y supérgena de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2).	<b>72</b>
<b>Figura 39.</b> Imagen macroscópica y microscópica en nícoles paralelos a 500 micras de la litología diorita de biotita del depósito Cerro del Oro con alteración supérgena. Muestra COR-01 del testigo de sondaje DDHLLA030. Roca silicificada con vetillas de cuarzo junto a óxidos de Cu, Fe y Mg.	<b>73</b>
<b>Figura 40.</b> Imágenes macroscópicas de las litologías seleccionadas para análisis mediante microscopio electrónico de barrido (SEM).	<b>75</b>
<b>Figura 41.</b> Macro y microfotografías de calcopiritas en vetillas y diseminada del depósito La Colina (2) en asociación con alteración potásica.	<b>76</b>
<b>Figura 42.</b> Fotomicrografías de cristales de pirita en vetillas y diseminada del depósito La Colina (2).	<b>77</b>
<b>Figura 43.</b> Fotomicrografías con luz reflejada de óxidos de hierro en vetillas y diseminado del depósito La Colina (2).	<b>79</b>
<b>Figura 44.</b> Fotomicrografías de óxidos de hierro y pirita en vetillas y diseminado del depósito Cerro del Oro asociado a las alteraciones sericitica, argílica moderada y supérgena.	<b>81</b>
<b>Figura 45.</b> Macro y microfotografías de las litologías que hospedan la mineralización en Cerro del Oro, Pórfido Central Llahuín y La Colina (2).	<b>82</b>
<b>Figura 46.</b> Secuencia paragenética de alteración y mineralización del depósito Cerro del Oro.	<b>85</b>
<b>Figura 47.</b> Secuencia paragenética del depósito La Colina (2).	<b>86</b>
<b>Figura 48.</b> Representación esquemática simplificada de un testigo de sondaje a partir de la descripción de secciones transparentes-pulidas realizadas en los testigos de sondajes DDHLLA030 y DDHLLA20 del sector Cerro del Oro.	<b>90</b>
<b>Figura 49.</b> Representación esquemática simplificada de un testigo de sondaje a partir de la descripción de secciones transparentes-pulidas realizadas en los testigos de sondajes CLRD004, CLRD007, CLRD011, CLRD012, CLRD015, CLRD019 del sector La Colina (2).	<b>92</b>
<b>Figura 50.</b> Zonación de alteración-mineralización hipógena para un sistema tipo pórfido Cu-Mo-Au. La línea roja indica la profundidad relativa de erosión o exhumación de los depósitos Pórfido Central Llahuín y Cerro del Oro dentro del cluster de pórfidos Llahuín. Modificado de Sillitoe (2010).	<b>95</b>
<b>Figura 51.</b> Modelo esquemático de alteración hidrotermal y mineralización IOCG (izquierda) y pórfido cuprífero (derecha). Modificado de Richards y Mumin (2013). Los rectángulos en rojo indican la ubicación	

aproximada del cluster de pórfidos Cu-(Au-Mo) Llahuín, donde se encuentra el depósito Cerro del Oro; y el depósito de afinidad IOCG La Colina (2), de acuerdo a las características de alteración y mineralización descritas en este estudio.....97

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Sondajes muestreados para este estudio y su ubicación en coordenadas UTM.....	<b>19</b>
<b>Tabla 2.</b> Porcentaje de reemplazo por asociaciones minerales de alteración hidrotermal.....	<b>43</b>

SOLO USO ACADÉMICO

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

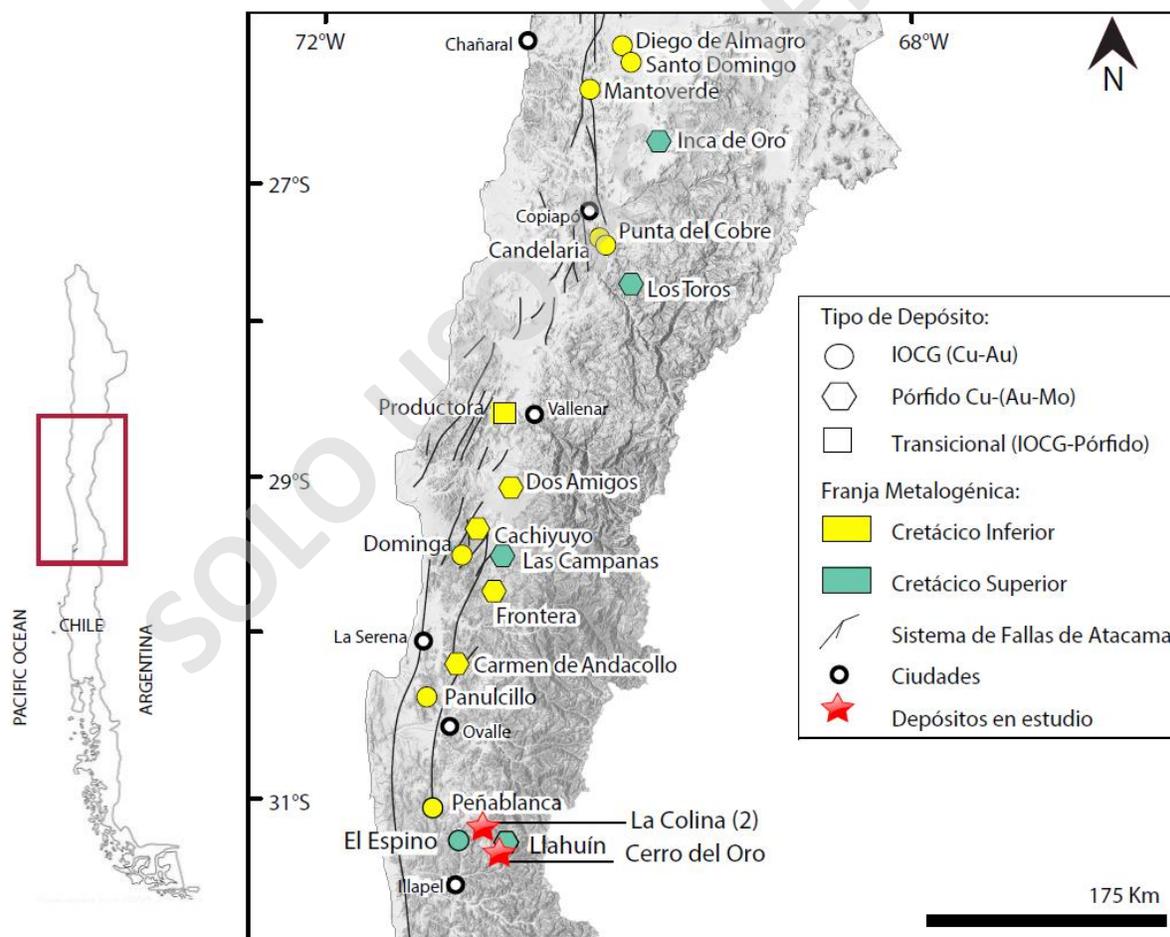
## 1.1 Formulación y motivación del estudio propuesto

Chile es reconocido a nivel mundial como uno de los lugares con las mayores concentraciones de cobre de la Tierra. Los depósitos tipo pórfido cuprífero y de óxidos de hierro-cobre-oro o *iron oxide-copper-gold* (IOCG) representan la primera y segunda fuente de cobre en Chile, respectivamente. Además, de sus elevadas concentraciones de cobre, estos depósitos pueden contener cantidades significativas de Au, Ag, Mo y metales críticos (por ejemplo, elementos del grupo del platino, Re, tierras raras, In, Co, Te, Ge, Ga, etc.), esenciales en la producción de tecnologías energéticas verdes y para la transición global hacia bajas emisiones de carbono (Arndt et al., 2017; Watari et al., 2021).

La ocurrencia de depósitos minerales a lo largo de la provincia metalogénica de los Andes se encuentra genéticamente asociada con la generación de un arco magmático en un margen de subducción (Camus, 2003). La migración del magmatismo hacia el este a partir del Jurásico Superior resultó en una serie de franjas metalogénicas longitudinales y paralelas al margen continental (Sillitoe y Perelló, 2005). Por su parte, entre los 26° y los 32°S, la Franja Cretácica de la Cordillera de la Costa del norte de Chile hospeda varios tipos de depósitos, incluyendo estratoligados Cu-(Ag) o tipo-manto, magnetita-apatito o *iron oxide-apatite* (IOA), IOCG y pórfidos Cu-(Au-Mo) (Sillitoe, 2003; Sillitoe y Perelló 2005).

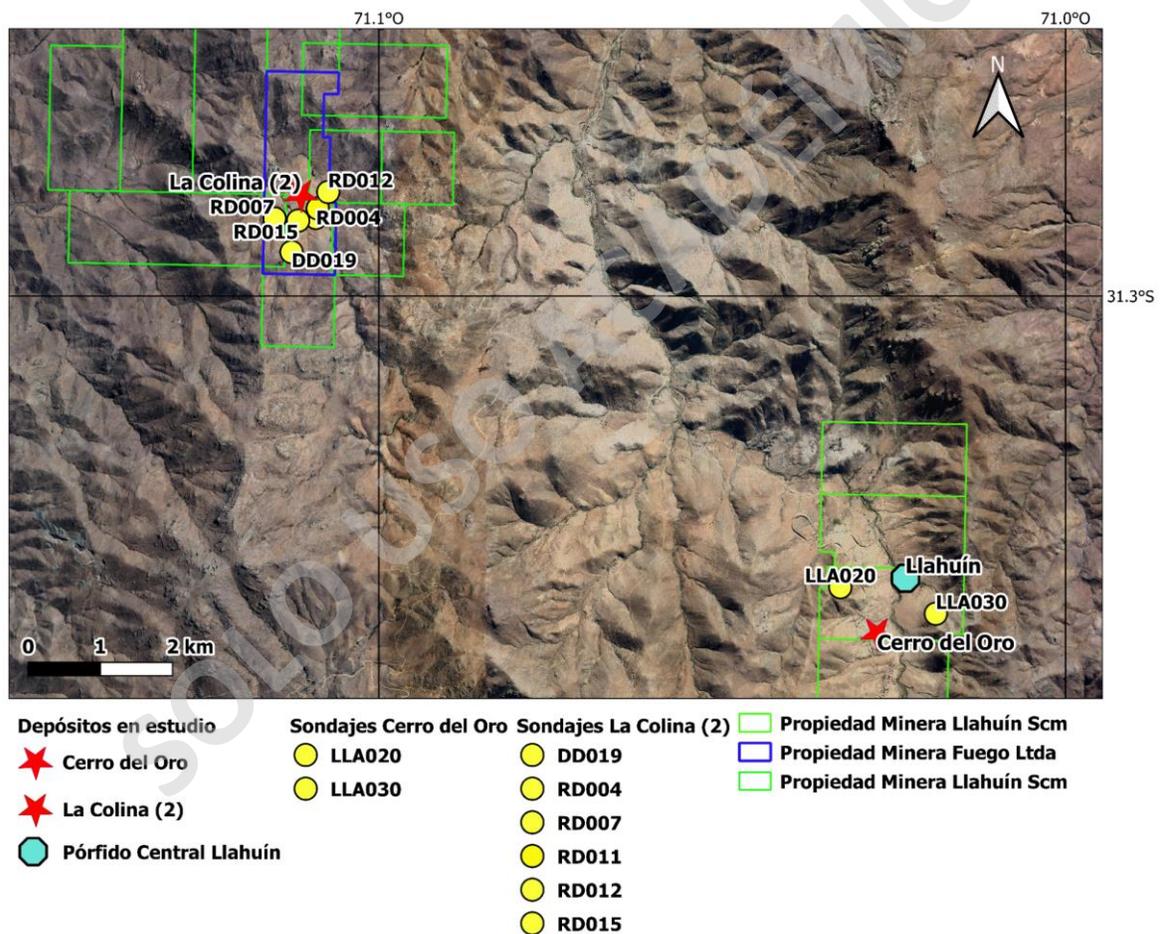
Dentro de la Franja Cretácica, los depósitos IOCG y tipo pórfido Cu-(Au-Mo) se encuentran espacialmente asociados unos con otros (**Figura 1**). De acuerdo con Richards et al. (2017), los depósitos IOCG se habrían formado entre los 125 y 110 Ma, mientras que los depósitos tipo pórfido Cu-(Au-Mo) tendrían edades menores a los 110 Ma. Los depósitos IOCG se habrían formado en un ambiente de subducción bajo un régimen extensional entre el Jurásico Superior y el Cretácico Inferior (Oyarzún et al., 2003; Sillitoe, 2003). Mientras que el primer evento de formación de pórfidos cupríferos en la Cordillera de la Costa del norte de Chile se relacionaría con uno de los primeros episodios de deformación asociados a un régimen compresivo durante el Cretácico Inferior (116-104 Ma; Creixell et al., 2020).

Sin embargo, algunos IOCGs y pórfidos cupríferos de la Franja Cretácica se habrían formado de forma coetánea (por ejemplo, El Espino y Llahuín entre los 92-86 Ma; Richards et al., 2017; **Figura 1**). También se habrían formado depósitos “híbridos” o “transicionales” con características geológicas afines con ambos estilos de mineralización (por ejemplo, El Tropezón y Productora; Fox, 2000; Ray and Dick, 2002; Tornos et al., 2010; Escolme et al., 2020; **Figura 1**). Estas observaciones, sugieren una posible relación genética entre los depósitos IOCG y pórfidos cupríferos de la Franja Cretácica, los cuales se habrían formado principalmente bajo un fuerte control estructural asociados al Sistema de Fallas de Atacama (Richards et al., 2017).



**Figura 1.** Ubicación de los depósitos tipo IOCG y pórfido Cu-(Au-Mo) de edad Cretácica entre las latitudes 26° y 33°S del centro-norte de Chile, además de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2) en los cuales se enfoca este estudio. Palma (no publicado), modificado de Richards et al. (2017).

Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se presenta un estudio mineralógico de los depósitos Cu-(Au) Cerro del Oro y La Colina (2) (**Figura 1**), pertenecientes a la empresa minera *Southern Hemisphere Mining (SHM) Limited*. Estos depósitos se ubican aproximadamente a los 31°S dentro de la Cordillera de la Costa, en la vecindad del Distrito IOCG El Espino (~93-86 Ma; López et al., 2014) y el Distrito de pórfidos Cu-(Au-Mo) Llahuín (~92 Ma; Makshev et al., 2010), los cuales se superponen relativamente de manera espacial y temporal (**Figura 1**). Los depósitos en estudio se encuentran en etapa de exploración minera y forman parte de las concesiones Amapola 3 de Minera Llahuín Scm y La Colina de Minera Fuego Ltda, respectivamente (**Figura 2**).



**Figura 2.** Imagen satelital con la ubicación de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2), las propiedades mineras y los sondajes utilizados en este estudio.

El depósito Cerro del Oro se encuentra dentro del Distrito Llahuín, específicamente a 1 km de distancia del Pórfido Central Llahuín, el cual contiene recursos medidos e indicados de

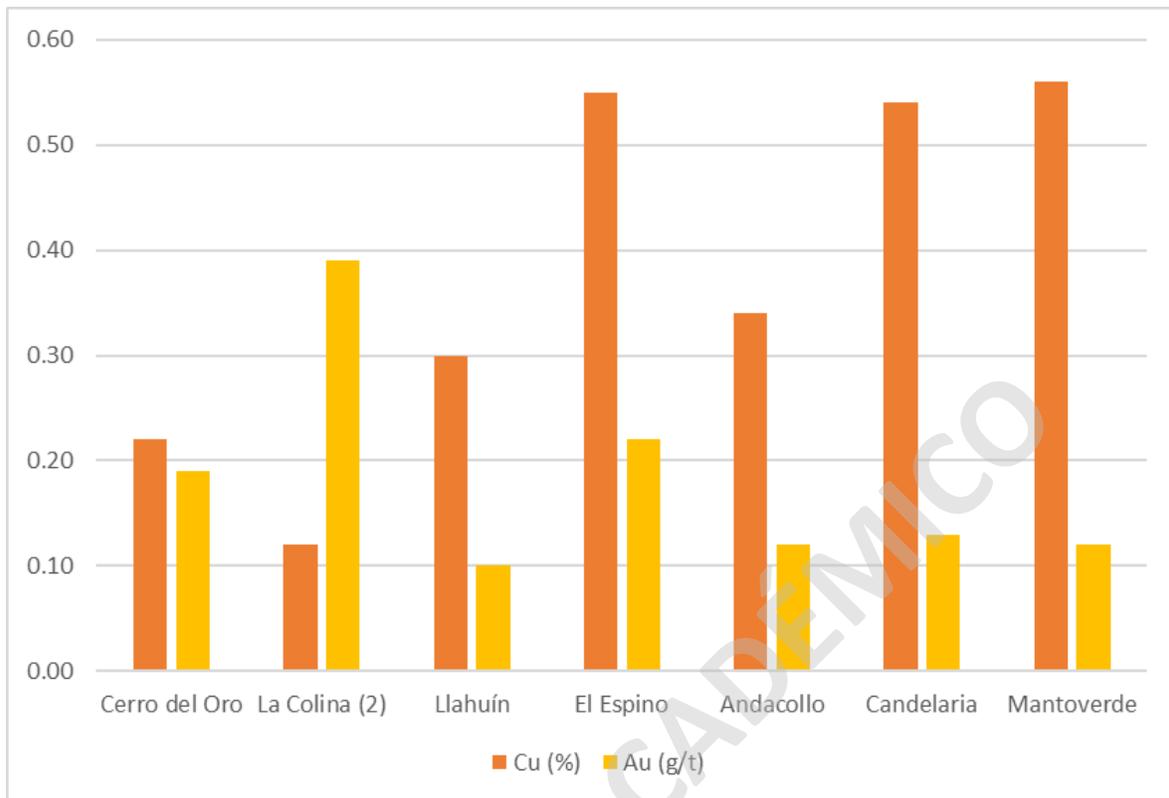
145 Mton con 0.4% de Cu equivalente y valores cercanos a 0.2 g/ton de Au (**Figura 3**; *SHM Limited*, 2012). Por otra parte, el depósito La Colina (2) ha sido previamente definido como un sistema de brechas magmáticas-hidrotermales con leyes de 0.4 g/ton de Au (**Figura 3**; *SHM Limited*, 2012). Algunas muestras de *RockChip* del depósito La Colina (2) reportan contenidos de hasta 17 ppm Au (*SHM Limited*, 2012).

En el presente trabajo de tesis se realiza una caracterización de la geología de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2), incluyendo aspectos relacionados a la litología, alteración hidrotermal y mineralización. Los resultados obtenidos corresponden a observaciones de terreno, descripciones macroscópicas y petro-calcográficas de muestras de mano obtenidas de afloramientos de roca, así como de testigos de sondajes. Asimismo, se examina la posible ocurrencia del oro en dos secciones transparentes-pulidas mediante microscopio electrónico de barrido (SEM). Esta información es de relevancia para entender los procesos geológicos que formaron estos depósitos y para contribuir con nuevos antecedentes a la zona de estudio, la cual ha sido muy poco estudiada. Además, se clasifican los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2) de acuerdo con sus características de alteración hidrotermal y mineralización, y se comparan sus principales características geológicas y mineralógicas.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

El objetivo general de este trabajo es determinar a qué tipo de depósito mineral corresponden Cerro del Oro y La Colina (2) con base en sus principales características geológicas y mineralógicas relacionadas con su litología, alteración hidrotermal y mineralización. Asimismo, se espera reconocer implicancias sobre los principales controles de la mineralización de Cu y Au en estos depósitos.



**Figura 3.** Comparación de los recursos de Cu (%) y Au (g/t) de los depósitos Cu-Au de la Cordillera de la Costa: Cerro del Oro, La Colina (2), Llahuín (Pórfido Central), El Espino, Andacollo, Candelaria y Mantoverde (**Figura 1**). Fuente de datos: Informe Técnico de *Southern Hemisphere Mining Limited* (2012), Informe Técnico Proyecto exploratorio de sondajes La Colina por Minera Fuego Ltda. (2006) y Richards et al. (2017).

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información geológica de terreno, con énfasis en la litología, alteración hidrotermal y mineralización en superficie.
- Caracterizar mineralógicamente la litología, alteración hidrotermal y mineralización, mediante el estudio de secciones transparentes-pulidos a partir de muestras de superficie y testigos de sondajes.
- Establecer una secuencia paragenética de los principales eventos de alteración hidrotermal y mineralización para cada uno de los depósitos.
- Examinar la ocurrencia del Cu y Au (fases minerales y texturas) mediante microscopía óptica de barrido (SEM).

- Comparar las características geológicas y mineralógicas y determinar a qué tipo de depósito mineral corresponden Cerro del Oro y La Colina (2).
- Generar un modelo geológico esquemático de los depósitos en estudio.

### **1.3 Hipótesis**

La mineralización de Cu y Au en los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2) representan distintos estilos de mineralización que se formaron durante el Cretácico.

El depósito Cerro del Oro corresponde a la zona más somera del cluster de pórfidos Cu-(Au-Mo) Llahuín, el cual se caracteriza por la presencia de vetillas/stockworks de cuarzo y un dominio de alteración argílica avanzada. En contraste, el depósito La Colina (2) corresponde a un sistema de brechas hidrotermales con una alteración propilítica dominante. Este depósito se asocia con mineralización tipo IOCG, ya que se han identificado vetas de magnetita en las proximidades del depósito. Las diferencias en los estilos de mineralización entre los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2) son un reflejo de las particularidades de los procesos geológicos que operaron durante el Cretácico.

### **1.4 Metodología y análisis**

#### **1.4.1 Revisión de antecedentes geológicos disponibles**

La primera etapa de este estudio contempló la revisión de material bibliográfico referente a los depósitos tipo pórfido cuprífero e IOCG de la Cordillera de la Costa, además de la compilación de datos existente de los depósitos minerales en estudio. Adicionalmente, se realizó una revisión de las vías de acceso y ubicación de los puntos de interés a través del análisis de imágenes LANDSAT y GOOGLE EARTH (**Figura 2**).

## 1.4.2 Trabajo de terreno

El trabajo de terreno se realizó entre los días 26 y 27 de abril del 2022. Se recopilieron muestras de superficie y de testigos de sondajes de diamantina de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2) (**Figura 4**). En total, se muestrearon dos testigos de sondajes del depósito Cerro del Oro, y seis testigos de sondajes del depósito La Colina (2) (**Tabla 1**).

En esta etapa se generó una planilla de mapeo con el código del sondaje, número de caja, metros totales del testigo de sondaje, metraje de la muestra extraída, además de una breve descripción a muestra de mano de la litología, alteración hidrotermal, mineralización y estructuras presentes en los depósitos.



**Figura 4.** Sondajes muestreados para los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2). (a) y (b) Corresponden al sondaje DDHLLA030 del depósito Cerro del Oro a profundidades de 30-29.1 m y 44.6-40 m, respectivamente. (c) Sondaje CLRD019 del depósito La Colina (2) a una profundidad de 134-133.8 m.

### **1.4.3 Descripción de las muestras y secciones transparentes-pulidas**

La caracterización mineralógica se realizó a partir de la descripción macroscópica de muestras de mano y mediante el estudio petro-calcográfico de 20 secciones transparentes-pulidas (**Tabla 1**). Para la preparación de secciones transparentes-pulidas se seleccionaron 12 muestras de testigo de roca y 6 muestras de afloramiento.

Para la descripción petro-calcográfica se utilizó un microscopio petrográfico de marca Nikon y modelo eclipse E200 en el Laboratorio de Microscopía de la Escuela de Geología de la Universidad Mayor.

### **1.4.4 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)**

Posterior al estudio de microscopía óptica, se seleccionaron 2 secciones transparentes-pulidas, una de cada depósito (COR-02 y COL-09), para realizar un análisis mineralógico detallado. El objetivo de este análisis fue examinar la ocurrencia del oro y obtener datos composicionales semi-cuantitativos mineralógicos. Las muestras (COR-02 y COL-09) se seleccionaron de acuerdo a su asociación mineralógica, dado por la presencia de abundante pirita y calcopirita, respectivamente.

El microscopio electrónico de barrido (SEM, ZEISS GeminiSEM 360) se ubica en la Facultad de Ciencias Naturales, Matemáticas y del Medio Ambiente de la Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago. Este SEM posee como equipamiento un espectrómetro de dispersión de energía (EDS) y un detector de electrones retro-dispersados (BSED).

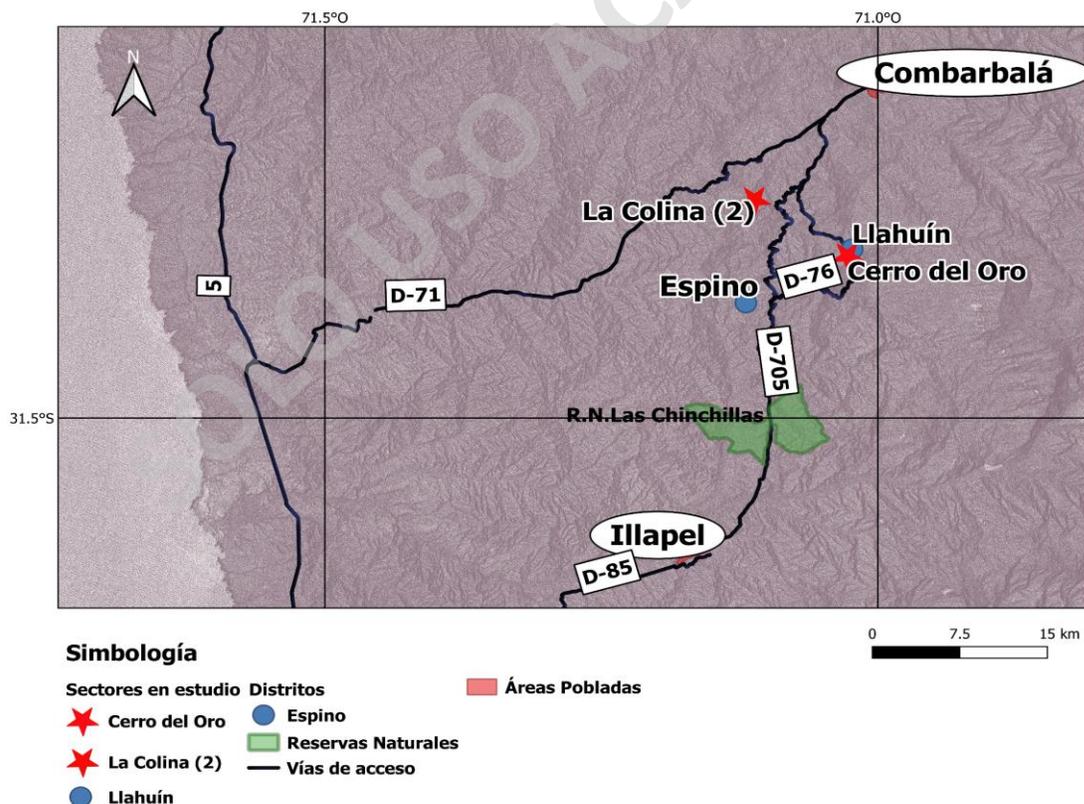
<b>Sondajes muestreados</b>					
		<b>Coordenadas</b>			
<b>ID Sondaje</b>	<b>Depósito</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>	<b>Proyecto</b>	<b>Propiedad Minera</b>
DDHLLA020	Pórfido Central Llahuín	307080	6530720	Amapola 3	Llahuín Scm
DDHLLA030	Cerro del Oro	307109	6530783	Amapola 3	Llahuín Scm
CLRD004	La Colina (2)	299239	6536310	La Colina (1/5)	Fuego Ltda
CLRD007	La Colina (2)	298666	6536291	La Colina (1/5)	Fuego Ltda
CLRD011	La Colina (2)	299261	6536442	La Colina (1/5)	Fuego Ltda
CLRD012	La Colina (2)	299402	6536671	La Colina (1/5)	Fuego Ltda
CLRD015	La Colina (2)	298993	6536268	La Colina (1/5)	Fuego Ltda
CLRD019	La Colina (2)	298909	6535831	La Colina (1/5)	Fuego Ltda

**Tabla 1.** Sondajes muestreados para este estudio y su ubicación en coordenadas UTM\_WGS\_84.

## 1.5 Ubicación y vías de acceso

El depósito Cerro del Oro se ubica dentro del Distrito Llahuín en la Provincia del Limarí, región de Coquimbo, aproximadamente a 240 km al norte de Santiago y 17 km al sur de la localidad de Combarbalá (**Figura 5**). Este proyecto minero se ubica a 56 km al este de la costa y de la Carretera Panamericana. Las coordenadas geográficas del centro del proyecto son Este 71°01'29" y Norte 31°20'23" (Datum Long/Lat PSAD56). Dentro del Distrito Llahuín, el depósito Cerro el Oro se ubica específicamente en las coordenadas Este 71°01'37" y Norte 31°19'46".

Por otra parte, el sector La Colina (2) se ubica a 8 km al noroeste del depósito Cerro del Oro, aproximadamente a 250 km al norte de Santiago y 9 km al Sur de la localidad de Combarbalá (**Figura 5**). Las coordenadas geográficas del centro del proyecto son Este 71°02'71" y Norte 31°32'94" (Datum Long/Lat PSAD56). La altitud promedio del sector es de ~1200 m.s.n.m.



**Figura 5.** Ubicación y vías de acceso hacia los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2), región de Coquimbo, Chile.

## CAPÍTULO 2: MARCO GEOTECTÓNICO Y METALOGÉNICO

La evolución tectónica de los Andes Centrales del norte de Chile se asocia a la formación de un arco magmático producto de la subducción de placas, proceso que se ha mantenido activo desde el Jurásico (Charrier et al., 2007). Desde el inicio de la subducción, la migración del magmatismo hacia el este dio lugar a la formación de una serie de franjas metalogénicas paralelas de orientación N-S (Sillitoe, 2003; Sillitoe y Perelló, 2005). Particularmente, la Cordillera de la Costa del Jurásico-Cretácico temprano del norte-centro de Chile alberga una variedad de depósitos de origen magmático-hidrotermal, incluyendo los del tipo estratoligados Cu-(Ag) o tipo manto, magnetita-apatita o *iron oxide-apatite* (IOA), óxido de hierro-cobre-oro o *iron oxide-copper-gold* (IOCG), y pórfidos Cu-(Au-Mo) (Sillitoe, 2003; Sillitoe y Perelló, 2005).

Entre el Jurásico y el Cretácico Inferior, la evolución del margen andino se asoció con un régimen extensional (Richards et al., 2017) producto de una subducción oblicua sinistral de alto ángulo (Scheuber y Gonzalez, 1999), la cual propició la formación de *rifting* y adelgazamiento cortical (Charrier et al., 2007; Richards et al., 2017; **Figura 6a**). Durante este periodo se formaron pequeños depósitos tipo pórfido Cu-(Au) del Cretácico Inferior (>125 Ma; Berriasiense Barremiano), por ejemplo, los depósitos Antucoya y Colliguay (Maksaev et al., 2006, 2010).

A mediados del Cretácico, el régimen tectónico se volvió predominantemente transtensional con volcanismo episódico y depositación de sedimentos en cuencas de intra y trasarco (Brown et al., 1993; Arévalo et al., 2003; Richards et al., 2017; **Figura 6b**). Los depósitos IOCG y de magnetita-apatito se formaron principalmente entre los ~125 y los ~110 Ma (Aptiano-Albiano; Gelcich et al., 2005; Arévalo et al., 2006; Rieger et al., 2010; Tornos et al., 2010); y su formación se relaciona espacial y temporalmente con la culminación del período de extensión de tras-arco, que se desarrolló desde el Jurásico Superior hasta el Cretácico Medio (Oyarzun et al., 1999; Grocott y Taylor, 2002; Sillitoe, 2003).

Posteriormente, se registró una etapa de inversión tectónica que resultó en la migración hacia el este del arco magmático, con zonas de cizalle y cuencas de trasarco desarrollándose a mediados y finales del Cretácico (Mpodozis y Ramos, 1989; Brown et al., 1993; Scheuber, 1994; Arévalo et al., 2003; Charrier et al., 2007; Richards et al., 2017; **Figura 6c**). Los depósitos tipo pórfido Cu-(Au-Mo), como por ejemplo Carmen de Andacollo (104 Ma), comenzaron a formarse en el Cretácico Superior (<110 Ma; **Figura 6c**) entre los 25° y 32°S, luego de la reanudación del magmatismo de arco durante o después de la inversión de la cuenca (Maksaev et al., 2010). De acuerdo con Scheuber y Gonzalez (1999), estos cambios tectónicos reflejarían períodos alternados de acoplamiento y desacoplamiento de las placas tectónicas subductante y subductada.

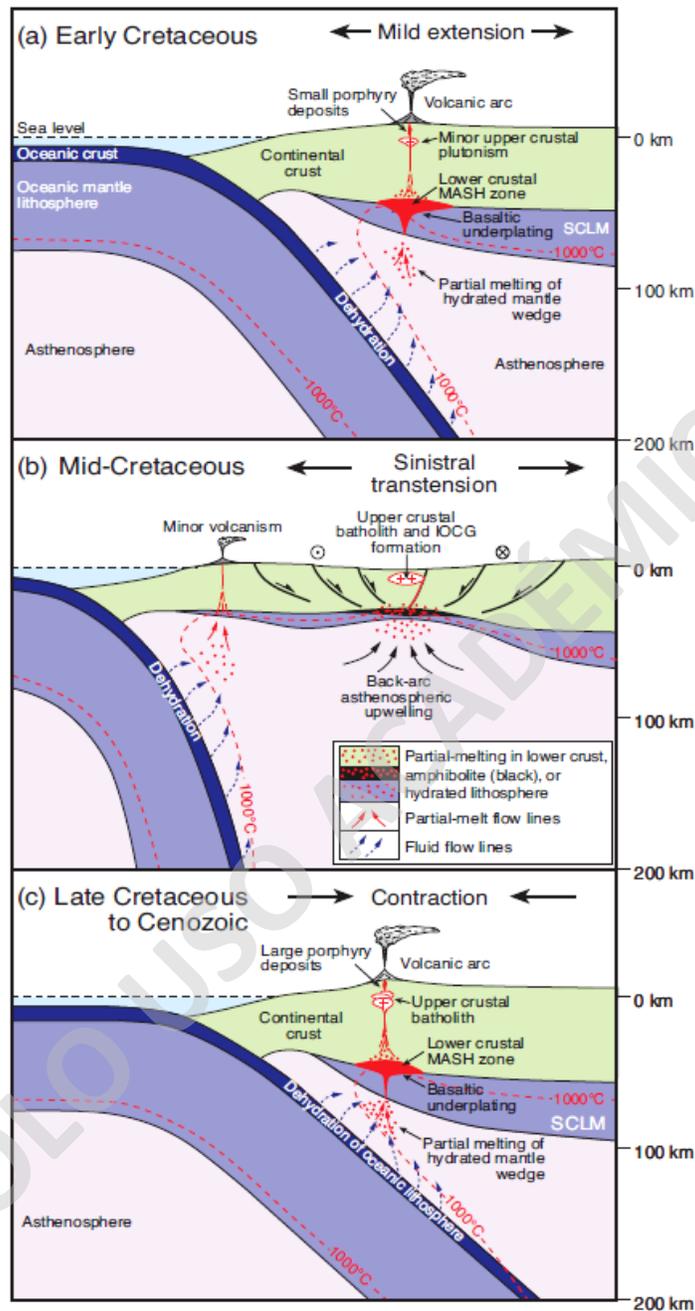
El Sistema de Fallas de Atacama fue el resultado de una subducción oblicua durante el Cretácico Inferior. Esta subducción dio lugar a la formación de un sistema de fallas transtensionales con desplazamiento de rumbo a nivel cortical (Scheuber y Andriessen, 1990; Brown et al., 1993). Estas estructuras crearon vías para el ascenso de magmas calcoalcalinos de composición intermedia a máfico y para la intrusión de batolitos compuestos (Maksaev, 2001; Morata y Aguirre, 2003; Charrier et al., 2007). Además, habrían actuado como conductos para el transporte de los fluidos mineralizadores durante la extensión regional (Simon et al., 2018; **Figura 6b**).

## **2.1 Depósitos de óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG)**

El clan de depósitos de óxidos de hierro-oro-cobre o *iron oxide-copper-gold* (IOCG) abarca una amplia variedad de depósitos minerales que presentan más de un 10% de contenido de hierro (Fe) en forma de magnetita y/o hematita, ya sea con o sin la presencia de cantidades significativas de Cu y Au, con mineralización de calcopirita y menor proporción de bornita como mena principal (Sillitoe, 2003; Groves et al., 2010; Williams et al., 2005). Estos depósitos pueden contener cantidades significativas de otros elementos con potencial económico tales como Ag, U, Co, Bi, Mo, F, P y tierras raras (Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005; Barton, 2014; **Figura 7**).

La alteración hidrotermal característica de estos depósitos se presenta como eventos sobreimpuestos determinados por una alteración sódica-cálcica (albita, actinolita, epidota) en las zonas más profundas, potásica (biotita, ortoclasa) en porciones profundas a intermedias y con menor desarrollo alteración sericítica (clorita, sericita, calcita) en la parte intermedia a superior del sistema. La zona más somera se caracteriza por la presencia de vetillas tardías con asociaciones de minerales ricos en K, Fe, Ca y C (hematita, sericita, clorita, carbonatos, cuarzo) (Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005; Richards y Mumin, 2013; **Figura 7**). Por otra parte, la mineralización en los depósitos IOCG ocurre de forma masiva, vetas, stockworks, brechas y diseminada, presentando un fuerte control estructural o confinado por niveles estratigráficos formando cuerpos mantiformes (Williams et al., 2005; Barton, 2014; del Real, 2018).

Es ampliamente aceptado que la mineralización IOCG es de origen hidrotermal, sin embargo, la fuente de los fluidos mineralizadores continúa siendo un tema controversial. Por una parte, varios autores postulan que los fluidos involucrados en la formación de los IOCG son de origen magmático-hidrotermal (por ejemplo, Hitzman et al., 1992; Pollard, 2000; Rieger et al., 2010). Por otra parte, otros autores proponen que fluidos provenientes de cuencas sedimentarias y son posteriormente calentados por cuerpos intrusivos (por ejemplo, Barton y Johnson, 1996, 2000; Ullrich y Clark, 1999; Chen et al., 2011) podrían originar mineralización de tipo IOCG. Sin embargo, estudios geoquímicos e isotópicos recientes en magnetita y sulfuros en varios depósitos IOCG chilenos son consistentes con un origen principalmente magmático-hidrotermal, con fluidos mineralizadores principalmente provenientes de magmas silicatados de composición intermedia a máfica y con una mínima contribución de salmueras de cuenca (Barra et al., 2017; Simon et al., 2018; del Real et al., 2020). Esto último es consistente con estudios de inclusiones fluidas en cuarzo, feldespato y calcita para los depósitos IOCG Candelaria y Mantoverde que sugieren una mezcla de fluidos de alta salinidad y de origen magmático-hidrotermal con salmueras de cuenca (por ejemplo, Marschik y Fontboté, 2001; Chiaradia et al., 2006; Rieger et al., 2012; Marschik y Kendrick, 2015).



**Figura 6.** Evolución tectonomagmática entre 25° y 34°S del norte de Chile durante el Cretácico y formación de depósitos tipo IOCG y pórfidos cupríferos. (a) El Cretácico Temprano, se caracterizó por un régimen de subducción en extensión que llevó a la formación de zonas de rift, magmatismo relativamente primitivo y adelgazamiento cortical. (b) Durante el Cretácico Medio, el régimen fue predominantemente transtensional sinistral, con volcanismo episódico, depositación de sedimentos en cuencas de intra y trasarco, y la formación de depósitos tipo IOCG. (c) El cambio hacia la tectónica compresiva durante el Cretácico tardío hasta el Cenozoico, es decir, inversión tectónica, se caracterizó por la migración del arco magmático hacia el este y la formación de grandes depósitos tipo pórfido cuprífero. Modificado de Richards et al. (2017).

## 2.2 Depósitos tipo pórfido Cu-(Au-Mo)

Los depósitos tipo pórfido cuprífero ocurren principalmente asociados a límites de placas convergentes, en márgenes continentales activos y márgenes cordilleranos (Sillitoe, 1998; Sillitoe, 2010; Mpodozis y Cornejo, 2012). Estos sistemas mineralizados se relacionan estrechamente con plutones subyacentes que ocurren a paleo-profundidades de 5 a 15 km. Estos plutones representan los reservorios que suministran los magmas y fluidos hidrotermales responsables de la formación de estos depósitos y la mineralización asociada (Sillitoe, 2010).

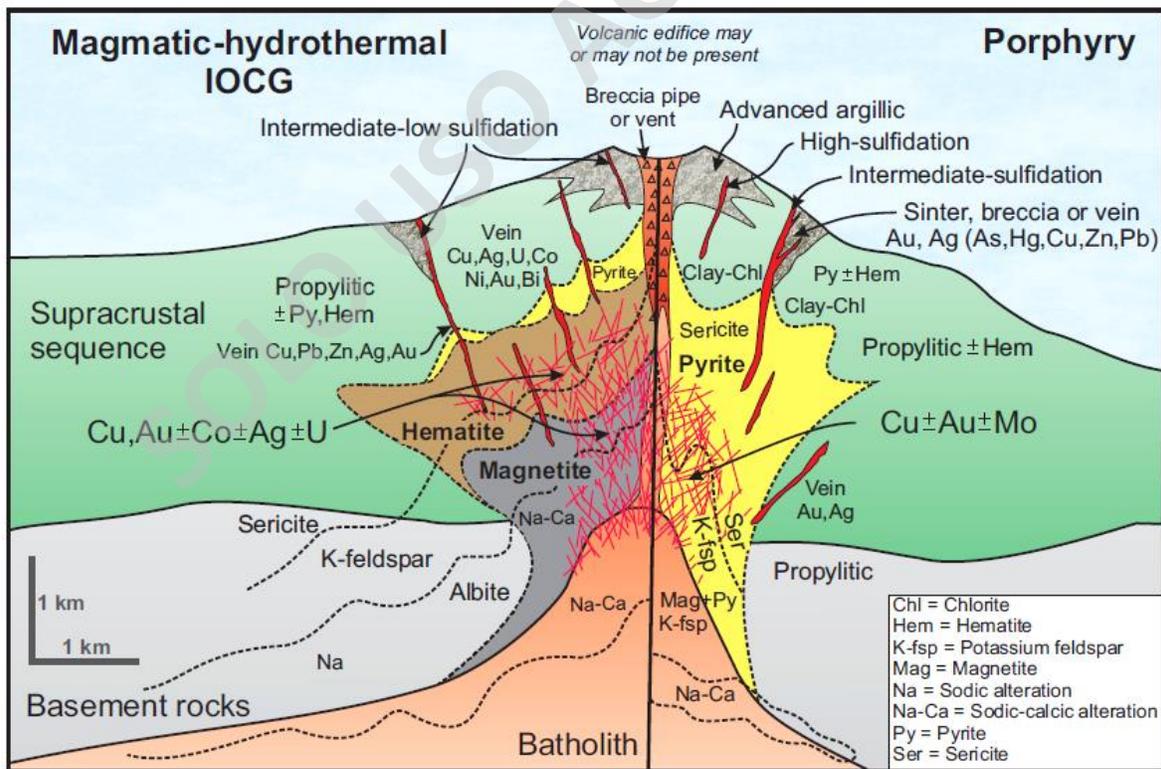
Los pórfidos cupríferos corresponden a grandes anomalías geoquímicas de Fe y S con mineralización metálicas de Cu y Au en forma de vetas, stockworks y/o diseminaciones, con proporciones variables de calcopirita, bornita, molibdenita, pirita y magnetita (Sillitoe, 2010). Estos depósitos se forman a partir de la exsolución de fluidos magmático-hidrotermales asociados principalmente a magmas calcoalcalinos de arco, oxidados y ricos en azufre (Park et al., 2021). Estos depósitos exhiben una secuencia de alteración y mineralización característica (**Figura 7**), la cual es el resultado del enfriamiento progresivo de rocas y fluidos, desde temperaturas  $>700^{\circ}\text{C}$  a  $<250^{\circ}\text{C}$ , causado por la intrusión de plutones parentales (Sillitoe, 2010).

En general, la zonación de alteración hidrotermal y mineralización hipógena es la siguiente: en la zona profunda, se encuentra una alteración sódico-cálcica, que generalmente es estéril y está mayormente asociada a la presencia de albita. Además, en el núcleo mineralizado, se encuentra la alteración potásica con mineralización de calcopirita, bornita y magnetita (**Figura 7**). En la zona intermedia, se presentan las alteraciones sericita-clorita, y sericítica (**Figura 7**). Además, en los sistemas tipo pórfido cuprífero se observa un halo gradacional y distal de alteración propilítica (albita, clorita-esmectita, epidota, carbonatos  $\pm$  pirita, magnetita) que puede extenderse por varios kilómetros (**Figura 7**). En la zona más somera, puede desarrollarse alteración argílica avanzada, la cual suele destruir la textura original de la roca producto de la alta acidez de los fluidos hidrotermales. Esto último, da lugar a *lithocaps*, que pueden alcanzar  $>1$  km de espesor, si no se ven afectados por una erosión significativa (**Figura 7**).

### 2.3 Relación entre los depósitos IOCG y pórfido Cu-(Au-Mo)

En general, se ha propuesto que algunos depósitos IOCG de origen magmático-hidrotermal comparten ciertas características con los depósitos tipo pórfido Cu-(Au-Mo), aunque también presentan algunas diferencias (Groves et al., 2010; Richards y Mumin, 2013a, b).

Los depósitos IOCG y pórfidos cupríferos suelen emplazarse a lo largo o en intersecciones de estructuras corticales, tensionales o transtensionales. Dichas estructuras controlan el emplazamiento de las intrusiones y ejercen una influencia significativa en el transporte de los fluidos hidrotermales, y, por lo tanto, en la formación de zonas de alteración hidrotermal y mineralización (Richards y Mumin, 2013a, b). Otras similitudes, entre ambos estilos de mineralización, incluyen el contenido principal de metales (Fe, Cu y Au), la química de los fluidos mineralizadores y el tipo de alteración hidrotermal (**Figura 7**), así como su configuración tectónica y asociación con magmas calcoalcalinos a ligeramente alcalinos (Richards y Mumin, 2013a).



**Figura 7.** Modelo esquemático para sistemas magmático-hidrotermales tipo IOCG (izquierda) y tipo pórfido Cu-(Au-Mo) (derecha). Richards y Mumin (2013).

No obstante, los depósitos IOCG presentan una gama más amplia de metales (Cu, Au, Ag, U, tierras raras, Co, Ni y Bi) en comparación con los depósitos tipo pórfido cuprífero (Cu, Au, Mo) (Somarin y Mumin, 2012; Richards y Mumin, 2013a, b; **Figura 7**). Otra característica distintiva es que los depósitos IOCG se formarían a partir de una fuente magmática empobrecida en azufre, mientras que los pórfidos cupríferos se originarían a partir de una fuente magmática rica en azufre (Richards et al., 2017). De manera consistente, las zonas de alteración ácida (sericítica y argílica) son más limitadas en los depósitos de IOCG en comparación con las zonas que se desarrollan en los depósitos tipo pórfido cuprífero (**Figura 7**). Cuando los fluidos ricos en azufre ( $SO_2$ ) de los sistemas tipo pórfido cuprífero se enfrían y mezclan con componentes acuosos, se forma  $H_2S$  y  $H_2SO_4^{2-}$  (ácido sulfúrico), resultando usualmente en alteración argílica a niveles poco profundos (Burnham, 1979; Candela, 1992; Field et al., 2005; Richards, 2011, 2015). Otra diferencia significativa, es que en los depósitos IOCG, la mineralización no suele ir acompañada de la precipitación de cuarzo, como ocurre en los depósitos tipo pórfido cuprífero (Sillitoe, 2010; Richards y Mumin, 2013b; Richards et al., 2017). Esto se refleja en una menor intensidad de la alteración hidrolítica y en una mayor presencia de carbonatos en los depósitos IOCG en comparación con los depósitos tipo pórfido cuprífero (**Figura 7**).

Dentro de la Franja Cretácica de la Cordillera de la Costa del norte de Chile, los IOCGs que se formaron a los ~125-110 Ma representan los depósitos más grandes de esta franja (por ejemplo, Candelaria y Mantoverde; Marschik et al., 2000; Sillitoe 2003; Williams et al., 2005). Asimismo, ocurren depósitos de tipo pórfido Cu-(Au-Mo) de menos de 110 Ma principalmente distribuidos entre los 26° y 31°S (por ejemplo, Dos Amigos y Andacollo; Sillitoe y Perelló, 2005). Estos depósitos representan un blanco poco explorado en términos de recursos de cobre. Esto se debe, en gran medida, a que son en su mayoría más pequeños en cuanto tonelaje y, en general, presentan leyes de cobre menores en comparación con los pórfidos cupríferos del Cenozoico (Sillitoe y Perelló, 2005).

Richards et al. (2017), propusieron que el arco/tras-arco Cretácico se desarrolló en tres etapas separadas: extensión (>125 Ma), extensión de trasarco y rifting (125-110 Ma), y una compresión más joven (110 Ma; **Figura 6**). Además, proponen que los magmas que dan

origen a los depósitos de IOCG se habrían formado durante un breve período de transtensión en el tras-arco durante el Cretácico Medio. Estos magmas son generalmente más máficos (dioríticos), más alcalinos y de naturaleza más primitiva en comparación con los magmas granodioríticos asociados con la formación de pórfidos cupríferos durante un contexto tectónico compresivo en el Cretácico Superior. Sin embargo, las composiciones de ambos tipos de intrusivos se superponen, y sus diferencias no son lo suficientemente claras como para ser diagnósticas.

De acuerdo con Creixell et al. (2020), la formación de pórfidos cupríferos durante el Cretácico entre los 28°00' y 29°30' S, muestra una fuerte relación temporal con eventos mayores de deformación que se registraron a lo largo de sistemas de fallas mayores paralelas al orógeno. El primer episodio de deformación ocurrió durante el Cretácico Temprano (~116 a 104 Ma), contemporáneo con una configuración transpresiva sinistral. Mientras que el segundo evento ocurrió durante el Cretácico Tardío (~92 a 87 Ma), coetáneo con una fase de deformación compresiva asociada con la Fase Orogénica Peruana.

Algunos depósitos IOCG y pórfidos cupríferos del Cretácico se superponen relativamente en términos de espacio y tiempo, por lo que ciertos autores han propuesto una posible relación genética entre ambos estilos de mineralización (por ejemplo, Tornos et al., 2010; Richards et al., 2017). Particularmente, es de interés para este estudio el IOCG El Espino (~93-86 Ma) y el pórfido Cu-(Au-Mo) Llahuín (~92 Ma), los cuales se relacionan espacialmente a los depósitos en estudio (**Figura 1**).

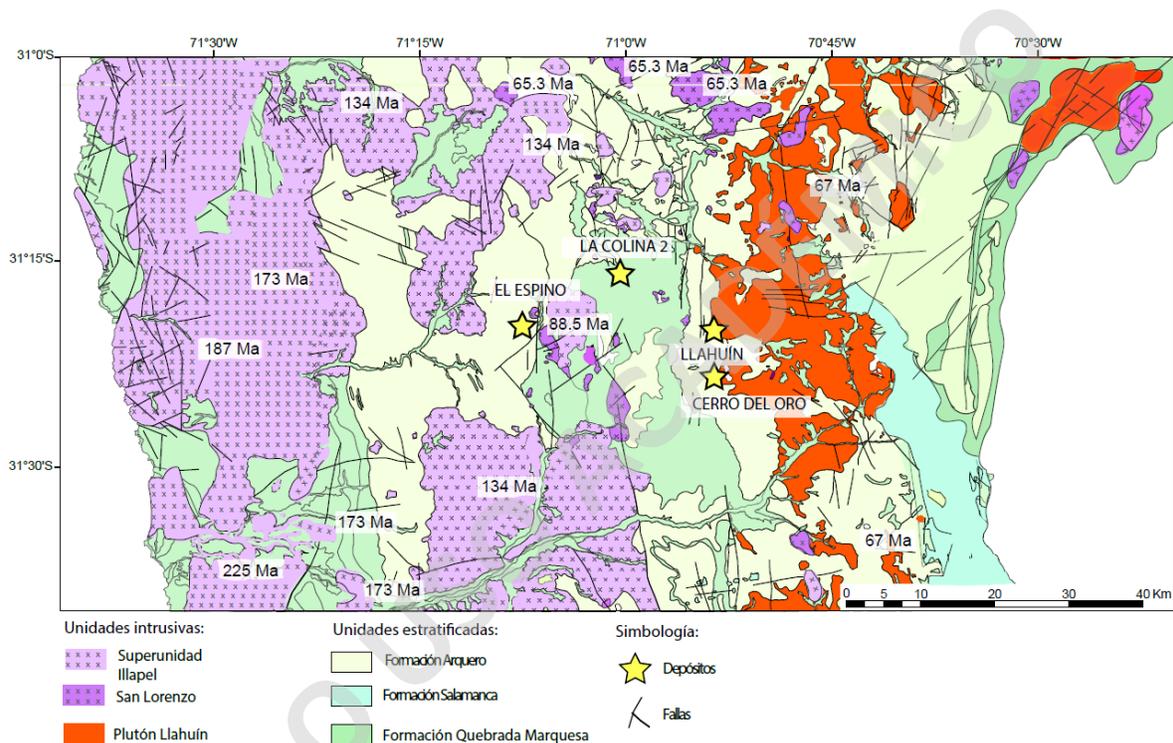
## **CAPÍTULO 3: MARCO GEOLÓGICO**

### **3.1 Geología Regional**

El área de estudio, donde se encuentran los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2), está compuesta por las formaciones volcánicas-sedimentarias Arqueros, Quebrada Marquesa y Salamanca. Es importante señalar que solo la parte superior de la Formación Arqueros y la base de la Formación Quebrada Marquesa se extienden dentro de la zona de estudio. Estas

formaciones son intruidas por una serie de rocas del Cretácico Superior de composición granodiorítica a diorítica (López et al., 2014), incluyendo el plutón Llahuín en la zona centro-norte y la Superunidad Illapel hacia el oeste (**Figura 8**).

A continuación, se describen las principales unidades estratificadas e intrusivas que albergan los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2).



**Figura 8.** Mapa geológico regional de la zona de estudio entre los 31°S y 31°45'S. Las estrellas amarillas muestran la ubicación de los depósitos Cerro del Oro, La Colina (2), Llahuín y El Espino. Palma (no publicado), modificado de Rivano y Sepúlveda (1991) y López et al. (2014).

### 3.1.1 Unidades Estratificadas

#### Formación Arqueros

Definida originalmente por Aguirre y Egert (1962, 1965), la Formación Arqueros tiene como techo la Formación Quebrada Marquesa, con la cual presenta un contacto concordante. Este contacto concordante se observa tanto con el Miembro El Espino, en la zona del mismo

nombre, como con el Miembro Quelén al sur de la localidad de Combarbalá. En su base, la formación se dispone en secuencias triásicas (Formación El Quereo) con la que presenta una discordancia erosiva y angular (Rivano y Sepúlveda, 1991). Además, se encuentra rodeada en gran parte por la Superunidad Illapel (**Figura 8**).

Aguirre y Egert (1965) subdividieron esta formación en cinco miembros, de los cuales tres miembros son de origen volcánico (Ka1, Ka3 y Ka5). El miembro basal se ha descrito como brechas volcánicas de potencia variable entre 200-300 m, mientras que los demás miembros corresponden a volcanitas que alcanzan una potencia de hasta 1000 m. Estos miembros se encuentran separados por dos miembros sedimentarios (Ka2 y Ka4), que corresponden a intercalaciones sedimentarias calcáreas, tales como coquinas, calciruditas y/o calcarenitas rudíticas.

Las condiciones de depositación corresponden a un ambiente volcánico, sin embargo, las intercalaciones sedimentarias evidencian la ocurrencia de episodios de sedimentación en aguas someras. Específicamente, de un ambiente infralitoral de alta energía, según Rivano y Sepúlveda (1991).

Esta formación se correlaciona con las formaciones Lo Prado y Veta Negra, esencialmente de edad Cretácica Inferior, como indican Thomas (1958), así como Piracés y Maksaeve (1977). Adicionalmente, el hecho de que la Formación Arqueros se encuentre intruida por la Superunidad Illapel limita su edad máxima al Neocomiano (Rivano y Sepúlveda, 1991).

### **Formación Quebrada Marquesa**

Definida por Aguirre y Egert (1962), la Formación Quebrada Marquesa sobreyace de manera concordante a la Formación Arqueros (**Figura 9**), y se encuentra cubierta en discordancia angular por la Formación Salamanca, específicamente por el Miembro Santa Virginia (anteriormente Formación Viñita) (Rivano y Sepúlveda, 1991).

Aguirre y Egert (1965) definieron la Formación Quebrada Marquesa en su localidad tipo a través de cuatro miembros, desde la base hasta el techo:

Miembro 1 (700-1200 m): Brechas, lavas, areniscas, tobas, conglomerados y lutitas continentales.

Miembro 2 (40-100 m): Areniscas calcáreas, calcilitas, calizas, lentes de yeso, lavas andesíticas y riolíticas.

Miembro 3 (50-250 m): Conglomerados, brechas, tobas, areniscas, lutitas, calizas y chert.

Miembro 4 (35-300 m): Lavas andesíticas y/o basálticas.

Además, lejos de su localidad tipo en la Hoja de Illapel (Rivano y Sepúlveda, 1991) se separó en dos miembros. El miembro inferior, denominado Miembro El Espino, es de origen sedimentario; y está compuesto por margas, calizas y areniscas con niveles locales de yeso estratificado. El miembro superior, denominado Miembro Quelén, se caracteriza por su color rojo-parduzco y tiene un origen volcánico-sedimentario. Este miembro se compone de niveles de conglomerados, areniscas, brechas y lavas.

El miembro inferior se limita al sector El Espino, tanto hacia el sur como hacia el norte, por contacto intrusivo. Mientras que al este, se encuentra limitado por contacto discordante con la Formación Salamanca (López et al., 2014; **Figura 9**). Sin embargo, hacia el norte, en la cuesta El Espino, el miembro inferior se acuña hasta desaparecer (López et al., 2014).

### ***Miembro El Espino***

El Miembro El Espino consiste en una secuencia sedimentaria marina transicional, donde afloran areniscas, conglomerados, margas, lutitas, calizas estromatolíticas y yeso estratificado.

La secuencia corresponde a una depositación en un ambiente transicional continental en régimen regresivo, con variaciones eustáticas, bajo un clima subtropical árido (Rivano y Sepúlveda, 1991). La presencia de intercalaciones margo-calcáreas con foraminíferos indicaría influencias de mar abierto (Rivano y Sepúlveda, 1991).

### ***Miembro Quelén***

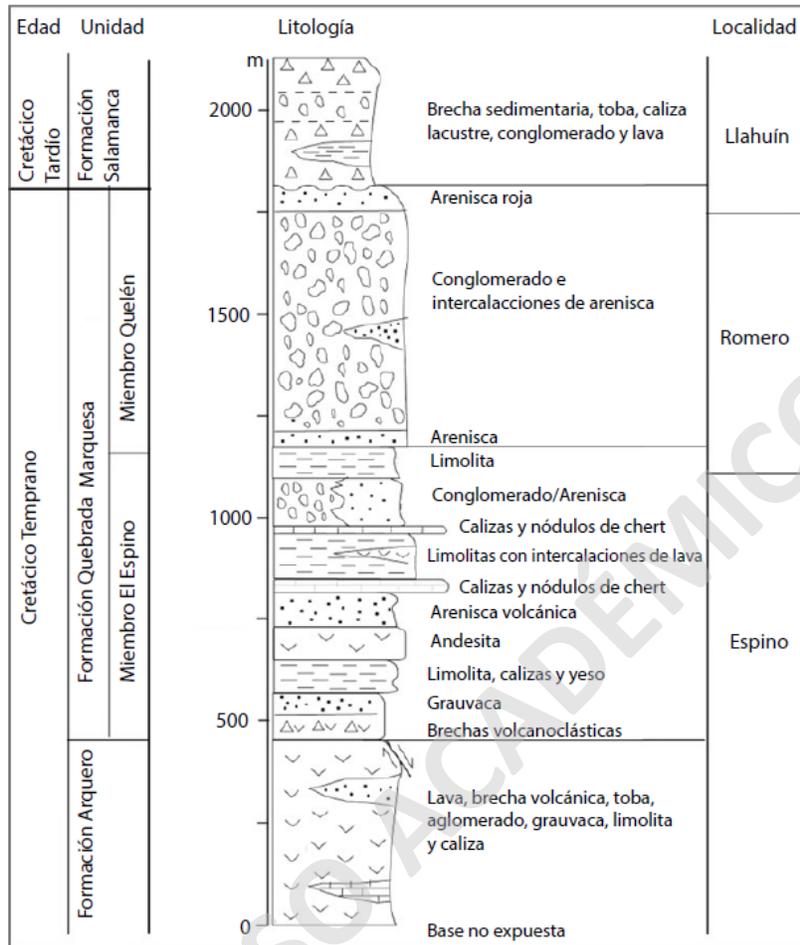
El Miembro Quelén abarca el 95% de los afloramientos asignados a la Formación Quebrada Marquesa. Este miembro está compuesto por intercalaciones de andesitas, brechas piroclásticas, volcarenitas y conglomerados de color rojo, con niveles blanquecino en las que se aprecia una buena estratificación (Rivano y Sepúlveda, 1991). Las características litológicas del Miembro Quelén revelan condiciones de depositación en un ambiente continental, dominado por una intensa actividad volcánica.

En la localidad tipo de la Formación Quebrada Marquesa, Aguirre y Thomas (1964) y Aguirre y Egert (1965) atribuyeron una edad que abarcaría desde el Neocomiano superior hasta el Albiano Superior, basándose en la presencia de fauna fósil recolectada en la parte basal de la unidad y su contacto discordante con la Formación Viñita.

Rivano y Sepúlveda (1991) acotaron la edad de la Formación Quebrada Marquesa mediante las relaciones estratigráficas que presenta y las edades radiométricas de los cuerpos que la intruyen. Estos intrusivos tienen edades obtenidas mediante el método geocronológico K-Ar en biotitas, que varían entre los 85 Ma y los 134 Ma, asignando a esta unidad una edad desde el Neocomiano Superior hasta el Albiano Superior. Estudios más recientes arrojaron edades U-Pb en circones de 107 Ma para el techo del miembro Quelén en el Valle de Quebrada Marquesa (Emparán y Pineda, 2006).

### **Depósitos cuaternarios**

Dentro de las unidades cuaternarias en la zona de estudio, tal como las definió Rivano y Sepúlveda (1991), se encuentran presentes sedimentos aluviales, coluviales y depósitos de relleno de valles. Estos están principalmente relacionados con los actuales cursos de agua actuales que provienen de esteros como Pupío, Conchalí y La Canela, así como los ríos Choapa, Chalinda, Illapel, Cogotí y Combarbalá. Estos depósitos están compuestos por gravas y ripios, los cuales presentan una mala estratificación, así como arenas y limos que muestran buena estratificación.



**Figura 9.** Estratigrafía del Cretácico dentro del Distrito IOCG El Espino mostrando los intervalos estratigráficos de las áreas Espino, Romero y Llahuín. Modificado de López et al. (2014).

### 3.1.2 Unidades Intrusivas

#### Superunidad Illapel

Definida por Rivano et al. (1985), esta unidad intrusiva se destaca como un rasgo distintivo en la geología de la zona de Illapel entre los 31-33°S. Abarca un área mayor a los 3,200 km<sup>2</sup> y se encuentra emplazada en rocas intrusivas y volcánicas del Jurásico, además de rocas volcánicas y sedimentarias del Cretácico Inferior.

Rivano et al. (1985) y Parada et al. (1999) dividieron los afloramientos de la Superunidad Illapel en dos unidades principales: la Unidad Chalinga, que constituye el 95% del total de afloramientos, y la unidad Limahuida, que comprende el 5% restante.

La Unidad Chalinga se extiende como una amplia franja que atraviesa toda la zona de Illapel. Su litología varía desde dioritas de anfíbol y piroxeno hasta sienogranitos de anfíbol y hornblenda, pasando por tonalitas, granodioritas y monzodioritas.

Por otra parte, la Unidad Limahuida aflora en una franja continua al norte y sur de Illapel, desde las nacientes del Estero El Espino hasta la localidad de Caimanes dentro de la Unidad Chalinga. Esta unidad está compuesta por granodioritas con una textura hipidiomórfica equigranular de grano medio, en la cual predominan el cuarzo y feldespatos. Los minerales ferromagnesianos son escasos y se presentan alterados a clorita y epidota.

Las dataciones geocronológicas realizadas en rocas graníticas de la Superunidad Illapel arrojaron edades obtenidas mediante el método geocronológico K-Ar en biotita, que varían entre 113 Ma y 96 Ma (Rivano et al., 1985). Estudios más recientes permitieron identificar cuatro pulsos magmáticos con edades obtenidas mediante el método geocronológico U-Pb en circón: 117 Ma, 110 Ma, 100 Ma y 90 Ma (Morata, 2006). Es importante mencionar que la litología varía desde composiciones máficas a granodioríticas junto con las edades de las franjas de en dirección de oeste a este.

### **Unidad San Lorenzo**

Definida por Rivano et al. (1985), la Unidad San Lorenzo corresponde a un conjunto de cuerpos dioríticos y andesíticos porfídicos, así como a cuerpos microgranulares cuyas dimensiones varían entre los 200-300  $m^2$  y los 80  $km^2$ . Esta unidad se compone por plutones alineados en dirección norte-sur, incluyendo los plutones Cogotí, El Sauce, Loma Blanca, El Aletón, y también los plutones Cuesta El Espino y Farellón Sánchez, que afloran en el área de estudio (Rivano y Sepúlveda, 1991).

La edad de la Unidad San Lorenzo ha sido determinada en el Plutón Cogotí mediante el método geocronológico K-Ar en roca total, resultando en  $65.3 \pm 3.1$  Ma, ubicándola en el intervalo Cretácico Superior-Paleógeno (Rosales, 1988).

### 3.1.3. Estructuras Regionales

Según Rivano y Sepúlveda (1986), entre los 31-32°S, es posible observar numerosas fallas normales, las cuales generalmente son subverticales a verticales, y que muestran sistemas de orientación bien definidos. Estas orientaciones se pueden categorizar en:

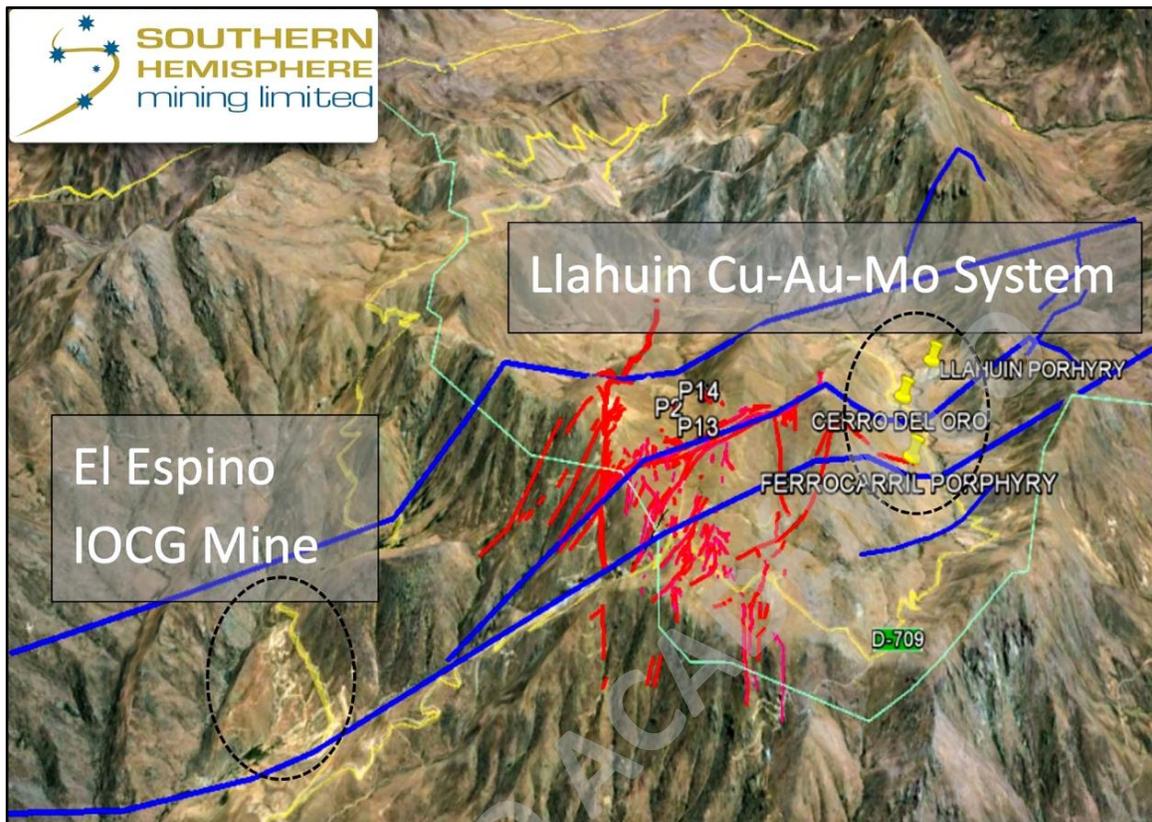
- Sistema de fallas NS-NNW: son las fallas regionalmente más notables que establecen un límite septentrional.
- Sistema de fallas NNE-NE: en este dominio se encuentra la Falla Tuluahuén, la cual pasa por el norte del distrito Llahuín.
- Sistema de fallas NWW-NW: se evidencian a través de fallas normales que son subparalelas entre sí y de corta longitud, exhibiendo una componente horizontal de tipo dextral.

## 3.2 Geología Local

La zona de estudio, ubicada entre los 31°S y 31°30'S del norte de Chile, se caracteriza por la ocurrencia de unidades intrusivas y volcano-sedimentarias de edad Cretácica (**Figura 8**), en las cuales se hospedan los distritos El Espino (88-86 Ma; López et al. 2014) y Llahuín (92 Ma; Richards et al., 2017) (**Figura 10**).

### 3.2.1 Distrito El Espino

El Distrito El Espino comprende una serie de cuerpos mineralizados, incluyendo el depósito El Espino, uno de los sistemas IOCG más australes de Chile. Aproximadamente el 30% del distrito está compuesto por rocas intrusivas, mientras que el resto de las litologías corresponden a rocas sedimentarias, brechas y lavas, pertenecientes a la Formación Arquero y Quebrada Marquesa (López et al., 2014). Como se observa en la **Figura 11**, en la parte norte del distrito se encuentran rocas intrusivas pertinentes al complejo plutónico Llahuín, además hacia el sur del distrito, se distribuyen varios plutones de diorita aislados, y más al sur del distrito aflora el complejo plutónico multifásico Illapel-Caimanes.



**Figura 10.** Imagen satelital de los distritos mineros dentro de la zona de estudio entre los 31°S y 31°30´S. Se observa la mina IOCG El Espino y el sistema de pórfidos Cu-(Au-Mo) Llahuín. Obtenido de SHM (2013).

La distribución de zonas de alteración y mineralización en el distrito El Espino indica un fuerte control estructural. La falla de Lagarrigue, con rumbo NNE, forma un límite oriental fundamental para el distrito (**Figura 11**), con rocas alteradas que se presentan al oeste, pero no al este de esta falla. Las principales zonas de alteración se distribuyen a lo largo de las fallas de rumbo NNO a NE en el distrito, o de forma paralela a ellas (López et al., 2014).

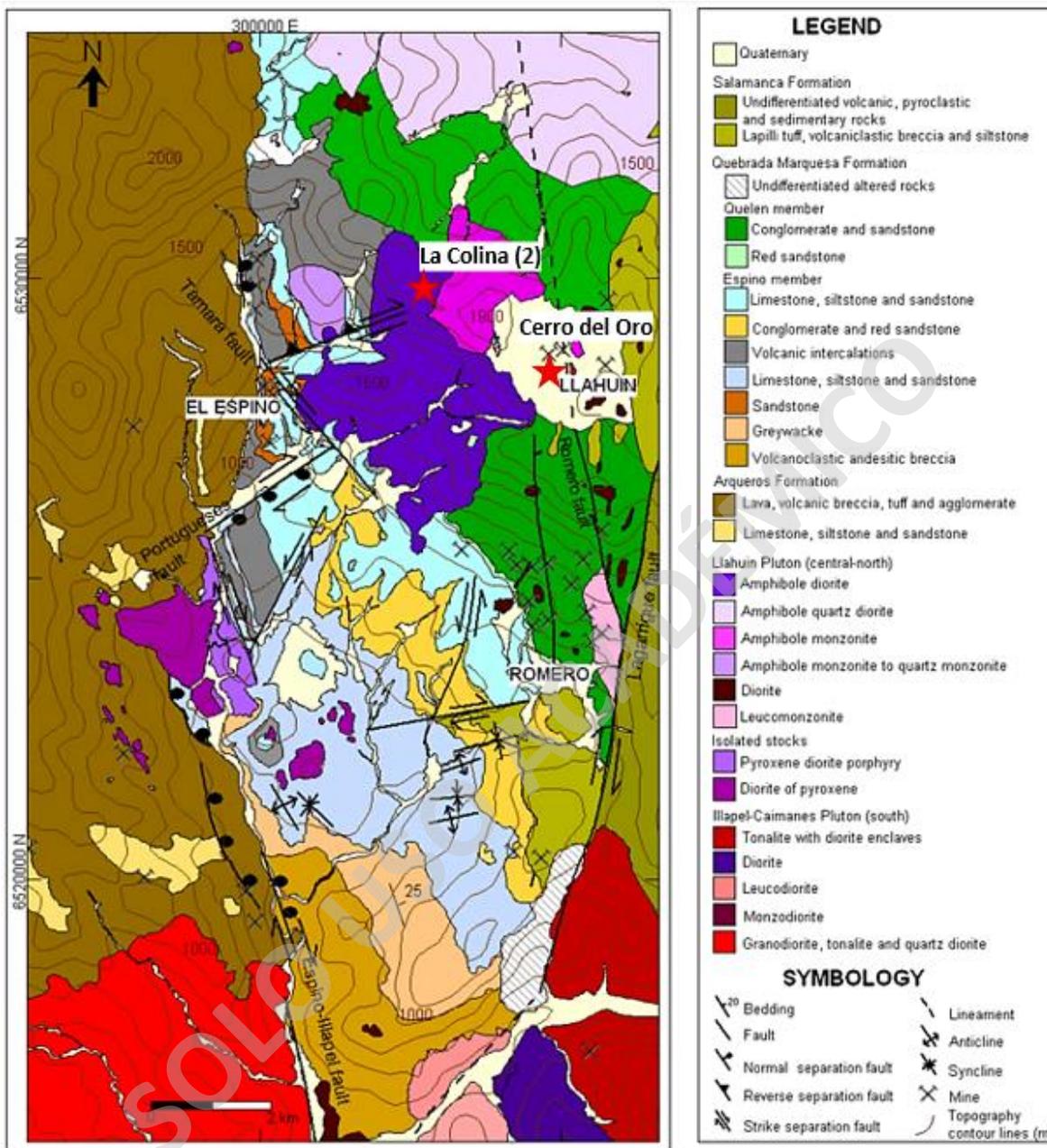
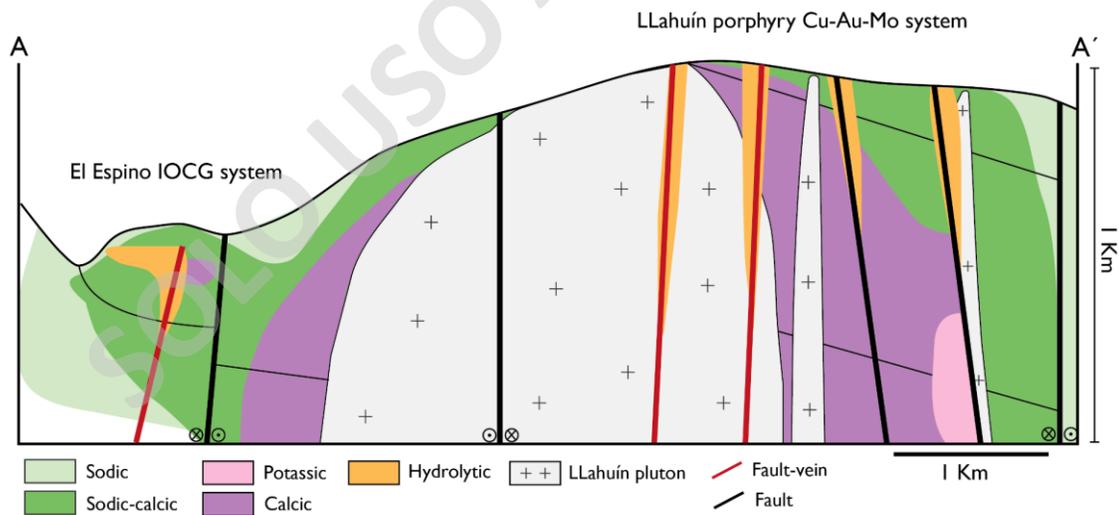


Figura 11. Geología Regional del sector Illapel-Ovalle. López et al. (2014).

El Distrito El Espino exhibe una variedad de tipos y estilos de alteración hidrotermal, las cuales presentan una zonación vertical y lateral característica (López et al., 2014; Figura 12). Un evento temprano de alteración sódica (albita ± clorita) afectó gran parte del distrito, seguido por eventos de alteración sódico-cálcica (albita-epidota-actinolita-titanita-escapolita±apatito) y potásica (biotita-feldespato potásico) (Figura 12). La alteración sódica

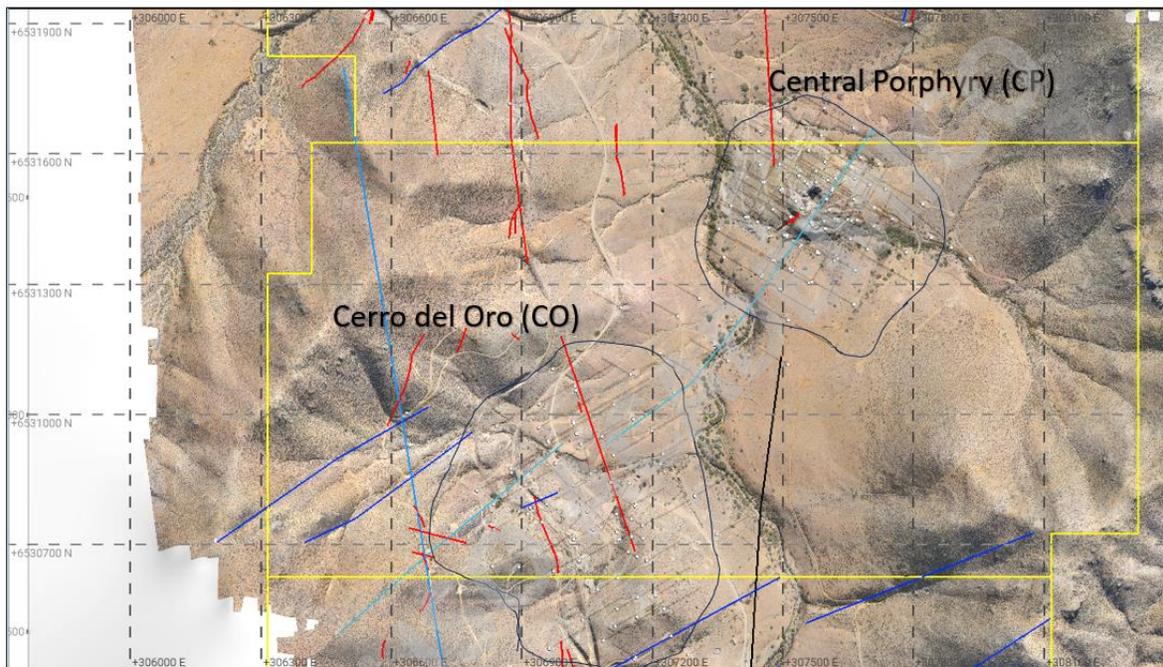
afectó a más de  $100 \text{ km}^2$  en el distrito El Espino, siendo más intensa a lo largo de los lineamientos regionales de tendencia NS y NE. Estos eventos de alteración están asociados con la mineralización de óxidos de hierro. Asimismo, un evento posterior de alteración cálcica (epidota-actinolita-clorita  $\pm$  calcita-titanita-apatito-cuarzo) se asocia con la mineralización de sulfuros de cobre. Además, se reconoce una alteración hidrolítica tardía (cuarzo-calcita-sericita-clorita-óxidos de hierro-sulfuros), la cual también tiene asociada mineralización de Cu y Au. La alteración hidrolítica se exhibe principalmente en vetas (**Figura 12**). Las vetas asociadas con la alteración hidrolítica presentan cambios mineralógicos con la profundidad. La porción más profunda corresponde a vetas ricas en óxido de hierro, mientras que la porción más somera a vetas de cuarzo. En las elevaciones más altas del distrito, las vetas están dominadas por asociaciones de alteración argílica y contienen predominantemente calcita y baritina con sulfuros argentíferos menores (López et al., 2014).



**Figura 12.** Perfil esquemático de la alteración hidrotermal para los sistemas IOCG El Espino y pórfido Cu-Au Llahuín. Modificado de López et al. (2014).

### 3.2.3 Distrito Llahuín

El Plutón Llahuín comprende al menos nueve intrusiones individuales, que se distinguen por su textura, mineralogía y ubicación geográfica (López et al., 2014). Los pórfidos Cu-(Au-Mo) del Cluster Llahuín comprenden tres cuerpos mineralizados de extensión variable: Pórfido Central, Cerro de Oro (**Figura 13**) y Ferrocarril (Reporte Técnico *SHM*, 2013).



**Figura 13.** Imagen satelital del distrito Llahuín con la ubicación de los depósitos Pórfido Central y Cerro del Oro. Las líneas rojas indican la dirección preferencial de las vetillas, mientras que las líneas azules corresponden a fallas. Obtenida mediante Leapfrog Geo (*Southern Hemisphere Mining Limited*).

El Pórfido Central (**Figura 13**), comprende una serie de intrusiones porfídicas de grano medio a fino, dioríticas y monzoníticas que intruyen a rocas volcánicas de la Formación Marquesa (Cretácico), las cuales se encuentran fuertemente brechizadas, mineralizadas y silicificadas como una unidad de hornfels. La porción de mayor ley del sistema presenta una intensa alteración potásica, evidenciada por la dominancia de cristales de biotita secundaria diseminada acompañados de *stockworks* de cuarzo y magnetita. La mineralización corresponde a calcopirita-bornita-molibdenita, en algunos casos acompañada de pirita (Reporte Técnico *SHM*, 2012).

La parte más superficial del sector Cerro del Oro (ubicada a 1 km al suroeste del Pórfido Central Llahuín; **Figura 13**) ha sido perforada, pero el intrusivo subyacente aún no ha sido estudiado. El sector Cerro del Oro ha sido interpretado como una zona de stockwork asociado a un yacimiento tipo pórfido cuprífero potencialmente mayor y más profundo, que se encuentra predominantemente emplazado en rocas volcánicas (Reporte Técnico *SHM*, 2012).

De acuerdo con López et al., 2014, el Distrito Llahuín, se encuentra a una elevación de ~1,200 m s.n.m y presenta un estilo de alteración hidrotermal que se extiende a lo largo de fallas de alto ángulo (**Figura 12**). Asimismo, la alteración hidrotermal disminuye en intensidad hacia el exterior de estas estructuras (**Figura 12**). Secuencialmente, un evento temprano de alteración sódica afectó gran parte del distrito, seguida por eventos de alteración sódico-cálcica y potásica (**Figura 12**). Estos eventos de alteración están asociados con mineralización de óxidos de hierro. Posteriormente, ocurrió un evento de alteración cálcica que fue sincrónico con la mineralización de sulfuros de cobre. Además, en el distrito se observa alteración hidrolítica tardía, asociada principalmente a fallas de orientación N-S con mineralización de cobre y oro asociada (**Figura 12**).

#### **3.2.4 Proyecto La Colina**

Según el informe realizado por la Minera Fuego Ltda. (2016), el proyecto La Colina, se caracteriza por la ocurrencia de afloramientos de la Formación Arqueros, conformada de lavas andesíticas-dacíticas, tobas y brechas volcanoclásticas. Estas litologías están en contacto con un cuerpo intrusivo porfídico con alteración hidrotermal propilítica y sericítica. La alteración propilítica rodea mayoritariamente al cuerpo intrusivo porfírico diorítico central, y altera de manera pervasiva a la roca de caja diorítica, así como a la secuencia volcánica cercana a los intrusivos. Los minerales observados son clorita, epidota, sílice, calcita (también en forma de vetillas) y pirita. La alteración sericítica se presenta junto con pirita y magnetita. Su intensidad varía, y también se observa en la parte superior del sistema, donde no se han detectado sulfuros ni magnetitas (Minera Fuego Ltda., 2016).

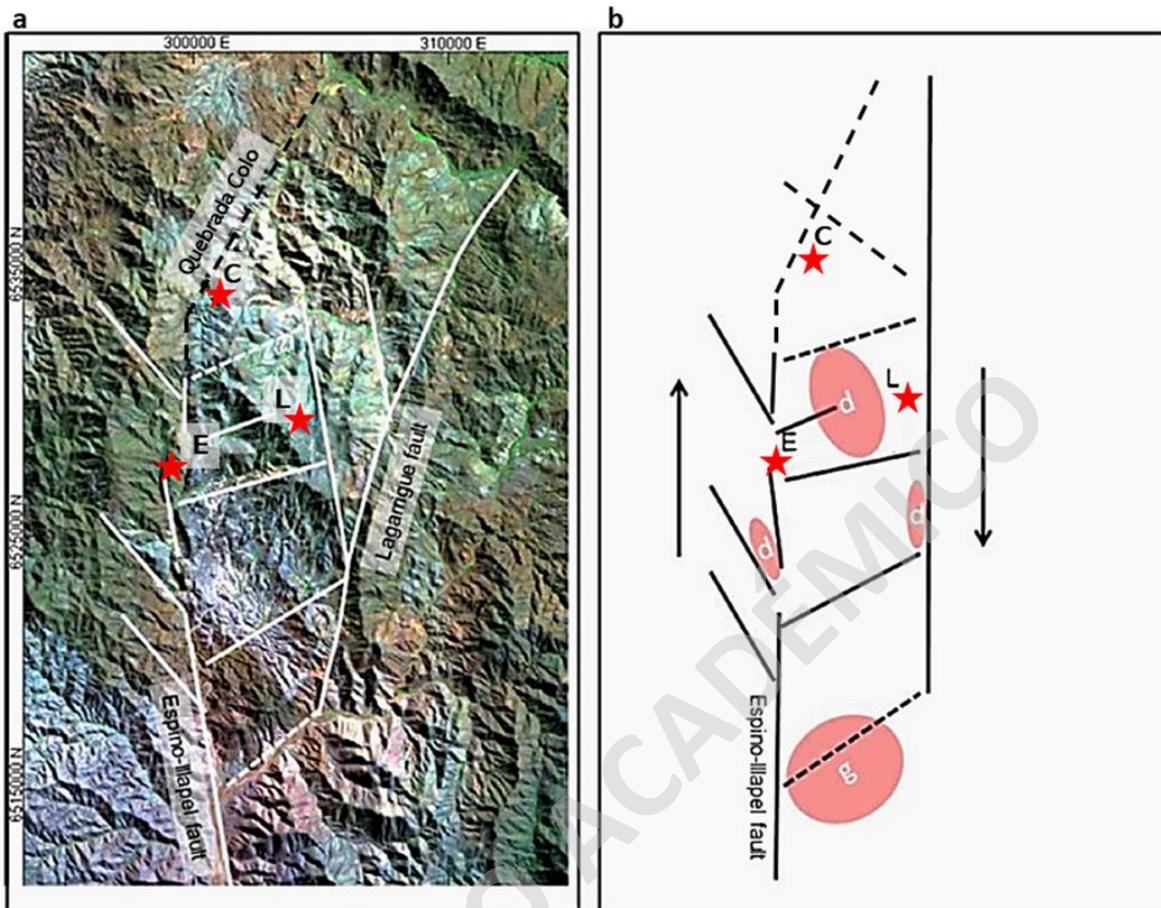
La mineralización metálica superficial en La Colina es escasa y ocurre principalmente en forma de vetas. Esta se encuentra limitada a la roca de caja volcánica y al intrusivo diorítico

porfírico, que se encuentra en la porción central de la depresión de la quebrada Colo (N330°) (**Figura 14**). La mineralización se aloja en planos de fractura y está compuesta de óxidos de cobre, y en menor proporción sulfuros de cobre y pirita. El espesor de las vetas no supera los 3.8 m, y la longitud expuesta es del orden de centenas de metros. Algunos sectores han sido explotados en forma artesanal por mineros locales. Se postula que los eventos de mineralización estarían relacionados con la circulación de fluidos hidrotermales a través de zonas favorables (estructuras) en la roca de caja de origen volcánico y/o intrusivo (Minera Fuego Ltda., 2016).

### 3.2.1 Estructuras

De acuerdo con López et al. (2014), las fallas que se encuentran en los distritos El Espino y Llahuín muestran dos conjuntos principales de rumbo: NNW–NS y NE (**Figura 14**). Asimismo, se reconocen fallas de deslizamiento oblicuo y de deslizamiento por inmersión (**Figura 12**). Los estratos de la Formación Quebrada Marquesa también se encuentran cortados por un conjunto de fallas escalonadas de dirección NE. La mayoría de las vetas mineralizadas en las áreas de El Espino, Romero y Llahuín tienen rumbo NS a ENE, y muchas están relacionadas con estas fallas de rumbo NE (**Figura 14**).

La geometría y cinemática de las fallas y vetas dentro del sector Illapel-Ovalle, sugieren que la zona contiene una estructura de flor negativa desarrollada localmente a lo largo de un sistema de fallas dextrales de rumbo NS (López et al., 2014; **Figura 14**). Esta arquitectura también habría controlado la formación de la alteración hidrotermal y la mineralización alrededor del plutón Llahuín (López et al., 2014). El sistema de vetas de El Espino se habría formado principalmente como fracturas de extensión de rumbo NE y fallas normales dentro del sistema, mientras que las vetas del sector de Llahuín se habrían formado a lo largo del sistema de fallas del margen este de la cuenca de rumbo NS-NNE (López et al., 2014).



**Figura 14.** Modelo estructural del Distrito El Espino. a) Imagen satelital (Landsat 741) con interpretación de lineamientos. b) Modelo de sistema de fallas que muestra la orientación general y la ubicación (estrellas rojas) de El Espino (E), Llahuín (L) y La Colina (C). Los cuerpos intrusivos se representan como elipses rosas: (d) Sistema de Pórfidos Cu-(Au)-Mo Llahuín, (g) Plutón diorítico a lo largo del margen sur de la cuenca. Las líneas corresponden a fallas generando una estructura de flor negativa. Modificado de López et al. (2014).

El proyecto La Colina se encuentra al noroeste del Distrito Llahuín (**Figura 14**). Sin embargo, hasta la fecha, no se ha publicado información detallada sobre las estructuras locales en el área.

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS

En el siguiente capítulo se presentan los principales resultados de este estudio, incluyendo las observaciones petro-calcográficas de 20 secciones transparentes-pulidas obtenidas a partir de testigos de sondajes (12/20) y de muestras superficiales (6/20).

Para la descripción de secciones transparentes-pulidas, se define una escala de clasificación de la intensidad de alteración hidrotermal basada en el porcentaje relativo de reemplazo mineral de la roca hospedante (**Tabla 2**).

<b>Intensidad de alteración hidrotermal</b>	<b>Descripción de intensidades de alteración hidrotermal</b>	<b>Porcentaje de reemplazo</b>
Muy débil	Bajo porcentaje de minerales alterados; roca casi fresca	<10%
Débil	Se puede reconocer el mineral reemplazado	10-25%
Moderada	Casi no se puede reconocer el mineral alterado	25-50%
Fuerte	Alteración pervasiva y destructiva	50-100%

**Tabla 2.** Porcentaje de reemplazo por asociaciones minerales de alteración hidrotermal.

#### **4.1 Litología**

A continuación, se presentan las litologías descritas para los sectores Cerro del Oro y La Colina (2), las cuales corresponden a rocas intrusivas, principalmente dioríticas, rocas volcánicas andesíticas y brechas.

##### **4.1.1 Depósito Cerro del Oro**

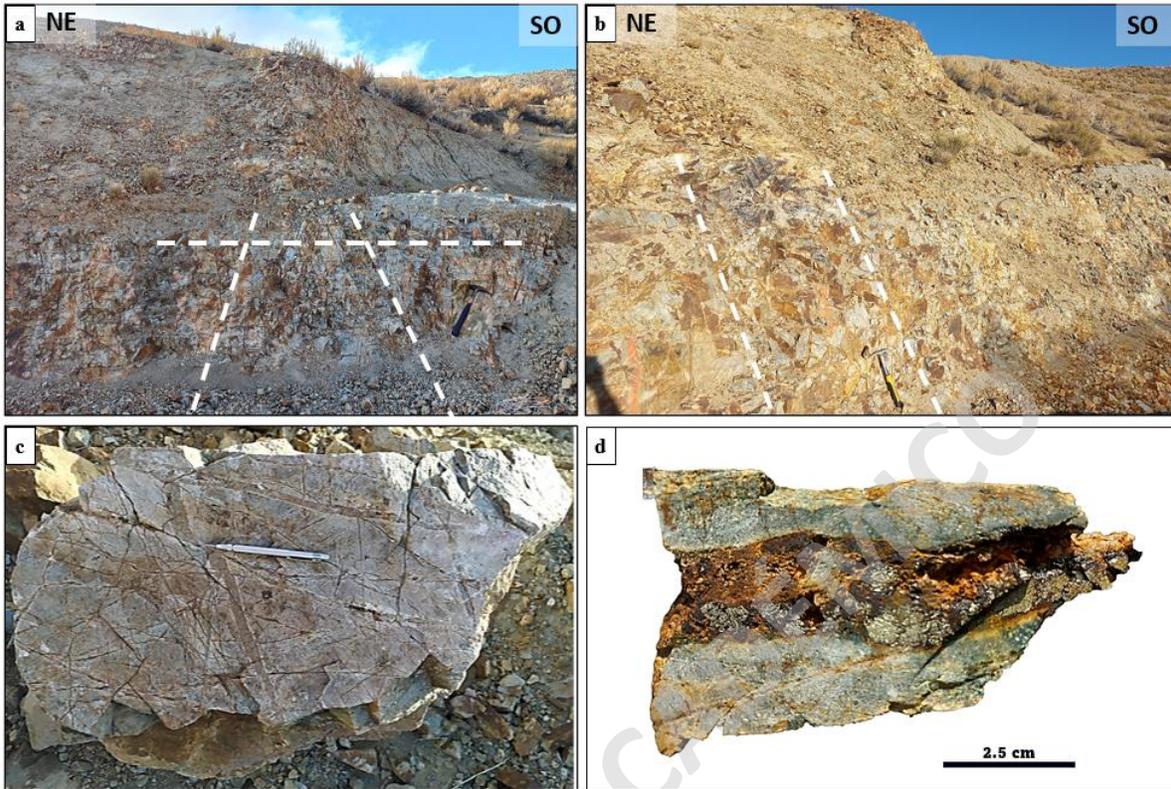
###### **Diorita-Tonalita:**

Presente en gran parte del depósito Cerro del Oro, se identifica un cuerpo intrusivo (**Figura 15.a, b**) que corresponde a la roca que hospeda la mineralización. Este cuerpo intrusivo es intruido posteriormente por una sucesión de diques andesíticos de orientación NW-SE y es cortado por *stockworks* de cuarzo con tres direcciones preferenciales (N-S, E-W, NW-SE)

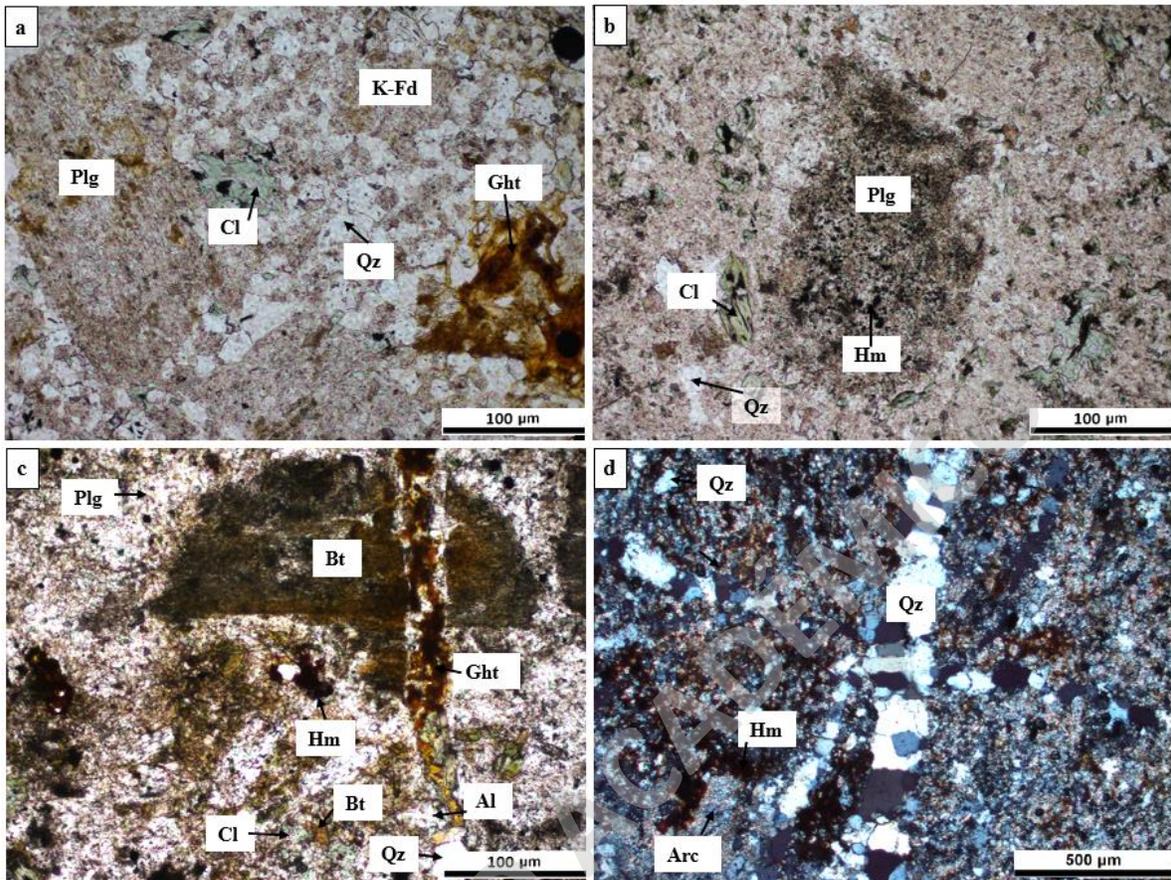
(Figura 15.a, c). Asimismo, se observan arreglos de vetillas paralelas de cuarzo (es decir, *sheeted veins*) (Figura 15.c).

Macroscópicamente, la roca presenta texturas porfídica a fanerítica (Figura 15.d), además, esta roca presenta una coloración amarilla a marrón debido a la presencia de las alteraciones argílica moderada y supérgena (Figura 15. a, b).

Microscópicamente, se observan texturas holocristalina, porfírica a fanerítica, de grano fino a medio (~1 mm), inequigranular. La roca se encuentra compuesta por plagioclasas (60-75%) euhedrales a subhedrales con textura seriada de <0.3, 0.3-0.8, >0.8 mm con alteración moderada a fuerte de sericita y arcillas (Figura 16.a, b); feldespato-K (2-8%) subhedral de hasta 0.3 mm, también alterados a sericita y arcillas (Figura 16.a), biotita (10-15%) subhedrales a anhedrales con textura seriada de <0.1, 0.1-1 mm, >1 mm, en cúmulos y alterados a clorita y goethita (Figura 16.a, b, c); y cuarzo (30-35%). El cuarzo se presenta en la mayoría de las muestras, en las cuales se reconocen al menos tres tipos. El primer tipo corresponde a cuarzo anhedral (<0.5 mm), el cual se observa formando gran parte de la masa fundamental. Además, se observan “ojos de cuarzo” (Figura 16.a, b). El segundo tipo ocurre como cuarzo en vetillas que se intersectan en al menos tres direcciones, con espesores que varían entre 0.1 y 5 mm, y en algunos casos alcanzan espesores de hasta ~1 cm, los cuales se componen de cuarzo granular (<0.1) (Figura 16.d). El tercer tipo corresponde a cristales de cuarzo masivo aislados (Figura 16.d), en los cuales se observa mineralización de calcopirita masiva (<0.1 mm). De acuerdo con estas observaciones, la roca varía desde una diorita de biotita a tonalita de biotita. Sin embargo, en el depósito se observan más evidencias de una roca diorítica.



**Figura 15.** Fotografías del depósito Cerro del Oro. a) Afloramiento de intrusivo diorítico con enrejado de vetillas de cuarzo con al menos tres direcciones preferenciales (líneas punteadas). Se observa una alteración supérgena fuerte. b) Intrusivo diorítico de color amarillento producto de las alteraciones argílica moderada y supérgena, cortado por un dique andesítico (líneas punteadas). c) Rodado de intrusivo diorítico con *stockwork* y *sheeted veins* de cuarzo. d) Muestra Cor-02 del testigo de sondaje DDHLLA030. Intrusivo diorítico cortado por una vetilla de pirita-hematita-goethita. La muestra se encuentra altamente lixiviada y con una alteración supérgena fuerte.



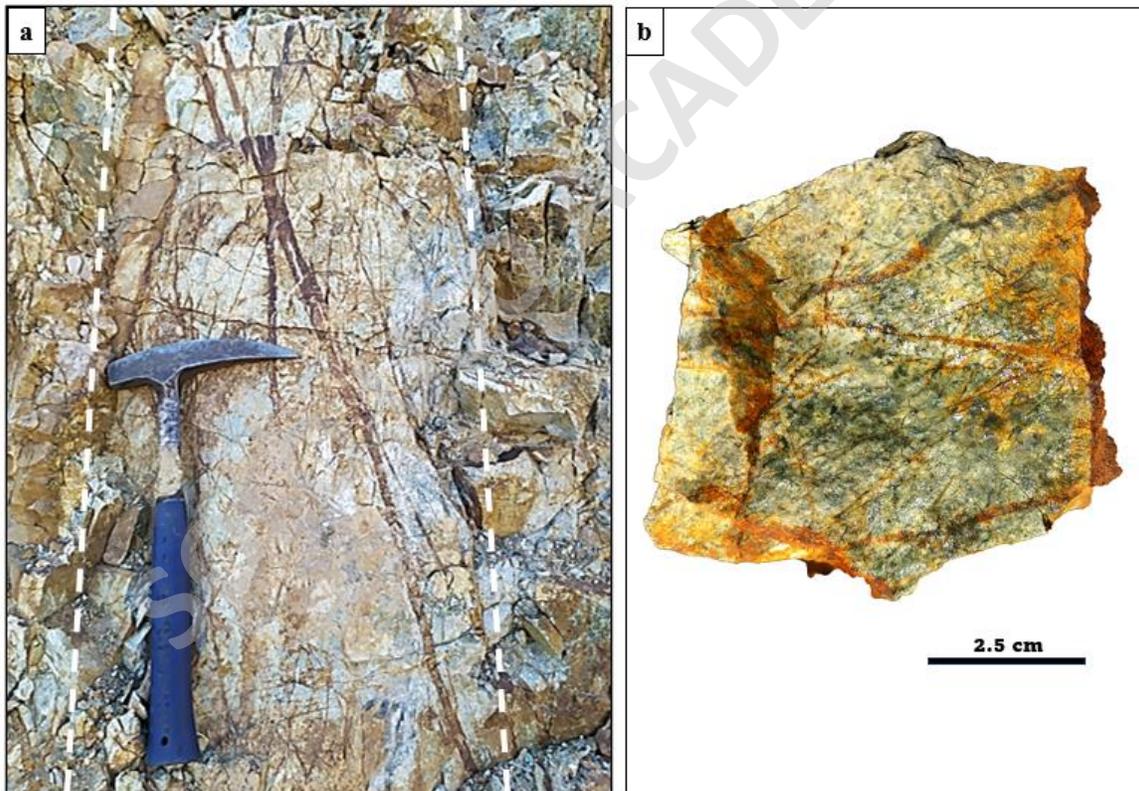
**Figura 16.** Imágenes microscópicas a luz transmitida de la diorita del depósito Cerro del Oro. a) Muestra COR-02 en aumento 10x. Fenocristal de plagioclasa moderadamente alterado por sericita junto clorita, goethita y textura de “ojos de cuarzo”. b) Muestra COR-01 en aumento 10x. Fenocristal de plagioclasa alterado de manera pervasiva por sericita, arcilla y hematita junto a cuarzo granular y clorita. c) Muestra COR-01 en aumento 10x. Fenocristales de biotita y plagioclasa cortados por vetilla de cuarzo, goethita, además de máficos (biotita) alterados a clorita y goethita. d) Muestra COR-02 en aumento 4x. Vetillas de cuarzo granular con mineralización de hematita y goethita en la roca diorítica alterada con recristalización de cuarzo, sericita y arcillas. Abreviaturas: plagioclasa (Plg), biotita (Bt), cuarzo (Qz), feldespato potásico (K-Fd), clorita (Cl), alunita (Al), arcillas (Arc), goethita (Ght), hematita (Hm).

### Diques andesíticos:

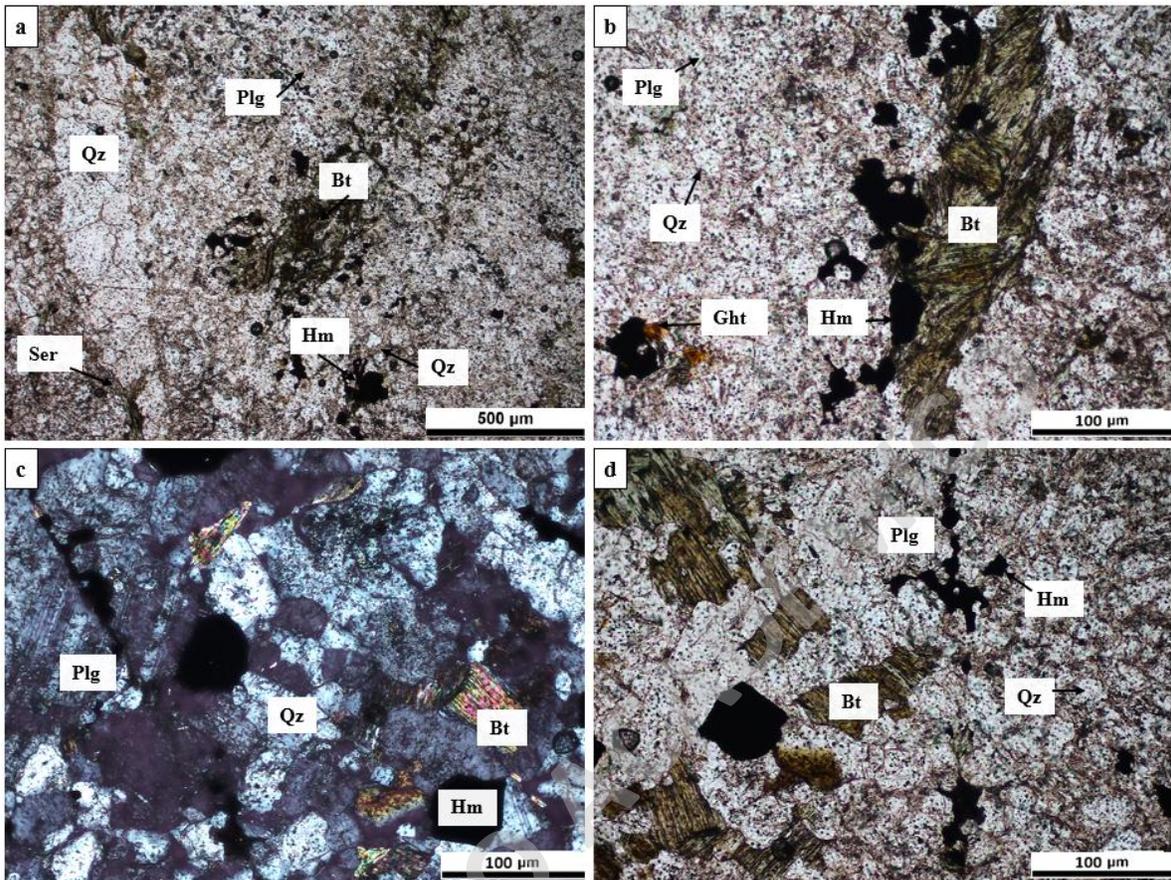
Se identifica una serie de diques andesíticos con formas tabulares y espesores que varían entre 30–50 cm (**Figura 17.a**). Estos diques presentan una orientación preferencial NW-SE (**Figura 17.a**). Macroscópicamente, los diques andesíticos presentan texturas hipocristalina, porfídica y afanítica. Los diques se encuentran cortados por vetillas de cuarzo producto de la alteración sericítica, además se observa una fuerte alteración supérgena en el depósito

caracterizada principalmente por la asociación hematita-goethita (**Figura 17. a, b; Figura 18.a**).

Microscópicamente, se observa una masa fundamental microcristalina de composición andesítica, la cual presenta microlitos de plagioclasa (65-75%), menores a 0.1 mm (**Figura 18. a, b**); y como fenocristales mayores a 1 mm (**Figura 18.c**). Además, se reconocen cristales de biotita (10-15%) subhedrales a anhedrales con textura seriada con tamaños <0.1 mm, entre 0.1-1 mm, >1 mm, así como con textura de cúmulos alterados a clorita, hematita y goethita (**Figura 18.b, d**). Asimismo, se observan cristales de cuarzo granular (20-25%) menores a 0.3 mm, los cuales se encuentran mayormente recristalizados y formando parte de la masa fundamental (**Figura 18.b, c, d**).



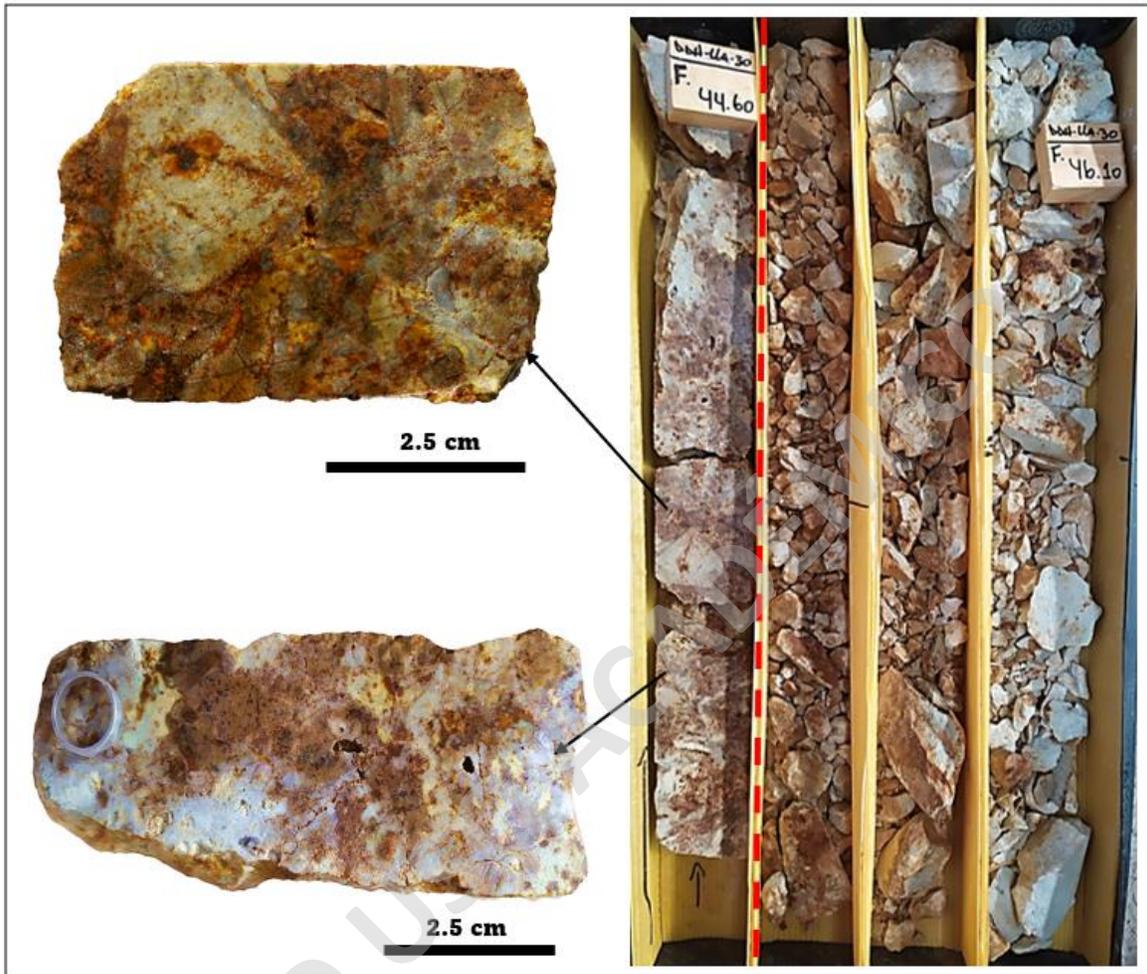
**Figura 17.** Fotografías de diques andesíticos del depósito Cerro del Oro. a) Afloramiento con dique andesítico cortado por enrejado de vetillas de cuarzo, producto de las alteraciones potásica y sericítica, así como alteración supérgena tardía (hematita-goethita). La línea punteada indica la orientación principal del cuerpo tabular respecto al intrusivo. b) Muestra de mano del dique andesítico (COR-06) con fenocristales de plagioclasa y cúmulos de biotita junto a vetillas de cuarzo, producto de las alteraciones potásica y sericítica, así como de una alteración supérgena tardía (hematita-goethita).



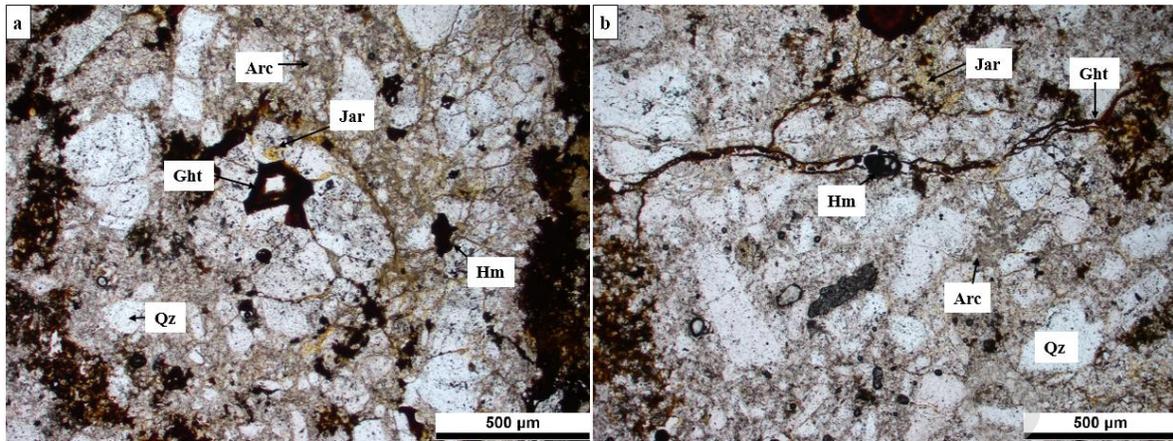
**Figura 18.** Imágenes microscópicas a luz transmitida del dique andesítico. a) Muestra COR-06 a nícoles paralelos en aumento 4x. Vetilla de cuarzo junto a cúmulo de biotitas alteradas a hematita, y cristales de plagioclasa subhedral y cuarzo anhedral. b) Muestra COR-06 a nícoles paralelos en aumento 10x. Cúmulo de biotitas alteradas a hematita y goethita junto a cristales de plagioclasa y cuarzo anhedral. c) Muestra COR-06 a nícoles cruzados en aumento 10x. Fenocristal de plagioclasa junto a cuarzo anhedral, biotita y hematita. d) Muestra COR-06 a nícoles paralelos en aumento 10x. Fenocristales de biotita y plagioclasa subhedral junto a vetilla de hematita. *Abreviaturas: plagioclasa (Plg), biotita (Bt), cuarzo (Qz), feldespato potásico (K-Fd), sericita (Ser), alunita (Al), arcillas (Arc), goethita (Ght), hematita (Hm).*

### Brecha hidrotermal:

Se reconoce una brecha polimíctica, fuertemente lixiviada y alterada producto de la alteración sericítica, argílica moderada y supérgena (**Figura 19**). Los clastos presentes en la brecha son representativos de las litologías predominantes en la zona, es decir, intrusivo diorítico-tonalítico y andesitas (**Figura 20.a, b**). La matriz se compone principalmente de harina de roca, de tamaño menor a 2 mm, la cual se observa alterada a arcillas y cuarzo recrystalizado (**Figura 20.a, b**).



**Figura 19.** Testigo y muestras del sondaje DDHLLA30 del depósito Cerro del Oro de los 44.60 m a los 46.10 metros de profundidad en donde se observa la brecha hidrotermal polimíctica. A la derecha, se observa la caja con testigos de sondajes. La línea punteada roja indica un cambio en el tamaño de los clastos y una zona de falla.



**Figura 20.** Imágenes microscópicas a luz transmitida en nícoles paralelos en aumento 4x de la brecha hidrotermal polimíctica del depósito Cerro del Oro. a) Muestra COR-04 en aumento 4x. Se observan clastos de intrusivo diorítico silicificados y con alteración supérgena (hematita, goethita y jarosita) en las fracturas, así como matriz de arcillas y cuarzo. b) Muestra COR-04 en aumento 4x. Se observan clastos angulares dioríticos y andesíticos silicificados junto a vetillas de hematita-goethita. Abreviaturas: cuarzo (Qz), arcillas (Arc), goethita (Ght), hematita (Hm), jarosita (Jar).

#### 4.1.2 Depósito La Colina (2)

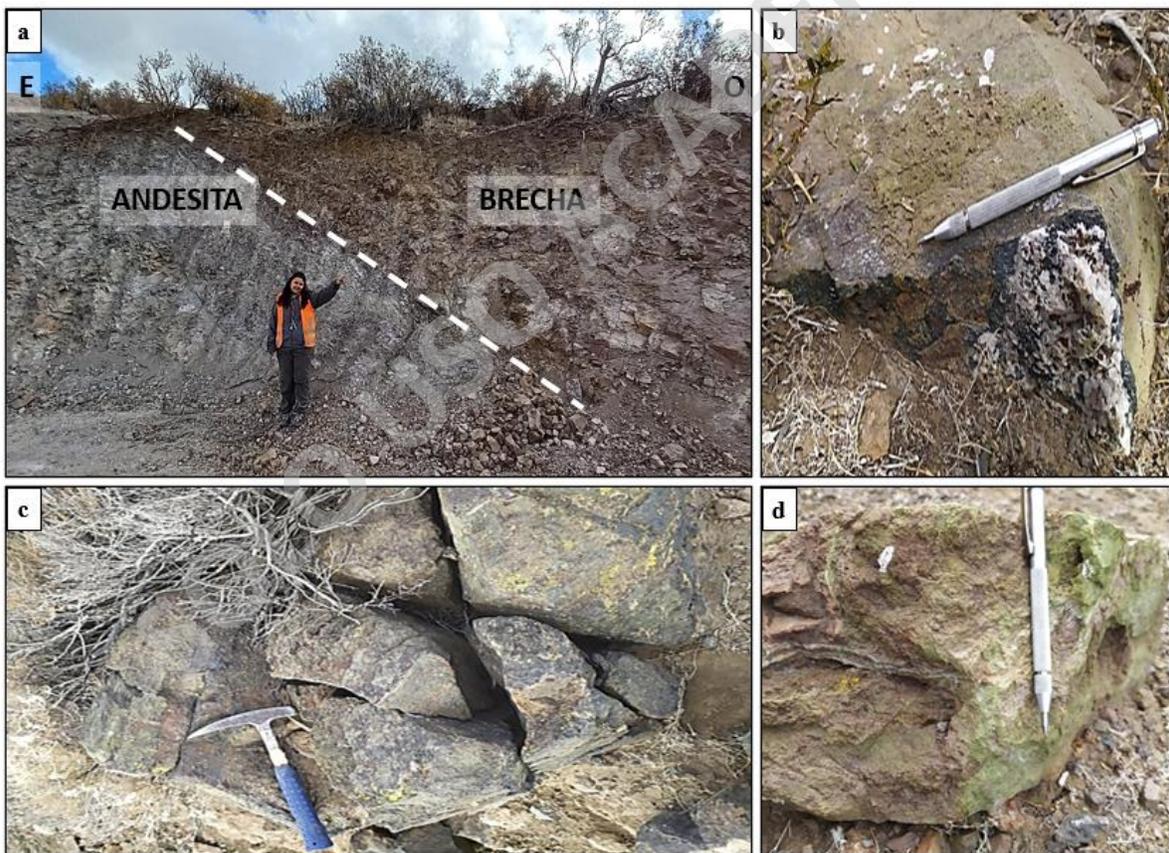
##### Dioritas y granodioritas:

Estas unidades intrusivas se extienden dentro de toda la zona de La Colina (2). Corresponden a los cuerpos de roca que hospedan la mineralización de Cu y Au. Dentro del área de estudio, se observan en contacto con otros tipos de litologías, tales como lavas andesíticas y brechas magmáticas-hidrotermales (**Figura 21.a, b**).

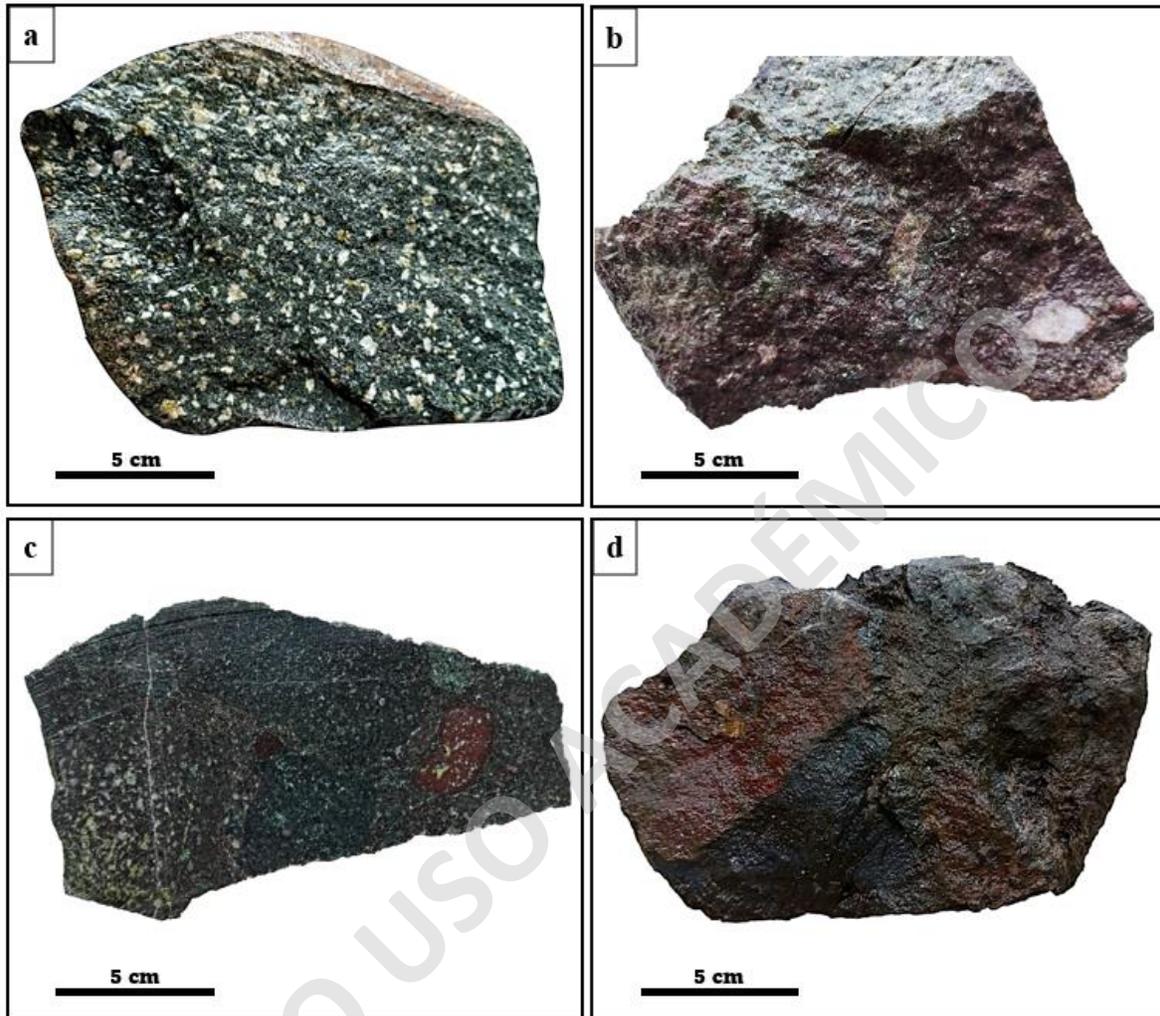
A escala macroscópica, estas rocas exhiben texturas faneríticas a porfídicas (**Figura 22.a**) y presentan una coloración verdosa debido a una fuerte alteración propilítica (y epidotización) (**Figura 21.d; Figura 22.a**).

Las observaciones en microscopio petrográfico indican que éstas rocas están compuestas principalmente por plagioclasas (60-75%) subhedrales que tienen un tamaño promedio entre 0-5 y 1-2 mm. Se observan algunas plagioclasas zonadas y recrystalizadas a albita producto de la alteración albita-epidota-clorita-carbonatos-magnetita-pirita (**Figura 23.a**). Además, se identifican cristales subhedrales de feldespato-K (4-8%) de hasta 0.3 mm, intercrecidos entre las plagioclasas y alterados a sericita (**Figura 23.b**), así como cristales subhedrales de biotita

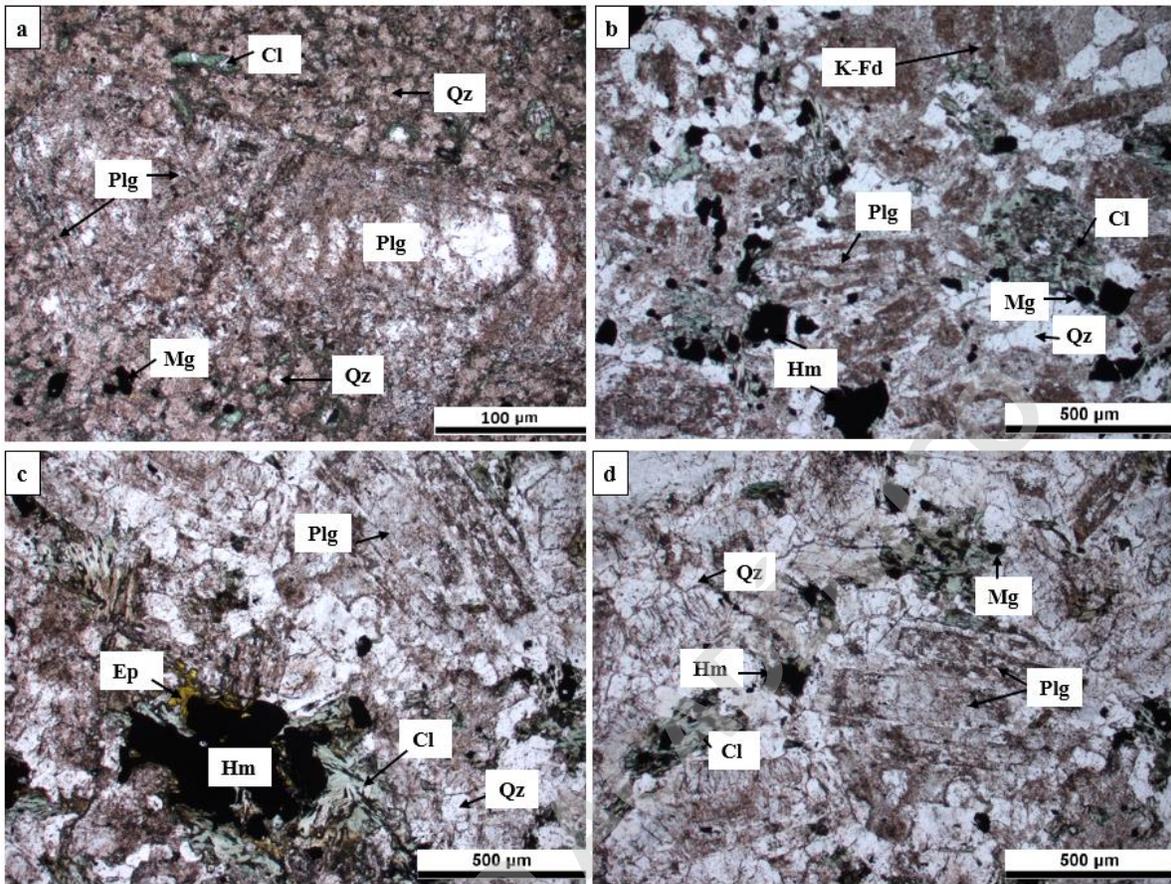
(10%) con una textura seriada, el tamaño de los cristales varía mayoritariamente entre 0.1 a 0.3 mm, pero presentan tamaños de hasta 0.8 mm, y en cúmulos alterados a clorita (**Figura 23.c**). El cuarzo (10-15%) se presenta en la mayoría de las muestras y se reconocen al menos dos tipos. El primer tipo, corresponde a cuarzo anhedral y granular (<0.5 mm), el cual se observa formando gran parte de la masa fundamental y en forma de cristales recrystalizados con un tamaño promedio de 0.1-0.3 mm. Además, se identifican texturas de “ojos de cuarzo” (**Figura 23.d**). El segundo tipo de cuarzo (<0.1 mm), ocurre como vetillas de cuarzo-magnetita-calcopirita asociado a las etapas tempranas de alteración y mineralización. De acuerdo con estas observaciones, la roca varía desde composiciones dioríticas a granodioríticas.



**Figura 21.** Fotografías del depósito La Colina (2). a) Contacto entre las litologías andesita de biotita y brechas con matriz andesítica-diorítica. b) Afloramiento de veta de magnetita con clasto diorítico-andesítico alterado fuertemente a cuarzo-calcita producto de la albíta-epidota-clorita-carbonatos-magnetita-pirita. c) Afloramiento de veta de magnetita masiva con un espesor >1m. d) Rodado de roca andesítica con color verdoso debido a parches de epidota producto de la alteración propilítica.



**Figura 22.** Fotografías de las muestras de mano de las distintas litologías del depósito La Colina (2). a) Muestra COL-12. Diorita de biotita con reemplazo de albita, clorita, epidota. b) Muestra COL-11. Autobrecha andesítica con un clasto de 0.5 cm con reemplazo de magnetita y albita. c) Muestra COL-06. Brecha magmática-hidrotermal con matriz andesítica y clastos de diorita y andesita de ~5 cm alterados a magnetita y hematita. d) Muestra COL-10. Brecha hidrotermal con matriz de magnetita y clastos alterados a magnetita. Se observa la presencia de hematita producto de la martitización.



**Figura 23.** Imágenes microscópicas a luz transmitida del intrusivo diorítico-granodiorítico a nícoles paralelos. a) Muestra COL-12 en aumento 10x. Fenocristales de albita inmersos en la roca diorítica con cristales de cuarzo, plagioclasa, clorita y magnetita. b) Muestra COL-08 en aumento 4x. Cristales de plagioclasa y K-feldespato subhedral y cuarzo anhedral, además de cristales de biotita alterados a clorita y magnetita. c) Muestra COL-08 en aumento 4x. Cúmulo de biotitas alteradas a hematita, clorita y epidota, junto a cristales de plagioclasa y cuarzo anhedral con textura de “ojos de cuarzo”. d) Muestra COL-03 en aumento 4x. Cristales de biotitas alteradas a clorita y magnetita junto a cristales de plagioclasa y cuarzo anhedral con textura de “ojos de cuarzo”. Abreviaturas: plagioclasa (Plg), cuarzo (Qz), feldespato potásico (K-Fd), clorita (Cl), epidota (Ep), magnetita (Mg), hematita (Hm).

### Andesitas y autobrechas:

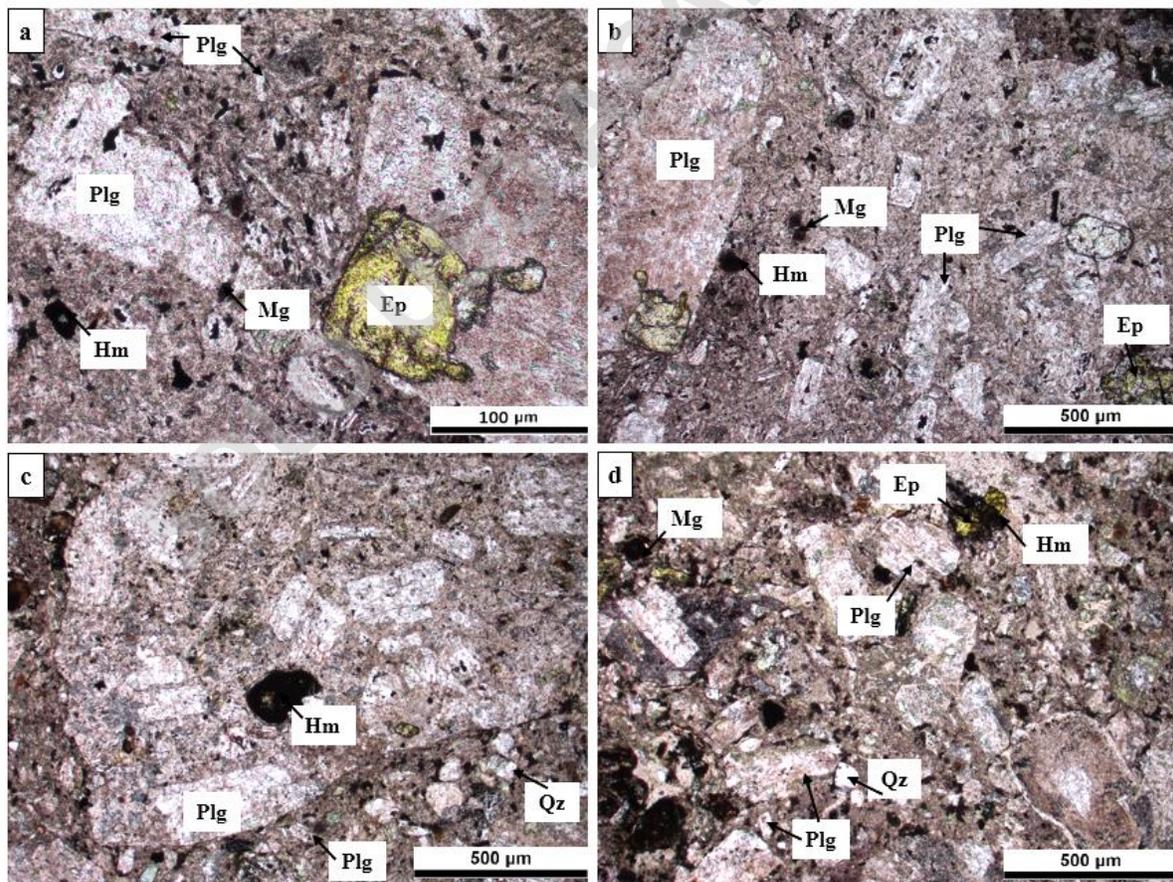
Las andesitas presentan textura porfírica con fenocristales de plagioclasa en una masa fundamental afanítica de colores pardos a grises azulados (**Figura 22.b, c**). Una característica en estas lavas es la presencia de fragmentos líticos de roca de caja más antigua (**Figura 22.c**).

Las brechas contienen clastos andesíticos y matriz de composición andesítica, compuestos principalmente por microlitos y fenocristales de plagioclasa (**Figura 24.a, b**). Estas brechas

se denominan autobrechas debido a que los fragmentos y la masa fundamental son de la misma composición y se habrían formado de manera cogenética.

Las autobrechas se caracterizan por presentar una mala selección, fragmentos monomícticos, angulosos a subredondeados; y por ser predominantemente matriz soportados (**Figura 24.b**). Los contactos entre los fragmentos y la masa fundamental son difusos, pero en algunos sectores también pueden observarse contactos nítidos (**Figura 24.c, d**).

Las brechas presentan clastos con textura porfídica y matriz afanítica. A escala microscópica, los clastos presentan una masa fundamental que corresponde principalmente a cristales de plagioclasa (~80%), además, se encuentra una escasa proporción de cristales de cuarzo (3-5%) (**Figura 24.d**), predominando la biotita sobre la hornblenda como la fase máfica primaria hidratada (15-20%) (**Figura 24.d**).



**Figura 24.** Imágenes microscópicas a luz transmitida en nícoles paralelos de las andesitas y autobrecha del

depósito La Colina (2). a) Muestra COL-11 en aumento 10x. Fenocristal de plagioclasa fracturada por matriz de andesita con microlitos de plagioclasa y reemplazo de epidota b) Muestra COL-11 en aumento 4x. Fenocristales de plagioclasa y masa fundamental andesítica con microlitos de plagioclasa c) Muestra COL-11 en aumento 4x. Autobrecha andesítica con un clasto de 0.5 cm con fenocristales de plagioclasa d) Muestra COL-11 en aumento 4x. Masa fundamental andesítica con microlitos de plagioclasa junto a clastos y fenocristales de plagioclasa euhedrales a subhedrales fracturados. *Abreviaturas: plagioclasa (Plg), cuarzo (Qz), epidota (Ep), magnetita (Mg), hematita (Hm).*

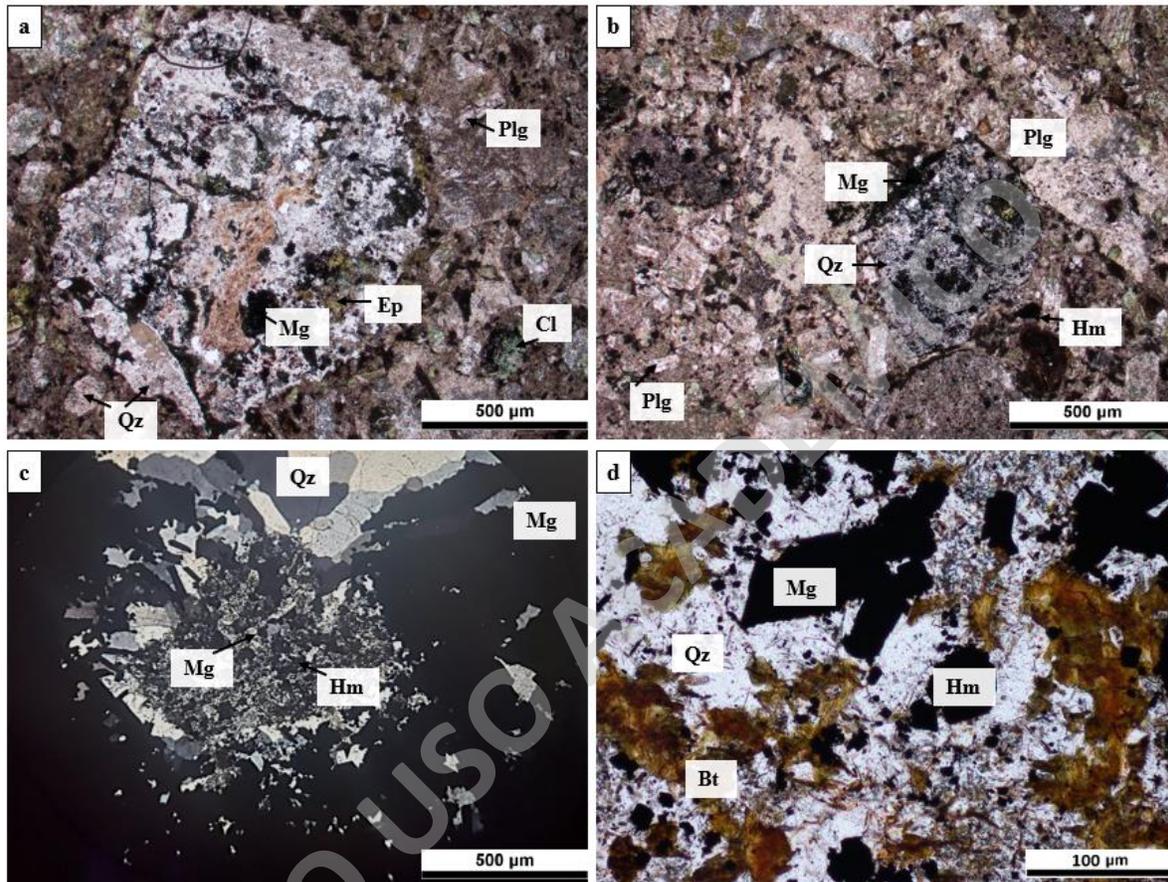
### **Brechas magmáticas-hidrotermales:**

Las brechas magmáticas-hidrotermales se caracterizan por ser matriz soportadas, y se reconocen dos tipos de masa fundamental: andesítica (**Figura 22.c**) y de magnetita (**Figura 22.d**). La proporción de óxidos de hierro de la matriz varía dependiendo la cercanía a las vetas de magnetita. Estas brechas contienen clastos dioríticos y granodioríticos con textura porfídica, así como clastos de lavas andesíticas (**Figura 25.a, b**). Las litologías reconocidas en los clastos de la brecha corresponden a las unidades anteriormente descritas en la sección de litologías del depósito La Colina (2). Las brechas se formaron en una etapa que va desde intermineral hasta tardío mineral dentro de la evolución magmática-hidrotermal. Todas estas se habrían formado posterior al emplazamiento de las intrusiones dioríticas.

En general, las brechas de la zona La Colina (2) son polimícticas y matriz soportada (**Figura 25.a, b, c**). La composición y el origen de los fragmentos de roca son similares en todos los cuerpos, definiéndose dos dominios principales: el primero, de composición andesítica con texturas afanítica y porfírica; y el segundo de composición diorítica-granodiorítica con texturas fanerítica-porfírica. Los clastos presentan cúmulos de biotita secundaria asociados a la alteración potásica, que posteriormente es reemplazada por cristales de clorita producto de la alteración propilítica (albita-epidota-clorita-esmectita-carbonatos-magnetita-pirita). Además, las plagioclasas y feldespatos muestran alteración a sericita (**Figura 25.d**) y arcillas, producto de las alteraciones sericítica y argílica moderada, respectivamente.

La matriz, principalmente de magnetita, presenta, contenidos variables de hematita, al igual que los clastos de roca (**Figura 25.c**); y en menor medida goethita producto de la alteración supérgena tardía.

Esta litología contiene la mayor cantidad de mineralización en el depósito, con menas de magnetita y calcopirita, asociadas a la alteración potásica.



**Figura 25.** Fotomicrografías de las brechas magmáticas-hidrotermales del depósito La Colina (2). a) Muestra COL-06 a nícoles paralelos en aumento 4x. Clasto diorítico con alteración potásica-propilítica (albita-epidota-clorita-carbonatos-magnetita-pirita) con magnetita dominante inmerso en una matriz andesítica. b) Muestra COL-06 a nícoles paralelos en aumento 4x. Clasto diorítico con abundante magnetita inmerso en una matriz andesítica en fenocristales de plagioclasa. c) Muestra COL-10 a nícoles cruzados en aumento 4x. Brecha magmática-hidrotermal con matriz de magnetita con un clasto de cuarzo-magnetita producto de la alteración potásica. d) Muestra COL-10 a nícoles paralelos en aumento 4x. Clasto de la brecha con matriz de magnetita asociado a alteración potásica con cúmulos de biotita y relleno de cristales de cuarzo. Abreviaturas: *plagioclasa (Plg)*, *biotita (B)*, *cuarzo (Qz)*, *clorita (Cl)*, *epidota (Ep)*, *magnetita (Mg)*, *hematita (Hm)*.

## 4.2 Alteración hidrotermal

En los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2) se identifican al menos seis tipos de alteración hidrotermal.

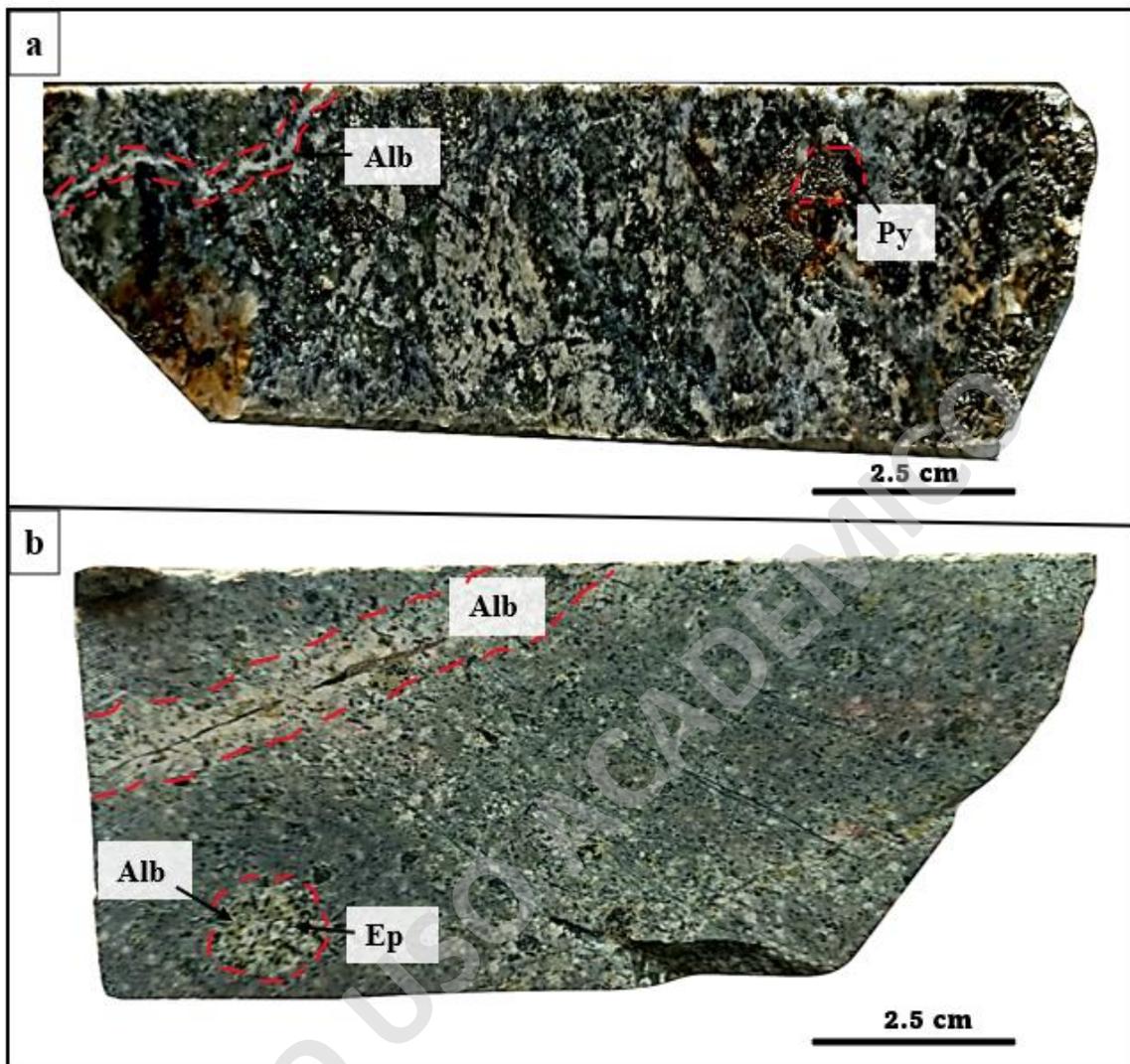
En el depósito Cerro del Oro, la alteración hidrotermal incluye las asociaciones albítica, potásica, sericítica, argílica moderada, y un evento tardío de alteración supérgena. Las alteraciones potásica y supérgena son las más desarrolladas y económicamente importantes.

En el depósito La Colina (2), la alteración hidrotermal incluye las asociaciones albítica, potásica, propilítica, sericítica, argílica moderada, y un evento tardío de alteración supérgena. Además, se observa una epidotización que predomina como alteración a escala local. Siendo la alteración potásica la más desarrollada y económicamente importante.

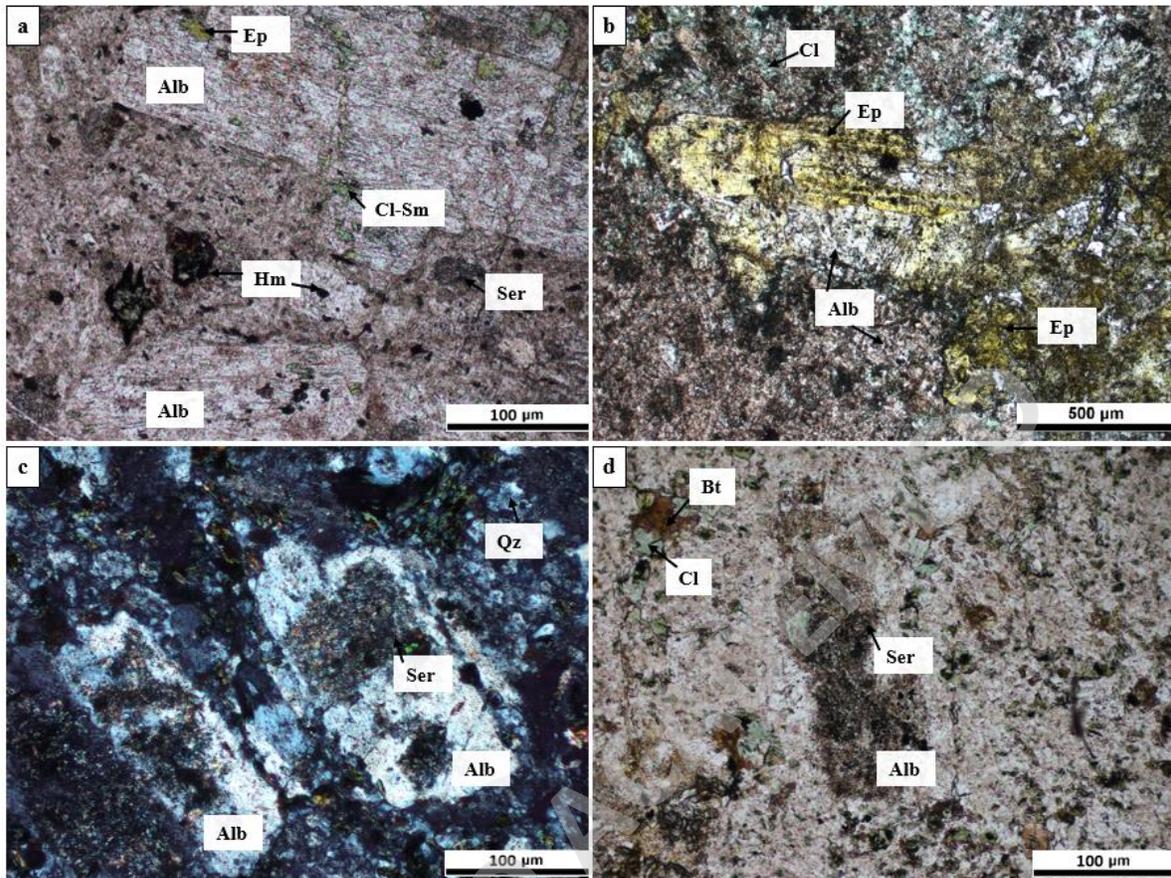
### 4.2.1 Albitización

La alteración sódica se observa en las muestras de testigos de sondaje más profundos del Pórfido Central Llahuín (~468 m de profundidad) y cercana al depósito Cerro del Oro. En el depósito La Colina (2), se observa en muestras de testigos de sondajes a ~150 m de profundidad. En ambos depósitos, los cristales de plagioclasas de las rocas dioritas-andesíticas se encuentran reemplazadas por cristales de albita de hasta 5 mm (**Figura 26.a, b**). Tanto los fenocristales de albita, considerados mayores a 1 mm, como los cristales menores a 1 mm, se presentan de forma euhedral a subhedral en la roca. (**Figura 27.a**)

En ambos depósitos esta alteración está relacionada a un evento sódico-cálcico temprano, y se encuentra sobrepuesto por una asociación de alteración propilítica (albita-epidota-clorita-esmectita-carbonatos) (**Figura 27.a, b**) y sericítica (**Figura 27.c, d**).



**Figura 26.** Imágenes macroscópicas de las litologías albitizadas en los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2). a) Muestra COR-05 del sondaje DDHLLA020 del Pórfido Central Llahuín. Diorita de biotita con vetilla de albita junto a cúmulos de pirita producto de la posterior alteración potásica. b) Muestra COL-05 del sondaje CLRD019 del depósito La Colina (2). Andesita de biotita con vetillas, cúmulos y parches de albita, los cuales son posteriormente alterados a epidota producto de la alteración albita-epidota-clorita-esmectita-carbonatos predominante en el depósito. *Abreviaturas: albita (Alb), epidota (Ep), pirita (Py).*



**Figura 27.** Imágenes microscópicas a luz transmitida de las litologías albitizadas en los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2). a) Muestra COL-11. Brecha andesítica a nícoles paralelos en aumento 10x. Fenocristales de albita inmersos en la masa fundamental andesítica. b) Muestra COL-01. Diorita de biotita a nícoles paralelos en aumento 4x. Fenocristal de plagioclasa alterado a epidota, además de cristales de albita con superposición de carbonatos, clorita y epidota. c). Muestra COR-01. Diorita de biotita a nícoles cruzados en aumento 10x. Fenocristales de albita moderadamente alterados a sericita. d) Muestra COR-01. Diorita de biotita a nícoles paralelos en aumento 10x. Fenocristal de albita fuertemente alterado a sericita, además de cristales albitas moderadamente alterados a sericita y cristales de biotita alterados a clorita. *Abreviaturas: albita (Alb), cuarzo (Qz), biotita (Bt), clorita (Cl), epidota (Ep), esmectita (Sm), sericita (Ser), hematita (Hm).*

#### 4.2.2 Alteración Potásica

La asociación de alteración principal se encuentra compuesta principalmente por biotita y magnetita, con contenidos variables de feldespato potásico, que se observa sólo en las rocas más félsicas (granodioritas) de los depósitos. Además, la zona potásica comprende dos sub-asociaciones de alteración con contenidos variables de estos minerales. Estas sub-asociaciones se dividen en: biotita dominante, que se observa en los dos depósitos descritos

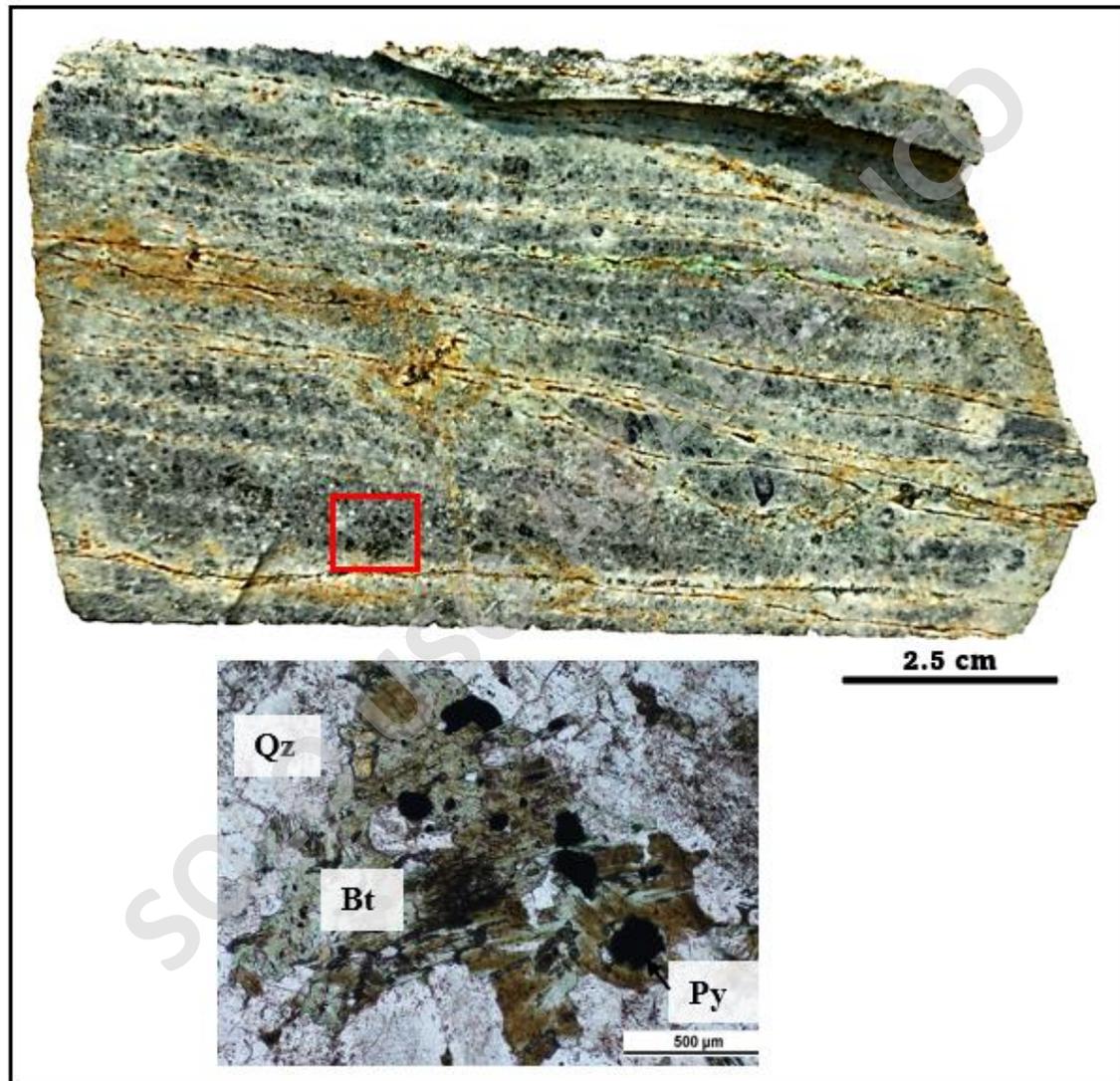
como asociación principal (**Figura 28; Figura 29**); y magnetita dominante, que se observa en el depósito La Colina (2) asociado espacialmente a las vetas de magnetita (**Figura 22.d**).

En el depósito Cerro del Oro, se observa una alteración casi total de los máficos primarios de la roca intrusiva por biotita secundaria. Esta fase mineral se encuentra en cúmulos, como finos cristales diseminados intersticiales en la masa fundamental de unidades intrusivas y reemplazando *books* de biotita primaria (**Figura 30.a, b**). Además, se observa siendo alterada a clorita o reemplazada por mineralización de magnetita-pirita-hematita (**Figura 30.b**). Asimismo, se observan agregados de feldespato potásico secundario microgranular (<1 mm), producto de la alteración selectiva de cristales de plagioclasas. Estos agregados también se encuentran intercrecidos en la masa fundamental recristalizada de las unidades intrusivas o como halos de alteración de vetillas de cuarzo.

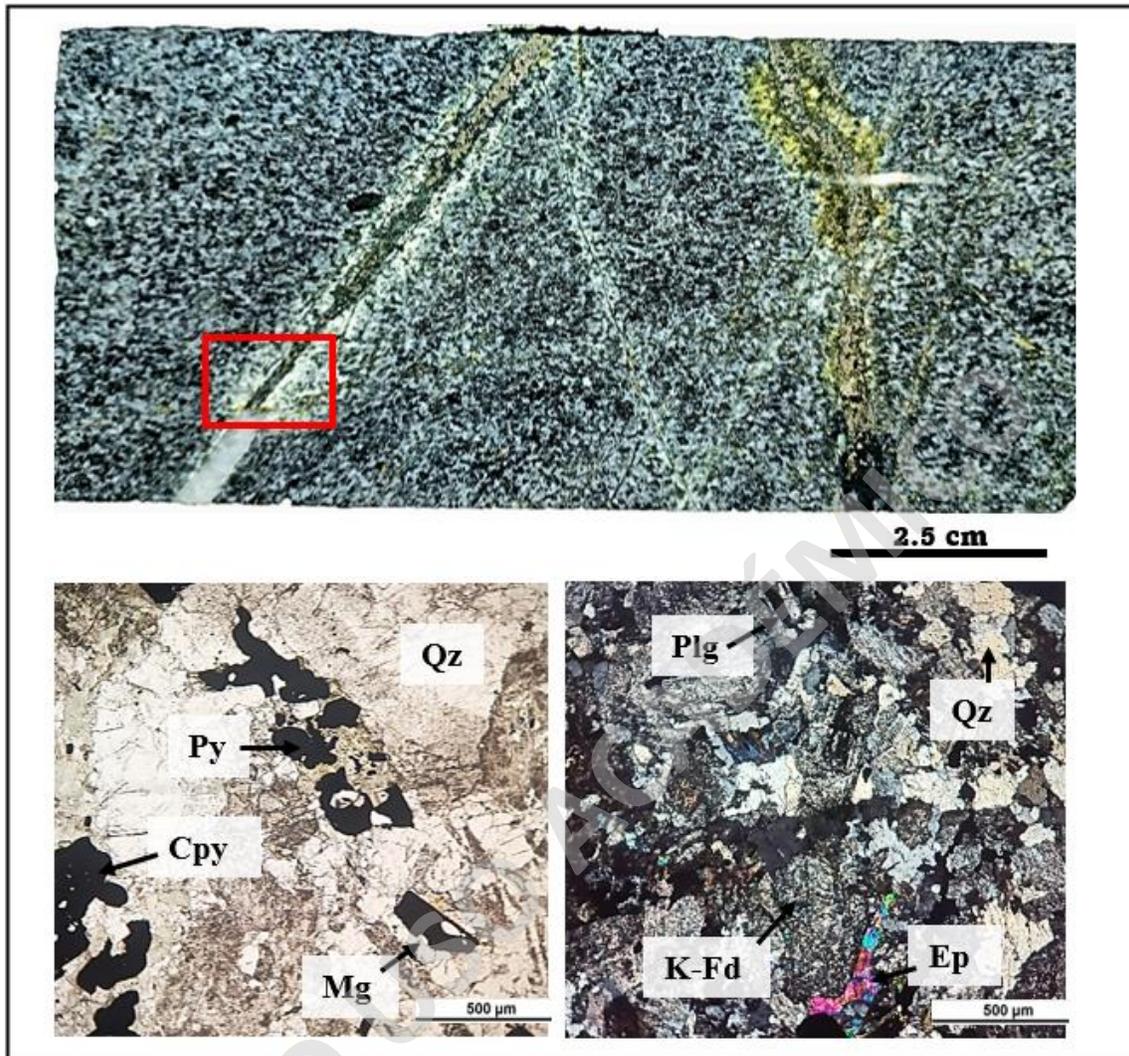
Por otro lado, en el depósito La Colina (2) la asociación de alteración principal está conformada por cúmulos y en menor medida vetillas de biotita secundaria, así como vetas y vetillas de magnetita. La biotita secundaria es de grano fino (hasta 0,5 mm) y se sobrepone a la mineralogía primaria, generando texturas de relleno intersticial y de reemplazo. Esta reemplaza parcialmente a las plagioclasas y completamente a biotitas primarias, las cuales posteriormente se alteran a clorita y magnetita (**Figura 30.b**). Hacia los bordes de los cristales de feldespato potásico, se observa un reemplazo por albita (**Figura 30.c**), además de un reemplazo parcial de biotita secundaria por clorita. Esto sugiere que, durante el evento potásico y posterior a la formación de feldespato potásico secundario, se produjo una albitización local asociado a un evento de alteración propilítica (albita-epidota-clorita-esmectita-carbonatos-magnetita-pirita), que se desarrolla principalmente como un halo de la alteración potásica.

Subordinado a esta alteración, se observan vetillas de cuarzo presentes en ambos depósitos (**Figura 28; Figura 29; Figura 30.d**). En el caso del depósito Cerro del Oro, estas vetillas son las más tempranas en el sistema y se observan espacialmente dentro del intrusivo diorítico como un intercrecimiento granular de hasta 3 cm de diámetro, generando textura de *stockwork*. Posteriormente, estas vetillas son reutilizadas durante la alteración sericítica (**Figura 30.d**). En el caso del depósito La Colina (2), estas vetillas también corresponden a

las más tempranas dentro del sistema, en conjunto con las vetillas de magnetita (**Figura 29**), y presentan espesores de hasta 1 cm, aunque la mayoría de ellas tienen alrededor de 0.5 cm de espesor. Además, estas presentan contenidos variables de sulfuros, como calcopirita y pirita (**Figura 29**).

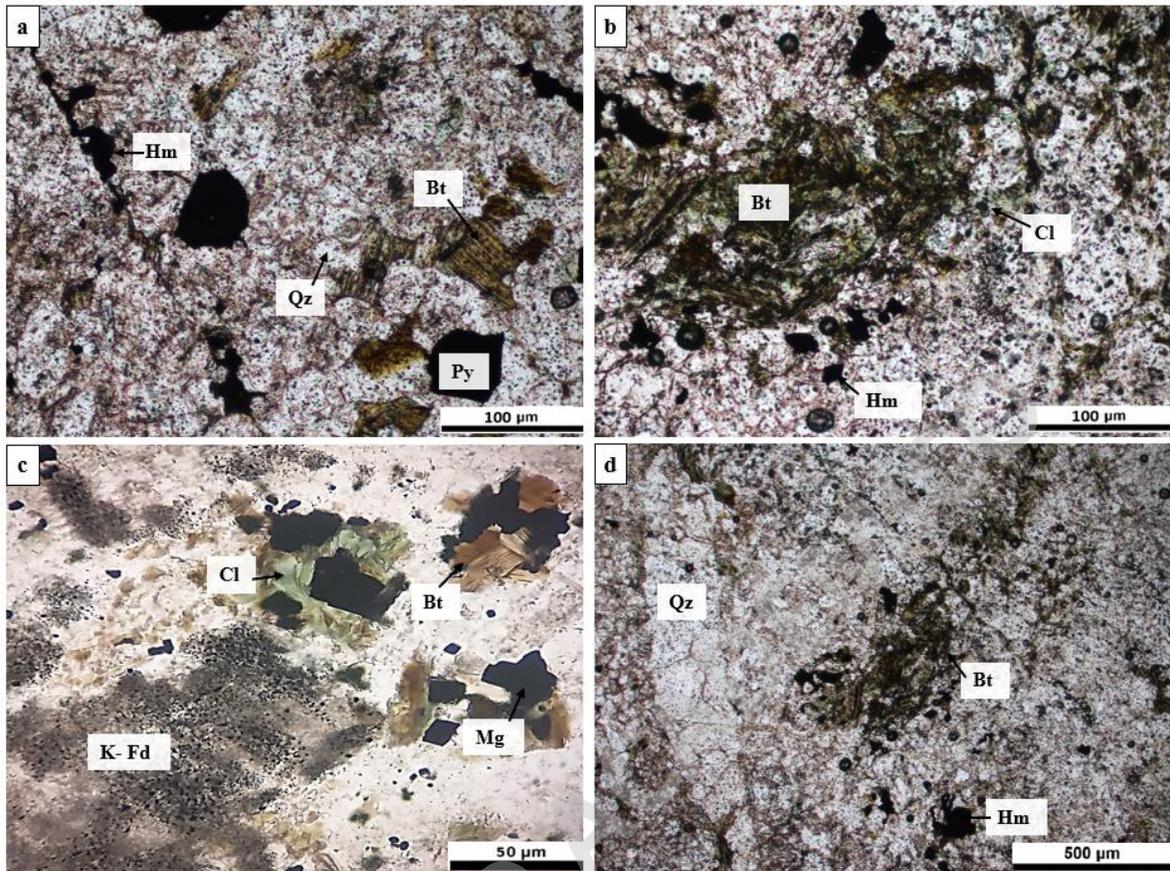


**Figura 28.** Imagen macroscópica y microscópica a 500 micras de la alteración potásica del depósito Cerro del Oro. Diorita de biotita con vetillas de cuarzo, diseminado de pirita y cúmulos de biotita secundaria. Abreviaturas: plagioclasa (Plg), cuarzo (Qz), biotita (Bt), pirita (Py).

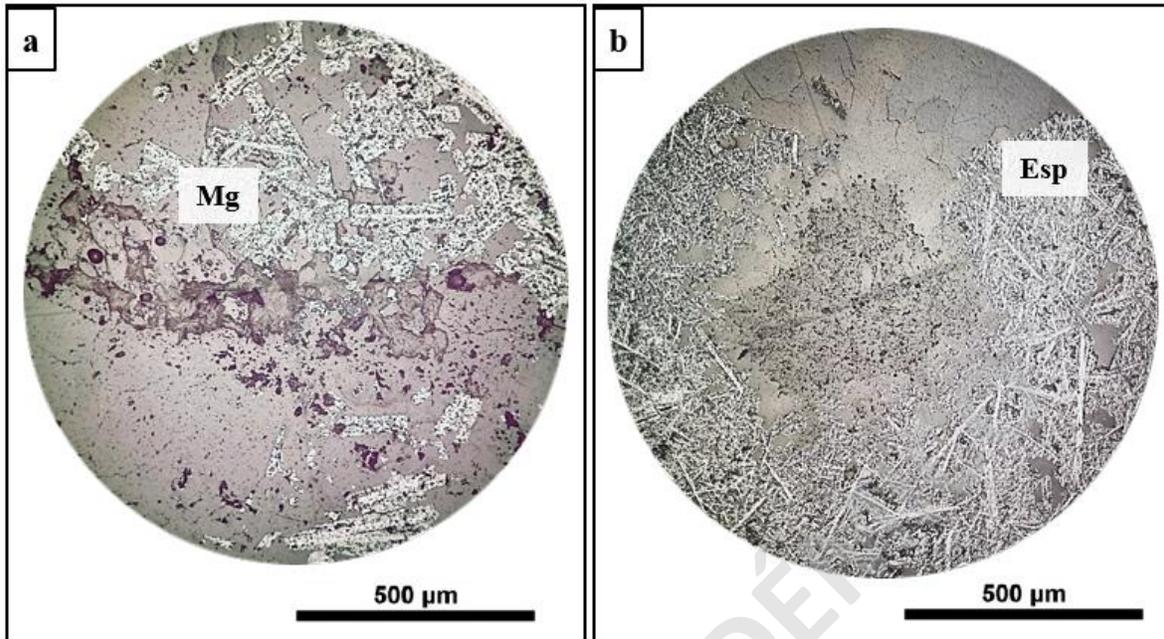


**Figura 29.** Imágenes macroscópicas y microscópicas a 500 micras de la alteración potásica del depósito La Colina (2). Granodiorita de biotita con vetilla de cuarzo, magnetita, calcopirita y pirita (izquierda) y mosaico equigranular con cristales de plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico y biotita. Abreviaturas: plagioclasa (Plg), cuarzo (Qz), feldespato potásico (K-Fd), epidota (Ep), magnetita (Mg), pirita (Py), calcopirita (Cpy).

En el depósito La Colina (2) se observan vetas de magnetita con un espesor de hasta 50 cm (**Figura 21.c**). Las observaciones al microscopio óptico permiten identificar al menos tres familias (tipos) de magnetitas caracterizadas por texturas de reemplazo y zonación. Estas ocurren de forma de diseminado (60%), vetas (10%) y vetillas (30%) (**Figura 31.a**). Además, se reconoce un reemplazo parcial de la magnetita por hematita (70%) (**Figura 31.b**) y goethita (25%), así como hematita relleno de oquedades o cavidades (5%).



**Figura 30.** Imágenes microscópicas a luz transmitida de las litologías con alteración potásica de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2). a) Muestra COR-03. Diorita de biotita a nícoles paralelos en aumento 10x. Books de biotita primaria siendo alterados por biotita secundaria y diseminado de cristales de pirita subhedral. b) Muestra COR-06. Andesita de biotita a nícoles paralelos en aumento 10x. Cúmulos de biotita secundaria alterados a clorita, pirita y hematita. c) Muestra COL-08. Granodiorita de biotita a nícoles cruzados en aumento 10x. Fenocristal de feldespato potásico junto a cristales de biotita alterada a clorita y magnetita. d) Muestra COR-06. Andesita de biotita a nícoles paralelos en aumento 10x. Cúmulos de biotita secundaria junto a una vetilla de cuarzo temprana producto de la alteración potásica, junto a reemplazo de pirita y sericita producto de la alteración sericitica, cristales que posteriormente son alterados a hematita y arcillas, respectivamente, producto de la alteración argílica moderada. *Abreviaturas: cuarzo (Qz), feldespato potásico (K-Fd), biotita (Bt), clorita (Cl), magnetita (Mg), hematita (Hm), pirita (Py).*



**Figura 31.** Imágenes microscópicas a luz reflejada en nícoles paralelos 500 micras de la brecha magmática-hidrotermal con matriz de magnetita del depósito La Colina (2). Muestra COL-10. a) Vetilla de magnetita. b) Brecha magmática-hidrotermal con matriz de hematita especular. Abreviaturas: magnetita (*Mg*), hematita especular (*Esp*).

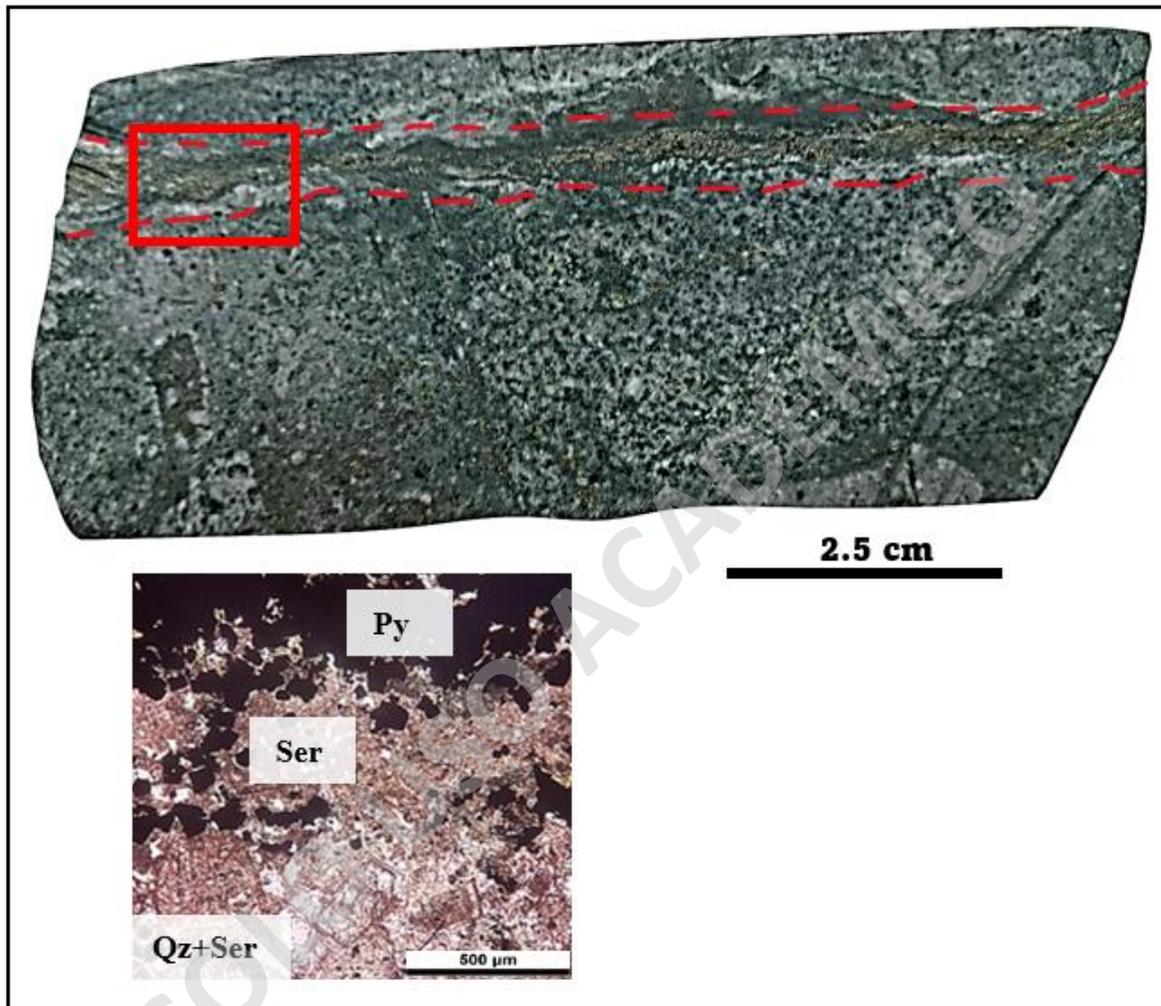
#### 4.2.3 Alteración Sericítica

La asociación de alteración principal corresponde a sericita, cuarzo, clorita y pirita (**Figura 32; Figura 33.a, c**).

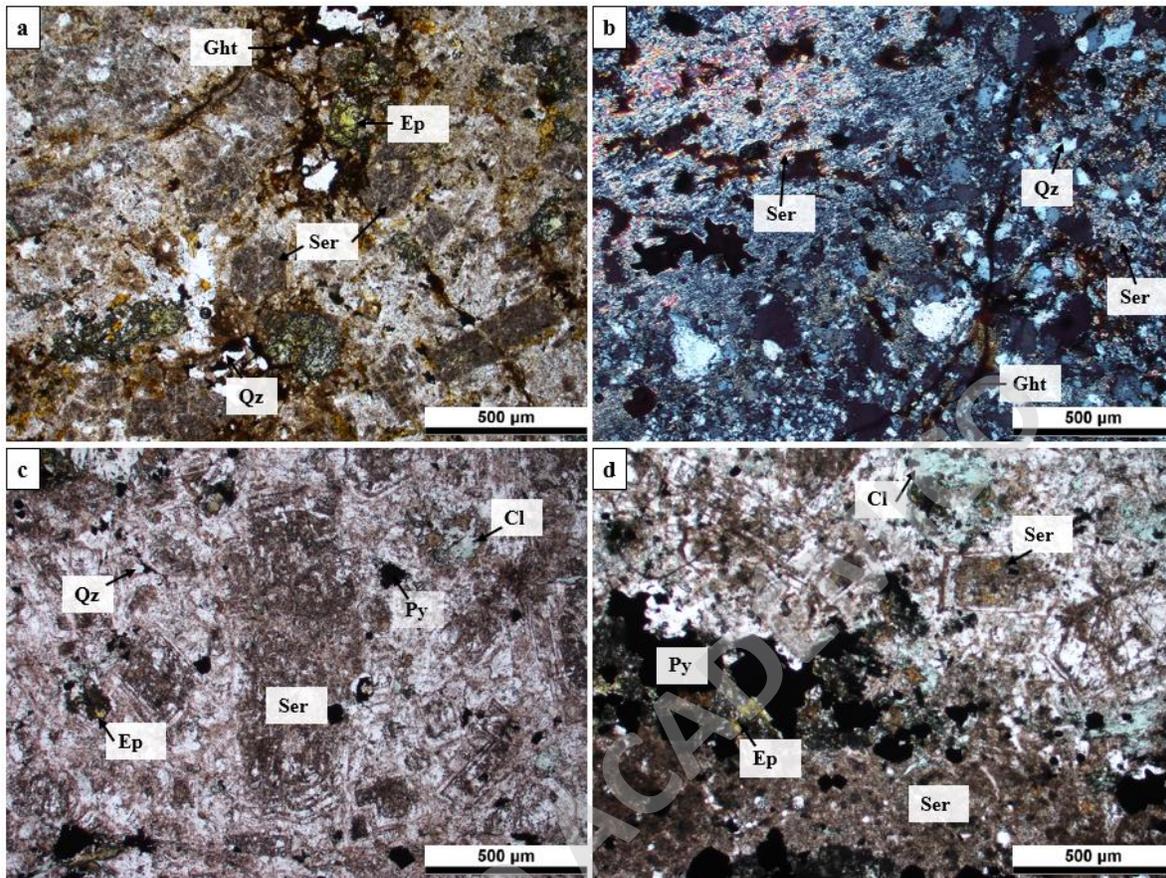
En ambos depósitos, se observa un reemplazo tanto de las plagioclasas y feldespatos a sericita (y/o muscovita de grano fino). Esta alteración se observa principalmente en las muestras de testigos de sondajes de mayor profundidad, aproximadamente a más de 50 m para el caso del depósito Cerro del Oro y alrededor de los 143 m en el caso del depósito La Colina (2) (**Figura 33.b**).

En ambos depósitos, se observa reemplazo de cristales de biotita a clorita, así como recristalización de cuarzo microcristalino. Además, la pirita también se introduce en forma de vetillas y diseminada (**Figura 33.c**). Las vetillas de pirita se presentan de forma continua, más o menos rectas y son de unos pocos milímetros (<5 mm) de espesor. Estas se componen

principalmente de pirita y generalmente desarrollan halos de alteración de sericita-clorita y/o sericita  $\pm$  cuarzo (**Figura 33.d**), que se superponen a la alteración potásica (**Figura 23**).



**Figura 32.** Imagen macroscópica y microscópica en nícoles paralelos a 500 micras de la litología diorita de biotita del depósito La Colina (2). Muestra Col-04 del sondaje CLRD015. Vetilla de pirita con un halo de sericita proximal y cuarzo-sericita más distal. Abreviaturas: cuarzo (*Qz*), sericita (*Ser*), pirita (*Py*).



**Figura 33.** Imágenes microscópicas a luz transmitida de las rocas con alteración sericítica en los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2). a) Muestra COL-13. Brecha andesítica a nícoles paralelos en aumento 4x. Fenocristales de albita y clastos alterados a sericita y arcillas. b) Muestra COR-01. Diorita de biotita a nícoles cruzados en aumento 4x. Fenocristal de plagioclasa alterado sericita junto a una vetilla de cuarzo con halo sericítico. c) Muestra COL-04. Diorita de biotita a nícoles cruzados en aumento 10x. Fenocristales de albita alterados a sericita junto a cristales de clorita y epidota. d) Muestra COL-04. Diorita de biotita a nícoles paralelos en aumento 10x. Vetilla de pirita con halo de cristales de sericita, cuarzo y clorita. *Abreviaturas: cuarzo (Qz), sericita (ser), clorita (Cl), epidota (Ep), magnetita (Mg), goethita (Ght), pirita (Py).*

#### 4.2.4 Alteración Propilítica

La alteración propilítica se compone de la asociación mineral albita-epidota-clorita-esmectita-carbonatos, con contenidos variables de magnetita y pirita. Esta alteración se observa principalmente en el depósito La Colina (2) (**Figura 34.a, b, c**), presente en la mayoría de las muestras tanto de testigos de sondajes como en las muestras de superficie. En el depósito Cerro del Oro, esta alteración se reconoce en el sector más distal asociado principalmente al Pórfido Central Llahuín (**Figura 34.d**).

Microscópicamente, los cristales de clorita se presentan mayormente euhedrales a subhedrales en un rango de tamaño entre los 0,1 a 0,6 mm (**Figura 35.a**), los cuales reemplazan parcialmente a los cristales de plagioclasas y en mayor grado a los cristales de biotita (**Figura 35.b, c**). Las plagioclasas se alteran selectivamente a cristales de albita subhedral de hasta 0.8 mm (**Figura 36.b**), así como en cristales de epidota euhedrales de hasta 1 mm (**Figura 35.d**).

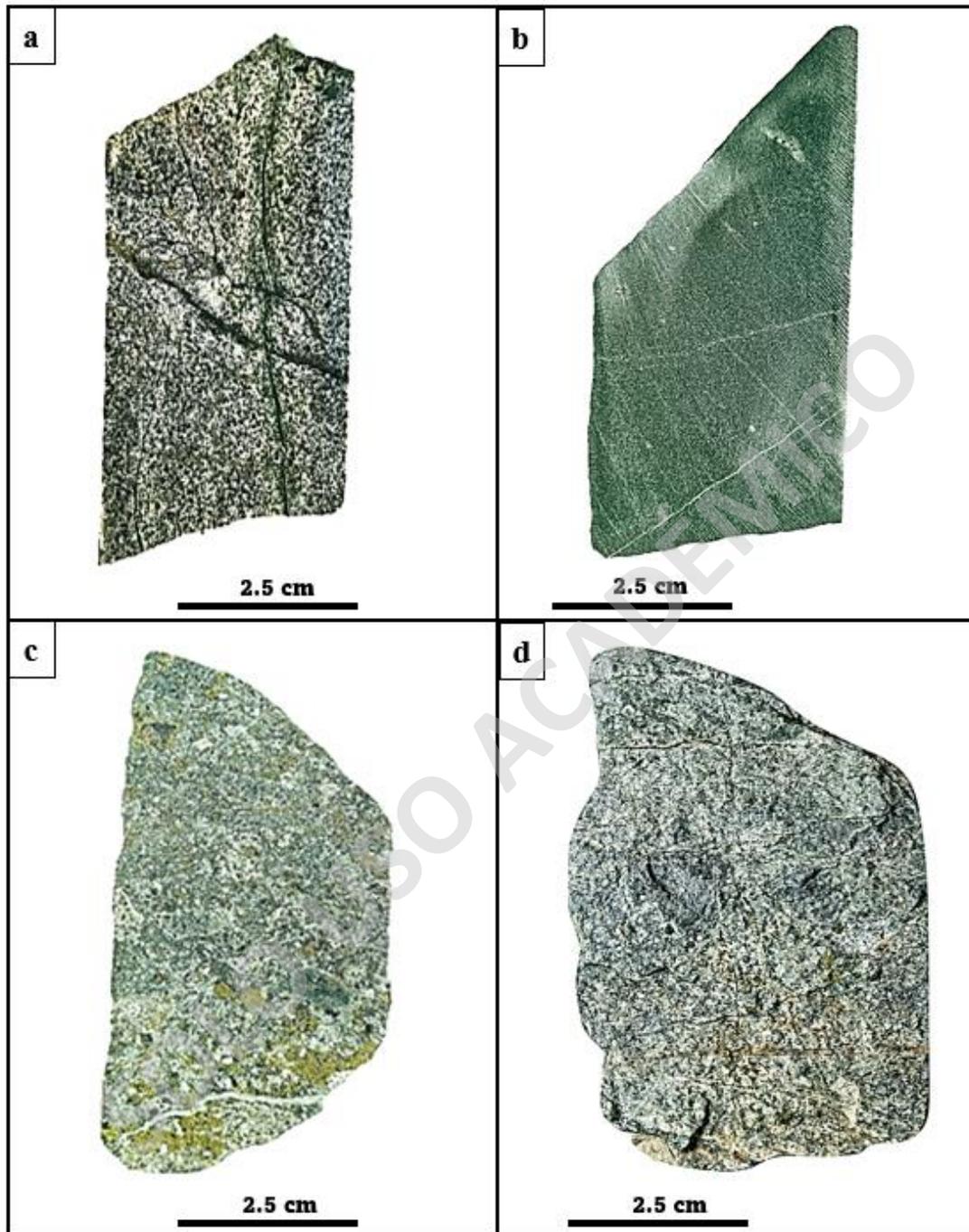
En el depósito La Colina (2) se observa un reemplazo de magnetita por hematita especular. Además, se identifican varias vetillas de ~1 cm de espesor de clorita, magnetita y menor pirita (**Figura 36.a**), con halos de albita y epidota. También se observan vetillas de albita con halos de sericita (<1 mm) (**Figura 36.b, c**) y carbonatos (**Figura 35.c, d**). En el caso del depósito Cerro del Oro, las vetillas de cuarzo temprana se observan siendo reutilizadas por vetillas de cuarzo-clorita-epidota (**Figura 36.d**).

Además, en la mayor parte del sector de La Colina (2), se observa en superficie afloramientos y rodados con abundante epidota masiva, o bien como cúmulos y parches (**Figura 34.c; Figura 35.c**).

#### **4.2.5 Alteración Argílica Moderada**

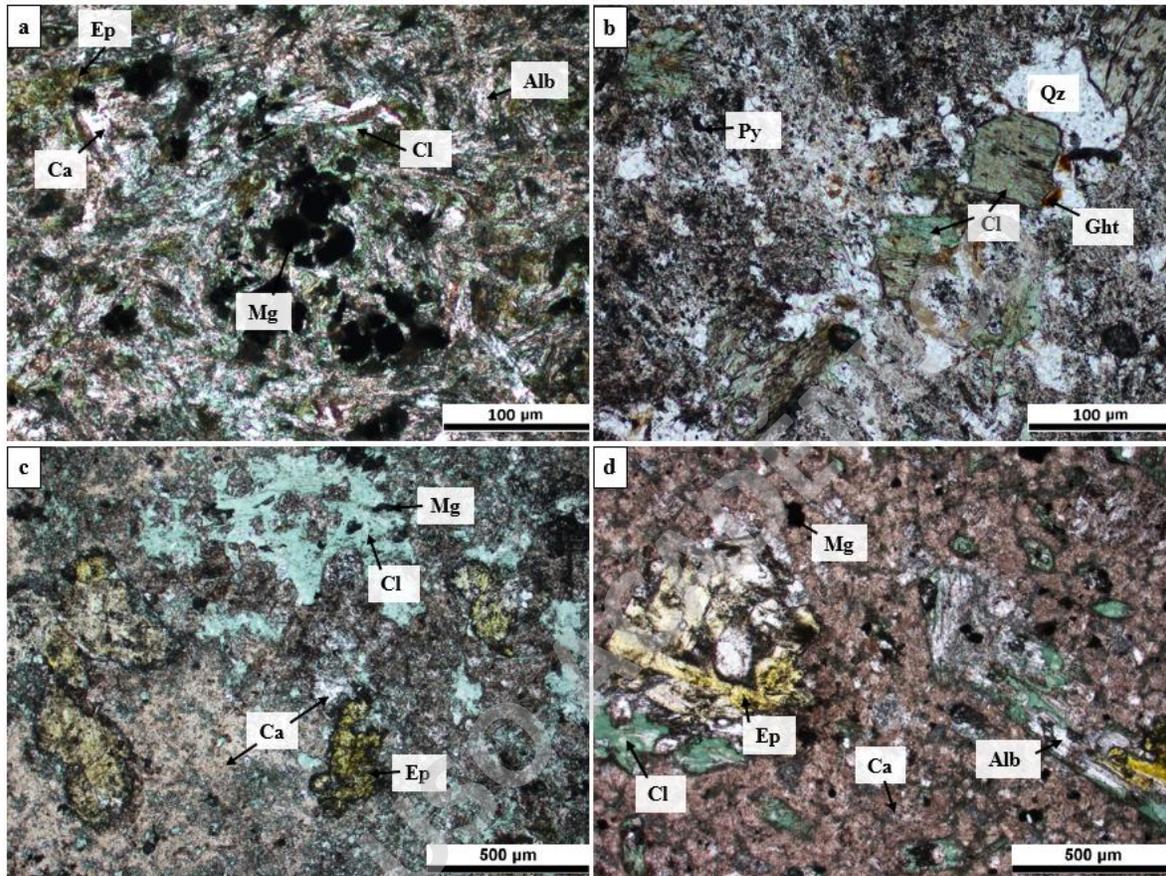
La alteración argílica moderada presenta una asociación mineral principal que incluye arcillas, caolinita, hematita, cuarzo, y en menor medida alunita y sericita (**Figura 38.a**). Además, como resultado de la destrucción de la magnetita, se observan escasos (<1%) hidróxidos y óxidos de hierro, principalmente goethita y hematita, respectivamente. Asimismo, se reconoce el reemplazo de cristales pirita por hematita (**Figura 38.b**).

En el depósito Cerro del Oro la alteración argílica moderada se observa en conjunto a la alteración supérgena (**Figura 37.a**). Mientras que en el depósito La Colina (2) la alteración argílica moderada se observa de manera local, en los testigos de sondajes de menor profundidad (<20 m), identificándose una asociación principal de arcillas, caolinita, hematita, y en menor medida cuarzo (**Figura 37.b**).

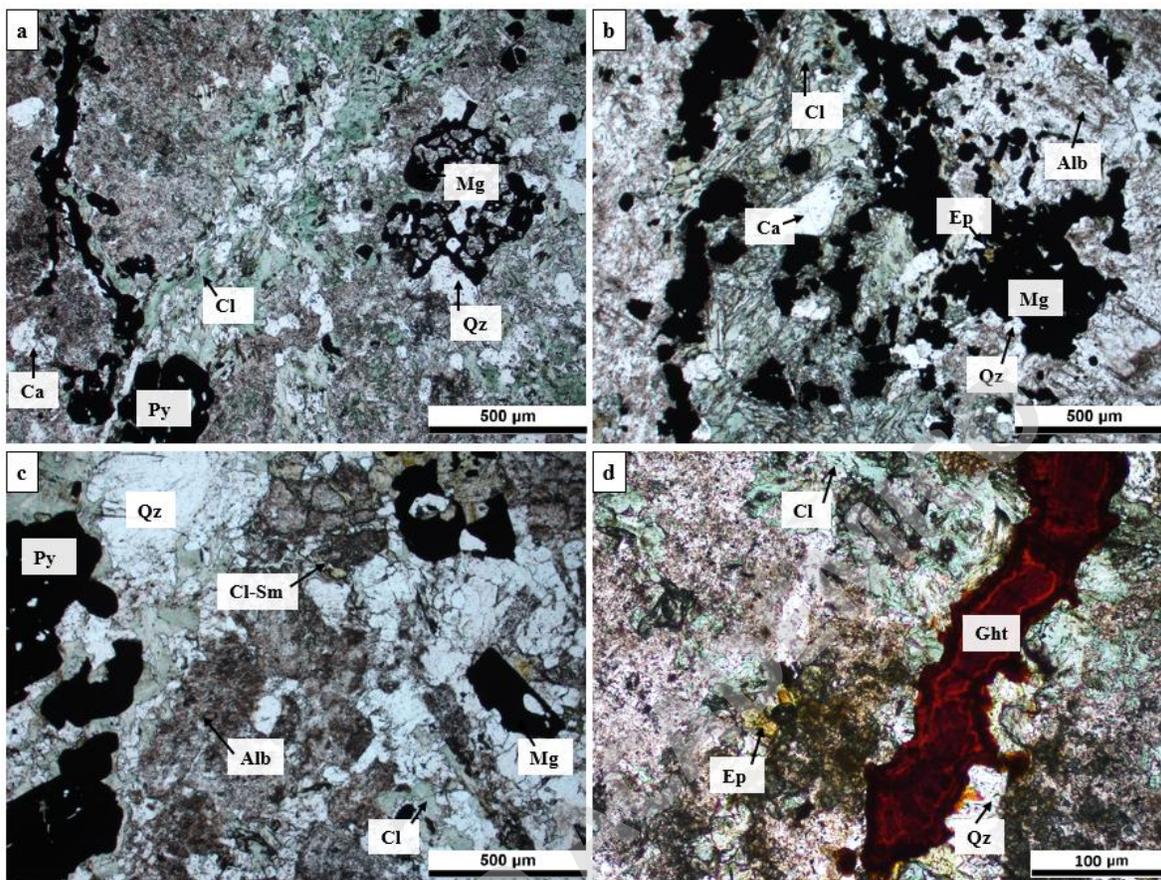


**Figura 34.** Imágenes macroscópicas de las rocas con alteración propilítica (albita-epidota-clorita-esmectita-carbonatos) de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2). a) Muestra COR-07 del sondaje CLRD007. Diorita de biotita con vetillas y cúmulos de clorita y albita. b) Muestra Col-02 del sondaje CLRD012. Andesita de biotita. Los máficos en la masa fundamental, principalmente biotita, se encuentran alterados a clorita, además se observan vetillas de calcita. c) Muestra COL-03 del sondaje CLRD004. Diorita de biotita con reemplazo de cristales de biotita por clorita, plagioclasa por albita y epidota, además de parches de epidota y carbonatos, junto

a vetilla de carbonatos. d) Muestra COL-01. Diorita de biotita. Los cristales de biotita se encuentran alterados a clorita y las plagioclasas a albita y epidota.



**Figura 35.** Imágenes microscópicas a luz transmitida a nícoles paralelos de las rocas con alteración propilítica (albita-epidota-clorita-esmectita-carbonatos-magnetita-pirita) de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2). a) Muestra COL-02 en aumento 10x. Andesita de biotita, en donde los cristales de biotita han sido reemplazados por clorita y magnetita, mientras que los cristales de plagioclasa son reemplazados por albita, epidota o carbonatos. b) Muestra COR-07 en aumento 10x. Diorita de biotita, en donde los cristales de biotita han sido reemplazados por clorita junto a cuarzo recrystalizado y carbonatos. c) Muestra COL-01. Diorita de biotita a nícoles cruzados en aumento 4x. Fenocristales de clorita y epidota junto a carbonatos. d) Muestra COL-12. Diorita de biotita a nícoles paralelos en aumento 4x. Fenocristal de albita siendo reemplazado por epidota y clorita. Abreviaturas: cuarzo (Qz), albita (Alb), clorita (Cl), epidota (Ep), carbonatos (Ca), magnetita (Mg), goethita (Ght), pirita (Py).

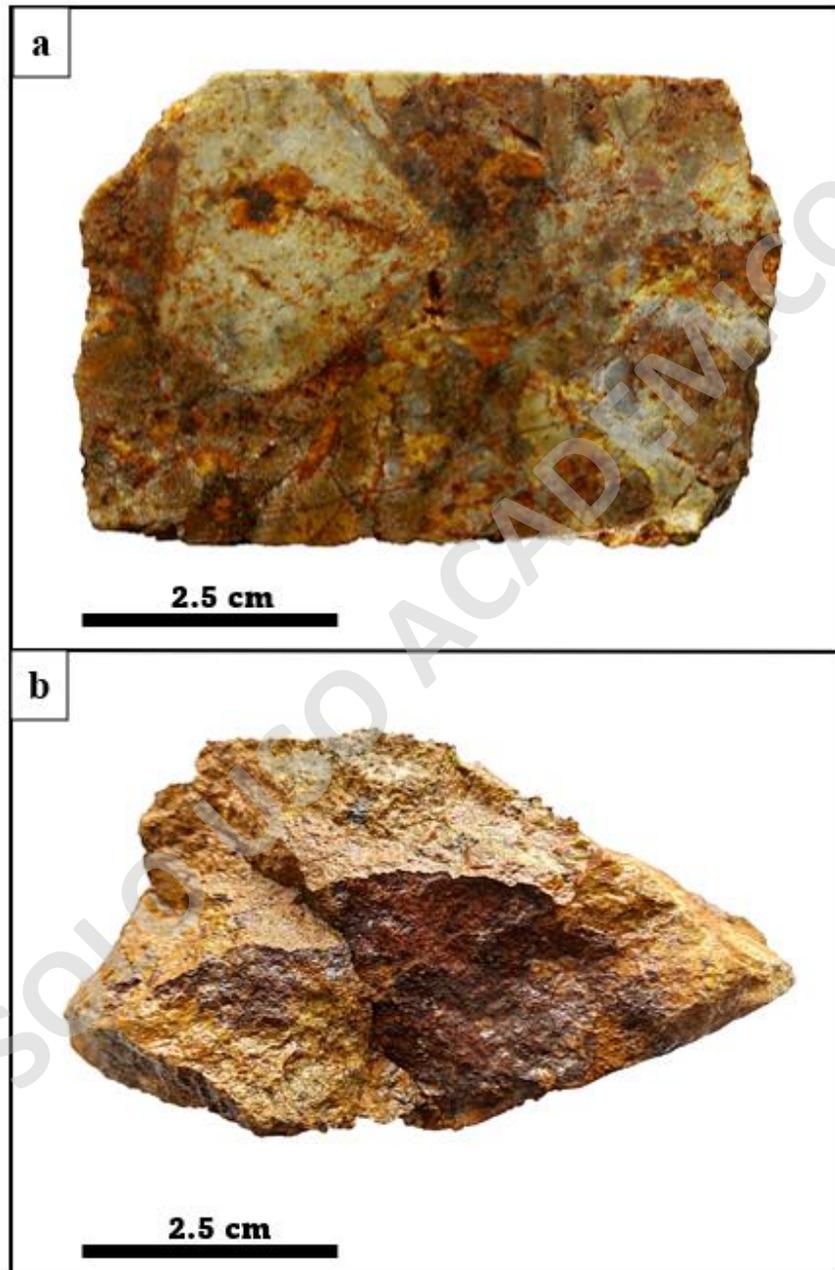


**Figura 36.** Imágenes microscópicas a luz transmitida a nícoles paralelos de vetillas asociadas a alteración propilítica (albita-epidota-clorita-esmectita-carbonatos) de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2). a) Muestra COL-03 en aumento 4x. Vetilla de cuarzo-clorita-pirita-magnetita hidrotermal con textura esqueletal y halo de carbonatos b) Muestra COL-03 en aumento 4x. Cúmulo de minerales máficos alterados a clorita y magnetita, junto con cristales de albita, cuarzo granular y carbonatos. c) Muestra COL-08 en aumento 4x. Vetilla de cuarzo, albita, pirita y magnetita d) Muestra COR-03 en aumento 10x. d) Vetilla de cuarzo-clorita-epidota con posterior *infill* de goethita producto de la alteración supérgena. Abreviaturas: cuarzo (Qz), albita (Alb), clorita (Cl), epidota (Ep), esmectita (Sm), carbonatos (Ca), magnetita (Mg), goethita (Ght), pirita (Py).

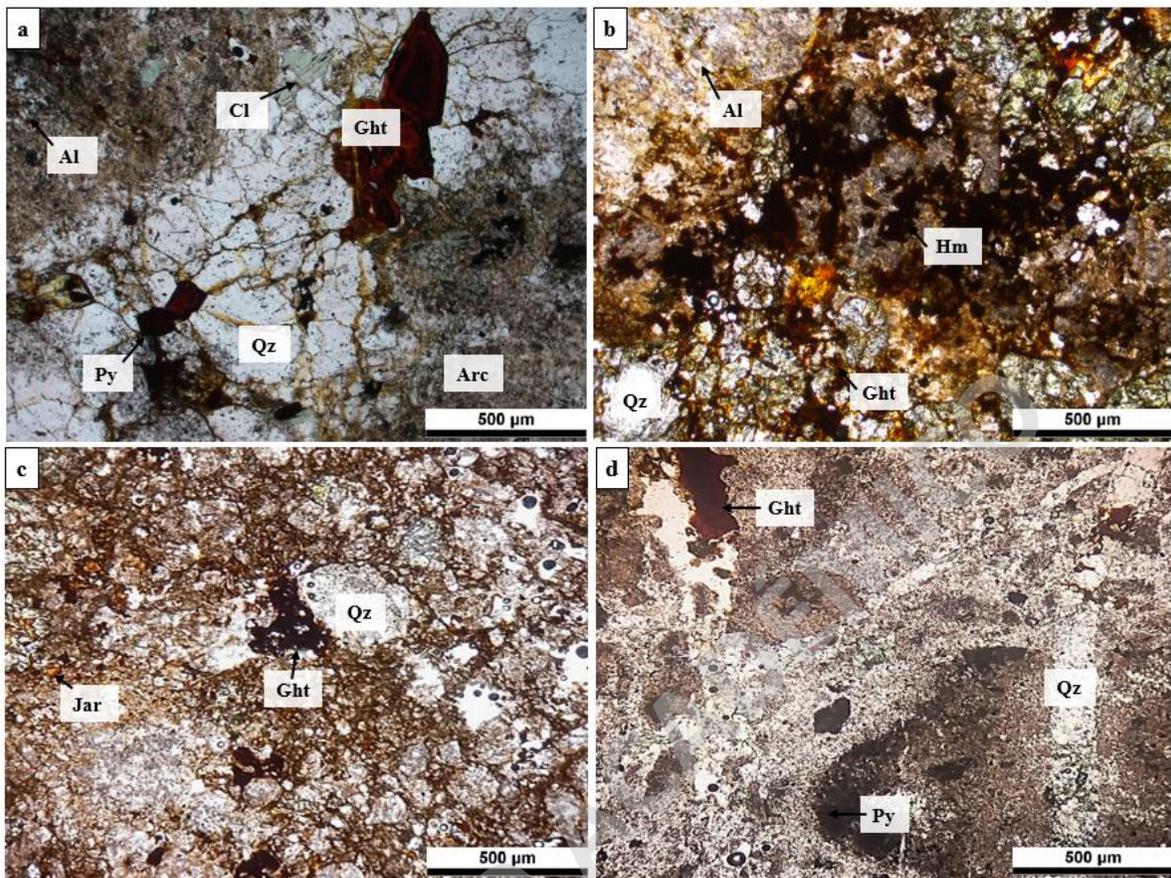
#### 4.2.6 Alteración Supérgena

Esta alteración se encuentra presente en ambos depósitos, en las zonas más superficiales de los depósitos y en testigos de sondajes correspondientes a profundidades <20 m. En el caso del depósito Cerro del Oro, la asociación mineralógica consta principalmente de minerales oxidados de cobre (crisocola, atacamita y malaquita), óxidos e hidróxidos de hierro (hematita y goethita), silicatos de Fe-Mg-Mn (posiblemente neotocita), sulfatos de hierro (jarosita), junto con la formación de arcillas y sílice en forma de parches y vetillas (**Figura 39**); y se encuentra principalmente asociada al intrusivo diorítico (**Figura 39**), y brechas hidrotermales

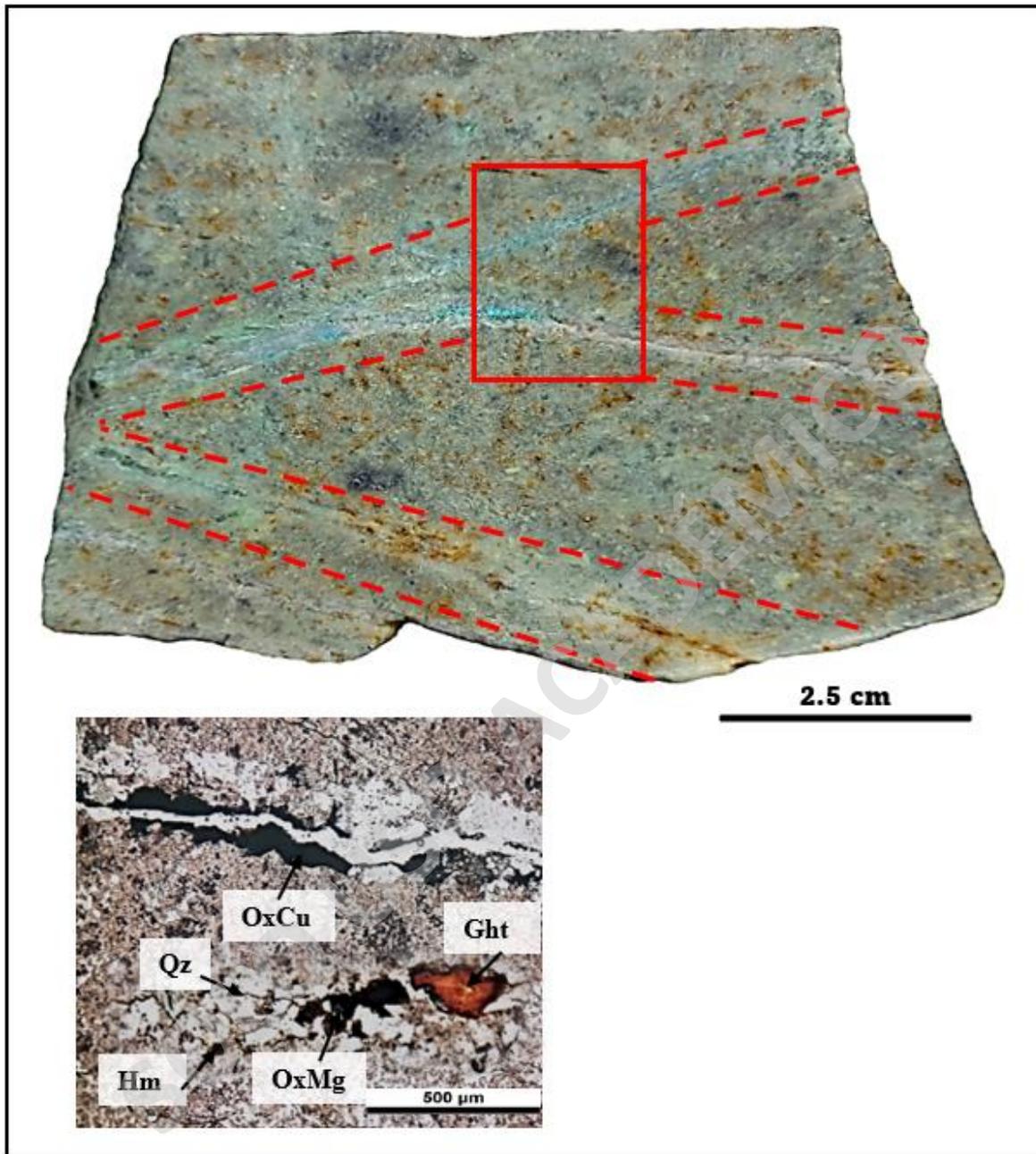
(Figura 37.a). En el caso del sector de La Colina (2), la asociación mineralógica consta principalmente de goethita, jarosita, hematita y arcillas; la cual afecta principalmente a las brechas hidrotermales (Figura 37.b; Figura 38.b, c).



**Figura 37.** Imágenes macroscópicas de las litologías con alteración argílica moderada y supérgena de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2), respectivamente. a) Muestra COR-04 del testigo de sondaje DDHLLA030. Brecha hidrotermal polimíctica con alteración argílica moderada y supérgena. Los clastos presentan vetillas de cuarzo y se observa alteración de hematita junto a goethita. b) Muestra COL-13. Brecha hidrotermal con clastos de diorita/andesita con alteración argílica moderada y supérgena.



**Figura 38.** Imágenes microscópicas a luz transmitida a nícoles paralelos en aumento 4x de las litologías con alteración argílica moderada y supérgena de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2). a) Muestra COR-03. Diorita de biotita. Vetilla de cuarzo-pirita con halo de clorita, sericita, arcillas y alunita, asociado a las alteraciones sericítica y argílica moderada, con posterior reemplazo de hematita-goethita-jarosita asociado a evento supérgeno b) Muestra COL-13. Brecha hidrotermal con clastos de diorita. Clastos alterados a arcillas, alunita y cuarzo recristalizado asociado a alteración argílica moderada junto a matriz fuertemente alterada y lixiviada con goethita-jarosita asociada a evento supérgeno. c) Muestra COL-13. Brecha hidrotermal con clastos de diorita. Clastos alterados a arcillas producto de una alteración argílica moderada, posteriormente silicificados, en una matriz fuertemente alterada y lixiviada con goethita-jarosita asociado a un evento supérgeno. d) Muestra COR-04. Brecha hidrotermal. Clastos y matriz se encuentran fuertemente alterados a arcillas y hematita producto de la alteración argílica moderada, además estos son cortados por vetillas de cuarzo con alteración supérgena junto a goethita. Abreviaturas: cuarzo (Qz), alunita (Al), arcillas (Arc), clorita (Cl), goethita (Ght), hematita (Hm), jarosita (Jar), pirita (Py).



**Figura 39.** Imagen macroscópica y microscópica en nícoles paralelos a 500 micras de la litología diorita de biotita del depósito Cerro del Oro con alteración supérgena. Muestra COR-01 del testigo de sondaje DDHLLA030. Roca silicificada con vetillas de cuarzo junto a óxidos de Cu, Fe y Mg. Abreviaturas: cuarzo (Qz), hematita (Hm), goethita (Ght), pirita (Py), óxidos de cobre (OxCu), óxidos de magnesio (OxMg).

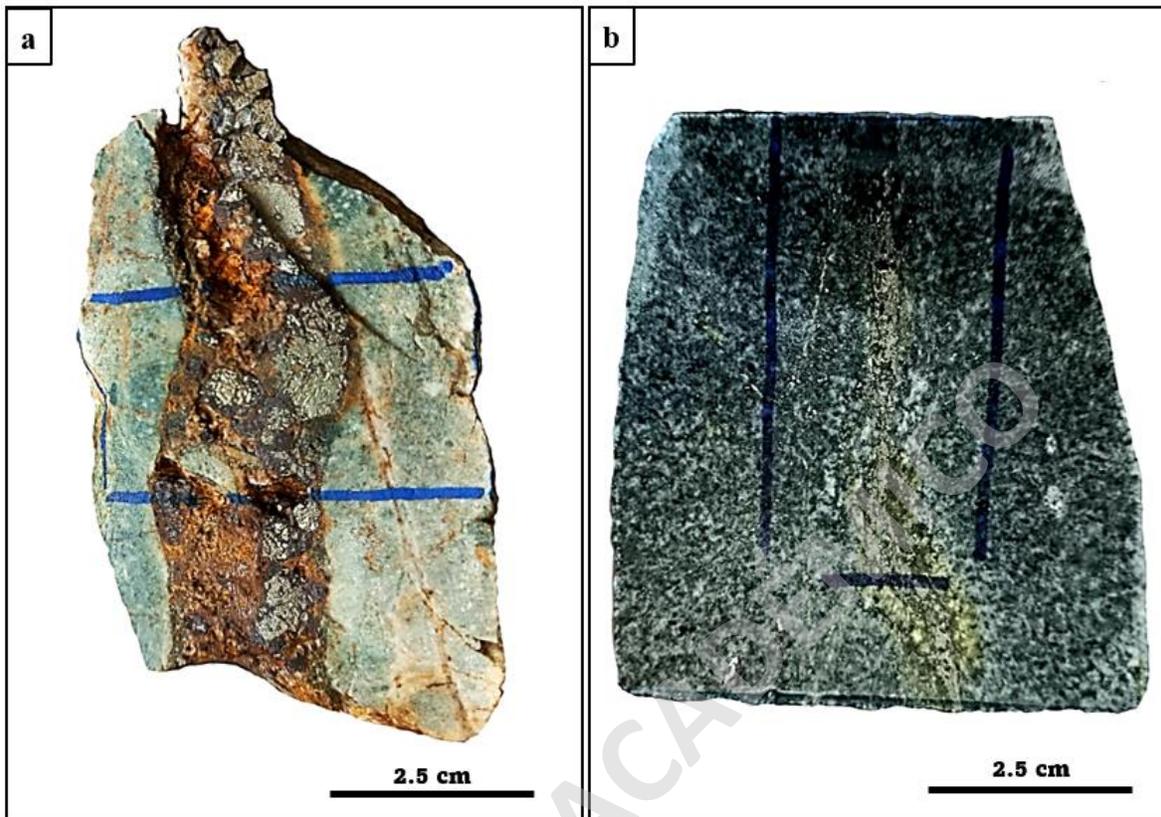
### 4.3 Mineralogía sulfurada y óxidos/ hidróxidos de hierro y titanio

En general, en los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2), la mineralización metálica hipógena se compone principalmente de sulfuros de cobre (**Figura 40, 41**). En el caso del depósito Cerro del Oro, se observa una mineralización supérgena asociada a óxidos y oxidados de cobre, hierro y magnesio (**Figura 39**), mientras que para el depósito La Colina (2), la alteración supérgena está principalmente asociada a óxidos/hidróxidos de hierro (**Figura 42**).

En ambos depósitos la mineralogía sulfurada, reconocida mediante microscopio óptico a luz reflejada, corresponde principalmente a calcopirita y pirita, además de esfalerita para el depósito La Colina (2). Los óxidos de hierro observados corresponden principalmente a magnetita y hematita. Estos minerales ocurren principalmente de manera diseminada y en distintos tipos de vetillas, asociados a distintas alteraciones hidrotermales.

Con el objetivo de caracterizar la mineralogía de oro, se seleccionaron dos muestras para ser analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). En el caso del depósito Cerro del Oro, se seleccionó la muestra COR-02, correspondiente al testigo de sondaje DDHLLA030, la cual se caracteriza por la ocurrencia de una vetilla de cuarzo-pirita producto de la alteración sericítica, alterada posteriormente a arcillas, hematita, goethita y jarosita producto de una alteración argílica moderada y supérgena (**Figura 40.a**). Además, según lo comunicado por *SHM*, el tramo de testigo de sondaje donde se tomó la muestra presenta altas leyes de oro (confidencial). En el caso del depósito La Colina (2), se seleccionó la muestra COL-09 correspondiente al testigo de sondaje CLRD007, la cual presenta mineralización de calcopirita, pirita, magnetita, hematita, y una menor proporción esfalerita, asociada a una alteración potásica y propilítica (**Figura 40.b**).

Cabe destacar que, durante el análisis mediante SEM, se enfocó especialmente en la búsqueda de oro visible y en la detección de contenidos de oro en calcopirita, pirita y goethita.



**Figura 40.** Imágenes macroscópicas de las litologías seleccionadas para análisis mediante microscopio electrónico de barrido (SEM). a) Muestra COR-02 del sondaje DDHLLA030 del sector Cerro del Oro. Diorita de biotita con vetilla de pirita producto de la alteración sericitica, alterada posteriormente a arcillas y hematita producto alteración argílica moderada; además la roca es posteriormente silificada y lixiviada producto de la alteración supérgena (goethita y jarosita). b) Muestra COL-09 del sondaje CLRD007 del sector La Colina (2). Diorita de biotita con vetillas de magnetita-calcopirita-pirita-epidota que es representativa de la alteración potásica-propilítica.

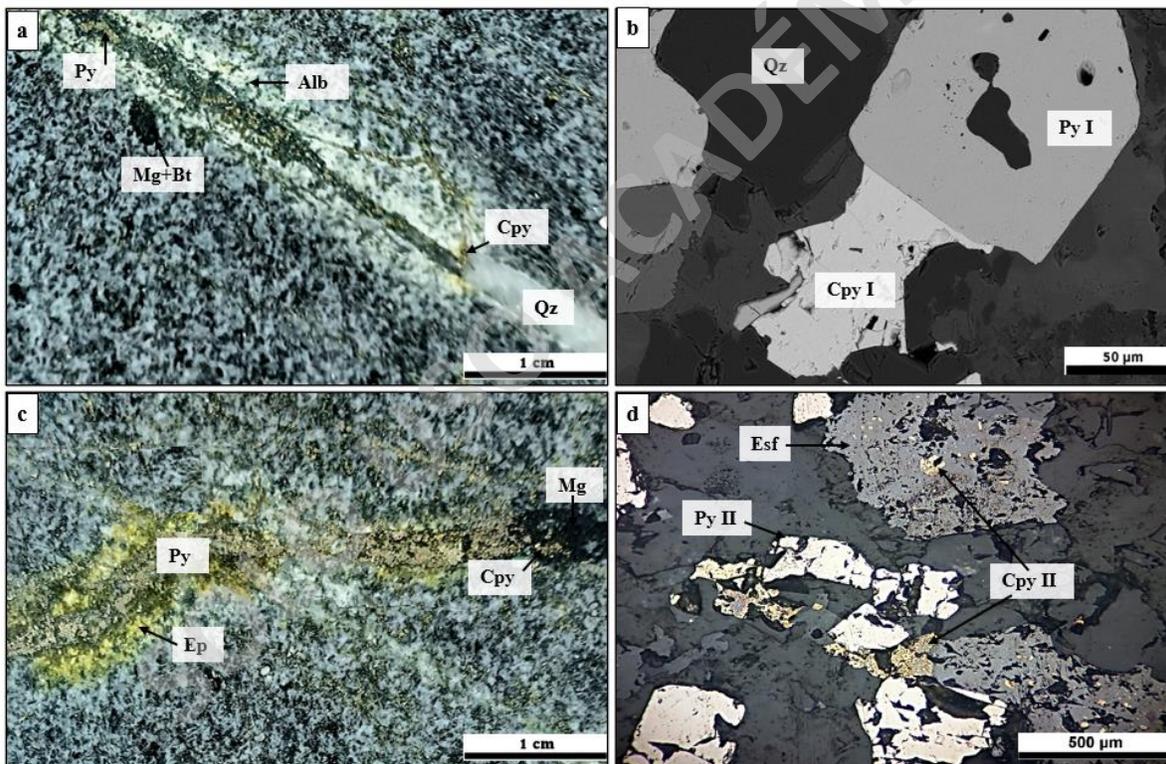
#### 4.3.1 Alteración Potásica y Propilítica

En los dominios de alteración potásica la mineralización principal está conformada por calcopirita, magnetita y pirita. Esta alteración hidrotermal es la principal responsable de la mineralización en el depósito La Colina (2).

Se reconocen dos tipos de calcopirita, las cuales ocurren en vetillas (I y II), masiva (I y II), diseminado (I), y en inclusiones dentro de cristales de pirita y magnetita (I). La calcopirita (I) corresponde a cristales anhedrales ( $\leq 0.1-1$  mm) y se asocia a biotita-cuarzo-magnetita (I).

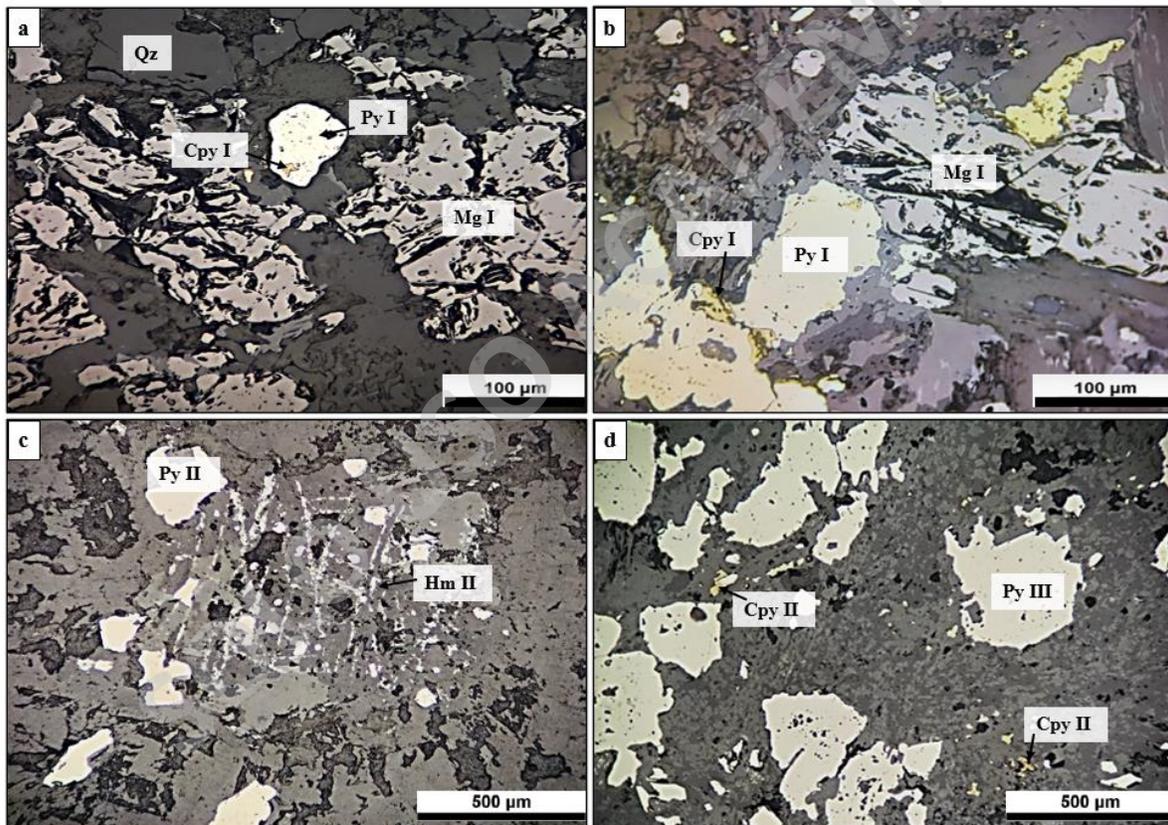
La calcopirita (I) se observa en vetillas de cuarzo de hasta 5 mm de espesor (**Figura 41.a**) y en contacto simple e intercrecidas con magnetita (I) y pirita (I) (**Figura 41.b**).

La calcopirita (II), presente solo en el depósito La Colina (2), se encuentra en menores proporciones como cristales anhedrales ( $\leq 0.3$  mm) que ocurren en vetillas y de forma masiva. Este tipo de calcopirita ocurre principalmente en vetillas de cuarzo-magnetita-clorita en conjunto con cristales y/o cúmulos de epidota (**Figura 41.c**), y presenta inclusiones de esfalerita (**Figura 41.d**). Además, puede encontrarse en contacto simple con magnetita (II) y hematita (II). Este tipo de calcopirita se asocia a una alteración en asociación albita-clorita-epidota-carbonatos-magnetita-pirita.



**Figura 41.** Macro y microfotografías de calcopiritas en vetillas y diseminada del depósito La Colina (2) en asociación con alteración potásica. a) Muestra COL-08 del sondaje CLRD007. Vetilla de cuarzo-magnetita-biotita con mineralización diseminada de calcopirita y pirita, además de halo de albita. b) Muestra COL-08 en aumento 20x. Intercrecimiento de minerales de calcopirita, pirita y magnetita con inclusiones de calcopirita en una vetilla de cuarzo anhedral. c) Muestra COL-09 del sondaje CLRD007. Vetilla pirita-calcopirita-magnetita con halo de epidota. d) Muestra COL-09. Contacto entre un cristal de pirita y calcopirita producto de una alteración potásica temprana, junto a esfalerita con inclusiones de calcopirita. *Abreviaturas: cuarzo (Qz), albita (Alb), biotita (Bt), epidota (Ep), magnetita (Mg), calcopirita (Cpy), pirita (Py), esfalerita (Esf).*

Se reconocen 3 tipos de pirita, las cuales ocurren en vetillas (I, II y III), masivas (I y II) y diseminado (I y III). El primer tipo corresponde a pirita (I), euhedral - subhedral ( $\leq 2$  mm), en vetillas de cuarzo asociados a una alteración potásica (**Figura 42.a**) y también en contacto con calcopirita (I) y magnetita (I) (**Figura 42.b**). El segundo tipo corresponde a pirita (II), anhedral - subhedral (mm), con ocurrencia en vetillas y masiva. La pirita (II) se presenta en asociación con la alteración albita-clorita-esmectita-epidota-carbonatos-magnetita-pirita junto a hematita (II) (**Figura 42. c**). La pirita (III) corresponde a cristales anhedrales ( $\leq 3$  mm) que ocurren en vetillas y diseminada. Este tipo de pirita se encuentra asociada a vetillas y diseminado producto de la alteración sericita-clorita (**Figura 42.d**).



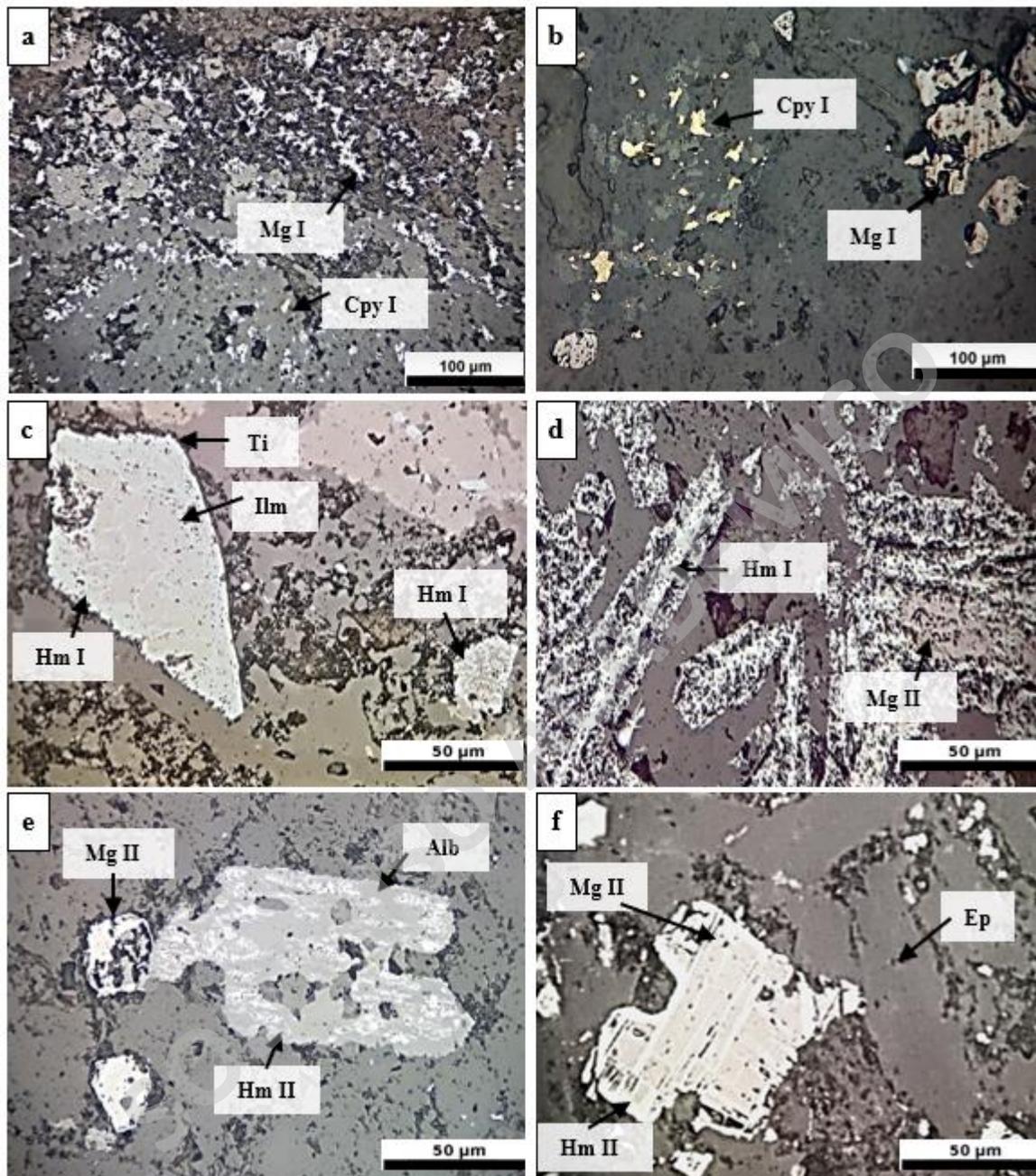
**Figura 42.** Fotomicrografías de cristales de pirita en vetillas y diseminada del depósito La Colina (2). a) Muestra COL-08 en aumento 20x. Intercrecimiento de minerales de calcopirita, pirita y magnetita, con inclusiones de calcopirita en los cristales de pirita asociado a la alteración potásica. b) Muestra COL-09. Contacto entre un cristal de pirita, calcopirita y magnetita, con inclusiones de calcopirita en los cristales de pirita, asociado a la alteración potásica. c) Muestra COL-03 en aumento 10x. Pirita con inclusión de calcopirita junto a cristales de magnetita hematitizada (martitización) en asociación con la alteración albita-epidota-clorita-esmectita-carbonatos-magnetita-pirita. d) Muestra COL-04 en aumento 4x. Cristales de pirita anhedral y diseminado de

calcopirita en asociación con la alteración sericita-clorita. *Abreviaturas: cuarzo (Qz), magnetita (Mg), hematita (Hm), calcopirita (Cpy), pirita (Py).*

En el sector La Colina (2) se reconocen 2 tipos de magnetita, las cuales ocurren de forma masiva (I), en vetillas (I y II) y diseminada (I y II). El primer tipo corresponde a magnetita (I), con secciones octaédricas subhedral a euhedrales ( $\leq 0.1-0.3$  mm), la cual ocurre de manera masiva, diseminada y en vetillas (**Figura 43.a**). Este tipo de magnetita comúnmente se encuentra intercrecida con cristales de biotita formando cúmulos, y en algunos casos, acompañados de cuarzo masivo, así como en vetillas de cuarzo intercrecida con calcopirita (I) y pirita (I) características de una alteración potásica (**Figura 43.b**). También, se presenta un intercrecimiento de hematita (I) ( $\leq 0.08$  mm) con ilmenita ( $\leq 0.08$  mm), ambos anhedrales, masivos (**Figura 43.c**), que posteriormente, en algunos casos se alteran a titanita. El segundo tipo corresponde a magnetita (II), la cual también se encuentra alterando a hematita (I) como mushketovita (**Figura 43.d**). El tercer tipo corresponde a magnetita (III), anhedrales a subhedral ( $\leq 0.3$  mm), con hábito especular u octaédrico euhedral a subhedral en vetillas de 1-3 mm de ancho. Este tipo de magnetita se encuentra intercrecida con cristales de clorita, epidotas y calcita entrecrecida con pirita y esfalerita (**Figura 41.e**); además en contacto con hematita (II) (**Figura 43.e**) asociada a una alteración en asociación albita-clorita-epidota-carbonatos. Además, se forma hematita a partir de los planos de clivaje de la magnetita como martitización (**Figura 43.f**).

#### 4.3.2 Alteración Sericítica y Supérgena

En los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2), también se observa escasa mineralización asociada a alteración sericítica y supérgena. En el caso del depósito Cerro del Oro, se observan stockworks de cuarzo-pirita (**Figura 44.a**), asociada la alteración sericítica. Los cristales de piritas son euhedrales a subhedrales ( $\leq 2$  mm) (**Figura 44.a**) y, en su mayoría, se encuentran zonadas (**Figura 44.b**). Además, se observan piritas siendo reemplazadas por hematita producto de una posterior alteración argílica supérgena (**Figura 44.c**).



**Figura 43.** Fotomicrografías con luz reflejada de óxidos de hierro en vetillas y diseminado del depósito La Colina (2). a) Muestra COL-03 en aumento 10x. Diseminado de magnetita y calcopirita en asociación con alteración potásica. b) Muestra COL-06 en aumento 20x. b) Muestra COL-05 en aumento 10x. Magnetita subhedral junto a diseminado de calcopirita producto de la alteración potásica. c) Muestra COL-06 en aumento 20x. Hematita (I) e ilmenita asociada alteración potásica alterándose a titanita. d) Muestra COL-10 en aumento 20x. Hematita especular (II) asociada a alteración propilítica reemplazada por magnetita (III) formando mushketovita. e) Muestra COL-12 en aumento 20x. Cristales de magnetita junto a un cristal de albita el cual ha sido alterado a hematita por sus planos de clivaje, asociados a alteración propilítica. f) Muestra COL-06 en aumento 20x. Cristales de magnetita hematitizada (martitización) a través de sus fracturas y planos de clivaje,

en asociación con la alteración propilítica. *Abreviaturas: albita (Alb), epidota (Ep), ilmenita (Ilm), titanita (Ti), magnetita (Mg), hematita (Hm), calcopirita (Cpy), pirita (Py).*

Además, en el depósito Cerro de Oro, se observa hematita junto a hidróxidos de hierro (**Figura 44.d**), principalmente goethita, que se forma a partir de los planos de clivaje de la pirita (**Figura 44.e**). Asimismo, la goethita presenta inclusiones de fosfato de tierras raras (Y, La, Nd) asociadas a alteración supérgena (**Figura 44.f**). También se encuentra en asociación con sulfatos de potasio y hierro, principalmente jarosita (**Figura 40.a**), junto a minerales oxidados de cobre (crisocola, atacamita y malaquita) y silicatos de Fe-Mg-Mn (posiblemente neotocita), asociados a un evento tardío de alteración supérgena (**Figura 39**).

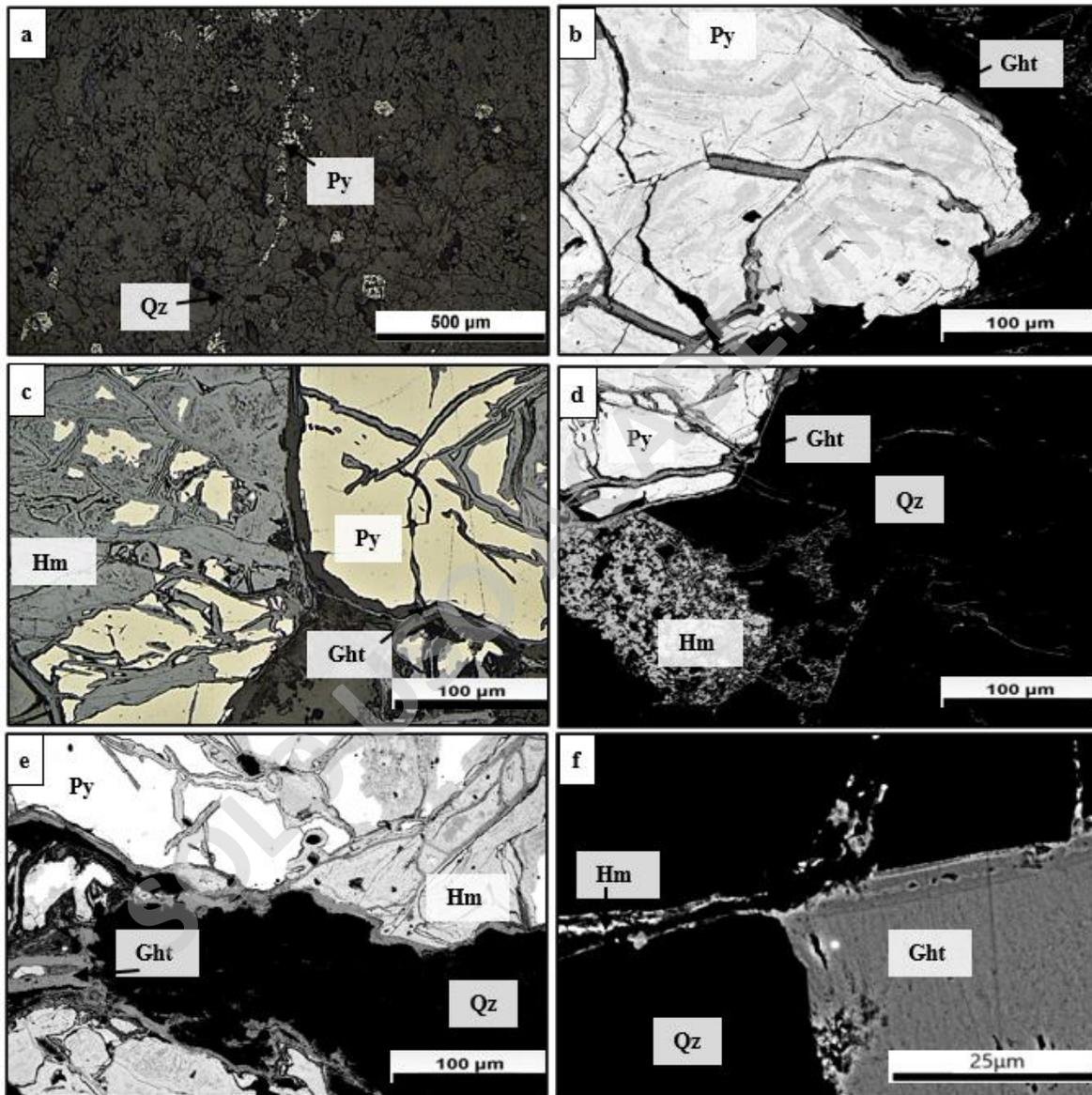
## **CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN**

En este capítulo se discuten aspectos relacionados a la caracterización litológica, la alteración hidrotermal y la mineralización, así como la ocurrencia del oro. Además, se clasifican los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2) de acuerdo con las observaciones de las secciones transparentes-pulidas de testigos de sondajes mediante microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido (SEM), así como de la recopilación de información de la geología superficial.

### **5.1 Caracterización litológica**

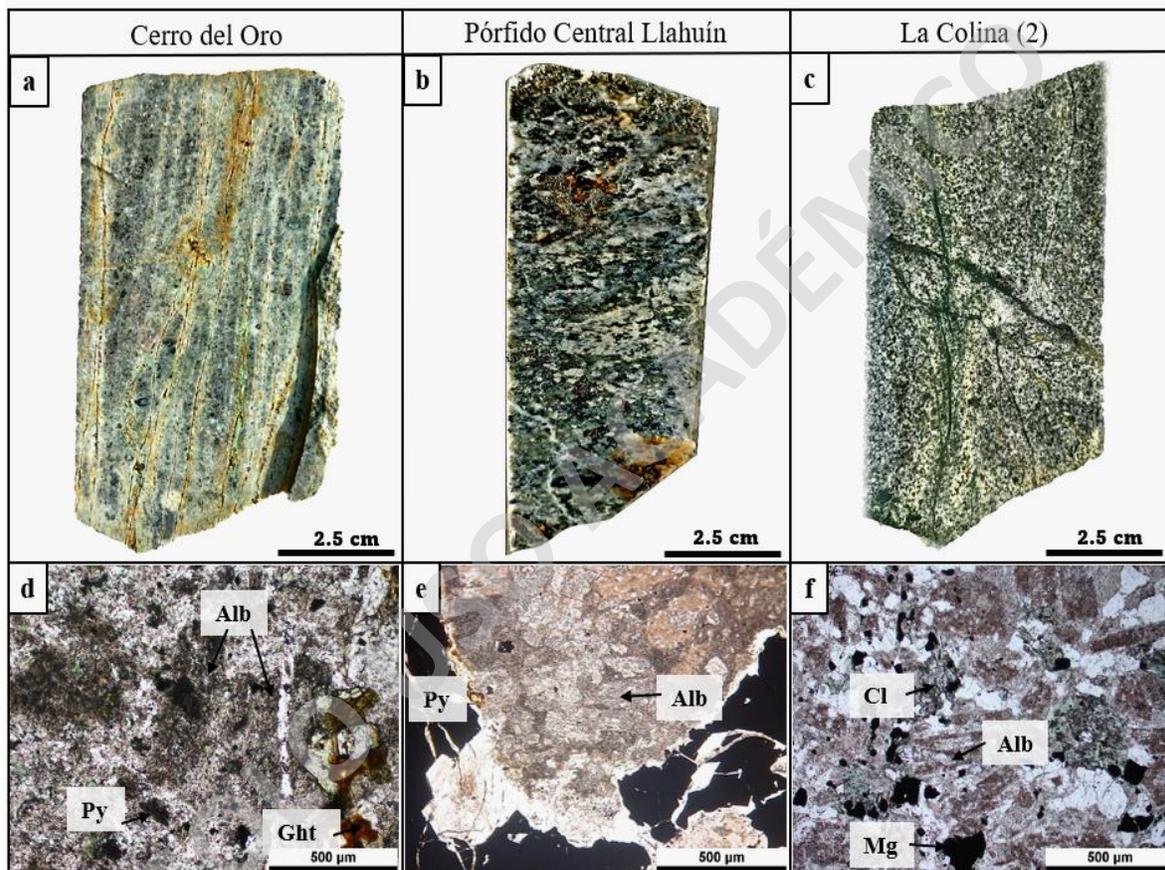
La litología hospedante de la mineralización del depósito Cerro del Oro corresponde a un intrusivo principalmente diorítico (**Figura 15**). De acuerdo con López et al. (2014), esta litología sería similar a la que alberga la mineralización del Distrito Llahuín, la cual varía de composición diorítica a granodiorítica. Además, esta litología se asemeja a la roca de caja del Pórfido Central Llahuín (muestra del testigo de sondaje DDHLLA020), descrita como una diorita de biotita (**Figura 26.a**). Dicha observación sugiere que la roca de caja de los depósitos Cerro del Oro y el Pórfido Central Llahuín sería la misma, y que las mayores diferencias se deben al tipo de alteración hidrotermal. En el caso del Pórfido Central Llahuín, la mineralización sulfurada (calcopirita>pirita) se encuentra asociada principalmente a vetillas y *stockworks* de cuarzo que se formaron durante una alteración potásica dominante

(Figura 45.b). Mientras que en el depósito Cerro del Oro, la mineralización sulfurada (pirita>calcopirita) se encuentra principalmente relacionada con *stockworks* y *sheeted veins* de cuarzo que se asocian con una alteración potásica temprana a la cual se le sobrepone una alteración sericítica más tardía (Figura 45.a).



**Figura 44.** Fotomicrografías de óxidos de hierro y pirita en vetillas y diseminado del depósito Cerro del Oro asociado a las alteraciones sericítica, argílica moderada y supérgena. a) Muestra COR-07 a luz reflejada en aumento 4x. Vetilla de cuarzo-pirita y diseminado de pirita euhedral a subhedral producto de la alteración sericítica. b) Imágen BSE de microscopio de barrido electrónico (SEM) de la muestra COR-02 del sondaje DDHLLA030. Cristal subhedral de pirita con zonación c) Muestra COR-02 a luz reflejada en aumento 10x. Cristales de pirita alterados a hematita y con goethita en fracturas producto de la alteración supérgena d) Imágen

BSE de microscopio de barrido electrónico (SEM) de la muestra COR-02 del depósito Cerro del Oro. Vetilla de cuarzo-pirita producto de la alteración sericítica y posterior diseminado de hematita, con reemplazo de hematita y goethita en pirita producto de la alteración supérgena. e) Imágen BSE de microscopio de barrido electrónico (SEM) de la muestra COR-02 del sondaje DDHLLA030. Vetilla de cuarzo-pirita producto de la alteración sericítica, además el cristal de pirita se encuentra alterado a hematita junto a goethita en fracturas producto de la alteración supérgena. f) Imágen BSE de microscopio de barrido electrónico (SEM) para la muestra COR-02 del depósito Cerro del Oro. Cristal de goethita con inclusión de fosfato de tierras raras (Y, La, Nd) asociado a alteración supérgena. *Abreviaturas: cuarzo (Qz), magnetita (Mg), hematita (Hm), goethita (Ght), calcopirita (Cpy), pirita (Py).*



**Figura 45.** Macro y microfotografías de las litologías que hospedan la mineralización en Cerro del Oro, Pórfido Central Llahuín y La Colina (2). a) Muestra COR-03 del testigo de sondaje DDHLLA030 del depósito Cerro del Oro. Diorita de biotita con alteración potásica y supérgena débil sobreimpuesta. b) Muestra COR-05 del testigo de sondaje DDHLLA020 del Pórfido Central Llahuín. Diorita de biotita con albitización y alteración potásica. c) Muestra COL-03 del sondaje CLRD007 del depósito La Colina (2). Diorita de biotita con alteración propilítica (albita-epidota-clorita-esmectita-magnetita-pirita). d) Muestra COR-03 a nícoles paralelos en aumento 4x. Fenocristales de plagioclasa cortados por vetilla de cuarzo, además de máficos (biotita) alterados a clorita y posterior goethita. e) Muestra COR-05 a nícoles paralelos en aumento 4x. Vetilla de pirita y cuarzo junto a fenocristales de albita alterados a sericita. f) Muestra COL-03 a nícoles paralelos en aumento 4x. Cristales de albita y cuarzo junto con máficos (biotita) alterados a clorita y magnetita. *Abreviaturas: albita (Alb), clorita (Cl), magnetita (Mg), goethita (Ght), pirita (Py).*

En el caso del depósito La Colina (2), la litología hospedante de la mineralización corresponde a un intrusivo diorítico a granodiorítico con alteración potásica y propilítica dominante (**Figura 45.c**). La característica más distintiva de este depósito es la ocurrencia de vetas de magnetita masiva asociadas con una alteración potásica y con contenidos significativos de pirita y calcopirita (**Figura 42.b**), que son cortadas por vetillas de hematita especular producto de la posterior alteración propilítica (**Figura 31**). Estas vetas de magnetita se asociarían espacial y genéticamente con las brechas magmáticas hidrotermales compuestas de clastos de andesita/diorita-granodiorita, matriz de magnetita y mineralización de calcopirita (~1%) (**Apartado 5.4**). Asimismo, se observan otras litologías en el sector de La Colina (2), incluyendo lavas andesíticas y brechas volcánicas con alteración propilítica.

## **5.2 Secuencia paragenética de alteración hidrotermal y mineralización**

Con base en las asociaciones mineralógicas observadas en terreno y descritas en el CAPÍTULO 3: RESULTADOS, se propone una secuencia paragenética de eventos de alteración y mineralización para los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2), considerando las relaciones de corte y características texturales observadas.

### **5.2.1 Cerro del Oro**

En el depósito Cerro del Oro se identifican seis eventos principales de alteración hidrotermal y mineralización sobreimpuestos, es decir, los eventos I, II y III, IV, V y VI (**Figura 46**). El primer evento (Evento I) corresponde a una alteración sódica caracterizada por albita, seguido de un segundo evento (Evento II) de alteración potásica con biotita, cuarzo, magnetita, calcopirita ± pirita. El Evento III corresponde a una alteración propilítica compuesta principalmente por clorita, clorita-esmectita, albita, y en menor proporción epidota, calcita y pirita. El Evento IV corresponde a una alteración sericítica caracterizada principalmente por sericita, cuarzo-sericita, sericita-clorita, clorita-esmectita y pirita. El evento V, se define como una alteración argílica moderada, la cual se caracteriza por la formación de minerales de arcillas, junto a una menor proporción de hematita, cuarzo y alunita. Finalmente, el último evento de alteración y mineralización corresponde a una alteración supérgena (Evento VI), caracterizada por la presencia de minerales oxidados de

cobre (crisocola, atacamita y malaquita), óxidos e hidróxidos de hierro (hematita y goethita), silicatos de Fe-Mg-Mn (posiblemente neotocita), sulfatos de hierro (jarosita), junto con la formación de arcillas.

### **5.2.2 La Colina (2)**

En el depósito La Colina (2) se identifican seis eventos principales de alteración hidrotermal y mineralización sobreimpuestos, es decir, los eventos I, II y III, IV, V y VI (**Figura 47**). El primer evento (Evento I) corresponde a una alteración sódica definida por albita, seguido de un segundo evento (Evento II) de alteración potásica caracterizado por biotita, magnetita, cuarzo, calcopirita  $\pm$  pirita. El Evento III corresponde a una alteración propilítica con abundante epidota, clorita, clorita-esmectita, albita, calcita, y en menor medida, magnetita y pirita. La mushketovita se encuentra asociada a los sulfuros, pero posterior a la formación de magnetita en el evento potásico temprano, por lo cual, se cree que se formó durante parte del Evento II e inicios del Evento III. El Evento IV corresponde a una alteración sericítica caracterizada principalmente por sericita, cuarzo-sericita y sericita-clorita, clorita-esmectita. El Evento V corresponde a una alteración argílica moderada, caracterizada por la formación de arcillas y menor hematita. Finalmente, el último evento de alteración hidrotermal y mineralización (Evento VI) corresponde a la alteración supérgena caracterizada principalmente por arcillas, goethita, jarosita y hematita.

### **5.3 Zonación vertical de la alteración hidrotermal y mineralización**

A continuación, se presentan dos esquemas que ilustran la variación de la litología, alteración hidrotermal y mineralización en profundidad, a partir de las observaciones macroscópicas y petro-calcográficos de los testigos de sondaje de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2), respectivamente (**Figura 48** y **Figura 49**). Para ambos depósitos, se definen tres zonas de alteración hidrotermal y mineralización: *zona somera*, *zona intermedia* y *zona profunda*.

Mineralogía		Eventos					
		I	II	III	IV	V	VI
Mena	Magnetita		D, V		R	R, V	M, V
	Hematita			Espequerita			
	Calcopirita		D, V				
	Pirita		D, V	V	V, D		
	Crisocola						
	Malaquita						
	Jarosita						
	OxMg						
	Goethita						
	Ganga	Albita		H			
Cuarzo			V, D	V	V, H	D	V, R, M
Feldespato potásico							
Biotita			R, C				
Clorita				R, V	R, D		
Clorita-Esmectita							
Sericita					R, V, D, M		
Alunita							
Arcillas							
Epidota				M, R			
Calcita				V, D			

**Figura 46.** Secuencia paragenética de alteración y mineralización del depósito Cerro del Oro. Se determinan seis eventos principales: I (alteración sódica-albitización), II (alteración potásica), III (alteración propilítica), IV (alteración sericítica), V (alteración argílica moderada) y VI (alteración supérgena). El grosor de las líneas representa la abundancia relativa del mineral durante los eventos. *Abreviaturas: Cúmulo (C), disseminado (D), halo (H), masivo (M), reemplazo (R) y vetilla (V).*

Mineralogía		Eventos					
		I	II	III	IV	V	VI
Mena	Magnetita		M, V, D	Mushketovita V, D			
	Hematita			Especularita R		R	V
	Ilmenita		---				
	Calcopirita		V, D				
	Pirita		V, D		V, D		
	Esfalerita			V, D			
	Goethita						
	Jarosita						
Ganga	Albita		H	V, D			
	Cuarzo		V, D	V	V, D, H		
	Feldespato potásico		---				
	Biotita		R, C				
	Clorita			M, R, V			
	Clorita-Esmectita						
	Sericita				M, V, H		
	Arcillas						
	Epidota			M, V, H			
	Calcita			M, V, R			

**Figura 47.** Secuencia paragenética del depósito La Colina (2). Se determinan cinco eventos principales: I (alteración sódica-albitización), II (alteración potásica), III (alteración sericítica), IV (alteración propilítica) y V (alteración argílica moderada). El grosor de las líneas representa la abundancia relativa del mineral durante los eventos. *Abreviaturas: Cúmulo (C), disseminado (D), halo (H), masivo (M) y vetilla (V).*

### 5.3.1 Cerro del Oro

La *zona somera* del depósito Cerro del Oro abarca el dominio entre la superficie y los 50 m de profundidad, en la cual predominan la alteración sericítica, que se caracteriza por la ocurrencia de abundantes vetillas de cuarzo-pirita; a la cual se sobreimpone una alteración argílica moderada caracterizada por la formación de arcillas principalmente; y finalmente un evento supérgeno tardío que se caracteriza por la presencia de minerales oxidados de cobre (crisocola, atacamita y malaquita), óxidos e hidróxidos de hierro (hematita y goethita),

silicatos de Fe-Mg-Mn (posiblemente neotocita), sulfatos de hierro (jarosita), junto con la formación de arcillas (**Figura 46; Figura 48**). La *zona intermedia* se define entre los 50 y 200 m de profundidad, y se caracteriza por la presencia de una alteración sericítica dominante, con vetillas de cuarzo-sericita-pirita (**Figura 48**). La *zona profunda* se define entre los 200 y 400 m de profundidad, y se encuentra caracterizada por una alteración potásica con *stockworks* y vetillas de cuarzo con pirita y en menor medida calcopirita. La alteración potásica es la que domina en la parte más profunda del sistema (**Figura 48**). Asimismo, la alteración potásica se superpone a una alteración sódica temprana (de fondo), lo cual es evidente a partir de relaciones de corte.

Es importante destacar, que tanto en las *zonas somera, intermedia y profunda* del depósito Cerro del Oro, se observa que los sulfuros (pirita>calcopirita) están principalmente asociados con múltiples generaciones de vetillas de cuarzo, *stockworks* y *sheeted veins* (**Figura 48**), lo cual es una característica distintiva de la mineralización asociada a los sistemas tipo pórfido cuprífero (Sillitoe, 2010).

### 5.3.2 La Colina (2)

La *zona somera* del sector La Colina (2) abarca el dominio entre la superficie y los 45 m de profundidad. Se caracteriza por una abundante presencia de epidota, producto de una alteración propilítica pervasiva, abundantes arcillas producto de una alteración argílica moderada, y óxidos e hidróxidos de hierro (principalmente hematita y goethita) que se formaron durante un evento supérgeno tardío (**Figura 49**). La *zona intermedia*, definida entre los 45 y 145 m de profundidad, se caracteriza por una alteración propilítica con abundante albita, epidota, clorita y carbonatos (**Figura 47**), junto a la presencia de magnetita, menor hematita (especular) y esfalerita (**Figura 47**). Asimismo, se identifica una alteración sericítica caracterizada por la presencia de sericita, cuarzo, clorita y pirita (**Figura 49**). En la *zona profunda*, definida entre los 145 y 200 m de profundidad, domina la alteración potásica (biotita-cuarzo ± feldespato potásico) con abundante mineralización de magnetita, además de mushketovita, calcopirita, pirita, y en menor medida ilmenita (**Figura 49**). También, en la *zona profunda* se reconoce alteración propilítica (albita-epidota-clorita-esmectita-

carbonatos), con contenidos variables de magnetita, hematita (especular), pirita y esfalerita. En particular, la alteración potásica ocurre principalmente asociada a brechas magmáticas-hidrotermales con matriz de magnetita, mientras que la asociación propilítica ocurre como un halo gradacional y distal de la alteración potásica, a la cual también se le asocia contenidos significativos de magnetita (**Figura 49**).

La abundante presencia de óxidos de hierro como magnetita, hematita y mushketovita en las *zonas profunda, intermedia y somera* del depósito La Colina (2), además de la menor presencia de fases minerales ricas en Ti (ilmenita y titanita) y la escasa ocurrencia de vetillas de cuarzo, son características más afines a los sistemas IOCG (Sillitoe, 2003), en comparación a los sistemas tipo pórfido cuprífero. En particular, el reemplazo de hematita por magnetita, es decir, mushketovita, es común en diversos depósitos IOCG como Candelaria, Raúl Condestable y Mantoverde (Marschik y Fontboté, 2001; De Haller y Fontboté, 2009; Rieger et al., 2010). La ocurrencia de mushketovita se asociaría a un aumento de la interacción fluido-roca lo que generaría una disociación de  $SO_2$  disuelto en el fluido en  $H_2SO_4^{2-}$  y  $H_2S$ , aumentando así el contenido de  $H_2$  del sistema, proceso que influiría en un aumento de temperatura, produciendo la disminución del estado redox (reducción) necesario para generar mushketovita (De Haller y Fontboté, 2009).

#### **5.4 Asociación mineralógica del oro**

Según los resultados obtenidos mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM) no se observaron partículas de oro visibles (BSE), ni se identificaron contenidos de oro en calcopirita, pirita y goethita (EDS), a pesar de los contenidos de oro reportados en Cerro del Oro y La Colina (2) (**Figura 3**).

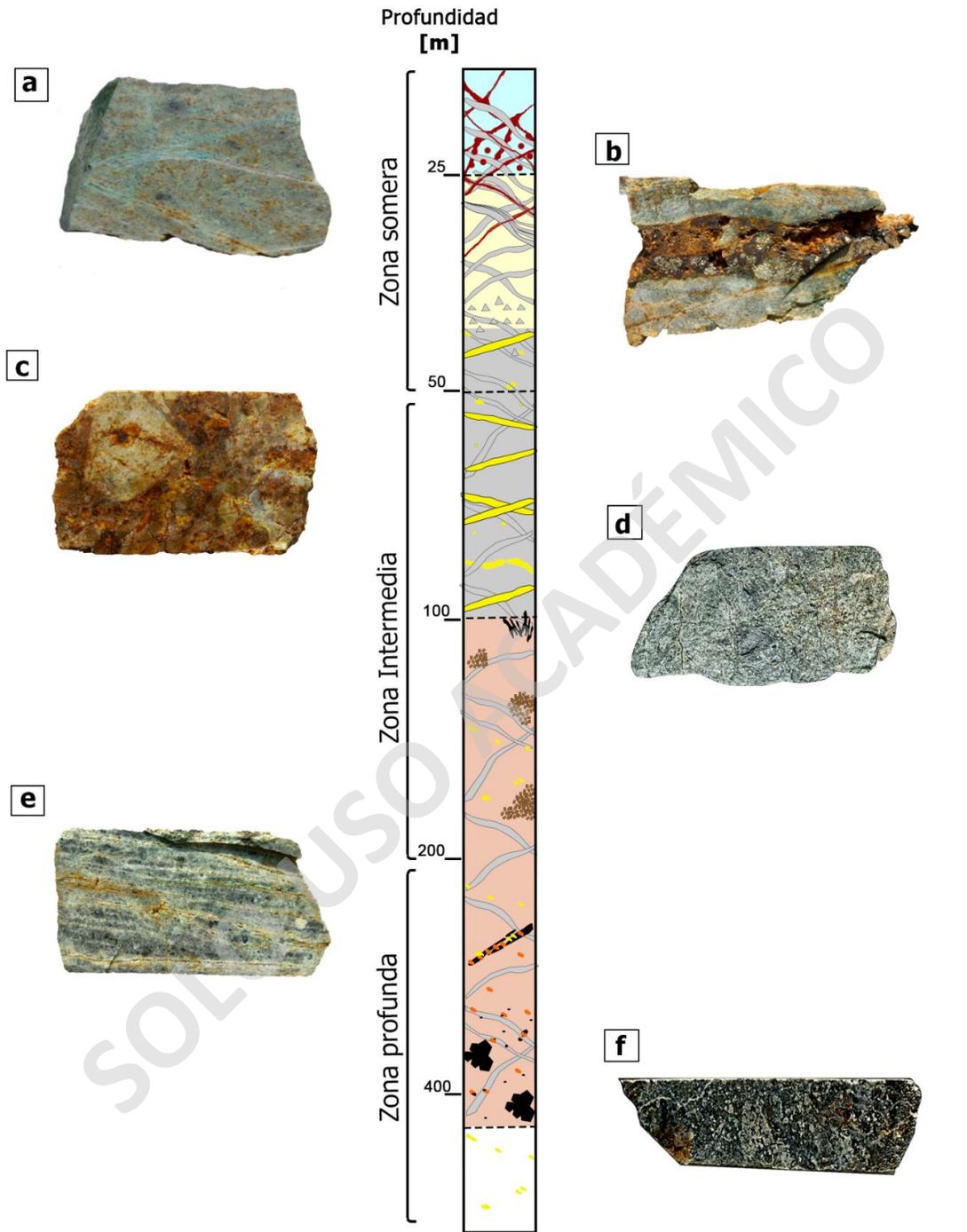
De acuerdo con la literatura, el oro puede precipitar en respuesta a diversos mecanismos geológicos, incluyendo enfriamiento, ebullición, oxidación, sulfidización, aumento del pH (neutralización ácida) y dilución con aguas meteóricas (Gammons y Williams-Jones, 1997; Williams-Jones et al., 2009). En general, la solubilidad del oro a temperaturas mayores a los  $350^\circ C$  (1 *kbar*) y fluidos ricos en potasio, está principalmente dominada por complejos clorurados ( $AuCl$ ) si los contenidos de  $H_2S$  son relativamente bajos (magnetita estable),

donde la solubilidad de oro decrece continuamente hasta los 300°C. En contraste, el oro puede transportarse como complejo sulfurado  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ , si los contenidos de  $\text{H}_2\text{S}$  son relativamente altos (pirita estable) (Gammons y Williams-Jones, 1997).

Considerando las leyes de Au y Cu de los testigos de sondajes (confidencial, SHM), las características de la alteración hidrotermal y mineralización, así como las observaciones de los geólogos del proyecto, en Cerro del Oro, el oro podría ocurrir asociado con la alteración sericitica, argílica moderada y/o alteración supérgena. Mientras que en el depósito La Colina (2), el oro podría estar asociado a la alteración potásica y/o a la alteración propilítica. Esto denota diferentes condiciones físico-químicas de precipitación de oro (temperatura y pH), y posiblemente la formación de distintos tipos de complejos y ligantes, por ejemplo  $\text{HS}^-$  y  $\text{Cl}^-$  (Williams-Jones et al., 2009).

Para el caso de Cerro del Oro, es posible que zonas de alteración sericitica (300-400°C, pH=5-6) y/o argílica moderada (150-300°C, pH=4-5) tengan asociadas concentraciones significativas de oro (Sillitoe, 2010). Asimismo, la asociación de oro-goethita es muy común en depósitos supérgenos de oro, en donde este metal puede ser remobilizado y enriquecido en la zona de *gossan* como micropartículas de oro (Sillitoe, 2000; 2010). Si bien, en el sector de Cerro de Oro no se observa esta zona como tal, probablemente debido a la erosión, el depósito se encuentra fuertemente alterado por un evento supérgeno, con abundante goethita.

Para el caso de La Colina (2), es posible que los contenidos de oro se encuentren asociado a la mineralización de cobre y a la alteración potásica (350-550°C, pH≈7). Una relación estrecha entre altas concentraciones de oro, mineralización hipógena de cobre y alteración potásica de alta temperatura es ampliamente aceptada (por ejemplo, Sillitoe, 1989 y 2000; Ulrich & Heinrich, 2001; Perelló et al., 2004). Por otro lado, hay estudios que indican que el oro puede precipitar de soluciones acuosas subsaturadas al incorporarse como trazas de impurezas en otras fases, en particular, sulfuros de Cu-Fe, por ejemplo, bornita, calcopirita (Gammons y Williams-Jones, 1997; Williams-Jones et al., 2009; Tosdal et al., 2009).



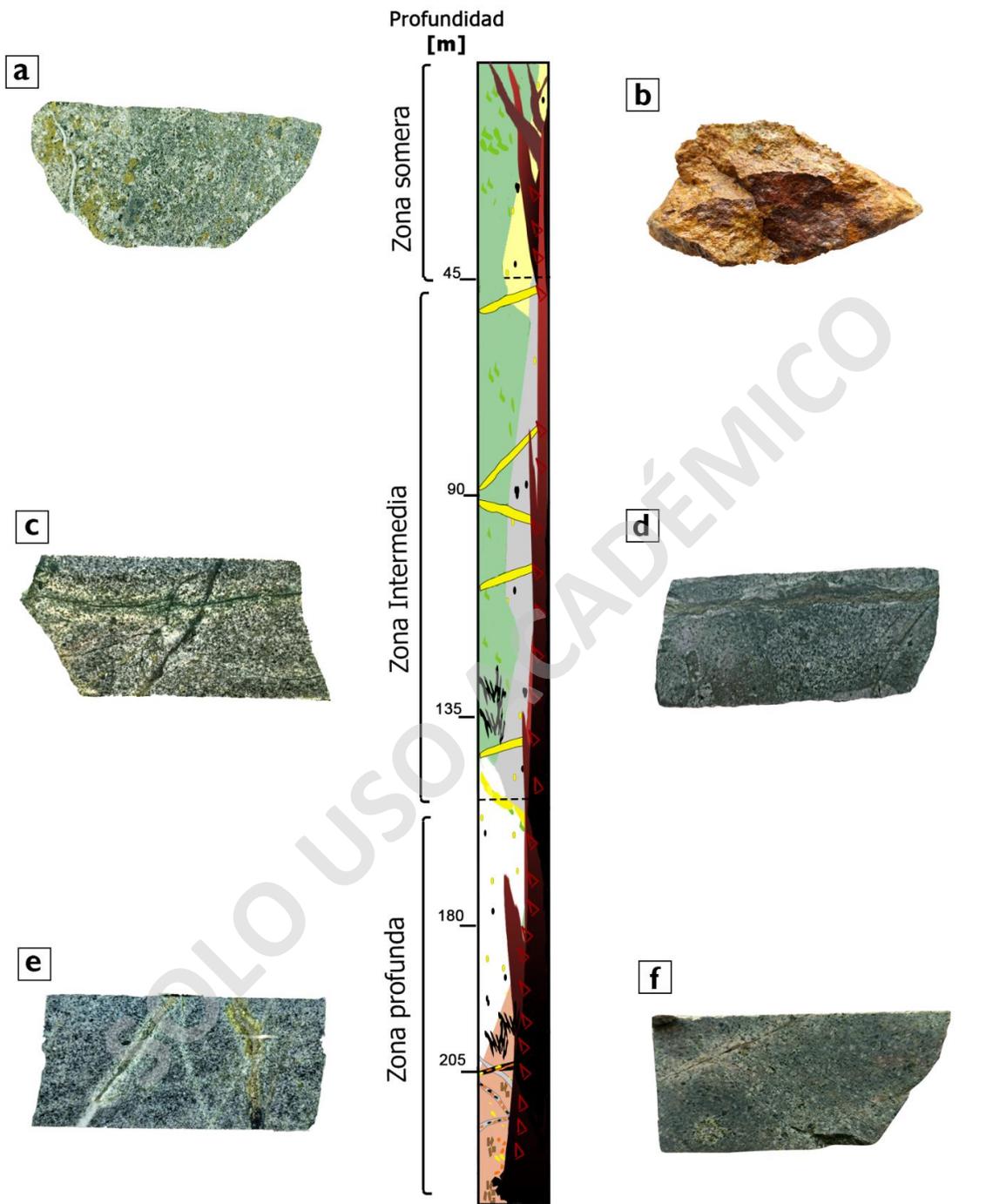
- |                    |   |  |             |
|--------------------|---|--|-------------|
| Diorita            | Alteración potásica (bt+cuarzo+ fd-k+ mgt)    | Alteración argílica moderada (arcillas±alunita±ser±hm)     | Hematita    |
| Andesita           | Alteración sericítica (ser+cuarzo+py±clorita) | Alteración supérgena (óxidos/hidróxidos/sulfatos de Cu-Fe) | Pirita      |
| Brecha hidrotermal | Alteración sódica (albita)                    | Biotita + clorita  | Calcopirita |
| Vetilla de cuarzo  |   |  | Magnetita   |

**Figura 48.** Representación esquemática simplificada de un testigo de sondaje a partir de la descripción de secciones transparentes-pulidas realizadas en los testigos de sondajes DDHLLA030 y DDHLLA20 del sector Cerro del Oro. (a) Diorita con alteración supérgena dominante. (b) Diorita de biotita con vetilla de pirita producto de la alteración sericítica, alterada posteriormente a arcillas y hematita producto alteración argílica moderada; además la roca es posteriormente silificada y lixiviada producto de la alteración supérgena (goethita y jarosita). (c) Brecha hidrotermal con alteración sericítica, argílica moderada y supérgena. (d) Diorita con alteración sericítica. (e) Diorita con alteración potásica dominante. (f) Diorita alteración sódica con superposición de alteración potásica con pirita en vetillas y cúmulos.

Además, esta asociación mineralógica ha sido reportada con anterioridad a partir de experimentos (Candela, 1997) que muestran que el oro entra a la estructura del cobre como solución sólida pero subsecuentemente se exsuelve al enfriarse para formar intercrecimientos de oro nativo y calcopirita. De acuerdo con los resultados obtenidos de una descripción petrográfica realizada por la empresa *SHM*, se observó oro diseminado ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ) en una briqueta con fragmentos de roca principalmente del tipo intrusiva. En el fragmento de roca descrito también se encontró magnetita y pirita, las cuales se podrían correlacionar con el evento potásico (Informe petrográfico realizado para *SHM*, 2022).

Sin embargo, para el caso de La Colina (2), es posible que parte de la mineralización de oro haya precipitado durante la alteración propilítica ( $200\text{-}300^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH}\approx 7$ ), junto con sulfuros como pirita y esfalerita, y en menor medida calcopirita. Esto se sugiere por las observaciones de los geólogos de la mina, en donde se distingue una correlación entre las leyes de Cu, Au y la ocurrencia de la alteración propilítica.

Esta asociación entre la mineralización de oro y alteración propilítica ha sido anteriormente reportada en algunos pórfidos de Au-Cu de la Franja de Maricunga del norte de Chile (Palma, 2014). En los depósitos Luciano, Luciano Norte y Úrsula se ha descrito una zonación vertical de la alteración hidrotermal, mineralización sulfurada y asociación mineralógica del oro, relacionada a una alteración potásica (alta temperatura) y propilítica (baja temperatura). Los resultados obtenidos mediante análisis QEMSCAN arrojan dos asociaciones mineralógicas principales para el oro: bornita y calcopirita (alteración potásica) y esfalerita (alteración propilítica).



- |                   |  |   |             |
|-------------------|--|---|-------------|
| Diorita/Andesita  | Alteración potásica (bt+qz+ fd-k+ mg)            | Alteración sericítica (ser+qz+cl+py)    | Magnetita   |
| Brecha            | Alteración sódica (albita)                       | Alteración argílica (arcillas±hematita) | Hematita    |
| Goethita/Jarosita | Alteración propilítica (al+ep+cl+carbonatos+esf) | Biotita                                 | Pirita      |
| Vetilla de cuarzo |  | Epidota                                 | Calcopirita |
|                   |  | Mushketovita                            |             |

**Figura 49.** Representación esquemática simplificada de un testigo de sondaje a partir de la descripción de secciones transparentes-pulidas realizadas en los testigos de sondajes CLRD004, CLRD007, CLRD011, CLRD012, CLRD015, CLRD019 del sector La Colina (2). (a) Diorita con alteración propilítica con parches de epidota. (b) Diorita con alteración argílica moderada y supérgena (goethita, hematita, jarosita). (c) Diorita con alteración propilítica con vetillas de clorita y albita. (d) Diorita con alteración sericítica y vetilla de piritita con halo de cuarzo-sericita. (e) Diorita con alteración potásica-propilítica con vetillas de cuarzo-magnetita-calcopirita, junto a vetilla de calcopirita, esfalerita, epidota. (f) Diorita con alteración sódica con vetillas y parches de albita.

Finalmente, debido a que no fue posible observar oro mediante microscopio electrónico de barrido electrónico (SEM), se sugiere la realización de otros análisis microscópicos en los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2). En particular, la técnica QEMSCAN, ampliamente utilizada en minería y metalurgia, presenta tres modos de operación: BMA (*Bulk Mineral Analysis*), PMA (*Particle Mapping Analysis*) y FS (*Field Scan*). El modo de operación PMA presenta tres alternativas de medición dependiendo del objetivo del estudio a desarrollar, estos son: PMA (*Particle Mapping Analysis*), SMS (*Specific Mineral Search*) y TMS (*Trace Mineral Search*). En particular, este último se utiliza para estudiar la mineralogía del oro a escala de micrones.

El modo de operación TMS (análisis de minerales específicos o trazas) es una técnica especial de medición que aumenta la probabilidad de encontrar elementos en proporciones muy bajas (<0.5% volumen). Este se utiliza solamente cuando la fase de interés está presente a nivel de traza en la muestra, como por ejemplo el oro. Las imágenes obtenidas del análisis TMS proveen información sobre las relaciones espaciales de los minerales, incluyendo datos de liberación, asociación mineralógica y proporcionan una representación visual de las texturas de los minerales (oro libre versus oro ocluido).

### **5.5 Clasificación metalogénica de los depósitos en estudio**

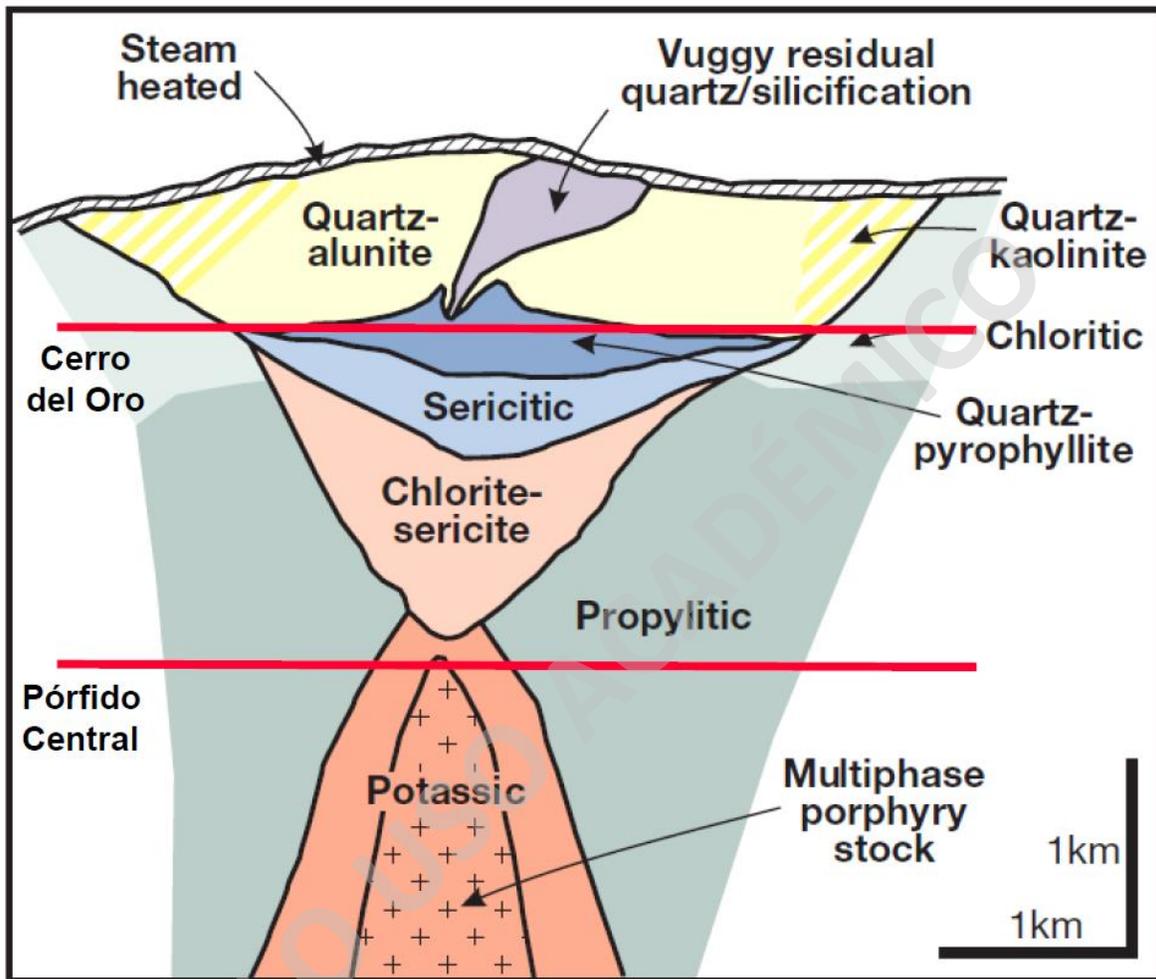
Basándose en los nuevos datos mineralógicos en este estudio, se concluye que los eventos de alteración hidrotermal y mineralización que dieron origen a los depósitos Cerro del Oro y La Colina 2 son similares, es decir, alteración sódica, potásica, propilítica, sericítica, argílica moderada y supérgena (**Figura 46; Figura 47**). Sin embargo, se identifican algunas diferencias claves con relación a la alteración hidrotermal (distribución en profundidad y alteraciones dominantes), estilos de mineralización (dominio de vetillas de cuarzo, vetas y

brechas de magnetita), contenido y ocurrencia de algunas fases minerales (por ejemplo, magnetita, mushketovita, sericita, entre otros) (**Figura 48; Figura 49**), que permiten clasificar los depósitos minerales en estudio de una forma u otra.

El Distrito Llahuín corresponde a un cluster de pórfidos Cu-(Au-Mo) (**Figura 50; Figura 51**) de edad Cretácica ( $88.1 \pm 1.1$  Ma; López, 2012), que incluye los depósitos Pórfido Central Llahuín, Cerro del Oro y Ferrocarril. Los procesos de alteración hidrotermal y mineralización están relacionados principalmente con intrusiones porfídicas dioríticas. En particular, las zonas de mineralización en Cerro del Oro son relativamente ricas en Au (en promedio  $\sim 0.2$  g/t de Au; Informe Técnico de SHM Limited, 2012) y pobres en Cu (en promedio  $\sim 0.2\%$  Cu; Informe Técnico de SHM Limited, 2012) y Mo; en comparación con el Pórfido Central Llahuín ( $\sim 0.1$ g/t Au y  $\sim 0.3\%$  Cu; Informe Técnico de SHM Limited, 2012). En el cluster de pórfidos Llahuín, se reconoce un fuerte control estructural dado por estructuras de rumbo de orientación preferentemente NS (**Figura 13**; líneas rojas), generando en ocasiones stockworks y en otras ocasiones sheeted veins (vetillas subparalelas).

En Cerro del Oro, se ha establecido una zonación vertical de la alteración hidrotermal y mineralización sulfurada hipógena (**Figura 48**). Una zona profunda potásica, con un predominio de vetillas de cuarzo con calcopirita-pirita. Una zona superior sericítica, con preponderancia de vetillas de cuarzo-sericita-pirita y alteración argílica. Las diferencias en la alteración hidrotermal y mineralización entre los depósitos Cerro del Oro y el Pórfido Central Llahuín, indican que estos representarían distintos niveles de erosión o exhumación (**Figura 50**). De esta forma, el Pórfido Central Llahuín sería el cuerpo mineralizado más erodado o exhumado (alteración potásica dominante con mayores contenidos de Cu-Mo), seguido de Cerro del Oro caracterizado por una alteración potásica, una fuerte sobreimposición de alteración sericítica y argílica moderada y más tarde un evento supérgeno (**Figura 50**). En este contexto, el depósito Cerro del Oro podría corresponder a la “tapa” de un sistema tipo pórfido más profundo (SHM, 2013). De acuerdo con López et al. (2014), las variaciones en la alteración hidrotermal en el área de Llahuín se relacionan con las condiciones a las cuales están expuestos los cuerpos mineralizados, es decir, con la altura y exhumación del depósito. Específicamente, las zonas con alteración hidrolítica (cuarzo-

hematita-arcillas), se desarrollan/preservan mejor en niveles estratigráficos medios a altos (500 a 0 m de profundidad).

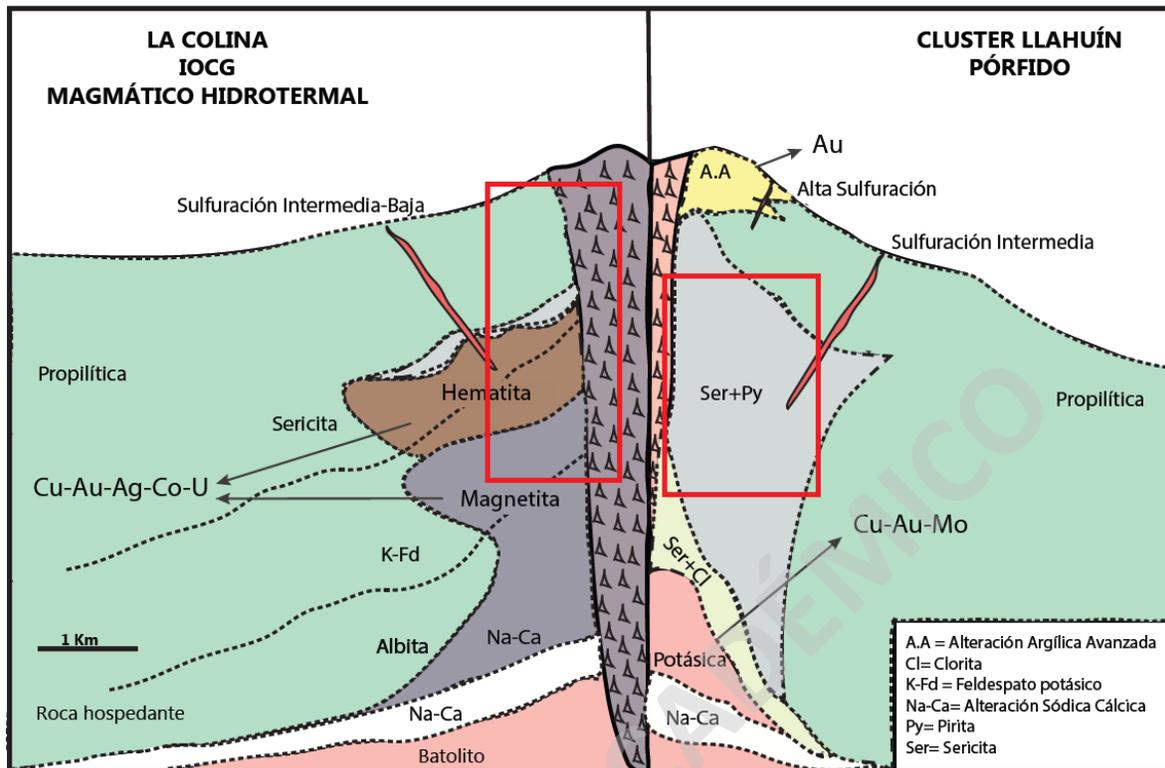


**Figura 50.** Zonación de alteración-mineralización hipógena para un sistema tipo pórfido Cu-Mo-Au. La línea roja indica la profundidad relativa de erosión o exhumación de los depósitos Pórfido Central Llahuín y Cerro del Oro dentro del cluster de pórfidos Llahuín. Modificado de Sillitoe (2010).

Recientemente, los geólogos del proyecto (comunicación oral) han reportado la ocurrencia de estilos de alteración hidrotermal y mineralización más afines a depósitos tipo IOCG-IOA en testigos de sondajes, con abundantes vetillas de actinolita-magnetita y magnetita masiva en profundidad. Por lo tanto, no se descarta de que el cluster de pórfidos Llahuín podría corresponder a sistema más bien “híbrido” o “transicional” entre IOCG y pórfido cuprífero (Richards et al., 2017). Esta observación es consistente con lo reportado en otros depósitos de la Cordillera de la Costa del norte de Chile. Por ejemplo, el Distrito Punta del Cobre fue

propuesto como un intermedio entre un sistema IOA y pórfido cuprífero (Marschik y Fontboté, 1996), mientras que el depósito El Tropezón fue descrito como un IOCG con características tipo pórfido (Tornos et al., 2010). Esta asociación entre estilos de mineralización IOCG y pórfido también se observa a escala distrital en el depósito Productora (Fox, 2000; Ray and Dick, 2002). Sin embargo, recientemente se propuso que el depósito Productora tiene mayores afinidades con mineralización tipo pórfido en vez de IOCG, evidenciado por una mineralogía dominada por turmalina, altos contenidos de Mo, bajos contenidos de magnetita (en comparación con los IOCG), asociaciones de alteración ácida (sericítica) con abundante presencia de sulfuros (Escolme et al. 2020).

Por otra parte, se concluye que el depósito La Colina (2) comparte características con los yacimientos tipo IOCG (**Figura 51**). En particular, este depósito presenta una abundante presencia de óxidos de hierro como magnetita, hematita y mushketovita con mineralización de calcopirita, pirita y Au asociada a cuerpos vetiformes y brechas magmáticas-hidrotermales con matriz de magnetita. Asimismo, de acuerdo con Richards y Mumin (2013b), a diferencia de los pórfidos Cu-(Au-Mo), las zonas de alteración hidrotermal de baja temperatura (<400°C) en los depósitos IOCG se caracterizan por la persistencia de condiciones de pH neutras a ligeramente ácidas, y raramente se desarrollan zonas importantes de alteración sericítica, argílica y/o argílica avanzada (**Figura 51**). Esto es consistente con lo que se observa en el depósito La Colina (2), en donde los procesos de alteración hidrotermal y mineralización se encuentran principalmente asociados a una alteración potásica y propilítica de pH neutro-alcalino. Sin embargo, es interesante notar que en el depósito La Colina (2) de igual forma se identifica una alteración sericítica (**Figura 47**), lo cual es consistente con lo observado en el depósito IOCG El Espino, uno de los pocos ejemplos en Chile donde ocurre mineralización tipo IOCG asociada a una alteración hidrolítica (cuarzo, calcita, sericita (illita, fengita), clorita, minerales de óxido de hierro (principalmente hematita), y sulfuros (calcopirita, pirita); con menor rutilo y turmalina) (**Figura 12**; López et al., 2014).



**Figura 51.** Modelo esquemático de alteración hidrotermal y mineralización IOCG (izquierda) y pórfido cuprífero (derecha). Modificado de Richards y Mumin (2013). Los rectángulos en rojo indican la ubicación aproximada del cluster de pórfidos Cu-(Au-Mo) Llahuín, donde se encuentra el depósito Cerro del Oro; y el depósito de afinidad IOCG La Colina (2), de acuerdo con las características de alteración y mineralización descritas en este estudio.

## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan nuevos antecedentes mineralógicos y texturales sobre los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2), ubicados en la franja metalogénica del Cretácico del norte de Chile. Estos depósitos minerales se caracterizan por contener mineralización de Cu-Au asociada principalmente a intrusivos dioríticos de la Superunidad Illapel y a rocas volcánicas de la Formación Arquero y Quebrada Marquesa.

Mediante estudios petro-calcográficos y microscopía electrónica de barrido (SEM), se definieron seis eventos de alteración hidrotermal/mineralización (Evento I al VI) que dieron lugar a la formación de los depósitos Cerro del Oro y La Colina (2). Estos eventos incluyen

las alteraciones sódica, potásica, propilítica, sericítica, argílicas moderada y un último evento de carácter supérgeno.

En el caso de Cerro del Oro, la mineralización de cobre (calcopirita) ocurre principalmente en vetillas de cuarzo y cuarzo-sericita junto con pirita, en forma de *stockworks* o *sheeted veins* asociados a las alteraciones potásica y sericítica. En el depósito La Colina (2) la mineralización de cobre (calcopirita), acompañada de contenidos variables de pirita, se encuentra asociada a brechas magmáticas-hidrotermales. Estas brechas se caracterizan por presentar clastos de composición andesíticos/dioríticos a granodioríticos y una matriz de magnetita. Asimismo, se reconocen afloramientos con cuerpos vetiformes de magnetita masiva con mineralización de calcopirita y pirita.

En este estudio no fue posible caracterizar la ocurrencia del oro, ya que no se observaron partículas de oro visibles (BSE), ni se identificaron contenidos de oro (EDS) mediante análisis de microscopio electrónico de barrido (SEM). Se sugiere la realización de otros tipos de análisis mineralógico, como el análisis QEMSCAN en modo de operación TMS, para estudiar la mineralogía del oro a escala de micrones y en concentraciones a nivel traza (<0.5% volumen).

En cuanto a la distribución vertical de la alteración hidrotermal y mineralización, se concluye que los depósitos Cerro del Oro y el Pórfido Central Llahuín, que conforman el cluster de pórfidos Cu-(Au-Mo) Llahuín, representarían distintos niveles de erosión o exhumación. El Pórfido Central Llahuín sería el cuerpo mineralizado más erodado o exhumado, consistente con una alteración potásica dominante y mayores contenidos de Cu-Mo en comparación con Cerro del Oro. Este último se caracteriza por una alteración potásica a la que se le sobreimpone una fuerte alteración sericítica, argílica moderada y supérgena.

Por otro lado, se concluye que el depósito La Colina (2) presenta características afines con yacimientos del tipo IOCG. El depósito exhibe una abundante presencia de óxidos de hierro como magnetita, hematita y mushketovita, con mineralización de calcopirita, pirita y Au asociada a cuerpos vetiformes y brechas magmáticas-hidrotermales con matriz de magnetita. Los procesos de alteración hidrotermal y mineralización se encuentran principalmente

asociados a una alteración potásica y propilítica de pH neutro-alcalino, sin el desarrollo de zonas significativas de alteración sericítica ni argílica.

SOLO USO ACADÉMICO

## Referencias

- Aguirre, L.; Egert, E. 1962. Las formaciones manganesíferas de la región Quebrada Marquesa, Provincia de Coquimbo. *Revista Minerale*s, No. 76, p. 25-37. Santiago.
- Aguirre, L. y Egert, E., 1965, Cuadrángulo Quebrada Marquesa provincia de Coquimbo, Carta Geológica de Chile, vol. 15, Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, 92 pp.
- Aguirre, L.; Egert, E. 1965. El contacto discordante entre las formaciones cretácicas Quebrada Marquesa y Viñita en la Provincia de Coquimbo. *Revista Minerale*s, No. 84, p. 30-37.
- Arndt, N.T., Fontboté, L., Hedenquist, J.W., Kesler, S.E., Thompson, J.F.H., y Wood, D.G. (2017) Future Global Mineral Resources: Geochemical Perspectives, v. 6, no. 1, p.1-171
- Arancibia G (2004) Mid-cretaceous crustal shortening: evidence from a regional-scale ductile shear zone in the coastal range of central Chile (32 degrees S). *J S Am Earth Sci* 17:209–226.
- Barton, P. B., & Bethke, P. M. (1987). Chalcopyrite disease in sphalerite; pathology and epidemiology. *American Mineralogist*, 72(5-6), 451-467.
- Barton, M. D., Johnson, D. A., & Porter, T. M. (2000). Alternative brine sources for Fe-oxide (-Cu-Au) systems: Implications for hydrothermal alteration and metals. *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*, 1, 43-60.
- Barra F., Reich M., Selby D., Rojas P., Simon A., Salazar E. y Palma G., 2017. Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: a Re – Os isotope approach. *Ore Geol. Rev.* 81, 62–78.
- Blunden, J., Hartfield, G., Arndt, D. S., DUNN, R., TYE, M., Blenkinsop, S., ... & JACOBS, S. (2018). State of the Climate in 2017. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(8), Si-S310.
- Camus, F. 2003. Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago de Chile, 267 p.
- Charrier, R., Pinto, L. y Rodríguez, M.P. (2007). Tectonostratigraphic evolutions of the Andean Orogen in Chile. In Moreno, T. y Gibbons W (eds) *The Geology of Chile*. Geological Society, London. 95, 21-114.
- Creixell, C., Fuentes, J., Bierma, H., & Salazar, E. (2015, October). Tectónica regional y metalogénesis asociada al emplazamiento de la franja de pórfidos cupríferos cretácicos del norte de Chile (28°–30° S). In *Sociedad Geológica de Chile, Congreso Geológico Chileno, XIV, La Serena, Chile*.
- Creixell, C., Fuentes, J., Bierma, H., & Salazar, E. (2020). Tectonic setting of Cretaceous porphyry copper deposits of northern Chile (28°-30° S) and its relations with magmatic evolution and metallogeny. *Andean Geology*, 47(3), 469-507.
- De Haller, A. y Fontboté, L. (2009). The Raúl-Condestable Iron Oxide Copper- Gold Deposit, Central Coast of Perú: Ore and related hydrothermal alteration, sulfur isotopes and thermodynamic constraints. *Economic Geology*. 104, 365-384.

- Del Real, I., Reich, M., Simon, A. C., Deditius, A., Barra, F., Rodríguez-Mustafa, M. A., ... & Roberts, M. P. (2023). Formation of giant iron oxide-copper-gold deposits by superimposed episodic hydrothermal pulses. *Scientific reports*, 13(1), 12041.
- Escolme, A., Berry, R., Hunt, J., Halley, S. y Potma, W. (2019). Predictive models of mineralogy from Whole-Rock Assay Data: Case study from the Productora Cu-Au-Mo deposits, Chile. *Economic Geology*, 144, 1513-1542.
- Escolme, A., Cooke, D. R., Hunt, J., Berry, R. F., Maas, R., & Creaser, R. A. (2020). The Productora Cu-Au-Mo Deposit, Chile: A Mesozoic magmatic-hydrothermal breccia complex with both porphyry and iron oxide Cu-Au affinities. *Economic Geology*, 115(3), 543-580.
- Fox, K. A. (2000). Fe-Oxide (Cu-U-Au-REE) mineralization and alteration at the Productora prospect. *2000-2009-Mines Theses & Dissertations*.
- Gammons, C. H., & Williams-Jones, A. E. (1997). Chemical mobility of gold in the porphyry-epithermal environment. *Economic Geology*, 92(1), 45-59.
- Garwin, S. (2002). The geologic setting of intrusion-related hydrothermal systems near the Batu Hijau porphyry copper-gold deposit, Sumbawa, Indonesia.
- Groves, D. I., Bierlein, F. P., Meinert, L. D., & Hitzman, M. W. (2010). Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*, 105(3), 641-654.
- Hough, R. M., Butt, C. R., & Fischer-Bühner, J. (2009). The crystallography, metallography and composition of gold. *Elements*, 5(5), 297-302.
- Jaillard, E. (1992). La fase peruana (Cretáceo Superior) en la margen peruana. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 83, 81-87.
- Jaillard, E., & Soler, P. (1996). Cretaceous to early Paleogene tectonic evolution of the northern Central Andes (0–18 S) and its relations to geodynamics. *Tectonophysics*, 259(1-3), 41-53.
- Kesler, S. E., Chryssoulis, S. L., & Simon, G. (2002). Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate. *Ore Geology Reviews*, 21(1-2), 103-124.
- Maksaev, V. (2001). Reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina. *Santiago*, 63.
- Marschik, R., Singer, B. S., Munizaga, F., Tassinari, C. C. G., & Fontbote, L. (1996). Age of Cu (-Fe) mineralization and Cretaceous to Palocene thermal evolution of the Punta del Cobre district, northern Chile. *Anais*, 7, 306-309.
- Marschik, R. y Fontboté, L., (2001b). The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au (-Zn-Ag) deposits, Chile. *Econ Geol.* 96, 1799–1826.
- Mineral Resource Estimate - Llahuin Copper Project, Coquimbo Region, Chile. NI 43-101 Technical Report. On Behalf of – Southern Hemisphere Mining Limited Effective Date – 10th September 2012.

- Morata, D. y Aguirre, L. (2003). Extensional Lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29°20'-30°S), Chile: geochemistry and petrogenesis. *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 459-476.
- Morata, D., Féraud, G., Schärer, U., Aguirre, L., Belmar, M., Cosca, M., 2006. A new geochronological framework for Lower Cretaceous magmatism in the Coastal Range of central Chile. 11° Congreso Geológico Chileno, Agosto 2006, Antofagasta (Chile), vol. 2, 509-512.
- Mumin, A. H. (2010). The IOCG-porphyry-epithermal continuum of deposit types in the Great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada. *Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues*, 59-78.
- Mpodozis, C., & Ramos, V. A. (2008). Tectónica jurásica en Argentina y Chile: extensión, subducción oblicua, rifting, deriva y colisiones? *Revista de la Asociación geológica Argentina*, 63(4), 481-497.
- López G. (2012) The El Espino iron oxide copper gold (IOCG) district, Coastal Cordillera of North-Central Chile, PhD thesis, Colorado School of Mines, 120 p.
- Lopez, G. P., Hitzman, M. W., & Nelson, E. P. (2014). Alteration patterns and structural controls of the El Espino IOCG mining district, Chile. *Mineralium Deposita*, 49(2), 235-259.
- Oyarzún, R., Oyarzún, J., Ménard, J.J., y Lillo, J. (2003). The Cretaceous iron belt of northern Chile: Role of oceanic plates, a superplume event, and a major shear zone: *Mineralium Deposita*. 38, 640-646.
- Palma, G (2014). Caracterización de la litología, alteración y mineralización del *Cluster* de Pórfidos Luciano, Distrito minero Casale, III Región de Atacama, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias, Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología.
- Parada, M.A., Nyström, J.O., Levi, B., 1999. Multiple sources for the Coastal Batholith of central Chile (31-34° S): geochemical and Sr/Nd isotopic evidence and tectonic implications. *Lithos*, vol. 46, 505-521.
- Parada, M.A., Féraud, G., Fuentes, F., Aguirre, L., Morata, D., Larrondo, P., 2005, Ages and cooling history of the Early Cretaceous Caleu pluton: testimony of a switch from a rifted to a compressional continental margin in central Chile. *Journal of the Geological Society*, v. 162, issue 2, p. 273-287.
- Park, J. W., Campbell, I. H., Chiaradia, M., Hao, H., & Lee, C. T. (2021). Crustal magmatic controls on the formation of porphyry copper deposits. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(8), 542-557.
- Perelló, J., Brockway, H., & Martini, R. 2004b. Discovery and geology of the Esperanza porphyry copper-gold deposit, Antofagasta Region, northern Chile: Society of Economic Geologists Special Publication 11, p. 167-186.
- Porter, T. M. (2010). Current understanding of iron oxide associated-alkali altered mineralised systems: Part I—an overview. *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: a global perspective*, 3, 5-32.
- Ramos, V. A. (2009). Anatomy and global context of the Andes: Main geologic features and the Andean orogenic cycle. *Backbone of the Americas: Shallow subduction, plateau uplift, and ridge and terrane collision*, 204, 31-65.

Ramos, V. A. (2010). The tectonic regime along the Andes: Present-day and Mesozoic regimes. *Geological Journal*, 45(1), 2-25.

Ray, G. E., Dick, L. A., & Porter, T. M. (2002). The Productora prospect in north-central Chile: An example of an intrusion-related Candelaria type Fe-Cu-Au hydrothermal system. *Porter GeoConsultancy Publishing, Adelaide*, 2, 131-151.

Real Contreras, I. D. (2011). Geología y Estructura del Distrito Minero El Espino, Comuna de Illapel, Chile.

Richards, J. P., & Mumin, A. H. (2013a). Lithospheric fertilization and mineralization by arc magmas: Genetic links and secular differences between porphyry copper±molybdenum±gold and magmatic-hydrothermal iron oxide copper-gold deposits.

Richards, J. P., & Mumin, A. H. (2013b). Magmatic-hydrothermal processes within an evolving Earth: Iron oxide-copper-gold and porphyry Cu±Mo±Au deposits. *Geology*, 41(7), 767-770.

Richards, J. P., López, G. P., Zhu, J. J., Creaser, R. A., Locock, A. J., & Mumin, A. H. (2017). Contrasting tectonic settings and sulfur contents of magmas associated with Cretaceous porphyry Cu±Mo±Au and intrusion-related iron oxide Cu-Au deposits in northern Chile. *Economic Geology*, 112(2), 295-318.

Rieger, A., Marschik, R., Díaz, M., Hölzl, S., Chiaradia, M., Akker, B. y Spangenberg, J., (2010). The hypogene iron oxide copper-gold mineralization in the Mantoverde district. North Chile. *Economic Geology*. 105, 1271–1299.

Rivano, S., Sepúlveda, P. 1991. Hoja Illapel. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 69, 132 p., 1 mapa escala 1:250.000.

Rivano, S., Sepúlveda, P., Hervé, M., Puig, A., 1985. Geocronología K/Ar de las rocas intrusivas entre los 31°-32°S, latitud sur, Chile. *Revista Geológica de Chile*, No. 24, p. 63-74.

Rosales, G. (1988). Geología del área Combarbalá-San Lorenzo (31°00'-31°15'S). Región de Coquimbo. Memoria de título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 132 p.

Scheuber, E., & Gonzalez, G. (1999). Tectonics of the Jurassic-Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22–26 S): A story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics*, 18(5), 895-910.

Sellés, D., Gana, P., 2001. Geología del área Talagante-San Francisco de Mostazal: Regiones Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins, Escala 1:100.000. SERNAGEOMIN, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N°74.

Seward, T. M. (1973). Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(3), 379-399.

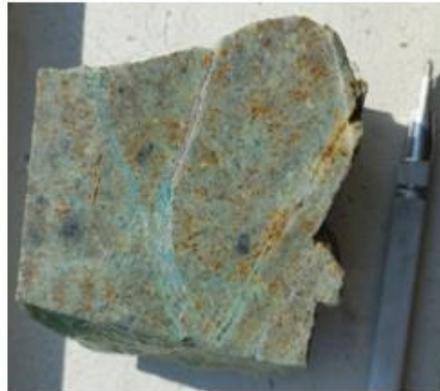
Southern Hemisphere Mining Limited (30th June 2013) Mineral Resource Estimate - Llahuin Copper-Gold Project, Coquimbo Region, Chile. NI 43-101 Technical Report On Behalf of SHM Limited.

Southern Hemisphere Mining Limited (10th September 2012) Mineral Resource Estimate - Llahuin Copper Project, Coquimbo Region, Chile. NI 43-101 Technical Report On Behalf of SHM Limited.

- Sillitoe, R. 1989. Gold deposits in western Pacific island arcs: The magmatic connection, in Keays, R. R., Ramsay, W. R. H., & Groves, D. I., eds. *The geology of gold deposits: The perspective in 1988: Economic Geology*, v. 84, p. 1805-1816.
- Sillitoe, R. H. (2000). Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. *Reviews in Economic Geology*, 13, 315-345.
- Sillitoe, R. H. (2003) Iron oxide–copper–gold deposits: an Andean view. *Miner Deposita* 38:787–812.
- Sillitoe, R. H., & Perelló, J. (2005). Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic geology*, 105(1), 3-41.
- Somarin, A.K., and Mumin, A.H., 2013, P-T-composition and evolution of paleofluids in the Paleoproterozoic Mag Hill IOCG system, Contact Lake Belt, Northwest Territories, Canada: *Mineralium Deposita*, in press.
- Skirrow, R. G. (2010). Hematite-group. *IOCG+ U ore systems: Tectonic settings, hydrothermal characteristics, and Cu-Au and U mineralizing processes: Geological Association of Canada Short Course Notes*, 20, 39-59.
- Stefánsson, A., & Seward, T. M. (2004). Gold (I) complexing in aqueous sulphide solutions to 500 C at 500 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20), 4121-4143.
- Tosdal, R. M., Dilles, J. H., & Cooke, D. R. (2009). From source to sinks in auriferous magmatic-hydrothermal porphyry and epithermal deposits. *Elements*, 5(5), 289-295.
- Tornos, F., Velasco, F., Barra, F. y Morata, D. (2010). The Tropezón Cu–Mo–(Au) deposit, Northern Chile: the missing link between IOCG and porphyry copper systems? *Miner deposita*. 321, 1-9.
- Vergara M, Levi B, Nystrom J, Cancino A. (1995) Jurassic and Early Cretaceous Island arc volcanism, extension and subsidence in the coast range of Central Chile. 107:1427–1440.
- Wall, R.; Sellés, D.; Gana, P. 1999. Área Tiltill-Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, No.11.
- Watari, T., Nansai, K., & Nakajima, K. (2021). Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105107.
- Williams, P. J., Barton, M. D., Johnson, D. A., Fontboté, L., De Haller, A., Mark, G., & Marschik, R. (2005). Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin.
- Williams-Jones, A. E., Bowell, R. J., & Migdisov, A. A. (2009). Gold in solution. *Elements*, 5(5), 281-287.
- Williams, P. J., Kendrick, M. A., & Xavier, R. P. (2010). Sources of ore fluid components in IOCG deposits. PGC Publishing.

## ANEXOS

	Código Muestra	Cor-01		
	Sondaje	DDHLLA030	Desde-Hasta (m)	36,87 37,00
	Roca Primaria	Texturas	Alteración pervasiva. Holocristalina; grano fino a medio (~1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica; Pórfido.	
Minerales (5%)		plg (55%) cristales (y fenocristales) euhedrales a subhedrales con textura seriada de 0.3-0.8-1.5 mm, qz (30%) cxs recristalizados de 0.1 mm, fd-k (4%) cxs subhedrales de hasta 0.3 mm intercrecidos entre plagioclasas alterados a sericita, bt (10%) cristales subhedrales con textura seriada de 0.1- 0.3 hasta 0.8 mm y en cúmulos		
Nombre protolito		Diorita de biotita		
Alteración y Mineralización	Infill (40%)	Forma	vetillas	
		Texturas	Stockwork con vetillas de qz-hm-oxidados de cobre. Boxwork de pirita reemplazada por hematita.	
		Minerales	qz, py, hm, ght, crisocola, atacamita y malaquita, silicatos de Fe-Mg-Mn (posiblemente neotocita), sulfatos de hierro (jarosita)	
		Orden depositación	vetillas de de qz-py (alteració potásica) - Mineralogía supérgena con oxidados de cobre (crisocola, atacamita y malaquita), óxidos e hidróxidos de hierro (hematita y goethita), silicatos de Fe-Mg-Mn (posiblemente neotocita), sulfatos de hierro (jarosita), junto con la formación de arcillas.	
	Reemplazo	Textura (Intensidad /Distribución)	Selectiva en máficos por biotita secundaria, py-hm, intensa alteración en plg y fd en arcillas	
		Mxs	bt-qz-py-hematita-goethita	
		Alteración / Asociación mxl	Textura potásica de fondo con cúmulos de biotita siendo alterados por clorita y hm-py.	
	Secuencia de Eventos	Alteración potásica de fondo - Alteración supérgena.		
	Mxs de alteración (85%)			
	Mineralización (10%)			



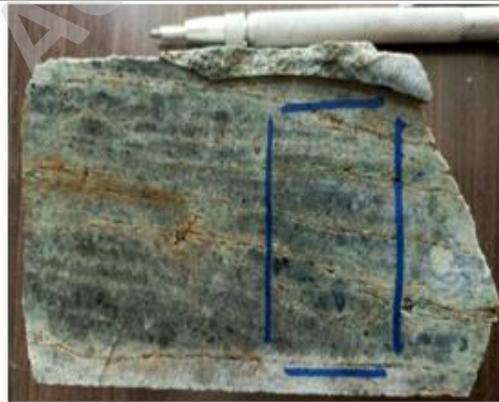
Anexo 1. Descripción microscópica de la muestra COR-01.

	Código Muestra	Cor-02		
	Sondaje	DDHLLA030	Desde-Hasta (m)	30 30,11
	Roca Primaria	Texturas	Alteración pervasiva. Holocristalina; grano fino a medio (~1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica; Pórfido.	
Minerales (5%)		plg (75%) cristales (y fenocristales) euhedrales a subhedrales con textura seriada de 0.3-0.8-1.5 mm, qz (10%) cxs recristalizados de 0.1 mm, fd-k (4%) cxs subhedrales de hasta 0.3 mm intercrecidos entre plagioclasas alterados a sericita, bt (10%) cristales subhedrales con textura seriada de 0.1- 0.3 hasta 0.8 mm y en cúmulos alterados a clorita.		
Nombre protolito		Brecha-Stockwork con clastos de Diorita de biotita		
Alteración y Mineralización	Infill (50%)	Forma	vetillas	
		Texturas	Stockwork con vetillas de qz-py-hm.	
		Minerales	py, qz, hematita, goethita, jarosita	
		Orden depositación	vetillas de de qz-py (alteración sericitica), vetillas de qz-hm-goethita (alteración supérgena)	
	Reemplazo	Textura (Intensidad /Distribución)	selectiva en máficos por bt secundaria, plagioclasas y fd-K por ser y arcillas ep y fd-k por ser. Boxwork de py alterados a hm.	
		Mxs	bt, py, hm, gth, ser, qz, arcillas	
		Alteración / Asociación mxl	alteración potásica - alteración sericitica - alteración argilica moderada - alteración supérgena	
	Secuencia de Eventos		Alteración potásica - Asociación sericita/chlo/py - Alteración argilica moderada- alteración supérgena	
	Mxs de alteración (75%)			
	Mineralización (20%)			



Anexo 2. Descripción microscópica de la muestra COR-02.

	<b>Código Muestra</b>	Cor-03		
	<b>Sondaje</b>	DDHLLA030	<b>Desde-Hasta (m)</b>	29,05    29,11
	<b>Roca Primaria</b>	Texturas	Alteración moderadamente pervasiva. Holocristalina; grano fino a medio (~1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica; Pórfido.	
Minerales (25%)		plg (15%) cristales euhedrales a subhedrales zonadas y con textura seriada de 0.3-0.8-1.5 mm, qz (60%) cxs recristalizados de 0.1 mm, fd-k (5%) cxs subhedrales de hasta 0.3 mm intercrecidos entre plagioclasas, bt (15%) cristales subhedrales y en cúmulos con textura seriada de 0.05- 0.1- 0.3 hasta 0.5 mm		
Nombre protólito		Diorita de biotita		
<b>Alteración y Mineralización</b>	<b>Infill</b>	Forma	vetillas	
		Texturas	Stockwork con vetillas de qz-hm.	
		Minerales	qz, py, hematita, goethita	
		Orden depositación	vetillas de qz-py alteración potásica- vetillas de de qz-hematita-goethita (evento supérgeno)	
	<b>Reemplazo</b>	Textura (Intensidad /Distribución)	selectiva en máficos por biotitas secundarias, plagioclasas y fd-k por sericita y arcillas. Boxwork de py.	
		Mxs	bt, qz, py, hm	
		Alteración / Asociación mxl	cúmulos de biotita (alteración potásica). Boxwork de pirita reemplazada por hematita (alteración supérgena).	
	<b>Secuencia de Eventos</b>		Alteración potásica de fondo - Asociación sericita/chlo/py - Alteración supérgena	
	Mxs de alteración (65%)			
	Mineralización (10%)			



**Anexo 3.** Descripción microscópica de la muestra COR-03.

	Código Muestra	Cor-04			
	Sondaje	DDHLLA030	Desde-Hasta (m)	44,86 44,96	
Roca Primaria	Texturas	Alteración pervasiva y destructiva. Protolito casi completamente obliterado. Holocristalina; grano fino a medio (~1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica.			
	Minerales (1%)	plg (40%) pseudomorfos de cristales subhedrales de hasta 1 mm, qz (50%) cxs recristalizados de hasta 1mm, fd-k (2%) pseudomorfos subhedrales de hasta 0.4 mm, bt (8%) de 0.5-0.3 mm alterados a óxidos de fe.			
	Nombre protolito	Brecha hidrotermal polimictica			
Alteración y Mineralización	Forma	vetillas, matriz de brecha.			
	Texturas	Stockwork con vetillas de qz-hm-ght			
	Minerales	qz-hm-ght			
	Orden deposición	vetillas de de qz-py (alteración sericitica)-hematita-goethita (evento supérgeno)			
	Reemplazo	Textura (Intensidad /Distribución)	textura obliterada en la roca, selectiva en plagioclasa y fd; por sericita, arcillas, alunita, además presenta pseudomorfos de py reemplazados por hematita y goethita.		
		Mxs	arcillas, alunita, cuarzo, hematita		
		Alteración / Asociación mxl	Alteración sericitica (cuarzo-sericita-py) - alteración argilica moderada (arcillas-hematita-alunita) - alteración supérgena (cuarzo-hematita-goethita)		
	Secuencia de Eventos	Alteración sericitica (cuarzo-sericita-py) - alteración argilica moderada (arcillas-hematita-alunita) - alteración supérgena (cuarzo-hematita-goethita)			
	Mxs de alteración (90%)				
	Mineralización (1%)				



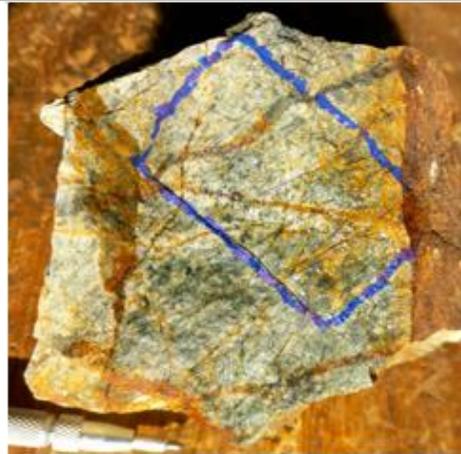
Anexo 4. Descripción microscópica de la muestra COR-04.

	<b>Código Muestra</b>	Cor-05		
	<b>Sondaje</b>	DDHLLA020	<b>Desde-Hasta (m)</b>	486,55    486,68
<b>Roca Primaria</b>	<b>Texturas</b>	Alteración pervasiva. Holocristalina; grano fino a medio (~1 mm); Inequigranular; Pórfirica.		
	<b>Minerales (4%)</b>	plg (50%) pseudomorfos de cristales subhedrales de hasta 1 mm, qz (40%) cxs recristalizados de hasta 1mm, fd-k (2%) pseudomorfos subhedrales de hasta 0.4 mm, bt (8%) de 0.5-0.3 mm alterados a óxidos de fe.		
	<b>Nombre protolito</b>	Diorita de biotita		
<b>Alteración y Mineralización</b>	<b>Infill (60%)</b>	<b>Forma</b>	vetillas	
		<b>Texturas</b>	vetillas py-qz-ser	
		<b>Minerales</b>	pirita, qz, sericita.	
		<b>Orden depositación</b>	vetillas de de albita (alteración sódica)- vetillas de qz-py (alteración sericitica)	
	<b>Reemplazo</b>	<b>Textura (Intensidad /Distribución)</b>	selectiva en plagioclasa y fd por sericita, micas blancas y arcillas	
		<b>Mxs</b>	albita-cuarzo-sericita-	
		<b>Alteración / Asociación mxl</b>	Albitización- Alteración cuarzo-sericita	
	<b>Secuencia de Eventos</b>		Albitización- evento sericitico	
	<b>Mxs de alteración (80%)</b>			
	<b>Mineralización (16%)</b>			



Anexo 5. Descripción microscópica de la muestra COR-05.

	Código Muestra	Cor-06			
	Tipo Muestra	Roca-dique	Coordenadas	N - 6530725 E - 307125	
	Roca Primaria	Texturas	Alteración pervasiva y medianamente destructiva. Holocristalina; grano fino a medio (~1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica; Pórfido.		
		Minerales (25%)	Pseudomorfos de plagioclasas reemplazados por fd-k y qz recristalizados de hasta 1.5 mm. Biotitas en cúmulos recristalizadas de 0.5 hasta 1 mm.		
Nombre protolito		Andesita de bt			
Alteración y Mineralización	Infill	Forma	vetillas.		
		Texturas	Stockwork con vetillas de qz-py-hm		
		Minerales	qz, py, hm		
		Orden depositación	vetillas de de qz-py (alteración sericitica) - vetillas de qz-hm-ght (evento supérgeno)		
	Reemplazo	Textura (Intensidad/ Distribución)	selectiva en máficos por biotitas secundarias y clorita, plagioclasas y fd-k por sericitita y arcillas.		
		Mxs	biotita secundaria, clorita, ser - Magnetita martitizada.		
		Alteración/ Asociación mxl	alteración potásica (bt secundaria), alteración sericitica (ser-clorita-qz-py), clorita+magnetita martitizada, alteración argilica moderada (arcillas, hematita), alteración supérgena (hm-ght)		
	Secuencia de Eventos		Alteración potásica - Asociación sericitita/chlo/py - Alteración argilica moderada - Alteración supérgena		
	Mxs de alteración (65%)				
	Mineralización (10%)				



Anexo 6. Descripción microscópica de la muestra COR-06.

	<b>Código Muestra</b>	Cor-07			
	<b>Tipo Muestra</b>	Roca	<b>Coordenadas</b>	N - 6530725 E - 307125	
<b>Roca Primaria</b>	Texturas	Alteración pervasiva y medianamente destructiva. Holocristalina; grano fino a medio (~1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica; Pórfido.			
	Minerales (25%)	Pseudomorfos de plagioclasas reemplazados por fd-k y qz recristalizados de hasta 1.5 mm. Biotitas en cúmulos recristalizadas de 0.5 hasta 1 mm.			
	Nombre protolito	Diorita de bt			
<b>Alteración y Mineralización</b>	Forma	vetillas.			
	Texturas	Stockwork con vetillas de qz-py-hm			
	Minerales	qz, py, hm			
	Orden depositación	vetillas de de qz-py (alteración sericitica) - vetillas de qz-hm-ght (evento supérgeno)			
	<b>Reemplazo</b>	Textura (Intensidad/ Distribución)	selectiva en máficos por biotitas secundarias y clorita, plagioclasas y fd-k por sericitita y arcillas.		
		Mxs	biotita secundaria, clorita, ser - Magnetita martitizada.		
		Alteración/ Asociación mxl	alteración potásica (bt secundaria), alteración sericitica (ser-clorita-qz-py), clorita+magnetita martitizada, alteración argilica moderada (arcillas, hematita), alteración supérgena (hm-ght)		
	Secuencia de Eventos	Alteración potásica - Asociación sericitita/chlo/py - Alteración argilica moderada - Alteración supérgena			
	Mxs de alteración (65%)				
	Mineralización (10%)				



**Anexo 7.** Descripción microscópica de la muestra COR-07.

	Código Muestra	Col-01		
	Sondaje	21CLR004	Desde-Hasta (m)	167,25 167,4
	Roca Primaria	Texturas	Alteración pervasiva. Holocristalina; grano fino a medio (~1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica.	
Minerales (5%)		plg (75%) cristales subhedrales con textura seriada < a 1mm -0.3 hasta 0.6 mm alterados por sericita, qz (15%) cxs recristalizados de hasta 0.1 mm, fd-k (6%) cxs subhedrales de hasta 0.3 mm alterados por sericita, bt (3%) cristales subhedrales con textura seriada de 0.1- 0.5 hasta 1 mm alterados a clorita.		
Nombre protolito		brecha hidrotermal con clastos de diorita de bt		
Alteración y Mineralización	Infill	Forma	Espacio de matriz, vetillas.	
		Texturas	Brecha magmática con presencia vetillas de calcita. Texturas triangulares de pequeña y gran escala.	
		Minerales	calcita, ep, clorita.	
		Orden depositación	Alteración sericitica pervasiva principalmente en los clastos y matriz de brecha; posterior alteración propilitica (vetilla de calcita, y clorita, epidota- albita en la matriz).	
	Reemplazo	Textura (Intensidad/ Distribución)	cúmulos de biotita, selectiva en plagioclasas alteradas a epidota	
		Mxs	bt, qz, ser, chl, ep, albita, carbonatos.	
		Alteración/Asociación	alteración potásica-alteración propilitica	
	Secuencia de Eventos	Alteración potásica en clastos - Alteración propilitica (infill de carbonatos).		
	Mxs de alteración (94%)			
	Mineralización (1%)			



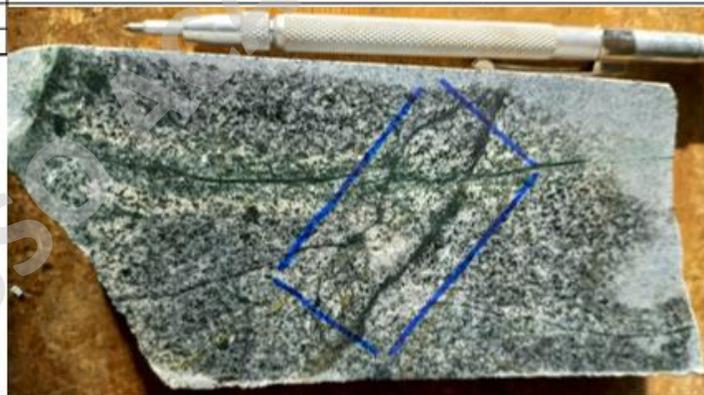
Anexo 8. Descripción microscópica de la muestra COL-01.

	<b>Código Muestra</b>	Col-02		
	<b>Sondaje</b>	21CLRD012	<b>Desde-Hasta (m)</b>	94,2      94,35
	<b>Roca Primaria</b>	<b>Texturas</b>	Alteración moderadamente pervasiva. Holocristalina; grano muy fino a fino (<1 mm); Inequigranular; afanítica a Pórfirica.	
<b>Minerales (25%)</b>		plg (75%) cristales subhedrales con textura seriada < a 1mm -0.3 hasta 0.6 mm alterados por sericita, qz (15%) cxs recristalizados de hasta 0.1 mm, fd-k (1%) cxs subhedrales de hasta 0.3 mm alterados por sericita, bt (3%) cristales subhedrales con textura seriada de 0.1- 0.5 mm alterados a clorita.		
<b>Nombre protolito</b>		Dique andesítico		
<b>Alteración y Mineralización</b>	<b>Infill</b>	<b>Forma</b>	vetillas.	
		<b>Texturas</b>	vetillas de albita y calcita	
		<b>Minerales</b>	calcita, clorita, albita.	
		<b>Orden deposición</b>	alteración propilitica (vetilla de calcita, y clorita, epidota- albita en la matriz).	
	<b>Reemplazo</b>	<b>Textura (Intensidad/Distribución)</b>	fuertemente alterada a alteración propilitica, selectiva en máficos a biotita, mg, hm; y plagioclasas a albita y epidota	
		<b>Mxs</b>	chl, esmectita, ep, albita, carbonatos	
		<b>Alteración/Asociación</b>	alb, ep, clorita, esmectita, carbonatos, magnetita	
	<b>Secuencia de Eventos</b>		Alteración propilitica	
	<b>Mxs de alteración (70%)</b>			
	<b>Mineralización (5%)</b>			



Anexo 9. Descripción microscópica de la muestra COL-02.

	<b>Código Muestra</b>	Col-03		
	<b>Sondaje</b>	21CLR007	<b>Desde-Hasta (m)</b>	118,26   118,42
<b>Roca Primaria</b>	<b>Texturas</b>	Alteración moderadamente pervasiva. Holocristalina; grano fino a medio (~1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica; Pórfido.		
	<b>Minerales (25%)</b>	plg (75%) cristales euhedrales a subhedrales zonadas y con textura seriada de 0.3-0.8 1.5 mm, qz (10%) cxs recristalizados de 0.1 mm, fd-k (4%) cxs subhedrales de hasta 0.3 mm intercrecidos entre plagioclasas, bt (10%) cristales subhedrales con textura seriada de 0.1- 0.3 hasta 0.8 mm alterados a clorita.		
	<b>Nombre protolito</b>	Diorita de biotita		
<b>Alteración y Mineralización</b>	<b>Infill</b>	<b>Forma</b>	vetillas	
		<b>Texturas</b>	Intersección 3 vetillas principales: 1) mg, cpy, py 2) clorita, mg 2) py 3) calcita	
		<b>Minerales</b>	py, ccpy, mg, clorita, albita, qz	
		<b>Orden depositación</b>	alteració potásica (mg, cpy, py, qz) - alteración propilitica (albita, clorita, mg, hm)	
	<b>Reemplazo</b>	<b>Textura (Intensidad/Distribución)</b>	selectiva en máficos a biotita, mg, hm; y plagioclasas a albita y epidota	
		<b>Mxs</b>	albita, clorita, calcita, py, mg, hm	
		<b>Alteración/Asociaci</b>	Alt. Potásica (bt, qz, ccpy, py, mg) - Alt. Propilitica (albita, clorita, calcita, py, mg, hm)	
	<b>Secuencia de Eventos</b>		Alteración potásica - alteración propilitica	
	<b>Mxs de alteración (65%)</b>			
	<b>Mineralización (10%)</b>			



Anexo 10. Descripción microscópica de la muestra COL-03.

	<b>Código Muestra</b>	Col-04			
	<b>Sondaje</b>	21CLRD015	<b>Desde-Hasta (m)</b>	143,85    143,97	
	<b>Roca Primaria</b>	Texturas	Alteración moderadamente pervasiva. Holocristalina; grano fino a medio (~1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica; Pórfido.		
		Minerales (25%)	plg (75%) cristales euhedrales a subhedrales zonadas y con textura seriada de 0.3-0.8-1.5 mm, qz (10%) cxs recristalizados de 0.1-0.2 mm, fd-k (8%) cxs subhedrales de hasta 0.4 mm, bt (5%) cristales subhedrales con textura seriada de 0.1- 0.5 hasta 1 mm alterados a clorita.		
Nombre protolito		Diorita de biotita			
<b>Alteración y Mineralización</b>	<b>Infill</b>	Forma	vetillas		
		Texturas	Vetillas de py con halo de qz-sericita-chl+epidota.		
		Minerales	py, qz, sericita		
		Orden depositación	py, qz, ser, chl		
	<b>Reemplazo</b>	Textura (Intensidad/Distrib)	Selectiva en máficos por bt secundaria, cl, py, ep y en plg y fd-k por ser		
		Mxs	qz, bt, cl, ser, py, ep.		
		Alteración/Asociación	Alt. Potásica (bt, qz, ccpy, py, mg) - Alteración sericitica (py, qz, ser, cl) - Alt. Propilitica (albita, clorita, epidota, mg, hm)		
	<b>Secuencia de Eventos</b>		Alteración potásica de fondo -- Alteración sericitica - Alt. propilitica.		
	<b>Mxs de alteración (65%)</b>				
	<b>Mineralización (10%)</b>				



Anexo 11. Descripción microscópica de la muestra COL-04.

	Código Muestra	Col-05			
	Sondaje	21CLR019	Desde-Hasta (m)	133,88 134	
	Roca Primaria	Texturas	Alteración pervasiva y moderadamente destructiva. Holocristalina; grano fino (<1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica; Pórfido.		
		Minerales (5%)	qz (15%) cxs recristalizados intercrecidos de hasta 0.3 mm, bt (8%) 0.5 mm intercrecidos y en cúmulos, plg (70%) microlitos <1mm y fenocristales de hasta 1 mmsubhedral siendo alteradas por sericita y ep.		
Nombre protolito		diorita de biotita			
Alteración y Mineralización	Infill	Forma	Vetillas		
		Texturas	vetillas de albita		
		Minerales	pseudomorfos de py reemplazados a hematita		
		Orden deposición	albita (alteración sódica) - mg, hm (alteración propilitica)		
	Reemplazo	Textura (Intensidad/Distrib)	fuertemente alterada a albita, selectiva en máficos a biotita secundaria y mg (alteración potásica); y plagioclasas a ser (alteración sericitica), albita-epidota-hm		
		Mxs	sericita, qz, albita, ep, clorita.		
		Alteración/Asociaci	albita-ser+clorita-epidota+albita+calcita		
	Secuencia de Eventos	Albitización - Alteración sericitica - alteración propilitica			
	Mxs de alteración (85%)				
	Mineralización (10%)				



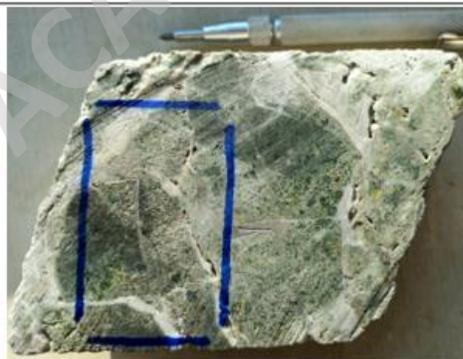
Anexo 12. Descripción microscópica de la muestra COL-05.

	<b>Código Muestra</b>	Col-06		
	<b>Sondaje</b>	21CLRD019	<b>Desde-Hasta (m)</b>	90,33      90,50
	<b>Roca Primaria</b>	Texturas	Alteración pervasiva y moderadamente destructiva. Holocristalina; grano fino (<1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfírica.	
Minerales (5%)		qz (15%) cxs recristalizados intercrecidos de hasta 0.3 mm, bt (8%) 0.5 mm intercrecidos y en cúmulos, plg (70%) microlitos <1mm y fenocristales de hasta 1 mm subhedral siendo alteradas por sericita y ep.		
Nombre protolito		Brecha magmática-hidrotermal		
<b>Alteración y Mineralización</b>	<b>Infill</b>	Forma	Matriz de brecha - Vetillas. Clastos de hasta 3 mm.	
		Texturas	Clástica, brechoza	
		Minerales	Clastos de andesita y diorita en matriz andesítica	
		Orden depositación	clastos previos a la brecha, alteración propilitica posterior a la brecha	
	<b>Reemplazo</b>	Textura (Intensidad/Distrib)	Selectiva en plg a ep; y mgt a hm. Mushketovita y martitización.	
		Mxs	albita, ep, clorita, magnetita, hematita	
		Alteración/Asociación	albita, epidota, clorita, mg, hematita	
	<b>Secuencia de Eventos</b>		Alteración potásica (mushketovita) - alteración propilitica (martitización)	
	Mxs de alteración (85%)			
	Mineralización (10%)			



Anexo 13. Descripción microscópica de la muestra COL-06.

	<b>Código Muestra</b>	Col-07		
	<b>Tipo muestra</b>	Sondaje	<b>Desde-Hasta (m)</b>	210,56      210,66
	<b>Roca Primaria</b>	Texturas	Alteración pervasiva y moderadamente destructiva. Holocristalina; grano fino (<1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfírica.	
Minerales (5%)		qz (15%) cxs recristalizados intercrecidos de hasta 0.3 mm, bt (4%) , plg (30%) subhedral siendo alteradas por sericita y ep.		
Nombre protolito		brecha hidrotermal con clastos de diorita de bt		
<b>Alteración y Mineralización</b>	<b>Infill</b>	Forma	Matriz de brecha -Vetillas. Clastos de hasta 3 cm.	
		Texturas	Brecha magmática hidrotermal con matriz de calcita	
		Minerales	calcita, qz, epidota, clorita, albita	
		Orden depositación	alteración propilítica	
		<b>Reemplazo</b>	Textura (Intensidad/Distrib)	Selectiva en biotitas y máficos en bt secundaria, cl y mgt.
	Mxs		calcita, qz, albita, ep, clorita	
	Alteración/Asociación		bt (alteración potásica), albita, epidota, clorita, calcita (alteración propilítica)	
	Secuencia de Eventos		Alteración potásica- alteración propilítica- epidotización	
	Mxs de alteración (85%)			
	Mineralización (10%)			



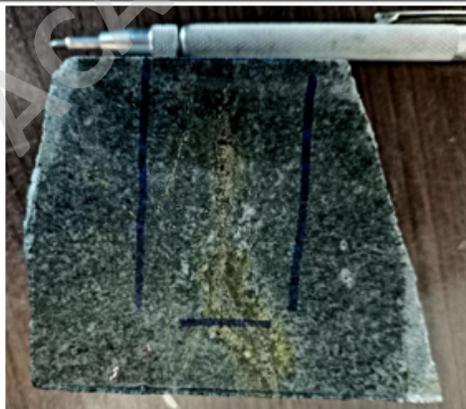
**Anexo 14.** Descripción microscópica de la muestra COL-07.

	Código Muestra	Col-08		
	Sondaje	21CLRD007	Desde-Hasta (m)	119,5      119,67
	Roca Primaria	Texturas	Alteración moderadamente pervasiva. Holocristalina; grano fino a medio (~1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica; Pórfido.	
Minerales (25%)		qz (10%) cxs recristalizados de hasta 0.2, bt (5%) fenocristales de hasta 1 mm, plg (70%) euhedral a subhedral zonadas y con textura seriada con poblaciones de 0.3- 0.5 y de hasta 1mm, fd/k (15%) subhedral a anhedral de hasta 0.8 mm.		
Nombre protolito		Granodiorita de biotita		
Alteración y Mineralización	Infill	Forma	vetillas.	
		Texturas	vetillas, stockwork de cuarzo	
		Minerales	qz, cpy, py, mgt.	
		Orden depositación	vetillas de qz, bt, mg, ccpy, py (alteración potásica). Halo de albita-epidota (alteración propilitica)	
	Reemplazo	Textura (Intensidad/Distrib)	selectiva en máficos a biotita y mg; y plagioclasas a albita y epidota	
		Mxs	biotita, magnetita, clorita, albita, epidota	
		Alteración/Asociación	Alt. Potásica (biotita secundaria, qz, magnetita, cpy, py)- Alt. Propilitica (albita, epidota, clorita, hm).	
	Secuencia de Eventos	Vetillas de cuarzo, cpy, py (alteración potásica), reemplazo de mgt +-cl+-ep (alteración propilitica)		
	Mxs de alteración (65%)			
	Mineralización (10%)			



Anexo 15. Descripción microscópica de la muestra COL-08.

	Código Muestra	Col-09		
	Sondaje	21CLR007	Desde-Hasta (m)	119,5    119,67
	Roca Primaria	Texturas	Alteración moderadamente pervasiva. Holocristalina; grano fino a medio (~1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica; Pórfido.	
Minerales (25%)		qz (15%) cxs recristalizados intercrecidos de hasta 0.3 mm, bt (4%) fenocristales de hasta 0.5 mm siendo reemplazados por clorita, plg (75%) euhedral a subhedral zonadas y con textura seriada con poblaciones de 0.3- 0.5 y de hasta 1.5 mm siendo aletradas por sericita, fd/k (10%) subhedrales a anhedrales de hasta 0.8 mm.		
Nombre protolito		Granodiorita de biotita		
Alteración y Mineralización	Infill	Forma	Vetillas.	
		Texturas	vetillas, stockwork de cuarzo	
		Minerales	qz, cpy, py, mgt.	
		Orden depositación	vetillas de qz, bt, mg, ccpy, py (alteración potásica). Halo de albíta- epidota (alteración propilitica)	
	Reemplazo	Textura (Intensidad/Distrib)	selectiva en máficos a biotita y mg; y plagioclasas a albíta y epidota	
		Mxs	biotita, magnetita, clorita, albíta, epidota	
		Alteración/Asociaci	Alt. Potásica (biotita secundaria, qz, magnetita, cpy, py)- Alt. Propilitica (albíta, epidota, clorita, hm).	
	Secuencia de Eventos	Vetillas de cuarzo, cpy, py (alteración potásica), reemplazo de mgt +cl+ep (alteración propilitica)		
	Mxs de alteración (65%)			
	Mineralización (10%)			



Anexo 16. Descripción microscópica de la muestra COL-09.

	Código Muestra	Col-10			
	Tipo muestra	Roca	Coordenadas	N - 6535867 E - 298668	
	Roca Primaria	Texturas	Holocristalina; grano fino (<1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica.		
		Minerales (5%)	qz (15%) cxs recristalizados intercrecidos de hasta 0.3 mm, bt (8%) fenocristales de hasta 1 mm intercrecidos y en cúmulos.		
Nombre protolito		Brecha magmática-hidrotermal con clastos de diorita/andesita			
Alteración y Mineralización	Infill	Forma	Matriz de brecha -Vetillas.		
		Texturas	Brecha magmática-hidrotermal con matriz de magnetita.		
		Minerales	Mgt, cpy, py, bt, qz.		
		Orden depositación	brecha producto de las vetas de magnetita del evento temprano potásico		
	Reemplazo	Textura (Intensidad/	Alteración pervasiva		
		Mxs	qz- bt- mgt-hematita		
		Alteración/ Asociación mineral	cuarzo-biotita-magnetita		
	Secuencia de Eventos	Alteración potásica			
	Mxs de alteración (85%)				
	Mineralización (10%)				



Anexo 17. Descripción microscópica de la muestra COL-10.

	<b>Código Muestra</b>	Col-11		
	<b>Tipo muestra</b>	Roca	<b>Coordenadas</b>	N - 6536334 E - 299601
	<b>Roca Primaria</b>	Texturas	Alteración pervasiva y moderadamente destructiva. Holocristalina; grano fino (<1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica.	
Minerales (5%)		qz (15%) cxs recristalizados intercrecidos de hasta 0.3 mm, bt (8%) fenocristales de hasta 1 mm intercrecidos y en cúmulos, plg (70%) fenocristales (< 1 mm) y microlitos		
Nombre protolito		Brecha magmática-hidrotermal con clastos de andesita		
<b>Alteración y Mineralización</b>	<b>Infill</b>	Forma	Matriz de brecha - clastos de hasta 3 mm.	
		Texturas	Autobrecha	
		Minerales	albita, qz, mgt	
		Orden depositación	clastos y matriz alterados por evento potásico temprano (abundante magnetita) y posterior propilítico (epidota)	
	<b>Reemplazo</b>	Textura (Intensidad/Distribuc	Los cláston presentan fuerte reemplazo a magnetita, albita y epidota	
		Mxs	mg, albita, epidota	
		Alteración/Asociación	magnetita (alteración potásica) - albita, epidota, hematita (alteración propilítica)	
	<b>Secuencia de Eventos</b>		Alteración potásica - alteración propilítica	
	<b>Mxs de alteración (85%)</b>			
	<b>Mineralización (10%)</b>			



**Anexo 18.** Descripción microscópica de la muestra COL-11.

	<b>Código Muestra</b>	Col-12	
	<b>Muestra</b>	Roca	<b>Coordenadas</b> N-6536334 E- 299149
	<b>Roca Primaria</b>	Texturas	Alteración moderadamente pervasiva. Holocristalina; grano fino a medio (~1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica.
Minerales (25%)		plg (75%) cristales subhedrales con textura seriada < a 1mm -0.3 hasta 0.6 mm alterados por sericita, qz (15%) cxs recristalizados de hasta 0.1 mm, fd-k (6%) cxs subhedrales de hasta 0.3 mm alterados por sericita, bt (3%) cristales subhedrales con textura seriada de 0.1- 0.5 hasta 1 mm alterados a clorita.	
Nombre protolito		Diorita de biotita	
<b>Alteración y Mineralización</b>	<b>Infill</b>	Forma	vetillas
		Texturas	vetillas
		Minerales	calcita
		Orden depositación	vetillas de calcita (alteración propilitica)
	<b>Reemplazo</b>	Textura (Intensidad/ Distribución)	Selectiva en plagioclasa por albita y epidota; y en bt por clorita, magnetita
		Mxs	albita, epidota, clorita, carbonatos, magnetita, hematita
		Alteración/ Asociación mineral	albita, epidota, clorita, carbonatos, magnetita, hematita
	Secuencia de Eventos	Alteración propilitica	
	Mxs de alteración (74%)		
	Mineralización (1%)		



**Anexo 19.** Descripción microscópica de la muestra COL-12.

	<b>Código Muestra</b>	Col-13	
	<b>Tipo Muestra</b>	Roca	<b>Coordenadas</b> N- 6536328 E- 299183
	<b>Roca Primaria</b>	Texturas	Alteración pervasiva y medianamente destructiva. Holocristalina; grano fino a medio (~1 mm); Inequigranular; Fanerítica a Pórfirica.
Minerales (15%)		Rx de caja casi completamente obliterada. Pseudomorfos de plagioclasas reemplazados por fd-k y qz recristalizados, y sericita.	
Nombre protolito		brecha hidrotermal con clastos de andesita/diorita obliterada	
<b>Alteración y Mineralización</b>	<b>Infill</b>	Forma	Matriz de brecha
		Texturas	Stockwork de hematita, goethita, jarosita.
		Minerales	qz, hematita, goethita, jarosita, limonitas.
		Orden depositación	hematita-goethita-jarosita (evento supérgeno)
	<b>Reemplazo</b>	Textura (Intensidad/ Distribución)	pervasiva en clastos por arcillas. Boxwork de py reemplazados a hematita.
		Mxs	arcillas, cuarzo, hematita, goethita, jarosita
		Alteración/ Asociación mxl	arcillas, cuarzo, hematita (alteración argílica moderada), goethita, jarosita (alteración supérgena)
	Secuencia de Eventos	Alteración argílica moderada - alteración supérgena.	
	Mxs de alteración (80%)		
	Mineralización (5%)		



**Anexo 20.** Descripción microscópica de la muestra COL-13.