

## TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCION.....	1
1.1. Motivación y mérito científico.....	1
1.2. Alcance del estudio.....	3
1.3. Ocurrencia de Ag y elementos asociados en sistemas magmáticos-hidrotermales.....	4
1.4. Objetivos.....	6
1.4.1. Objetivo general.....	6
1.4.2. Objetivos específicos.....	6
1.5. Hipótesis.....	6
1.6. Trabajos previos.....	7
1.7. Metodología de trabajo y estructura de la tesis.....	8
1.7.1. Etapa 1: Recopilación de información y análisis estadístico.....	8
1.7.2. Etapa 2: Trabajo de terreno.....	8
1.7.3. Etapa 3: Trabajo de laboratorio.....	9
1.7.4. Etapa 4: Síntesis final del trabajo.....	10
1.8. Publicaciones resultantes de esta tesis.....	10
1.8.1. Publicaciones en revistas indexadas.....	10
1.8.2. Presentaciones en congresos.....	10
CAPÍTULO 2: MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	11
2.1. Generalidades.....	11
2.2. Unidades volcánicas.....	12
2.2.1. Formación Abanico.....	12
2.2.2. Formación Farellones.....	14
2.2.3. Formación Colorado-La Parva.....	14
2.3. Rocas intrusivas.....	14
2.3.1. Batolito San Francisco.....	14
2.3.2. Cuerpos subvolcánicos.....	15
2.4. Cuaternario.....	15
2.5. Marco estructural de Chile central.....	15
2.5.1. Dominio Costero (Cordillera de la Costa).....	15
2.5.2. Dominio Central (Depresión Central).....	16
2.5.3. Dominio Cordillerano (Cordillera Principal).....	16
2.6. Evolución tectónica.....	17
2.6.1. Extensión y basamento intraarco (34-22 Ma).....	17

2.6.2.	Inversión tectónica, plutonismo y pórfidos (22-5 Ma).....	17
CAPÍTULO 3: GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO RÍO BLANCO .....		17
3.1.	Antecedentes generales .....	17
3.2	Unidades litológicas.....	21
3.2.1	Formación Farellones .....	21
3.2.2.	Batolito San Francisco.....	21
	Granodiorita Río Blanco (GDRB) .....	21
	Granodiorita Cascada (GDCC).....	22
	Diorita (DIOR).....	22
3.2.3.	Pórfido Cuarzomonzonítico (PQM) .....	22
3.2.4.	Pórfido Feldespático (PFELD) .....	23
3.2.5.	Pórfido Don Luis (PQM).....	24
3.2.6.	Complejo de Brechas Río Blanco .....	24
	Brecha magmática (BXMG).....	25
	Brecha de turmalina (BXT) .....	25
	Brechas polvo de roca (BXPR).....	25
	Brechas de matriz feldespática (BXSK) .....	25
	Brecha de matriz biotita (BXBT) .....	26
	Brechas de matriz anhidrita (BXANH) .....	26
3.2.7.	Chimenea Dacítica (CHDAC) .....	27
3.2.8.	Chimenea Riolítica (CHRIOL).....	28
3.3.	Alteración hidrotermal.....	28
3.3.1.	Alteración clorita-epidota (FCI-Ep).....	28
3.3.2.	Alteración biotítica de fondo (FBt).....	28
3.3.3.	Alteración biotita-clorita de fondo (FBt-CI) .....	29
3.3.4.	Alteración feldespato potásico mayor que biotita (Fk>Bt).....	31
3.3.5.	Alteración biotita mayor que feldespato potásico (Bt>Fk).....	32
3.3.6.	Alteración transicional (SGV>Fk-Bt) .....	33
3.3.7.	Alteración sericita gris verde (SGV).....	33
3.3.8.	Alteración cuarzo-sericita (QS).....	34
3.3.9.	Asociación argílica penetrativa (Arg) .....	35
CAPÍTULO 4: DISTRIBUCIÓN DE PLATA EN EL YACIMIENTO RÍO BLANCO .....		37
4.1	Información general .....	37
4.2	Estadística descriptiva .....	37
4.3.	Diagramas de dispersión .....	39
4.4.	Distribución de plata en el yacimiento Río Blanco .....	42

4.4.1.	Contenidos de plata en función del sector del yacimiento .....	42
4.4.2.	Contenidos de plata en función de la litología .....	43
4.4.3.	Distribución de plata en función de la cota .....	43
4.4.4.	Distribución de plata en función de las zonas de alteración .....	45
4.4.5.	Distribución de Ag en planta y perfil a nivel de yacimiento .....	46
4.5.	Comportamiento de plata y elementos asociados .....	47
4.5.1.	Comportamiento acoplado de Ag-Cu-In .....	48
4.5.2.	Comportamiento variable de Ag-As-Sb .....	48
4.6.	Análisis estadístico de muestras geotermométricas .....	52
<b>CAPÍTULO 5: ESTUDIO MINERALÓGICO Y MINERALOQUÍMICO DE LAS FASES PORTADORAS DE PLATA Y ELEMENTOS ASOCIADOS EN RÍO BLANCO .....</b>		<b>56</b>
5.1	Generalidades .....	56
5.2	Criterios de selección del muestreo de sondajes a diamantina .....	56
5.3	Muestras y metodología de estudio .....	56
5.3.1	Microscopia electrónica de barrido (SEM) .....	57
5.3.2	Microscopia electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM).....	58
5.3.3	Microsonda electrónica (EMPA) y mapas WDS.....	58
5.3.4	Espectrometría de masas por inducción de plasma acoplado a un sistema de ablación laser (LA-ICP-MS).....	59
5.4	Resultados.....	60
5.4.1	Observaciones calcográficas.....	60
5.4.2	Observaciones mediante SEM y FESEM .....	62
Sulfuros de plata .....		62
Teluros de plata y de plata-paladio .....		63
Sulfuros de plata-cobre-arsénico: (Ag, Cu, As)S.....		63
Sulfuros de plata-bismuto-cobre-hierro: (Ag, Bi, Cu, Fe)S .....		63
Inclusiones de metales nobles (Au, Ag, Pd, Pt).....		65
5.4.3	Resultados de análisis en sulfuros mediante EMPA y LA-ICP-MS.....	68
Pirita (FeS <sub>2</sub> ).....		68
Elementos mayores, menores y traza en piritas.....		71
Diagramas elementales de dispersión en piritas.....		72
Mapas EMPA-WDS de piritas .....		75
Mapas LA-ICP-MS de pirita.....		77
Calcopiritas (CuFeS <sub>2</sub> ).....		79
Elementos mayores, menores y trazas en calcopiritas .....		79
Gráficos elementales de dispersión en calcopiritas.....		82

Mapas EMPA-WDS de calcopiritas .....	84
Bornitas ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) .....	85
Elementos mayores, menores y trazas en bornitas.....	87
Gráficos elementales de dispersión en bornitas.....	87
Mapas EMPA-WDS de bornitas.....	90
Mapas LA-ICP-MS de bornita.....	90
Sulfosales de cobre.....	92
Elementos mayores, menores y traza en enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) .....	92
Elementos mayores, menores y traza en tennantita ( $(\text{Cu,Fe,Ag,Zn})_{12}(\text{As, Sb})_4\text{S}_{13}$ ).....	92
Elementos mayores, menores y traza en tetrahedrita ( $(\text{Cu,Fe,Ag,Zn})_{12}(\text{Sb, As})_4\text{S}_{13}$ ) ...	94
Gráficos elementales de dispersión en sulfosales de cobre.....	94
Mapas EMPA-WDS de tennantita-tetrahedrita .....	95
Elementos mayores, menores y traza en sulfuros de plata .....	96
Elementos mayores, menores y traza en minerales del grupo del platino (PGM) .....	97
CAPITULO 6. MODELO GEOLÓGICO DE MINERALIZACIÓN DE PLATA EN EL YACIMIENTO RÍO BLANCO .....	98
6.1 Modelos genéticos previos para Río Blanco.....	98
6.2 Eventos de alteración y mineralización de Cu-Mo .....	101
6.3 Eventos acoplados de mineralización de plata.....	101
6.3.1. Primer evento de mineralización de Ag: alteración potásica .....	102
6.3.2. Segundo evento (transicional) de mineralización de Ag: alteración sericita gris verde	103
6.3.3. Tercer evento de mineralización de Ag: alteración cuarzo-sericítica.....	104
CAPITULO 7. CONSIDERACIONES GENÉTICAS PARA LA MINERALIZACIÓN DE PLATA EN SISTEMAS DE TIPO PÓRFIDO .....	108
CAPITULO 8. CONCLUSIONES.....	114
BIBLIOGRAFIA .....	118
ANEXOS Y APENDICES .....	127
Apéndice 1: Análisis representativos de piritita mediante EMPA. ....	127
Apéndice 2: Análisis representativos de calcopirita mediante EMPA .....	130
Apéndice 3: Análisis representativos de bornitas mediante EMPA .....	136
Apéndice 4: Análisis representativos de sulfosales de cobre mediante EMPA .....	140
Apéndice 5: Análisis representativos de sulfuros de plata y telurios de paladio mediante EMPA.....	142
Apéndice 6: Análisis de elementos traza en piritita mediante LA-ICP-MS .....	143
Apéndice 7: Análisis de elementos traza en calcopirita mediante LA-ICP-MS .....	145
Apéndice 8: Análisis de elementos traza en bornita mediante LA-ICP-MS .....	150

Apéndice 9: Análisis de elementos traza en sulfosales de cobre mediante LA-ICP-MS.....	153
Anexo A: Perfil geológico incluyendo el sondaje DDH-4320.....	155
Anexo B: Perfil de alteración incluyendo el sondaje DDH-4320.....	156
Anexo C: Perfil geológico incluyendo los sondajes 4687, DDH-812. ....	157
Anexo D: Perfil de alteración incluyendo los sondajes 4687, DDH-812. ....	158
Anexo E: FESEM-EDS análisis de microinclusiones de telurios de Ag en calcopiritas.....	159
Anexo F: FESEM-EDS análisis de microinclusiones de telurios de Pd en calcopiritas y bornitas....	160
Anexo G: FESEM-EDS análisis de microinclusiones de electrum en bornita.....	163
Anexo H: FESEM-EDS análisis de microinclusiones de AuAgHg y AuAgTe en bornita.....	165
Anexo I: FESEM-EDS análisis de microinclusiones de merenskyita y hessita en bornita.....	167
Anexo J: Perfiles de concentración LA-ICP-MS (tiempo vs. intensidad) de isótopos seleccionados en calcopirita de la zona de alteración cuarzo-sericita. ....	169
Anexo K: Diagrama de razones Cd:Zn en calcopiritas con temperaturas de cristalización inferida, modificado de Luke et. Al., 2018. ....	170

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Asociaciones de alteración hidrotermal definidas para el yacimiento Río Blanco .....	36
Tabla 2. Matriz de correlación elementos seleccionados .....	37
Tabla 3. Análisis estadístico descriptivo de Ag y elementos asociados en el yacimiento Río Blanco-Chile .....	38
Tabla 4. Sondajes representativos utilizados en el presente estudio.....	48
Tabla 5. Matriz de correlación entre Ag, Au, Cu, Se, Sb, In, Bi, Zn y As, de muestras geometalúrgicas.....	52
Tabla 6. Matriz de correlación de muestras geometalúrgicas para Ag, Au, y porcentajes modales de bornita, calcopirita, esfalerita, enargita, molibdenita y tennantita.....	54
Tabla 7. Muestras seleccionadas para estudios petrográficos y análisis mediante SEM, FESEM, EMPA y LA-ICP-MS .....	57
Tabla 8. Identificación de minerales de Ag mediante observaciones SEM y FESEM ....	62

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema tectónico del extremo norte de la cuenca intra-arco Abanico.....	13
Figura 2. Esquema simplificado de la geología de Chile central, mostrando la ubicación de los depósitos de pórfidos de cobre.....	18
Figura 3. Mapa geológico del yacimiento Río Blanco.....	18
Figura 4. Perfil geológico para el sector Río Blanco.....	19
Figura 5. Perfil de alteración para el sector Río Blanco. ....	20
Figura 6. Andesita de la Formación Farellones.....	21
Figura 7. Rocas intrusivas del Batolito San Francisco.....	22
Figura 8. Pórfido cuarzo monzonítico.....	23
Figura 9. Fotografías de pórfido feldespático.....	23
Figura 10. Pórfido Don Luis.....	24
Figura 11. Brecha matriz feldespática.....	26
Figura 12. Brecha de matriz biotita.....	26
Figura 13. Brecha matriz anhidrita.....	27
Figura 14. Chimenea Dacítica.....	27
Figura 15. Asociación clorita-epidota.....	29
Figura 16. Asociación de alteración biotítica de fondo.....	30
Figura 17. Alteración biotita-clorita de fondo.....	31
Figura 18. Alteración feldespato potásico mayor biotita.....	32
Figura 19. Alteración biotita mayor feldespato potásico.....	33
Figura 20. Alteración sericita gris verde.....	34
Figura 21. Granodiorita.....	35
Figura 22. Box plot de concentraciones de Ag y elementos asociados en el yacimiento Río Blanco.....	39
Figura 23. Gráficos de dispersión entre Ag y elementos asociados.....	40
Figura 24. Gráficos de dispersión para Co, Fe, Zn, Sb, Re, Mo, As, In, Cu.....	41
Figura 25. Box plot de contenidos de Ag en función de zonas de explotación en el yacimiento Río Blanco.....	42
Figura 26. Box plot de concentración de Ag en función de la litología para el yacimiento de Río Blanco.....	43
Figura 27. Box plot de Ag en función de la cota en el yacimiento Río Blanco.....	44
Figura 28. Box plot de concentración de Ag en función de las distintas zonas de alteración hidrotermal.....	45
Figura 29. Contenidos promedio de Ag en función de las distintas zonas de alteración hidrotermal en el yacimiento Río Blanco.....	46
Figura 30. Vista de planta de las muestras de sondajes a diamantina con sus valores de concentración de Ag expresados en partes por millón (ppm).....	46
Figura 31. Vista de perfil de la ubicación de las muestras de sondajes a diamantina con sus contenidos de Ag expresados en partes por millón (ppm).....	47
Figura 32. Distribución de Ag y Cu en el yacimiento Río Blanco.....	49
Figura 33. Perfiles de sondajes a diamantina que muestran la distribución en profundidad de las concentraciones de Ag, Cu e In (ppm).....	50
Figura 34. Perfiles de sondajes a diamantina que muestran la distribución en profundidad de las concentraciones Ag, As y Sb.....	51

Figura 35. Diagramas de dispersión para elementos de interés en muestras geometalúrgicas.....	53
Figura 36. Diagramas de dispersión para elementos de interés en muestras geometalúrgicas.....	54
Figura 37. Diagrama de box plot que muestra el porcentaje (%) de abundancia (o proporción modal) de los sulfuros de mena y ganga presentes en el yacimiento Río Blanco. ....	55
Figura 38. Fotomicrografías mediante luz reflejada de sulfuros predominantes en el yacimiento Río Blanco.....	61
Figura 39. Imágenes SEM-BSE de acantita ( $Ag_2S$ ) .....	63
Figura 40. Inclusiones micrométricas a nanométricas de telurios de Ag en calcopirita-bornita-molibdenita, observaciones mediante FESEM.....	64
Figura 41. Imágenes SEM de sulfuros de Ag-Cu-As.....	64
Figura 42. Imágenes FESEM de minerales del grupo del platino (PGM) en calcopirita y bornita .....	66
Figura 43 Imágenes FESEM de inclusiones minerales de Ag, Au, Hg y Te, en calcopirita y bornita .....	67
Figura 44. Diagrama de cajas de las concentraciones para elementos menores y traza en pirita del yacimiento Río Blanco con datos EMPA y LA-ICP-MS.....	69
Figura 45. Diagrama de cajas de elementos menores y trazas en pirita “sin/con inclusiones” minerales LA-ICP-MS análisis.....	70
Figura 46. Perfiles de concentración LA-ICP-MS (tiempo vs. intensidad) de isótopos seleccionados en pirita de la zona de alteración cuarzo-sericita.....	71
Figura 47. Diagramas de dispersión en piritas para elementos seleccionados.....	73
Figura 48. Diagramas de dispersión en piritas para elementos seleccionados As-Ni-Cu-Te-Au .....	74
Figura 49. Diagramas de dispersión en piritas para los elementos Ag, Pb, Bi, Zn.....	74
Figura 50. Imagen BSE y mapas WDS rayos-X de pirita de la zona de alteración QS ..	75
Figura 51. Imágenes microscopía óptica, BSE y mapas WDS rayos-X de pirita de la zona de alteración SGV .....	76
Figura 52. Mapa de elementos traza en pirita realizado mediante LA-ICP-MS.....	77
Figura 53. Diagrama de cajas de elementos menores y trazas en pirita (Co, Cu, As, Ni, Ag, Se y Te) .....	78
Figura 54. Diagrama de cajas de concentraciones para elementos menores y traza en calcopiritas del yacimiento Río Blanco con datos EMPA y LA-ICP-MS.....	80
Figura 55. Diagrama de cajas de elementos menores y trazas en calcopirita “sin/con inclusiones minerales” .....	81
Figura 56. Gráficos de dispersión en calcopiritas de la base de datos LA-ICP-MS.....	82
Figura 57. Gráficos de dispersión de la base de datos LA-ICP-MS en calcopiritas para Ag, As, Co, Pb y Sn.....	83
Figura 58. Diagrama de cajas de contenido de Ag en función de las zonas de alteración en el yacimiento Río Blanco.....	84
Figura 59. Imagen BSE y mapas EMPA-WDS rayos-X de calcopirita y bornita de la zona de alteración potásica .....	85
Figura 60. Diagrama de cajas de las concentraciones para elementos menores y trazas en bornitas del yacimiento Río Blanco con datos EMPA y LA-ICP-MS.....	86
Figura 61. Diagrama de concentraciones (ppm) en bornita de Ag vs. Bi en escala logarítmica.....	88

Figura 62. Gráficos de dispersión de datos LA-ICP-MS en bornitas para Ag, Bi, Se, Te, Pb y As, expresados en escala logarítmica.....	89
Figura 63. Imagen BSE y mapas EMPA-WDS de calcopirita y bornita de la zona de alteración SGV .....	90
Figura 64. Mapa de elementos traza en bornita mediante LA-ICP-MS .....	91
Figura 65. Diagrama de cajas de elementos mayores, menores y trazas en enargita, tennantita y tetrahedrita con datos de LA-ICP-MS .....	93
Figura 66. Gráficos de dispersión en enargitas, tennantitas y tetrahedritas para Ag, Sb, Cd, Co, Bi, Hg y Pb en escala logarítmica de análisis LA-ICP-MS.....	94
Figura 67. Gráficos de dispersión en enargitas, tennantitas y tetrahedritas para Sb, Cd, Co, Bi, Hg, Zn y Pb en escala logarítmica de análisis LA-ICP-MS.....	95
Figura 68. Imagen BSE y mapas EMPA-WDS de pirita-calcopirita-tennantita-tetrahedrita de la zona de alteración QS .....	96
Figura 69. Modelo esquemático de los patrones de zonación relacionados con las brechas mineralizadas de turmalina en el distrito Río Blanco-Los Bronces .....	98
Figura 70. Diagrama esquemático la posible evolución del fluido en la brecha de turmalina Sur-Sur .....	100
Figura 71. Modelo de alteración y mineralización de Ag en Río Blanco con patrón de zonación de metales . .....	106
Figura 72. Modelo de tres etapas para la mineralización de Ag en el yacimiento Río Blanco .....	107