

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Hipótesis de Trabajo	2
1.3. Ubicación y accesos	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Elementos críticos Energéticos (<i>ECE's</i>)	4
2.2. Epitermales y solubilidad metálica	5
2.3. Texturas microscópicas diagnósticas en cuarzo y calcita.....	16
2.4. Inclusiones Fluidas.....	17
2.5. Estudios previos.....	21
3. MARCO GEOLÓGICO	23
3.1. Geología Regional	23
3.2. Estratigrafía distrital.....	24
3.3. Intrusivos	24
3.4. Estructuras y lineamientos.....	25
3.5. Mineralización	25
4. METODOLOGÍA	28
4.1. Muestreo y clasificación	28
4.2. Preparación de cortes transparentes rápidos (corte transparente rápido)	29
4.3. Petrografía	29
4.4. Microtermometría	30
4.5. SEM-BSE.....	31
4.6. Raman.....	32
4.7. Ablación Laser ICPMS.....	32
5. RESULTADOS	35
5.1. Evidencia en terreno	35
5.2. Geoquímica.....	38
5.3. Petrografía	41
5.4. Petrografía de inclusiones.....	45
5.5. Microtermometría	50
5.6. Microscopía electrónica de barrido (SEM-BSE)	52
5.7. Raman.....	53
5.8. Ablación laser ICP-MS	54
6. DISCUSIONES	57
6.1. Geoquímica.....	57
6.2. Petrografía y Paragénesis	59
6.3. Evolución del fluido	65
6.4. Enriquecimiento metálico	70
6.5. Comparación con otros depósitos.....	73
7. CONCLUSIONES	75
8. BIBLIOGRAFÍA	77

ANEXOS	83
Anexo A.....	83
Anexo B.....	84
Anexo C.....	85
Anexo D.....	87
Anexo E.....	92
Anexo F.....	94
Anexo G.....	103
Anexo H.....	104
Anexo I.....	105
Anexo J.....	106
Anexo K.....	108
Anexo L.....	114
Anexo M.....	115
Anexo N.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Mapa de rutas y accesos al distrito de Chancón 3
- Figura 2: Esquema generalizado (no a escala) mostrando la estructura, procesos, alteración, tipos de fluidos, entre otros parámetros en la formación de depósitos epitermales. Los epitermales de baja sulfuración se forman a partir de fluidos a profundidades <1.5 km, Ph neutro – alcalino y en equilibrio con la roca hospedante a profundidades mayores. Los epitermales de alta sulfuración se forman por un ascenso de volátiles en un ambiente epitermal hasta ser absorbidos por aguas meteóricas, el HCl y SO₂ forman una solución altamente ácida que altera la roca desde el conducto del fluido (White y Hedenquist, 1995). (extraído de Comprubí et al., 2003). 6
- Figura 3: Solubilidad de oro en función del pH y estado de oxidación (f_{O_2}). Calculada a una temperatura de 250°C, actividad de azufre a_S de 0.01, concentración molal de ion potasio (K^+) de 5×10^{-3} y concentración molal de ion magnesio Mg^{2+} de 4×10^{-5} . Las líneas verticales representan el equilibrio de Illita-adularia con sílica amorfa y cuarzo. La máxima solubilidad de oro está representada por el círculo amarillo y la solubilidad en ppb se representa en líneas celestes (modificado de Henley and Brown, 1985; Shenberger and Barnes, 1989). 8
- Figura 4: Solubilidad de plata en función del pH y estado de oxidación (f_{O_2}). Calculada a una temperatura de 250°C, actividad de azufre a_S de 0.01, actividad de cloro 0.1. Las áreas de predominio para $AgCl_2$ y $Ag(HS)_2$ están separadas por la línea vertical oscura en función del pH y estado de oxidación. Las líneas segmentadas representan los campos de predominio de distintas especies de sulfuro. La máxima solubilidad de plata está representada por el círculo amarillo y la solubilidad en ppb se representa en líneas celestes (extraído de Gammons y Barnes, 1989). 9
- Figura 5: a) Solubilidad de esfalerita en una solución de H₂S ($P=P_{sat}$; $a_S = 0.1$ en función del pH (modificado de Tagirov y Seward (2010). b) Diagrama de predominancia para los complejos Zn-S-HS en función del pH a $P=P_{sat}$ y $a_S = 0.1$ (extraído de Tagirov and Seward, 2010). 10
- Figura 6: Variación de solubilidad para Au, Ag y Zn en un diagrama log S vs log Cl (Modificado de Henley, 1990). 11
- Figura 7: a) Campos de estabilidad con dominancias de especies Ag-Se-S-Na-Cl-O-H a 300°C, concentración molal de Ag de 10^{-7} , concentración molal de Se de 10^{-8} . Líneas punteadas separa campos con dominancia de especies de S y líneas sólidas separa campos de dominancia de Se. Líneas grises horizontales indican la fugacidad de oxígeno para el buffer de H-M (línea superior) y para el buffer N-NO (línea inferior). Áreas verdes y grises representan las zonas de estabilidad para las fases sólidas de Se-Ag y líquidas de Se nativo (modificado de Akinfiyev and Tagirov, 2006). b) Campos de estabilidad para fases sólidas de plata y selenio en función de la temperatura y presión saturada de H₂O (extraído de Akinfiyev and Tagirov, 2006). 12

Figura 8: a,b: Especiación y solubilidad del Au y Te en vapor y fluido salino para el sistema Au-Te-H ₂ O-S-Cl a 300°C a una presión de vapor de 85.8 bar, concentración molal de Cl ⁻ de 1, concentración molal de S de 0.1, a_{K^+} entre 1 – 0.1, 1 ppm de Au, 10 ppm de Te. La línea gris (Figura 7b) es 0.320 (10-0.5) ppm de oro. Extraído de Grundler et al (2013).....	13
Figura 9: Campos de estabilidad y predominancia para complejos clorurados, hidróxidos e hidroxiclорurados de In(III) a 25°C y 1 bar. Extraído de Wood and Samson (2006).....	14
Figura 10: Superficie de solubilidad de Sb ₂ S _{3(s)} : A. Solución como sulfuro, dependiendo del pH, temperatura y m_{HS^-} ; B. Solución como clorurado (pH = 2), dependiendo de la temperatura y m_{Cl^-} . Extraído de Obolensky et al (2007).....	15
Figura 11: Resumen de texturas halladas en cuarzo y calcita observadas en ambientes de tipo epitermal. Estas, pueden ser usadas como guía para detectar la ocurrencia de ebullición. Modificado de Moncada et al, 2012.	17
Figura 12: Distribución de inclusiones: (P) primarias siguiendo zonas concéntricas, paralelas a las caras de crecimiento; (S) secundarias, cruzan los cristales en cualquier dirección.	20
Figura 13: Tipos de arreglos de inclusiones fluidas dependiendo si estas fueron atrapadas en condiciones de no ebullición, ebullición o evaporación rápida.	20
Figura 14: Mapa geológico del distrito de Chancón, escala 1:30000. Modificado de Munzenmayer (2002).	26
Figura 15: Acercamiento al área de estudio (Veta Leona), mostrando la ubicación de la entrada de las principales labores mineras en esta veta.	27
Figura 16: Metodología de muestreo realizada en la veta Leona	28
Figura 17: Microscopio Olympus BX53 y Linkam THM-600 de la Universidad de Chile.	31
Figura 18: SEM-EDX-CL Quanta 250 de la Universidad de Chile.	31
Figura 19: Raman Jobin Yvon LabRam-HR800 perteneciente a Virginia Tech.	32
Figura 20: LA-ICPMS Agilent 7500ce ICPMS quadrupole mass spectrometer acoplado a un sistema de ablación GeolasPro Eximer 193-nm ArF laser ablation system. Perteneciente a Virginia Tech.	33
Figura 21: Evidencia en terreno: a) Sección transversal de la veta con evidencia de dos brechas hidrotermales (Brecha I y II); b) Muestra superficial mostrando la coexistencia de estas dos brechas, además del halo de alteración presente en la porción de la roca correspondiente a la Brecha I. Cpy: calcopirita; Jas: jaspe; Qtz: cuarzo; Py: pirita.....	36
Figura 22: Evidencia en terreno: a) Muestra en profundidad de la Brecha I y una vetilla con mineralización de calcopirita en cuarzo; d) Brecha hidrotermal (Brecha I) con clastos de roca caja y mineralización de calcopirita en la matriz de brecha. Cpy: calcopirita; Qtz: cuarzo.	37
Figura 23: Contenido medio en la corteza vs análisis en roca total. La recta anaranjada representa una línea 1:1	39
Figura 24: geoquímica de especímenes realizada en las labores mineras en profundidad, al interior de la veta Leona mostrando valores para Au, Ag, In, Te y Se.	40

Figura 25: a) Cuarzo plumoso mostrado a n�oculos cruzados (CP) y n�oculos paralelos (PPL); b) Cuarzo rompecabeza; c) Cuarzo euhedral; d) Sílica amorfa (cuarzo coloforme); e) Cuarzo zonal.....	42
Figura 26: Ejemplo de mineralización de pirita diseminada en cuarzo rompecabeza....	44
Figura 27: a) Evidencia de illita en cuarzo rompecabeza, correspondiente a una muestra superficial con evidencia de evaporación rápida. b) Exoluci�n de calcopirita en esfalerita tipo masiva.	44
Figura 28: Arreglo de Inclusiones Fluidas A (BC03C) en cuarzo euhedral encontrado en un especimen a 715 msnm.	45
Figura 29: Arreglo de Inclusiones Fluidas B) en cuarzo euhedral encontrado en un especimen a 560 msnm.	46
Figura 30: Arreglo de Inclusiones Fluidas C en cuarzo euhedral encontrado en un especimen a 625 msnm.	47
Figura 31: Arreglos de Inclusiones Fluidas D (T1.2) con inclusiones ricas en líquido y presencia de mineralización en esfalerita.	48
Figura 32: FIA´s D encontrados en zonas de crecimiento de esfalerita (A→B). A) Arreglos de Inclusiones Fluidas T3A con mineralización, junto a FIA´s secundarios con necking down. B) Arreglos de Inclusiones Fluidas T3B posteriores, con mineralización.	49
Figura 33: Diagrama T_h vs T_m de los resultados obtenidos de microtermometría en la veta Leona.....	51
Figura 34: SEM-BSE realizado en pirita. a) �rea detectada en pirita con señales de Fe, S y Py. b) �rea detectada en pirita con señales de Fe, Cu, S y Ag. El C detectado corresponde al metalizado.	52
Figura 35: Picos obtenidos en Raman en una inclusión de la muestra BC11-T3. Los picos correspondientes a CO_2 se encuentran en 1285 y 1387 Q_{tz} : cuarzo, *: no reconocido.	53
Figura 36: Picos obtenidos con ablación láser, correspondientes a inclusiones secundarias en Arreglos de Inclusiones Fluidas en cuarzo zonal [BC11-T3]. IF: Inclusion Fluida; Q_{tz} : cuarzo.	56
Figura 37: Picos obtenidos con ablación láser, correspondientes a inclusiones primarias en Arreglos de Inclusiones Fluidas en esfalerita [T1.2]. IF: Inclusion Fluida; Sph: Esfalerita.	56
Figura 38: Diagrama de cajas y bigotes comparativo realizado por stage para 28 elementos. La línea roja representa la ley de corte de Au de 1 ppm.	58
Figura 39: Texturas clave para determinar la paragénesis en cuarzo: 1. Cuarzo subeuhedral; 2. Sílica amorfa (coloforme); 3. Cuarzo plumoso; 4. Cuarzo rompecabeza.	60
Figura 40: Minerales met�licos de mena y ganga más comunes en la veta. a) Coexistencia de pirita, calcopirita, esfalerita y galena; b) Textura de disolución en galena por esfalerita; Textura de exolución de calcopirita en esfalerita.	61
Figura 41: Paragénesis de la veta Leona. En esta se representa los tres eventos principales de mineralización, siendo el segundo el que presentó mayor volumen de mineralización y presencia de metales preciosos.....	64

Figura 42: Diagrama de cajas y bigotes T_m y T_h ordenados por stages para los 9 Arreglos de Inclusiones Fluidas medidos	66
Figura 43: a) Curvas líquido – vapor para salinidades de 2, 5, 10 y 15% en peso NaCl. Las líneas verticales representan las isocoras calculadas para cada Arreglos de Inclusiones Fluidas, mientras que los círculos enumerados representan la secuencia PT mínimas seguidas por el fluido, la doble flecha indica que no determinaron las condiciones de atrapamiento. Diagrama realizado en base a Wagner y Prub (2002); Duan y Zhang (2006).	68
Figura 44: Diagrama T_h vs T_m mostrando el camino seguido por el fluido durante su evolución, el que se resume a la derecha. Paréntesis indica número de inclusiones.	69
Figura 45: Diagrama resumen en profundidad mostrando las principales texturas, tipos de inclusiones y concentraciones de los elementos explorados de interés. ...	72
Figura 46: Concentraciones de Au, Ag, In y Se obtenidas por LA-ICPMS para cada Arreglos de Inclusiones Fluidas, ordenadas por la paragénesis.	73
Figura 47: Comparación de concentraciones de telurio de otros depósitos y Chancón (Modificado de Kelley y Spry, 2016).....	74
Figura 48: Intervalo de interés seleccionado en AMS, para una inclusión fluida	85
Figura 49: Background signal y sample signal ajustados en AMS para el NIST SRM-610.	86
Figura 50: Panel de opciones en del AMS.....	86
Figura 51: Raman obtenido en arreglo de inclusiones fluidas secundarias en cuarzo zonal	105
Figura 52: Ablación láser correspondiente a una inclusión del arreglo A-T2	115
Figura 53: Ablación láser correspondiente a una inclusión del arreglo B-T1	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Precio promedio en dólares (USD) por libra y producción mundial (toneladas) para indio, telurio, selenio y cobre en el 2016 (U.S. Geological Survey, 2017; BGS, 2017).	4
Tabla 2: Características y condiciones usadas en el LA-ICPMS.	33
Tabla 3: Principales elementos detectados por geoquímica de roca total en especímenes de la veta Leona	38
Tabla 4: Resumen de datos de microtermometría e información anexa. La muestra BC13 corresponde a un Arreglo de Inclusiones Fluidas con únicamente inclusiones ricas en vapor. Cal: calcita, Qtz: cuarzo, Sph: esfalerita, Min: mineralización, Prom: promedio, n: número de inclusiones. msnm: metros sobre el nivel del mar.	50
Tabla 5: Porcentaje en peso (% en peso) y molar (% mol) semi-cuantitativo para los elementos detectados en Pirita.	52
Tabla 6: Valores promedio obtenidos en diferentes Arreglos de Inclusiones Fluidas para Au, Ag, In, Te y Se. msnm: metros sobre el nivel del mar, LOD: bajo del límite de detección.	55
Tabla 7: Valores promedio de Au, Ag, In, Te y Se en minerales de mena y ganga. LOD: bajo del límite de detección.	55
Tabla 8: Resumen de los valores obtenidos de salinidad (% en peso NaCl eq) y presiones mínimas para cada FIA's. La presión obtenida en BC03C corresponde a la presión efectiva, mientras que en el resto corresponde a la presión mínima estimada.	68
Tabla 9: Datos de microtermometría de otros estudios (Sernageomin y JICA/MMAJ, 1984).	83
Tabla 10: Resultados de geoquímica en roca total para 62 elementos	93
Tabla 11: Datos obtenidos en microtermometría.	103
Tabla 12: Tabla resumen de los datos de microtermometría. Muestra BC13 corresponde a un arreglo de inclusiones fluidas con únicamente inclusiones ricas en vapor. Altitud: en metros sobre el nivel del mar, Min: presencia de mineralización presente en las inclusiones, T _n : temperatura de homogenización, T _m : temperatura de último fundido.	104
Tabla 13: Valores de fermi doublet, densidad y presión de CO ₂ en Arreglos de Inclusiones Fluidas secundarias en cuarzo zonal.	105
Tabla 14: Datos (ppm) obtenidos en LA-ICPMS en inclusiones fluidas. NM: No Medido en AMS por alto nivel de ruido, LOD: bajo el límite de detección	107
Tabla 15: Datos obtenidos en LA-ICPMS en minerales. LOD: bajo el límite de detección (tabla 6 de 6).	113
Tabla 16: Relación de aporte (% ppm) del host sobre la inclusión. Sph: esfalerita.	114