

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Formulación del estudio propuesto	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Hipótesis de trabajo.....	2
1.4. Metodología	3
1.4.1. Muestras del sondaje del depósito de Barreal Seco	3
1.4.2. Microscopía óptica	4
1.4.3. Microscopía electrónica de barrido.....	4
1.4.4. Difracción de rayos X	5
1.4.5. Isótopos estables de cloro.....	5
1.5. Trabajos anteriores	6
1.5.1. Generalidades de los procesos de enriquecimiento supérgeno	6
1.5.2. Mineralización supérgena de cobre en Atacama: estudios anteriores.....	8
1.6. Ubicación y vías de acceso.....	10
2. MARCO GEOLÓGICO	11
2.1. Introducción	11
2.2. Rocas estratificadas	14
2.2.1. Formación Las Tórtolas	14
2.2.2. Formación Pan de Azúcar	15
2.2.3. Formación La Negra	16
2.2.4. Formación Santa Ana.....	18

2.2.5.	Formación Aeropuerto	19
2.2.6.	Formación Chile-Alemania.....	21
2.2.7.	Gravas de Atacama	22
2.3.	Rocas intrusivas.....	24
2.3.1.	Grupo Plutónico Cifuncho	24
2.3.2.	Grupo Plutónico Cerro Del Pingo.....	25
2.4.	Rocas no consolidadas	26
2.4.1.	Depósitos Aluviales y Coluviales Modernos	26
2.5.	Geología estructural	27
2.5.1.	Pliegues	27
2.5.2.	Fallas	28
3.	Antecedentes generales de depósitos IOCG en el norte de Chile.....	29
3.1.	Depósitos IOCG con mineralización de hematita-calcopirita.....	32
4.	Geología del yacimiento de Barreal Seco.....	33
4.1.	Introducción	33
4.2.	Litología	33
4.3.	Elementos estructurales.....	37
4.4.	Mineralogía	37
4.4.1.	Mineralogía primaria.....	38
4.4.2.	Mineralogía secundaria	38
4.5.	Alteración hidrotermal	39
4.6.	Consideraciones genéticas.....	40
5.	RESULTADOS	41
5.1.	Descripción mineralógica.....	41
5.1.1.	Introducción	41
5.1.2.	Eventos de mineralización	41

5.1.3.	Tabla resumen de la descripción mineralógica	59
5.1.4.	Secuencia paragenética	60
5.2.	Isótopos estables de cloro.....	61
5.2.1.	Introducción	61
5.2.1.	Resultados	62
6.	Discusiones.....	64
6.1.	Caracterización de fluidos supérgenos.....	64
6.2.	Isótopos estables de cloro.....	67
6.3.	Modelo Geológico propuesto.....	71
6.3.1.	Evento I de alteración supérgena	71
6.3.2.	Evento II de alteración supérgena.....	73
7.	Conclusiones y recomendaciones.....	75
8.	Bibliografía.....	77
ANEXOS	81
ANEXO A.	DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA.....	81
ANEXO B.	RESULTADOS XDR.....	141

Índice de tablas

Tabla 1. Numeración y ubicación de las muestras obtenidas del sondaje estudiado. X: señala muestras utilizadas en análisis petrográfico, microscopía SEM, difracción de rayos X (XRD) y/o isótopos estables de cloro ($\delta^{37}\text{Cl}$) en separados minerales de atacamita y polimorfos de ésta..... 3

Tabla 2. Resumen de minerales encontrados en muestras del sondaje a distintas profundidades. X: Análisis por XRD. O: Análisis microscopio óptico y/o SEM. OX: Ambos análisis..... 59

Tabla 3. Tabla paragenética del depósito IOCG de Barreal Seco. La mineralogía corresponde a la reportada en este estudio en adición a la descrita por Correa (2000). 60

Tabla 4. Resultados $\delta^{37}\text{Cl}$ de las muestras analizadas del sondaje subvertical de Barreal Seco. . 62

Índice de ilustraciones

- Figura 1. Representación esquemática de la oxidación y enriquecimiento supérgeno de cobre. (Izquierda) separación de zonas enriquecidas del pozo de la mina de cobre el Chino (Santa Rita), Nuevo México. (Derecha) Diagrama de oxidación de cobre y principales reacciones de enriquecimiento para cada zona de la foto adyacente. (Izquierda abajo) Diagrama con aumento de ley de cobre que resulta de los múltiples ciclos de enriquecimiento supérgeno. Figura modificada de Reich y Vasconcelos (2015)..... 7
- Figura 2. Cronología de la alteración supérgena de los depósitos de cobre en el Desierto de Atacama y su relación con cambios climáticos en la región. Datos isotópicos Ar-Ar de Arancibia et al. (2006) definen un periodo de enriquecimiento supérgeno entre 45 a 9-5 Ma, seguido de una etapa sin información radiométrica (~5-2 Ma). Datos de ³⁶Cl en atacamita reportados por Reich et al. (2008) definen un periodo final dominado por la formación y preservación de atacamita desde el comienzo de las condiciones hiperáridas actuales en la región. Figura modificada de Reich et al. (2009)..... 8
- Figura 3. Mapa de ubicación del depósito Barreal Seco. (Izquierda) mapa con regiones del norte y centro de Chile y en gris la Región de Antofagasta. (Derecha) mapa con rutas de acceso al depósito Barreal Seco en verde, en negro las localidades principales y los nombres de las rutas, y en rojo la ubicación del depósito..... 10
- Figura 4. Mapa geológico de la zona de estudio, modificado de las Hojas Taltal y Chañaral (Naranjo y Puig, 1984)..... 12
- Figura 5. Esquema estratigráfico generalizado, en rojo se muestra el depósito Barreal Seco dispuesto en la Formación Aeropuerto. Modificado de las Hojas Taltal y Chañaral. 13
- Figura 6. Distribución espacial y temporal generalizada de las rocas del arco magmático (Hammerschmidt, 1992) y de los depósitos IOCG en el norte de Chile. Modificado de Sillitoe (2003)..... 30
- Figura 7. Subdivisión de cinturones de depósitos IOCG, al oeste del mapa se extiende la provincia del Jurásico Tardío-Medio y al este la provincia del Cretácico Temprano. En la figura se indican los ejes del área de los cinturones de depósitos de pórfidos de cobre del Paleoceno-Eoceno Temprano, Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano, y Mioceno Tardío-Plioceno, incluyendo la localización de los principales depósitos. Modificado de Sillitoe (2003). 31
- Figura 8. Mapa geológico del prospecto Barreal Seco. Modificado de Correa (2000) 34
- Figura 9. Perfil geológico del depósito de Barreal Seco, donde se observa el cuerpo de brecha principal. El segmento A-A' es indicado en la Figura 8. Modificado de Correa (2000)..... 35

- Figura 10. Vista isométrica 3D de cuerpos de brechas del depósito Barreal Seco. Líneas sub-verticales corresponden a sondajes realizados a la fecha del año 2007. Figura modificada de Simón (2007)..... 36
- Figura 11. Espectro de difracción de rayos X de la muestra N°3 (13.8 m). Se identifican picos característicos de algunas de las fases minerales presentes en la roca. Gp: yeso, Atac: atacamita, Paratac: paratacamita, Clinocl: clinocloro, Hem: hematita. 42
- Figura 12. A. Fotomicrografía a luz reflejada en el microscopio óptico, donde se aprecian fenocristales de plagioclasas y cúmulos cristalinos euhedrales de titanomagnetita. Ambas fases son cortadas por una vetilla de mineralización supérgena. B. Fotomicrografía a luz transmitida y a nícoles cruzados. Se aprecia epidota como alteración de los fenocristales y de la matriz de la roca andesítica. Minerales de color negro corresponden a opacos. 43
- Figura 13. A. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron), donde se observan cúmulos de titanomagnetita asociados a la roca andesítica. B. Detalle del cúmulo cristalino en A, Spectrum 1 corresponde a datos de composición mineral química de los cristales de titanomagnetita (semicuantitativos). 43
- Figura 14. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 están asociados a vetilla de cuarzo que presenta en bordes crisocola (Spectrum 3) y yeso (Spectrum 4). Spectrum 5 muestra valores relacionados a magnetita asociada a los clastos andesíticos. Spectrum 1 al 5 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos)..... 44
- Figura 15. A. Fotomicrografía a luz transmitida y a nícoles cruzados en donde se observan láminas de specularita (opacos) dispuestos sobre cristales subhedrales de anhidrita. B. Fotomicrografía a nícoles cruzados y a luz transmitida, donde se observan cristales de atacamita (\pm polimorfo) reemplazando bordes de amígdala de anhidrita. 45
- Figura 16. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Spectrum 1 y 2 corresponden a una vetilla de cuarzo que posee grietas con mineralización de hematita specular relacionada a la brecha hidrotermal. Se disponen cristales de atacamita entre los espacios de las láminas de specularita (Spectrum 4). Spectrum 1, 2 y 4 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos)..... 46
- Figura 17. Imagen de electrones retrodispersados (BSE). Análisis EDS entrega composiciones asociadas a fases de hidróxidos de hierro con estequiometría variable (Spectrum 1 y 6) como reemplazo de crisocola en bordes de amígdalas. Crisocola es conservada en los centros de las amígdalas (Spectrum 2 y 5). Spectrum 1, 2, 5 y 6 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos)..... 48
- Figura 18. A. Fotomicrografía a luz reflejada donde se dispone specularita (a) y goethita (b) con crecimiento de lepidocrocita en bordes y en planos de debilidad (c). B. Fotomicrografía a luz reflejada donde goethita (b) rodea a specularita (a), mientras que lepidocrocita (c) se dispone como alteración de ambas fases. 49

Figura 19. A. Fotomicrografía a luz transmitida y a nicoles cruzados. Se observa goethita de color rojo dispuesta en bordes de cristales de especularita B. Fotomicrografía a luz reflejada de especularita reemplazada en bordes por goethita y con un reemplazo parcial posterior de atacamita.	49
Figura 20. Espectro de difracción de rayos X de muestra N°9 (34.9 m). Se identifican picos característicos de algunas de las fases minerales presentes en la roca. Paratac: paratacamita, Hem: hematita, Qtz: cuarzo, Goeth: Goethita.....	50
Figura 21. A. Fotomicrografía a luz transmitida y a nicoles cruzados, donde se observa pseudomalaquita en pátinas. B. Mismo sector que en A, pero a luz reflejada, donde se observan cristales de especularita reemplazados en bordes a pseudomalaquita.	51
Figura 22. Imagen de electrones retrodispersados (BSE), con análisis EDS. Pseudomalaquita (Spectrum 1 y 2) ocurre entre cristales de especularita (Spectrum 6 y 7); esta configuración mineral es cortada por vetillas de yeso (Spectrum 3, 4 y 5). Spectrum 1 al 7 corresponden a datos de composición mineral química semicuantitativos.	52
Figura 23. A. Imagen de electrones retrodispersados (BSE, Back-scattered electron). Se observa una vetilla de crisocola con formación de copper pitch en fracturas de la vetilla. B. Detalle de la mineralización en A. La vetilla de crisocola junto a la mineralización de copper pitch presenta alteración de yeso. Spectrum 1, 2 y 3 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos).....	53
Figura 24. Imagen de electrones retrodispersados (BSE). Spectrum 3 y 4 se asocian a yeso en vetilla cortando crisocola, la cual es formada en espacios entre cristales de especularita (Spectrum 1 y 2). Spectrum 1 al 4 corresponden a datos de composición mineral química (semicuantitativos).	54
Figura 25. Imagen de electrones retrodispersados (BSE), Spectrum 2 y 5 corresponden a vetillas de atacamita (\pm polimorfos), que cortan granos de crisocola con contenido de hierro en su composición química (Spectrum 3). Spectrum 1 y 4 están relacionados a cristales de hematita especular. Spectrum 1 al 5 corresponden a datos de composición mineral química semicuantitativos.....	55
Figura 26. Imagen de electrones retrodispersados (BSE). Spectrum 3 y 4 asociados a cristales de atacamita (\pm polimorfos), los cuales están reemplazados en bordes por crisocola. La crisocola no presenta registro de hierro en su composición química (Spectrum 1 y 2). Spectrum 1 al 4 corresponden a datos de composición mineral química semicuantitativos	56
Figura 27. A. Fotomicrografía a luz transmitida, en la cual se dispone atacamita a nicoles cruzados. B. Fotomicrografía a nicoles cruzados y a luz transmitida, donde una vetilla de yeso con crecimiento de atacamita en bordes corta a vetilla de atacamita. Se observa el crecimiento de atacamita con textura de crustificación y estructura de peinetas en bordes de la vetilla.....	57

Figura 28. Imagen de electrones retrodispersados (BSE). Se dispone yeso (Spectrum 3 y 4) y atacamita (Spectrum 1 y 2) intercrecidos en una misma vetilla, la cual corta a la roca andesítica. Spectrum 5 indica la presencia de cúmulos cristalinos de titanomagnetita asociados a la andesita. Spectrum 1 al 5 corresponden a datos de composición mineral química semicuantitativos. 58

Figura 29. Perfil en profundidad de los valores de $\delta^{37}\text{Cl}$ de las muestras del sondaje subvertical de Barreal Seco. 63

Figura 30. Diagrama pH vs. $\log a(\text{H}_4\text{iO}_4)$ en donde se muestra la estabilidad de la crisocola y pseudomalaquita relativa a distintos fosfatos de cobre. T=25°C (Crane et al., 2001). 65

Figura 31. Diagrama pH-Eh para minerales de cobre a T=25° C y a 1 bar. Modificado de Reich et al. (2009). 66

Figura 32. Resaltados en color los datos de $\delta^{37}\text{Cl}$ pertenecientes al tramo profundo del sondaje estudiado. 67

Figura 33. Resaltados en color los datos de $\delta^{37}\text{Cl}$ pertenecientes al tramo superficial del sondaje estudiado. 69

Figura 34. Modelo geológico del depósito de Barreal Seco, donde se indica la circulación del fluido mineralizador de oxidados de cobre pertenecientes a un primer evento de alteración supérgena (33 a 9 Ma). 72

Figura 35. Modelo geológico del depósito de Barreal Seco, donde se indica la circulación del fluido mineralizador de oxidados de cobre pertenecientes a un segundo evento de alteración supérgena. 73