

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

ORIGEN Y DISTRIBUCION DE PLATA EN EL YACIMIENTO TIPO PORFIDO DE CU-
MO RÍO BLANCO, CHILE CENTRAL

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS MENCION GEOLOGÍA

JORGE AURELIO CRESPO MENA

PROFESOR GUIA:
MARTIN REICH MORALES

PROFESOR CO-GUIA:
FERNANDO BARRA PANTOJA

MIEMBROS DE LA COMISION:
DIEGO MORATA CÉSPEDES
CARLOS MARQUARDT ROMÁN

Este trabajo ha sido financiado por Núcleo Milenio Trazadores de Metales NC130065 y
por el programa Piensa Minería de CODELCO-Tech

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN

ORIGEN Y DISTRIBUCION DE PLATA EN EL YACIMIENTO TIPO PORFIDO DE CU-MO RÍO BLANCO, CHILE CENTRAL

El yacimiento Río Blanco, Chile, operado por la División Andina de CODELCO, es un depósito de tipo pórfido cuprífero de clase mundial, con recursos medidos de 2.029 millones de toneladas y una ley promedio de 0,88% de Cu y 0,027% de Mo. La génesis de Río Blanco está ligada a una secuencia evolutiva de múltiples etapas de alteración y mineralización de Cu-Mo, que involucran la generación de brechas magmático-hidrotermales, el emplazamiento de cuerpos porfídicos, el desarrollo de vetillas y alteración hidrotermal. Los eventos de mineralización de Cu-Mo en Río Blanco también concentraron cantidades apreciables de plata (Ag), las cuales alcanzan un promedio de 1,8 ppm a nivel de yacimiento, siendo los concentrados de Cu bonificados económicamente cuando el contenido de Ag supera los 3 ppm.

Este estudio pretende contribuir al conocimiento del origen y distribución de Ag en el yacimiento Río Blanco mediante un estudio sistemático y detallado de la ocurrencia de este elemento en sulfuros de mena y ganga en el depósito. Para la elaboración de esta tesis, se realizó un análisis estadístico de ~10.000 datos ICP-MS multi-elemento de sondajes de diamantina que arrojó una correlación positiva entre Ag y Cu a escala de depósito, distinguiéndose además variaciones en planta, cota, litología y zonas de alteración. El análisis detallado de Ag y elementos traza en sulfuros (calcopirita, bornita y pirita) y sulfosales (enargita, tennantita y tetrahedrita) asociados a cada evento de alteración/mineralización se realizó mediante técnicas de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido convencional (SEM) y de emisión de campo (FESEM), además de microanálisis mediante microsonda electrónica (EMPA) y espectrometría de masas por inducción de plasma acoplado a un sistema de ablación laser (LA-ICP-MS).

Se identificaron tres eventos de mineralización de Ag en Río Blanco, los cuales están genéticamente relacionados con los principales eventos de mineralización de Cu-Mo. El primero, se relaciona con el evento de alteración potásica (~ 500 °C), y se caracteriza por contenidos promedios de Ag en calcopiritas y bornitas de 3,89 ppm y 235,38 ppm, respectivamente, y la presencia de microinclusiones de hessita (Ag_2Te) y electrum (AuAg). El segundo evento está asociado a la alteración sericita gris verde (250-450 °C), con contenidos promedio de Ag en calcopiritas y bornitas de 1,63 ppm y 415,6 ppm, respectivamente, e incluye una creciente presencia de microinclusiones de hessita, electrum, acantita (Ag_2S) y proustita (Ag_3AsS_3). El evento final se relaciona a la alteración cuarzo-sericita (200-350 °C), con altos contenidos promedio de Ag detectados principalmente en tetrahedrita (7.907 ppm), tennantita (2.418 ppm) y enargita (820 ppm), además de calcopirita y pirita con bajas concentraciones de este metal (2,79 y 0,29 ppm, respectivamente). En este evento se distinguen minerales de Ag como acantita, proustita y argento witichenita ($\text{Cu,Ag}_3\text{BiS}_3$), los cuales son más abundantes y de mayor tamaño que los minerales de Ag identificados de las otras zonas de alteración, ocurriendo en bordes de grano y rellenando cavidades y microvetillas en los sulfuros. El modelo planteado en este estudio explica la mineralización de Ag en Río Blanco como el resultado de la partición selectiva de Ag en sulfuros y sulfosales desde el fluido hidrotermal salino, el cual sufre variaciones en solubilidad de Ag relacionados a cambios de temperatura gatilladas por interacción fluido-roca, mezcla y variaciones en el pH.

La ocurrencia de Ag y otros elementos asociados a los sulfuros de Cu-Fe y sulfosales de Cu en Río Blanco tales como el In, Pd, Pt, y Au, aporta con información mineralógica y geoquímica de relevancia para yacimientos tipo pórfido de Cu-Mo, abriendo nuevas vías de investigación y de impacto en la geometalurgia y la evaluación económica de elementos estratégicos en pórfidos cupríferos.

Esta tesis está dedicada a mi esposa Tania
por su amor incondicional, paciencia y comprensión.

A mis hijas Romina y Naomi
por ser mi alegría y fuente de inspiración.

AGRADECIMIENTOS

Durante mis estudios de Doctorado, son varias las personas e instituciones que han contribuido en este largo proceso a las cuales quiero agradecer.

Primeramente quisiera agradecer al Estado de Chile, a través de sus instituciones como: Núcleo Milenio Trazador de Metales en Zonas de Subducción, Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), CODELCO-Tech, División Andina-CODELCO y el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, ya que estas instituciones me ayudaron con la beca de manutención, financiamiento para los análisis de laboratorio y el uso de las instalaciones/laboratorios especializados.

Quiero agradecer a mi profesor guía Dr. Martin Reich, por haberme dado la oportunidad de ser parte de su grupo de investigación, gracias por su paciencia, por su conocimiento, por aclarar las dudas que me surgían. También quisiera dar las gracias al profesor co-guía Dr. Fernando Barra, quien me impartió sus enseñanzas y el soporte necesario para sacar este proyecto adelante. Agradezco también al Dr. Diego Morata (miembro comisión) y al Dr. Carlos Marquardt (miembro externo) por sus aportes, comentarios y sugerencias al contenido de esta investigación.

Un especial agradecimiento a la División Andina de Codelco, ya que sin ellos no se hubiera llevado a cabo este trabajo. En especial a Juan José Verdugo y Claudio Martínez por su tiempo, proporcionar apoyo logístico y consejos en cada etapa de este trabajo. No quisiera dejar de mencionar a las personas que fueron parte importante en la obtención de los datos de laboratorio, Rurik Romero y Mathieu Leisen por prestar su contingente en la obtención de los resultados LA-ICP-MS en los laboratorios del CEGA de la Universidad de Chile, a Cristian Nieves por su diligencia y oportuna ayuda con el SEM, y también a Fernando Colombo de los laboratorios LAMARX de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Agradecer a mis padres Edgar y Alina por darme los valores necesarios para llegar a estas instancias (paciencia, prudencia y perseverancia), a mis hermanos Vane, Santi, David, Amanda y en especial a mi hermana Ali.

A mi esposa Tania le agradezco por estar conmigo en las buenas y en las malas, ha sido el ingrediente perfecto para culminar con éxito esta etapa de mi vida. Gracias amor por darme dos niñas hermosas, mis queridas hijas Romina y Naomi que han llenado nuestro hogar de alegría y felicidad, y recuerda que “familia unida nunca se separa”.

A mis suegros Santiago y Marianita por su apoyo incondicional por siempre estar cuando más los necesitamos y mi cuñado Santiago por su ayuda, soporte y por estar siempre pendiente de la salud de mis niñas. “Dios les pague”.

Al personal administrativo del NMTM: Mauricio Torres, del Departamento de Geología: Maritza y Blanca, CEGA: Bernardette y Karin y de CODELCO-Tech: Andrea, mil gracias por su colaboración.

Por último, me gustaría agradecer a los chiquillos y chiquillas de la oficina.

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
CAPÍTULO 5: ESTUDIO MINERALÓGICO Y MINERALOQUÍMICO DE LAS FASES PORTADORAS DE PLATA Y ELEMENTOS ASOCIADOS EN RÍO BLANCO		56
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 ₂).....		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 ₂).....		79
Elementos mayores, menores y trazas en calcopiritas		79
Gráficos elementales de dispersión en calcopiritas.....		82

Mapas EMPA-WDS de calcopiritas	84
Bornitas (Cu_5FeS_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 (Cu_3AsS_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 pirita mediante EMPA.	127
Apéndice 2: Análisis representativos de calcopiritas 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 pirita 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 piritita del yacimiento Río Blanco con datos EMPA y LA-ICP-MS.....	69
Figura 45. Diagrama de cajas de elementos menores y trazas en piritita “sin/con inclusiones” minerales LA-ICP-MS análisis.....	70
Figura 46. Perfiles de concentración LA-ICP-MS (tiempo vs. intensidad) de isótopos seleccionados en piritita de la zona de alteración cuarzo-sericita.....	71
Figura 47. Diagramas de dispersión en pirititas para elementos seleccionados.....	73
Figura 48. Diagramas de dispersión en pirititas para elementos seleccionados As-Ni-Cu-Te-Au	74
Figura 49. Diagramas de dispersión en pirititas para los elementos Ag, Pb, Bi, Zn.....	74
Figura 50. Imagen BSE y mapas WDS rayos-X de piritita de la zona de alteración QS ..	75
Figura 51. Imágenes microscopía óptica, BSE y mapas WDS rayos-X de piritita de la zona de alteración SGV	76
Figura 52. Mapa de elementos traza en piritita realizado mediante LA-ICP-MS.....	77
Figura 53. Diagrama de cajas de elementos menores y trazas en piritita (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

CAPÍTULO 1: INTRODUCCION

1.1. Motivación y mérito científico

Las menas sulfuradas de cobre (ej. CuFeS_2) y de otros metales base tales como el Zn o Pb (ej. ZnS, PbS) constituyen la principal fuente mundial de estos elementos, constituyendo además repositorios de interés de elementos estratégicos y necesarios para el desarrollo de las sociedades del Siglo XXI. El avance tecnológico actual y el desarrollo de energías y tecnologías emergentes utilizados por economías desarrolladas y en vías de desarrollo, están generando una alta demanda de elementos considerados estratégicos o “críticos” como el litio (Li), indio (In), telurio (Te), galio (Ga), antimonio (Sb), berilio (Be), tierras raras (REE) y los elementos del grupo del platino (PGE del inglés *platinum group elements*). Estos elementos son cruciales para una variedad de industrias de alta tecnología y un suministro estable de recursos minerales es esencial para la prosperidad económica y la seguridad nacional (National Research Council 2008), por lo que múltiples esfuerzos recientes se han enfocado en su caracterización en distintos tipos de yacimientos. Satisfacer las demandas globales será cada vez más difícil a medida que la población mundial aumenta, los estándares de vida siguen incrementándose y las reservas probadas de minerales críticos se agotan (GSA 2013).

A pesar de estos avances, poco es lo que se conoce sobre el contenido y distribución de elementos críticos en los depósitos del tipo pórfido cuprífero. Hay que considerar que los pórfidos cupríferos constituyen a nivel mundial las principales fuentes de cobre (Cu) y molibdeno (Mo) además contienen cantidades relevantes de oro (Au), plata (Ag), incluyendo algunos subproductos como el renio (Re), paladio (Pd) y platino (Pt), constituyéndose como *targets* importantes al momento de estudiar nuevas fuentes de elementos críticos. Adicionalmente a su impacto positivo en la economía, el estudio de los elementos considerados críticos en pórfidos de Cu-Mo podría aportar al conocimiento de los mecanismos de concentración de éstos, desde la segregación magmática hasta su concentración en etapas posteriores de alteración hidrotermal, y oxidación y enriquecimiento supérgeno.

El yacimiento tipo pórfido cuprífero Río Blanco en Chile central, operado por División Andina de CODELCO, es un depósito de clase mundial con recursos medidos de 2.029 MT (millones de toneladas) y una ley promedio de 0,88% de Cu y 0,027% de Mo, con producción anual de 220.000 toneladas de concentrado fino y 5.000 toneladas de molibdeno (CODELCO 2018).

El yacimiento Río Blanco se ubica en la zona cordillerana de la Provincia de Aconcagua en la V Región de Valparaíso, a 80 kilómetros al noreste de Santiago, Chile y se divide en 3 sectores de explotación de norte a sur en: Río Blanco, Don Luis y Sur-Sur. El yacimiento se encuentra entre los 3.700 y 4.300 metros sobre el nivel del mar. La División Andina de CODELCO (DAN), tiene un método de explotación mixto, mina subterránea (Río Blanco) y mina rajo abierto (sectores Don Luis y Sur-Sur) (CODELCO 2018).

Para acceder al yacimiento Río Blanco-Los Bronces desde la ciudad de Santiago, se toma la vía que conduce a la ciudad de Los Andes (ruta 57), alrededor de 81 km, para luego dirigirse por la ruta internacional 60 hasta llegar a Saladillo, alrededor de 39 km de

distancia. Desde Saladillo aproximadamente 40 km en dirección sur hasta llegar al yacimiento.

Informes internos de la compañía realizados durante los años 2012 y 2014 en base a la información de análisis químico ICP-MS de sondajes a diamantina, muestran la presencia de 12 elementos traza (Cu, Mo, Re, Te, As, Se, Ag, Sb, Bi, W, Cr, In) cuyas concentraciones son de interés para la empresa, entre los cuales destaca la Ag con un valor promedio de 1,77 ppm. Cabe mencionar que de los 12 elementos analizados, el 50% son considerados como elementos críticos de acuerdo a los criterios de la National Research Council (2008). Suazo (2014), menciona que la Ag en Río Blanco, estaría asociada principalmente a la existencia de tennantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$) y tetrahedrita ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), pudiendo encontrarse como solución sólida en estas sulfosales o como pequeños granos o inclusiones de minerales de Ag. Además, se reconoce la presencia de una serie de soluciones sólidas con contenidos altos de Ag como la pearcita ($\text{Ag, Cu}_{16}(\text{As, Sb})_2\text{S}_{11}$), freibergita-argentotennantita ($(\text{Ag, Cu, Fe})_{12}(\text{Sb, As})_4\text{S}_{13}$) – ($(\text{Ag, Cu})_{10}(\text{Zn, Fe})_2(\text{As, Sb})_4\text{S}_{13}$) y polibasita ($\text{Ag, Cu}_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$). Los principales minerales de plata identificados en el citado estudio fueron pearcita y argentita (Ag_2S), seguidos por hessita (Ag_2Te), jalpaita (Ag_3CuS_2), argentotennantita ($\text{Ag}_9(\text{Cu}_4(\text{Fe, Zn})_2)\text{As}_4\text{S}_{13}$), matildita (AgBiS_2), polibasita ($(\text{Ag, Cu})_6(\text{Sb, As})_2\text{S}_7$), (Ag_9CuS_4), cloroargirita (AgCl), embolita ($\text{Ag}(\text{Cl, Br})$) y plata nativa (Ag).

En general, existen estudios muy limitados acerca de la ocurrencia mineralógica y el control geoquímico de Ag en sistemas de tipo pórfido cuprífero. Por ejemplo, y desde la perspectiva del fluido hidrotermal, estudios de inclusiones fluidas en distintos depósitos (Kouzmanov y Pokrovski 2012) demuestran que la Ag tiene concentraciones de un orden de magnitud mayor en el líquido hipersalino (salinidad $>26 \text{ wt\% NaCl}_{\text{eq}}$) que en inclusiones monofásicas, ricas en vapor o inclusiones acuosas de baja salinidad. Por otra parte, estudios experimentales y termodinámicos (Akinfiyev y Zotov 2001; Pokrovski et al. 2013) demuestran que la Ag forma complejos clorurados (AgCl_2^- y AgCl_3^{2-}) en fluidos acuosos salinos en rangos de temperatura de 200-600 °C (densidades $>0,3\text{-}0,4 \text{ g/cm}^3$), y cuya solubilidad estaría controlada por reacciones sensibles a los cambios de pH, salinidad y fugacidad de azufre, como por ejemplo:



Además de la formación de minerales de Ag, estudios mineralógicos en sulfuros de Cu y Fe mediante espectrometría de masas por iones secundarios (SIMS) muestran altos contenidos de Ag en bornitas (81-649 ppm) y calcopiritas (0,61-2211 ppm) para depósitos de Cu de tipo manto o “porphyry-like” en el norte de Chile (Reich et al. 2013). Por otra parte, un estudio reciente donde se incluye el yacimiento de pórfido cuprífero de Chuquicamata (Yano 2012) menciona que prácticamente todos los elementos traza de interés están contenidos dentro de las vetillas que contienen tennantita-tetrahedrita, mientras que las piritas son relativamente estériles en estos elementos. Los valores de indio (In) se correlacionan por lo general con altas concentraciones de Ag, y ambos valores son más elevados y más consistentes en calcopiritas de depósitos tipo skarn respecto de depósitos de tipo pórfido cuprífero (Yano 2012). En yacimientos tipo pórfido, estudios muestran que la Ag en la bornita es un orden de magnitud mayor que en las calcopiritas, y dos órdenes de magnitud mayor que en las piritas (Ciocă et al. 2014).

Considerando estos antecedentes, los siguientes tres aspectos son fundamentales tomar en cuenta si se quiere identificar la ocurrencia, distribución e incorporación de plata en los minerales sulfurados en el yacimiento de Río Blanco:

- a) ¿Cuál es la distribución espacial de plata a través del depósito en términos de concentraciones de roca total? ¿A qué otros elementos se asocia este elemento?
- b) ¿Cuál es la ocurrencia, incorporación y especiación de plata en muestras individuales de distintos niveles o sectores del depósito, su ocurrencia mineralógica, y como ésta influencia la composición de la roca?
- c) ¿Cuál es el origen de la plata en el yacimiento, y cómo se distribuyen en el tiempo y el espacio los diferentes eventos mineralizadores de plata y de alteración hidrotermal, representados por diferentes asociaciones mineralógicas?

Para responder estas preguntas y determinar así la distribución mineralógica y geoquímica de plata en el yacimiento Río Blanco, se realizó un estudio de caracterización detallado orientado a identificar las paragénesis minerales portadoras de Ag y elementos asociados (Cu, As, Sb, Zn, In, Bi, entre otros). Con el fin de desarrollar este tema de investigación se llevó a cabo un trabajo de revisión, validación y procesamiento de la base de datos geoquímica de espectrometría de masas por inducción de plasma acoplado (ICP-MS) multiácido (HF-HNO₃-HClO₄, lixiviación con HCl) existente tanto para muestras de sondajes a diamantina (10.140 muestras con análisis de 51 elementos) así como de análisis ICP-MS de muestras geometalúrgicas (1.726 muestras) y datos mineralógicos obtenidos mediante el método QEMSCAN (quantitative evaluation of materials by scanning electron microscopy). El análisis de esta información permitió seleccionar grupos de muestras representativas para ser investigadas en detalle mediante técnicas de microscopía avanzada, incluyendo microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía electrónica de barrido de alta definición (FESEM). Esta información fue complementada con otras técnicas microanalíticas orientadas a cuantificar el contenido de plata y otros metales traza en los distintos sulfuros de mena y ganga, entre las cuales se destacan técnicas de microsonda electrónica (EMPA) para elementos mayores y menores, y espectrometría de masas por inducción de plasma acoplado a un sistema de ablación láser (LA-ICP-MS) para elementos traza.

1.2. Alcance del estudio

Existen escasos trabajos publicados que reporten la distribución y concentración de elementos traza en depósitos tipo pórfido de cobre (por ejemplo, Yano 2012; Reich et al. 2013a; Reich et al. 2013b; Cioacă et al. 2014; Franchini et al. 2015; McFall et al. 2017). Es por esto que este estudio pretende constreñir la distribución, incorporación y especiación de Ag y metales críticos al interior de los sulfuros de Cu(Fe) y sulfosales de Cu y determinar cuáles fueron los eventos mineralizadores y de alteración hidrotermal que introdujeron Ag durante la génesis del yacimiento Río Blanco.

Esta tesis pretende contribuir al conocimiento de los metales de interés económico y estratégico, en especial Ag y sus elementos asociados (As, Sb, In, Bi, Au, Pd), en un yacimiento pórfido de Cu-Mo de clase mundial. Además, pretende proporcionar información de utilidad geometalúrgica para su posterior aprovechamiento en la fase de recuperación mineral mediante procesos extractivos.

1.3. Ocurrencia de Ag y elementos asociados en sistemas magmáticos-hidrotermales

Los depósitos del tipo pórfido de cobre actualmente proveen el 60% de Cu y Mo a nivel mundial (Johnson et al. 2014), e históricamente se han considerado como la principal fuente de estos dos metales. Sin embargo, en los últimos años se ha demostrado que otros metales preciosos y críticos como Au, Ag, Re, Zn, Pt, Pd, In y Bi, se encuentran frecuentemente relacionados a sistemas porfídicos, pudiendo en casos ser recuperados económicamente. El Au ha sido uno de los metales preciosos que ha sido reconocido como un importante subproducto de los depósitos tipo pórfido de Cu, y en aquellos yacimientos con leyes $>0,30$ ppm Au, la mineralización de Au se asocia preferentemente a las zonas de alteración potásica, caracterizado por biotita, cuarzo y magnetita (Sinclair 2007).

El Au se encuentra en los depósitos tipo pórfido de cobre en solución sólida en sulfuros de Cu-Fe y como pequeños granos de Au nativo, usualmente a lo largo de los bordes de grano de la bornita (Kesler et al. 2002). Estudios mediante SIMS de minerales de mena de depósitos tipo pórfido de Cu mostraron que la bornita contiene cerca de 1 ppm de Au, mientras que la calcopirita contiene cerca de un orden de magnitud menos (Kesler et al. 2002). Valores altos de Cu y Au generalmente coinciden en la parte central de los depósitos tipo pórfido. En depósitos como Grasberg (Irian Jaya), Bingham (EEUU), Granisle (Canadá), Pangua (Papúa Nueva Guinea) y Santo Tomas (México), el Au está asociado a la alteración potásica temprana, principalmente como inclusiones de Au nativo de tamaños 5-100 μm o como sobrecrecimiento de granos de electrum (Rubin y Kyle 1997). En el depósito de pórfido de Cu-Au Elatsite, en Bulgaria, los valores promedio de Au, Ag, Pd y Pt son 0,96 ppm, 0,19 ppm, 0,007 ppm y 0,002 ppm respectivamente, calculado a partir de una ley de corte de 0,33 %Cu. Análisis de concentrados de flotación revelan un contenido de 25,6 % Cu con contenidos de: 33 ppm Ag, 13,6 ppm Au, 0,72 ppm de Pd y 0,15 ppm de Pt. El contenido de metales preciosos es relativamente alto en Au, Pd y Pt en la asociación magnetita-bornita-calcopirita (Tarkian et al. 2003). En estos trabajos se concluye que los metales preciosos fueron probablemente transportados como complejos clorurados en soluciones de origen magmático-hidrotermal y altamente salinas (~ 28 a 65% NaCl_{eq} , $T^{\circ}\text{s}$ de 340 a > 700 $^{\circ}\text{C}$), las cuales pudieron haber sufrido mezcla con aguas de origen meteórico (Tarkian et al. 2003). En el depósito de pórfido de Cu-Au Elatsite, el Cu tiene a nivel de yacimiento, correlaciones lineales (r) moderadas a altas con el Au ($r=0,77$), Ag ($r=0,71$) y Pd ($r=0,48$), mientras que la correlación lineal entre Ag vs. Au es de $r= 0,65$.

Respecto a la Ag, tema principal de estudio de la presente tesis, no existe información detallada respecto de su distribución, ocurrencia y especiación en sistemas de pórfido cuprífero. La Ag se encuentra bien documentada en calcopirita (Harris y Cabri 1984; Butler y Nesbitt 1999; Luke et al. 2018) y particularmente en galena y esfalerita (Gasparrini y Lowell 1985; Costagliola et al. 2003; Cook et al. 2009). En contraste, existen considerablemente menos datos para Ag en pirita, bornita, covelina, calcosina y digenita (Shalaby et al. 2004; Chouinard et al. 2005; Reich et al. 2010; Cook et al. 2011). Para los dos casos más estudiados, Au (y Ag) en pirita (FeS_2) y Ag en galena (PbS), los datos muestran que los contenidos de Au y Ag se correlacionan fuertemente con As y Sb, respectivamente (Foord y Shawe 1988; Foord 1989; Chouinard et al. 2005; Reich et al.

2005; Reich et al. 2006; Cook et al. 2011, 2009; Deditius et al. 2014; George et al. 2018). La incorporación de Ag en la solución sólida se cree que sigue una sustitución acoplada del tipo $2(Fe)^{+2} = (Au, Ag)^{+1} + (As)^{+3}$ y $2(Fe)^{+2} = (Ag)^{+1} + (Sb)^{+3}$, respectivamente. La correlación positiva entre Ag y Au con Sb y As, respectivamente, puede observarse en diferentes niveles, desde la escala de muestra hasta la escala de depósito mineral.

El Au y la Ag se pueden incorporar en minerales sulfurados en dos formas principales: (a) químicamente enlazados a la estructura del sulfuro huésped (solución sólida), y (b) como inclusiones o partículas minerales de tamaño micrométrico a submicrométrico o nanométrico (Cook y Chryssoulis 1990; Sharp y Buseck 1993; Cabri et al. 2000; Costagliola et al. 2003; Palenik et al. 2004; Reich et al. 2005, 2006). Las implicaciones geológicas para la presencia de una o ambas formas son potencialmente muy significativas. Los metales preciosos (Au, Ag) en depósitos minerales se cree comúnmente que se concentran a partir de soluciones hidrotermales que están saturadas con respecto a las especies de Ag o Au nativa. Sin embargo, la incorporación de Ag (y Au) en solución sólida en sulfuros tales como la pirita en distintos tipos de depósitos minerales ha sido interpretada como resultado de la acción de soluciones hidrotermales sub saturadas con respecto a Ag u Au nativo (Reich et al. 2013a; Reich et al. 2013b). Las reacciones para la incorporación de metales unidos estructuralmente (o en solución sólida) en sulfuros, difieren de las reacciones para la depositación de metales en forma nativa. Por ejemplo, la incorporación de Au^{+1} en la pirita es más fuertemente afectada por el enfriamiento y cambios de pH que la depositación de Au nativo (Simon et al. 2000). Reich et al. (2005) confirmó que el estado químico de elementos traza en la pirita puede utilizarse como monitor del estado de saturación del Au en la solución hidrotermal que lo depositó. Por ejemplo, las soluciones hidrotermales parentales para los depósitos de Au gigantes de tipo Carlin en Nevada, donde el Au en solución sólida es dominante en la pirita, fueron en gran parte subsaturadas con respecto al Au nativo (Au^0) (Palenik et al. 2004; Reich et al. 2005); en cambio, en sistemas epitermales de Au, donde los procesos de ebullición o boiling generan la sobresaturación de las soluciones hidrotermales con respecto a Au^0 , una proporción importante del Au en la pirita ocurre en estado nativo (Román et al. 2019)

Finalmente, respecto a los elementos denominados críticos y asociados a la Ag y/o al Au, la información es aún más escasa para pórfidos cupríferos. Por ejemplo, la concentración de In y otros elementos tales como el Bi, Sb, Pd, Pt son pobremente entendidas. El In es recuperado principalmente como un subproducto del proceso de Zn. Se ha demostrado que existen niveles altos de In en calcopiritas, pero que la mayor cantidad de la fuente de este elemento es la esfalerita (Sinclair et al. 2006). Previamente fueron reportados contenidos anómalos de PGE en sulfuros de Cu-Fe y concentrados de flotación de varios depósitos tipo pórfido Cu-Au (Tarkian y Stribny 1999), donde los altos contenidos de Pd (130-190 ppb) están asociados a altos contenidos de Au (1-28 ppm). Adicionalmente, Pašava et al. (2010) mostró en el depósito pórfido Cu-Au-Mo Kalmarky en Uzbekistán, concentraciones promedio de 55 ppb Pd, 5,5 ppb Pt y 4,1 ppm Au. Economou-Eliopoulos (2005) concluyó que los pórfidos con contenidos de PGE tienen similares características, que incluyen: (a) su asociación con sistemas alcalinos o calco-alcalinos ricos en potasio; (b) la ocurrencia dominante de minerales portadores de Pd (merenskyita) dentro de los sulfuros de Cu, en asociación con Au-Ag-Te; y (c) la asociación de Pd, Pt y Au con el ensamble magnetita-bornita-calcopirita, dentro de la alteración potásica pervasiva en la

parte central del depósito. McFall et al. (2018) menciona que el depósito Skouries en Grecia, la mineralización de PGE es parte del principal evento de mineralización hipógena de alta temperatura, en donde se identificaron diferentes minerales del grupo del platino (PGM del inglés *platinum group minerals*) como: sopcheite ($\text{Ag}_4\text{Pd}_3\text{Te}_4$), merenskyita ($(\text{Pd,Pt})(\text{Te,Bi})_2$), y kotulskite ($\text{Pd}(\text{Te,Bi})$).

1.4. Objetivos

Los objetivos generales y específicos del presente trabajo de investigación se describen a continuación:

1.4.1. Objetivo general

- Establecer la distribución espacial, mineralógica y temporal de Ag en el yacimiento de tipo pórfido Cu-Mo Río Blanco, Chile, con el propósito de constreñir el origen de Ag y su relación con los distintos eventos mineralizadores y de alteración hidrotermal que formaron el yacimiento.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar, depurar, validar e interpretar la base de datos geoquímicos ICP-MS (multiácido) multi-elemento (51 elementos) de sondajes a diamantina y de muestras geometalúrgicas con que cuenta la División Andina-CODELCO, con especial énfasis en la Ag, metales y metaloides asociados tales como: As, Sb, In, Bi, Cu, Zn, entre otros.
- Constreñir y caracterizar los estilos de alteración y mineralización con las asociaciones mineralógicas donde se acumula y/o se deprime Ag en el yacimiento.
- Relacionar los diferentes tipos de litología al interior del depósito y asociación con la ocurrencia de Ag y elementos asociados.
- Establecer el modo mineralógico de ocurrencia, incorporación y especiación de Ag y elementos asociados en las fases huésped (ej. Ag en solución sólida vs. inclusiones micrométricas a nanométricas de minerales de Ag).
- Identificar las asociaciones geoquímicas entre Ag, metales y metaloides tales como el As, Sb y otros, así como evaluar la ocurrencia de ésta en otras fases de sulfuros de cobre y hierro, como también sulfosales de cobre.
- Integrar la información mineralógica y geoquímica de detalle en el modelo del yacimiento, para así determinar la distribución espacial de Ag y su evolución temporal, con el propósito de aportar al conocimiento del comportamiento de metales preciosos en sistemas de tipo pórfido Cu-Mo.

1.5. Hipótesis

La Ag se encuentra relacionada en el yacimiento Río Blanco a distintas fases minerales, lo cual resulta en una distribución espacial y temporal compleja. Esto se manifiesta en variaciones en concentración y especiación a nivel vertical y areal a escala del yacimiento. Por ende podemos hacernos la pregunta ¿La concentración de plata está ligada preferentemente a cierto(s) eventos de alteración y mineralización en específico?

La ocurrencia mineralógica de Ag en el yacimiento es compleja, y estaría asociada a más de un tipo de fase portadora. La plata estaría asociada e incorporada como trazas (solución sólida) en fases sulfuradas que conforman la mena (ej. calcopirita, bornita, sulfosales de cobre) y a la ganga (ej. pirita), como también a una ocurrencia en minerales de Ag en forma de inclusiones micrométricas a nanométricas. Surge entonces la pregunta: ¿Los fluidos mineralizadores estuvieron subsaturados o sobresaturados en Ag? ¿Hubo cambios en el estado de saturación de los fluidos respecto de fases de Ag específicas?

Finalmente, la incorporación de Ag en las fases sulfuradas estaría fuertemente correlacionada con la presencia de elementos críticos asociados (ej. As, Sb, In, Bi, Pb, Se y Te), y variaría tanto en el espacio como en el tiempo. Entonces, ¿Existe alguna correlación geoquímica entre Ag y otros elementos traza, como por ejemplo el In, Bi, Sb en los sulfuros y sulfosales de cobre? Estas variaciones serían el resultado de procesos físico-químicos relacionados con la evolución hidrotermal del yacimiento, en particular, procesos de separación de fases, ebullición o cambios en la temperatura del fluido hidrotermal.

1.6. Trabajos previos

Varios autores han realizado estudios previos en el yacimiento Río Blanco, aunque principalmente centrados en la geología y geocronología del depósito. Por ejemplo, Warnars et al., (1985) estudian y define el sistema de pórfido y brechas de turmalina. Deckart et al. (2005) realizan estudios de geocronología de los diferentes eventos magmáticos y los eventos hidrotermales del yacimiento, redefiniendo la evolución de los distintos procesos de alteración y mineralización.

Respecto de la distribución de metales traza en el yacimiento, poco es lo que se conoce y existe poca información acerca del comportamiento de los metales (ej. Ag, Au, Hg), por ejemplo) y metaloides como el As y el Sb en el yacimiento. Éstos elementos forman parte de los concentrados de cobre y molibdeno, productos principales de CODELCO-Andina, y su estudio se ha remitido a reportes internos de la compañía, memorias de título y un trabajo publicado reciente, los cuales son resumidos a continuación.

Martínez (2013) realiza el estudio de la mineralogía asociada al As, en relación a los diferentes sulfuros y sulfosales predominantes en el yacimiento Río Blanco, determinando que el As se encuentra asociado a las zonas someras del yacimiento y en vetas, el cual ha sido asociado como un elemento guía para identificar zonas de enriquecimiento de Ag. Este estudio establece que la mineralización de As tiene un carácter tardío, donde se establece su ocurrencia dominante en vetillas asociado a estructuras que controlan la distribución de la alteración cuarzo-sericita (QS).

Suazo (2014) realiza estudios para identificar minerales de Ag en el yacimiento Río Blanco, en donde se identifica minerales de Ag como matildita (AgBiS_2), berryita ($\text{Cu}_3\text{Ag}_2\text{Pb}_3\text{Bi}_7\text{S}_{16}$), paderaita $\text{Cu}_7(\text{Cu},\text{Ag})_{0,33}\text{Pb}_{1,33}\text{Bi}_{11,33})_{13}\text{S}_{22}$, hessita (Ag_2Te) y embolita ($\text{Ag}(\text{Br}, \text{Cl})$). En este estudio además se determinó que la tennantita y tetrahedrita contienen hasta cerca de un 3% de Ag. En las zonas profundas la bornita contiene hasta casi 1% de Ag asociada a minerales como la wittichenita (Cu_3BiS_3).

Spiess (2017) realiza un estudio sobre la distribución y ocurrencia de mercurio en el yacimiento Río Blanco, en donde identifica que el Hg se encuentra asociado a los denominados cobres grises, como solución sólida en tennantita-tetrahedrita. Además realiza una correlación de Hg con otros metaloides, identificando una alta correlación con el Sb tanto en la alimentación ($r=0,93$) y en los concentrados de cobre $r=0,87$.

Crespo et al., (2018) reporta la ocurrencia de micro a nano inclusiones de minerales del grupo del platino (PGM), considerados metales críticos (Pd, Pt, Au, Ag y Te) en el yacimiento Río Blanco. Observaciones mediante FESEM y análisis con EMPA en calcopiritas y bornitas de la zona de alteración potásica revelan la presencia de micro a nano partículas ($<1-10 \mu\text{m}$) de PGM. Los datos mineralógicos muestran que estas inclusiones en su mayoría son de telurios, como la merenskyita ((Pd, Pt) (Bi, Te)₂), hessita rica en Pd (Ag₂Te), sylvanita ((Ag, Au)Te₂) y petzita (Ag₃AuTe₂).

1.7. Metodología de trabajo y estructura de la tesis

Para cumplir con los objetivos planteados para la elaboración de la presente tesis, se desarrolló la siguiente metodología de investigación, realizándose en varias etapas que se detallan a continuación.

1.7.1. Etapa 1: Recopilación de información y análisis estadístico.

Se llevó a cabo un trabajo de recopilación bibliográfica de trabajos anteriores realizados en el yacimiento Río Blanco-Los Bronces, como también artículos de revistas científicas especializadas y congresos geológicos. Los antecedentes generales respecto del marco geológico regional y de la geología del yacimiento se presentan en los Capítulos 2 y 3, respectivamente.

Posteriormente, se realizó una revisión de informes internos de la empresa y se compiló una base de datos geoquímica ICP-MS multi-elemento de roca total obtenida de muestras de sondajes a diamantina, además de datos geoquímicos de concentrados geometalúrgicos.

En esta etapa se analizó la base de datos geoquímicos ICP-MS multi-elemento (51 elementos) de 10.140 muestras (roca total) de sondajes a diamantina, como también datos proporcionados por el departamento de geometalurgia de análisis químicos y razón de enriquecimiento de plata y otros elementos en muestras geometalúrgicas.

El análisis estadístico de la base de datos ICP-MS, incluyó análisis de correlación y técnicas estadísticas descriptivas convencionales, orientadas a determinar correlaciones entre elemento a escala de depósito. Los resultados de este trabajo se detallan en el Capítulo 4.

1.7.2. Etapa 2: Trabajo de terreno

El muestreo de sondajes a diamantina de sectores previamente seleccionados durante la fase de análisis estadístico de la base de datos geoquímica, se realizó en la litoteca ubicada en Saladillo, propiedad de CODELCO, donde se encuentran todas las campañas

de perforación realizadas en el sector con un total de 615.379 metros de sondajes, de los cuales alrededor de 2.419 corresponden a sondajes a diamantina (Solé et al. 2014).

CODELCO-Andina cuenta con cortes transparentes y pulidos de sondajes a diamantina, los cuales se identificaron y se inspeccionaron preliminarmente para análisis petrográficos en el laboratorio.

Se seleccionaron 21 sondajes a ser muestreados, contándose con un total 178 muestras, 120 cortes transparentes y 58 de cortes pulidos. Éstos fueron seleccionados y confeccionados en base a su representatividad, tratando de abarcar la mayor cantidad de litologías, zonas de alteración y mineralización, así como también cubrir espacialmente el yacimiento.

1.7.3. Etapa 3: Trabajo de laboratorio

Se realizó una descripción petrográfica y calcográfica de detalle de los cortes transparentes y pulidos previamente seleccionados, orientado a caracterizar los estilos de mineralización y las asociaciones de alteración, y examinar la potencial ocurrencia de fases de Ag en las muestras, mediante métodos convencionales de microscopía óptica de polarización a luz transmitida y reflejada.

Una vez realizadas las descripciones petrográficas y calcográficas, se seleccionaron 28 cortes transparentes pulidos considerados los más representativos, para ser inspeccionados en mayor detalle mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM). Se dio especial énfasis en los sulfuros de cobre y hierro y sulfosales de cobre, candidatos a ser huéspedes de Ag y elementos críticos asociados en el yacimiento. Las observaciones de detalle mediante SEM y FESEM, orientadas a identificar microtexturas, zonaciones químicas y/o ocurrencia de inclusiones minerales a escalas micro y nanométrica, se detallan en el Capítulo 5.

Posteriormente, se realizó el análisis de fases de interés en 21 cortes transparentes pulidos mediante técnicas de microsonda electrónica (EMPA). El foco estuvo puesto en sulfuros de cobre-hierro (pirita, calcopirita y bornita) y sulfosales de cobre (enargita, tennantita y tetrahedrita), obteniéndose las concentraciones de elementos mayores y menores de dichos sulfuros con un rango de concentraciones desde niveles de porcentaje en peso (wt%) a centenas de partes por millón (ppm).

Para la determinación de elementos traza en los sulfuros de mena y de ganga, previamente analizados mediante EMPA, se utilizaron técnicas de espectrometría de masas por inducción de plasma acoplado a un sistema de ablación láser (LA-ICP-MS). Este trabajo se lo realizó en el Laboratorio de Espectrometría de Masas del Centro de Excelencia Geotermal de los Andes (CEGA) en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, Santiago, Chile. Los datos microanalíticos obtenidos mediante EMPA y LA-ICP-MS se detallan también en el Capítulo 5.

1.7.4. Etapa 4: Síntesis final del trabajo

Los resultados de los capítulos anteriores se sintetizan y discuten en los Capítulos 6, 7 y 8. Dicha síntesis final del trabajo incluyó una comparación entre el análisis estadístico preliminar de roca total de los sondajes a diamantina y los resultados de detalle obtenidos mediante las diferentes técnicas SEM, FESEM, EMPA y LA-ICP-MS, elaborándose un modelo espacial de la Ag en el yacimiento tomando como base los sondajes y sus respectivos análisis geoquímicos ICP-MS.

El paso final consistió en la interpretación de los resultados obtenidos en cada una de las fases anteriores, en el contexto de los modelos genéticos en el depósito, es decir, constreñir el origen de plata y su relación con los distintos eventos mineralizadores y de alteración hidrotermal que dieron origen al yacimiento Río Blanco. El modelo geológico de mineralización de plata en Río Blanco se presenta en el Capítulo 6, mientras que los Capítulos 7 y 8 presentan las discusiones y conclusiones finales del estudio, respectivamente.

Adicionalmente, se presenta material suplementario en forma de Apéndices y Anexos. Los Apéndices incluyen los análisis mediante EMPA y LA-ICP-MS de pirita, calcopirita, bornita, sulfosales de cobre, sulfuros de plata y telurios de paladio. Además en los Anexos se incluyen varios perfiles adicionales geológicos, de alteración del yacimiento, así como también, los resultados de los análisis mediante FESEM de microinclusiones de telurios de Pd, telurios de Ag y minerales portadores de Au-Ag-Hg.

1.8. Publicaciones resultantes de esta tesis

1.8.1. Publicaciones en revistas indexadas

Crespo, J., Reich, M., Barra, F., Verdugo, J.J., and Martínez, C. (2018). "Critical Metal Particles in Copper Sulfides from the Supergiant Río Blanco Porphyry Cu–Mo Deposit, Chile." *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min8110519>.

Crespo, J., Reich, M., Barra, F., Verdugo, J.J., and Martínez, C. "Occurrence and distribution of silver in the world-class the Río Blanco porphyry Cu-Mo deposit, Chile". In prep (2019).

1.8.2. Presentaciones en congresos

Crespo, J., Reich, M., Barra, F., Verdugo, J.J., and Martínez, C. (2018) "Critical metal particles in copper sulfides from the supergiant Río Blanco porphyry Cu-Mo deposit Chile". Society Economic Geologist (SEG) conference, Kesytone, Colorado, USA, September 22-25.

Crespo, J., Reich, M., Barra, F., Verdugo, J.J., and Martínez, C. (2018) "Trace metals in sulfides and sulfosalts from the Río Blanco porphyry Cu-Mo deposit, Central Chile. Congreso Geológico Chileno, Concepción, Chile, Noviembre 18-23.

Crespo, J., Reich, M., Barra, F., Verdugo, J.J., and Martínez, C. "Occurrence and distribution of silver in the world-class the Río Blanco porphyry Cu-Mo deposit, Chile". In

prep (2019). Society Economic Geologist (SEG) conference, Santiago, Chile. October 7-10.

Reich, M., Crespo, J., Barra, F., Leisen, M., Romero, R., Verdugo, J.J., Martínez, C. (2019) How are critical elements distributed in a world-class porphyry Cu deposit? Goldschmidt Conference, Barcelona, Spain, August 18-23.

CAPÍTULO 2: MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1. Generalidades

Los Andes de Chile central, hospedan la franja de depósitos pórfido de cobre del Mioceno tardío al Plioceno temprano, los cuales incluyen los tres gigantes yacimientos, desde el norte al sur: Los Pelambres-El Pachón, Río Blanco-Los Bronces y El Teniente. El yacimiento Río Blanco-Los Bronces contiene unas 220 Mt de cobre, y es por lo tanto la mayor concentración de este metal a nivel mundial (Sillitoe 2012) y consta de varios centros mineralizados alineados en una orientación norte-noroeste (Toro et al. 2012).

Los depósitos del Mioceno-Plioceno de Chile central se encuentran emplazados dentro de la cuenca invertida Abanico, la cual tiene una configuración tectónica diferente a los del depósitos del Eoceno-Oligoceno, después del inicio de la deformación por compresión dentro de una depresión volcano-tectónica (basamento Abanico) que evolucionó durante otro período, desde el Oligoceno tardío hasta el Mioceno temprano, período de un aumento en la producción de la corteza oceánica del Pacífico oriental (Mpodozis y Cornejo 2012).

El distrito Río Blanco-Los Bronces está ubicado en una importante zona de transición entre dos segmentos diferentes del sistema de subducción andino (Mpodozis y Ramos 1989). Al sur del distrito se encuentra la zona volcánica sur (SVZ), asociada con un ángulo de subducción normal y un volcanismo activo. Hacia el norte se encuentra el segmento de *flat slab* Chileno, caracterizado por un ensanchamiento del sistema orogénico y la ausencia de volcanismo activo (Kay et al., 1999). Esta zona de transición coincide con la subducción de la dorsal asísmica de Juan Fernández, un rasgo topográfico de mayor buoyancia en el slab oceánico que algunos autores han propuesto está directamente relacionada con el establecimiento de la subducción plana al norte, y con la generación de las condiciones apropiadas para la formación de depósitos gigantes tipo pórfido de Cu-Mo (Yáñez et al. 2002; Hollings y Cooke 2005). Sin embargo, esta configuración del margen occidental de América del Sur es un producto relativamente reciente de los eventos del Cenozoico tardío, que se superponen en un margen continental que tienen una historia geológica de mucho más larga data, comenzando con la subducción y acreción del Paleozoico tardío en el margen occidental de Gondwana.

Las unidades de rocas asociadas con la evolución del margen sudamericano se distribuyen en Chile central en tres dominios morfotectónicos principales orientados al norte. Estos son desde el oeste al este, la Cordillera de la Costa, la Depresión Central y la Cordillera Principal (Fig. 2)

Los Andes de Chile central, desde la latitud de los yacimientos tipo pórfido de Cu-Mo de Los Pelambres (32°S) hasta El Teniente (34°S), se caracterizan por una variedad de rocas Paleozoicas tardías, a rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas recientes. La Cordillera Principal abarca los Andes del centro de Chile (Ramos 1994), y limita al este con Argentina y al oeste con el Valle o Depresión Central. La Cordillera Principal se compone de un basamento Paleozoico y rocas sedimentarias/volcánicas mesozoicas a terciarias de la Zona Volcánica Sur (SVZ). Éstas han sido intruidas por batolitos, stocks, diques y complejos de brechas del Mioceno-Plioceno.

La actividad volcánica en el centro de Chile se desarrolló durante los períodos Mesozoico y Terciario. Esta finalizó con el cese de la depositación de la Formación Farellones. Durante este periodo de tiempo, el ensanchamiento del arco magmático se produjo cuando el frente volcánico migró más de 40 km hacia el este (Kay et al. 1987; Kay et al. 1988; Stern y Skewes 1995). La culminación de la actividad volcánica y la migración del arco se considera que está asociada con la relativa inactividad en condiciones sub-corticales debajo de la cordillera principal como resultado del aplanamiento del slab en el centro de Chile (Stern y Skewes 1995). El dominio oeste en Chile, consiste de rocas volcánicas del Eoceno-Plioceno y rocas intrusivas del Mioceno-Plioceno. Este magmatismo Mio-Plioceno esta genéticamente relacionado a la formación de yacimiento pórfidos de Cu-Mo de Chile central (Piquer et al. 2015). Las unidades volcánicas y plutónicas del Mioceno han sido cortadas por pórfidos subvolcánicos y brechas hidrotermales de edades del Mioceno tardío- Plioceno temprano, que están genéticamente y espacialmente relacionadas a la formación del yacimiento pórfido de Cu-Mo Río Blanco-Los Bronces (Warnaars 1985; Serrano et al. 1998; Vargas et al. 1999; Deckart et al. 2005, 2013; Deckart et al. 2014).

2.2. Unidades volcánicas

2.2.1. Formación Abanico

Aguirre (1960) define la Formación Abanico en la provincia de Aconcagua. Las rocas de la Formación Abanico se disponen en dos franjas norte-sur separadas por afloramientos de la Formación Farellones. La parte oriental de la Formación Abanico se encuentra limitado por depósitos mesozoicos en contacto a través de grandes fallas regionales (Charrier et al. 2002). En el Valle Central la Formación Abanico sobreyace discordantemente a las formaciones Lo Valle y Las Chilcas (Gana y Wall 1997).

La Formación Abanico es una gran secuencia continental de ~3.300 m de espesor constituida por lavas básicas a intermedias, rocas piroclásticas ácidas e intercalaciones sedimentarias fluviales, aluviales y lacustres, formando lentes de hasta 500 m de espesor. Según varios trabajos de dataciones radiométricas y estudios de fauna fósil se establece una edad Eoceno superior – Mioceno (Charrier et al. 2002). En la zona oriental afloran basaltos, andesitas basálticas y rocas volcanoclásticas, de edad Oligoceno a Mioceno temprano. Dataciones radiométricas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en plagioclasas de flujos de lava le asignan una edad máxima de $34,4 \pm 0,4$ Ma para la porción inferior y una edad de $21,4 \pm 1,0$ Ma para la porción media de la sucesión. Los flujos de lava muestran una afinidad calco-alcalina y tienen características geoquímicas típicas de rocas volcánicas de arco generadas en un margen continental activo. La Formación Abanico se correlaciona hacia el sur con la Formación Coya-Machalí definida por Klohn (1960) (Thiele 1980; Charrier et al. 2002).

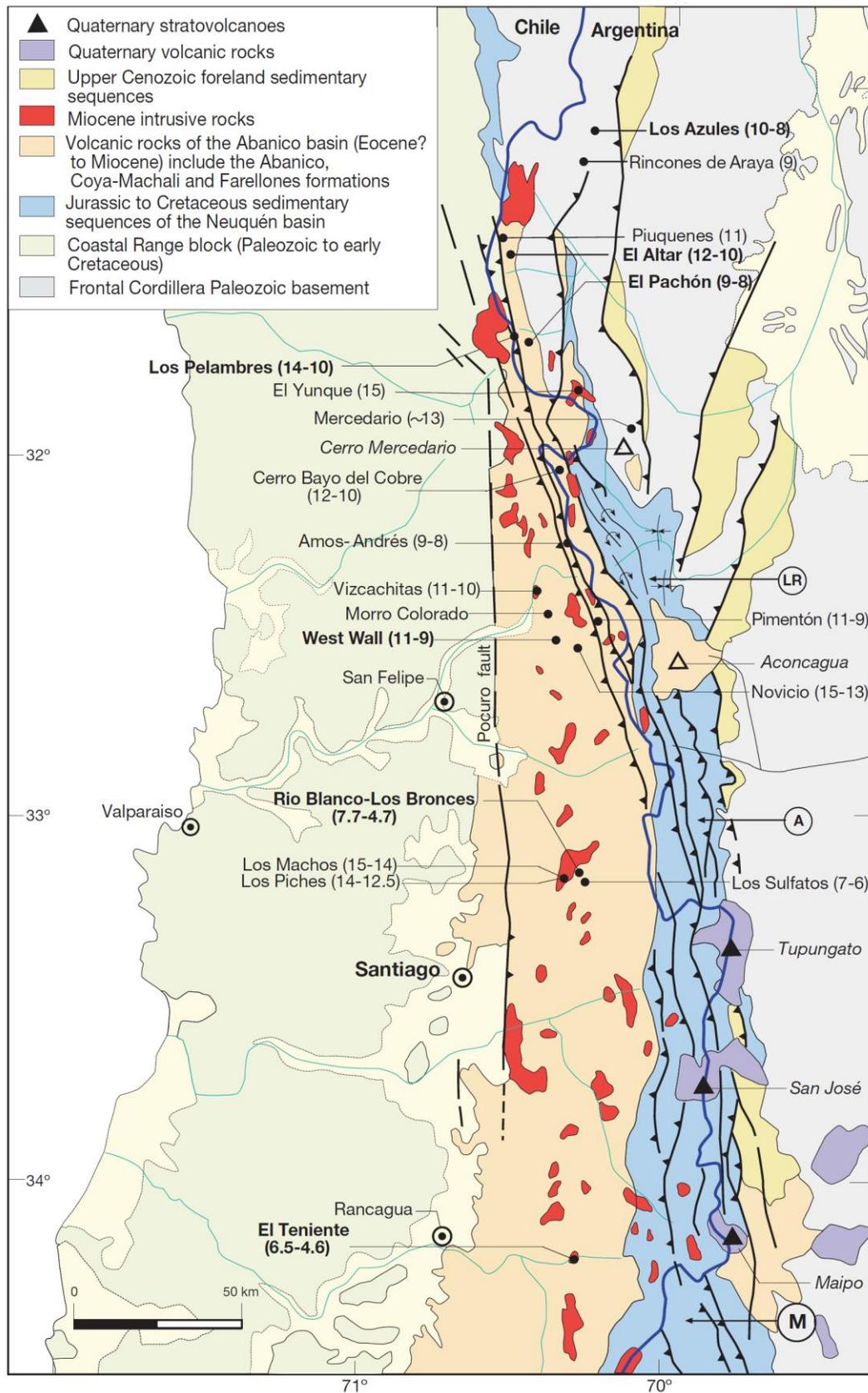


Figura 1. Esquema tectónico del extremo norte de la cuenca intra-arco Abanico (31°-34° S), mostrando la ubicación y edad (Ma) de los depósitos pórfido de cobre Mioceno-Plioceno de Chile central y Argentina (tomado de Mpodozis et al. 2012).

2.2.2. Formación Farellones

La Formación Farellones está compuesta por un miembro inferior, tobáceo a ignimbrítico, de composición riolítico-dacítica, y otro miembro superior, compuesto por flujos andesítico-basálticos intruidos por domos riolíticos. El miembro inferior es el producto de erupciones tipo caldera, mientras que el miembro superior corresponde a una interdigitación de lavas y materiales volcanoclásticos que provienen de estratovolcanes. Entre la latitud 33°S y 34° S, aflora únicamente el miembro superior (Rivano et al. 1990).

Las evidencias más recientes describen un contacto transicional entre la Formación Farellones y la Formación Abanico, con amplias variaciones tanto norte-sur, y en algunos sectores discordantes o pseudo-concordantes, dependiendo esencialmente a una reactivación de las fallas asociadas a la inversión tectónica de la cuenca de la Formación Abanico (Charrier et al. 2002). La Formación Farellones sobreyace a la Formación Abanico con orientación N-S desde los 32°S hasta los 35°S.

Aguirre et al. (2000) reportó edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en plagioclasas de $21,6 \pm 0,2$ y $20,1 \pm 0,3$ Ma para la parte basal de la Formación Farellones. Fuentes et al. (2002) obtuvo un rango de edades de 21 a 18 Ma para esta unidad en la parte occidental del distrito Río Blanco-Los Bronces basado en edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (biotita y horblenda). Los flujos de lava andesítica que hospedan a las unidades intrusivas en Río Blanco-Los Bronces fueron datados por Deckart et al. (2005) (U/Pb en circones), quien determinó un rango de edades entre $16,77 \pm 0,25$ Ma y $17,20 \pm 0,05$ Ma (Mioceno). El espesor reportado es de alrededor de 2.500 m.

2.2.3. Formación Colorado-La Parva

Se integran en esta formación domos y cuerpos subvolcánicos de textura porfírica y composición riolítica, asociados a flujos de lavas, tobas y brechas de composición traquítica, andesítica, dacítica y riolítica (Thiele 1980). Cerca de los centros de emisión, el contacto con la Formación Farellones es levemente discordante.

Beccar et al. (1986), demostró con dataciones radiométricas K/Ar, que la localidad donde se definió esta formación, corresponde a edad Mioceno y deberían incluirse dentro de la Formación Farellones.

2.3. Rocas intrusivas

En la región cordillerana de Chile central, la actividad intrusiva abarca desde el Mioceno al Plioceno. Estos cuerpos intrusivos tiene poca extensión en superficie, y se vuelven más jóvenes progresivamente hacia el oriente (Thiele 1980). El Batolito San Francisco de edad Mioceno, intruye a las rocas estratificadas de la Formación Farellones y Formación Abanico, los cuales a su vez son intruidos por cuerpos subvolcánicos porfídicos del Mioceno superior al Plioceno

2.3.1. Batolito San Francisco

El Batolito San Francisco (BSF) es un cuerpo intrusivo de un área de aproximadamente 200 km² (Serrano et al. 1998), que intruye a las Formaciones Abanico y Farellones en las

riveras del valle de San Francisco. Se compone de múltiples granitoides de distintas texturas y composiciones, principalmente de diorita cuarcífera, granodiorita, monzonita cuarcífera (cuarzomonzonita), monzodiorita cuarcífera (cuarzomonzodiorita), y en menor proporción granitos y sienitas (Serrano et al. 1998). El Batolito San Francisco tiene una afinidad calco-alcalina (Warnaars et al. 1985). Edades K-Ar en roca total (Serrano et al. 1998) ubican al BSF en un rango de edades que va desde 20,1 a 7,4 Ma. Mediante dataciones U/Pb en circones, Deckart et al. (2005) obtienen edades de $11,96 \pm 0,4$ Ma en la granodiorita Río Blanco; $8,4 \pm 0,23$ Ma y $8,16 \pm 0,45$ Ma en la Granodiorita Cascada, asignándoles una edad Mioceno medio-superior.

2.3.2. Cuerpos subvolcánicos

Son cuerpos que corresponde a stocks, lacolitos, diques y chimeneas volcánicas (Thiele 1980). Se los define como Unidad intrusiva II, y corresponden a microdioritas, pórfidos dioríticos, dacíticos, andesíticos y félsicos, que intruyen a la Formación Farellones y a los intrusivos Miocénicos. Dataciones de intrusivos mediante el método U/Pb en circones, realizadas en el sector Río Blanco indican edades de emplazamiento de $6,32 \pm 0,09$ Ma para el Pórfido Cuarzomonzonítico, $5,84 \pm 0,03$ Ma para el Pórfido Feldespático y $5,23 \pm 0,07$ Ma para el Pórfido Don Luis (Deckart et al. 2005).

2.4. Cuaternario

Rellenando los valles se observan sedimentos aluviales, fluviales y fluvio glaciales, compuestos por materiales de variada granulometría como bloques, gravas, arenas, limos y arcillas (Thiele 1980). Sobre los 2.500 msnm, en las cabeceras de los ríos, se encuentran sedimentos morrénicos, compuestos en su mayor parte por morrenas marginales y acumulaciones de detritos provenientes de glaciares de altas cumbres. Debido a la fuerte meteorización física se producen acumulaciones detríticas importantes en las bases de las pendientes de los valles (Thiele 1980).

2.5. Marco estructural de Chile central

La corteza en Chile central se divide en tres dominios estructurales principales, subparalelos de orientación N-S: 1) costero; 2) central; y 3) cordillerano (Fig. 2; Rivano 1996). El dominio costero ocupa un área desde la costa hacia el interior hasta la longitud $71^{\circ}00'$ W. El dominio central se extiende desde los $71^{\circ}00'$ W hacia el este hasta la mega falla Pucuro a $70^{\circ}30'$ W, al este del municipio de Los Andes (Fig. 2). El dominio cordillerano, donde se aloja el depósito mineral Río Blanco, se encuentra entre la mega falla Pucuro y la frontera entre Chile y Argentina. La evolución estructural del centro de Chile en todos los dominios ha implicado períodos de extensión y acortamiento que han dado como resultado el desarrollo de fallas normales, inversas y de empuje, así como también pliegues abiertos a gran escala. En la parte central del distrito Río Blanco-Los Bronces las estructuras que unen las secuencias volcánicas y sedimentarias son siempre oblicuas al orógeno, sistemas de fallas NE y NW (Piquer et al. 2015)

2.5.1. Dominio Costero (Cordillera de la Costa)

La cordillera de la costa está compuesta de intrusivos del Paleozoico tardío al Triásico y rocas metamórficas (conocidas como el basamento de los Andes) y rocas volcánicas,

sedimentarias e intrusivas Jurásicas al Cretácico temprano (Piquer et al. 2015). El dominio costero contiene las rocas más antiguas expuestas en la región. En consecuencia, conserva el registro más largo de deformación, que abarca desde el Paleozoico tardío hasta el presente. Este terreno ha sufrido una complicada historia de acortamiento que involucra la transpresión sinistral, lo que resulta en la rotación hacia la derecha de bloques corticales aislados en su actual orientación NNW (Rivano 1996). La rotación de bloques se expresa mediante foliaciones bien desarrolladas y subparalelas dentro de estratos volcánicos y sedimentarios en la Formación Jurásica Ajial (Rivano 1996). Además, los clastos dentro de la Formación La Ligua (Triásico) y fósiles en la Formación Los Molles (principios del Jurásico) se han reportado como estirados y deformados por una probable rotación en sentido horario hasta su orientación actual (Rivano 1996). En la Formación Los Molles, las zonas foliadas anchas (hasta 700 m de ancho) se desarrollan más intensamente proximal a las fallas inversas de alto ángulo (Rivano 1996). Milonites y porfiroblastos también se preservan localmente, sugiriendo la exhumación de la corteza relativamente profunda dentro del dominio costero (Rivano 1996).

2.5.2. Dominio Central (Depresión Central)

La depresión central es un valle longitudinal delimitado por dos cordilleras, relleno por depósitos sedimentarios y piroclásticos no consolidados (Piquer et al. 2015). Su contacto con la Cordillera Principal está definido por fallas inversas de alto ángulo con vergencia al oeste (Cembrano et al. 2007; Armijo et al. 2010). El dominio central está compuesto principalmente por unidades volcánicas y volcanoclásticas del Cretácico, intruidas por batolitos del Cretácico y del Terciario. Estas unidades se deforman débilmente en pliegues anchos y abiertos, la mayoría de los cuales están restringidos a áreas donde predominan estructuras horst y graben (Rivano 1996). En la parte occidental de este dominio, las características más destacadas son monoclinales orientadas al este que disminuyen en amplitud hacia el este en estratos principalmente sub-horizontales (Rivano 1996). La falta de deformación en el dominio central se atribuye a una combinación de: i) abundantes unidades intrusivas que actuaban como contrafuertes a la deformación y; ii) la competencia relativa de las unidades estratigráficas gruesas, las cuales se cree que han fortalecido considerablemente este cinturón (Rivano 1996).

2.5.3. Dominio Cordillerano (Cordillera Principal)

La cordillera principal se puede subdividir en un dominio occidental y uno oriental. El dominio oriental consiste de rocas sedimentarias del Jurásico al Cretáceo temprano depositados en una cuenca trasarco. Las rocas sedimentarias están fuertemente deformadas y forman parte del cinturón de pliegue y empuje Mioceno Aconcagua (Ramos 1996). El dominio occidental consiste de rocas del Eoceno al Plioceno y rocas intrusivas del Mioceno al Plioceno. Este magmatismo está genéticamente relacionado a la formación de depósitos tipo pórfidos de Cu-Mo de Chile central. (Piquer et al. 2015). Las rocas volcánicas de este dominio fueron depositadas durante la apertura y subsecuente inversión de un basamento intraarco volcanotectónico, el basamento Abanico. Se han agrupado en la Formación sin-extensional Abanico y la Formación sin-inversión Farellones (Charrier et al. 2002). Este dominio se ha sometido a un acortamiento considerable, lo que ha provocado importantes fallas inversas, plegamiento, engrosamiento y elevación (Rivano 1996). La parte occidental de este dominio (cerca del

mega falla Pocuro (Fig. 2) se caracteriza por fallas normales con solo un desplazamiento menor (Rivano 1996). En el sector oriental, una mayor reducción ha resultado en el desarrollo de pliegues disarmónicos macroscópicos con una vergencia global hacia el este, junto con fallas inversas de alto ángulo de orientación norte con desplazamiento significativo (Rivano 1996). El acortamiento también ha producido un sistema de falla inversa de ángulo inferior con una vergencia hacia el este, característicamente desarrollada dentro de la Formación Farellones (Rivano 1996).

El plegamiento abierto alrededor de un eje de plegado de tendencia norte-sur ha producido un gran sinclinal en forma de artesa en los dominios central y cordillerano de la SVZ. Los pliegues macroscópicos dentro del dominio cordillerano corresponden al grosor predominante de la corteza. En el momento de la deformación, la corteza en esta zona alcanzó un espesor máximo potencial de 65 km (Kay et al. 1988). Tal grosor considerable de corteza continental competente se dobla a longitudes de onda mucho mayores produciendo pliegues a gran escala generalmente irreconocibles en cualquier punto del campo. La corteza gruesa también es el precursor probable del desarrollo de fallas de ángulo alto con la superficie de erosión actual que potencialmente representa la extensión superior de las grandes zonas de falla líticas a profundidad. Alternativamente, la naturaleza de ángulo alto de estas fallas inversas puede haberse producido a partir de la reactivación de fallas normales durante la inversión de la cuenca.

2.6. Evolución tectónica

2.6.1. Extensión y basamento intraarco (34-22 Ma)

Este período fue caracterizado por la apertura y el relleno del basamento intraarco volcanotectónico Abanico. Las principales fallas normales de la cuenca tuvieron buzamiento norte (fallas Pocuro-Infiernillo y Alto del Juncal), y el área dentro de estas fue completamente cubierta por los productos de la Formación Abanico (Piquer et al. 2015). El régimen tectónico durante este período fue caracterizado por una amplia extensión este-oeste y el ascenso del magma a la superficie se vio favorecido por una corteza continental delgada (Kurtz et al. 1995)

2.6.2. Inversión tectónica, plutonismo y pórfidos (22-5 Ma)

Durante este período el buzamiento de alto ángulo N35°W y N40°E de las fallas extensionales intrabasamento del basamento Abanico fueron reactivadas. Las principales fallas del margen de la cuenca de dirección norte se reactivaron en modo inverso. La inversión tectónica fue paralela a la depositación de la Formación Farellones, que difiere notablemente de la Formación Abanico en que cubre una superficie considerablemente menor y alcanza un espesor máximo de 1,5 km (Piquer et al. 2015).

Los plutones tempranos en el distrito corresponden a los cuerpos granodioríticos actualmente expuestos en el valle del río San Francisco (Warnaars et al. 1985). El magmatismo culminó con el emplazamiento de pórfidos riolíticos y diatremas controlados estructuralmente (Deckart et al. 2013). Las rocas entre 7,12 y 4,69 Ma. son rocas subvolcánicas directamente asociadas con la actividad hidrotermal y la mineralización (Deckart et al. 2005, 2013). Se infiere que las cámaras magmáticas están localizadas a 5 o 7 km debajo de la superficie actual (Piquer et al. 2015). Los contactos intrusivos,

diques porfíricos, brechas hidrotermales y vetillas muestran una fuerte preferencia de orientación NW y NE, lo que indica que las fallas reactivadas canalizaron el ascenso y el emplazamiento de magma y fluidos hidrotermales durante la etapa de compresión, actuando como alimentadores tanto para los batolitos como para los sistemas mineralizados. En Río Blanco-Los Bronces, los cuerpos principales de brechas están alineados y alargados paralelamente al sistema de fallas N35°W Río Blanco-Los Bronces, mientras la mayoría de las vetillas tardías tipo “D” y “E” (vetillas cuarzo-turmalina-sulfuros con halos sericíticos, vetillas de carbonato-sulfuros-sulfosales) están emplazadas a lo largo de las fallas N40°E (Piquer et al. 2015).

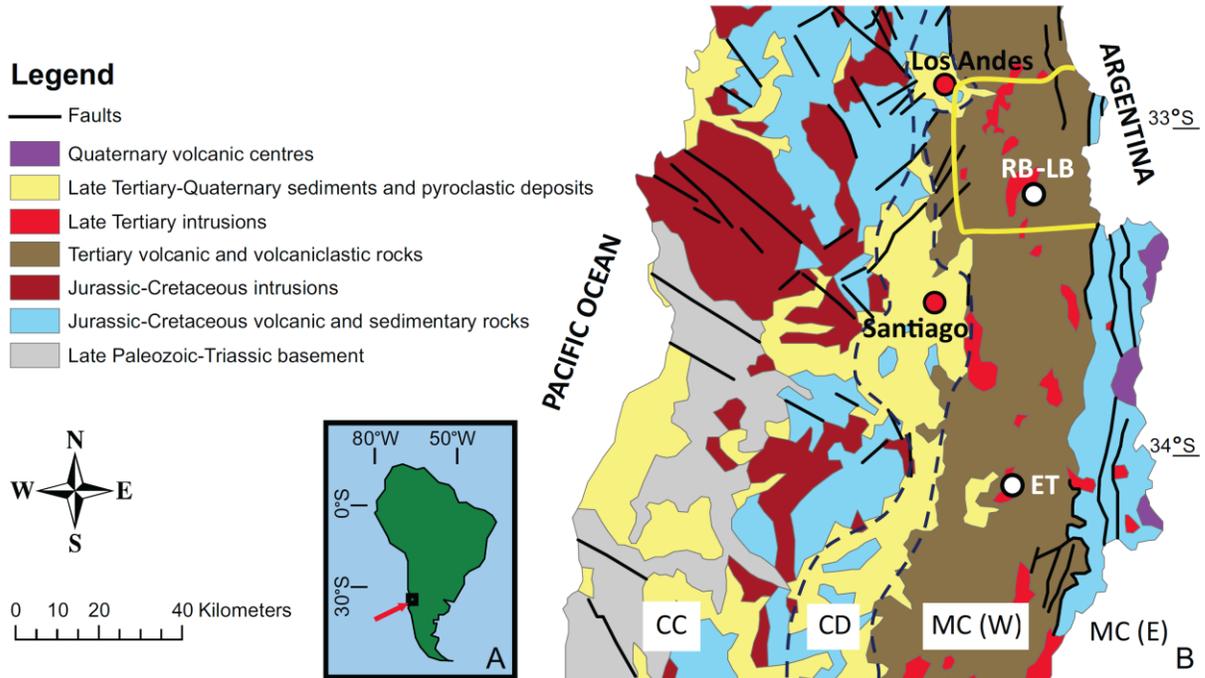


Figura 2. Esquema simplificado de la geología de Chile central, mostrando la ubicación de los depósitos de pórfidos de cobre (ET= El Teniente, RB-LB= Río Blanco-Los Bronces;) y las principales unidades geomorfológicas (CC= Cordillera de la Costa; CD= Depresión Central; MC (E)= Cordillera principal este; MC (W)= Cordillera principal oeste. (Tomado de Piquer et al. 2015)

CAPÍTULO 3: GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO RÍO BLANCO

3.1. Antecedentes generales

La génesis del yacimiento Río Blanco está ligada a una secuencia evolutiva configurada por múltiples etapas de alteración y mineralización, los cuales involucran la generación de brechas magmático-hidrotermales, el emplazamiento de cuerpos porfídicos, el desarrollo de vetillas tipo stockwork y alteración asociada, y la intrusión de cuerpos subvolcánicos (Stambuk et al. 1982; Vargas et al. 1999; Serrano et al. 1998).

En el yacimiento se reconoce una cubierta de rocas volcánicas estratificadas, pertenecientes a la Formación Farellones con edades U/Pb en circones $17,2 \pm 0,05$ Ma. (Deckart et al. 2005). Estas rocas andesíticas se encuentran intruidas por el Batolito San Francisco, el cual a su vez tiene dos unidades, Granodiorita Río Blanco (GRBD) y Granodiorita Cascada (GDCC) con edades U/Pb en circones de $11,96 \pm 0,04$ Ma. y $8,4 \pm 0,23$ Ma. respectivamente (Deckart et al. 2005). Todas estas formaciones se encuentran cortadas por pórfidos cuarzomonzoníticos (PQM), elongados en sentido noroeste (Fig. 3). Se reconoce un conjunto de brechas interminerales representadas por Brechas de Turmalina, Brechas de Biotita, Brechas de Polvo de Roca, Brechas Cuarzo-Feldespató Potásico y Brechas de Anhidrita, elongadas en sentido noroeste y subordinadamente noreste.

El evento postmineralización está representado por el complejo subvolcánico La Copa, representado por tobas cristalinas y líticas, ubicado en el sector noroeste del yacimiento y representada por las unidades Chimenea Riolítica (CHRIOL) y Chimenea Dacítica de edades U/Pb en circones en los rangos 4,9-4,4 Ma, y 5,0-4,7 Ma, respectivamente (Fig. 3). El sector está ampliamente dominado por la unidad de Brecha de Turmalina (BXT) con fragmentos de Granodiorita Cascada (GDCC) la que aloja los mejores contenidos de cobre (Ferraz y Cruz 2011).

Se reconoce una alteración de fondo (“Background”) dada por una amplia biotitización que afectaron a las formaciones antes mencionadas. Las asociaciones de alteración de este evento preservan la textura original de la roca y acompañan las primeras manifestaciones de mineralización en las rocas de caja (granodioritas y andesitas).

Las alteraciones pervasivas identificadas en el depósito corresponden a alteraciones tardimagmáticas y comprenden el desarrollo de biotita, feldespató potásico y sericita, estrechamente ligada al emplazamiento de pórfidos. Ésta se manifiesta en halos de vetillas tempranas tipo “A” y “EBT”, recristalización de brechas preexistentes o invadiendo la textura primaria de la roca. La mineralización desarrollada en estas asociaciones corresponde a calcopirita y menores proporciones de bornita y molibdenita. Un evento posterior se manifiesta como superposición la alteración hidrotermal temprana, cuyo distintivo es la formación de vetillas tipo “C” bien desarrolladas con halos de sericita gris verde, afectando a clastos de brechas, y en forma masiva reemplazando a la mineralogía primaria de las rocas; ésta se desarrolla principalmente en brechas de turmalina y de polvo de roca. Este evento de alteración es uno de los principales controladores de la mineralización, con el desarrollo de abundante calcopirita-bornita y calcopirita-pirita en granodioritas, pórfidos y brechas tempranas. Finalmente, se reconoce un evento de alteración hidrotermal tardía con la presencia de cuarzo-sericita manifestada

principalmente en halos de vetillas tipo “D” y “E”, obliterando selectivamente la textura de la roca, y con el desarrollo de asociaciones de mena de pirita-calcopirita y pirita-sulfosales de cobre (tennantita-tetrahedrita-enargita). Como último evento en el depósito se reconoce una alteración argílica intermedia relacionada a brechas y vetillas de relleno hematita-especularita, afectando a las unidades anteriores con el desarrollo de pirita dominante con menores proporciones de calcopirita, digenita, calcosina y enargita. Los cuerpos de chimeneas exhiben en parte alteración sericita-arcillas como producto de desvitrificación y locales zonas de vetas tardías con halos sericita-arcillas (Ferraz y Cruz 2011).

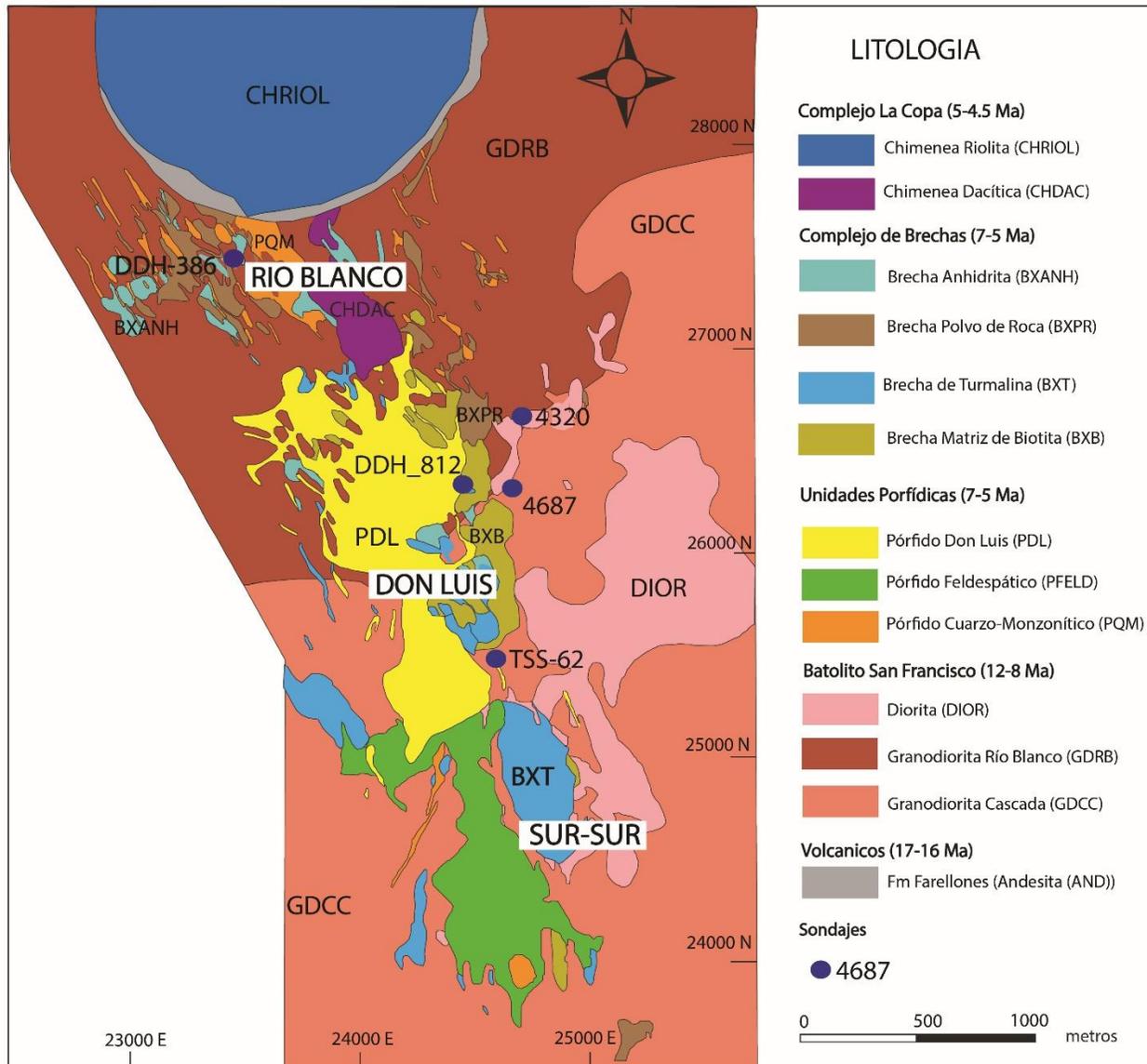


Figura 3. Mapa geológico del yacimiento Río Blanco (Modificado de Ferraz y Cruz 2011).

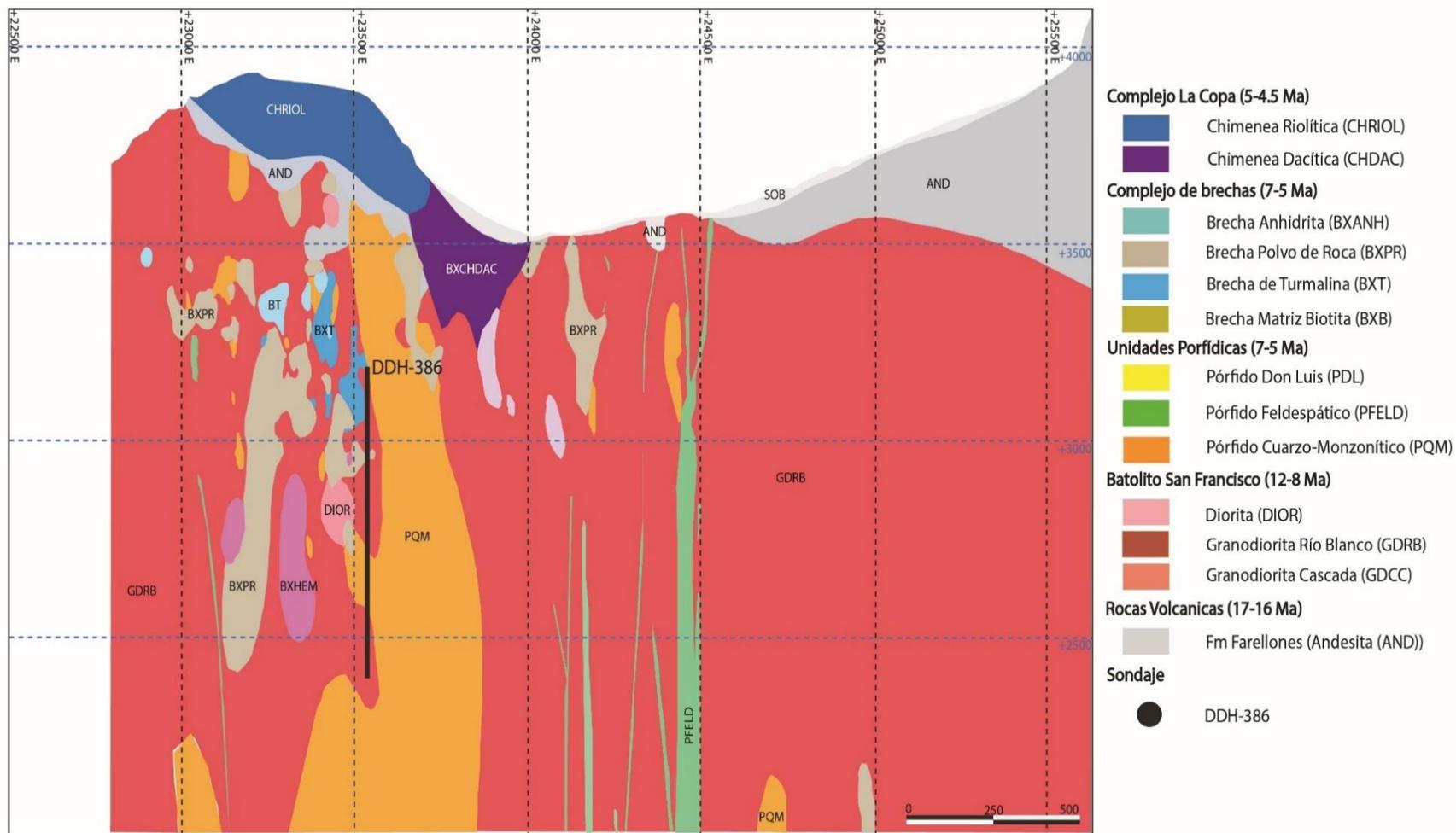


Figura 4. Perfil geológico para el sector Río Blanco. Sondaje DDH-386. Modificado de (CODELCO 2018) Andina-CODELCO, 2017. Las unidades se describen en la sección 3.2 Unidades Litológicas.

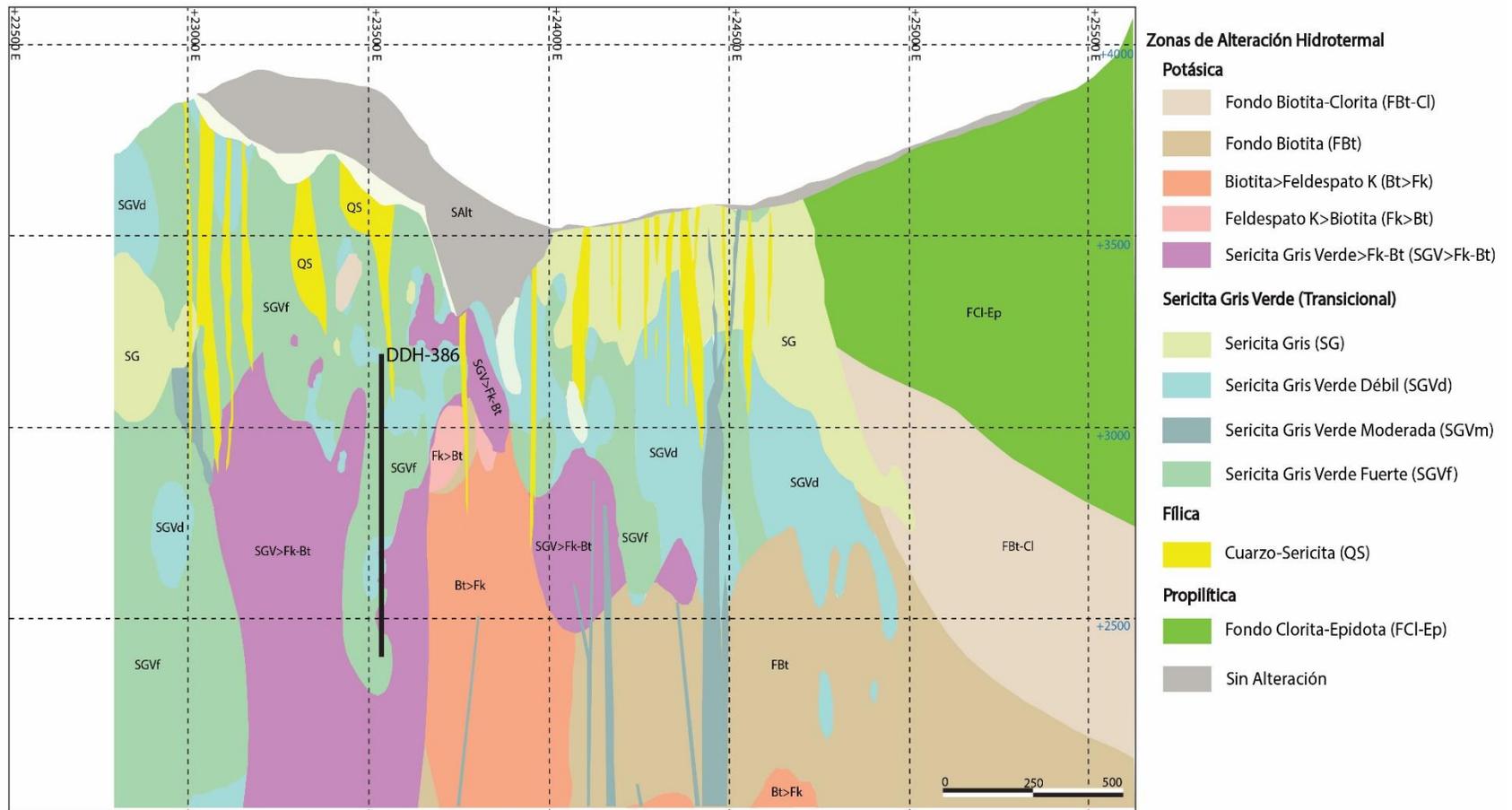


Figura 5. Perfil de alteración para el sector Río Blanco. Modificado de Andina-CODELCO, 2017. Las alteraciones se detallan en la unidad 3.3 Alteración hidrotermal.

3.2 Unidades litológicas

3.2.1 Formación Farellones

En el yacimiento, las rocas más antiguas se reconocen en las porciones centro y norte, y corresponden a lavas estratificadas de la Formación Farellones, que tienen una edad U/Pb (en zircones) de $17,2 \pm 0,05$ Ma. (Deckart et al. 2005). Éstas están representadas por andesitas y andesitas basálticas que corresponderían al miembro superior de la Formación Farellones (Rivano et al. 1990) y representan la roca de caja pre-mineralización. Las rocas de esta formación tienen textura afanítica a porfídica, de color gris oscuro a negro, con escasos fenocristales de plagioclasa (Fig. 6), y al microscopio óptico se han descrito pseudomorfos de minerales máficos y minerales accesorios tales como rutilo, apatito y circón. Esta formación aflora como una cubierta volcánica subhorizontal o como roof pendant entre las rocas intrusivas. Esta unidad se encuentra intruida por granodioritas del Batolito San Francisco, en contacto subhorizontal y por rocas del complejo subvolcánico La Copa. Están parcial o totalmente alteradas a cuarzo-sericita, biotita, clorita y/o epidota (Stambuk et al. 1982). En el sector Río Blanco presentan zonas brechizadas que forman parte de los cuerpos de brecha mineralizados de los niveles superiores.

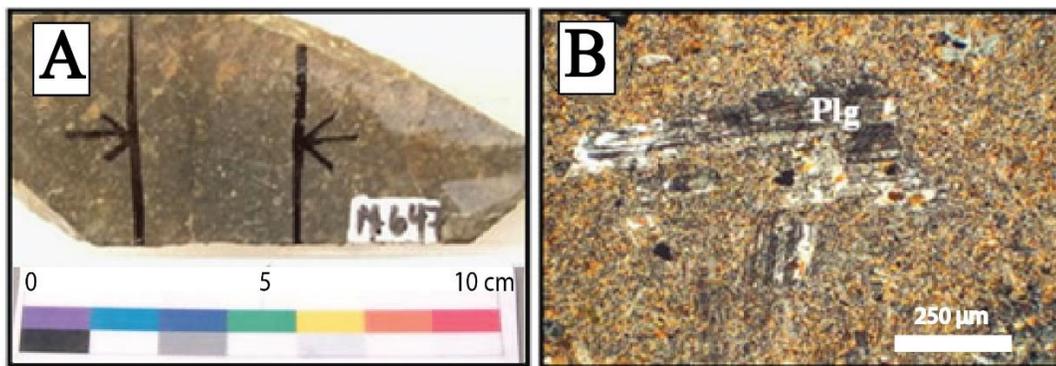


Figura 6. Andesita de la Formación Farellones. a) Aspecto macroscópico de Andesita (muestra DDH-366, 205-215 m); b) Microfotografía de andesita compuesta por fenocristales de plagioclasa alterados parcialmente a biotita en una masa fundamental microcristalina fuertemente biotitizada (muestra DDH-366, 205-215 m, 10x10, NC).

3.2.2. Batolito San Francisco

El Batolito San Francisco, descrito en la sección 2.3.1 cubre un área de cerca de 200 km², y está compuesto de plutones de composición variable entre granodioritas, monzodioritas y tonalitas (Stambuk et al. 1982), que conforman las unidades Granodiorita Río Blanco y Granodiorita Cascada de edades U/Pb $11,96 \pm 0,04$ Ma. y $8,4 \pm 0,23$ Ma. respectivamente (Deckart et al. 2005).

Granodiorita Río Blanco (GDRB)

La Granodiorita Río Blanco es una roca de textura fanerítica de grano grueso a medio, con cristales mayores a 3 mm (Fig. 7 A), y su composición varía desde granodiorítica a tonalítica. Presenta la siguiente composición: cuarzo (20%), plagioclasa (60%), feldespato potásico (10%) y 10% de minerales máficos primarios (biotita y/o anfíbol), estos últimos comúnmente como cristales reemplazados parcial a totalmente a biotita

secundaria. Localmente contiene xenolitos de grano fino de composición diorítica biotitizados. La Granodiorita Río Blanco intruye en contacto irregular a andesitas pertenecientes a la Formación Farellones y es cortada por pórfidos tempranos a tardíos, por el complejo de brechas Río Blanco y por las Chimeneas Dacítica y Riolítica (Figs. 3 y 4). La edad de cristalización obtenida mediante U/Pb en circón es de $11,96 \pm 0,4$ Ma (Deckart et al. 2005).

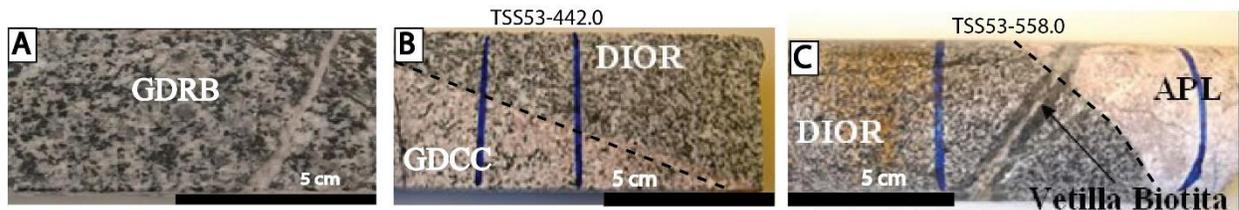


Figura 7. Rocas intrusivas del Batolito San Francisco. A) Granodiorita Río Blanco (GDRB). B) Granodiorita Cascada (GDCC) en contacto con Diorita (DIOR). C) Diorita en contacto con aplita. APL=Aplita; DIOR=Diorita.

Granodiorita Cascada (GDCC)

La Granodiorita Cascada corresponde a una roca de textura fanerítica, tamaño de grano medio (~2 mm), color gris claro variando a tonalidades verdosas y rosadas (Fig. 7B), compuesta por cuarzo (20%), feldespato potásico (15%), plagioclasa (55%) y minerales máficos (10%), principalmente biotita y menor anfíbol. Como minerales accesorios se encuentran circón, magnetita, esfeno y apatita. La edad de cristalización obtenida mediante U/Pb en circón es de $8,4 \pm 0,23$ Ma. (Deckart et al. 2005). La Granodiorita Cascada es la unidad de mayor distribución en el sector Sur-Sur del yacimiento y constituye la roca de caja de casi todas las demás litologías (Fig. 3). Presenta un desarrollo local de alteración propilítica, manifiesto por la presencia de clorita y epidota en vetillas y menos común en diseminado.

Diorita (DIOR)

La diorita se la puede reconocer en el sector suroriental del yacimiento (Fig. 3). La diorita corresponde a un plutón de emplazamiento tardío dentro del Batolito San Francisco estrechamente relacionado con la Granodiorita Cascada, con una edad de cristalización obtenida mediante U/Pb en circón es de $8,16 \pm 0,45$ Ma. (Deckart et al. 2005). En el sector Río Blanco del yacimiento su distribución está restringida al área sur-este (Fig. 4).

La diorita es una roca de textura alotriomorfa, de grano fino (1-2 mm) y color gris verdoso, compuesta por plagioclasa (75%), anfíbol, menor biotita y cuarzo. Se destacan cristales tabulares de anfíbol (Fig. 7B, C). Localmente es posible reconocer minerales máficos con orientación incipiente.

3.2.3. Pórfido Cuarzomonzónico (PQM)

El pórfido cuarzomonzónico se presenta como diques subverticales de orientación N27°W, los cuales intruyen a la Granodiorita Río Blanco y andesitas y a su vez se encuentran cortados por el Complejo de Brechas Río Blanco y que comúnmente son parte de los fragmentos de éstas. Estos pórfidos son de composición variable desde dacítica a cuarzomonzónica, localmente se ha encontrado pórfidos de composición andesítica cortados por las brechas de polvo de roca-biotita. Está compuesto por

fenocristales de plagioclasa (30-50%), en una masa fundamental de cuarzo (5-10%), feldespato potásico (0-15%) y biotita y/o anfíbol (1-5%) de tamaños entre 0,1 y 0,3 mm. Los fenocristales comúnmente forman un denso empaquetamiento en el cual los feldespatos se tocan unos con otros. La masa fundamental es afanítica a microfanerítica felsítica de tonos gris blanco a rosado (40-55%). La edad de cristalización U/Pb en circón es de $6,64 \pm 0,38$ Ma. (Toro et al. 2012).

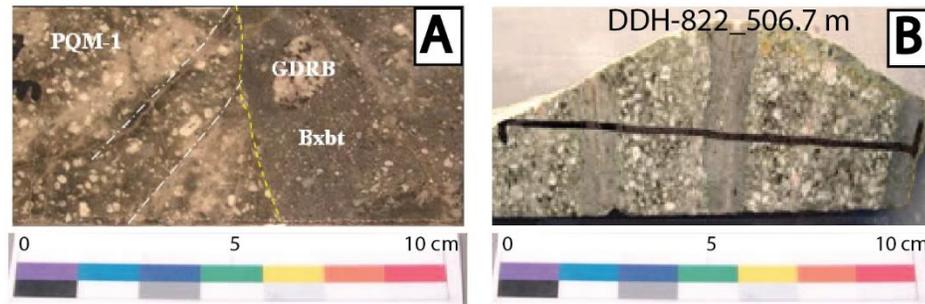


Figura 8. Pórfido cuarzo monzonítico. A) Contacto entre pórfido PQM1 y brecha de polvo de roca y biotita (Bxbt), pórfido con alteración biotítica y vetillas truncadas por matriz de la brecha, B) Pórfido cuarzo monzonítico sondaje DDH-822_506.7. Granodiorita Río Blanco (GDRB).

3.2.4. Pórfido Feldespático (PFELD)

El Pórfido Feldespático se presenta como pequeños cuerpos filoneanos subverticales de potencias menores a los 10 m, que intruyen a la Granodiorita Cascada y corta también al Pórfido Cuarzomonzonítico, con una orientación N30°W (Stambuk et al. 1982). Es una roca de textura porfídica de tono gris a pardo verdoso (Fig. 9 A), con abundante masa fundamental (70%) microfanerítica fina (Fig. 9 C) constituida por cuarzo (<5%), plagioclasa (65%) y minerales máficos biotita-anfíbol (<5%). Los fenocristales corresponden a cuarzo (~1%), plagioclasa (30%) y minerales máficos (~1%). La edad $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita es de $5,12 \pm 0,07$ Ma. (Deckart et al. 2005). Además, el pórfido feldespático corta al Complejo de Brecha de Río Blanco (Fig. 9 B).

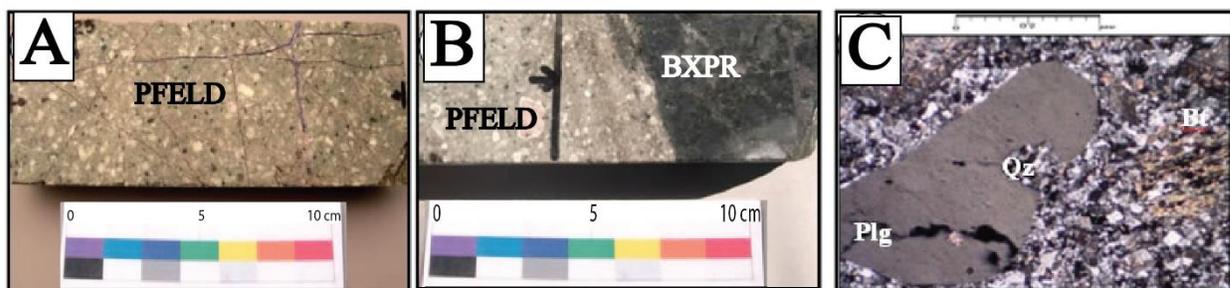


Figura 9. Fotografías de Pórfido Feldespático A) Pórfido Feldespático; B) Pórfido Feldespático con borde de enfriamiento en contacto con Brecha de Matriz Polvo de Roca y biotita-turmalina; c) Fenocristal de cuarzo embahiado en Pórfido Feldespático, cristal de plagioclasa alterado a sericita y máfico obliterado por sericita-clorita (5x10 NC). PFELD= pórfido feldespático; BXPR=Brecha Matriz Polvo de Roca.

La principal diferencia entre el Pórfido Cuarzomonzonítico y el Pórfido Feldespático radica en que el Pórfido Cuarzomonzonítico presenta una textura más cerrada con menor contenido de masa fundamental, mayor contenido de biotita y una masa felsítica gruesa, mientras que el Pórfido Feldespático es un pórfido de textura más abierta y masa

fundamental mucho más fina rica en feldespato potásico y plagioclasa con muy bajo contenido de cuarzo (Suazo 2014).

3.2.5. Pórfido Don Luis (PQM)

En el sector Don Luis el sistema de brechas se encuentra truncado en su parte occidental por el Pórfido Don Luis, de composición dacítica y de gran volumen, mismo que se encuentra distribuido en todo el sector Don Luis, con una tendencia NNW, caracterizado por tener una morfología tipo domo, siendo de mayor volumen en su parte superior y más estrecho en profundidad (Fig. 3). Es una roca de textura porfídica compuesta por fenocristales de plagioclasa de hasta 7 mm, grandes cristales poikilíticos de ortoclasa, ojos de cuarzo de hasta 5 mm y pequeños cristales de biotita, dispuestos en una masa fundamental microcristalina cuarzo-feldespática, posiblemente correspondiente a ortoclasa muy fina junto con cuarzo (Fig. 10 A, B). El Pórfido Don Luis es cortado por vetillas de cuarzo ± sericita ± anhidrita ± sulfuros y vetillas de feldespato potásico, indicando que una menor actividad hidrotermal continuaba luego del emplazamiento del Pórfido Don Luis (Frikken 2004). La edad asignada a este cuerpo porfídico por medio de datación U/Pb en circón es de $5,16 \pm 0,04$ Ma (Toro et al. 2012).

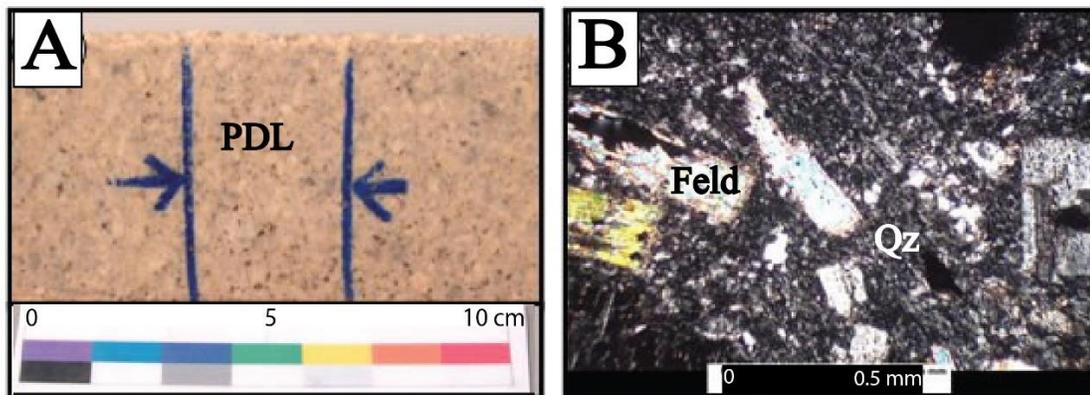


Figura 10. Pórfido Don Luis A) Pórfido Don Luis; B) Pórfido de masa fundamental parcialmente desvitrificada, mostrando un agregado muy fino de cuarzo y feldespato indiferenciado (10x10, LT-NC). PDL= pórfido Don Luis, Feldespato=Feld; Cuarzo=Qz.

3.2.6. Complejo de Brechas Río Blanco

El Complejo de Brechas Río Blanco se compone de múltiples brechas mineralizadas que se hospedan en la granodiorita Río Blanco. Este complejo de brechas se las consideran como brechas hidrotermales y tardimagmáticas que aporta con la mayor cantidad de mineralización en Don Luis, compuesto por brecha magmática (BXMG), brechas de turmalinas (BXT), brechas polvo de roca (BXPR), brechas feldespato potásico (BXSK), brechas de biotita (BXBT) y brechas de anhidrita (BXANH), que se encuentran distribuidas en la parte central y occidental del yacimiento y corresponden a cuerpos sub-verticales con elongación mayoritariamente noroeste y subordinadamente noreste (Ferraz y Cruz 2011). La BXANH se distribuye en el sector de Río Blanco, mientras que hacia el sur aumentan la BXT, BXPR y BXSK (Fig. 3). La BXSK y BXB en el sector de Río Blanco y Don Luis corresponden a una recrystalización tardimagmática de la BXPR, en tanto que esta última unidad (BXPR) corta a la BXT por lo que su emplazamiento es posterior (Ferraz y Cruz 2011).

Brecha magmática (BXMG)

En el sector Río Blanco, la mineralización se hospeda en la denominada BXMG, la cual intruye a la granodiorita Río Blanco y a las rocas volcánicas superpuestas donde se soportan los clastos de granodiorita o andesita dentro de una matriz cementada con biotita (Frikken 2004). La BXMG contiene clastos que están soportados por un material intersticial que varía desde un cemento hidrotermal microgranular parcialmente recristalizado de grano fino (5-20% vol) hasta matriz de polvo de roca compuesta de fragmentos minerales alterados, rotos y fragmentos clásticos. Los minerales primarios de los clastos se encuentran alterados a biotita, sulfuros, sulfatos, cuarzo, magnetita, especularita, turmalina (Frikken 2004). Basado en edades K/Ar y dataciones radiométricas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ se determinó una edad 7,3 – 4,2 Ma (Serrano et al. 1998).

Brecha de turmalina (BXT)

La Brecha de Turmalina es monolítica y esta hospedada en la Granodiorita Cascada y aflora en la parte central del sector Río Blanco (Fig. 3). Consiste de clastos de granodiorita de variable tamaño, soportados por una matriz de polvo de roca molida que ha sido reemplazada casi por completo por cemento de turmalina secundario. El cemento también contiene cantidades variables de sulfuro, sulfato, cuarzo, magnetita, hematita especular y biotita. Los espacios abiertos de la brecha se han llenado con cemento de turmalina y cuarzo más sulfuros. La brecha de turmalina se emplazó al sureste del yacimiento, entre finales del Mioceno y el Plioceno temprano en base a determinaciones de edades radiométricas K/Ar que varían de 7,1 a 5,1 Ma (Serrano et al. 1998).

Brechas polvo de roca (BXPR)

Se les ha clasificado a estas brechas de acuerdo al material clástico dominante en el contenido de la matriz, formado por los fragmentos de cristales de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y localmente cristales de minerales máficos. En las Brecha Polvo de Roca los minerales de cemento/alteración como biotita, feldespato potásico, anhidrita y turmalina, no superan el 20% del volumen de la matriz, y contienen en grados variables cuarzo, anhidrita y sericita. Los fragmentos corresponden a granodioritas, pórfidos y andesitas en distintas proporciones. Algunos fragmentos de granodiorita Río Blanco y de pórfidos poseen vetillas de cuarzo tipo “A” truncadas por la matriz, en tanto que fragmentos y matriz comúnmente se encuentran cortadas por vetillas tipos “B”, “C” y “D”. Muy localmente se ha observado que tales brechas son cortadas por vetillas tipo “A” y se observan fragmentos que contienen vetillas de biotita truncadas. Se concluye que este tipo de brechas se emplazaron con posterioridad al evento de vetillas tipo “EB” y “A”. Su relación temporal aún no está clara (Maldonado et al. 2014).

Brechas de matriz feldespática (BXSK)

La característica principal de este tipo de brechas es el componente principal de su matriz, que consiste de feldespato potásico y cuarzo. Tienen aspecto difuso debido a su recristalización de la matriz, lo que dificulta diferenciar la parte clástica de los fragmentos (Fig. 11). Los fragmentos son de composición felsítica, con fragmentos de pórfidos de composición dacítica y granodioritas. La datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en feldespato potásico de la

matriz de la brecha entrega una edad de $4,79 \pm 0,03$ Ma. (Deckart et al. 2005), sin embargo se sugiere que estas edades no son representativas debido a un reseteo parcial o total del sistema Ar/Ar por la intrusión de cuerpos a temperaturas sobre los 300°C (Deckart et al. 2005).

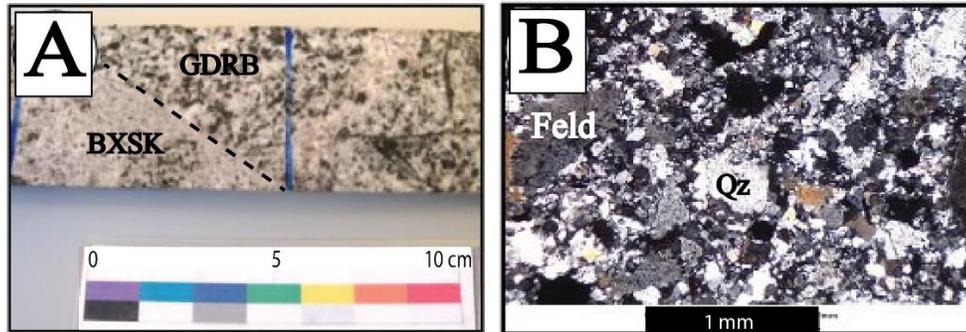


Figura 11. Brecha Matriz Feldespática. A) Aspecto macroscópico de matriz feldespato potásico-cuarzo afectando granodiorita; B) Intercrecimiento de cuarzo y feldespato recrystalizado a partir de polvo de roca, ausencia de maclas y turbidez de feldespato (5x10, LPP).

Brecha de matriz biotita (BXBT)

Se caracterizan principalmente por la matriz de biotita y polvo de roca (Fig. 12), donde éste último puede estar recrystalizado. Los fragmentos pueden ser de granodiorita, andesitas y en menor proporción pórfidos dacíticos y rocas aplíticas. En estas brechas se nota un desarrollo heterogéneo de la alteración tardimagmática, fragmentos de granodiorita con alteración pervasiva con fragmentos de esa misma litología levemente alterados. La temporalidad de estas brechas aún no está clara, sin embargo, se ha observado que las matrices de estas brechas están cortando el evento de biotitización transicional, y están siendo cortadas por vetillas “A” y “B”. Luego, el emplazamiento de este tipo de brechas se encontraría entre los eventos “EBT” y el “A” (Maldonado et al. 2014).

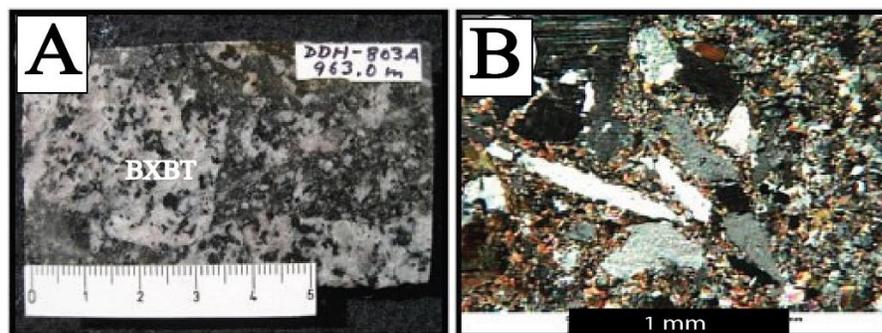


Figura 12. Brecha de Matriz Biotita (BXBT) A) Aspecto macroscópico de brechas de matriz biotita y polvo de roca (muestra DDH-803A 963,0 m); B) Matriz en donde aún se puede identificar fragmentos de polvo de roca tipo esquirlas de cuarzo y feldespato que la recrystalización no ha obliterado (muestra DDH-803A 963,0 m, 6,3x10).

Brechas de matriz anhidrita (BXANH)

Se caracterizan por el desarrollo de matriz especularita-anhidrita afectando a granodioritas (Fig. 13), pórfidos dacíticos y parcialmente a la Chimenea Dacítica, es de color gris claro, clastos con tamaños menores a 10 cm, subangulosos a subredondeados

La matriz constituye aproximadamente un 70 % volumen de la roca y está compuesta principalmente por pequeños fragmentos de cuarzo, plagioclasa, especularita, anhidrita y sulfuros. Su distribución es en el sector oriental de las secciones bajo la Chimenea Riolítica. Los cuerpos de brecha no sobrepasan potencias mayores a 20 m, sin embargo, lateralmente a las cajas se observan inyecciones de especularita con sulfuros. No existen dataciones radiométricas, sin embargo, su posición relativa es posterior a la Chimenea Dacítica y anterior a la Chimenea Riolítica (Maldonado et al. 2014).

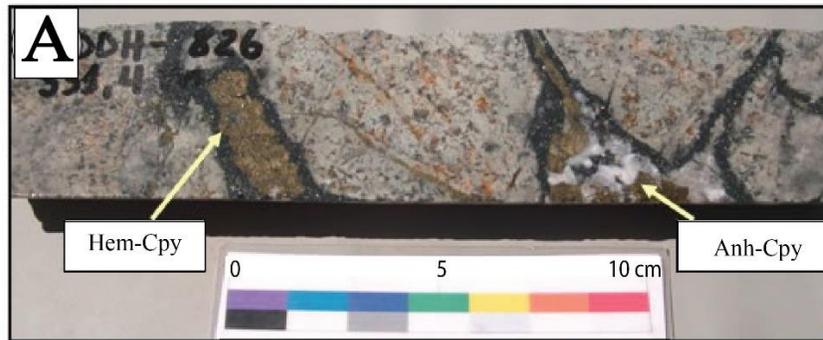


Figura 13. Brecha Matriz Anhidrita (BXANH). A) Aspecto de brecha de matriz especularita-anhidrita con calcopirita (muestra DDH-826 331,4 m); (Modificado de Maldonado et al., 2014).

3.2.7. Chimenea Dacítica (CHDAC)

La Chimenea Dacítica es un cuerpo subvolcánico que aflora entre el Pórfido Don Luis y la Chimenea Riolítica. Está constituida por un pórfido brechizado de composición dacítica con estructuras de bandeamiento (Stambuk et al. 1982). Rocas faneríticas de naturaleza clástica, presenta una coloración gris clara con un tono verdoso discreto (Fig. 14 A). Presenta fenocristales de cuarzo (25%) de forma redondeadas, a veces embahiados. Por lo general no se observa fenocristales de plagioclasas o feldespatos, ya que podrían estar siendo reemplazados por minerales de alteración. Se observan pocos cristales de biotita. La masa fundamental (75%) se compone de vidrio en proceso de desvitricación y recristalización a un agregado microcristalino que resulta muy rico en feldespato potásico (Maldonado et al. 2014). Tiene una forma de cono invertido, cortando andesitas, granodioritas, pórfidos dacíticos y brechas. A su vez está cortado por la Chimenea Riolítica. La edad de esta unidad en el sistema U/Pb en circones es de $4,92 \pm 0,09$ Ma. (Deckart et al. 2005).

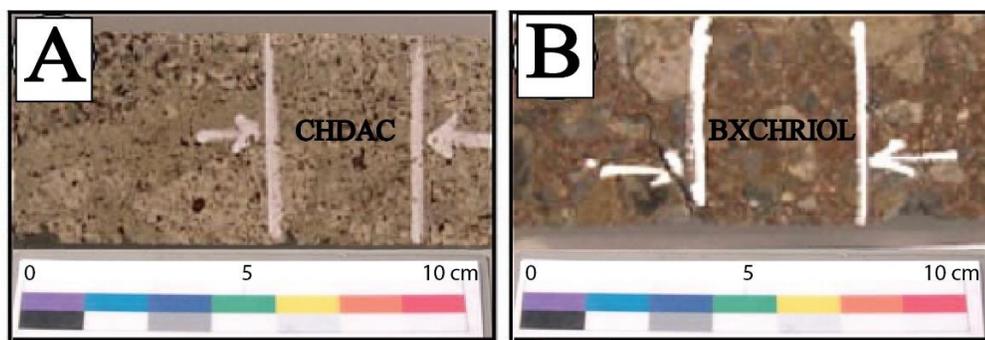


Figura 14. A) Aspecto macroscópico de Chimenea Dacítica (CHDAC) (muestra DDH-448, 166,8 m); b) Aspecto macroscópico de la Brecha de la Chimenea Riolítica (BXCHRIOL) (muestra DDH-160_92.9 m); (Modificado de Maldonado et al., 2014).

3.2.8. Chimenea Riolítica (CHRIOL)

La Chimenea Riolítica comprende un conjunto de cuerpos de composición riolítica cuyas diferencias texturales evocan un origen subvolcánico efusivo como también ígneo intrusivo, que afloran en la parte norte del sector Río Blanco (Fig. 14 B). La chimenea riolítica es el complejo intrusivo que se emplazó al final en el depósito mineral, resultando en la destrucción de zonas mineralizadas en el sector Río Blanco (Serrano et al. 1998). Esta unidad comúnmente genera una unidad clástica formando brechas cuya matriz es la Chimenea Riolítica y fragmentos de diversas litologías. La Brecha Chimenea Riolítica comprende una matriz de cristales fracturados variados y fragmentos líticos menores aglutinados al parecer por polvo de vidrio argilizados. Los fragmentos corresponden a intrusivos, dacitas, andesitas y volcánicos indiferenciados. Esta unidad ha sido datada por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita entregando una edad de $4,03 \pm 0,19$ Ma (Deckart et al. 2005).

3.3. Alteración hidrotermal

Las zonas de alteración hidrotermal en el yacimiento Río Blanco, fueron definidas en base a la paragénesis de los minerales de ganga, tipo de mineralización y abundancia relativa de las asociaciones de alteración, relaciones de sobreimposición, alteraciones retrógradas. Estas asociaciones de alteración se esquematizan en la Tabla 1:

3.3.1. Alteración clorita-epidota (FCI-Ep)

Contemporáneamente con el desarrollo de la alteración potásica de fondo, en las porciones más externas o distales del depósito se generan zonas de alteración dominadas por asociaciones de minerales de menor temperatura como clorita y epidota (Fig. 5), con minerales accesorios tales como albita, magnetita, rutilo y ocasionalmente actinolita-tremolita (Figs. 15 A-D). Puede ser considerada como una alteración propilítica, aunque de menor desarrollo. La cloritización de los minerales máficos formadores de roca se desarrolla en forma selectiva preservando las características primarias de los cristales originales, al igual que la muscovita cuando reemplaza a los feldespatos. Esta asociación de fondo pueden existir zonas con desarrollo de vetillas con halos de albita y localmente albitización de feldespatos. La mineralización en las zonas de clorita-epidota es de bajo contenido de sulfuros comprendido principalmente de pirita diseminada y localmente pirita relacionada a vetillas tipos "C" y "EBT" (Díaz y Solé 2014).

3.3.2. Alteración biotítica de fondo (FBt)

La asociación de alteración biotítica de fondo corresponde a la alteración a biotita secundaria reemplazando minerales máficos primarios en rocas ígneas, misma que se asocia con mineralización de calcopirita y menor pirita finamente diseminada (Díaz y Solé 2014). La asociación de alteración biotítica de fondo está distribuida en las partes profundas del yacimiento (Fig. 5), restringida a las unidades intrusivas y esta se manifiesta por una intensa biotitización selectiva de los minerales máficos en diversos grados de intensidad (Figs. 16). Esta alteración es gradual y decrece tanto hacia los márgenes del depósito como hacia los niveles más someros (Solé et al. 2014).

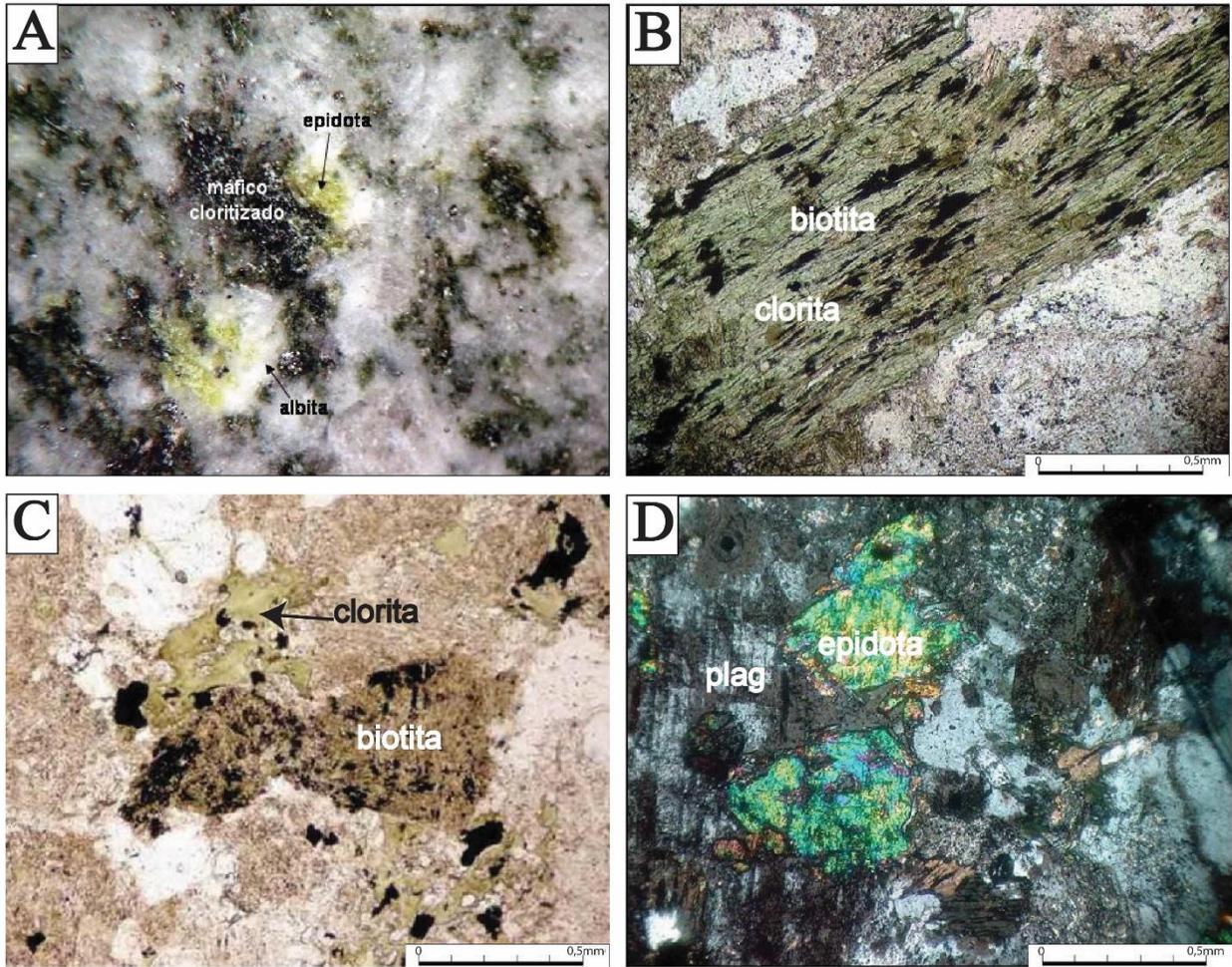


Figura 15. Asociación clorita-epidota. A) Cuarzodiorita afectada por una moderada alteración clorita-epidota, albita y sericita; B) Biotita fuertemente alterada a clorita y rutilo (NC 5x10); C) Seudomorfos de anfíbol compuestos por biotita verde y opacos, preservando la forma cristalina (NC 5x10); D) Epidota en plagioclasa junto a máfico alterado a clorita (NC 5x10). Plagioclasa=plag.

3.3.3. Alteración biotita-clorita de fondo (FBt-CI)

Esta asociación de alteración comprende volúmenes de roca alteradas a biotita secundaria, en un grado de menor intensidad que en la alteración Fondo Biotita y con presencia de clorita asociada. La alteración FBt-CI es considerada como una alteración selectiva con un alto grado de textura preservada, en la cual los minerales máficos primarios se encuentran biotitizados parcialmente, es decir, aún no se encuentran estables con las biotitas primarias con cloritas, y se puede identificar formas cristalinas remanentes de los anfíboles biotitizados, puntualmente se observa epidota, pero de forma discontinua a nivel de trazas (Figs. 17 A-D). Esta asociación de alteración, la mineralización de calcopirita y pirita están presentes principalmente en guías de biotita y en conjuntos de vetillas. Esta alteración es transicional entre el ambiente de asociación de fondo biotítico y de clorita-epidota (Fig. 5) (Díaz y Solé 2014).

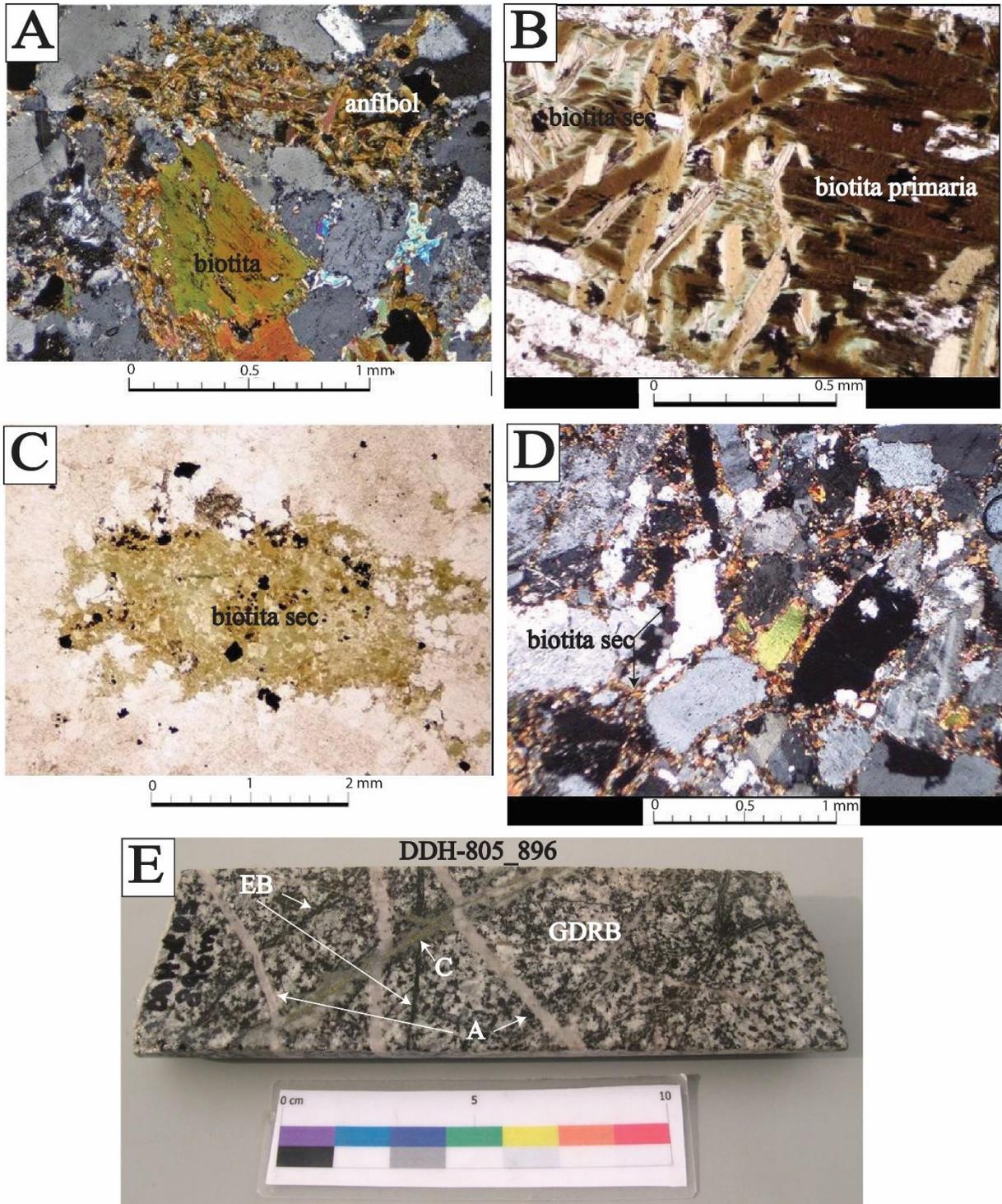


Figura 16. Asociación de alteración biotítica de fondo. A) Tonalita con minerales máficos (biotita y anfíbol) reemplazados por biotita secundaria, cuarzo y opacos. La biotita se encuentra reemplazada solo en los bordes, mientras que el anfíbol exhibe un fuerte reemplazo por biotita fina obliterando características primarias, (NC 5x10); B) Fenocristal de biotita alterado parcialmente a biotita secundaria (NC 10x10); C) Tonalita porfídica contiene seudomorfos de fenocristales de minerales máficos de hasta 4,5 mm; D) Brecha de matriz polvo de roca cementado por biotita secundaria fina (NC 5x10); E) Granodiorita de grano medio con asociación potásica biotítica de fondo afectada por vetillas de biotita tipo "EB" y vetillas de cuarzo y feldespato potásico tipo "A", en forma local vetilla de cuarzo con halo sericita gris verde tipo "C" corta a las vetillas anteriores, muestra DDH-805_896.

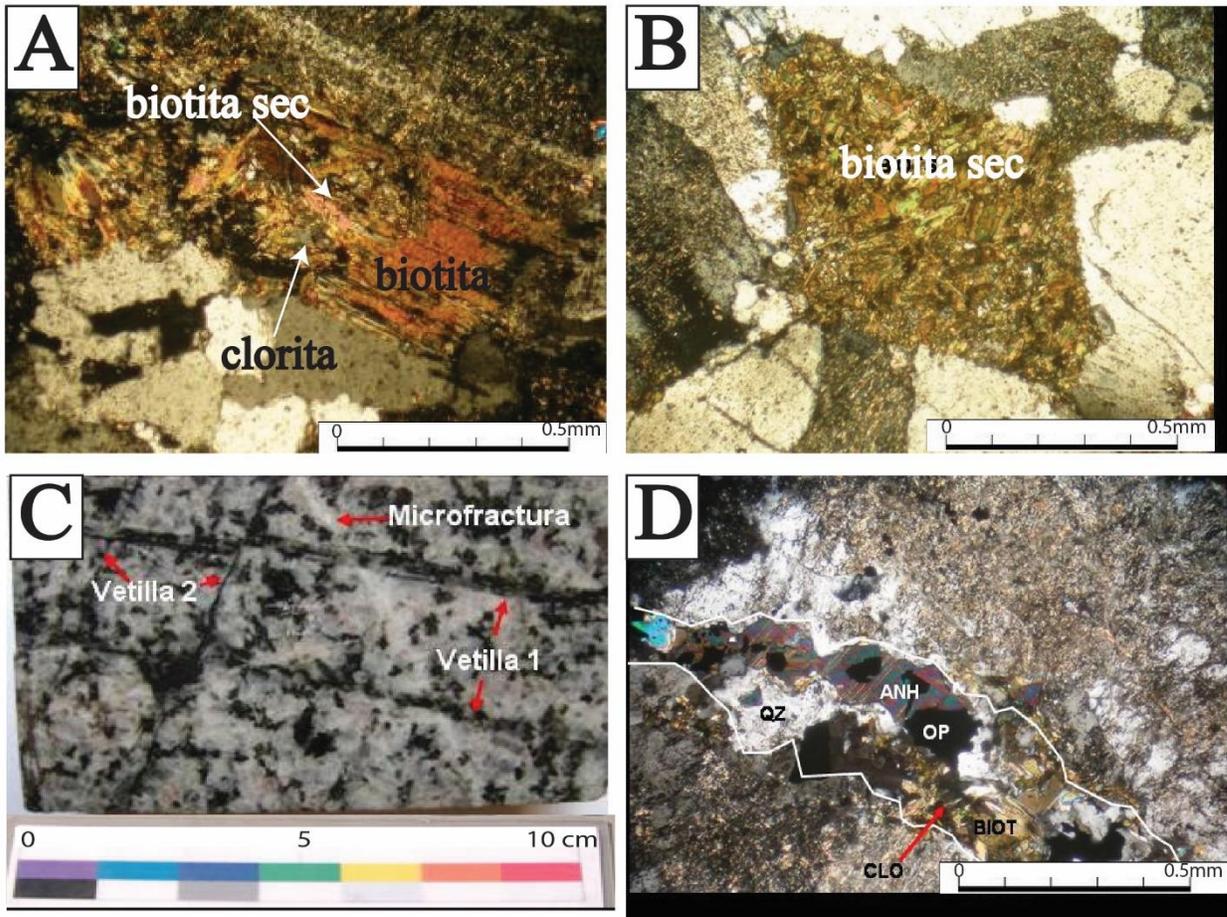


Figura 17. Alteración biotita-clorita de fondo A) Biotitas primarias alterada parcialmente a biotita secundaria y clorita (NC 10x10); B) Seudomorfo de hornblenda completamente reemplazado por biotita secundaria (NC 5x10); C) Vetillas con sutura central y halo pervasivo de alteración. La sutura esta rellena con cuarzo, anhidrita, biotita secundaria y calcopirita; D) Vetilla rellena de cuarzo (Qz), anhidrita (Anh), biotitas secundarias cloritizadas y opacos. (NC 5x10).

3.3.4. Alteración feldespato potásico mayor que biotita (Fk>Bt)

Esta alteración se caracteriza por la presencia de feldespato potásico, cuarzo, albita, biotita, sericita, anhidrita, magnetita y sericita verde (Figs. 18 A, B). Se encuentra restringida a las partes profundas del sistema de brechas tempranas de polvo de roca y feldespato potásico y subordinada en rocas intrusivas granodioritas (Fig. 5) (Solé et al. 2014). Sus modos de ocurrencia principal son matriz o cemento de brechas, en vetillas tipo “A”, “B” y tipo “EB-EBT”, además zonas con alteración penetrativa, con feldespato potásico-cuarzo penetrativo de aspecto aplítico, rocas con alteración pervasiva de la plagioclasa a feldespato potásico ± biotita y máficos biotitizados (Fig. 18 E). También se la encuentra en bordes de clastos de brechas con matriz de feldespato potásico y sílice, o en el centro de clastos de brechas con matriz de turmalina (Díaz y Solé 2014).

La mena asociada a esta alteración es principalmente calcopirita, comúnmente acompañada de bornita, molibdenita, y piritita escasa o ausente (Figs. 18 C, D).

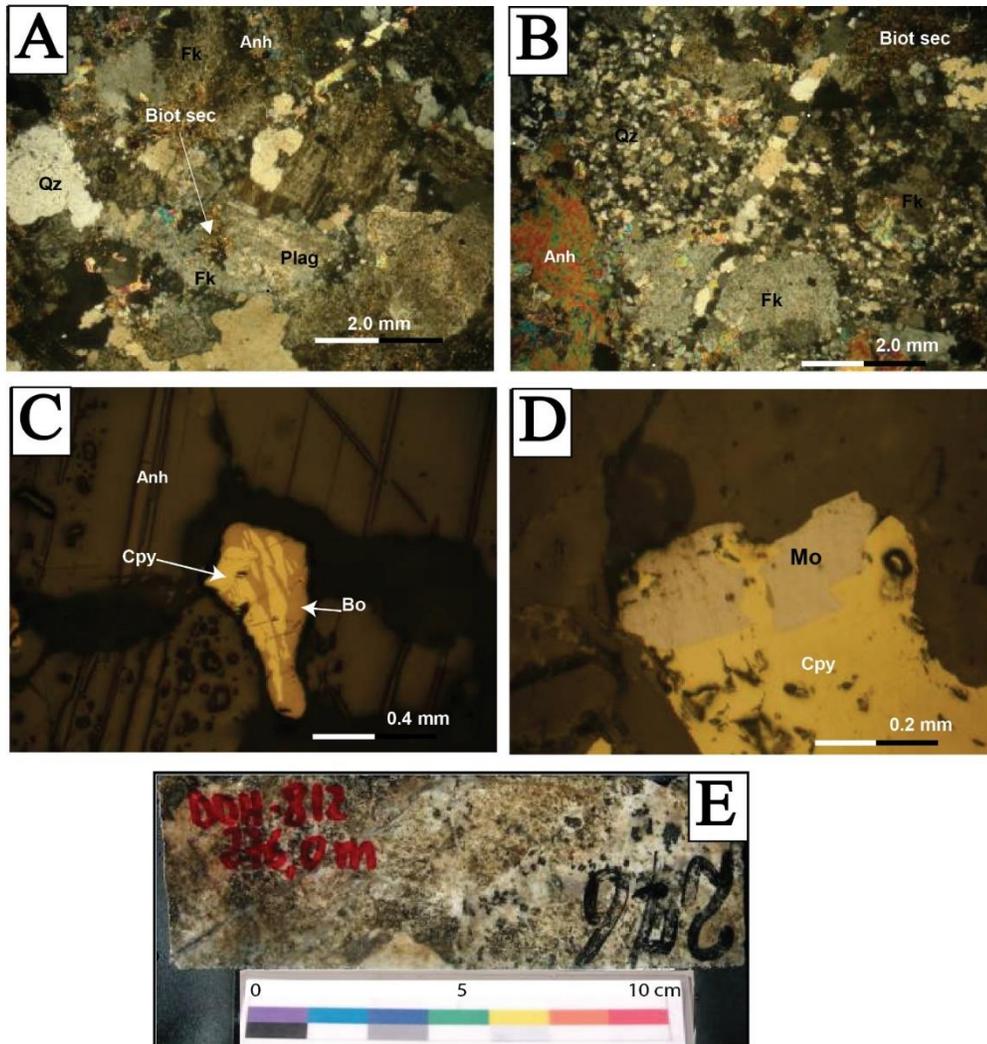


Figura 18. Alteración feldespato potásico mayor biotita (Fk>Bt) (muestra DDH-812_276). A) Granodiorita compuesta por cuarzo (Qz), plagioclasa (Plag) y feldespato potásico (Fk), plagioclasas alteradas a feldespato potásico, biotitas secundarias (Biot sec) y anhidrita (Anh) (NC x20). B) Granodiorita cortada por banda de brechización y por vetilla rellena de Qz, muestra alterada por Anh y biotitas secundarias, la banda de brechización está compuesta por fragmentos de Qz y Fk (NCx20). C) Calcopirita (Cpy) intercrecida con bornita (Bo), en textura de exsolución; la Cpy y Bo están intercrecidas con Anh. D) Molibdenita (Mo) y Cpy en textura envolvente. E). Granodiorita con textura obliterada por alteración potásica pervasiva.

3.3.5. Alteración biotita mayor que feldespato potásico (Bt>Fk)

La alteración de biotita penetrativa está constituida por biotita secundaria como mineral dominante, asociada a feldespato potásico, anhidrita, magnetita, cuarzo y sericita. Se encuentra distribuida principalmente hacia el este del sistema central de brechas tempranas y restringido a las unidades intrusivas (Fig. 5) (Solé et al. 2014). Sus modos de ocurrencia principal son en matriz o cemento de brechas, en vetillas tipos “EB-EBT” y en rocas con alteración de biotita penetrativa masiva alterando totalmente los minerales máficos de la roca, comúnmente formando cúmulos, con texturas ocelares, y en menor medida, reemplazando feldespatos (Díaz y Solé 2014). Las menas asociadas a esta alteración ocurren esencialmente en forma diseminada, aunque en algunos casos la mineralización en vetillas es significativa incluyendo calcopirita, con menor bornita, y pirita

escasa o ausente (Figs. 19). En esta asociación es frecuente observar conjuntos de vetillas tipos “EB” ± “EBT” ± “A” ± “B”, y menor proporción tipo “C” y “D-E”.

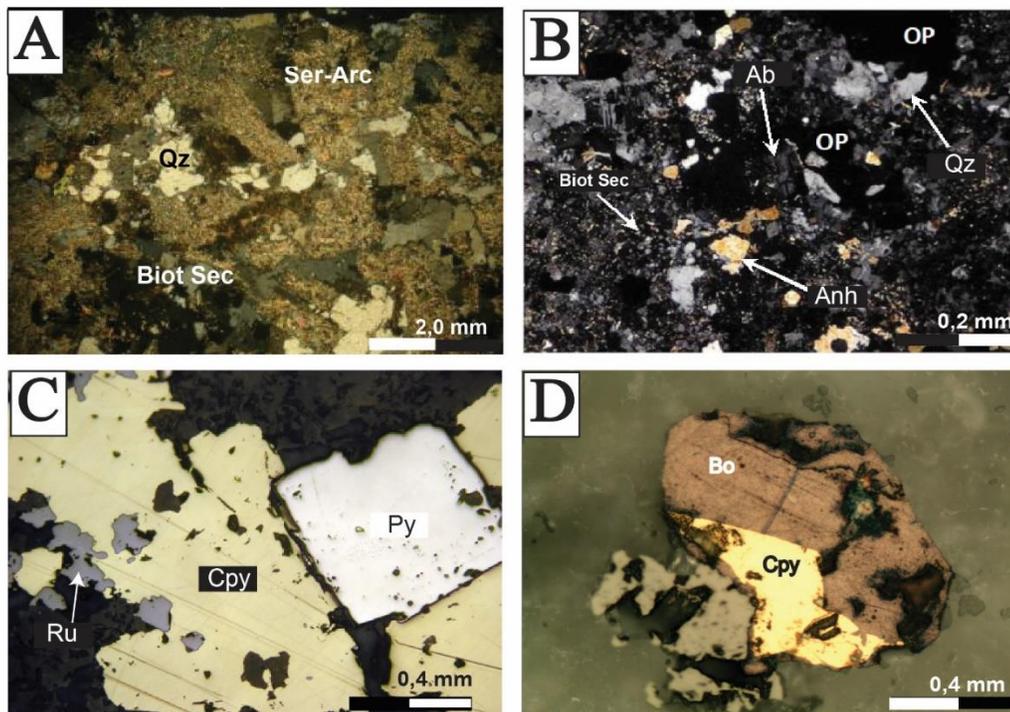


Figura 19. Alteración Biotita penetrativa. A) Fragmento de diorita, compuesto por cuarzo y plagioclasa completamente alterada a biotita secundaria, sericita y arcillas (NC x20). B) Matriz de brecha constituida por feldespato potásico, albita, anhidrita y opacos, con presencia fina diseminada de biotita reemplazando a los feldespatos (NC x10). C) Mineralización diseminada de Py sobrecrecida tangencialmente por Cpy asociada a rutilo. D) Bornita intercrecida con Cpy en textura de intercrecimiento de bordes mutuos. (Luz reflejada 10x10).

3.3.6. Alteración transicional (SGV>Fk-Bt)

Las asociaciones de alteración tempranas (potásica) gradan transicionalmente a una zona de mezcla donde la sericita gris verde es mayor que el feldespato potásico-biotita. Esto se caracteriza por la coexistencia de sericita gris verde sobreimpuesta a las asociaciones tempranas, conformando una envolvente externa a los núcleos potásicos (Fig. 5) (Solé et al. 2014). Esta asociación mineralógica de alteración hidrotermal se manifiesta como halos destructivos de sericita gris verde de vetillas tipo “C”, sobreimpuestas a las asociaciones de alteraciones potásicas, y los límites más profundos de esta alteración se encuentran abiertos en profundidad. Lateral y verticalmente, estas envolventes de alteración de asociaciones tempranas gradan a una zona de dominio de asociación de alteración sericita gris verde.

3.3.7. Alteración sericita gris verde (SGV)

La alteración sericita gris verde corresponde a una de las principales alteraciones presentes en el yacimiento, y se manifiesta en rocas de caja granodioríticas, brechas y pórfidos, agrupando a minerales esencialmente del tipo filosilicatos como micas verdes (fengita, celadonita) y muscovita (variedad sericita). Localmente se han observado proporciones importantes de clorita, biotita flogopita (verde), magnetita y contenidos menores de anhidrita, cuarzo y feldespato potásico (Figs. 20). La sericita de esta

alteración tiende a ser más gruesa que la de la asociación cuarzo-sericita (Díaz y Solé 2014). Su principal modo de ocurrencia está representado en las vetillas tipo “C”, con destrucción total de la textura original, alteración masiva del polvo de roca de la matriz de las brechas y alteración de clastos de las brechas. De acuerdo al grado de intensidad del proceso hidrotermal responsable de este evento de alteración, se identificaron tres eventos, los mismos que corresponden a sericita gris verde fuerte (SGVf), sericita gris verde moderada (SGVm) y sericita gris verde débil (SGVd) (Solé et al. 2014).

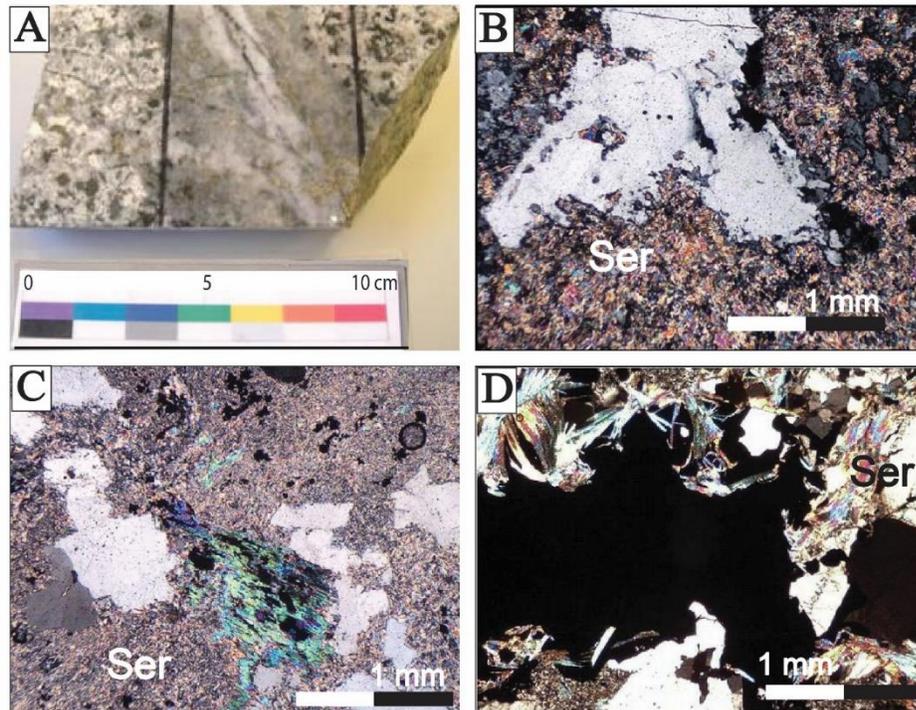


Figura 20. Alteración sericita gris verde. A) Granodiorita cortada por vetilla de cuarzo con halo de sericita gris verde, B) Alteración pervasiva sericita gris verde, cuarzo intersticial y pseudomorfos de biotita alterada a biotita secundaria. C) Diorita cortada por vetilla de halo sericita gris verde y sutura de cuarzo, anhidrita y opacos. D) Vetilla opacos (calcopirita) intercercidos con sericita gris y cuarzo.

La mena asociada a esta alteración corresponde a calcopirita, con menor pirita y bornita. Esta asociación de mena grada a pirita en las porciones superiores y en los márgenes del yacimiento.

3.3.8. Alteración cuarzo-sericita (QS)

Un evento de carácter tardío es representado por la alteración cuarzo-sericita, las misma que se encuentra distribuida en el margen oriental en el sector Don Luis y márgenes occidental y oriental en el sector Río Blanco, en torno al complejo subvolcánico de chimeneas, y desarrollada en las unidades intrusivas, brechas y pórfidos (Solé et al. 2014). Esta asociación de alteración está definida esencialmente por la presencia de cuarzo, illita-sericita (grano muy fino), con cantidades variables de arcillas (caolinitas-esmectitas), carbonatos y anhidrita. Esta alteración ocurre en las vetillas del tipo “D” y “E” con reemplazo total de la roca pero sin destrucción de su textura, alteración de la matriz y clastos de las brechas (Figs. 21). Se puede presentar además como alteración pervasiva en granodioritas. A menudo termina obliterando por completo la textura de la roca original en pórfidos (Díaz y Solé 2014).

La mena asociada a esta alteración es esencialmente pirita, con menor calcopirita. Presenta sulfosales de cobre (enargita-tennantita-tetrahedrita), esfalerita y galena.

3.3.9. Asociación argílica penetrativa (Arg)

Los minerales típicos de esta asociación de alteración son illita-sericita, caolinita, limonitas, esmectitas, además de carbonatos. La ocurrencia de esta alteración se encuentra en sectores someros del yacimiento, asociada con zonas de falla o con zonas de brechas tardías como la Brecha de Chimenea Dacítica o Brecha de Turmalina. En otros sectores se ha reconocido esta asociación, caracterizada por la presencia de alteración parcial o total de los feldespatos por arcillas esmectíticas verdes o montmorillonitas y máficos con reemplazo de clorita-sericita-arcillas y también especularita. Esta asociación se ha reconocido comúnmente asociada a craquelamiento o en los clastos de la unidad de Brecha de Hematita.

La mena asociada a esta alteración es esencialmente pirita ± calcopirita ± bornita ± sulfosales de cobre.

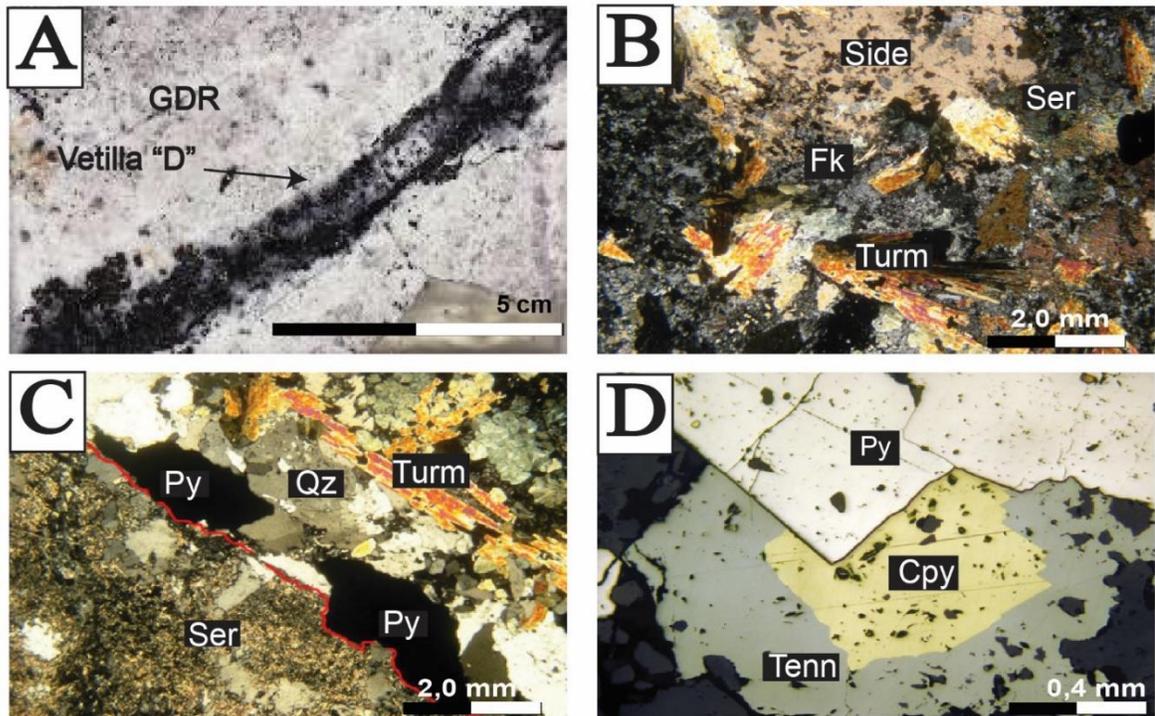


Figura 21. Granodiorita Río Blanco (muestra TSS-62_693). A) Granodiorita de grano fino cortada por una veta con halo de cuarzo-sericita y arcillas, presenta sutura de pirita, turmalina y en menor grado calcopirita. B) Reemplazo penetrativo de feldespato potásico local y fuerte siderita, turmalina acicular radial en cúmulos. C) Sutura de vetilla compuesta por turmalina, cuarzo, pirita; halo de sericita de manera sobreimpuesta. D) Sulfuros predominantes pirita sobrecrecida tangencialmente por calcopirita con reemplazo en borde de grano de tennantita.

TIPO DE ASOCIACIÓN ALTERACIÓN	TEXTURA PRESERVADA	ALTERACIÓN DE LOS MINERALES MÁFICOS	MINERALOGÍA PRINCIPAL	ASOCIACIÓN DE VETILLAS	ESPECIES Y OCURRENCIA DE SULFUROS	TOTAL DE SULFUROS	OTRAS CARACTERÍSTICAS
BIOTÍTICA DE FONDO (FBt)	≥ 85-90 %	>50%→ Bt Sec.	Bt Sec. ± Mgt Sec ± Rt	< 5 % tipos EB ± EBT ± A ± B ± < 5-10% tipo D ± < 15 % tipo C	Cpy >> Py ± Bo Diss > Vet	≤ 1.0 -1.5 %	Mineralización diseminada asociada a los minerales máficos biotitizados, pérdida de forma y clivajes de máficos, común observación de rutilo en los sitios de minerales máficos con Cpy asociada.
BIOTITA-CLORITA DE FONDO (FBt-Cl)	≥ 85-90 %	<50%→ Bt Sec.	Bt Sec. ± Mgt Sec ± Cl	< 5 % tipo EB ± < 5-10% tipo C-D	Cpy-Py Diss ≥ Vet	≤ 1.0 -1.5 %	Biotitización parcial, aun estables máficos biotita, se observan pseudomorfos de anfíbol biotitizados, mineralización en guías de biotita o guías de sulfuros, escasa mineralización diseminada
CLORITA-EPIDOTA DE FONDO (FCI-Ep)	≥ 80-90 %	± Cl	Cl ± Ep ± Carb ± Ab ± Mgt Prim	< 20% tipos C-D ± < 5% EB → Py	Py>Cpy Vet >> Diss	≤ 1.0 %	Minerales máficos presentan formas y clivajes, cloritización amplia y epidota como accesorio. Escasa mineralización diseminada
BIOTITICA O FELDESPATO POTÁSICO PENETRATIVA (Fk>Bt o Bt>Fk)	≥ 60 %	Bt Sec. sobrecrecidos	Fk ± Bt Sec. ± Ser ± Tur ± And ± Cor	> 15-20 % tipos EB ± EBT ± A ± B ± < 5-10% tipo D ± < 15 % tipo C	Cpy > Bo ± Py Diss>Vet (FK>Bt) Vet>Diss (Bt>Fk)	>1-2%	Textura fuertemente obliterada por alteración potásica con dominios biotíticos o dominios feldespáticos, comúnmente feldespatos alterados a sericita-biotita. Mineralización en general diseminada asociada a matriz de brechas recristalizadas o a vetillas EBT
SERICITA GRIS VERDE PENETRATIVA (SGV)	≥ 60%	Bt Sec. y/o Ser	Ser ± Qz ± Bt Sec	>10% tipos C < 5-15% tipo D	Cpy>Py ± Bo en FBt Py>>Cpy en FBt-Cl Vet >> Diss	≥1-2 %	Roca fuertemente obliterada por alteración SGV asociada a vetillas, halos de brechas o halos difusos, intensa mineralización diseminada y/o en halos de vetillas
CUARZO SERICÍTICA PENETRATIVA (QS)	≥ 60 %	Ser ± Cl	Ser ± Qz ± Carb ± Arc ± Cl	> 20 % tipo D y/o E ±	Py>Cpy >> En-Ten-Tet >> Esf-Ga Vet >> Dis (QS)	≥3-4% %	Textura obliterada por QS con presencia de arcillas blancas, localmente desarrollo de clorita y presencia común de carbonatos diseminados
ARGÍLICA PENETRATIVA (Arg)	≥ 60 %	Argilizados o ausentes	Arc ± Ser ± Qz ± Carb	> 5% tipo E	Py>Cpy En-Ten-Tet	Variable	Alta presencia de arcillas asociadas a cuarzo sericita, común carbonatos y posiblemente sulfosales

Tabla 1. Asociaciones de alteración hidrotermal definidas para el yacimiento Río Blanco. BtSec=biotita secundaria; Mgt=magnetita; Rt=rutilo; Cl=clorita; Ep=epidota; Carb=carbonatos; Ab=albita; Fk=feldespato potásico; Tur=turmalina; Ser=sericita; Qz=cuarzo; Arc=arcilla; Cpy=calcopirita; Py=pirita; Bo=bornita; En=enargita; Ten=tennantita; Tet=tetrahedrita; Esf=esfalerita; Ga=galena. Copilado de (Díaz y Solé 2014)

CAPÍTULO 4: DISTRIBUCIÓN DE PLATA EN EL YACIMIENTO RÍO BLANCO

4.1 Información general

En este capítulo se utilizó la información de la base de datos geoquímica ICP-MS multi-elemento (51 elementos) de sondajes a diamantina (10.140 muestras roca total), como también datos proporcionados por el Departamento de Geometalurgia de la División Andina de CODELCO, para determinar la distribución de la Ag en el yacimiento Río Blanco.

Este estudio contó con la aplicación de técnicas estadísticas, entre las que se destaca análisis de correlación (matriz de correlación) seguido de un análisis estadístico descriptivo de los elementos que presentan mayores correspondencias, sean éstas positivas o negativas. El análisis estadístico se realizó mediante el software ioGAS 6.2, con el cual además se generaron diagramas de cajas (o box plot) para representar los parámetros estadísticos descriptivos de los elementos analizados, entre ellos el promedio, la mediana, la moda, desviación estándar y los valores máximos y mínimos. Esta información se cotejó en función de los parámetros geológicos de los mapeos de los sondajes a diamantina, lo que permitió tener una idea sobre la distribución de Ag en función de la litología, zonas de alteración y mineralización. En base a esta información, sumado a la interpretación de diagramas de dispersión para aquellos elementos que presentaron las mayores correlaciones (positivas o negativas), al final del capítulo se discuten las conclusiones más importantes de este análisis, el cual sirve de base para el desarrollo de los capítulos posteriores.

4.2 Estadística descriptiva

El trabajo de análisis estadístico de la base de datos ICP-MS de roca total partió con la depuración de ésta, filtrándose los valores anómalos por debajo de los límites de detección para cada elemento. Luego, de los 51 elementos incluidos de la base de datos se seleccionaron los 12 elementos de mayor interés para este estudio, los cuales corresponden a Ag, Cu, In, Se, Sb, As, Bi, S, Mo, Re, Zn y Pb. Posteriormente, y con el propósito de establecer la varianza entre estos elementos, se realizó una matriz de correlación utilizando el software ioGAS 6.2 (Tabla 2).

Tabla 2. Matriz de correlación elementos seleccionados. Color amarillo=correlaciones moderadas-bajas positivas; color naranja= correlaciones moderadas positivas; color rojo= correlaciones altas positivas.

Correlación	Ag	Cu	In	Se	Sb	As	Bi	S	Mo	Re	Zn	Pb
Ag	1											
Cu	0,71	1										
In	0,53	0,56	1									
Se	0,51	0,48	0,12	1								
Sb	0,26	0,09	0,28	0,04	1							
As	0,30	0,15	0,35	0,03	0,72	1						
Bi	0,35	0,17	0,22	0,21	0,24	0,32	1					
S	0,36	0,43	0,43	0,25	0,12	0,20	0,17	1				
Mo	0,32	0,40	0,14	0,40	0,01	0,02	0,08	0,18	1			
Re	0,32	0,37	0,08	0,47	0,02	0,02	0,08	0,15	0,81	1		
Zn	0,26	0,07	0,32	0,01	0,66	0,66	0,21	0,11	0,012	0,001	1	
Pb	0,18	0,06	0,22	0,02	0,58	0,62	0,59	0,08	0,001	0,002	0,66	1

En la Tabla 2, se observa que las correspondencias más altas positivas (color rojo) corresponden a los pares de elementos Mo vs. Re ($r= 0,81$), As vs. Sb ($r= 0,72$) y Ag vs. Cu ($r= 0,71$), mientras que las correspondencias moderadas positivas (color naranja) están representados por los pares de elementos Zn vs. Pb ($r= 0,66$), As vs. Zn ($r= 0,66$), Sb vs. Zn ($r=0,66$), As vs. Pb ($r= 0,62$), Bi vs. Pb ($r= 0,59$), Sb vs. Pb ($r= 0,58$), Cu vs. In ($r= 0,56$), Ag vs. In ($r=0,53$), Ag vs. Se ($r=0,51$) y Cu vs. Se ($r= 0,48$).

La Ag presenta correspondencias bajas positivas (color amarillo) con los elementos S ($r= 0,36$), Bi ($r=0,35$), Mo ($r= 0,32$), Re ($r= 0,32$), As ($r= 0,30$), Sb ($r=0,26$), Zn ($r= 0,26$) y Pb ($r= 0,18$).

El Co y el Fe no presentan ninguna correlación con la Ag, motivo por el cual no fueron incluidos en la matriz de correlación, pero se identificó una correspondencia positiva moderada a alta entre Co vs. Fe con un coeficiente de correlación $r=0,63$.

Los parámetros considerados para el análisis estadístico descriptivo se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Análisis estadístico descriptivo de Ag y elementos asociados en el yacimiento Río Blanco-Chile

Elemento	Ag	Cu	In	Se	Sb	As	Bi	S	Mo	Re	Zn	Pb
Unidad de concentración	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Número muestras	10.144	10.144	10.141	9.208	10.144	10.144	10.144	10.131	10.144	10.110	10.144	10.144
Promedio	1,78	6.636,9	0,19	1,42	5,06	61,66	1,33	18.888,88	192,48	0,06	108,78	26,12
Desviación estándar	1,56	4.997,67	0,13	1,47	39,56	221,86	3,94	11.116,32	335,15	0,11	276,51	158,61
Mediana	1,43	5.776,65	0,16	0,5	1,18	10	0,63	17.000	87,28	0,02	62	10,4
Mínimo	0,04	91,1	0,02	0,4	0,12	0,10	0,03	50	0,37	0,001	8	0,25
Máximo	28,1	66.000	2,68	18	2.616,47	10.000	281	100.000	6.668,46	3,266	10.000	10.000
Límite Detección Inferior	0,01	0,20	0,01	0,1	0,05	0,20	0,01	10	0,05	0,002	1,00	0,01

Los contenidos de Ag a nivel de depósito presentan rangos que van desde los 0,04 hasta los 28,1 ppm, con un valor promedio de 1,78 ppm. El Cu tiene rangos de concentraciones que van desde los 91,1 hasta los 66.000 ppm. El Mo tiene contenidos entre 0,37 y 6.668,46 ppm. El In presenta valores entre 0,02 y 2,68 ppm.

Del análisis se observa que el Cu es el elemento con mayor concentración, seguido de Mo, Zn y As con valores promedio de 6.636; 192,48; 108,78 y 61,66 ppm respectivamente (Fig. 22). Los elementos como el Pb, Sb, Ag, Se, y Bi presentan valores promedios 4 órdenes de magnitud menores que el Cu. Los elementos con menores contenidos promedios corresponden al In y Re, con valores de 0,19 ppm y 0,062 ppm respectivamente.

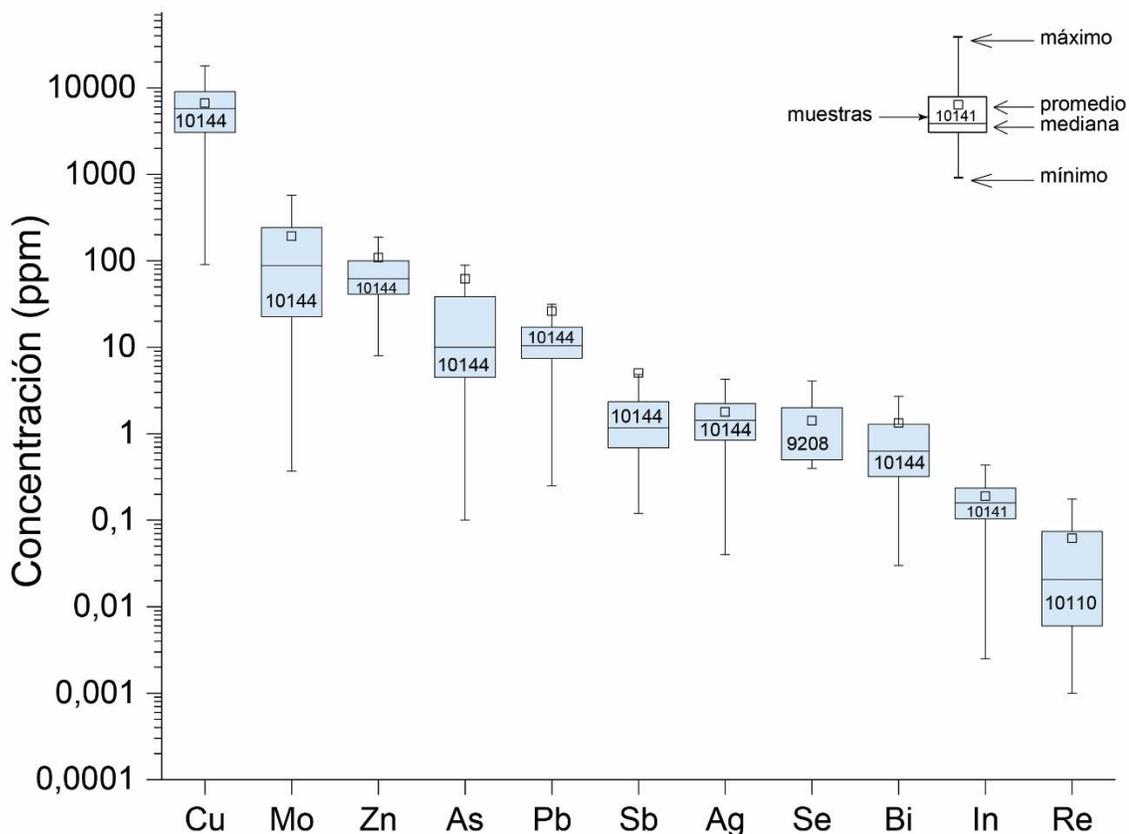


Figura 22. Box plot de concentraciones de Ag y elementos asociados en el yacimiento Río Blanco.

4.3. Diagramas de dispersión

Los resultados del análisis estadístico se presentan en diagramas de dispersión, donde el eje de las Y corresponde a la variable dependiente (Ag), mientras que en el eje de las X corresponden a las variables independientes (Cu, In, Sb, As, Bi, y Mo). Los diagramas fueron elaborados utilizando el software ioGAS 6.2.

Los diagramas de dispersión sugieren una fuerte correspondencia entre Ag vs. Cu, y entre Ag vs. In (Figs. 23 A, B). Cabe mencionar que los colores más cálidos de los gráficos bivariantes corresponden a la mayor concentración de interacciones entre pares de elementos, que para el caso de Ag y el Cu se ubicarían entre los 2,5 ppm y 8.000 ppm, respectivamente. La fuerte correspondencia entre Ag vs. Cu indica que la Ag estaría asociada a mineralización de sulfuros Cu (calcopirita y bornita), así como también a las sulfosales de este metal (tennantita, tetrahedrita y enargita).

Para el caso de los pares Ag vs. Sb y Ag vs. As (Figs. 23 C, D), se observan correspondencias positivas moderadas a bajas (Tabla 2). Estas variaciones posiblemente estén relacionadas a diferentes eventos de alteración y mineralización en el yacimiento, donde el evento temprano potásico carece de sulfosales de Cu (SSCu) con contenidos de As (tennantita) y Sb (tetrahedrita), mientras que en las alteraciones tardías, como cuarzo-sericita (QS) existe una marcada presencia de vetillas tipo “D” y “E”, las cuales son portadoras de SSCu.

Tanto el Bi como el Mo presentan correspondencias positivas bajas con la Ag, con coeficientes de correlación $r > 0,32$ (Figs. 23 E, F). Se conoce que el Bi se puede concentrar en la bornita hasta 1 wt%, y al igual que la Ag, el Bi sigue el comportamiento geoquímico del Cu en este sulfuro, lo que es un indicativo de una incorporación en la estructura como solución sólida (Cook et al. 2011). La baja correspondencia Ag vs. Bi probablemente estaría relacionado a que el Bi se encontraría únicamente en mayores concentraciones en las bornitas, y asociado a las zonas más profundas del yacimiento, es decir, a las zonas de alteración potásica.

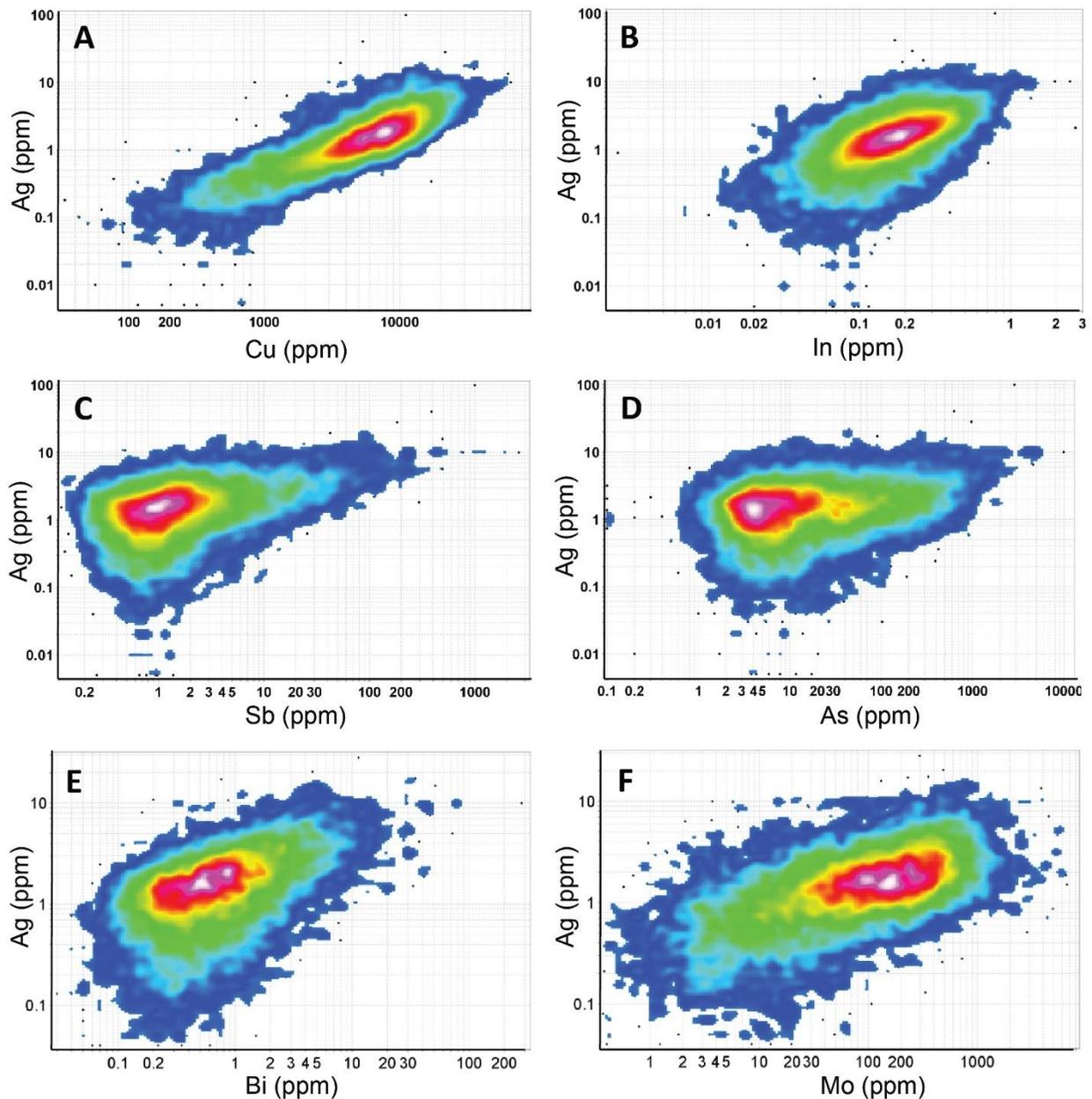


Figura 23. Gráficos de dispersión entre Ag y elementos asociados. A) Ag vs. Cu; B) Ag vs. In; C) Ag vs. Sb; D) Ag vs. As; E) Ag vs. Bi; F) Ag vs. Mo.

Otros diagramas de dispersión muestran correspondencias moderadas positivas ($r > 0,6$) entre los elementos Co vs. Fe, Zn vs. Sb, Re vs. Mo, As vs. Sb, Zn vs. As e In vs. Cu

(Figs. 24). En el yacimiento Río Blanco, el principal mineral portador de Mo es la molibdenita. Se sabe que la molibdenita presenta concentraciones importantes de Re, de hasta 15.000 ppm en depósitos de tipo pórfido (Barra et al. 2017). El In, por otra parte, muestra un enriquecimiento preferencial en los depósitos de tipo skarn por sobre los tipo pórfido de cobre, donde sus concentraciones generalmente se correlacionan a los valores de Ag, siendo ambos más elevados en calcopiritas (Yano 2012). La correspondencia entre la Ag vs. In se la puede observar en la Figura 23 B, misma que tiene un coeficiente de correlación $r=0,53$ (Tabla 2), y se podría explicar por la presencia de In en calcopiritas (Yano 2012). Finalmente, se observa una buena correspondencia entre el In y el Cu (Fig. 24 F), con un coeficiente de correlación $r=0,56$ (Tabla 2).

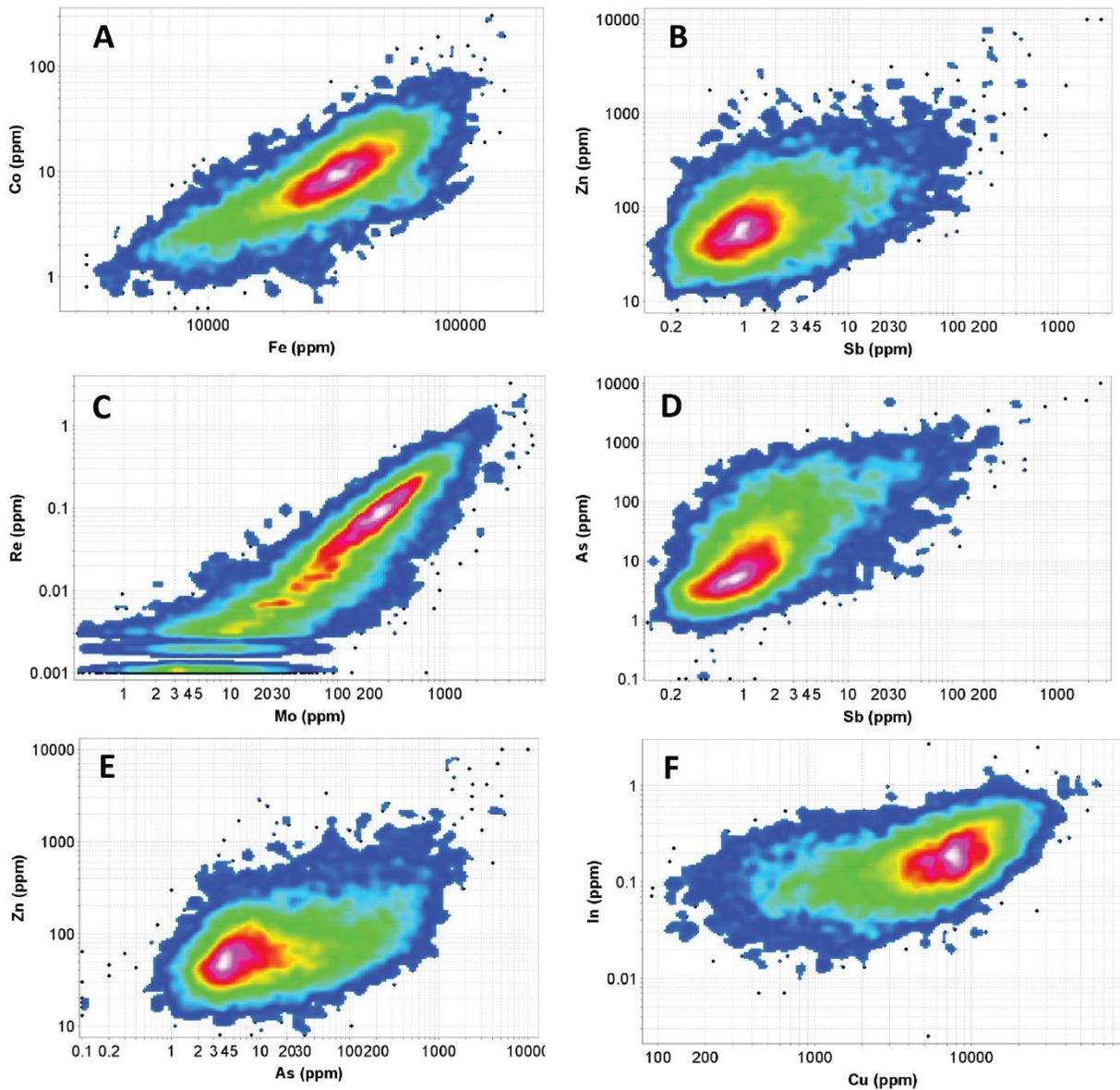


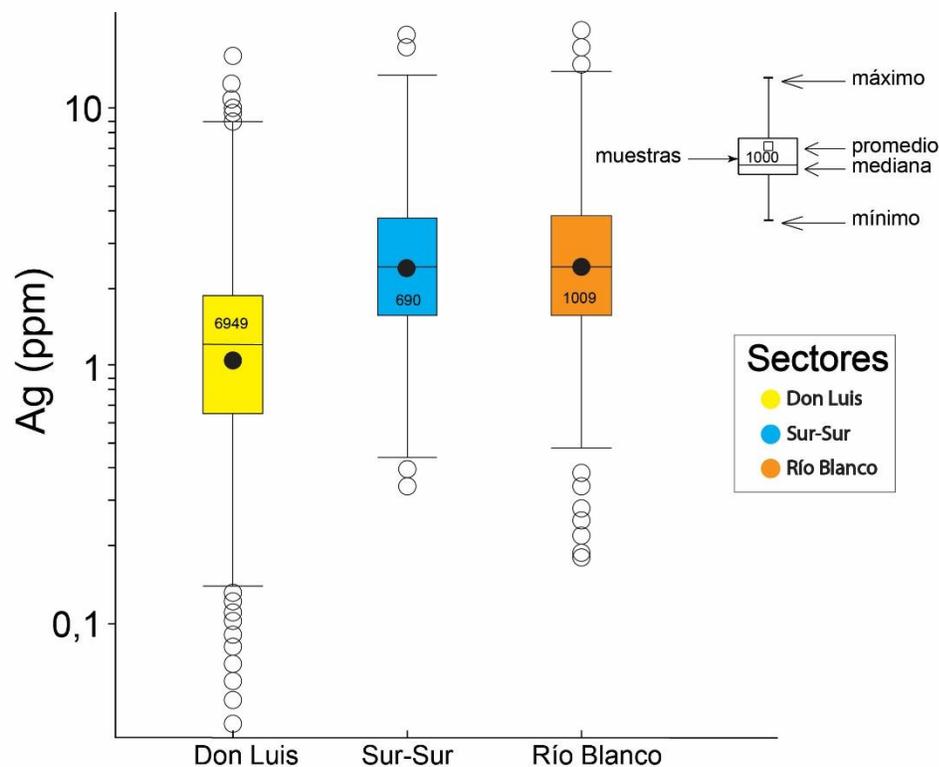
Figura 24. Gráficos de dispersión para Co, Fe, Zn, Sb, Re, Mo, As, In, Cu. A) Co vs. Fe; B) Zn vs. Pb; C) Re vs. Mo; D) As vs. Sb; E) Zn vs. As; F) In vs. Cu.

4.4. Distribución de plata en el yacimiento Río Blanco

Para establecer la distribución de Ag en el yacimiento se tomaron en consideración varios parámetros del mapeo de los sondajes a diamantina, entre los cuales se incluyen el sector de yacimiento, la litología, la cota de cada muestra, la zona de alteración y mineralización. Además, se hizo un análisis de la distribución en planta y perfil de las concentraciones de Ag, en base a la proyección de los sondajes estudiados. En la próxima sección se describe la variación de las concentraciones de Ag en función de estos parámetros.

4.4.1. Contenidos de plata en función del sector del yacimiento

De norte a sur, las actividades mineras en el yacimiento Río Blanco se centran en tres áreas: Río Blanco (mina subterránea), Don Luis (rajo) y Sur-Sur (rajo). El sector con la mayor cantidad de muestras corresponde a Don Luis (6.949), seguida de Río Blanco (1.009) y Sur-Sur (690) (Fig. 25). La mina subterránea Río Blanco presenta concentraciones de Ag entre 0,48 y 14,12 ppm, con una mediana de 2,43 ppm. Las concentraciones de Ag en el sector Sur-Sur varían entre 0,44 y 13,9 ppm, con una mediana de 2,41 ppm. Para el caso del sector Don Luis, las concentraciones de Ag varían desde 0,13 hasta 8,79 ppm, con una mediana de 1,21 ppm (Fig. 25). Hay que mencionar que el valor promedio de Ag en el yacimiento es de 1,78 ppm. Es importante indicar que en la base de datos existen alrededor de 1.529 muestras que no fueron tomadas en cuenta para este análisis, ya que no están clasificadas, es decir, no tienen registrado un sector definido del yacimiento.



4.4.2. Contenidos de plata en función de la litología

Como resultado del mapeo de sondajes a diamantina, CODELCO identifica en el yacimiento diferentes tipos de brechas, las cuales se diferencian por el tipo de clastos y minerales característicos en su matriz. Éstas corresponden a Brecha de Anhidrita (BXANH), Brecha de Biotita (BXB), Brecha de Granodiorita Cascada (BXGDCC), Brecha de Granodiorita Río Blanco (BXGRB), Brecha de Hematita (BXHEM), Brecha Indiferenciada (BXIN), Brecha Monolito (BXMN), Brecha de Pórfido Don Luis (BXPDL), Brecha Polvo de Roca (BXPR), Brecha Silice-Feldespato Potásico (BXSK), Brecha de Turmalina (BXT) y Brecha de Turmalina-Tobacea (BXTTO). Además, se distinguen varios tipos de cuerpos intrusivos: Aplitas (APL), Granodiorita Río Blanco (GDRB), Diorita (DIOR), Granodiorita Cascada (GDCC), cuerpos porfídicos: Pórfido Don Luis (PDL), Pórfido Feldespático (PFELD), Pórfido Cuarzomonzonítico (PQM) y rocas del complejo volcánico La Copa: Andesitas (AND), Chimenea Riolítica (CHRIOL).

Todas las litologías tienen valores promedios de Ag en el mismo orden de magnitud, siendo el PDL el que presenta el promedio más bajo (0,90 ppm) y la BXHEM aquella que presenta el contenido promedio más alto, con 4,62 ppm (Fig. 26).

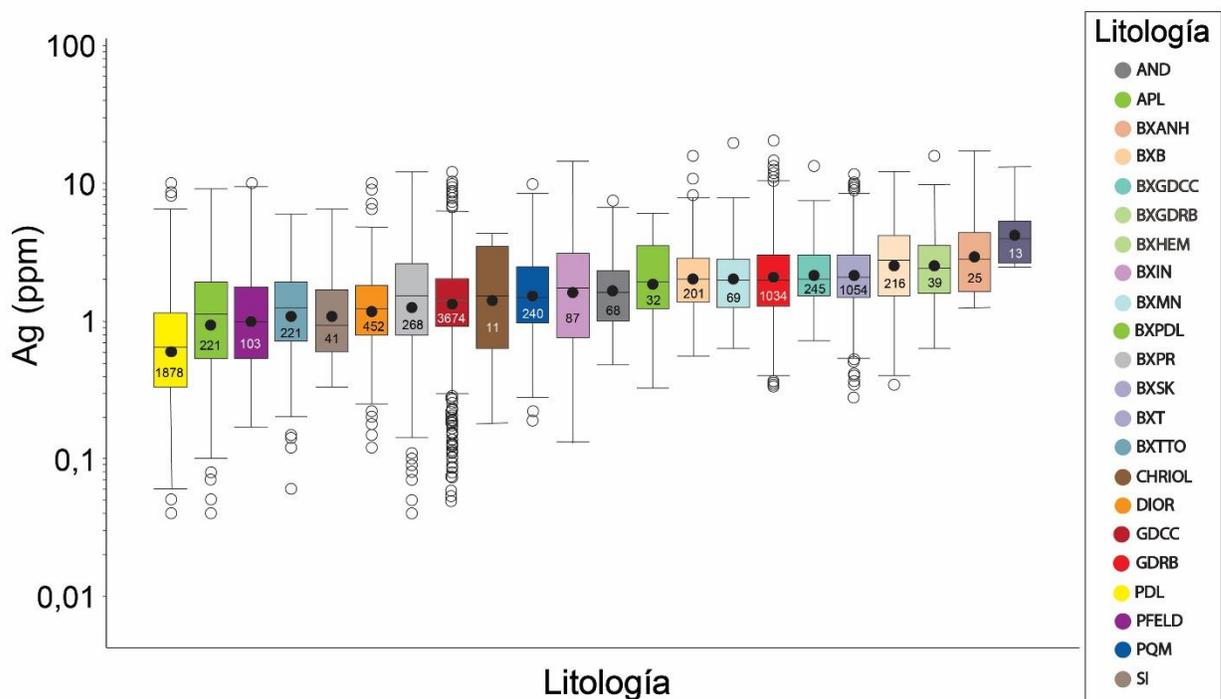


Figura 26. Box plot de concentración de Ag en función de la litología para el yacimiento de Río Blanco.

4.4.3. Distribución de plata en función de la cota

Cada muestra analizada cuenta con su posición geográfica en el yacimiento, así como también su altura o cota (en m s.n.m.). La muestra más profunda se encuentra en la cota 2.399 m s.n.m. y la más somera en la cota 4.230 m s.n.m., existiendo una diferencia de cota entre éstas de aproximadamente 1.800 metros.

Para el análisis estadístico de Ag en función de la cota se utilizaron 6 rangos de cota cada 200 metros, con excepción del rango entre 3.800-4.300 m s.n.m., ya que éste último rango representa únicamente el 2% de los datos analizados (Fig. 27).

Se aprecia que los contenidos de Ag en Río Blanco varían en función de la altura (Fig. 27). Los valores promedio más altos de Ag se encuentran localizados entre las cotas 2.400 y 3.200 m s.n.m. con un valor promedio de 2,1 ppm, mientras que desde los 3.400 hasta 3.800 m s.n.m los contenidos promedio de Ag las muestras disminuye hasta 1,2 ppm. Desde los 3.800 hasta los 4.300 m s.n.m. los valores promedio de Ag aumentan hasta 1,8 ppm.

El comportamiento de Ag en función de la cota probablemente estaría relacionado a la evolución hidrotermal del yacimiento. La parte más profunda asociada a la zona potásica con vetillas tempranas tipo “A”, “B”, “EB” y “EBT” presenta contenidos de calcopirita y bornita y en menor cantidad pirita, las cuales serían las fases huéspedes de Ag. En la parte media del depósito, la zona transicional asociada a la alteración sericita gris verde (SGV) con vetillas tipo “C”, da paso a una disminución de la cantidad de bornita, aumentando la calcopirita y pirita. Para el caso de la parte más somera del depósito los contenidos de Ag vuelven a incrementarse, probablemente asociado a la zona de alteración fílica (cuarzo-sericita QS), característica por vetillas tipo “D” y “E”, las cuales presentan, además de calcopirita y pirita, tennantita y tetrahedrita, minerales que pueden hospedar concentraciones importantes de Ag en su estructura cristalina.

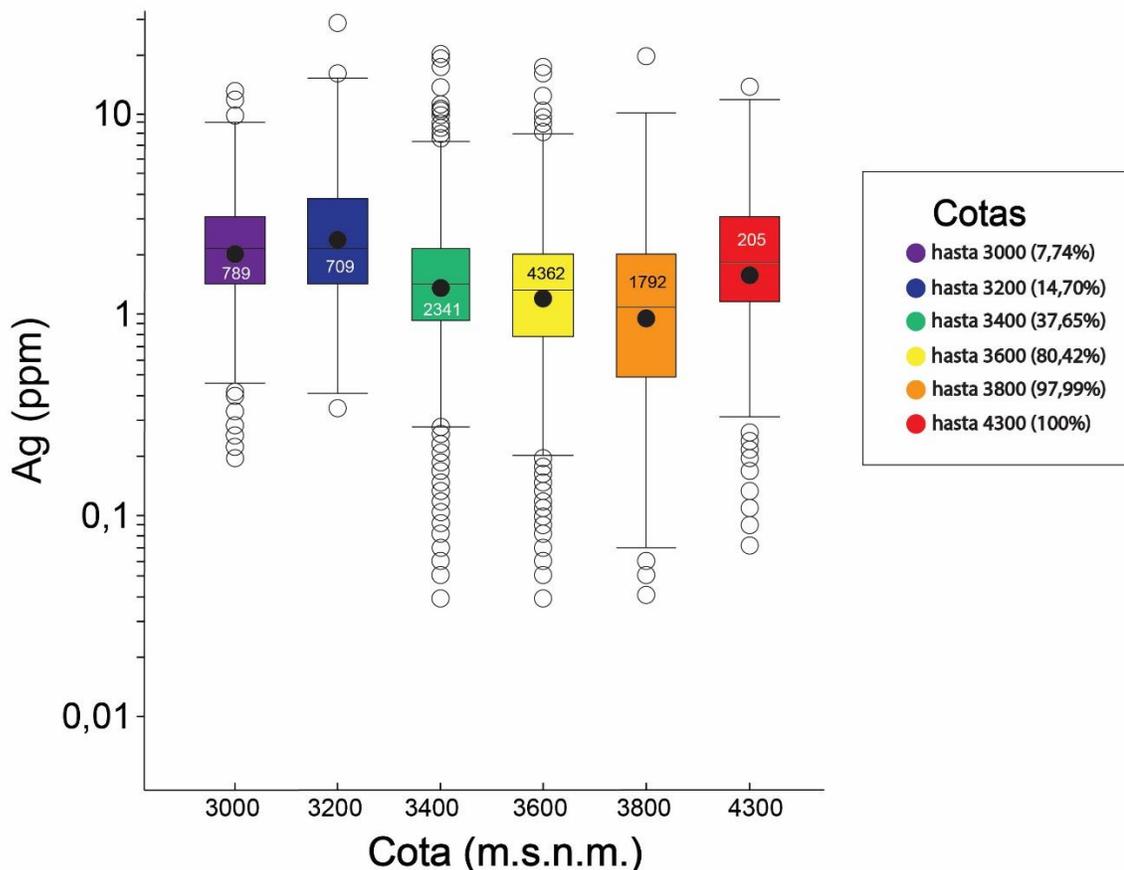


Figura 27. Box plot de Ag en función de la cota en el yacimiento Río Blanco.

4.4.4. Distribución de plata en función de las zonas de alteración

En el yacimiento se han identificado varias zonas de alteración, las cuales se agruparon de la siguiente manera: Asociación de alteración potásica (FBt; FBt-Cl; Fk>Bt; Bt>Fk; SGV>Fk-Bt), Asociación de alteración propilítica (FAlb-Tur-Esp; FCl-Ep), asociación de alteración transicional sericita gris verde (SG; SGVd; SGVm; SGVf) y asociación de alteración fílica o cuarzo-sericita (QS). Las distintas alteraciones citadas en esta sección se indican en la Tabla 1.

Del análisis de los contenidos de Ag en relación a las distintas zonas de alteración, se observa que la zona propilítica representada por las alteraciones FCl-Ep; FAlb (Tu-Esp), presentan los contenidos promedios más bajos en el yacimiento con 0,59 ppm Ag, mientras que la zona de alteración potásica presenta los contenidos promedios más altos de Ag con un valor de 2,01 ppm (Fig. 29). En la zona de alteración transicional sericita gris verde se puede observar que los contenidos de Ag se incrementan a medida que se incrementa la intensidad de alteración. Es decir, la zona de alteración sericita gris verde fuerte tiene mayor contenido de Ag, mientras que la zona de alteración sericita gris verde débil presenta un menor contenido de Ag (Fig. 28).

Comparando los resultados de los contenidos de Ag en función de las zonas de alteración y sus cotas, se infiere que la incorporación de Ag en el yacimiento se relaciona con el evento potásico de mayor profundidad, posteriormente se asocia al evento transicional de sericita gris verde en la zona media del yacimiento, y por último a un evento tardío de incorporación de Ag, representado por la zona de alteración cuarzo-sericita en la zona más somera.

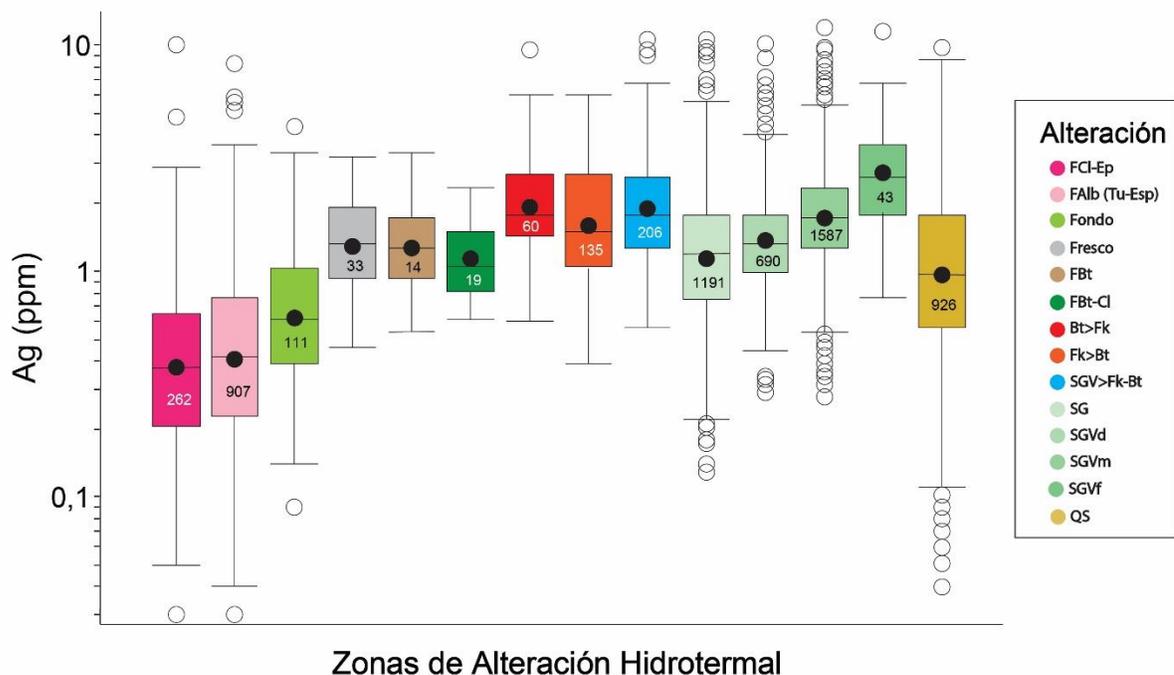


Figura 28. Box plot de concentración de Ag en función de las distintas zonas de alteración hidrotermal. Los símbolos de cada zona de alteración se describen a detalle en la sección 3.3 Alteración Hidrotermal, y en la Tabla 1.

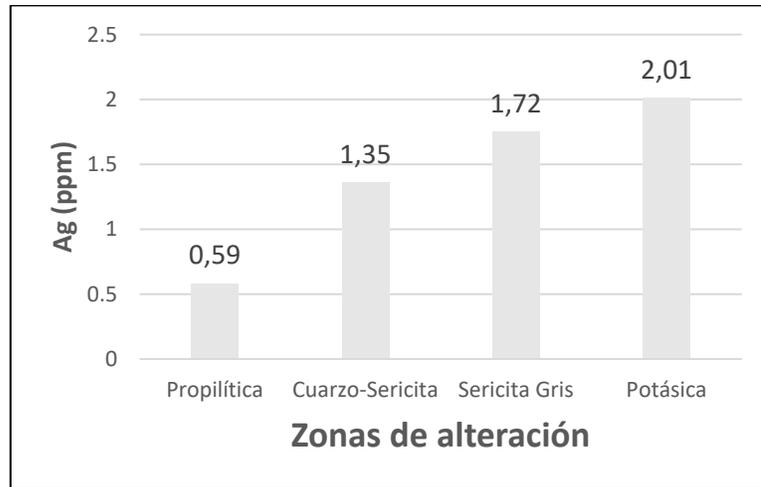


Figura 29. Contenidos promedio de Ag en función de las distintas zonas de alteración hidrotermal en el yacimiento Río Blanco.

4.4.5. Distribución de Ag en planta y perfil a nivel de yacimiento

Como se mencionó anteriormente, cada una de las 10.140 muestras obtenidas desde sondajes cuentan con sus coordenadas geográficas y su cota. Utilizando esta información y la proyección de los sondajes, se elaboraron diagramas de distribución de Ag en planta (Fig. 30) y en perfil (Fig. 31). De ambas figuras se puede observar que en el sector Don Luis existe la mayor cantidad de muestras, y la diferencia de cota entre las muestras.

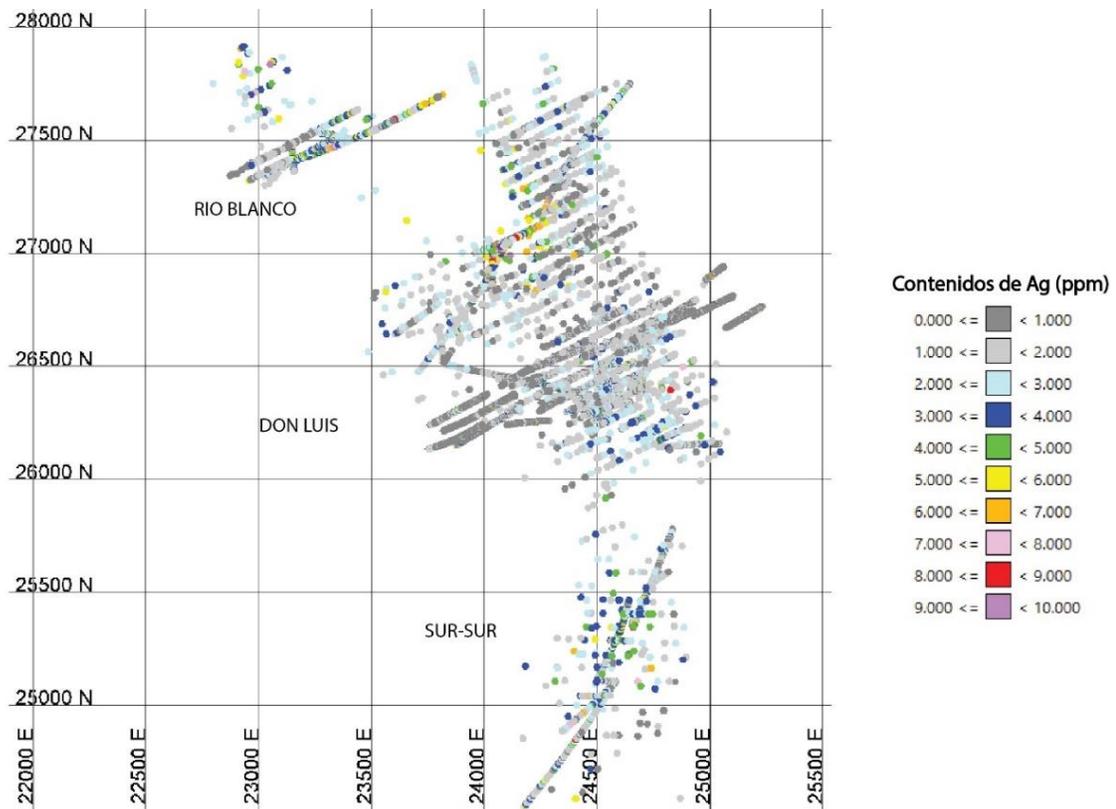


Figura 30. Vista de planta de las muestras de sondajes a diamantina con sus valores de concentración de Ag expresados en partes por millón (ppm).

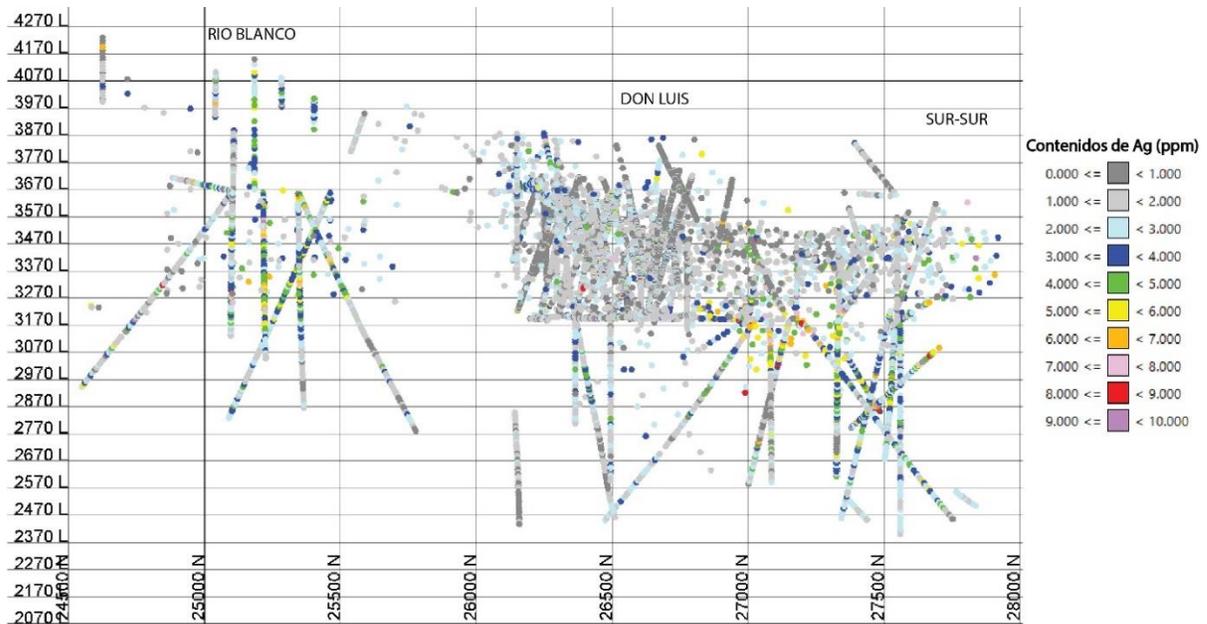


Figura 31. Vista de perfil de la ubicación de las muestras de sondajes a diamantina con sus contenidos de Ag expresados en partes por millón (ppm).

Utilizando la ubicación geográfica de las muestras y sus contenidos de Ag (ppm), se realizó un mapa de distribución de Ag (ppm) en planta para el yacimiento Río Blanco (Fig. 32 A). Adicionalmente, y con el propósito de observar las variaciones espaciales de Ag en función del contenido de Cu, se realizó un mapa de distribución de Cu (ppm) que se muestra en la Figura 32 B. Para la elaboración de las Figuras 32 A y B, se utilizó el programa ioGAS 6.2, con los siguientes parámetros: tamaño de la celda 8, radio de búsqueda de celda de 8 y radio mínimo de alisado de 8. Los colores más cálidos representan los contenidos más altos de los elementos analizados (Ag y Cu), expresados en partes por millón.

Los contenidos más altos de plata se encuentran ubicados en los sectores: Sur-Sur, Río Blanco y en la parte norte de Don Luis (Fig. 32 A). Para el caso del Cu, los contenidos más altos coinciden con los contenidos de Ag, lo que confirma lo expresado anteriormente en los literales 4.2 Estadística Descriptiva (Tabla 2) y 4.3 Diagramas de Dispersión (Fig. 23 A) de este capítulo, es decir, que la Ag vs. Cu tienen una alta correspondencia positiva y que los mayores contenidos de Ag se encuentran en SS-RB, mientras que para DL los valores disminuyen.

4.5. Comportamiento de plata y elementos asociados

Para conocer el comportamiento de Ag y elementos asociados en el depósito, se analizaron varios perfiles de sondajes para Ag, Cu, In, As y Sb, elementos que presentan las mejores correspondencias de acuerdo al análisis presentado en la sección 4.2 “Estadística Descriptiva” (Tabla 2). Los sondajes fueron escogidos de acuerdo a los siguientes criterios: 1) mayor representatividad en los tres centros de explotación minera (Río Blanco, Don Luis y Sur Sur); 2) mayor intersección de litologías, zonas de alteración y mineralización; y 3) mayor extensión en profundidad (entre 800 y 1.000 metros desde la zona la plataforma de perforación) (Tabla 4).

Tabla 4. Sondajes representativos utilizados en el presente estudio.

SECTOR	SONDAJES
Don Luis	4320; 4323; 4616; DDH-660; DDH-810; DDH-812; DL-130
Río Blanco	DDH-213; DDH-386; DDH-541; DDH-611; DDH-806; DDH-807; DDH-820
Sur-Sur	DL-17; DL-134; TSS-12; TSS-62; TSS-79; TSS-80

4.5.1. Comportamiento acoplado de Ag-Cu-In

El análisis estadístico de la base de datos ICP-MS permitió identificar correspondencias positivas Ag vs. Cu y Ag vs. In (Tabla 2; Figs. 23 A y B). Tomando en consideración estos resultados, se procedió a realizar 3 perfiles de sondajes con profundidades que van entre los 800 y 1.000 metros, con los contenidos de Ag-Cu-In expresados en ppm (Fig. 33). Se escogió un sondaje por cada zona de explotación del yacimiento: DDH-386 (Río Blanco), DDH-812 (Don Luis) y TSS-62 (Sur-Sur).

De la interpretación de los perfiles de sondajes se puede corroborar el comportamiento acoplado entre los elementos Cu-Ag-In descrito anteriormente. Es decir, los 3 elementos en cuestión presentan variaciones similares en profundidad a lo largo del sondaje, tanto en zonas empobrecidas en Cu-Ag-In como en zonas enriquecidas en estos tres elementos (Fig. 33). En las zonas donde disminuyen los contenidos del Cu, se deprimen los contenidos de Ag-In, y para el caso contrario, en las zonas donde aumentan los contenidos de Cu, aumentan los contenidos de Ag-In.

Este comportamiento acoplado estaría corroborando, a escala de yacimiento, que tanto la Ag como el In estarían asociados a los sulfuros de Cu(Fe) (calcopirita, bornita), ya sea como solución sólida al interior de su estructura cristalina, o como inclusiones micro a nanométricas de minerales de Ag.

4.5.2. Comportamiento variable de Ag-As-Sb

Las correlaciones identificadas para la Ag vs. Sb ($r=0,36$) y Ag vs. As ($r=0,32$) son positivas pero bajas (Figs. 23 C y D; Tabla 2). Para conocer el comportamiento de la Ag con el As y Sb se utilizaron los mismos sondajes que fueron utilizados para conocer el comportamiento entre Ag-Cu-In, es decir, DDH-386, DDH-812 y TSS-62.

Tanto el As como el Sb muestran un comportamiento variable con la Ag, es decir, existe un acoplamiento de estos 3 elementos en las zonas más someras del yacimiento, mientras que para las partes más profundas estos tres elementos se desacoplan (Fig. 34).

El comportamiento variable que tienen el As y Sb con la Ag podría indicar que estos elementos estarían correlacionados únicamente en los eventos de alteración hidrotermal transicionales a tardíos en la evolución del yacimiento (alteraciones SGV y QS). Por ende, la Ag, As y Sb se encontrarían relacionados a las sulfosales de Cu como tennantita y tetrahedrita en las vetillas tipo "D" y "E". En las zonas más profundas del yacimiento, asociadas con la alteración potásica, los sulfuros dominantes son calcopirita y bornita y en menor cantidad pirita, con nula presencia de sulfosales de Cu, generando un desacoplamiento geoquímico de la Ag, Sb y As.

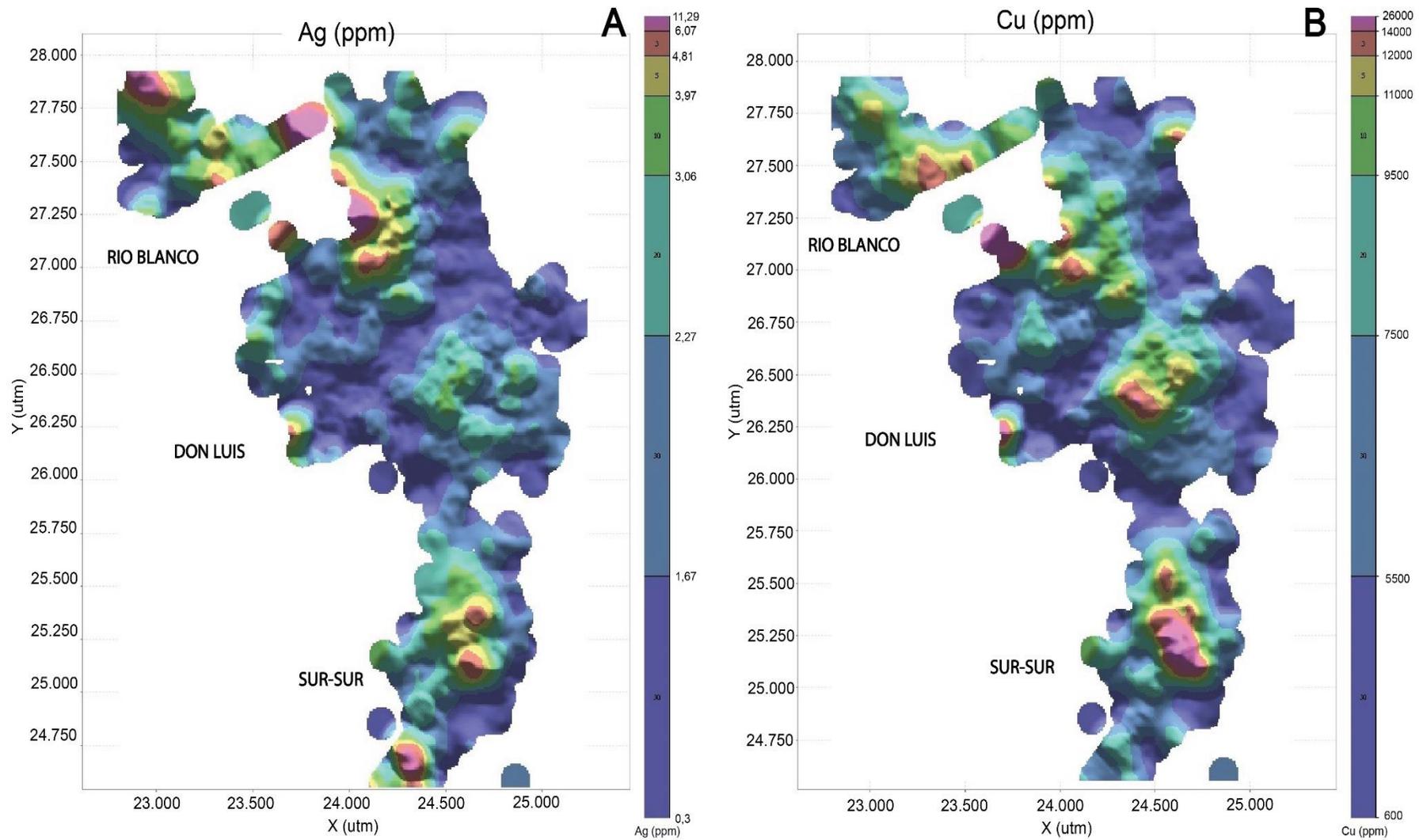


Figura 32. Distribución de Ag y Cu en el yacimiento Río Blanco. (A) Vista en planta de la distribución de Ag. Valores de Ag (ppm), expresados en tonos fríos a cálidos de acuerdo su concentración, indicado en la escala de colores en la barra a la derecha del mapa; (B) Vista en planta de la distribución de Cu. Valores de Cu (ppm), expresados en tonos fríos a cálidos de acuerdo a la concentración, indicado en la escala de colores a la derecha del mapa

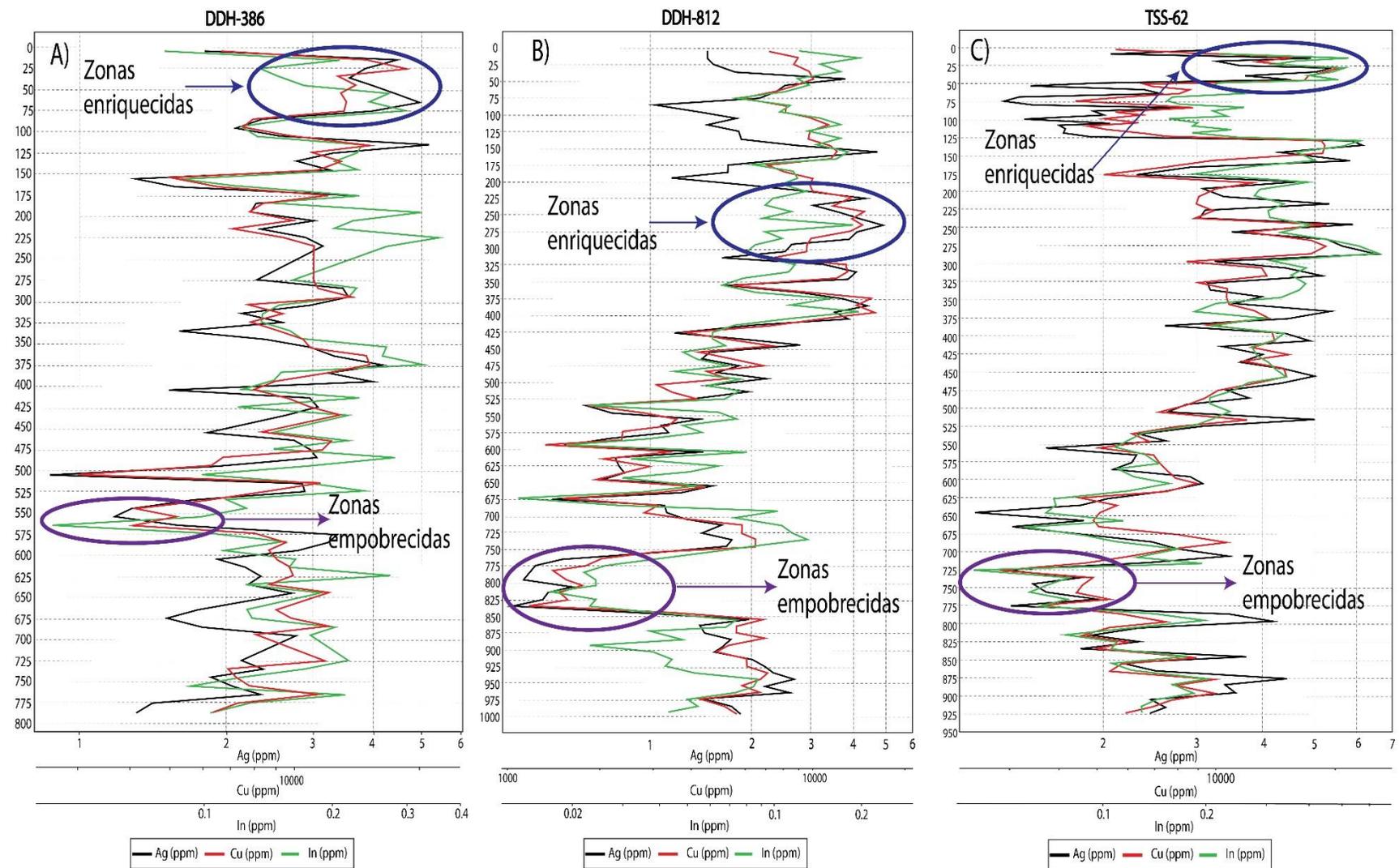


Figura 33. Perfiles de sondajes a diamantina que muestran la distribución en profundidad de las concentraciones de Ag, Cu e In (ppm). A) Sondaje DDH-386, sector Río Blanco, B) Sondaje DDH-812, sector Don Luis y C) Sondaje TSS-62, sector Sur-Sur. Línea negra contenidos de Ag, línea roja contenidos de Cu y línea verde contenidos de In. Elipse azul representa zonas enriquecidas de los 3 elementos, mientras que las elipses púrpura representan zonas empobrecidas.

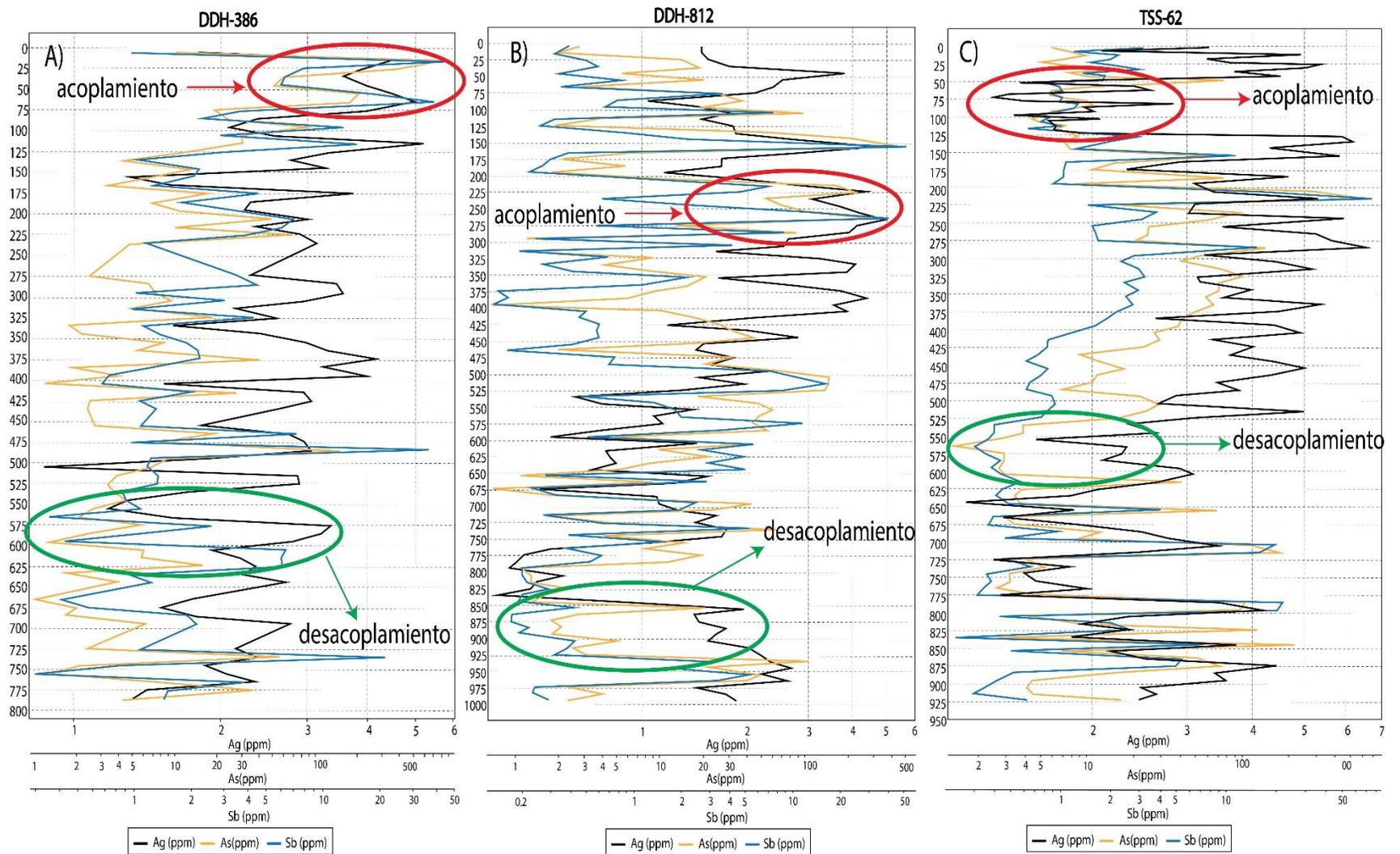


Figura 34. Perfiles de sondajes a diamantina que muestran la distribución en profundidad de las concentraciones Ag, As y Sb. A) Sondaje DDH-386, sector Río Blanco, B) Sondaje DDH-812, sector Don Luis y C) Sondaje TSS-62, sector Sur-Sur. Línea negra contenidos de Ag (ppm), línea naranja contenidos de As (ppm) y línea azul contenidos de Sb (ppm). Elipse roja representa zonas acopladas de los 3 elementos, mientras que las elipses verdes representan zonas desacopladas.

4.6. Análisis estadístico de muestras geometalúrgicas

La División Andina de CODELCO contaba hasta el mes de diciembre de 2016 con 1.726 muestras geometalúrgicas que en su gran mayoría tienen una longitud promedio de muestreo de 16 metros, y que fueron analizadas mediante ICP-MS para 51 elementos. Adicionalmente, cada muestra geometalúrgica cuenta con un análisis mineralógico cuantitativo mediante la técnica QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Materials by Scanning Electron Microscopy), la cual combina la tecnología de microscopía electrónica SEM, espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) y análisis de imágenes de forma automatizada. La técnica de QEMSCAN permite realizar determinaciones modales de especies minerales de mena y ganga, asociaciones mineralógicas y estudios de granulometría y grado de liberación, útiles para la geometalurgia.

Para el presente trabajo se acoplaron los datos geoquímicos de ICP-MS (concentraciones en ppm y ppb) y los análisis QEMSCAN (concentraciones modales) de sulfuros y sulfosales en categoría “bulk mineral” (BM), donde se identificaron calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4), covelina (CuS), calcosina (Cu_2S), tennantita ($(\text{Cu,Ag,Fe,Zn})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$), enargita (Cu_3AsS_4), tetrahedrita ($(\text{Cu,Ag,Fe,Zn})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), bournonita (PbCuSbS_3), seligmanita (CuPbAsS_3), pirita (FeS_2), esfalerita (ZnS), arsenopirita (FeAsS), molibdenita (MoS_2) y galena (PbS).

Para el análisis estadístico se realizaron dos matrices de correlación mediante el software ioGAS 6.2, la primera con la base de datos ICP-MS y la segunda con los datos BM mediante QEMSCAN. Cabe mencionar que el análisis ICP-MS para las muestras geometalúrgicas incluye contenidos de Au y Hg, elementos que no fueron analizados para las muestras de sondajes a diamantina.

Tabla 5. Matriz de correlación entre Ag, Au, Cu, Se, Sb, In, Bi, Zn y As, de muestras geometalúrgicas. Las unidades para el Au se expresan en ppb, mientras que para los demás elementos las concentraciones están en ppm. Los pares de elementos que tienen las mayores correspondencias positivas están marcadas en amarillo.

Correlación	Ag (ppm)	Au (ppb)	Cu (ppm)	Se (ppm)	Sb (ppm)	In (ppm)	Bi (ppm)	Zn (ppm)	As (ppm)
Ag (ppm)	1								
Au (ppb)	0,68	1							
Cu (ppm)	0,55	0,67	1						
Se (ppm)	0,51	0,71	0,61	1					
Sb (ppm)	0,45	0,15	0,10	0,14	1				
In (ppm)	0,41	0,30	0,30	0,22	0,15	1			
Bi (ppm)	0,38	0,61	0,18	0,26	0,11	0,26	1		
Zn (ppm)	0,33	0,14	0,025	0,018	0,55	0,26	0,096	1	
As (ppm)	0,31	0,30	0,083	0,17	0,53	0,16	0,11	0,50	1

Del análisis de la Tabla 4, se identificó la existencia de una correspondencia positiva de Ag con los siguientes metales: Au, Cu, Se, Sb, In, Bi, Zn y As (marcados en amarillo).

Comparando la matriz de correlación de los sondajes a diamantina (Tabla 2) con la matriz de correlación de muestras geometalúrgicas (Tabla 5), se reconoce que existe la misma tendencia de correspondencia lineal positiva moderada entre Ag vs. Cu, Ag vs. Se, Ag vs. In y Ag vs. Sb; y correspondencias lineales positivas más bien bajas entre Ag vs. Bi, Ag vs. Zn y Ag vs. As.

En la Figura 35 se muestran diagramas de dispersión para los elementos en cuestión. Se observa que la Ag (ppm) y el Au (ppb) presentan una moderada tendencia positiva, con un coeficiente de correlación $r=0,68$ (Tabla 5; Fig. 35 A). Para el caso de Ag vs. Cu, Ag vs. In, Ag vs. Bi, Ag vs. Sb (Figs. 35 B, C, E y F), estos elementos presentan correspondencias positivas moderadas, con coeficientes de correlación $r>0,38$ (Tabla 5). Los elementos que presentan menores correspondencias con la Ag son el As y Zn con coeficientes de correlación $r<0,31$ (Fig. 35 D).

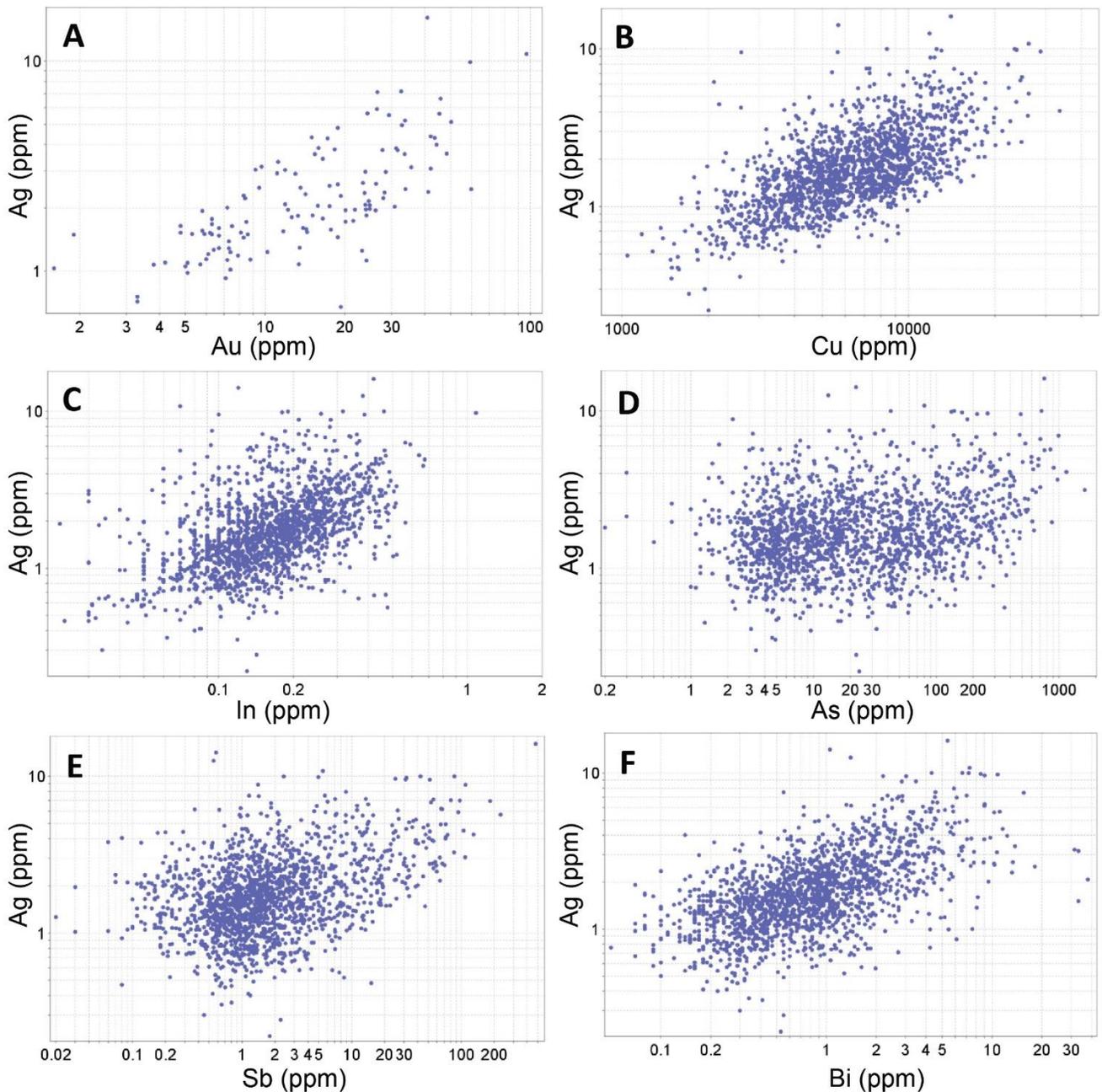


Figura 35. Diagramas de dispersión para elementos de interés en muestras geometalúrgicas. A) Ag vs. Au; B) Ag vs. Cu; C) Ag vs. In; D) Ag vs. As; Ag vs. Sb; F) Ag vs. Bi.

Además de su concentración en ppm o ppb de cada elemento, las muestras geometalúrgicas cuentan con la proporción modal de cada mineral analizado, representado por el indicador de sulfuro “bulk mineral (BM)”.

Tabla 6. Matriz de correlación de muestras geometalúrgicas para Ag, Au, y porcentajes modales de bornita, calcopirita, esfalerita, enargita, molibdenita y tennantita.

Correlación	Ag (ppm)	Au (ppb)	Bornita	Calcopirita	Esfalerita	Enargita	Molibdenita	Tennantita
Ag (ppm)	1							
Au (ppb)	0,68	1						
Bornita	0,43	0,80	1					
Calcopirita	0,42	0,25	0,097	1				
Esfalerita	0,32	0,14	-0,024	-0,022	1			
Enargita	0,28	0,28	0,049	0,028	0,3	1		
Molibdenita	0,24	0,18	0,14	0,35	-0,02	0,033	1	
Tennantita	0,13	-0,014	-0,034	0,022	0,12	0,51	-0,008	1

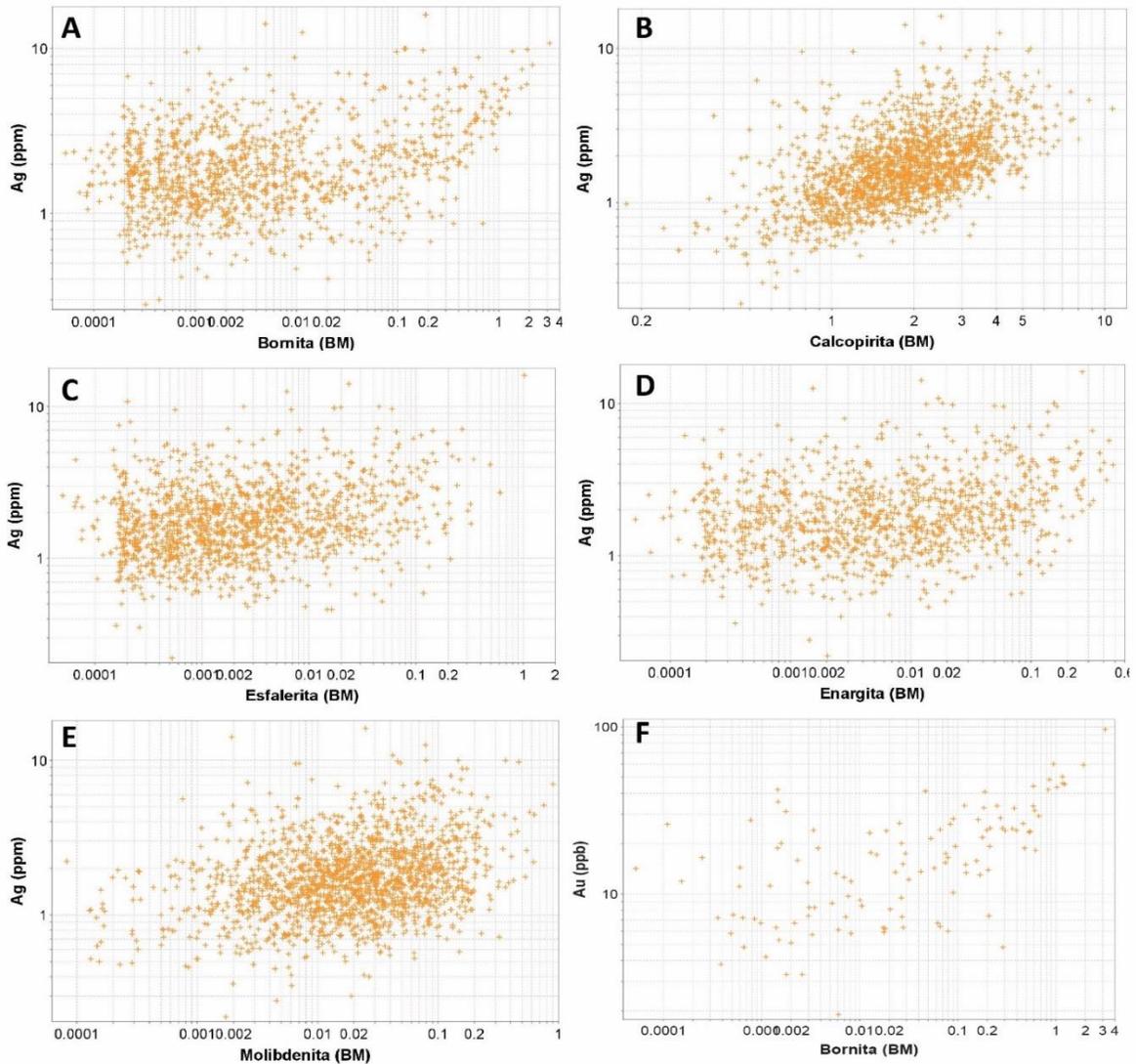


Figura 36. Diagramas de dispersión para elementos de interés en muestras geometalúrgicas. A) Ag vs. proporción modal de bornita; B) Ag vs. proporción modal de calcopirita; C) Ag vs. proporción modal de esfalerita; D) Ag vs. proporción modal de enargita; E) Ag vs. proporción modal de molibdenita; F) Au (ppb) vs. proporción modal de bornita.

De la Figura 36 se desprende que la Ag presenta correspondencias positivas moderadas con bornita, calcopirita y esfalerita, con un coeficiente de correlación $r > 0,32$ (Tabla 6; Figs. 36 A-C). Para el caso de la enargita y molibdenita las correspondencias son positivas bajas, con un coeficiente de correlación $r < 0,28$ (Tabla 6; Figs. 36 D y E). El Au presenta una correspondencia positiva con la bornita con un coeficiente de correlación $r = 0,80$ (Fig. 36 F; Tabla 6).

El análisis mediante QEMSCAM de las muestras geometalúrgicas arroja valores de los contenidos de sulfuros totales analizados, los cuales fueron interpretados en un gráfico de tipo box plot (Fig. 37). Se puede observar que el sulfuro más abundante en el yacimiento es la pirita con una proporción modal promedio de 52%. Para el caso de los sulfuros de Cu el más importante es la calcopirita con un 44% en promedio modal, seguido de la bornita con un contenido promedio de 2,2 %, por último la enargita con un contenido promedio de 0,53%. La molibdenita es el cuarto sulfuro más abundante con un valor promedio de 0,96%. El restante 0,96% de sulfuros correspondería a esfalerita, galena, tennantita, covelina, calcosina, tetrahedrita, y arsenopirita.

En base a la correspondencia moderada positiva entre Ag y calcopirita (Fig. 36 B) y al hecho de que la calcopirita es el sulfuro de cobre más abundante en el yacimiento, se puede inferir que la calcopirita es el mineral huésped más importante para Ag en el yacimiento Río Blanco.

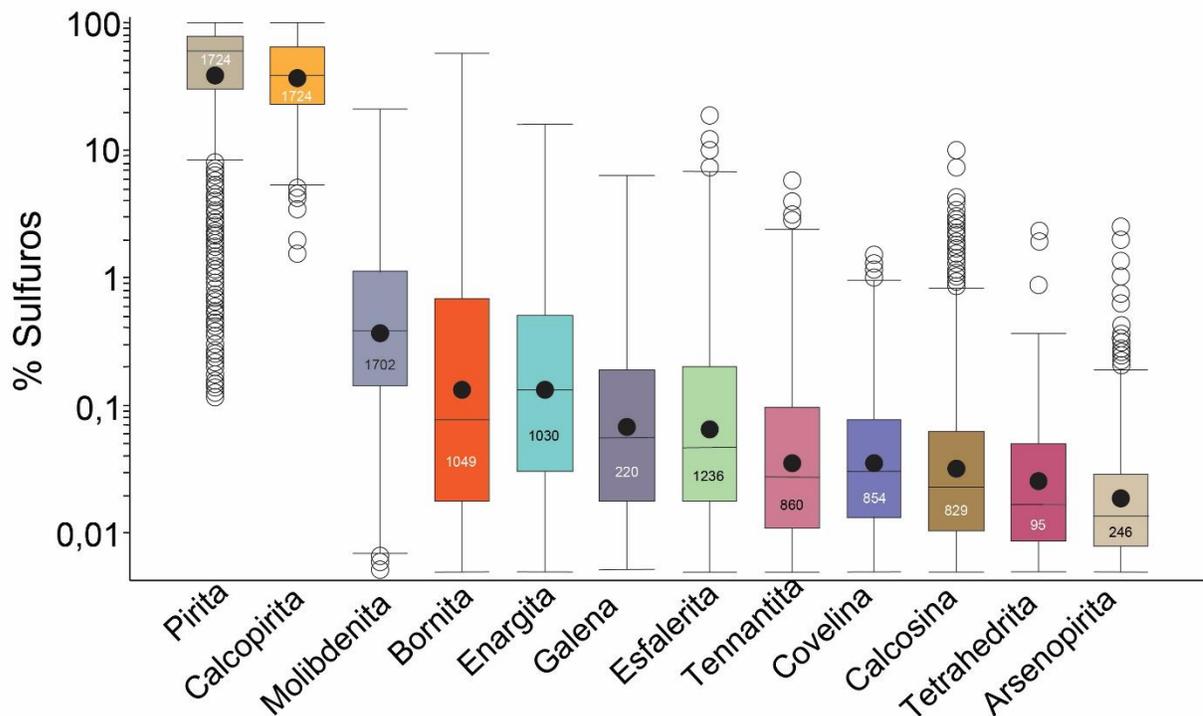


Figura 37. Diagrama de box plot que muestra el porcentaje (%) de abundancia (o proporción modal) de los sulfuros de mena y ganga presentes en el yacimiento Río Blanco. Datos obtenidos mediante QEMSCAN.

CAPÍTULO 5: ESTUDIO MINERALÓGICO Y MINERALOQUÍMICO DE LAS FASES PORTADORAS DE PLATA Y ELEMENTOS ASOCIADOS EN RÍO BLANCO

5.1 Generalidades

En el capítulo anterior se realizó un análisis estadístico de la base de datos ICP-MS de sondajes a diamantina, identificándose un comportamiento geoquímico acoplado entre Ag vs. Cu y Ag vs. In a escala de yacimiento (Tabla 2; Figs. 23 A y B). Por otra parte, se identificó que existe un comportamiento variable entre la Ag vs. As y Ag vs. Sb (Tabla 2; Fig. 34), los cuales suelen estar geoquímicamente acoplados en las zonas más someras del depósito, pero desacoplados en profundidad. Además, y combinando datos químicos de muestras metalúrgicas acoplado a datos mineralógicos automatizados de QEMSCAN, se reporta que la Ag tiene una correspondencia alta con la calcopirita y bornita (Tabla 6; Figs. 36 A y B). Tomando en cuenta que la calcopirita representa un 44% en valor promedio del total de sulfuros, se infiere que la calcopirita es el mineral huésped más importante de Ag en Río Blanco, seguido de la bornita. Las sulfosales únicamente representan un 0,78% de sulfuros totales (Fig. 37).

En base a esta información se procedió a realizar una investigación de detalle de la mineralogía y mineraloquímica de los distintos sulfuros de Cu-(Fe) y sulfosales de Cu portadoras de Ag en Río Blanco, tomando en consideración las diferentes zonas de alteración y mineralización del yacimiento. Para ello, se utilizó una combinación de técnicas micro-analíticas orientadas tanto a constreñir las concentraciones de elementos mayores, menores y trazas en sulfuros y sulfosales, como también a identificar inclusiones minerales hospedadas en éstos.

5.2 Criterios de selección del muestreo de sondajes a diamantina

Para poder cubrir de manera representativa el yacimiento Río Blanco, se realizó un muestreo sistemático en base a 21 sondajes a diamantina seleccionados, los cuales se indican en la Tabla 4. Éstos se caracterizan por cortar la mayor cantidad de litologías, zonas de alteración, mineralización del depósito, y además por encontrarse distribuidos en los tres centros de explotación minera. Otro parámetro que se utilizó para discriminar los tramos a ser muestreados fue la identificación de zonas con altas y bajas leyes de Ag y Cu, con la finalidad de no tener sesgos en el muestreo y posterior en las interpretaciones de los análisis.

5.3 Muestras y metodología de estudio

Para el estudio de Ag y elementos asociados en los sulfuros y sulfosales de cobre, se utilizaron varias técnicas de microscopía y análisis químico puntual o in-situ. La caracterización petrográfica y calcográfica básica se realizó mediante microscopía óptica de polarización utilizando un microscopio marca Olympus BX51 en el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, Santiago. Se utilizaron además técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM),

microsonda electrónica (EMPA) y espectrometría de masas por inducción de plasma acoplado a un sistema de ablación láser (LA-ICP-MS), las cuales se describen en las próximas secciones.

Las muestras que fueron seleccionadas para este trabajo están descritas en la Tabla 7. En total se analizaron un total de 28 muestras de los 21 sondajes a diamantina previamente seleccionados.

Tabla 7. Muestras seleccionadas para estudios petrográficos y análisis mediante SEM, FESEM, EMPA y LA-ICP-MS. La tabla muestra los sectores del yacimiento, sondajes, muestra, cota, litología, alteración y mineralización de las muestras seleccionadas. Los símbolos de las zonas de alteración se detallan en la sección 3.3 Alteración hidrotermal. Los símbolos de las litologías se detallan en la sección 3.2 Unidades litológicas. Py=pirita; Cpy=calcopirita; Bo=bornita; SSCu=sulfosales de Cu; TS=total sulfuros.

Sector	Sondaje	Muestra	Cota (msnm)	Litología	Alteración	Mineralización
Don Luis	4320	224.2	3546	GDCC	SG	Py>>Cpy_TS1.0
		373.1	3420	GDCC	QS	Cpy >> Py _TS>2.0
		421.2	3379	GDCC	SGVd	Cpy >Py _TS<2.0
		531.5	3286	GDCC	SGVd	Cpy > Py _TS<2.0
	4687	M-3552	3461	GDCC	SGVd	Cpy > Py _TS<2.0
		M-3544	3331	BXTGD	QS	Py >> Cpy -(SSCu) _TS>2.0
		M-3528B	3253	GDCC	SGV>Fk-Bt	Cpy >> Py _TS>2.0
		M-3535	3201	GDCC	SGV>Fk-Bt	Cpy >Bo _TS>1.5
	DDH-812	160.93	3066	GDCC	Fk>Bt	Cpy > Bo _TS>1.5
		221.7	3021	BXSK	Fk>Bt	Cpy > Bo _TS>1.5
		276	2984	BXSK	Fk>Bt	Cpy > Bo _TS>1.5
		377.5	2911	BXSK	Fk>Bt	Cpy > Bo _TS>1.5
		563.4	2772	PDL	FAlb(Tu-Esp)	Cpy > Bo _TS<1.0
871	2548	DIOR	Bt>Fk	Cpy > Bo _TS>1.5		
Río Blanco	DDH-386	133.9	3050	BXTGD	SGVm	Cpy > Py _TS>2.0
		154.2	3030	GDRB	SGVd	Cpy > Py _TS<2.0
		459	2720	GDRB	SGVm	Cpy > Py _TS>2.0
		477.9	2710	PQM	SGVd	Cpy > Py _TS<2.0
		564	2620	PQM	SGVd	Cpy > Py _TS<2.0
		598	2590	GDRB	SGV>Fk-Bt	Cpy > Bo _TS>1.5
		618	2570	PQM	SGVm	Cpy >> Py _TS>2.0
		700.1	2490	PQM	SGVm	Cpy > Bo _TS>1.5
Sur-Sur	TSS-62	32.4	3630	BXTGD	SGVf	Cpy >> Py _TS>2.0
		129.8	3543	BXTGD	SGVf	Cpy >> Py _TS>2.0
		286.5	3400	BXTGD	QS	Pirita> Cpy _TS>2.0
		424.6	3274	BXTGD	Bt>Fk	Cpy >> Py _TS>2.0
		693	3033	GDCC	Bt>Fk	Cpy >> Py _TS>2.0
		788.5	2953	PQM	Fk>Bt	Cpy >> Py _TS>2.0

5.3.1 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Un total de 28 cortes transparentes pulidos de muestras seleccionadas de los sondajes a diamantina fueron analizados mediante SEM (Tabla 7). Las muestras fueron elegidas en base a su contenido de Ag y Cu, además por ser las más representativas de los sondajes. Los sulfuros estudiados fueron pirita, calcopirita, bornita, tennantita, tetrahedrita, enargita, y sulfuros de plata. Las observaciones SEM fueron realizadas en el Laboratorio de Microanálisis del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Departamento de Geología, Universidad de Chile, usando un equipo FEI Quanta 250 SEM, equipado con detectores de electrones secundarios (SE), electrones retrodispersados (BSE) y un espectrómetro de rayos-X de dispersión de energía (EDS).

Los parámetros analíticos fueron: voltaje de aceleración de 15-20 kV, corriente de emisión de $\sim 80 \mu\text{A}$, ángulo de despegue $\sim 35^\circ$, tamaño del haz de electrones fue de 4-5 μm (spot beam size) y una distancia de trabajo de $\sim 10 \text{ mm}$. Se utilizaron análisis EDS semi-cuantitativos para constreñir los elementos mayores en fases individuales de los minerales analizados.

5.3.2 Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM)

La obtención de imágenes de alta resolución y magnificación de inclusiones minerales del tamaño micro- a nano-métrico se logró mediante microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM). Las observaciones se realizaron utilizando un equipo FEI Quanta 250 FEG en el Centro de Investigaciones en Nanotecnología y Materiales Avanzados (CEIN), en la Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago. El FESEM está equipado con un detector en columna (ICD) para SE y BSE, y un detector EDS. Las condiciones operativas incluyeron un voltaje de 20 kV, el tamaño del haz fue de 4 μm , un ángulo de despegue de $\sim 35^\circ$ a 37° , y una distancia de trabajo de $\sim 10 \text{ mm}$.

5.3.3 Microsonda electrónica (EMPA) y mapas WDS

Los contenidos de los elementos mayores y menores en piritita, calcopiritita, bornita, tennantita, tetrahedrita, enargita, sulfuros de plata (acantita) y dos inclusiones de telurios de paladio (merenskyita) se determinaron mediante análisis por microsonda electrónica (EMPA), utilizando un equipo JEOL JXA-8230 en los Laboratorios de Microscopía Electrónica y Análisis por Rayos-X (LAMARX) de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. La microsonda electrónica cuenta con tres espectrómetros dispersivos en longitudes de onda (WDS) y un espectrómetro EDS integrado al sistema, además de un detector de electrones secundarios y otro de electrones retrodispersados (BSE) de alta sensibilidad (LAMARX 2014).

Los elementos y sus líneas características de rayos-X utilizadas fueron Hg ($M\alpha$), Te ($L\alpha$), Se ($L\alpha$), Bi ($M\alpha$), Au ($M\alpha$), S ($K\alpha$), Fe ($K\alpha$), Co ($K\alpha$), Zn ($K\alpha$), As ($K\alpha$), Ag ($L\alpha$), Pb ($M\beta$), Sb ($L\alpha$), Cu ($K\alpha$), Ni ($K\alpha$), Mn ($K\alpha$), Pt ($M\alpha$), Re ($M\alpha$), Pd ($L\alpha$), Rh ($L\alpha$), Ru ($L\alpha$), Ir ($M\alpha$), Os ($M\alpha$). Las condiciones de operación incluyeron un voltaje de aceleración de 20 kV, una corriente de haz de 20 nA y un haz de electrones de $\sim 1 \mu\text{m}$ de diámetro. El tiempo de conteo fue de 40 s para Hg, Te, Se, Bi, Au, S, Fe, Co, Zn, As, Ag, Pb, Sb, Cu, Ni, y Mn. El tiempo de conteo fue de 20 s para Pt, Re, Pd, Rh, Ru, Ir, y Os. Los estándares utilizados para la calibración fueron: HgTe (para Hg y Te), NiSe (para Ni y Se), Bi_2S_3 (Bi), Au^0 (Au), CuFeS_2 (para Cu, Fe y S), CoAs_3 (Co), ZnS (Zn), NiAs (As), Ag^0 (Ag), PbS (Pb), Sb_2S_3 (Sb), Mn^0 (Mn), Pt^0 (Pt), Re^0 (Re), Pd^0 (Pd), Rh^0 (Rh), Ru^0 (Ru), Ir^0 (Ir) y Os^0 (Os).

Los mapas de rayos-X mediante WDS se adquirieron utilizando la configuración de calibración descrita anteriormente. Para la adquisición de éstos se utilizó un voltaje de aceleración de 20 kV, una corriente de haz de 100 nA, con una dimensión de pixeles de (1x1, 2x2) μm y un tiempo de conteo entre 40-100 ms/paso por pixel.

5.3.4 Espectrometría de masas por inducción de plasma acoplado a un sistema de ablación laser (LA-ICP-MS)

Las concentraciones de elementos traza se determinaron mediante espectrometría de masas por inducción de plasma acoplado a un sistema de ablación laser (LA-ICP-MS) en granos seleccionados de calcopirita, bornita, pirita, tennantita y tetrahedrita. Los análisis de LA-ICP-MS se realizaron usando un láser excimer argón flúor (ArF) de 193 nm (Photon Machines Analyte 193) acoplado a un espectrómetro de masas cuadrupolo (Thermo Fisher Scientific iCAP Q) en el Laboratorio de Espectrometría de Masas del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.

Antes de cada sesión de análisis, se ajustó el ICP-MS mientras se ablacionaba un estándar de referencia de vidrio NIST SRM 610, para asegurar niveles aceptables de robustez del plasma (es decir, $^{238}\text{U}^{+}/^{232}\text{Th}^{+}$ entre 0,95 – 1,05), producción de óxido ($\text{ThO}^{+}/\text{Th}^{+} < 0,5\%$) y una producción de doble carga ($^{22}\text{M}^{+}/^{44}\text{Ca} < 0,01\%$). Las condiciones de ablación fueron las siguientes: frecuencia de pulso del láser de 4 Hz, densidad de energía de $\sim 1,5 \text{ J/cm}^2$, y un tamaño del punto de análisis de 40 μm . Se utilizó He como gas portador. Cada punto ablacionado tuvo una duración de 30 s seguido de 30 s de colección de fondo de gas. Los siguientes isótopos fueron monitoreados: ^{34}S , ^{51}V , ^{52}Cr , ^{53}Cr , ^{55}Mn , ^{57}Fe , ^{59}Co , ^{60}Ni , ^{63}Cu , ^{65}Cu , ^{66}Zn , ^{69}Ga , ^{72}Ge , ^{73}Ge , ^{75}As , ^{77}Se , ^{82}Se , ^{95}Mo , ^{97}Mo , ^{105}Pd , ^{107}Ag , ^{109}Ag , ^{111}Cd , ^{115}In , ^{118}Sn , ^{120}Sn , ^{121}Sb , ^{123}Sb , ^{125}Te , ^{182}W , ^{185}Re , ^{189}Os , ^{195}Pt , ^{197}Au , ^{202}Hg , ^{205}Tl , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb y ^{209}Bi . Se utilizó un tiempo de permanencia de 10 ms para todos los elementos excepto para Ag, Cd, In, Sn, Te, Au y Bi para los cuales se utilizaron 30 ms. El procedimiento de calibración consideró tanto la calibración estándar externa como la interna (Longerich et al., 1996). El material de referencia utilizado como estándar primario para este estudio es el denominado MASS-1, el cual consiste de sulfuro sintético prensado (Wilson et al., 2002). Las concentraciones de Fe totales obtenidas previamente por EMPA se utilizaron como estándar interno. Además, el vidrio de referencia GSE-1G (Jochum et al. 2005) se utilizó como estándar secundario para el control de calidad. Las mediciones estándar externas se realizaron al comienzo y al final de cada ronda de análisis y al final de cada ronda de 20 análisis puntuales. La integración y reducción de datos se llevó a cabo utilizando el software de reducción de datos loliteTM (v.2.5) (Paton et al. 2011).

Los mapas realizados por LA-ICP-MS fueron obtenidos por medio de una serie de líneas de ablaciones continuas en el mineral de interés, espaciadas a 10 μm cada una. El tamaño del haz utilizado es de 10 μm , con una frecuencia del pulso del láser de 10 Hz a $\sim 4 \text{ J/cm}^2$ de densidad de energía del láser. La velocidad de avance de la ablación en cada línea se realizaba a una tasa de 10 $\mu\text{m/s}$. Previo a cada línea se realizó una preablación con un spot size de 30 μm , tasa de repetición de 30Hz y avance de 30 $\mu\text{m/s}$ para eliminar la posible contaminación superficial. Los analitos seleccionados para la ablación fueron ajustados para obtener un sweep time (tiempo de barrido de los elementos) de $\sim 2 \text{ ms}$, con lo anterior, todos los elementos tuvieron un tiempo de análisis de 0,01 ms, excepto el Zn y Se que se aumentó a 0,15 ms.

5.4 Resultados

En esta sección se detallan los resultados obtenidos de las técnicas analíticas antes mencionadas.

5.4.1 Observaciones calcográficas

Mediante microscopía óptica convencional con luz reflejada se describieron en las muestras los siguientes sulfuros: pirita, calcopirita, bornita, tennantita, tetrahedrita, galena, esfalerita y molibdenita. Los óxidos más relevantes encontrados son: magnetita, hematita y rutilo.

Las piritas por lo general presentan granos con formas irregulares (anhedrales a subhedrales) (Figs. 38 A y B), con tamaños que varían desde 50 μm hasta los 1,5 mm. Se las puede encontrar diseminadas en la roca, rellenando la matriz en las brecha junto con calcopirita y silicatos, y como agregados de mayor tamaño en el relleno de vetillas, en especial las vetillas del tipo "C" (Figs. 38 C y H), con poca frecuencia sobrecrecidos y en algunos casos reemplazados por calcopirita. Algunos granos de pirita sobrecrecen a cristales de magnetita o agregados de rutilo.

Las calcopiritas presentan tamaños que varían entre 15 μm hasta los 4 mm, y presentan cristales anhedrales a subhedrales (Fig. 38 E). Se encuentran diseminadas en la roca, así como también rellenando la matriz de brechas (Fig. 38 A), y en suturas y halos de vetillas. Se encuentran intercrecidas con bornita en textura de bordes mutuos, rectos (Figs. 38 F y G), y como reemplazos y sobrecrecimiento en los cristales de pirita y magnetita con textura de bordes mutuos.

Los granos de bornita se encuentran diseminados y asociados a calcopirita, presentando formas irregulares (anhedrales), con tamaños que varían entre 25 μm hasta 0,8 mm, reemplazando a la calcopirita en textura bordes mutuos y textura de bordes rectos. También es posible observar intercrecimiento entre calcopirita-bornita (Figs. 38 F, G). Algunas bornitas están intercrecidas con calcosina en textura mirmequítica o de exsolución.

La molibdenita por lo general se encuentra en trazas, diseminadas y en halos de vetillas tipo "B", presentan formas subhedrales, con tamaños $> 30 \mu\text{m}$. Tienen un hábito tabular alargado.

La enargita, tennantita-tetrahedrita, por otra parte, presentan formas anhedrales, asociadas a calcopirita-pirita en vetillas tipo "D" y "E", en textura de bordes mutuos y reemplazando en caries y en borde de grano a calcopirita-pirita. Presenta tamaños variables entre 10 hasta 400 μm .

Finalmente, la galena y esfalerita ocurren en trazas reemplazando en zonas de cavidades a calcopirita en vetillas tardías del tipo "D" y "E".

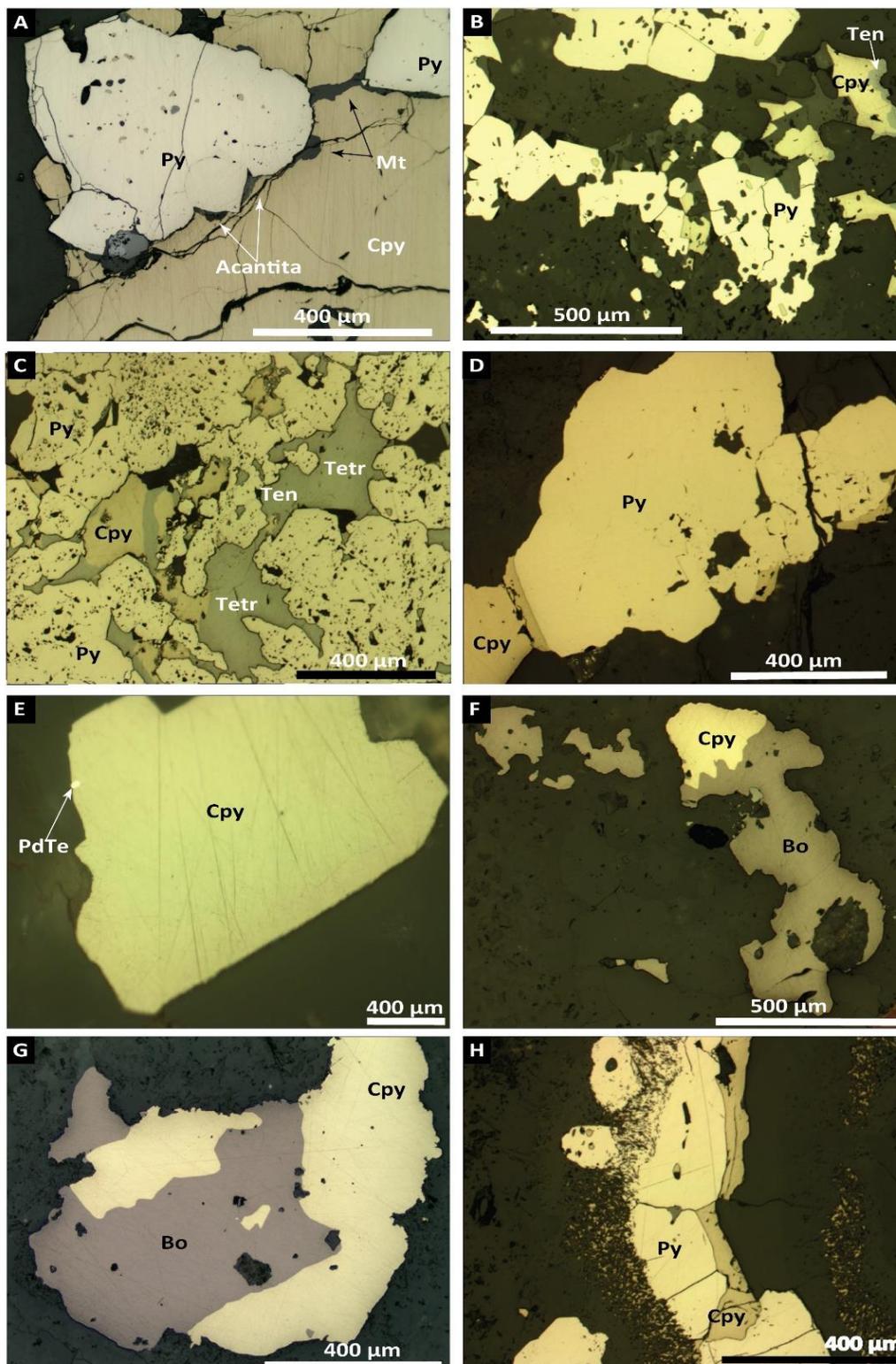


Figura 38. Fotomicrografías mediante luz reflejada de sulfuros predominantes en el yacimiento Río Blanco. A) Asociación pirita-calcopirita-magnetita-acantita en matriz brecha (muestra TSS62_32.4); B) Asociación pirita-calcopirita-tennantita-tetrahedrita, alteración QS (muestra TSS62_286.5); C) Asociación pirita-calcopirita-tennantita-tetrahedrita en vetilla tipo "C" (muestra TSS62_286.5); D) Asociación pirita-calcopirita, pirita con zonación rica en As, alteración SGV (muestra DDH386_459); E) Calcopirita con inclusión de merenskyita (muestra DDH386_564); F) Calcopirita-bornita zona alteración sericita gris verde (muestra DDH386_698); G) Calcopirita-bornita en textura de bordes mutuos, alteración potásica (muestra DDH386_700.1); H) Pirita-calcopirita en vetilla tipo "C" (muestra 4687_61).

5.4.2 Observaciones mediante SEM y FESEM

Las observaciones mediante SEM y FESEM permitieron complementar las observaciones calcográficas, y caracterizar en mayor detalle las micro-texturas e inclusiones minerales presentes en los sulfuros y sulfosales de Cu. Se identificaron en éstos minerales, abundantes micro y nano inclusiones de minerales de Ag y elementos asociados, los cuales se detallan en la Tabla 8. La composición semi-cuantitativa de las inclusiones de Ag y elementos asociados se determinó de manera puntal mediante EDS (Anexos E-I). En algunos casos el mineral formal pudo ser identificado y se reporta por su fórmula estequiométrica. Para aquellos casos donde la identificación formal de la especie mineral no fue posible, se reporta la composición de los elementos detectados.

Tabla 8. Identificación de minerales de Ag mediante observaciones SEM y FESEM. Cpy= calcopirita; Py= pirita; Ten=tennantita; Mo=molibdenita; Bo=bornita; Mt=magnetita; Hm=hematita; Rt=rutilo; Gn=galena; Sl=esfalerita; Ag₂S=acantita; AgCl=cloroargirita; AgTe=teluros de Ag; AuAg=electrum; PbAgS=galena rica en Ag; AgAsS=sulfuro de plata arsénico; AgBi(CuFe)S= sulfuro de plata bismuto.

Sondaje	Muestra	Sulfuros y Óxidos	Minerales de Ag
4320	224.2	Cpy, Py; Mt, Hm, Rt	Ag ₂ S; AgCuAsFeS; CuAgAsZnFeS; AgCl; AgCuAsS
	373.1	Cpy, Py, Ten; Gn; Sl, Rt	AgTe; PbAgS; AgCuAsFeS; PbAgTeS; AgCuAsS
	421.1	Py, Cpy; Mt, Rt	AgTe; AgClBr; AgCu(ClBr)
	531.6	Cpy, Py; Mt, Rt	AgCuFeAsS
4687	M-3538B	Cpy, Py	Ag ₂ S; AgAsS
	M-3535	Cpy, Py, Bo, Gn, Mo; Mt	AgCuBiFeS
DDH-812	160.93	Cpy, Bo, Mo; Rt,	Ag ₂ S; AuAg; AgCl
	221.7	Cpy, Bo, Mo; Rt	Ag ₂ S; AgCl
	276	Cpy, Bo, Mo, Gn; Rt	AgTe; AgCl, Ag ₂ S
	377.5	Cpy, Bo, Mo, Gn, Rt	Ag ₂ S; AgCl; AgTe; AuAgTe, AuPd
	563.4	Cpy, Bo, Gn, Rt	Ag ₂ S; AgCl; AgClBr
	871	Cpy, Bo, Mo, Rt	Ag ₂ S; AgCl; AgClBr
DDH-386	133.9	Cpy, Bo, Mo, Py, Ten; Mt; Rt	Ag ₂ S; PbAgS; Pb(AgClSe)S; Ag(SeTe); AuAg; AgTe
	154.2	Cpy, Py, Mo	Ag ₂ S; PbAgS; Pb(AgCl)S; AgAsS; AgTe; AgPdTe
	459	Cpy, Py, Mo, Mt	Ag ₂ S; PbAgS; AgTe; AgBiS; AgSe; AuAg
	477.9	Cpy, Mo, Rt	Ag ₂ S; AgTe; AgSbAsS
	564	Cpy, Bo, Ten, Cc, Rt	Ag ₂ S; AuAg, Ag(ClBr);
	598	Cpy, Bo, Mo, Rt	Ag ₂ S; AgTe; AgCl; Ag(ClBr)
	618	Cpy, Bo, Rt, Hm	Ag(SeTe); AuAg; AgCl
700.1	Cpy, Bo, Mo, Rt	Ag ₂ S; AgTe; AgCl; AuAg	
TSS-62	32.4	Cpy, Py, Mt; Hm	Ag ₂ S; AgTe; AgCuS; AgAsS
	129.8	Cpy, Py, Mt; Hm, Rt	Ag ₂ S; AgTe; AuAg; Ag(CuAs)S; AuAg(CuFeAs)S
	286.5	Py, Cpy, Bo, Mo, Ten, Mt,	Ag ₂ S; AgBi(CuFe)S; AgBi(CuAs)S
	424.6	Cpy, Py, Bo; Mt, Hm	Ag ₂ S; Ag(BiCu)S; AgZnS; AgCl
	693.3	Cpy, Py, Ten, Mo; Mt, Rt	Ag ₂ S; BiCuAgS; AgTe; AgAs; AgCl; Ag(SeTe); Cu(AgAsZn)S
	788	Cpy, Py, Ten, Mo; Rt	Ag ₂ S; AgTe; AgAsS; Pb(AgSe)S; Ag(CuAs)S; Ag(SeTe); Zn(AgFe)S; AgCl

Sulfuros de plata

Las minerales de Ag más comunes identificadas en sulfuros en Río Blanco corresponden a acantita (Ag₂S). Ésta se presenta en su mayoría como cristales anhedrales (Figs. 39 A, B y C) y también formando inclusiones subhedrales, con tamaños que van desde 1 µm a 50 µm. Se presentan por lo general en texturas de borde de grano entre calcopirita-pirita, calcopirita-magnetita (Figs. 39 C y D) y rellenando vetillas entre calcopirita (Figs. 39 E, F) y pirita. También se observan como clústers de micro a nano inclusiones (< 1 µm) en calcopirita y bornita. Algunos cristales se ubican en texturas de reemplazo en borde de grano entre calcopirita-bornita. Los sulfuros de plata por lo general, son más común

encontrarlos desde la zona de alteración sericita gris verde (SGV), hasta la zona de alteración cuarzo-sericita (QS), con un mayor número de partículas y tamaños de granos en la zona (QS).

Teluros de plata y de plata-paladio

Los teluros de plata corresponden principalmente a hessita (Ag_2Te) y por lo general se presentan como micro a nanopartículas $<2 \mu\text{m}$ diseminadas en calcopirita-bornita de formas anhedrales a subhedrales, y presentan un hábito tabular alargado (Figs. 40 A-F). Algunos teluros de plata se encuentran asociados con Au o Pd (Figs. 40 D-F) y en zonaciones con minerales que contienen Cu y Bi (Fig. 41 F). Estos minerales fueron encontrados en la zona de alteración potásica y en menor grado en la zona transicional.

Sulfuros de plata-cobre-arsénico: (Ag, Cu, As)S

Estas fases sulfuradas de Ag se presentan como cristales anhedrales, ubicados en bordes de grano en calcopirita y rellenando microvetillas en pirita y calcopirita. Algunos cristales pueden contener además de Sb, y sus tamaños son menores a $3 \mu\text{m}$. Generalmente están asociados genéticamente con las zonas de alteración sericita gris verde (SGV) y alteración cuarzo-sericita (QS) (Figs. 41 A-C)

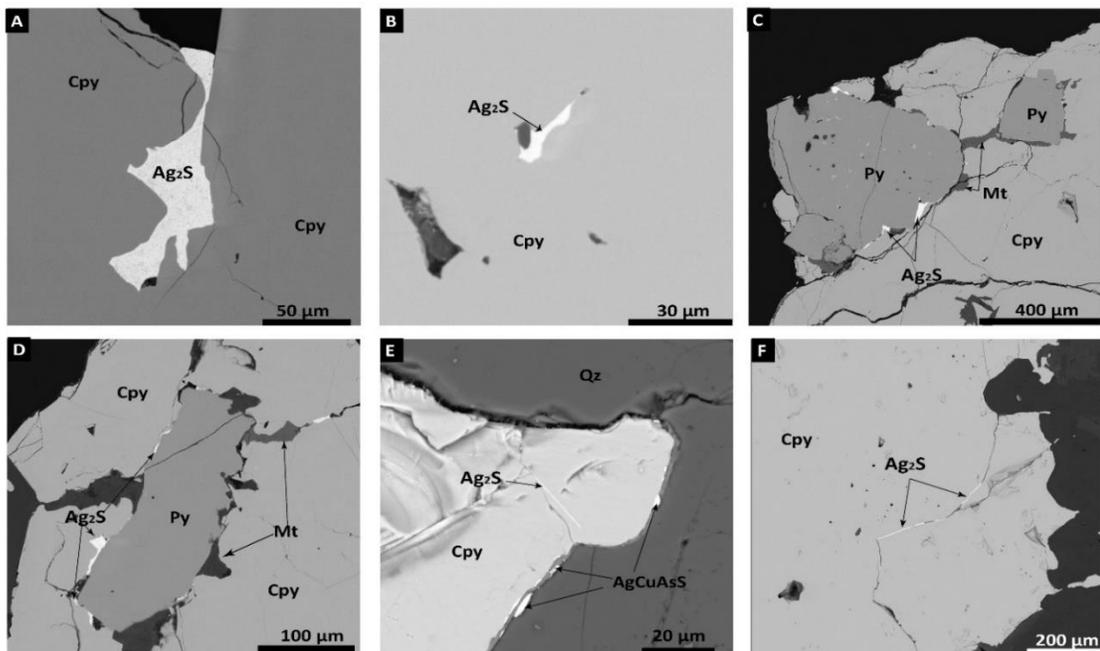


Figura 39. Imágenes SEM-BSE de acantita (Ag_2S). A) Acantita rellenando fractura en calcopirita (muestra TSS62_129.8); B) Acantita rellenando cavidad en calcopirita (muestra TSS62_129.8); C) Acantita en borde de grano entre calcopirita-pirita-magnetita, rellenando espacios intersticiales entre granos de calcopirita-pirita (muestra TSS62_32.4); D) Sulfuro de plata en borde de grano entre calcopirita-pirita-magnetita (muestra TSS62_32.4); E) Acantita rellenando vetilla en calcopirita, sulfuro de AgCuAsS en borde de grano entre calcopirita-cuarzo (muestra TSS62_32.4); F) Acantita rellenando vetilla en calcopirita (muestra DDH-386_154.2).

Sulfuros de plata-bismuto-cobre-hierro: (Ag, Bi, Cu, Fe)S

Estos sulfuros se presentan como nanopartículas ($< 1 \mu\text{m}$) en calcopirita (Fig. 41 D), formando como cristales anhedrales en textura de sobrecrecimiento en borde de grano y

rellenando cavidades en calcopirita (Fig. 41 E). En ocasiones ocurren agrupados en clústers de nanopartículas dentro de cristales de calcopirita. Algunos de estos sulfuros se encuentran zonados, con partes enriquecidas con hessita (Fig. 41 F). Asociado a las zonas de alteración transicional sericita gris verde y cuarzo-sericita.

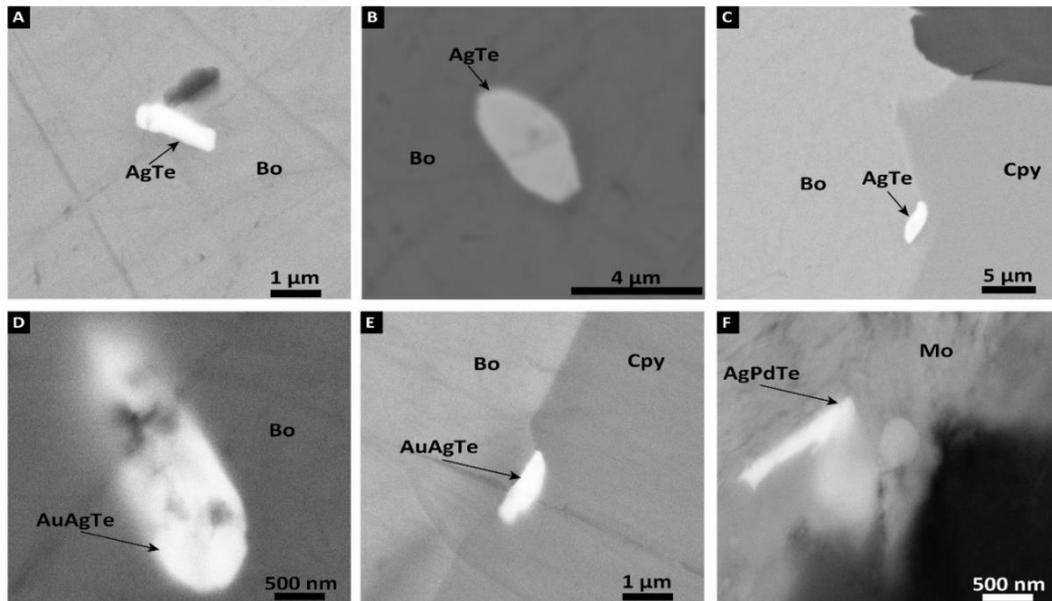


Figura 40. Inclusiones micrométricas a nanométricas de teluros de Ag en calcopirita-bornita-molibdenita, observaciones mediante FESEM. A) Nano inclusión de hessita en bornita (muestra DDH386_133.9); B) Inclusión de hessita en bornita (muestra DDH386_459); C) Micro inclusión de hessita en borde de grano entre bornita-calcopirita (muestra DDH386_459); D) Nano inclusión de AuAgTe en bornita (muestra DDH812_377.5); E) nano-inclusión de AuAgTe en borde de grano entre calcopirita-bornita (muestra DDH812_563.4); F) nano inclusión de teluro de plata-paladio en molibdenita (muestra DDH386_700.1)

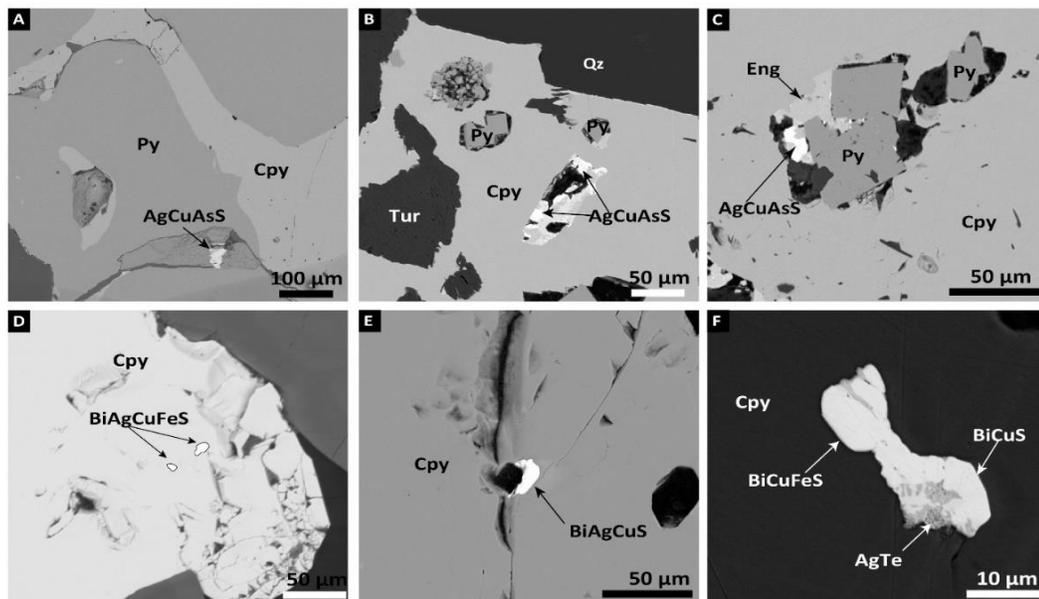


Figura 41. Imágenes SEM de sulfuros de Ag-Cu-As. A) Sulfuro de Ag-Cu-As rellenando cavidad en pirita (muestra 4320_224.2); B) Sulfuro de Ag-Cu-As rellenando cavidad en calcopirita (muestra 4320_373.1); C) Sulfuro de Ag-Cu-As rellenando cavidad en calcopirita-pirita, asociado a enargita (Eng) (muestra 4320_373.1); D) Micro partículas de sulfuro de Ag-Cu-Bi-Fe en calcopirita (muestra TSS62_693.3); E) Micro partículas de sulfuro de Ag-Cu-Bi-Fe rellenando cavidad en calcopirita (muestra TSS62_693.3); F) Micro partículas de witichenita (BiCuS) en calcopirita, con textura de exsolución de hessita (muestra TSS62_693.3). Tur= turmalina.

Inclusiones de metales nobles (Au, Ag, Pd, Pt)

La inspección detallada mediante SEM y FESEM de granos de calcopirita y bornita que contienen minerales de Ag, reveló la presencia de inclusiones de tamaño micro a nanométrico de minerales del grupo del platino (PGM, del inglés *platinum group elements*) (Crespo et al. 2018).

Las inclusiones de PGM ocurren usualmente a lo largo de los bordes de grano y sus morfologías varían de subhedral a tabular, con tamaños que van desde ~400 nm hasta ~4 μm . Debido al tamaño submicrométrico de la mayoría de las inclusiones, la caracterización química se llevó a cabo de manera semicuantitativa exclusivamente mediante FESEM-EDS. En la mayoría de los granos se detectaron Pd y Te, junto con Cu, Fe y S de la matriz del sulfuro huésped (Figs. 42 A, B y D). Los análisis FESEM-EDS de los granos que contienen Pd-Te son consistentes con el mineral merenskyita, $(\text{Pd,Pt})(\text{Te,Bi})_2$ (Crespo et al. 2018). Un análisis cuantitativo EMPA-WDS de la inclusión de merenskyita (Fig. 42 C), mostró concentraciones de 23,7 wt% Pd y 65,3 wt% Te, 1,3 wt% Pt, 0,4 wt% Bi, 0,1 wt% Au, y 0,1 wt% Os.

Las inclusiones minerales que contienen Au, Ag, Hg y Se, se muestran en la Figura 43. La mayoría de estas inclusiones tienen formas anhedrales a subhedrales, algunas con hábitos rectangulares y tabulares alargados. Estas inclusiones ocurren a lo largo de los bordes de grano en bornitas y calcopiritas (Fig. 43 A). El análisis semicuantitativo FESEM-EDS mostró que estas inclusiones son del tipo electrum (Au, Ag \pm Hg) (Figs. 43 A-D), y variedades minerales Au-Ag-Te tales como la petzita (Au_3AgTe_2) (Fig. 43 B)

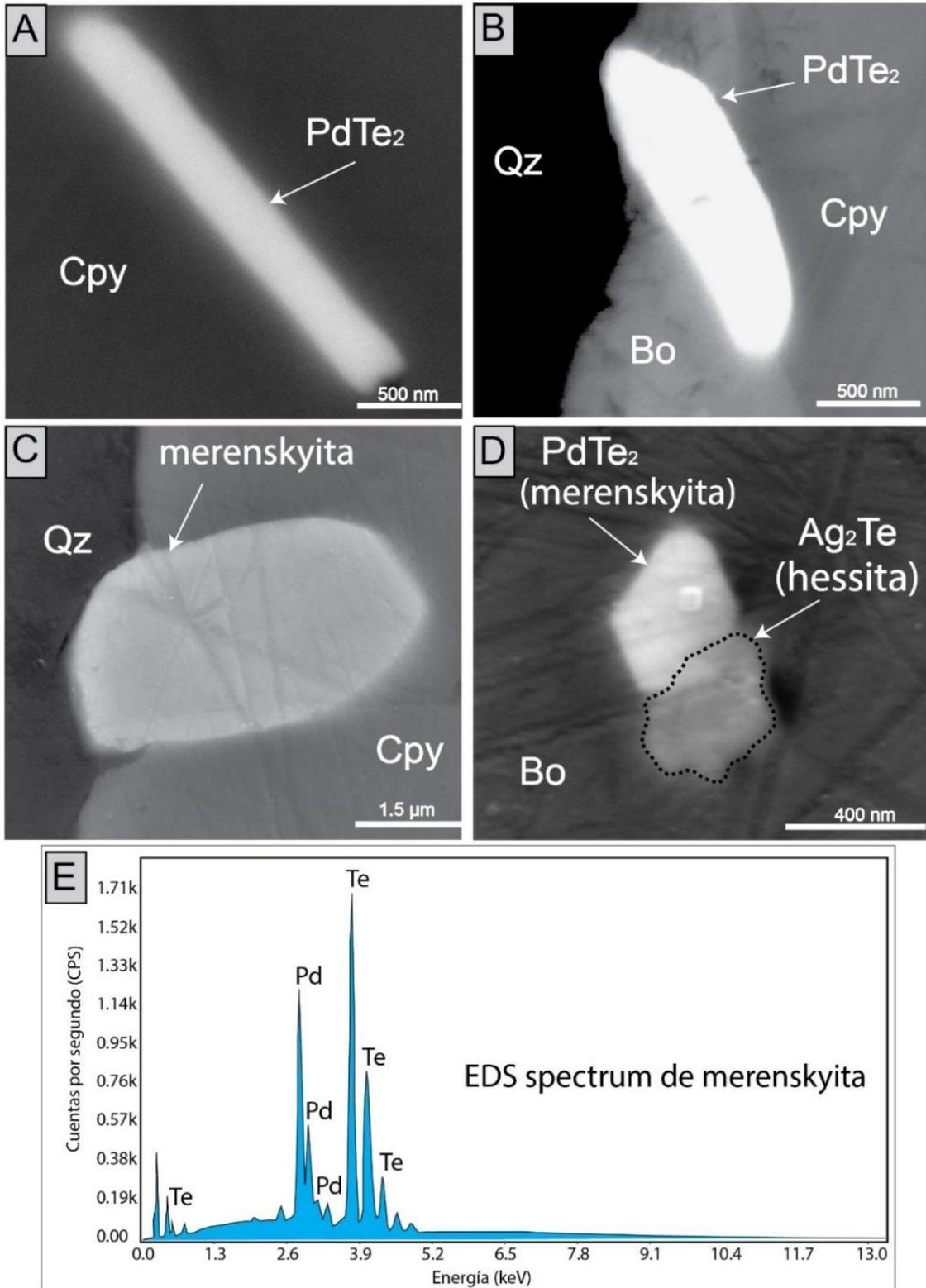


Figura 42. Imágenes FESEM de minerales del grupo del platino (PGM) en calcopirita y bornita. Teluros de paladio se muestran en las imágenes A-D. Las imágenes A y B fueron tomadas usando el detector de electrones retrodispersados (BSE), mientras que las imágenes C y D fueron tomadas usando el detector de electrones secundarios (SE). E) Espectro EDS del grano de telurio de paladio de la imagen C. Cpy=calcopirita; Bo=bornita; Qz=cuarzo; Ag₂Te= hessita; PdTe₂= merenskyita. Modificado de Crespo et al. (2018).

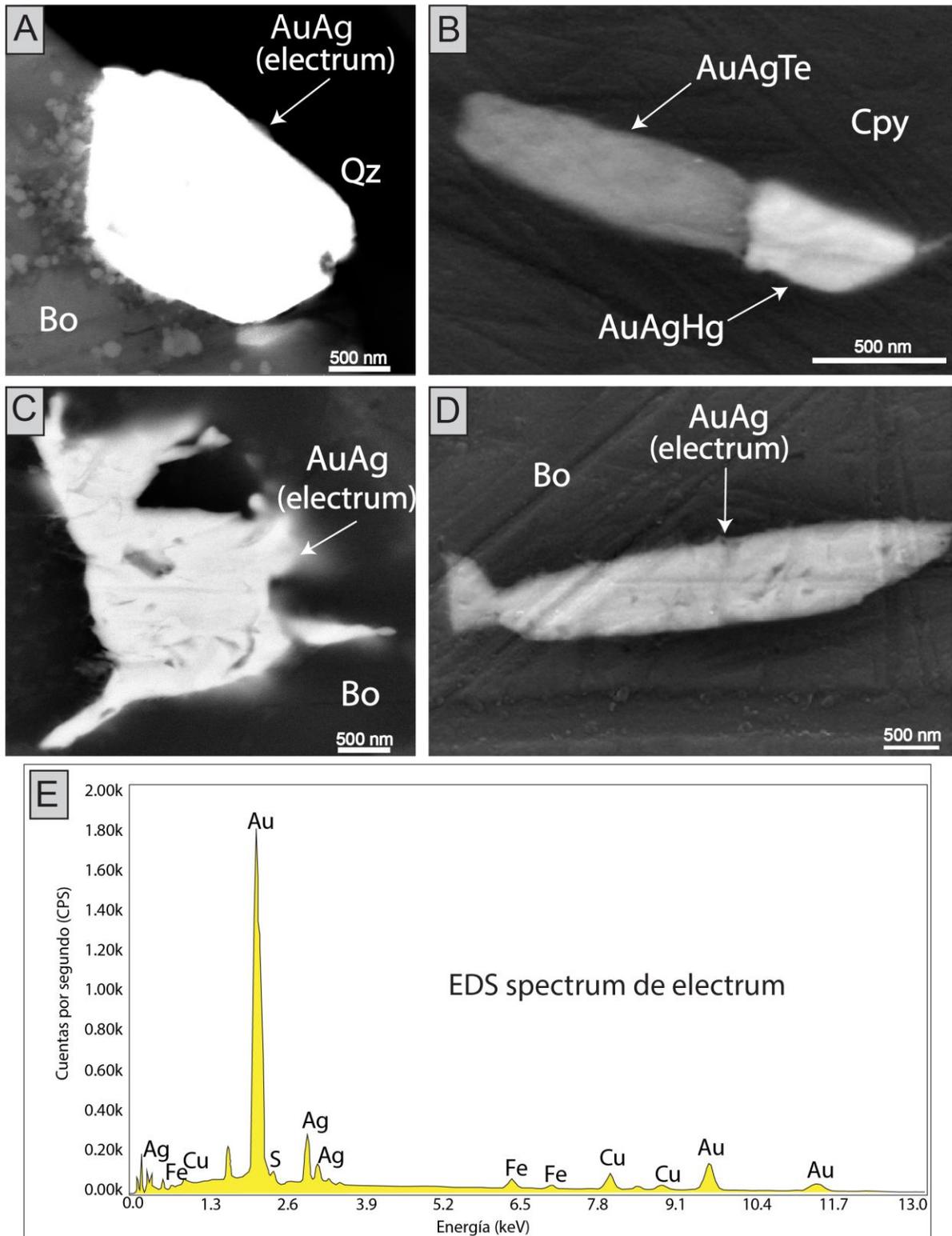


Figura 43 Imágenes FESEM de inclusiones minerales de Ag, Au, Hg y Te, en calcopirita y bornita. Granos de electrum (Au, Ag) se muestran en las imágenes A-D. Fases con Au-Ag-Te y Au-Ag-Hg se muestran en la imagen B. Imágenes A y C fueron tomadas usando el detector de electrones retrodispersados (BSE), mientras que las imágenes B y D fueron tomadas usando el detector de electrones secundarios (SE). E) Espectros EDS del grano de electrum de la imagen A. Cpy=calcopirita; Bo=bornita; Qz= cuarzo; AuAg=electrum; AuAgTe posiblemente sylvanita o petzita. Modificado de Crespo et al. (2018).

5.4.3 Resultados de análisis en sulfuros mediante EMPA y LA-ICP-MS

A continuación se presentan los datos microanalíticos de elementos mayores, menores y trazas obtenidos para los distintos sulfuros de Cu(Fe) (pirita, calcopirita, bornita) y sulfosales de Cu (enargita, tennantita y tetrahedrita). Adicionalmente, se presentan análisis de sulfuros de plata (acantita) y de minerales del grupo de platino (merenskyita).

Las técnicas de análisis mediante microsonda electrónica (EMPA) y espectrometría masas por inducción de plasma acoplado a un sistema de ablación laser (LA-ICP-MS) fueron utilizadas en su conjunto, ya que ambas poseen capacidades y ventajas distintivas. Por ejemplo, las técnicas de EMPA permiten mayor resolución espacial debido al menor tamaño del haz ($\sim 1 \mu\text{m}$), en comparación con LA-ICP-MS (haz $\sim 20\text{-}40 \mu\text{m}$); sin embargo, las técnicas de LA-ICP-MS permiten abarcar un rango de concentraciones mucho mayor (a ppb) que la microsonda electrónica, la cual posee límites de detección más altos ($>100 \text{ ppm}$) para gran parte de los elementos a analizar.

Las tablas de datos EMPA se presentan en los Apéndices 1-5, mientras los análisis LA-ICP-MS se incluyen en los Apéndices 6-9.

Pirita (FeS₂)

Los análisis mediante EMPA y LA-ICP-MS de piritas de las zonas de alteración potásica, cuarzo-sericita y sericita gris verde están reportados en los Apéndices 1 y 6. Es importante tomar en cuenta que los análisis fueron realizados en granos de pirita homogéneos que no presentaban inclusiones visibles a la escala de observación del SEM y EMPA. Sin embargo, es importante considerar que la presencia de nano inclusiones o clústers de nanopartículas de minerales no es posible de detectar previo al análisis, por lo que es probable que algunos análisis hayan sido afectados por la ablación de inclusiones submicrométricas presentes dentro de los granos de pirita. Este efecto puede evaluarse, por ejemplo, observando potenciales discrepancias en los datos de EMPA y LA-ICP-MS para distintos elementos, lo que estaría indicando la presencia de inclusiones minerales que aportan de manera discreta a la señal de EMPA o LA-ICP-MS, dependiendo de su tamaño.

Para una mejor evaluación de los datos composicionales, en la Figura 44 se despliega un diagrama de cajas o box plot de piritas con los datos EMPA y LA-ICP-MS. Las cajas grises representan a la suma total de análisis EMPA y LA-ICP-MS ($n=112$), mientras que las cajas naranjas corresponden a los análisis EMPA y las cajas verdes a los análisis LA-ICP-MS. Cabe mencionar que el límite de detección para los elementos analizados con EMPA fue de alrededor 100 ppm, representándose en la Figura 44 con la línea horizontal segmentada. Los datos están expresados en partes por millón (ppm) sobre una escala vertical logarítmica. En cada caja se muestra las concentraciones mínimas, la mediana y el valor máximo, además el número de análisis que están sobre el límite de detección. Los círculos sobre el valor mínimo y máximo corresponden a los valores atípicos o denominados outliers.

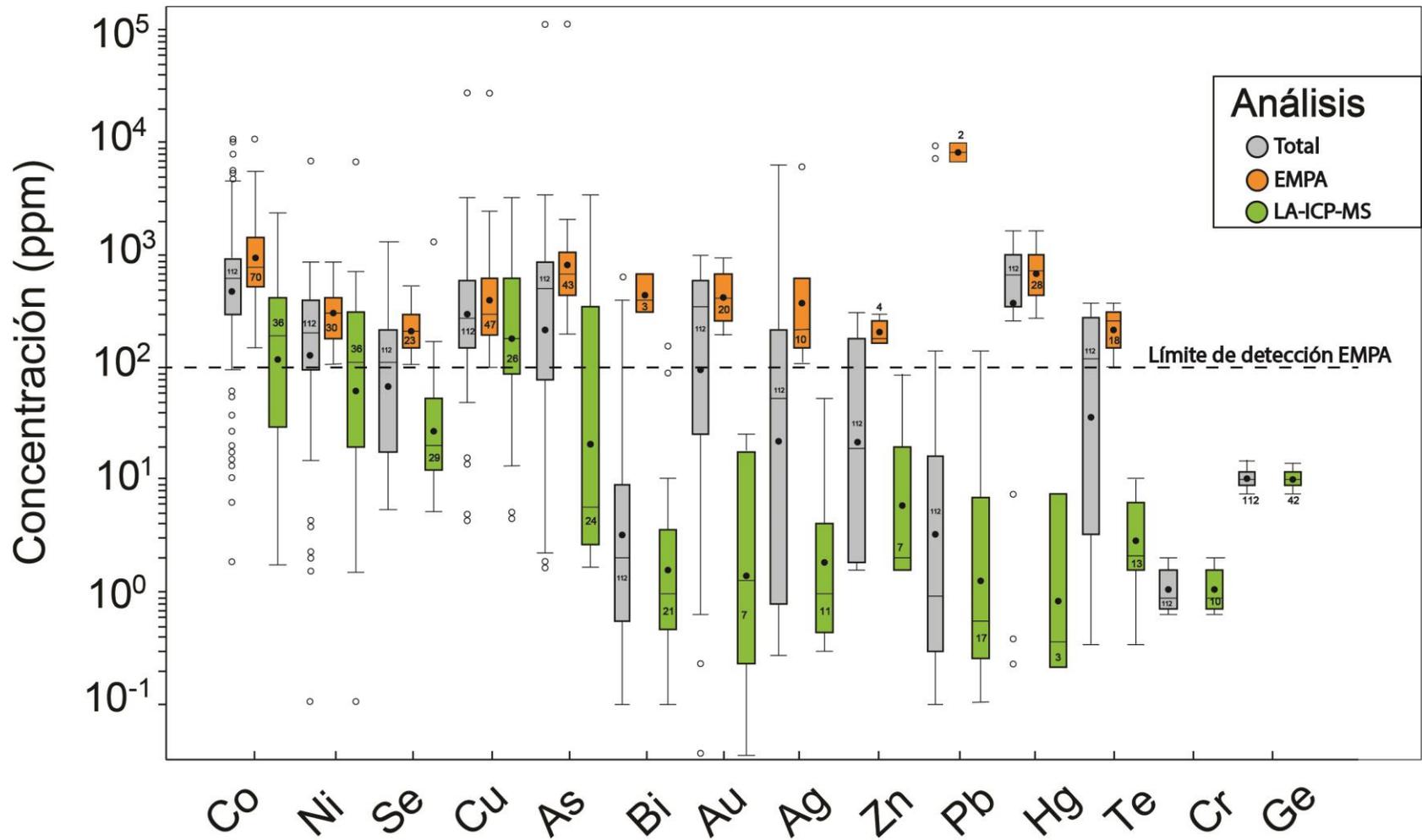


Figura 44. Diagrama de cajas de las concentraciones para elementos menores y traza en pirita del yacimiento Río Blanco con datos EMPA y LA-ICP-MS. Datos EMPA cajas anaranjadas y los datos LA-ICP-MS cajas verdes. Total de los análisis EMPA más LA-ICP-MS expresados en cajas de color gris.

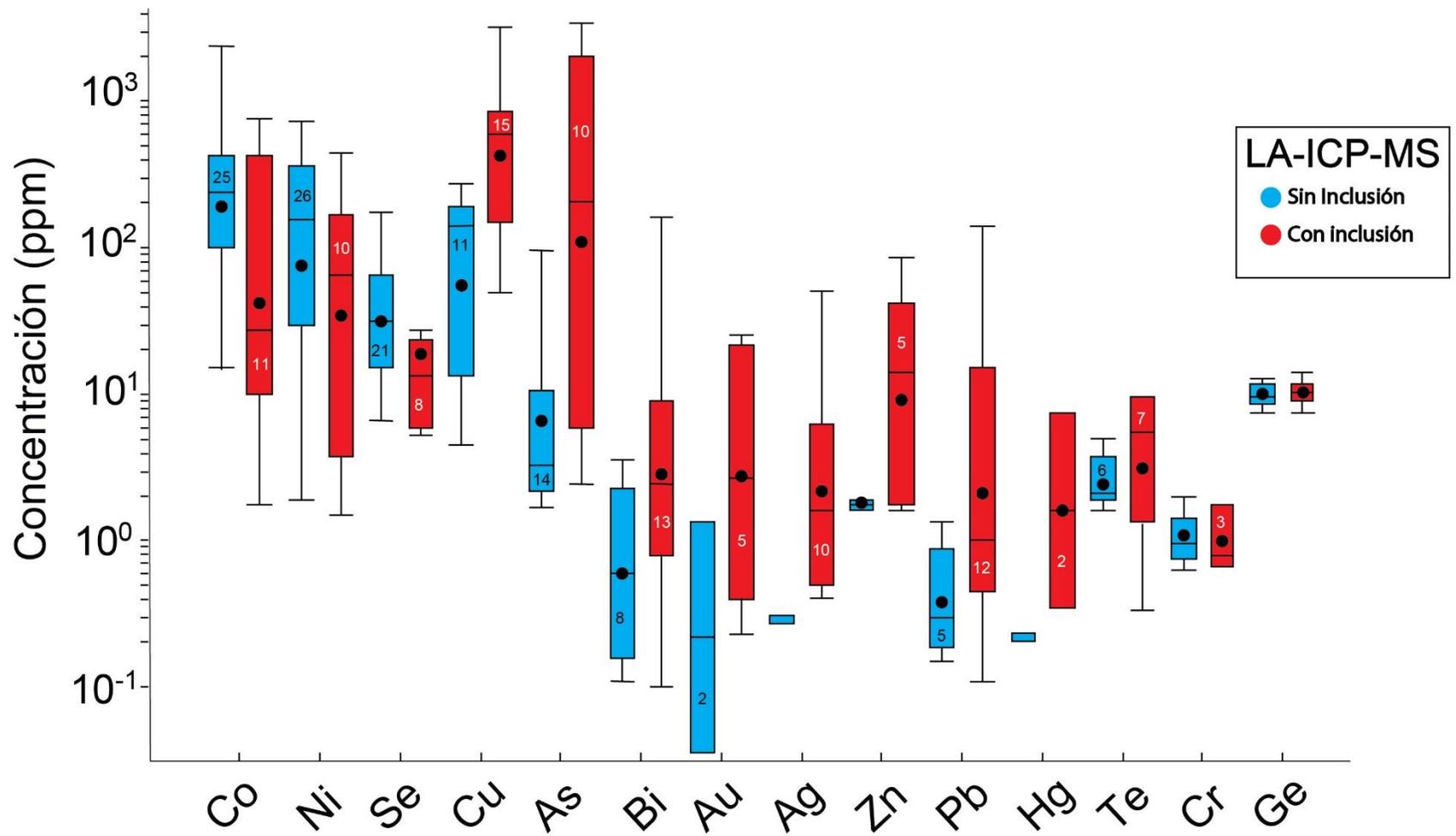


Figura 45. Diagrama de cajas de elementos menores y trazas en pirita “sin/con inclusiones” minerales LA-ICP-MS análisis. Cajas de color azul representan los datos sin inclusiones minerales, mientras que las cajas de color rojo representan los datos con inclusiones minerales.

Elementos mayores, menores y traza en piritas

Los análisis EMPA muestran que las concentraciones de Fe en la pirita varían de 39,44 a 48,29 wt%, mientras que el S tiene rangos que van desde 42,88 hasta 53,55 wt%. Como se mencionó anteriormente, algunos análisis LA-ICP-MS presentaron inclusiones minerales, por lo que se filtraron los espectros de análisis LA-ICP-MS considerando la potencial presencia de inclusiones minerales. El filtrado de datos se realizó analizando la señal transiente en los espectros LA-ICP-MS (Fig. 46)

La Figura 46 muestra dos perfiles de profundidad-concentración (tiempo vs. intensidad) de análisis LA-ICP-MS de un grano de pirita de la zona de alteración QS y una imagen de electrones retrodispersado (BSE) (muestra TSS62_286.5). Se observa que el análisis X286C5_9 no presenta inclusiones minerales, mientras que el análisis X286C5_10 presenta inclusiones de ^{75}As , ^{123}Sb y ^{65}Cu acoplados, los isótopos ^{208}Pb y ^{107}Ag presentan un pequeño incremento en la señal. La imagen BSE muestra un grano de calcopirita-pirita-tennantita-tetrahedrita, los círculos blancos segmentados representan a los sitios de los análisis LA-ICP-MS.

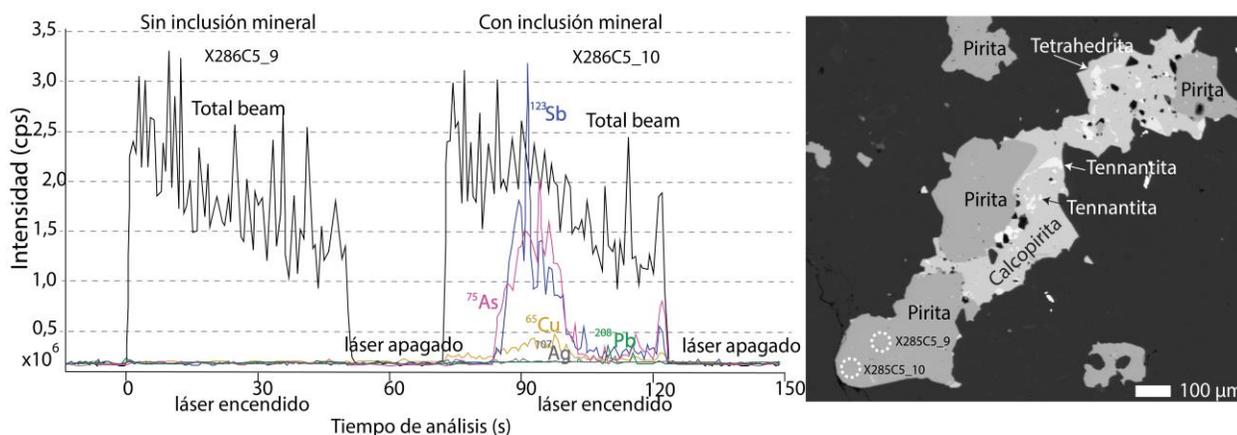


Figura 46. Perfiles de concentración LA-ICP-MS (tiempo vs. intensidad) de isótopos seleccionados en pirita de la zona de alteración cuarzo-sericita (muestra TSS-62_286.5). Análisis X286C5_9 sin inclusión mineral, análisis X286C5_10 con inclusión mineral de ^{75}As , ^{123}Sb , ^{65}Cu , ^{107}Ag , ^{208}Pb . La señal total beam representada en color negro. Imagen de electrones electrodispersados de un grano de calcopirita-pirita-tennantita-tetrahedrita, círculos segmentados representan los análisis LA-ICP-MS.

La Figura 45 muestra un diagrama de cajas para los elementos traza Co, Ni, Se, Cu, As, Bi, Au, Ag, Zn, Pb, Hg, Te, Cr y Ge, donde se comparan los datos LA-ICP-MS en función de la presencia y ausencia de inclusiones. Las cajas azules corresponden a los datos que no presentan inclusiones minerales, mientras que las cajas rojas representan los datos de pirita con inclusiones. Esta representación permite evaluar de manera más certera la presencia de elementos traza contenidos en la estructura cristalina (solución sólida) de la pirita vs. en inclusiones.

Los análisis LA-ICP-MS en piritas muestran cantidades significativas de As (<3.360ppm), Cu (<3.170 ppm), Co (<2.360 ppm) y Ni (<717 ppm), y concentraciones apreciables a bajas de Bi (<158 ppm), Pb (<139 ppm), Zn (<84 ppm), Se (<1.320), Sb (<28,7 ppm), In (<14 ppm), Ge (<14 ppm), Te (<10 ppm), Hg (<7,3 ppm), y Cr (<1,99 ppm). Las

concentraciones de Ag varían entre 0,29 a 52 ppm, con una mediana de 0,95 ppm, mientras que los valores de Au varían entre 0,04 a 25,4 ppm, con una mediana de 1,31 ppm (Fig. 44; Apéndice 6).

Los contenidos promedios de Co, Ni y Se son más altos en piritas sin inclusiones, mientras que para estos mismos elementos sus contenidos promedio disminuyen cuando el análisis presenta inclusiones minerales (Fig. 45). Para los elementos Cu, As, Bi, Au, Ag, Zn, Pb, Hg y Te, ocurre lo contrario, los contenidos promedio de estos elementos es menor en los análisis sin inclusiones, aumentando sus contenidos promedio cuando el análisis coincide con una inclusión mineral.

Diagramas elementales de dispersión en piritas.

En la Figura 47 se muestran diagramas elementales de dispersión en piritas para Co vs. Ni, Co vs. Cu, Co vs. Se, Co vs. As, Co vs. Bi y Co vs. Pb. Al igual que en la Figura 45, se consideran tanto los datos sin inclusiones minerales (color rojo) y los datos con inclusiones minerales (color verde). El Co presenta una correspondencia positiva con el Ni, con casi todas las relaciones Co/Ni entre los razones 0,1 y 10 (Fig. 47 A). La mayoría de los análisis de piritas que no contienen inclusiones presentan los más altos contenidos de Co y Ni. El Co presenta correspondencias negativas con Cu, As, Bi y Pb (Figs. 47 B, D, E y F), en donde los más altos contenidos de Co se encuentran en las piritas prístinas y los menores contenidos de Co en las piritas con inclusiones.

Otras tendencias ya sea positivas o negativas se pudieron identificar para las piritas. Para el caso del As vs. Ni, Ni vs. Cu las tendencias son negativas (Figs. 48 A y C), mientras que el As vs. Te presentan tendencias positivas (Fig. 48 B). En la Figura 48 D, se graficaron todos los datos obtenidos por EMPA y LA-ICP-MS en el diagrama de solubilidad Au-As de piritas definido por Reich et al., (2005), en donde todos los análisis realizados por EMPA caen en el campo de Au en inclusiones (Au^0), mientras que los análisis por LA-ICP-MS están dentro del campo de Au en la estructura de la pirita como solución sólida (Au^{+1}), además, para los datos por LA-ICP-MS, se observa una tendencia positiva entre Au vs. As con un coeficiente de correlación $r= 0,93$ (Fig. 48 D, estrellas púrpuras).

Para el caso de la Ag en piritas, en la Figura 49 se observa que presenta correspondencias positivas entre Ag vs. Pb, Ag vs. Bi y Ag vs. Zn (Figs. 49 A-C) con coeficientes de correlación $r= 0,95$, $0,86$ y $0,79$ respectivamente. Mientras que para el caso de Pb vs. Bi la tendencia también es positiva con un coeficiente de correlación $r= 0,83$.

Según lo observado en las Figura 45 y 46 y los diagramas de dispersión de las Figuras 47, 48 y 49, se puede decir que las piritas presentan inclusiones minerales enriquecidas en Cu, Sb, As, Bi, Au, Ag, Zn, Pb, Hg, y Te. No todas las inclusiones minerales presentes en las piritas contienen todos los elementos antes mencionados, algunas piritas pueden tener inclusiones minerales con más de un elemento, como es el caso del Pb, Bi y Ag, y en otros casos elementos como el As, Sb, Au y Cu (Fig. 46).

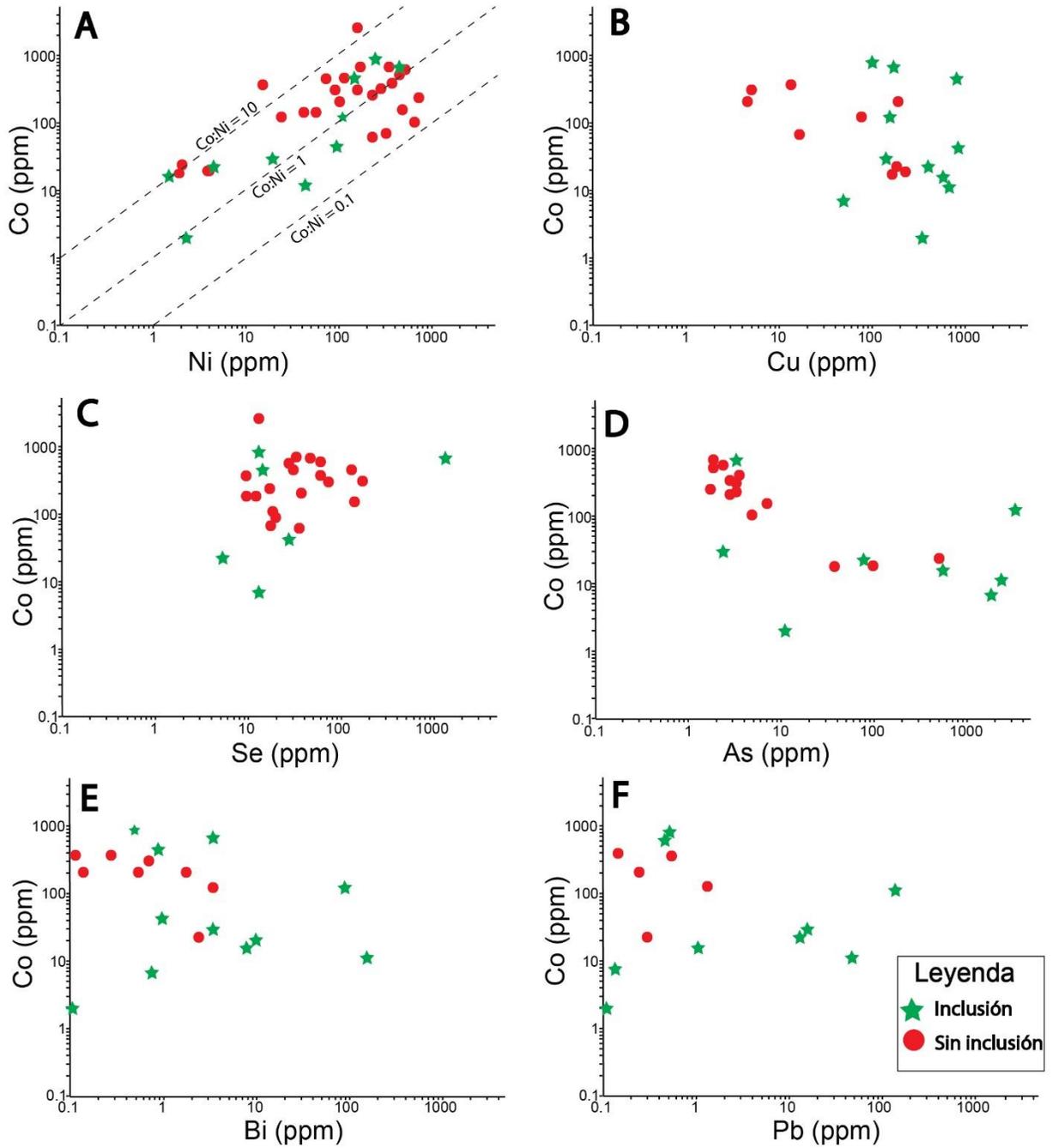


Figura 47. Diagramas de dispersión en piritas para elementos seleccionados. Base de datos LA-ICP-MS (Apéndice 6) Datos con inclusiones color verde, datos sin inclusiones en color rojo. A) Co vs. Ni; B) Co vs Cu; C) Co vs Se; D) Co vs. As; E) Co vs. Bi; F) Co vs. Pb. Todas las concentraciones están reportadas en partes por millón (ppm).

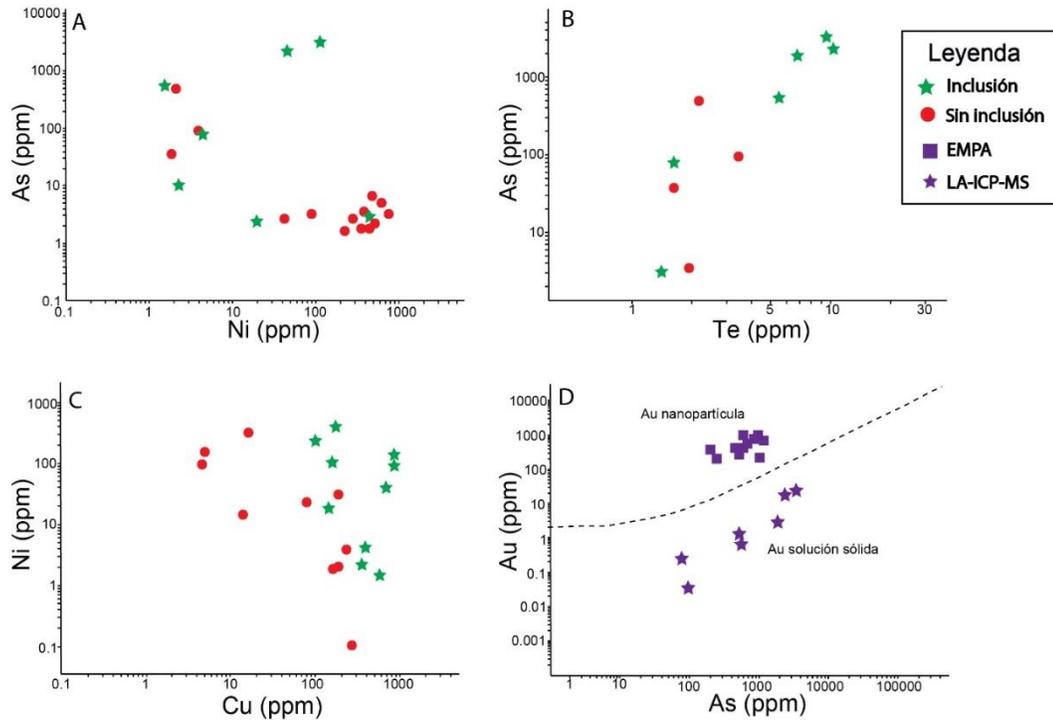


Figura 48. Diagramas de dispersión en piritas para elementos seleccionados As-Ni-Te-Cu-Au. Datos con inclusiones color verde, datos sin inclusiones en color rojo. A) As vs. Ni; B) As vs. Te; C) Ni vs. Cu; D) Diagrama Au vs. As, donde se representa el límite de solubilidad de Au en función del contenido de As en pirita, determinado por Reich et al., (2005). Los cuadrados representan los análisis EMPA, los triángulos representan los análisis LA-ICP-MS. Todas las concentraciones están reportadas en partes por millón (ppm). Base de datos LA-ICP-MS (Apéndice 6)

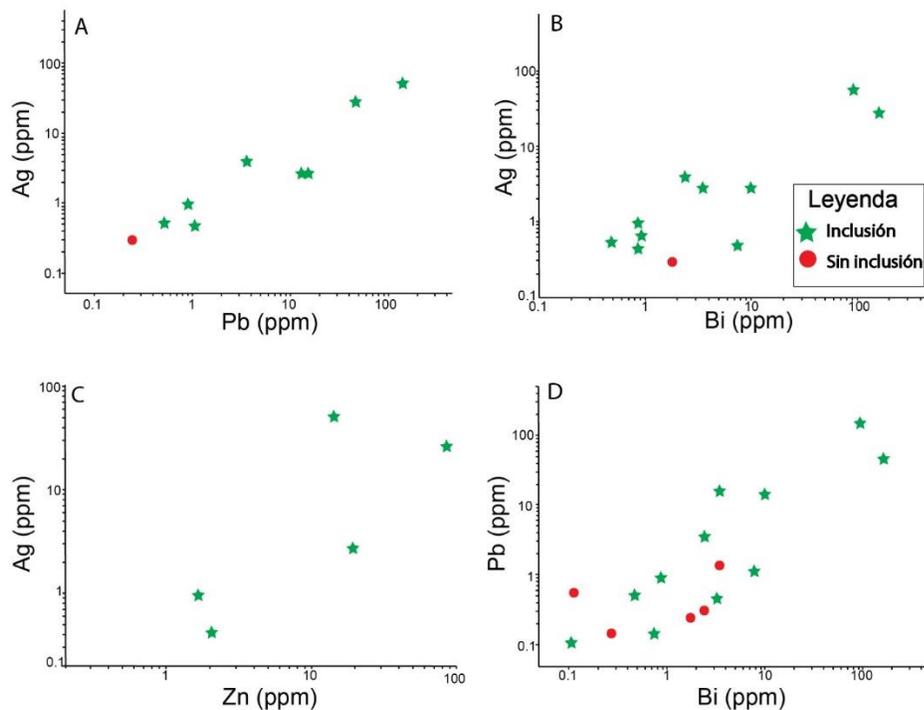


Figura 49. Diagramas de dispersión en piritas para los elementos Ag, Pb, Bi, Zn. A) Ag vs. Pb; B) Ag vs. Bi; C) Ag vs. Zn; D) Pb vs. Bi. Todas las concentraciones están reportadas en partes por millón (ppm). Base de datos LA-ICP-MS (Apéndice 6)

Mapas EMPA-WDS de piratas

Las Figuras 50 y 51 muestran imágenes de contraste BSE y mapas de rayos-X WDS en pirita para elementos seleccionados. Algunas piritas de la zona de alteración QS (muestra TSS62_286.5) presentan una distintiva zonación oscilatoria en el borde de grano, con bandas ricas en As-Ag-Cu (Fig. 50). Análisis EMPA en las bandas ricas en As-Ag-Cu muestran altos contenidos de Ag ~0,59 wt%, As ~11,31 wt%, Cu ~2,76 wt%, Pb ~0,83 wt%, Sb ~0,29 wt%, y Hg ~0,07 wt%, mientras que los contenidos de Fe y S son ~39,49 wt% y ~43,01 wt% respectivamente (Apéndice 1_TSS-62_286.5) (Figs. 50 E, F). En el núcleo de estas piritas, los contenidos de Fe y S son más altos que en los bordes con valores de ~47,68 wt% y ~51,82 wt% respectivamente (Figs. 50 E, F), con contenidos de As ~0,12 wt%, Cu ~0,1 wt% y valores de Ag bajo el límite de detección. Se deduce de esta textura la ocurrencia de un evento de enriquecimiento en As-Ag-Cu en los bordes de grano de pirita. Las zonas ricas en As-Ag-Cu (Figs. 50 B-D), se anticorrelacionan con los contenidos de Fe y S (Figs. 50 E, F), sugiriendo un reemplazo en sitios estructurales de la pirita (Reich et al. 2005; Deditius et al. 2014).

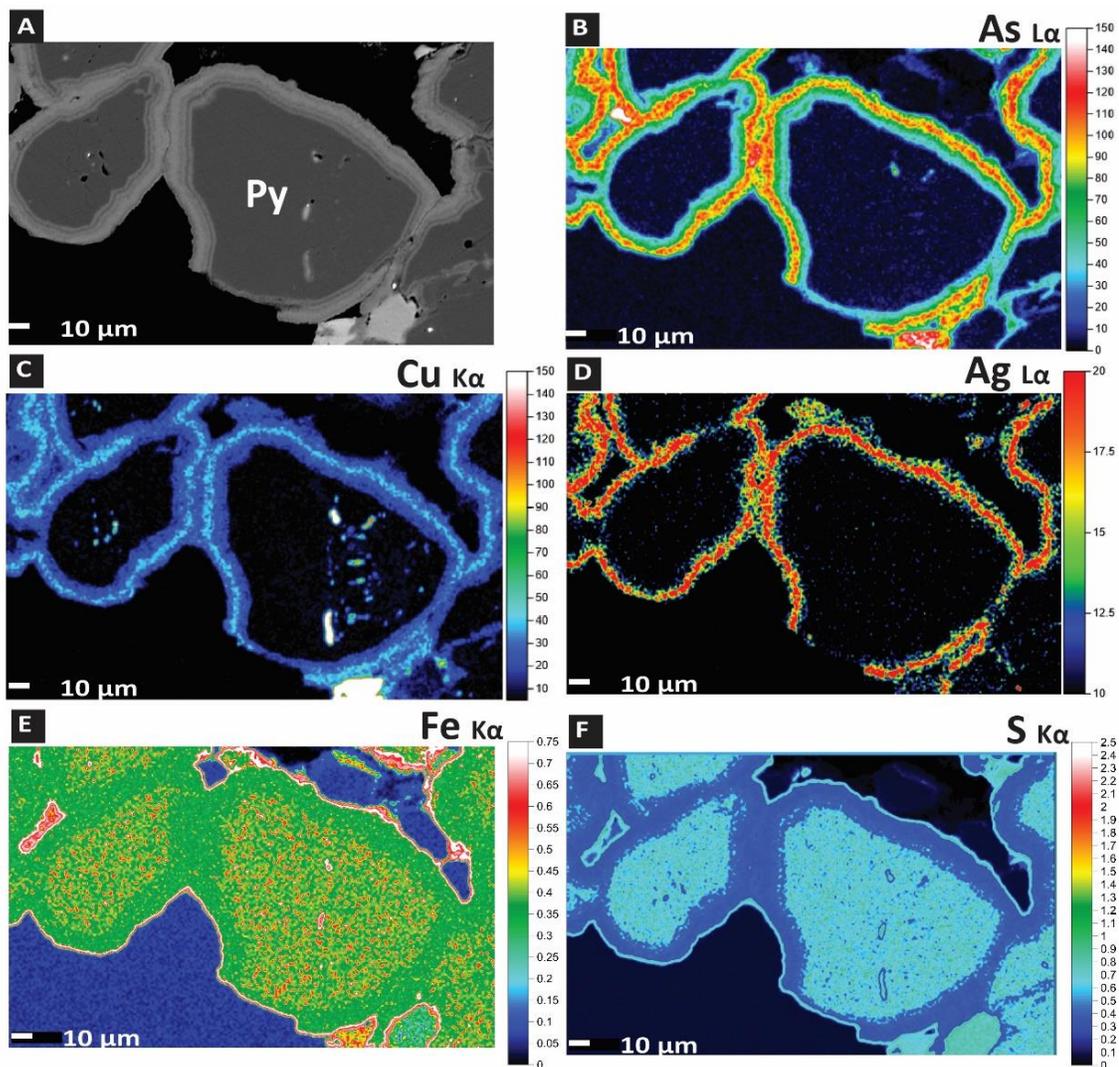


Figura 50. Imagen BSE y mapas WDS rayos-X de pirita de la zona de alteración QS (muestra TSS62_286.5.). A) Imagen BSE de pirita zonada; B) Mapa EMPA-WDS de As con la línea L α ; C) Mapa EMPA-WDS de Cu con la línea K α ; D) Mapa EMPA-WDS de Ag con la línea L α ; E) Imagen EDS de Fe K α ; F) Imagen EDS de S K α .

Imágenes mediante microscopía óptica convencional, BSE (Figs. 51 A, B) y mapas EMPA-WDS rayos-X de As $K\alpha$, Co $L\alpha$, y Cu $K\alpha$ en pirita (Figs. 51 C-E) (muestra DDH386_459) de la zona de alteración sericita gris verde (SGV), muestra una zona de crecimiento y unas bandas finas enriquecidas en As ($< 1\mu\text{m}$ de espesor). En el núcleo, los contenidos de los elementos mayores Fe y S son $\sim 46,59\text{ wt\%}$, $\sim 53,20\text{ wt\%}$ respectivamente, con contenidos de elementos menores tales como Co $\sim 0,07\text{ wt\%}$, As $\sim 0,08\text{ wt\%}$, Cu $\sim 0,02\text{ wt\%}$, Hg $\sim 0,06\text{ wt\%}$, y Se $\sim 0,02\text{ wt\%}$ mediante análisis EMPA.

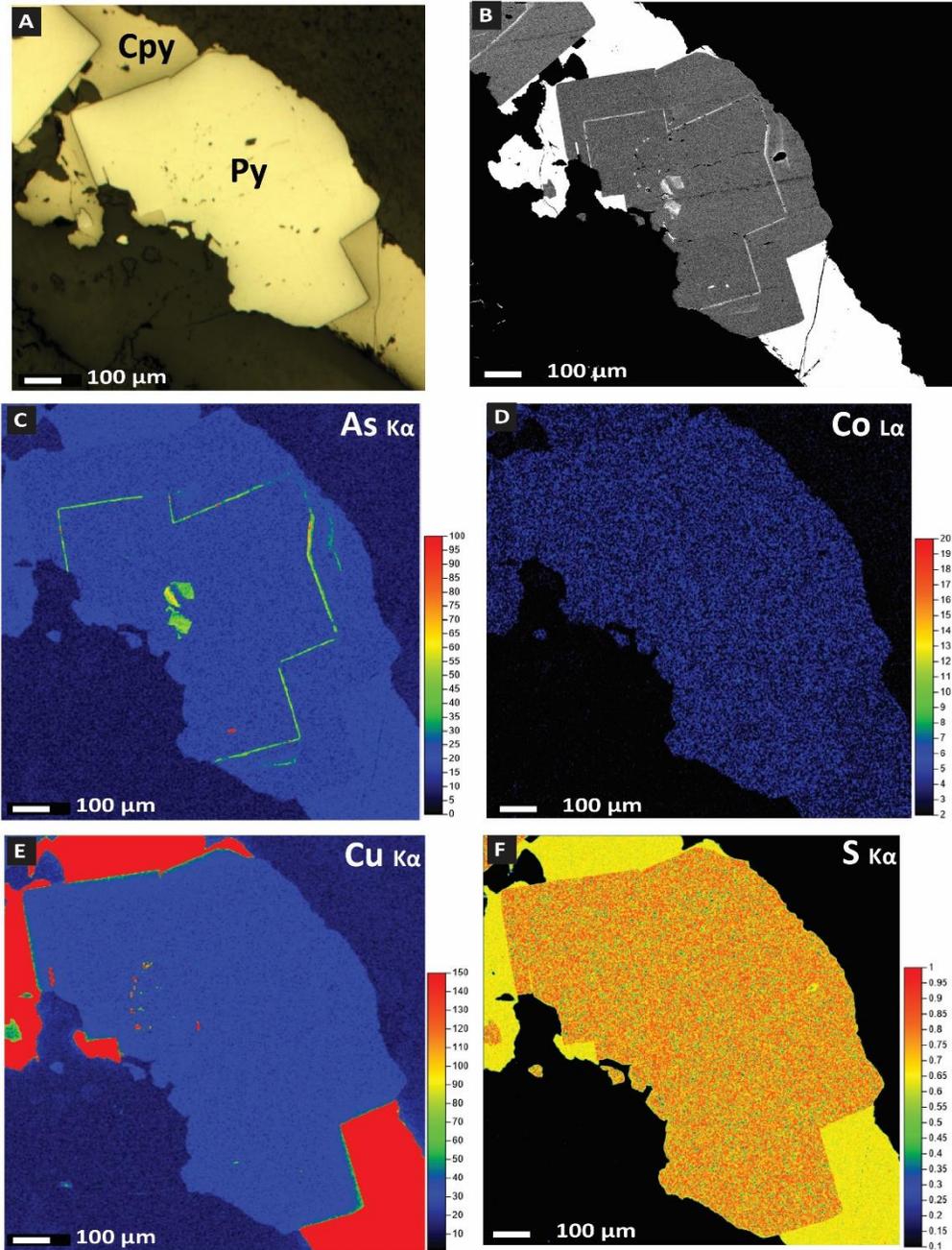


Figura 51 Imágenes microscopía óptica, BSE y mapas WDS rayos-X de pirita de la zona de alteración SGV (muestra DDH386_459). Imágenes microscopía óptica, BSE y mapas WDS rayos-X de pirita de la zona de alteración SGV. A) Imagen de pirita-calcopirita mediante microscopía óptica luz reflejada 10x; B) Imagen BSE de pirita con zona de enriquecimiento en As; C) Mapa EMPA-WDS de As con línea $K\alpha$; D) Mapa EMPA-WDS de Co con línea $L\alpha$; E) Mapa EMPA-WDS de Cu con línea $K\alpha$; F) Mapa EDS de S $K\alpha$.

Mapas LA-ICP-MS de pirita

Con el propósito de determinar la distribución de elementos traza en los granos de pirita, se realizaron mapas elementales mediante LA-ICP-MS en un grano representativo de pirita de la zona de alteración sericita gris verde (muestra DDH386_459) (Figs. 52). La pirita muestra una notable zonación que incluye una banda rica en (Co, Ni, Pb, Bi) (Figs. 52 E-H) en el núcleo del grano, seguido por una banda enriquecida en As (Fig. 52 B). Los spots de Au sugieren la presencia de inclusiones micro a nano métricas de Au⁰ en las bandas ricas en As (Fig. 52 C). En el borde del grano, los elementos están distribuidos uniformemente. Existe un desacoplamiento entre la banda rica en Co, Ni, Pb y Bi y la banda rica en As. Con respecto a Ag, la pirita presenta algunas inclusiones de Ag al interior del grano, en la banda rica en As (Fig. 52 D). Además, se observan concentraciones elevadas de este elemento en los bordes del grano.

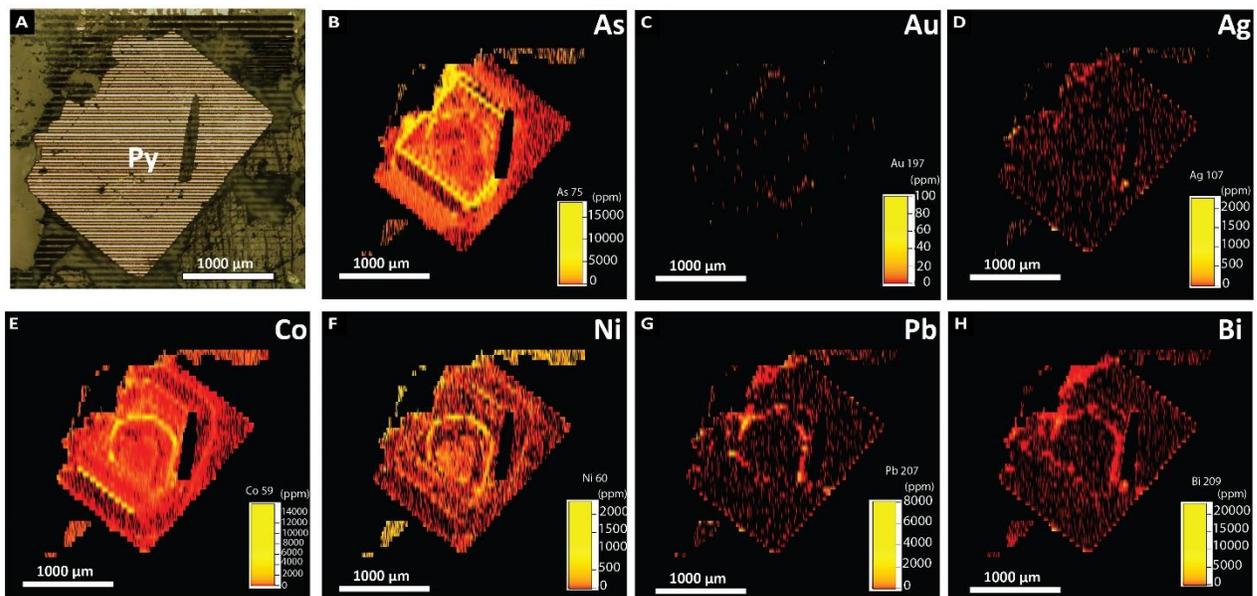


Figura 52. Mapa de elementos traza en pirita realizado mediante LA-ICP-MS (muestra DDH386_459). A) Imagen de pirita con microscopía óptica luego de la ablación, se puede observar las líneas de ablación; B) Mapa de As isótopo 75; C) Mapa de Au isótopo 197; D) Mapa de Ag isótopo 107; E) Mapa de Co isótopo 59; F) Mapa de Ni isótopo 60; G) Mapa de Pb isótopo 207; H) Mapa de Bi isótopo 209.

La Figura 53 muestra el diagrama de cajas de las concentraciones (ppm) de los elementos Co, Cu, As, Ni, Ag, Se y Te en pirita de las diferentes zonas de alteración del yacimiento Río Blanco mediante EMPA y LA-ICP-MS. Se puede observar que existe una diferencia en las concentraciones de los elementos traza en pirita, una amplia dispersión de los valores en los elementos Co, Cu, As, Ni, Ag, Se y Te en la zona de alteración cuarzo-sericita (QS) (Fig. 53), mientras que las zonas de alteración potásica y sericita gris verde, presenta concentraciones más acotadas. Además, la alteración QS es la que contiene un mayor número de análisis, lo que quiere decir, que las piritas de la zona de alteración QS presentan mayor cantidad de micro-a nano inclusiones minerales de los elementos mencionados.

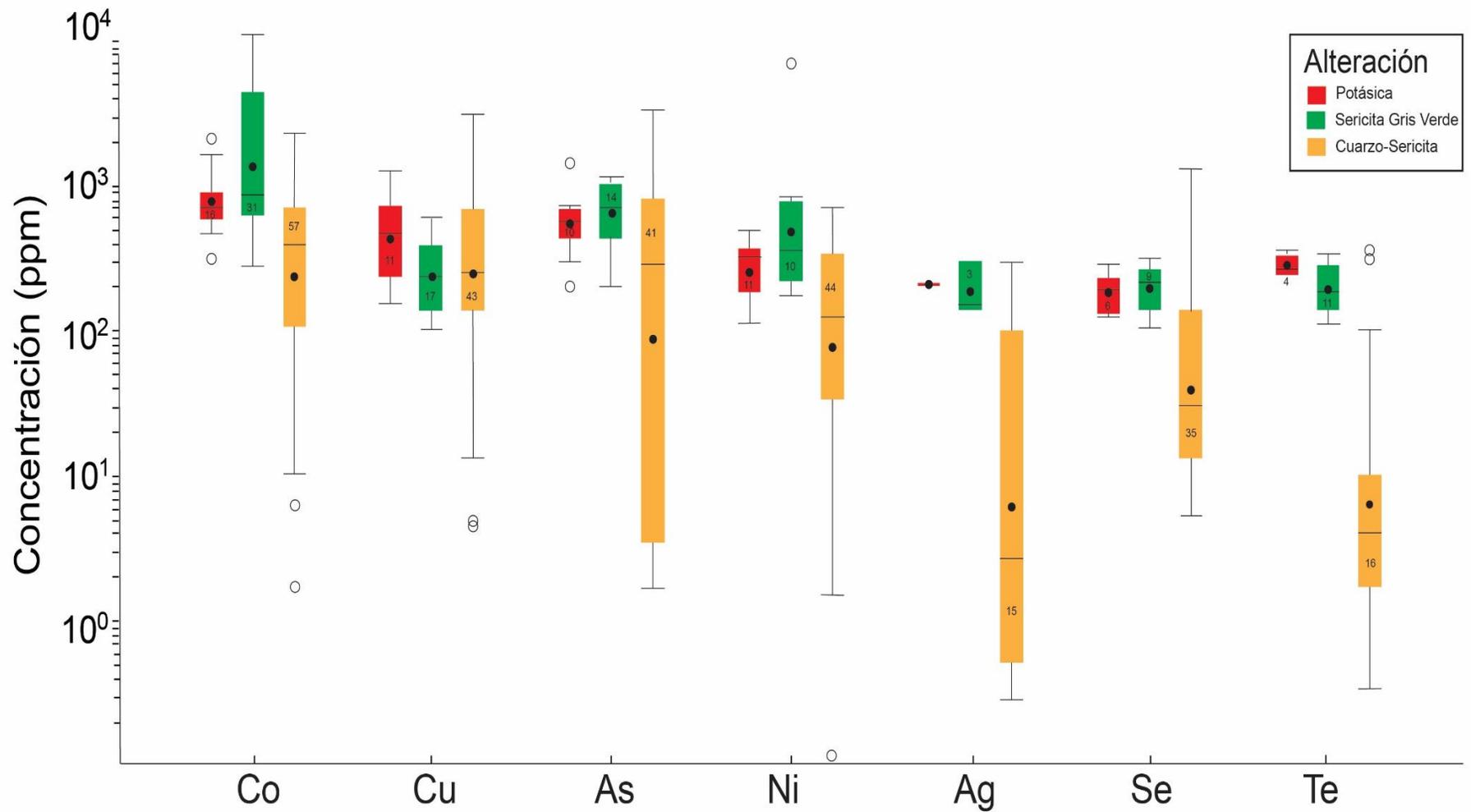


Figura 53. Diagrama de cajas de elementos menores y trazas en pirita (Co, Cu, As, Ni, Ag, Se y Te), EMPA y LA-ICP-MS análisis (Apéndices 1 y 6). Cajas de color rojo representa zona de alteración potásica, cajas de color verde representa zona de alteración sericita gris verde, cajas de color naranja representa zona de alteración cuarzo-sericita.

Calcopiritas (CuFeS₂)

Los análisis representativos mediante EMPA y LA-ICP-MS de calcopiritas del yacimiento Río Blanco están reportados en los Apéndices 2 y 7, respectivamente. Al igual que para el caso de las piritas, al realizar los análisis se veló por no realizar análisis en zonas del grano mineral que presentaran inclusiones visibles. Sin embargo, y tomando en cuenta que la ablación de nano o micropartículas no puede ser evitada durante los análisis en profundidad por LA-ICP-MS, algunos análisis fueron afectados por la presencia inclusiones minerales dentro de los granos de calcopirita.

Se elaboró un diagrama de cajas de calcopiritas con los datos EMPA y LA-ICP-MS con un total de 336 análisis, en donde las cajas azules representan a los datos obtenidos mediante EMPA y las cajas cafés representan los datos obtenidos mediante LA-ICP-MS (Fig. 54).

Elementos mayores, menores y trazas en calcopiritas

Las calcopiritas presentan concentraciones de elementos mayores que fluctúan entre 33,10 hasta 35,35 wt% para el S, 28,07 hasta 31,26 wt% para el Fe, y 33,65 hasta 35,69 wt% para el Cu, medidos por EMPA (Apéndice 2). Los contenidos de elementos traza en calcopiritas se midieron utilizando LA-ICP-MS (Apéndice 7). Los resultados LA-ICP-MS muestran que los contenidos promedio de los elementos en calcopiritas son los siguientes: Cr (3.188 ppm), As (2.850 ppm), Ni (1.229 ppm), Zn (366,33 ppm), Se (257,78 ppm), Co (96,43 ppm), Sb (74,05 ppm), Mn (32,3 ppm), Pb (20,79 ppm), Ge (20,91 ppm), Bi (14,16 ppm), Sn (8,57 ppm), Ga (6,26 ppm), In (4,29 ppm), Cd (3,92 ppm), Te (3,65 ppm), Hg (3,52 ppm) y Mo (1,52 ppm). Los contenidos de Ag en calcopirita van desde 0,26 hasta 348 ppm, con un valor promedio de 16,44 ppm.

Algunos análisis presentaron inclusiones minerales (Anexo J), las cuales se detectaron en los espectros de manera análoga a lo descrito para la pirita, por lo cual, se elaboró un diagrama de cajas para los elementos As, Zn, Ni, Co, Sb, Ag, Pb, Cr, Ge, Bi, Cd, Hg, Se, Mn, Sn, Ga, In y Te (Fig. 55), en donde las cajas de color rojo corresponden a los análisis con inclusiones minerales, mientras que las cajas de color azul pertenecen a los análisis sin inclusiones. Los elementos traza más abundantes son el Zn, Ni, Se, As (Fig. 55). La Ag en las calcopiritas sin inclusiones presenta valores que van desde 0,26 hasta 16,2 ppm con un valor promedio de 2,75 ppm; para el caso de la Ag en calcopiritas con inclusiones sus contenidos van desde los 10,5 ppm hasta 348 ppm con un valor promedio de 55,45 ppm. El In es el único elemento que se encontró presente en todos los análisis en calcopiritas, el mismo que no presenta variaciones de sus contenidos promedios con inclusiones minerales (Fig. 55). Los elementos más comunes asociados a la presencia de inclusiones minerales en calcopirita son: Ag, Se, As, Zn, Co, Ni, Sb, Pb, Cr, Ge, Bi, Hg y Cd (Fig. 55). Cabe mencionar que la zona de alteración QS es la que mayor cantidad de inclusiones minerales presenta, siendo el As y el Zn los elementos con mayores contenidos promedios 6.057 ppm y 2.725 ppm respectivamente, concentraciones similares fueron reportadas por Luke et al. (2018). Otros elementos asociados a la presencia de inclusiones en calcopiritas, y que presentan contenidos promedios altos en la zona de alteración QS, son el Sb, Pb, Ag y Bi con valores de 183 ppm, 166 ppm, 55 ppm y 94 ppm respectivamente.

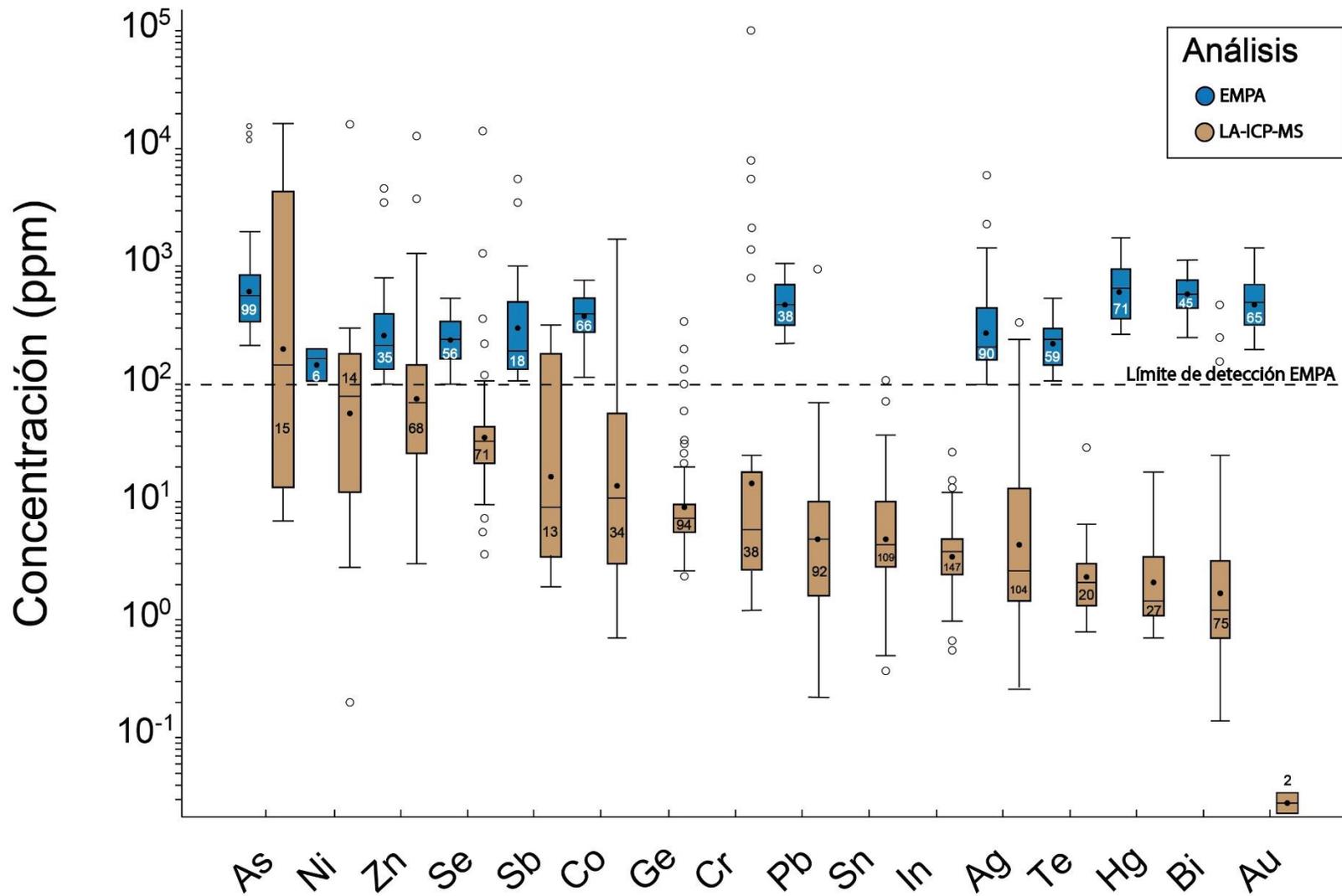


Figura 54. Diagrama de cajas de concentraciones para elementos menores y traza en calcopiritas del yacimiento Río Blanco con datos EMPA y LA-ICP-MS. Datos EMPA se muestran en cajas azules y los datos LA-ICP-MS se muestran en cajas cafés. Concentración de elementos expresados en partes por millón (ppm). Línea segmentada representa el límite de detección de los análisis EMPA.

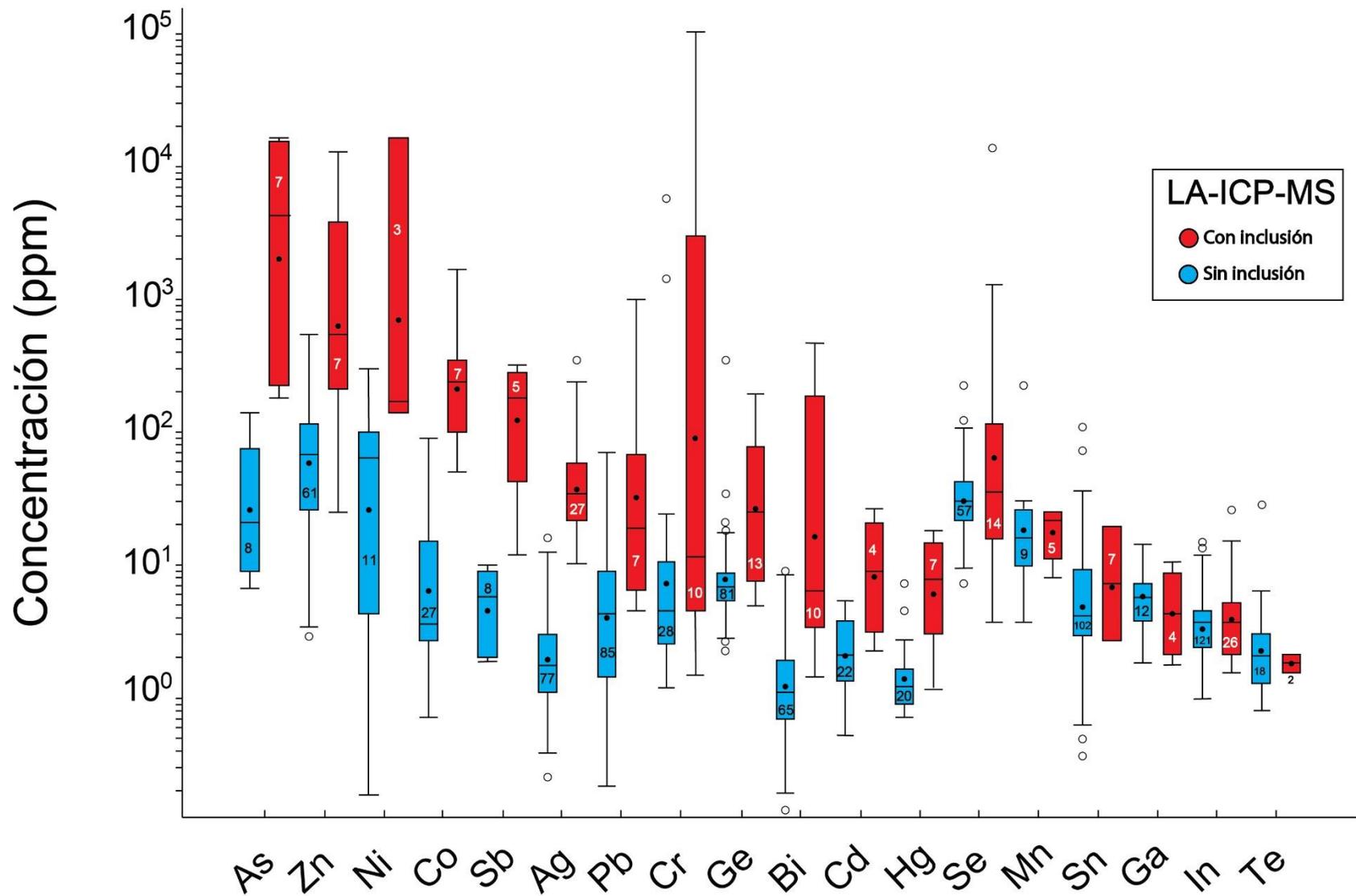


Figura 55. Diagrama de cajas de elementos menores y trazas en calcopirita "sin/con inclusiones minerales". Cajas de color azul representan los datos sin inclusiones minerales, mientras que las cajas de color rojo representan los datos con inclusiones minerales.

Gráficos elementales de dispersión en calcopiritas.

Durante el análisis estadístico de la base de datos LA-ICP-MS de calcopiritas, se encontró que los siguientes elementos tienen correspondencias positivas: Zn vs. Ag ($r=0,4$), Zn vs. Cd ($r=0,9$), Zn vs. As ($r=0,75$), Zn vs. Co ($r=0,7$), Zn vs. Hg ($r=0,5$) y Zn vs. Sb ($r=0,7$). Luke et al. (2018), encontró una fuerte correlación entre los pares de elementos Zn vs. Cd, en general, donde existe altas concentraciones de Zn en calcopirita, está asociado a altas concentraciones de Cd. Los gráficos de dispersión para los elementos antes mencionados se los puede observar en la Figura 56, en donde se considera tanto los datos filtrados sin inclusiones minerales (círculo rojo), y los datos con inclusiones minerales (estrellas verdes). Comparando lo visto en las Figuras 55 y 56, se determinó que las inclusiones minerales en calcopiritas corresponden a fases con contenidos de Ag, Cd, As, Hg, Sb y Zn. En los gráficos de dispersión (Fig. 56 A, B, C, E y F) se diferencian dos poblaciones de datos, la primera corresponde a los datos sin inclusiones y que representan, probablemente, a los elementos incluidos como solución sólida en las calcopiritas. En contraste, la segunda población de datos correspondería probablemente a las inclusiones minerales, las cuales presentan contenidos más altos.

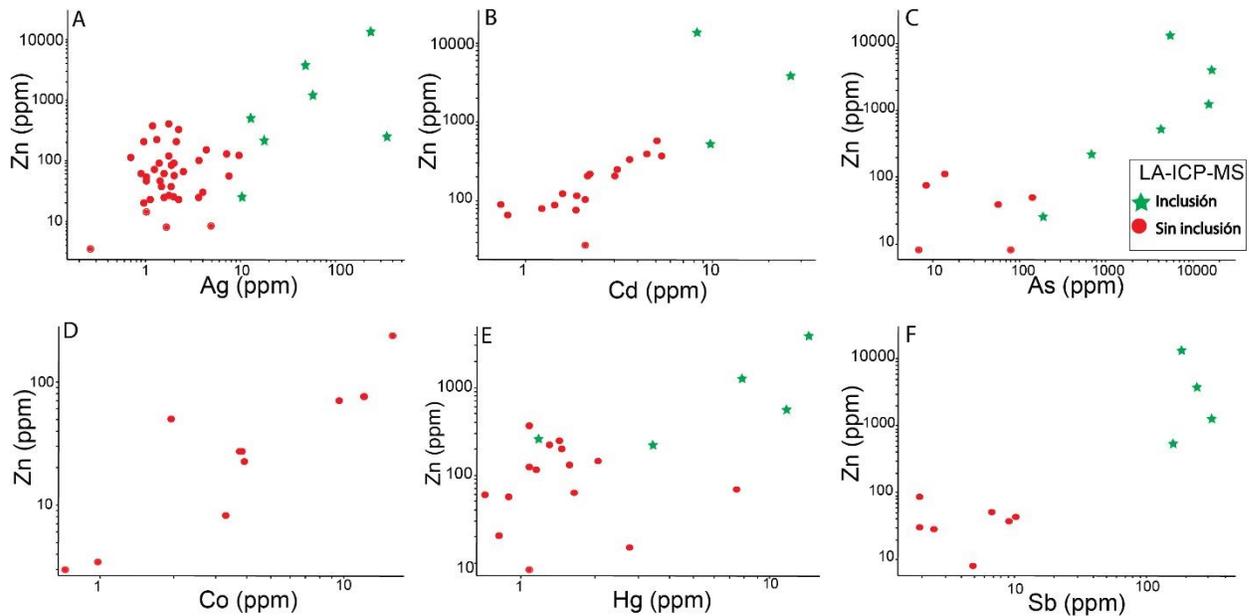


Figura 56. Gráficos de dispersión en calcopiritas de la base de datos LA-ICP-MS. Datos con inclusiones estrellas de color verde, datos sin inclusiones círculos de color rojo. A) Zn vs. Ag; B) Zn vs. Cd; C) Zn vs. As; D) Zn vs. Co; E) Zn vs. Hg; F) Zn vs. Sb. Todas las concentraciones están reportadas en partes por millón (ppm).

Las inclusiones minerales inferidas de los datos LA-ICP-MS en calcopiritas son de diferente tipo, es decir, no contienen todos los elementos en una sola inclusión, algunas calcopiritas contienen inclusiones de minerales con más de un elemento, como As, Sb, Zn, y en otros casos inclusiones únicamente de Ag. Se realizó un perfil de concentración LA-ICP-MS de isótopos seleccionados en calcopirita de la zona de alteración cuarzo-sericita (Anexo J), en donde el análisis puntual X286C4_11 no presenta inclusiones minerales, mientras que el análisis X286C4_12 presenta inclusiones de ^{75}As , ^{107}Ag , ^{208}Pb , ^{202}Hg y ^{209}Bi .

Se identificaron otras correspondencias positivas en calcopiritas. Para el caso de la Ag (Figs. 57 A y B), las tendencias son positivas para los pares de elementos Ag vs. As ($r=0,4$), y Ag vs. Co ($r=0,65$), además se observa dos grupos de datos, los primeros asociados a los datos sin inclusiones (color rojo) y corresponden a los datos con los menores contenidos de estos elementos, mientras que el segundo grupo asociado a los datos con inclusiones minerales (color verde) que son los análisis con más altos contenidos de As, Co y Ag. Para el caso del Co, existen correspondencias positivas con Co vs. Pb ($r= 0,91$) y Co vs. Sn ($r= 0,6$). Cabe mencionar que para el caso del Co vs. Pb y Co vs. Sn no se detectaron análisis potencialmente influenciados por la presencia de inclusiones minerales (Figs. 57 C y D).

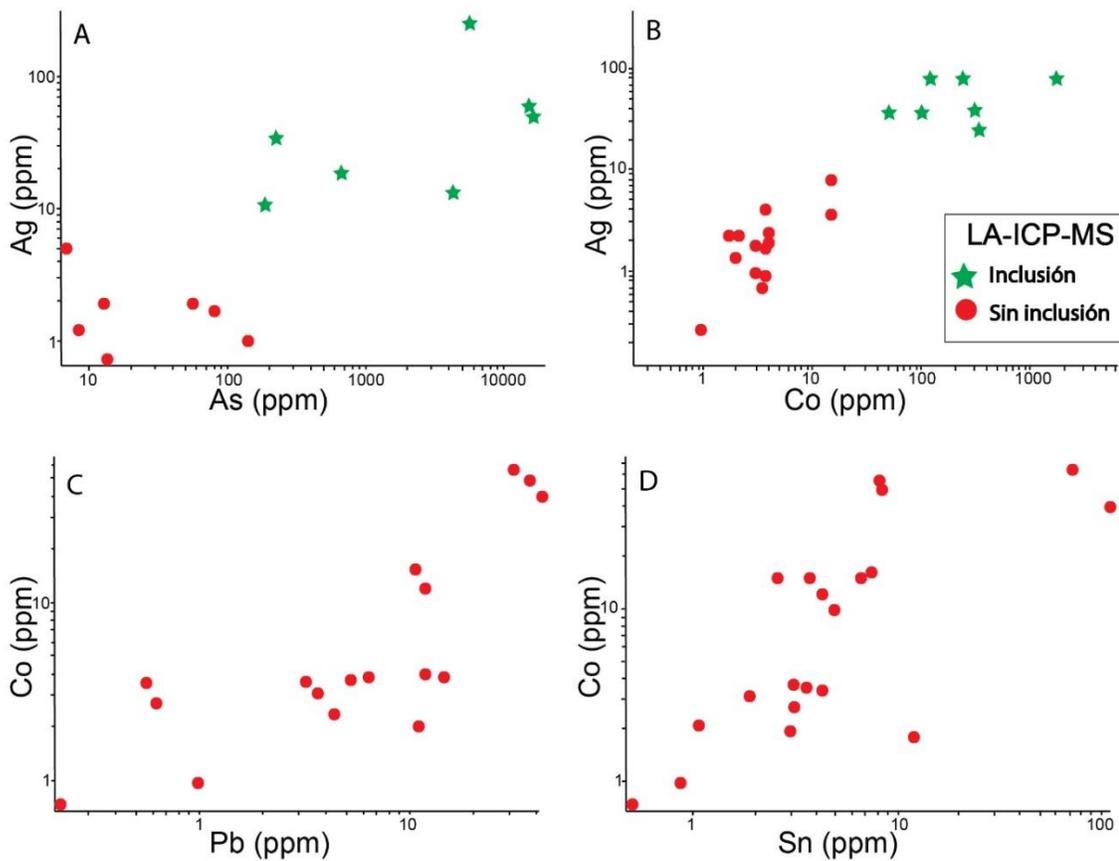


Figura 57. Gráficos de dispersión de la base de datos LA-ICP-MS en calcopiritas para Ag, As, Co, Pb y Sn. Datos con inclusiones estrellas de color verde, datos sin inclusiones círculos de color rojo. A) Ag vs. As; B) Ag vs. Co; C) Co vs. Pb; D) Co vs. Sn. Todas las concentraciones están reportadas en partes por millón (ppm).

Los datos LA-ICP-MS de calcopiritas sin inclusiones minerales de las diferentes zonas de alteración en el yacimiento permiten concluir que la zona de alteración Feldespato potásico > Biotita (Fk>Bt) presenta los contenidos promedios más altos de Ag (9,5 ppm) (Fig. 58), mientras que la zona de alteración sericita gris verde moderada (SGVm) tiene los valores promedios más bajos de Ag en el yacimiento (1,6 ppm). La zona de alteración cuarzo-sericita (QS) fue la que mayor número de análisis presenta y tiene un contenido promedio de 2,8 ppm de Ag.

El trabajo realizado por Luke et al. (2018), menciona que la razón Cd:Zn se incrementa con la temperatura inferida de cristalización, lo que sugiere que la temperatura es un

factor importante que influye en la razón Cd:Zn (Anexo K). Para este estudio se observa que las alteraciones Qs y SGVm presentan diferentes razones Cd:Zn. La alteración QS presenta razones Cd:Zn que van desde 0,001 hasta 0,025, mientras que la SGVm presenta una razón de Cd:Zn = 0,8 (Anexo K).

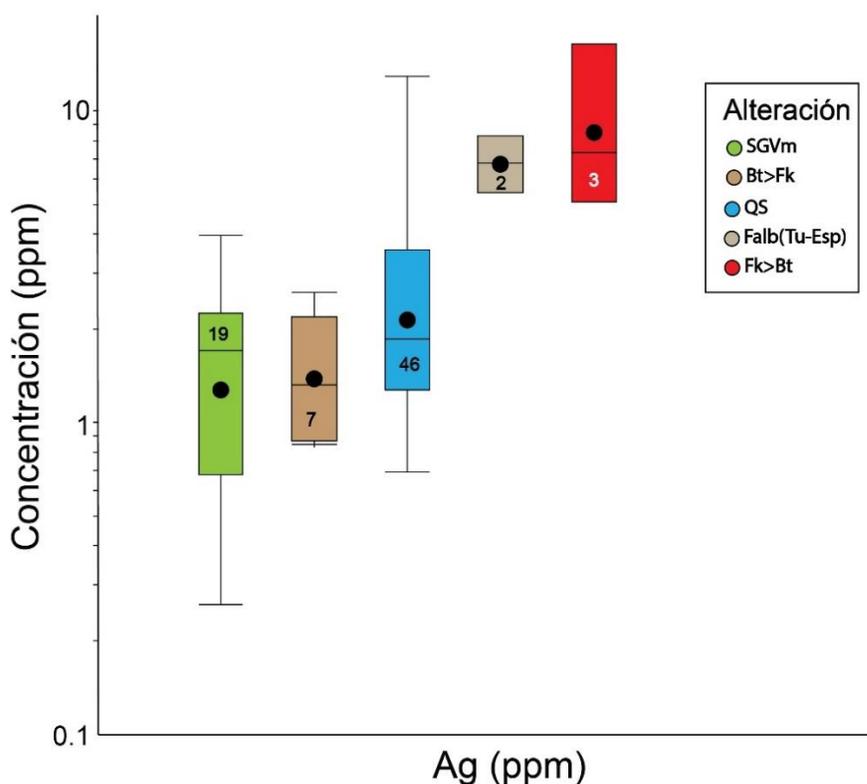


Figura 58. Diagrama de cajas de contenido de Ag en función de las zonas de alteración en el yacimiento Río Blanco, base de datos LA-ICP-MS, calcopirita sin inclusiones minerales. SGVm= sericita gris verde moderada; Bt>Fk= biotita>feldespato potásico; QS= cuarzo sericita; Falb(Tu-Esp)= fondo albita (turmalina-especularita); Fk>Bt= feldespato potásico>biotita. Concentración expresada en partes por millón (ppm).

Mapas EMPA-WDS de calcopirita

En la Figura 59 se observa una imagen BSE y mapas EMPA-WDS de rayos-X para Ag $L\alpha$, As $L\alpha$, Bi $M\alpha$ en calcopirita (asociada a bornita) de la zona de alteración potásica (muestra DDH812_871). Existe una distribución uniforme de Ag, tanto en bornita como en calcopirita, con los más altos contenidos de Ag presentes en la bornita (Fig. 59 B). No se pudo identificar inclusiones de minerales que contengan Ag o As. Los contenidos de As son más deprimidos en bornita que en calcopirita (Fig. 59 C). El Bi está distribuido uniformemente en la calcopirita, así como también en la bornita (Fig. 59 D). Análisis puntuales por EMPA en esta calcopirita (Apéndice 2, muestra_DDH812_871) indican contenidos de Cu, S y Fe 34,74 wt%, 34,87 wt%, y 30,35 wt% respectivamente. Datos de LA-ICP-MS en este grano de calcopirita (Apéndice 7, muestra_DDH812_871) muestra valores de Ag 1,25 ppm, Pb 0,57 ppm, Se 59 ppm, Ge 7 ppm, In 2,95 ppm, y Sn 12,93 ppm.

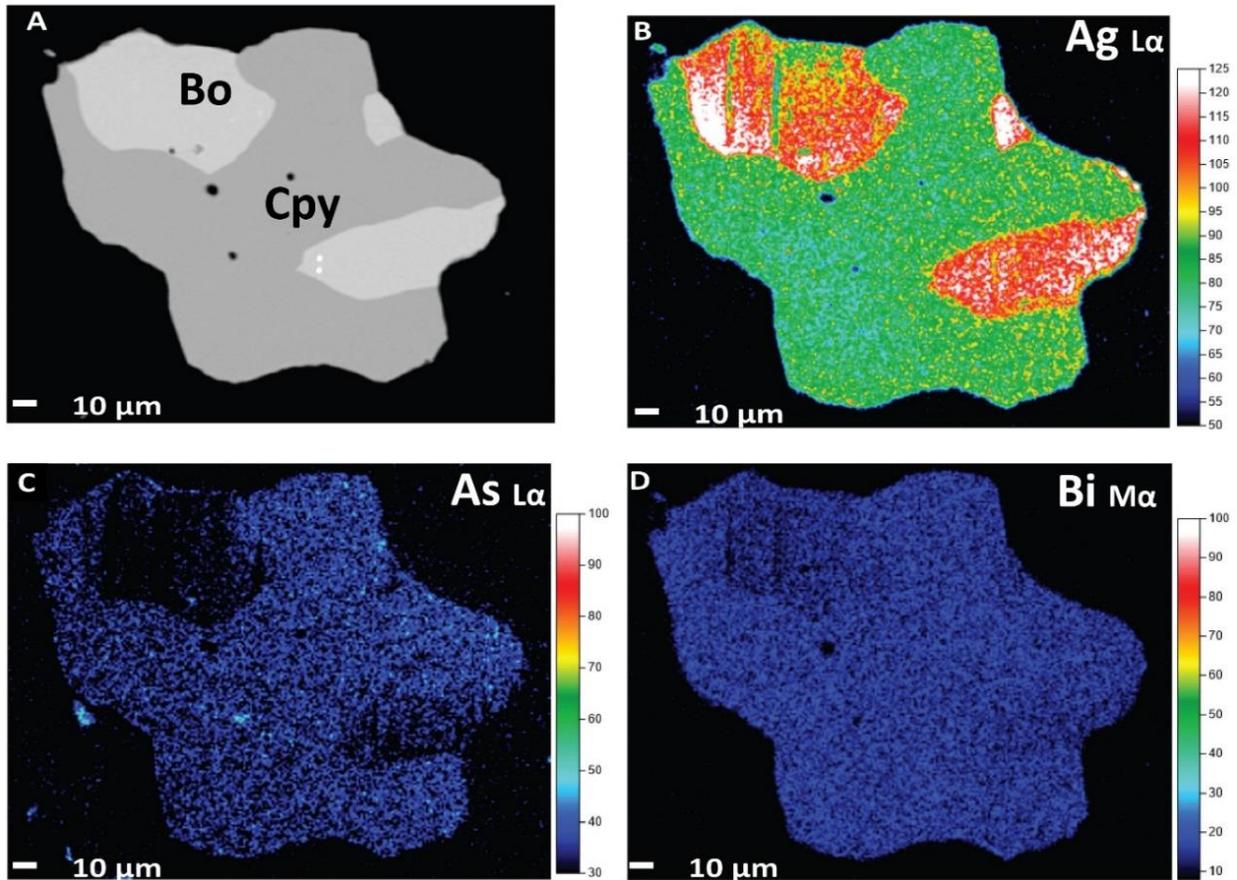


Figura 59. Imagen BSE y mapas EMPA-WDS rayos-X de calcopirita y bornita de la zona de alteración potásica. A) Imagen BSE (muestra DDH812_871); B) Mapa EMPA-WDS de Ag con línea $L\alpha$; C) Mapa EMPA-WDS de As con línea $L\alpha$; D) Mapa EMPA-WDS de Bi con la línea $M\alpha$.

Bornitas (Cu_5FeS_4)

Mediante observaciones con microscopía óptica y SEM se pudo identificar únicamente bornita en las zonas de alteración potásica y sericita gris verde, a las cuales se les realizaron análisis EMPA y LA-ICP-MS. Dichos análisis se reportan en los Apéndices 3 y 8, respectivamente. Los análisis realizados por LA-ICP-MS en bornitas fueron realizados en granos que no presentaban ninguna inclusión visible, pero se pudo identificar que las bornitas presentaron muy pocos análisis con inclusiones minerales. Los elementos asociados a análisis con LA-ICP-MS con influencia de inclusiones minerales en bornitas son Ag, As, Se, Pb y Te.

Al igual que en las piritas y calcopiritas, las concentraciones medidas para los elementos analizados por EMPA son más altas que las determinadas por LA-ICP-MS, y como se explicó anteriormente, la causa de esto podría ser que los análisis por EMPA tienen un mayor límite de detección, y en algunos casos ciertos datos podrían estar siendo afectados por inclusiones minerales. Se construyó un diagrama de cajas (Fig. 60) para bornitas con los datos EMPA y LA-ICP-MS, en donde las cajas de color azul representan a los análisis por EMPA ($n=115$) y las cajas de color café representan los análisis por LA-ICP-MS ($n=85$), con un total de 200 análisis. El límite de detección para los elementos analizados en bornitas por EMPA fue de alrededor 100 ppm.

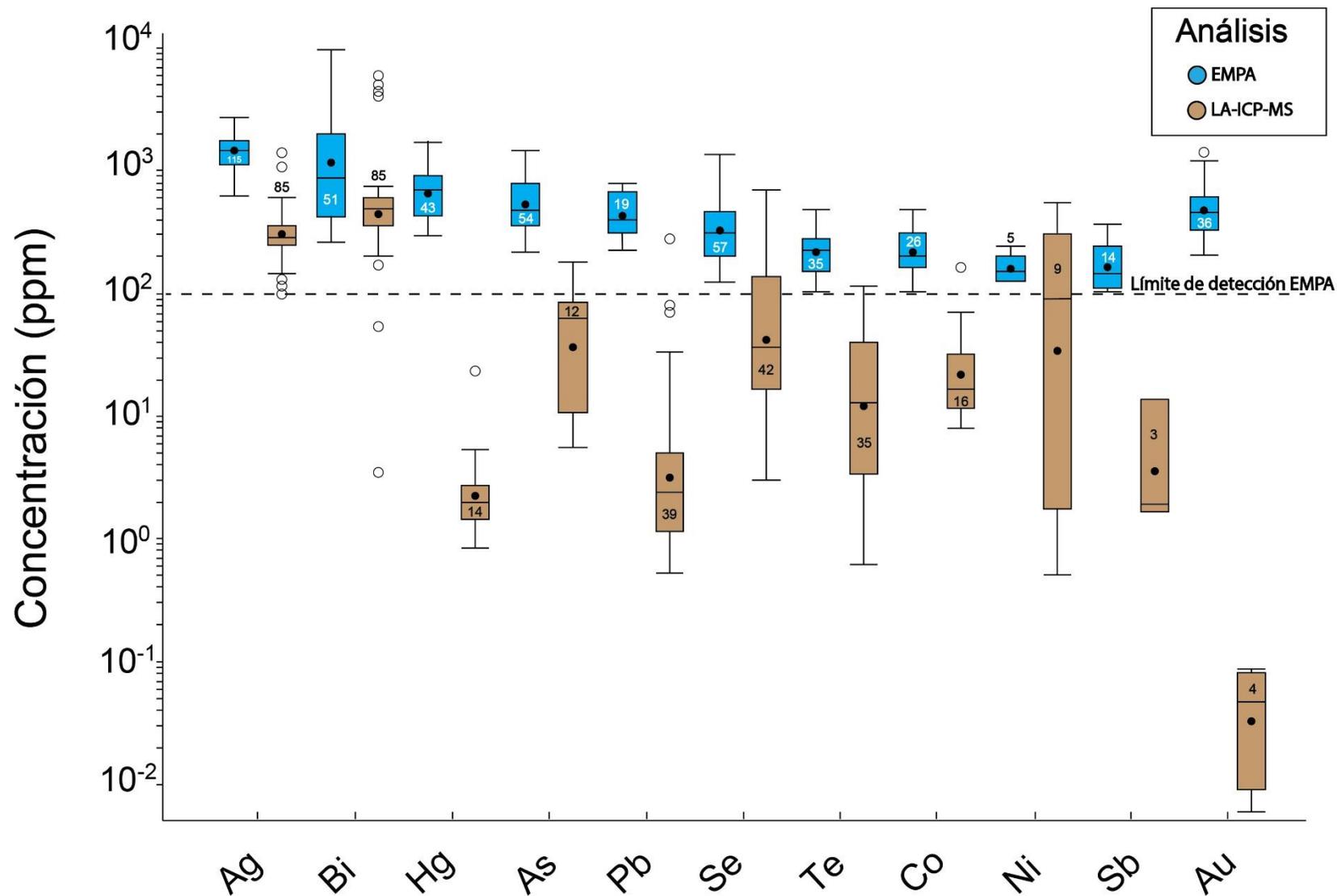


Figura 60. Diagrama de cajas de las concentraciones para elementos menores y trazas en bornitas del yacimiento Río Blanco con datos EMPA y LA-ICP-MS. Datos EMPA cajas azules y los datos LA-ICP-MS cajas cafés. Límite de detección EMPA línea segmentada horizontal. Concentración de elementos expresada en partes por millón (ppm) en escala logarítmica.

Elementos mayores, menores y trazas en bornitas

El análisis con microsonda electrónica para los elementos mayores como Cu, S y Fe varía desde 59,45 hasta 63,9 wt%, 23,93 hasta 27,44 wt%, y 10,36 hasta 12,07 wt% respectivamente (Apéndice 3).

Los elementos menores y trazas, determinados mediante LA-ICP-MS (Apéndice 8), muestra contenidos promedio de: Cr (181,77 ppm), Ni (168,29 ppm), Se (102,9 ppm), As (59,37 ppm), Mn (45,65 ppm), Co (31,22 ppm), Te (23,12 ppm), Ge (10,58 ppm), Pb (14,88 ppm), Hg (3,06 ppm), Cd (2,56 ppm), In (0,37 ppm), y Au (0,05 ppm).

Plata y Bi son los elementos que están presentes en todos los análisis de bornitas y tienen los valores más altos entre los elementos analizados, con una concentración promedio de 356,2 ppm para Ag y de 827,87 ppm para Bi. De los resultados se puede concluir que la bornita es uno de los sulfuros portadores de Ag de mayor interés en el yacimiento Río Blanco. Los contenidos de plata van desde los 106 ppm hasta los 1.380 ppm, con una mediana de 285 ppm.

Al igual que Ag, el Bi presenta concentraciones significantes en las bornitas que van desde 3,4 ppm hasta 5.940 ppm, con una mediana de 480 ppm. Tanto la Ag como el Bi estarían presentes en solución sólida en las bornitas (Cook et al. 2011).

Gráficos elementales de dispersión en bornitas.

Plata y el Bi son dos elementos calcófilos presentes en la bornita como elementos menores, presentando una elevada concentración en todos los análisis.

Se elaboró el gráfico de concentraciones de Ag vs. Bi (Fig. 61) en función de las zonas de alteración, mismo que presenta una correspondencia positiva con un coeficiente de correlación $r=0,92$. Se identificó que la totalidad de datos se encuentran entre las razones Ag:Bi= 0,2-2, a excepción de los análisis que corresponden a la alteración Fondo Albita(Turmalina-Especularita) FAlb(Tur-Esp).

Adicionalmente, se identificó una tendencia en las razones Ag:Bi en las bornitas que pareciera marcar las diferentes zonas de alteración hidrotermal en el depósito. La alteración de Fondo Albita(Turmalina-Especularita) FAlb(Tur-Esp) es la que mayor razón presenta (Ag:Bi>40), la alteración potásica con sus dos miembros Biotita>Feldespato potásico (Bt>FK) y Feldespato potásico>Biotita (Fk>Bt) con una razón Ag:Bi entre 0,3-3,08, la zona transicional sericita gris verde>feldespato potásico-biotita (SGV>Fk-Bt) tiene una razón Ag:Bi entre 0,34 y 1,43, y por último la alteración sericita gris verde moderada (SGVm) con una razón Ag:Bi entre 0,19-0,25 (Fig. 61).

Esta tendencia identificada en las bornitas, podría ser debido a cambios en las condiciones físico-químicos en el fluido hidrotermal al momento de la depositación de estos sulfuros, lo que permitiría la incorporación en menor o mayor razón de Ag o Bi. Cook et. al, (2011) realizó diagramas de concentraciones Ag vs. Bi para diferentes yacimientos como: skarn, epitermales, IOCG y pórfidos (Fig. 61). Para el caso de Río Blanco se planteó el diagrama de concentración Ag vs. Bi en función de las zonas de alteración del yacimiento, al parecer existe una tendencia de incorporación de Ag y Bi en

función de la temperatura de cristalización de la bornita, en donde las bornitas de más alta temperatura (zona de alteración potásica) presentan razones Ag:Bi más altas; mientras que la zonas de menor temperatura (sericita gris verde moderada) tienen una menor razón de Ag:Bi.

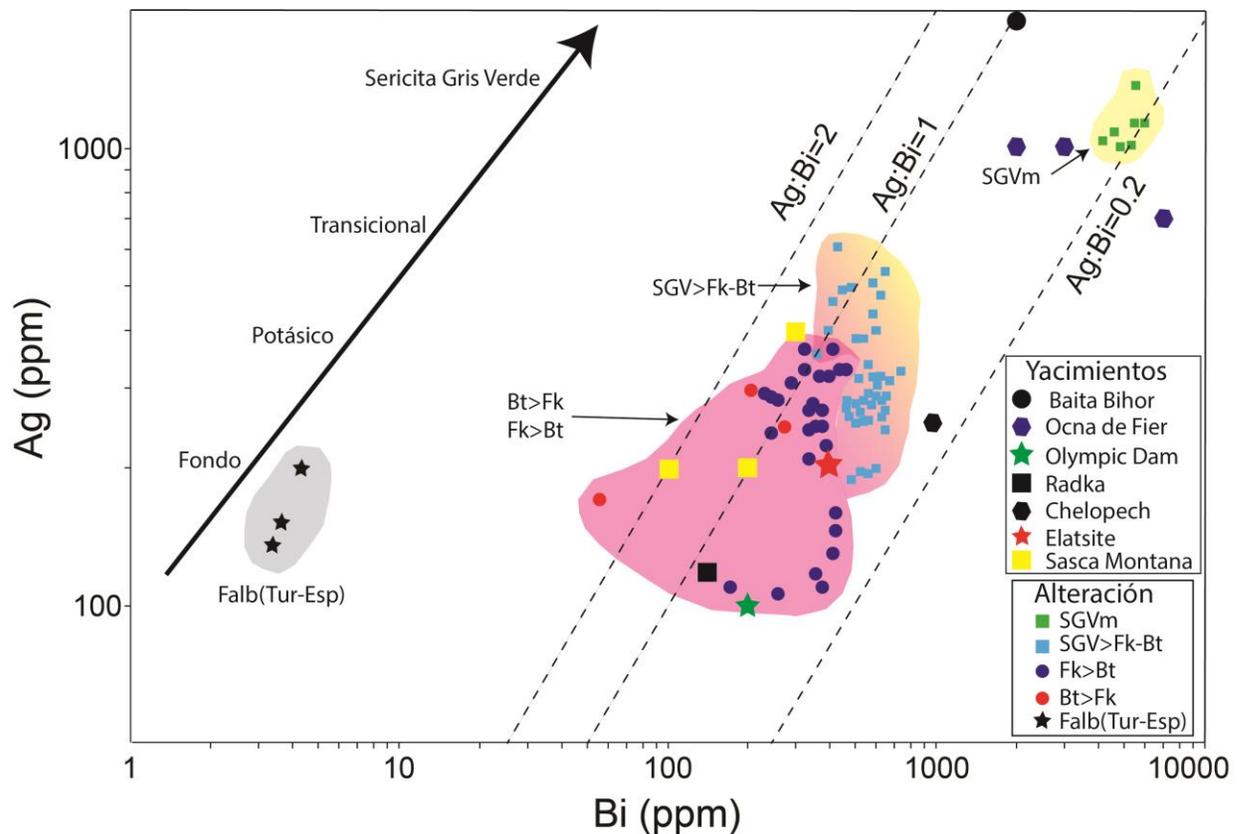


Figura 61. Diagrama de concentraciones (ppm) en bornita de Ag vs. Bi en escala logarítmica. Zona de alteración de fondo (Falb(Tur-Esp) zona de color gris, alteración potásica (Bt>Fk; Fk>Bt) zona de color morado, alteración transicional (SGV>Fk-Bt) color degradado entre morado y amarillo, alteración sericita gris verde (SGVm) zona de color amarillo. Líneas entrecortadas representan las razones Ag:Bi, que van desde 0,2 hasta 2 para este estudio. Los datos de los yacimientos fueron tomados de Cook et. al. 2011. Baita Bihor yacimiento skarn Cu-Au; Ocna de Fier yacimiento skarn Fe-Cu-(Zn-Pb); Olympic Dam yacimiento IOCG; Radka yacimiento epitermal Cu-Au intermedia sulfidación; Chelopech yacimiento epitermal Cu-Au alta sulfidación; Elatsite yacimiento pórfido Cu-Au; Sasca Montana yacimiento skarn Cu-Au.

Se identificaron otras tendencias elementales tanto positivas como negativas para las bornitas. En los gráficos de dispersión de la Figura 62 se observa que la Ag y el Bi presentan el mismo comportamiento con Se, Te y Pb.

La Ag y el Bi tienen una tendencia negativa con Se (Figs. 62 A y B), siendo la alteración sericita gris verde moderada (SGVm) la que presenta los más altos contenidos tanto de Ag y Bi.

En los gráficos de dispersión Ag vs. Pb, Bi vs. Pb (Figs. 62 E y F) no existe una tendencia definida, pero se observa que hay un comportamiento similar en las diferentes zonas de alteración mineral, es decir, la alteración SGMV tiene las más altas concentraciones de

Ag y Bi, con bajos contenidos de Pb, mientras que la zona transicional (SGV>Fk-Bt) y potásica (Bt>Fk, Fk>Bt) presentan una marcada dispersión de los datos, siendo la alteración Bt>Fk la que presenta los menores contenidos de Ag y Bi con los más altos contenidos de Pb. Con respecto a los pares Ag vs. As, Bi vs. As, el comportamiento de estos elementos es opuesto (Figs. 62 G y H), es decir, existe una tendencia positiva entre Ag vs. As, mientras que en el caso del Bi vs. As existe una tendencia negativa.

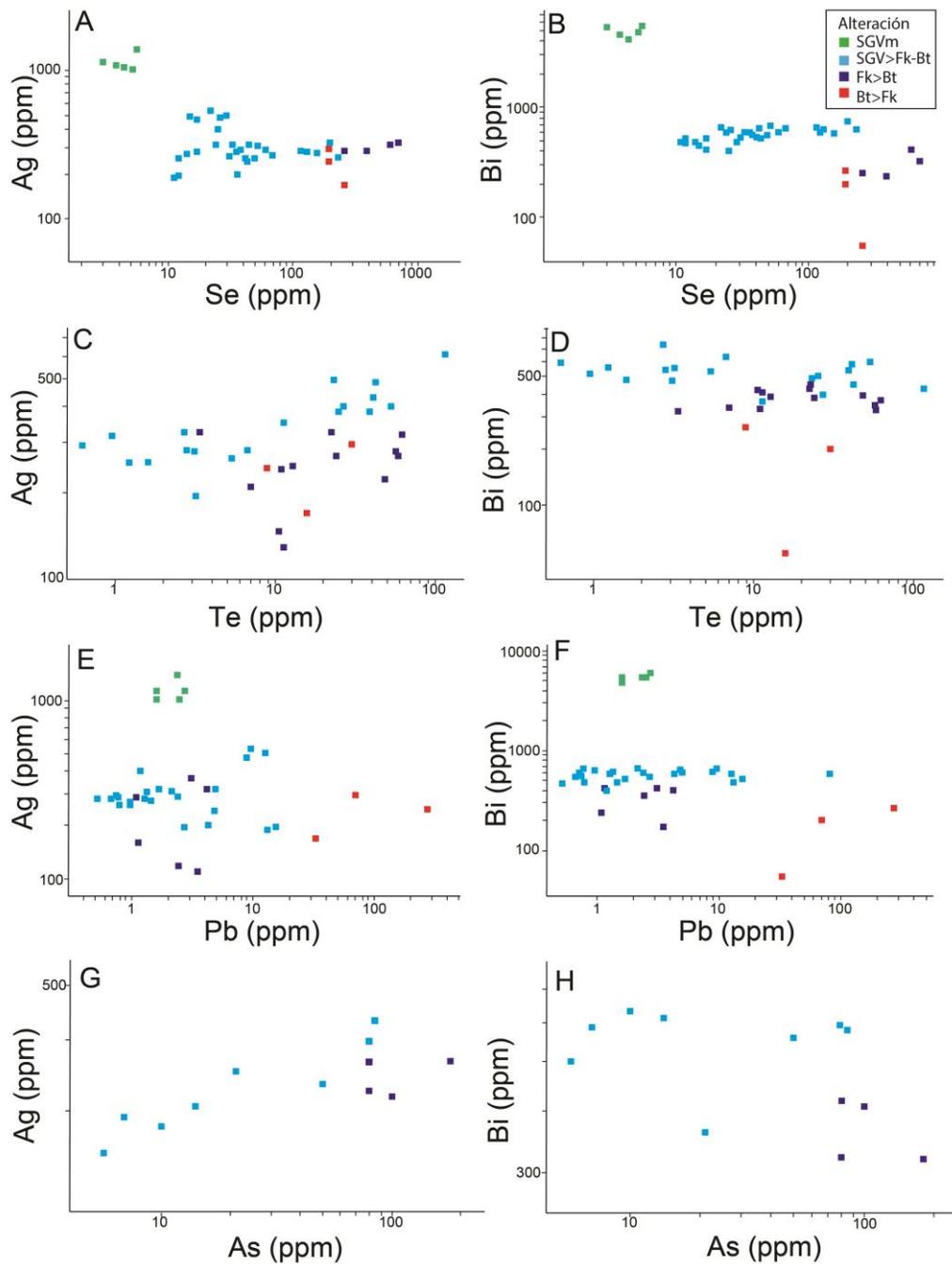


Figura 62. Gráficos de dispersión de datos LA-ICP-MS en bornitas para Ag, Bi, Se, Te, Pb y As, expresados en escala logarítmica. A) Ag vs. Se; B) Bi vs. Se; C) Ag vs. Te; D) Bi vs. Te; E) Ag vs. Pb; F) Bi vs. Pb; G) Ag vs. As; H) Bi vs. As. Todas las concentraciones expresadas en partes por millón (ppm). SGVm= sericita gris verde moderada; SGV>Fk-Bt= sericita gris verde mayor que feldespato potásico-biotita; Fk>Bt= feldespato potásico mayor que biotita; Bt>Fk= biotita mayor que feldespato potásico.

Mapas EMPA-WDS de bornitas.

Se elaboraron mapas EMPA-WDS para bornita-calcopirita de la alteración sericita gris verde (SGV) (muestra DDH386_598) para los elementos Ag, S y As. Se determinó que existe una distribución uniforme de Ag tanto en la bornita como en la calcopirita, detectando los más altos contenidos de Ag en la bornita (Fig. 63 B). Análisis puntuales mediante LA-ICP-MS en el grano de calcopirita mostró una inclusión de Ag con un valor de 13 ppm, contenidos promedio de In de 5,15 ppm y Ni de 144 ppm (Apéndice 7, muestra_DDH386_598). En el caso de la bornita los análisis por LA-ICP-MS para este grano arrojaron valores promedio de Ag 468 ppm, Se 21,5 ppm, Bi 421 ppm, Te 43 ppm, In 0,36 ppm, y Cr 7,6 ppm (Apéndice 8, muestra_DDH386_598).

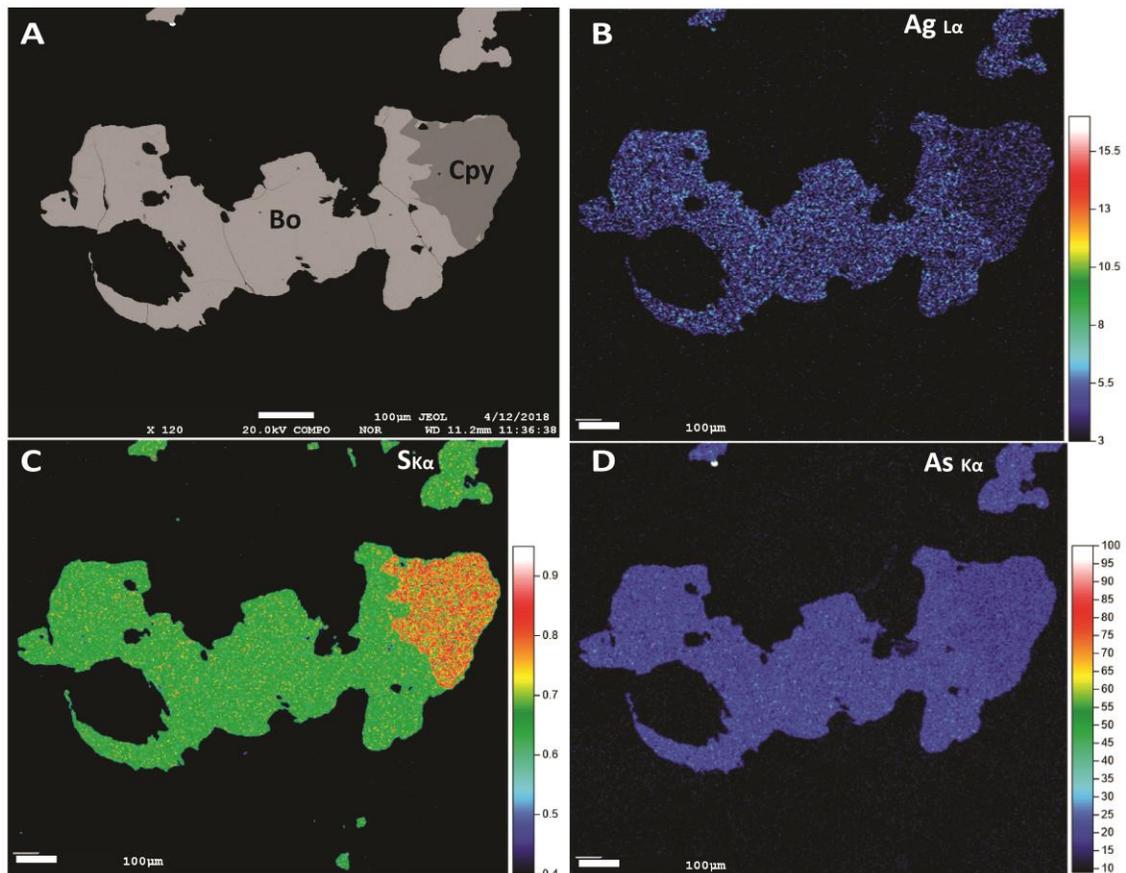


Figura 63. Imagen BSE y mapas EMPA-WDS de calcopirita y bornita de la zona de alteración SGV (muestra DDH386_598). A) Imagen BSE; B) mapa EMPA-WDS de Ag con línea $L\alpha$; C) mapa EMPA-EDS de S; mapa EMPA-WDS de As con línea $K\alpha$.

Mapas LA-ICP-MS de bornita

Se realizaron mapas de elementos traza mediante LA-ICP-MS de un grano seleccionado de bornita de la zona de alteración potásica del yacimiento Río Blanco (muestra DDH812_377.5). Los elementos mayores como el Cu y S, presentan una distribución uniforme (Figs. 64 E y G) en el grano de bornita, a excepción del Fe, el cual presenta una disminución en su contenido en el borde del grano (Fig. 64 F). Los elementos traza como el Bi y Se (Figs. 64 H y J), presentan una distribución uniforme en la bornita. Los mapas de metales nobles como el Au y Pd (Figs. 64 C y D) sugieren que estos dos elementos

se encuentran como inclusiones nanométricas al interior de la bornita. La bornita presenta un enriquecimiento de Ag en el borde de grano con respecto al núcleo, además, se puede decir que este enriquecimiento de Ag está asociado a la zona del grano donde existen menores contenidos de Fe (Fig. 64 B). Con respecto al Te, Sn y Pb (Figs. 64 I, K y L), los spots sugieren que estos elementos se encuentran distribuidos en la bornita a lo largo del grano y en algunos casos como inclusiones nanométricas.

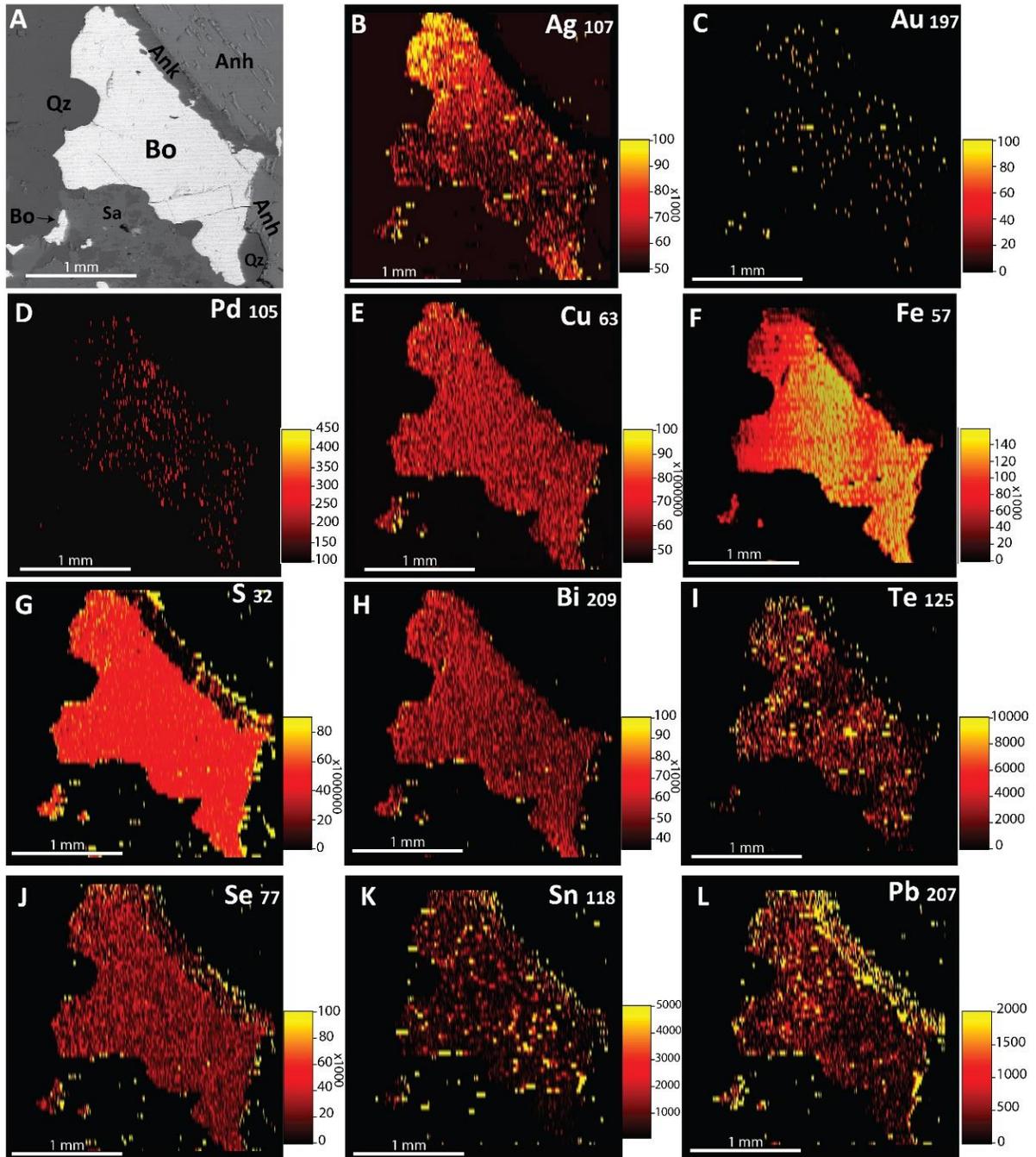


Figura 64. Mapa de elementos traza en bornita mediante LA-ICP-MS, (muestra DDH812_377.5). A) Imagen de bornita tomada con BSE de la zona de alteración potásica; B) mapa de Ag isótopo 107; C) mapa de Au isótopo 197; D) mapa de Pd isótopo 105; E) mapa de Cu isótopo 63; F) mapa de Fe isótopo 57; G) mapa de S isótopo 32; H) mapa de Bi isótopo 209; I) mapa de Te isótopo 125; J) mapa de Se isótopo 77; K) mapa de Sn isótopo 118; L) mapa de Pb isótopo 207. Anh= anhidrita; Qz= cuarzo; Ank= ankerita; Sa= sandidina; Bo= bornita.

Sulfosales de cobre

En la Figura 65 se muestran los datos composicionales para las sulfosales de Cu (SSCu), enargita, tennantita y tetrahedrita, los cuales en su gran mayoría fueron encontradas en la zona de alteración QS, en las vetillas tipo "D". Los elementos mayores fueron medidos mediante EMPA, y las trazas mediante LA-ICP-MS (Anexos 4 y 9). Durante los análisis de los perfiles LA-ICP-MS no fue posible detectar inclusiones minerales, motivo por el cual no se filtraron los resultados como para el caso de la pirita, calcopirita y bornita.

Para representar los valores obtenidos mediante LA-ICP-MS de los elementos Sb, Zn, As, Ag, Bi, Cd, Hg, Co, Pb, Se, Te, In, Tl y Au en las SSCu, se muestran en la Figura 65 cajas de color gris que representan a las enargitas, cajas de color verde para la tennantita y las cajas de color naranja para la tetrahedrita. Se realizaron 27 análisis LA-ICP-MS de enargita (n=8), tennantita (n=6) y tetrahedrita (n=13). Las concentraciones de los elementos está expresada en partes por millón (ppm) en una escala vertical logarítmica. Los contenidos promedio de Sb, Ag, Bi, Cd, Hg y Co son más altos en las tetrahedritas que en las tennantitas y enargitas. La enargita es la SSCu que presenta la menor concentración promedio de los elementos antes mencionados, de hasta un orden de magnitud menos en comparación con la tetrahedrita, a excepción del Pb, el cual presenta un orden de magnitud mayor que la tennantita y la tetrahedrita. Los elementos traza como Ag, Bi, Cd, Hg, Pb e In, se detectaron en todos los análisis de SSCu.

Plata es el elemento traza más abundante en las SSCu, con contenidos promedios de 7.907 ppm, 2.148 ppm y 820,37 ppm para la tetrahedrita, tennantita y enargita respectivamente.

Elementos mayores, menores y traza en enargita (Cu_3AsS_4)

Los resultados de los análisis mediante EMPA para los elementos mayores y menores en enargita muestran contenidos de Cu, S y As que van desde 48,6 hasta 49,4 wt%, 32,34 hasta 32,76 wt%, 18,83 hasta 19,05 wt% respectivamente (Apéndice 4). Análisis LA-ICP-MS en enargitas muestran las siguientes concentraciones de elementos de interés: Zn (<79.000 ppm), Sb (<10.600 ppm), Pb (<3.000 ppm), Se (<1.100 ppm), Cd (<264 ppm), Co (<38 ppm), Mo (<25,5 ppm), Ni (<23 ppm), Tl (<19,9 ppm), Mn (<17 ppm), In (<16,3 ppm), Hg (<9,8 ppm), Cr (<8,4 ppm), Ge (< 6,7 ppm), Bi (<6,5 ppm), Te (<4,5 ppm), Ga (<4,2 ppm) y Au (<0,66 ppm). Los contenidos de Ag van desde los 398 hasta 1.500 ppm, con un valor promedio de 820,37 ppm (Apéndice 9) (Fig. 65).

Elementos mayores, menores y traza en tennantita ($(Cu,Fe,Ag,Zn)_{12}(As, Sb)_4S_{13}$)

Los datos medidos en tennantita para los elementos mayores usando EMPA (Apéndice 4) muestran un rango de concentraciones de 37,82 hasta 46,93 wt% para el Cu, 25,06 hasta 30,94 wt% para el S, 8,6 hasta 20,4 wt% para el As, 0,01 hasta 10,6 wt% para el Sb, 0,18 hasta 8,03 wt% para el Zn y 0,50 hasta 13,56 wt% para el Fe. Los análisis LA-ICP-MS muestran cantidades significativas de Cd (<1.154 ppm), Bi (<1.020 ppm), Hg (<360 ppm), Co (<149 ppm), Pb (<98 ppm), Te (<41,4 ppm), Tl (<11,2 ppm), In (<6,47 ppm) y Cr (<5,9 ppm), y (Apéndice 9). Los valores de Ag tienen rangos que van desde 695 hasta 5.980 ppm, con un contenido promedio de 2.148 ppm (Apéndice 9) (Fig. 65).

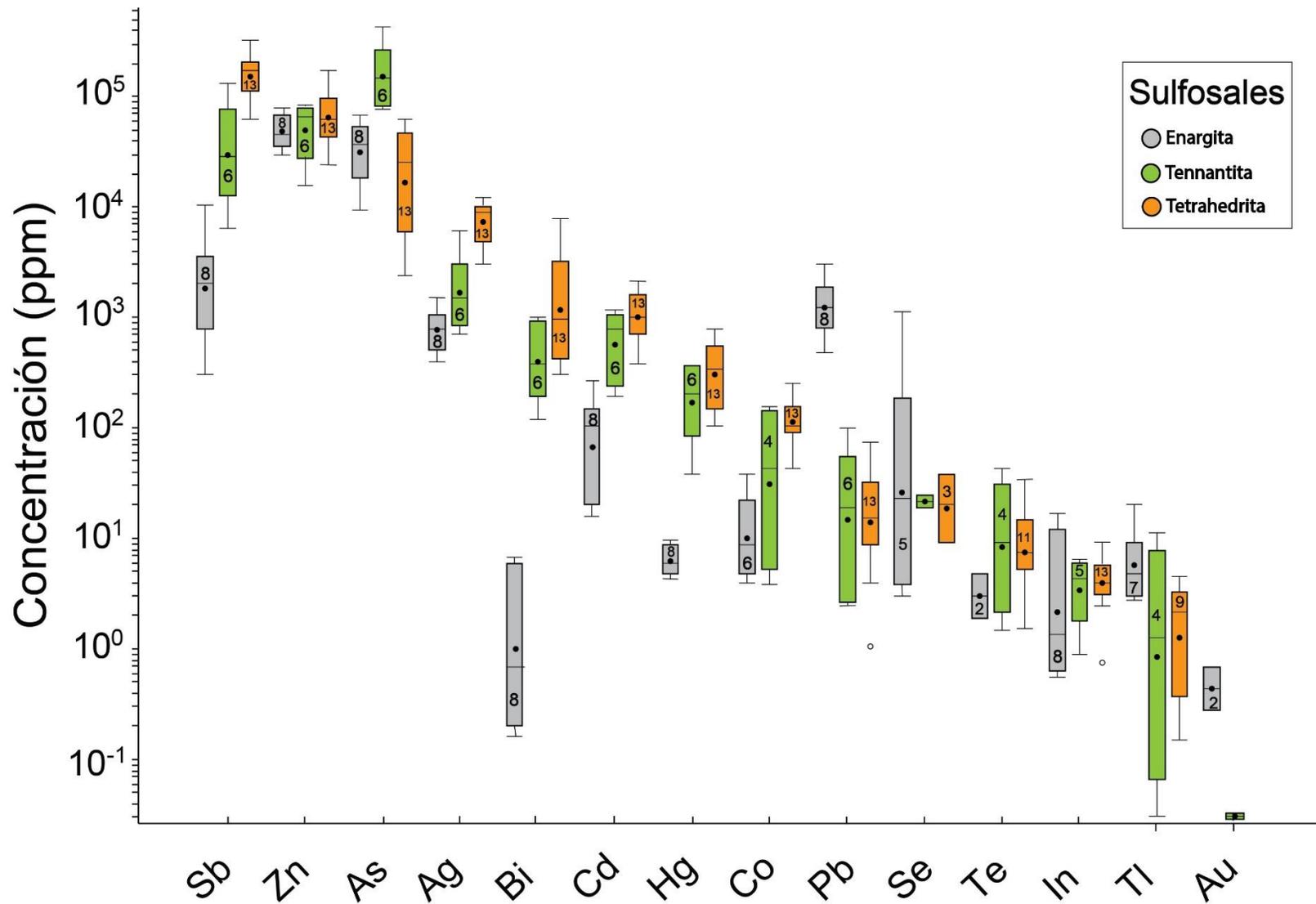


Figura 65. Diagrama de cajas de elementos mayores, menores y trazas en enargita, tennantita y tetrahedrita con datos de LA-ICP-MS. Concentraciones expresadas en partes por millón (ppm) a escala logarítmica. Cajas de color gris corresponden a enargitas, cajas de color verde corresponden a tennantitas y cajas de color naranja corresponden a tetrahedrita.

Elementos mayores, menores y traza en tetrahedrita ((Cu,Fe,Ag,Zn)₁₂(Sb, As)₄S₁₃)

Los análisis EMPA de los elementos mayores en tetrahedrita tienen concentraciones que van desde 36,70 hasta 40,47 wt% Cu, 23,78 hasta 26,37 wt% S, 13,19 hasta 29,48 wt% Sb, 0,17 hasta 10,26 wt% As, 2,68 hasta 7,03 wt% Zn, 0,71 hasta 4,48 wt% Fe (Apéndice 4). Los elementos menores medidos con LA-ICP-MS muestran los valores: Bi (<7.960 ppm), Cd (<2.120 ppm), Hg (<785 ppm), Co (<250 ppm), Pb (<73,6 ppm), Se (<37 ppm), Te (<33,6 ppm), Mn (<13,2 ppm), In (<8,98 ppm), Cr (<8,4 ppm), y Tl (<4,4 ppm). Los contenidos de Ag van desde los 3.070 hasta 11.980 ppm, con valor promedio de 7.907 ppm (Apéndice 9) (Fig. 65).

Gráficos elementales de dispersión en sulfosales de cobre

Para conocer el comportamiento de Ag en función de otros elementos asociados en las SSCu, se elaboraron diferentes gráficos de dispersión para los elementos de más alta correlación, tanto positivas como negativas.

Los pares de elementos Ag vs. Sb presentan una tendencia positiva con un coeficiente de correlación $r=0,96$, en donde el extremo enriquecido tanto en Ag como Sb corresponde a la tetrahedrita, en la zona media del gráfico se encuentra la tennantita, mientras que el extremo empobrecido del par de elementos corresponde a la enargita (Fig. 66 A).

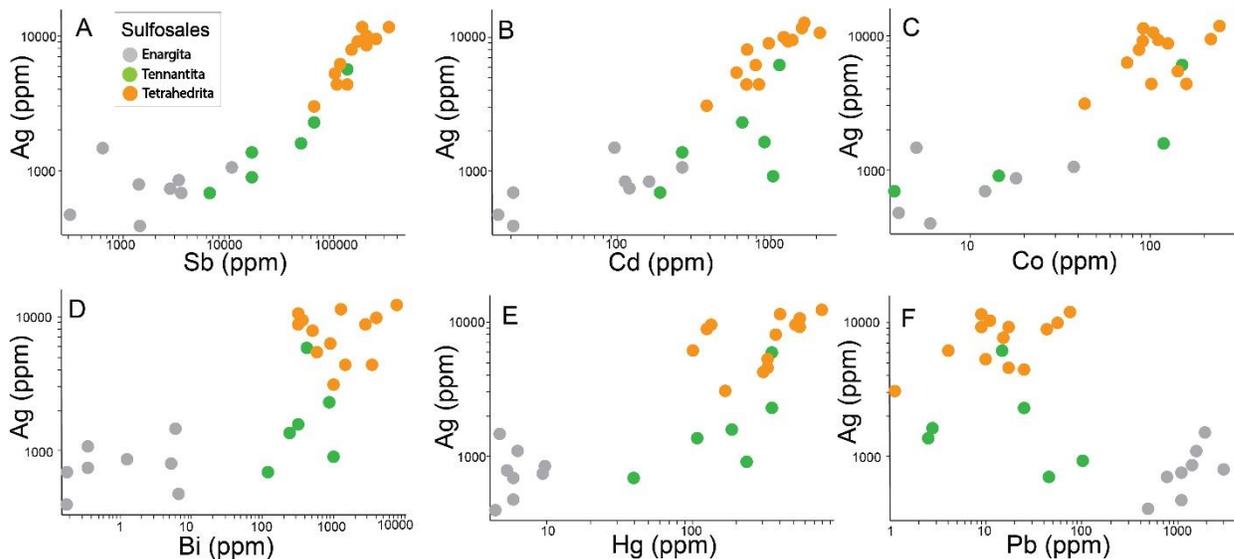


Figura 66. Gráficos de dispersión en enargitas, tennantitas y tetrahedritas para Ag, Sb, Cd, Co, Bi, Hg y Pb en escala logarítmica de análisis LA-ICP-MS. A) Ag vs. Sb; B) Ag vs. Cd; C) Ag vs. Co; D) Ag vs. Bi; E) Ag vs. Hg; F) Ag vs. Pb. Todas las concentraciones expresadas en partes por millón (ppm). Círculos grises corresponden a enargita, círculos verdes corresponden a tennantita y círculos naranja corresponden a tetrahedrita.

Los siguientes elementos presentan correspondencias positivas Ag vs. Cd ($r=0,87$), Ag vs. Co ($r=0,74$), Ag vs. Bi ($r=0,56$), Ag vs. Hg ($r=0,78$), con coeficientes de correlación $r > 0,56$, el comportamiento de estos pares de elementos es similar a la Ag vs. Sb, en donde la tetrahedrita presenta las más altas concentraciones y la enargita presenta los contenidos más bajos de los elementos antes mencionados.

Con respecto al par de elementos Ag vs. Pb se observa una correspondencia negativa, con un coeficiente de correlación $r=-0,56$. Los más altos contenidos de Pb corresponden a la enargita mientras que la tennantita-tetrahedrita presenta bajos contenidos de Pb.

Otras tendencias positivas y negativas encontradas en las sulfosales de cobre corresponden a los pares de elementos Sb vs. Cd ($r=0,86$), Sb vs. Co ($r=0,86$), Sb vs. Bi ($r=0,73$), Sb vs. Hg ($r=0,86$), Sb vs. Zn ($r=0,71$) con coeficientes de correlación $r>0,71$ (Figs. 67 A-E) y para el caso de Sb vs. Pb la correspondencia es negativa con un coeficiente de correlación ($r=-0,54$) (Fig. 67 F). La Ag y el Sb tienen un comportamiento similar con los elementos asociados Cd, Co, Bi, Hg y Pb (Figs. 66 B-F; Figs. 67 A-D, F) en las sulfosales de cobre. Para los elementos Sb vs. Zn la correspondencia es positiva con una dispersión en los datos en la enargita (Fig. 67 E).

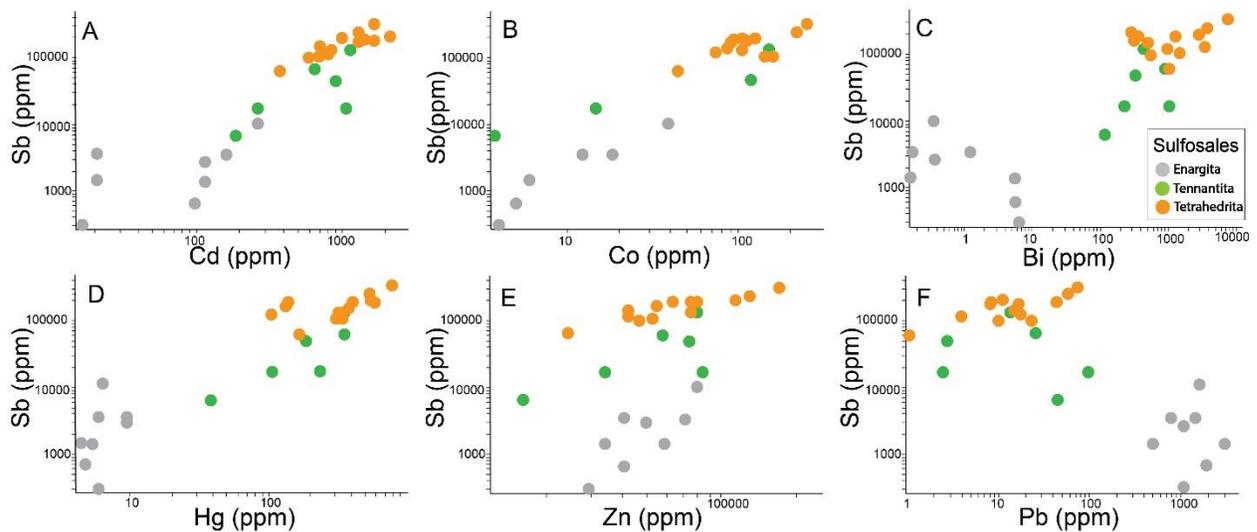


Figura 67. Gráficos de dispersión en enargitas, tennantitas y tetrahedritas para Sb, Cd, Co, Bi, Hg, Zn y Pb en escala logarítmica de análisis LA-ICP-MS (Apéndice 9). A) Sb vs. Cd; B) Sb vs. Co; C) Sb vs. Bi; D) Sb vs. Hg; E) Sb vs. Zn; F) Sb vs. Pb. Todas las concentraciones expresadas en partes por millón (ppm). Círculos grises corresponden a enargita, círculos verdes corresponden a tennantita y círculos naranja corresponden a tetrahedrita.

Mapas EMPA-WDS de tennantita-tetrahedrita

Imagen BSE y mapas composicionales EMPA-WDS rayos-X de tennantita y tetrahedrita de la zona de alteración cuarzo-sericita (QS) se observan en la Figura 68 (muestra TSS62_286.5). Se observa que la Ag está distribuida en mayor cantidad en la tetrahedrita que en la tennantita, además, existe un acoplamiento entre los contenidos de Sb y los contenidos de Ag en las sulfosales (Figs. 68 B-D), es decir, mientras más contenido de Sb, mayor contenido de Ag presentan las sulfosales, mismo comportamiento expresado en la Figura 66 A, de los análisis LA-ICP-MS en SSCu (Apéndice 9). La tetrahedrita presenta varias zonas y bandas ricas en Sb (Fig. 68 C), mientras que la tennantita presenta zonas y bandas ricas en As (Fig. 68 D). Existe un comportamiento desacoplado entre las zonas ricas en As y las zonas ricas en Sb tanto en tennantita como en tetrahedrita.

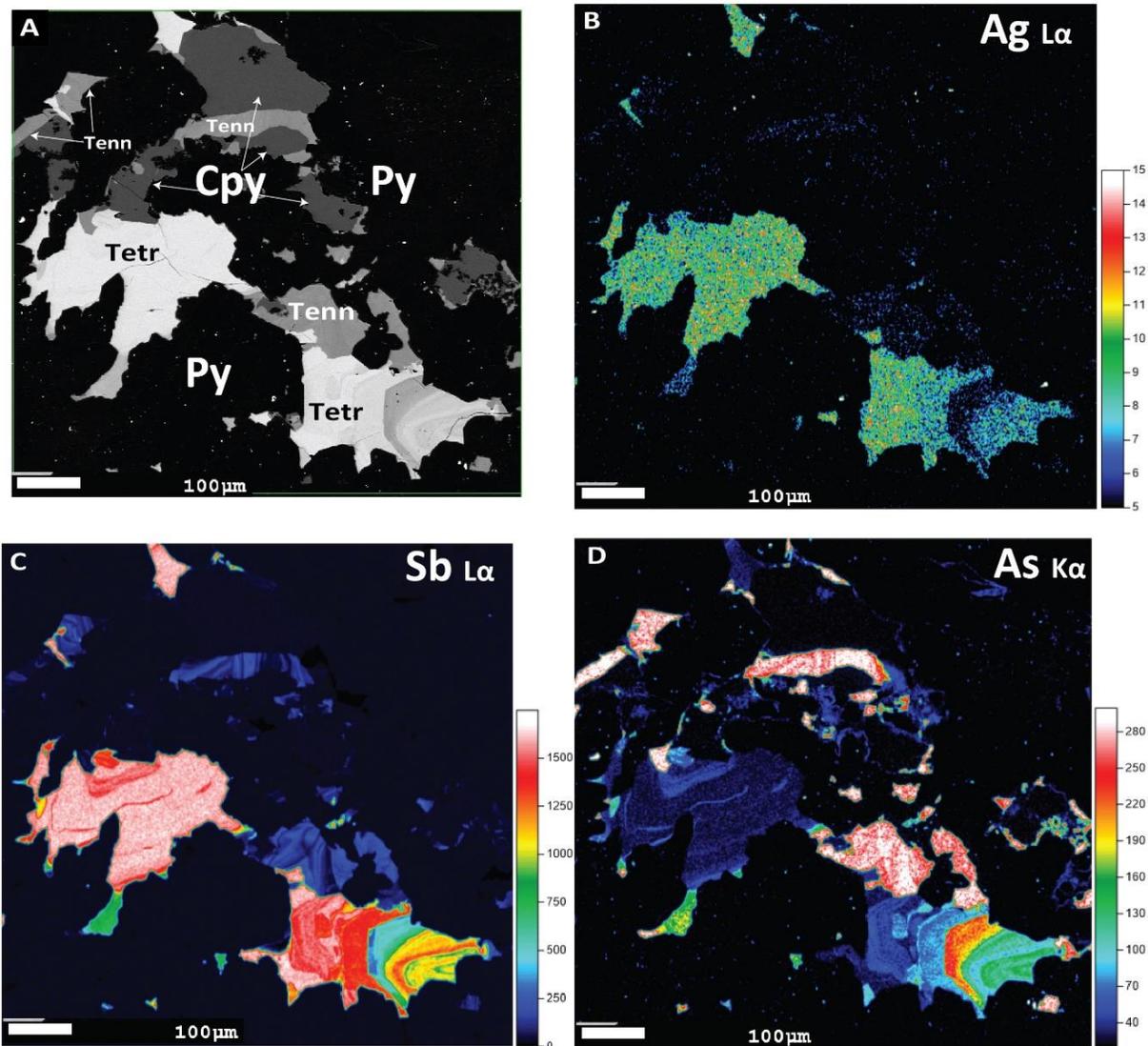


Figura 68. Imagen BSE y mapas EMPA-WDS de pirita-calcopirita-tennantita-tetrahedrita de la zona de alteración QS, (muestra TSS62_286.5). A) Imagen BSE; B) mapa EMPA-WDS de Ag con línea $L\alpha$; C) mapa EMPA-WDS de Sb con línea $L\alpha$; D) mapa EMPA-WDS de As con línea $K\alpha$.

Debido a que los mapas EMPA-WDS suelen tradicionalmente representar de manera adecuada la variabilidad composicional de las SSCu, no se realizaron mapas LA-ICP-MS para estos minerales. Sin embargo, y considerando la presencia de trazas detectada en análisis LA-ICP-MS puntuales, se sugiere para estudios futuros realizar este tipo de mapas composicionales.

Elementos mayores, menores y traza en sulfuros de plata

Se realizaron varias mediciones en sulfuros de plata de las zonas de alteración QS y SGV con EMPA (Apéndice 5; Fig. 39 A y C). Los elementos mayores en los sulfuros de plata muestran rangos desde 82,90 hasta 87,94 wt% Ag, y 4,28 hasta 16,15 wt% S. Estos sulfuros de Ag muestran concentraciones de: Cu (<3,86 wt%), As (< 2,86 wt%), Fe (<1,37

wt%), Hg (<0,23 wt%), Te (<0,20 wt%), Se (<0,07 wt%) y Pb (<0,05 wt%). El Au presenta valores con rangos que van desde 0,03 hasta 0,17 wt%, con un contenido promedio de 0,08 wt% (Apéndice 5).

Elementos mayores, menores y traza en minerales del grupo del platino (PGM)

Se identificaron varios PGM mediante observaciones FESEM, de los cuales, únicamente dos granos tenían el tamaño óptimo para realizar análisis cuantitativo mediante EMPA-WDS.

Los análisis puntuales cuantitativos EMPA-WDS de dos inclusiones del tamaño micrométrico (Fig. 42 B y C) (muestra DDH386_564) presentaron contenidos en rangos que van desde 19,18 hasta 23,69 wt% Pd y 48,10 hasta 65,34 wt% Te. A pesar de sus contenidos totales bajos (>95,35 wt%), la estequiometría es consistente con el mineral merenskyita ((Pd, Pt)(Bi,Te)₂). El análisis EMPA-WDS de los granos mostró la presencia de Pt (~1,32 wt%), Bi (~0,35 wt%), Rh (~0,2 wt%), Au (~0,13 wt%), Os (~0,12 wt%) y Ag (~0,07 wt%) (Apéndice 5) (Crespo et al. 2018).

Debido al tamaño reducido de los granos, no se pudieron realizar mapas EMPA-WDS, ni análisis puntuales o mapas mediante LA-ICP-MS.

CAPITULO 6. MODELO GEOLÓGICO DE MINERALIZACIÓN DE PLATA EN EL YACIMIENTO RÍO BLANCO

Este capítulo sintetiza y discute la información presentada por varios estudios sobre la génesis mineral en el yacimiento Río Blanco, con la finalidad de desarrollar un modelo genético de la mineralización de plata y elementos asociados en el yacimiento Río Blanco.

6.1 Modelos genéticos previos para Río Blanco

Aunque muchas de las características de la geología, mineralización y alteración de Río Blanco son comparables con los típicos depósitos tipo pórfido de cobre, el yacimiento Río Blanco se caracteriza porque la mayoría de sus recursos ocurren como cemento de brecha en lugar de vetillas mineralizadas (Frikken 2004). Vargas et al. (1999) fue el primero en generar un modelo esquemático que muestra las relaciones zonales en los sectores Sur-Sur y la Americana (Fig. 69). El esquema de Vargas et al. (1999), a pesar de ser sencillo para un sistema tan complejo como Río Blanco, es útil porque ilustra la zonación mineral de relevancia en el yacimiento. Una de las características claves en este modelo es la incorporación de un halo de alteración de especularita que se extiende gradualmente desde la brecha de turmalina, y una brecha cementada con biotita que se extiende hacia abajo desde la brecha de turmalina. Además, con respecto a los sulfuros se identificó que las abundancias de pirita aumentan hacia arriba a través de la columna de brechas de turmalina, y las razones pirita:calcopirita aumentan hacia afuera hasta el margen del cuerpo mineralizado, donde la calcopirita desaparece del ensamble del cemento de brecha (Vargas et al. 1999). Cabe mencionar que los autores citados sugirieron que los fluidos magmáticos fueron los responsables de la ruptura hidráulica inicial de la columna de roca y la mineralización de las brechas.

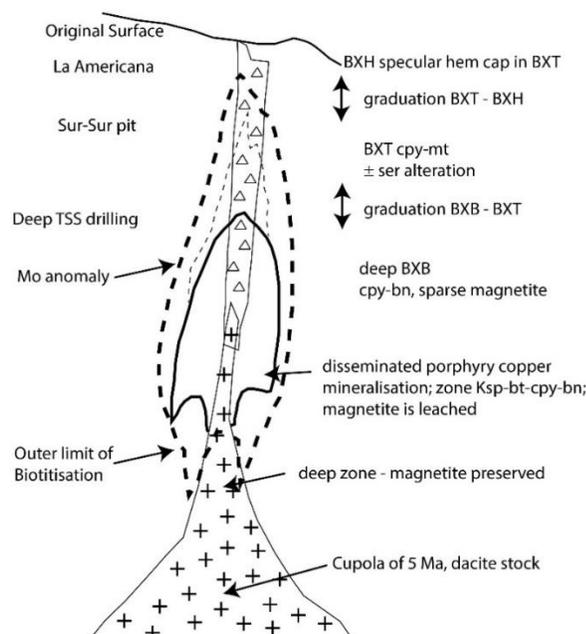


Figura 69. Modelo esquemático de los patrones de zonación relacionados con las brechas mineralizadas de turmalina en el distrito Río Blanco-Los Bronces. BXT= brecha de turmalina; BXB= brecha de biotita; BXH= brecha de hematita. (modificado de Vargas et al. 1999).

El enfriamiento y solidificación de cámaras magmáticas de la corteza media a superior, desencadenó la liberación de grandes volúmenes de fluidos magmáticos ricos en metales y generó un grupo económicamente significativo de brechas ricas en cobre en Chile central, por ejemplo, para la brecha Sur-Sur en Río Blanco se cree que se formó a partir de una explosión magmático-hidrotermal de una intrusión profunda, lo que provocó la formación de esta brecha, en donde las presiones hidrostáticas superaron catastróficamente la carga litostática más la resistencia a la tracción de la granodiorita, lo que condujo a una brechización generalizada y la introducción subsiguiente de enormes volúmenes de gas magmático y salmuera hipersalina (Warnaars et al. 1985; Skewes y Stern 1994; Vargas et al. 1999; Skewes et al. 2003; Frikken 2004; Frikken et al. 2005). Para el caso específico de Río Blanco-Los Bronces, los datos que se han obtenido de varios trabajos a partir de datos isotópicos de oxígeno e inclusiones fluidas han confirmado que los fluidos magmáticos de altas temperaturas y salinidades, no solo causaron la brechización, sino también la precipitación de cuarzo, turmalina y la mineralización en las brechas del complejo Los Bronces (Brecha Donoso) (Skewes et al. 1997; Skewes et al. 2003; Davidson et al. 2005). Probablemente las aguas meteóricas pudieron haber circulado mezclándose con los fluidos magmáticos, lo que produjo la precipitación de anhidrita, pero solamente después de la formación del cuarzo, turmalina y los sulfuros en la matriz de la brecha (Skewes 1997; Skewes et al. 2003). La brecha de turmalina Sur-Sur es una columna de roca intensamente fracturada y alterada que ha sido cementada por una cantidad variable de turmalina, especularita, sulfuros, anhidrita, magnetita y cuarzo. Frikken et al. (2005), demostró la presencia de inclusiones fluidas de líquido hipersalino de alta temperatura, lo que confirma un origen magmático-hidrotermal de la brecha. Además, en el mencionado estudio se documentó una zonación mineralógica e isotópica que provee la evidencia para mezcla de fluidos, separación de fases, oxidación, y la interacción de agua-roca durante la formación de la brecha Sur-Sur

Los yacimientos tipo pórfido de cobre generalmente contienen un enrejado o stockwork de vetillas transversales estrechamente espaciadas que forman un cuerpo mineralizado centrado en una intrusión de un pórfido. El yacimiento Río Blanco tiene la particularidad de que su mineralización de cobre se encuentra en su mayoría relacionada con múltiples cuerpos de brechas (mineralizadas y no mineralizadas) que fueron emplazadas durante aproximadamente un millón de años. Frikken et al. (2005), interpretó que la formación de mineral de Cu de alta ley en la parte superior del sistema, se debe principalmente a la mezcla de fluidos (Frikken 2004; Frikken et al. 2005).

Frikken (2004) describen varias etapas de la evolución del yacimiento Río Blanco. Las dos primeras etapas están asociadas a la zona de alteración potásica, donde en la etapa 1 se emplaza el Batolito San Francisco dentro de la Formación Farellones y Los Pelambres. En la etapa 2 comienza a desarrollarse un débil stockwork mineralizado de vetillas de cuarzo-biotita con sulfuros (Cpy-Bo) con halos de biotita que se localizan en profundidad. El stockwork de vetillas es considerado el precursor de las brechas de turmalina y de biotita. La etapa 3 consiste en la brechización y mineralización de las brechas. La brecha con cemento de biotita está fuertemente mineralizada en el sector Río Blanco y Don Luis, mientras que en el sector Sur-Sur la brecha matriz de biotita y turmalina son débilmente mineralizadas (Frikken 2004). Existe una transición desde la brecha matriz de biotita en profundidad hacia brecha matriz de turmalina sobre los 3.000 msnm, lo que marca una transición entre la zona de alteración potásica y la fílica. La

etapa 4 consiste en el emplazamiento de los pórfidos, stockwork de vetillas de la alteración fílica y el complejo La Copa. Las brechas mineralizadas de biotita y turmalina son cortadas por una serie de pórfidos alterados a cuarzo-sericita (PQM, PFELD, y PDL). El PQM y el PDL generaron un stockwork débil de vetillas que contienen sulfuros con halos de alteración cuarzo-sericita. La evolución final del yacimiento se relaciona al emplazamiento de la Chimenea Dacítica y el complejo Riolítico La Copa, los cuales son postmineralización.

El modelo genético de Frikken et al. (2005) menciona que para la formación de brecha magmática-hidrotermal, la brechización inicial fue desencadenado por la exsolución de un fluido magmático. La migración de la salmuera hacia la parte somera a través de la brecha en el momento de la depositación de los sulfuros de cobre, correspondería a un período de resurgimiento de magma. El aumento de salmuera o salmuera más vapor habría sido impulsado por diferenciales de presión dentro del sistema magmático-hidrotermal. La mezcla de salmuera rica en Cu y los reservorios a niveles altos de agua acida y oxidada se infiere que sea la causante de la transición de la mineralización desde calcopirita-magnetita a calcopirita-especularita y finalmente pirita-especularita, así como la mineralización de cobre de alta ley en la parte superior de la columna de la brecha. La precipitación de calcopirita podría haber sido causada por cambios en temperatura, presión, el estado de oxidación de los fluidos, así como cambios en la acidez, salinidad. Los gradientes en el potencial redox y la actividad de azufre causada por la mezcla de salmuera hipersalina y líquido de baja densidad son los factores más importantes que controlan la precipitación de calcopirita en la brecha de turmalina Sur-Sur (Fig. 70).

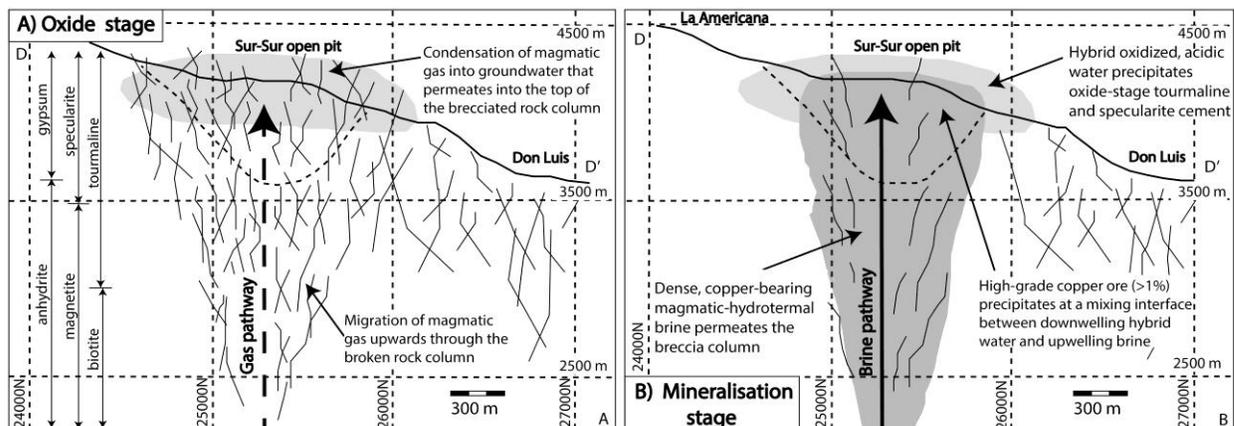


Figura 70. Diagrama esquemático la posible evolución del fluido en la brecha de turmalina Sur-Sur. A) Brechización magmática-hidrotermal desencadenada por una cristalización de una intrusión profunda que permitió a los gases magmáticos y a la salmuera hipersalina exsolverse a partir de un fundido. La expansión de vapor de baja densidad propagó el frente de la brecha hacia arriba y hacia afuera desde el punto de explosión inicial. Las aguas subterráneas penetraron en la parte superior y exterior de la columna de roca brechizada, condensando los gases magmáticos y produciendo un agua híbrida ácida y oxidada que precipitó la especularita en etapa de óxido, turmalina y anhidrita y causó una alteración cuarzo-sericita-turmalina. B) El surgimiento de la salmuera magmática-hidrotermal densa que contiene cobre, causó la depositación de calcopirita a través de la columna de brecha. La alta ley de mineral de cobre se desarrolla en la parte superior de la columna de brecha, debido a la mezcla de la salmuera con el agua híbrida oxidada. Modificado de Frikken et al. 2005.

Kusakabe et al. (1990) analizó inclusiones fluidas desde la zona potásica hasta la zona propilítica y de la zona potásica con alteración cuarzo-sericita en el sector Río Blanco. Se documentó temperaturas de homogenización entre 430° y 320°C. Vargas et al. (1999),

reportó inclusiones hipersalinas conteniendo 30 a 55 wt%NaCl_{eq} que fueron atrapadas a temperaturas de 225° a 500°C. Las inclusiones ricas en fluido presentan rangos de baja salinidad hasta los 30 wt%NaCl_{eq}, atrapadas a temperaturas de 150° a 450°C. Frikken (2004) realizó estudios de microtermometría en la matriz de cuarzo de la brecha de turmalina, y encontró que las inclusiones presentan temperaturas entre 160° hasta 600°C, en donde se presume que la temperatura de mineralización de Cu sea entre los 300 y 450 °C, con salinidades de ~30 wt%.

6.2 Eventos de alteración y mineralización de Cu-Mo

En el yacimiento Río Blanco se han identificado al menos tres grandes eventos de alteración y mineralización (Figura 72). El primer evento está comprendido entre 6,6-6,4 Ma (edad Re-Os) y se relaciona a los eventos de fondo potásico de la roca de caja con el desarrollo de las vetillas “EB-EBT” (Hermosilla 2015). Este evento de mineralización coincide con la edad de emplazamiento del pórfido cuarzomonzonítico temprano ubicado en el sector Río Blanco (Deckart et al. 2005, 2013). En el sector Río Blanco se observa que la brecha de turmalina temprana (BXT) y la brecha de polvo de roca (BXPR) contienen xenolitos de pórfidos PQM1 y PFELD, lo que permite inferir que su edad está comprendida entre 7,05-6,2 Ma.

Sobreimpuesto con el evento de alteración potásico de fondo, se interpreta el desarrollo de la alteración sericita gris verde con un importante aporte de sulfuros de cobre en donde predomina la calcopirita, y se encuentra afectando principalmente a la BXT y al pórfido cuarzomonzonítico intermineral PQM2.

Durante el emplazamiento del PQM2 se registra un evento de mineralización relacionado a un set de vetillas del tipo tempranas “A” y “B” con edades Re-Os de 6,26-5,8 Ma (Mathur et al. 2001; Deckart et al. 2005).

El pórfido Don Luis corta al evento anterior, el cual genera un nuevo pulso de alteración/mineralización con la presencia de vetillas tipo “A” y “B”. Este evento de mineralización tiene una edad Re-Os 5,0-4,8 Ma (Hermosilla 2015; Deckart et al. 2013). El PDL en profundidad cuenta con el desarrollo de vetillas potásicas tempranas y en zonas someras presenta alteración sericita gris verde.

El último evento corresponde a la mineralización de las brechas de turmalina tardía, ricas en piritita y calcopirita cuya formación es posterior al emplazamiento de la chimenea Riolítica (CHRIOL), la cual tiene una edad Re-Os de 4,5 ±0,02 Ma en molibdenita realizado en una vetilla tipo “D” (Deckart et al. 2013).

6.3 Eventos acoplados de mineralización de plata

Ayudado en los trabajos de geocronología realizados por Mathur et al. (2001); Frikken, (2003); Deckart et al. (2005), (2013); Hermosilla, (2015), y tomando en consideración los datos presentados los capítulos anteriores de esta tesis, se plantea un modelo de tres eventos de mineralización de Ag en el yacimiento Río Blanco. El modelo se muestra en forma gráfica en las Figuras 71 y 72, en donde se puede observar las edades de los emplazamientos de los diferentes pórfidos en el yacimiento, así como también las edades aproximadas de los principales cuerpos de brechas y las edades de probabilidad relativa

de biotita $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de los eventos de alteración hidrotermal. Además en la Figura 72, se muestra diferentes histogramas de concentración para cada sulfuro y sulfosal de cada evento de alteración, estos datos de concentraciones fueron tomados de los análisis mediante LA-ICP-MS por su amplio rango de concentraciones (ppm a wt%). Cabe mencionar que los sulfuros y sulfosales analizados corresponden a los diferentes vetillas presentes en cada evento de alteración hidrotermal, es decir, el evento temprano de mineralización de Ag, asociado a la alteración potásica, se analizaron calcopiritas y bornitas de las vetillas tipo “EB”, “EBT”, “A” y “B”; mientras que para el evento transicional de mineralización de Ag, asociado a la alteración sericita gris verde, se analizaron calcopiritas y bornitas de las vetillas tipo “C”, y por último para el evento tardío de mineralización de Ag, asociado a la zona de alteración fílica (cuarzo-sericita) los sulfuros y sulfosales analizados fueron, piritas, calcopiritas, enargitas, tennantitas y tetrahedritas, asociados a las vetillas tipo “D” y “E”. Por último en la Figura 72 se describe una tabla paragenética de los sulfuros y la mineralización de Ag en el yacimiento Río Blanco.

La Figura 71 es un modelo esquemático generalizado de un patrón de alteración hidrotermal, zonación de metales, zonas de mineralización y vía de los fluidos en el yacimiento Río Blanco.

6.3.1. Primer evento de mineralización de Ag: alteración potásica

El primer evento de mineralización de Ag en Río Blanco está relacionado con la zona de alteración potásica de fondo de la roca de caja en donde aparecen las vetillas tipo “EB-EBT” y los sulfuros predominantes corresponden a calcopirita y bornita. Posterior a este evento de fondo potásico, cada pulso intrusivo de pórfidos (PQM2, PFELD y PDL) presenta su distintivo evento potásico a diferentes intervalos de tiempo, desarrollándose las vetillas tipo “A” y “B”. Los sulfuros predominantes para este evento son calcopiritas y bornitas, molibdenita, con menor cantidad de pirita.

Del análisis estadístico de la base de datos ICP-MS de los sondeos a diamantina, sección 4.4.4 de esta tesis, se puede decir que a nivel de yacimiento, la zona de alteración potásica presenta contenidos promedios Ag con un valor de 2,01 ppm (Fig. 29) y además la alteración potásica presenta los contenidos promedios más altos que las otras zonas de alteración hidrotermal (Fig. 28).

Mediante observaciones SEM y FESEM se pudo identificar que los principales minerales de plata en esta zona potásica corresponden a hessita (Ag_2Te) y electrum (AuAg) (Figs. 40 y 43), las cuales se presentan como micro-nano inclusiones $<2\ \mu\text{m}$ diseminadas tanto en calcopirita y bornita, presentando un hábito tabular alargado. La descripción de estos minerales está detallada en la sección 5.4.2 de esta tesis.

Para la zona de alteración potásica, los resultados de los análisis LA-ICP-MS, muestran concentraciones promedio de Ag en calcopirita sin inclusiones de 3,89 ppm y de 235,38 ppm en bornita sin inclusiones (Fig. 55). Las concentraciones de Ag en piritas y molibdenitas son despreciables en esta zona de alteración, mediante análisis con microsonda electrónica se pudo identificar solamente un análisis con contenido de Ag de 0,02 wt% en pirita (muestra TSS62_788.5; Fig. 53; Apéndice 1). El histograma de concentración de Ag, expresado en partes por millón (ppm) para la zona de alteración potásica, muestra que el rango de abundancia más común para la Ag en calcopiritas

corresponde al intervalo comprendido entre 0,85-25,26 ppm (n=17) (Fig. 72). Para el caso de las bornitas se han identificado dos poblaciones de concentraciones de Ag: la primera población de datos corresponde a tres rangos entre 98,49-171,72 ppm (n=10); la segunda población en bornitas presenta una distribución mesocúrtica con concentraciones que van desde los 196,13 hasta los 367,0 ppm (n=23), en donde el mayor número de análisis está en los contenidos entre 269,36-293,77 ppm (n=5) (Fig.72).

Crespo et al. (2018) realizó una inspección detallada de las inclusiones minerales en calcopiritas y bornitas de la zona de alteración potásica, demostrando la presencia de micro a nano inclusiones de minerales del grupo del platino, telurios de paladio (PdTe_2 , merenskyita) (Fig. 42). Un análisis cuantitativo EMPA-WDS de la inclusión de merenskyita (Fig. 42 C), mostró concentraciones de ~23,7 wt% Pd y 65,3 wt% Te, 1,3 wt% Pt, 0,4 wt% Bi, 0,1 wt% Au, y 0,1 wt% Os.

Además de los minerales del grupo del platino, se identificaron otras inclusiones minerales que contienen Au, Hg y Se (Fig. 43), demostrándose la presencia de inclusiones del tipo electrum ($\text{Au, Ag} \pm \text{Hg}$) (Fig. 43 A-D), y variedades minerales Au-Ag-Te, tales como la petzita (Au_3AgTe_2) (Fig. 43 B).

En el esquema de zonación metálica, patrones de alteración hidrotermal (Fig. 71), se observa un núcleo potásico con mineralización calcopirita>bornita>molibdenita±pirita con zonación de metales $\text{Cu} \pm \text{Mo} \pm \text{Ag} \pm \text{Au} \pm \text{Pd}$, en base a los resultados EMPA y LA-ICP-MS y a lo observado con SEM y FESEM. La zona propilítica es un halo distal de la zona de alteración potásica, con una zona de mineralización pirita>calcopirita.

6.3.2. Segundo evento (transicional) de mineralización de Ag: alteración sericita gris verde

El segundo evento de mineralización de Ag se asocia al evento transicional de mineralización de Cu, el cual está relacionado con la zona de alteración sericita gris verde, en donde son características las vetillas del tipo “C”.

En la sección 4.4.4 de esta tesis se realiza un análisis estadístico de la base de datos ICP-MS de los sondajes a diamantina. En la zona transicional sericita gris verde (SGV), los contenidos promedio de Ag se incrementan a medida que se incrementa la intensidad de la alteración, es decir, la zona sericita gris verde fuerte tiene mayor contenido de Ag, mientras que la zona de alteración sericita gris verde débil, presenta una menor concentración de Ag (Fig. 28). El contenido promedio de Ag en la zona de alteración (SGV) es de 1,72 ppm (Fig. 29).

Los minerales de Ag observados mediante SEM y FESEM son hessita (Ag_2Te), electrum (AuAg), acantita (Ag_2S) (Figs. 39 y 41), sulfuros de AgCuAs (proustita, polibasita, pearcita) (Fig. 41 D-F), y sulfuros de plata-bismuto-cobre-hierro, mismos que están presentes como inclusiones en calcopiritas, rellenando microvetillas en piritas y calcopiritas, con tamaños menores a 3 μm . En la sección 5.4.2 de este trabajo, se encuentra más detallado los minerales de plata mencionados.

Los sulfuros analizados mediante LA-ICP-MS para esta zona de alteración corresponden a calcopirita y bornitas. La concentración promedio de Ag en calcopiritas sin inclusiones

minerales es de 1,63 ppm, mientras que la concentración promedio de Ag en bornitas sin inclusiones minerales es de 415,6 ppm. Se observa un incremento en la concentración de Ag en bornitas con respecto a la zona de alteración potásica. En la Figura 72 se observa el histograma para la zona de alteración sericita gris verde en donde los valores de Ag en calcopirita tienen el mayor número de análisis (n=24) en el primer rango de valores (0,26-69,24 ppm); para el caso de la bornita el histograma presenta una distribución leptocúrtica en donde se observa un elevado grado de concentración alrededor de los valores centrales entre el intervalo 276,20-345,19 ppm Ag con un total de 17 análisis.

Las piritas de la alteración SGV (Fig. 53) presenta concentraciones más acotadas de los elementos Co, Cu, As, Ni, Ag, Se y Te con respecto a las piritas de la alteración cuarzo-sericita (QS). Luke et al. (2018), menciona que la razón Cd:Zn se incrementa con la temperatura inferida de cristalización en las calcopiritas (Anexo K). Para nuestro estudio, se observó que la alteración SGVm presenta una razón mayor (Cd:Zn =0,08) que la alteración QS (Cd:Zn = 0,01-0,025). Con respecto a las bornitas, podemos decir que existe también una tendencia en las razones Ag:Bi, la zona de alteración SGVm presenta una razón Ag:Bi entre 0,19-0,25, mientras que las bornitas de la zona de alteración potásica presentan razones Ag:Bi más elevadas (0,3-3,08) (Fig.61). Las zonas alteración de mayor temperatura presentan razones mayores que las zonas de alteración de menor temperatura.

La Figura 71 muestra una zona de alteración sericita gris verde en con patrón característico de mineralización calcopirita>pirita±bornita, mientras que la zonación metálica corresponde a Cu±Ag±Bi±Co±Ni, según los análisis EMPA y LA-ICP-MS realizado a cada sulfuro correspondiente a esta zona de alteración.

6.3.3. Tercer evento de mineralización de Ag: alteración cuarzo-sericítica

El evento final de mineralización de Ag en el yacimiento corresponde a evento tardío cuarzo-sericita, en donde son características las vetillas tipo “D” y “E”. En este evento se incluye pirita, calcopirita, enargita, tennantita y tetrahedrita.

Del análisis de los contenidos de Ag en relación a las distintas zonas de alteración, se puede observar en la sección 4.4.4 de esta tesis, la zona de alteración cuarzo-sericita (QS) presenta los contenidos promedios bajos con respecto a los dos eventos antes mencionados, con una valor promedio de 1,35 ppm (Figs. 28 y 29).

Los minerales de Ag más comunes identificados mediante observaciones SEM y FESEM en esta zona de alteración corresponden a acantita (Ag₂S) (Figs. 41), sulfuros de Ag-Cu-As (Figs. 43 A-C) y sulfuros de Ag-Bi-Cu-Fe (Figs. 43 D-F).

El histograma de concentración promedio de Ag para pirita-calcopirita de la zona de alteración QS muestra que la calcopirita presenta una distribución asimétrica positiva, en donde el mayor número de análisis se encuentran alrededor del intervalo entre 1,02-1,76 ppm Ag (n=15). La solución sólida tennantita-tetrahedrita no presenta una distribución simétrica de las concentraciones de Ag, con contenidos que van entre 695-11.980 ppm Ag (Fig. 72).

Los análisis EMPA y LA-ICP-MS para las piritas de la zona de alteración QS presentan una amplia dispersión de los valores de los elementos Co, Cu, As, Ni, Ag, Se, Te. Las piritas de la alteración QS presentan una mayor cantidad de micro a nano inclusiones de minerales de los elementos antes mencionados (Fig. 53). Las concentraciones promedio de Ag en piritas sin inclusiones minerales son bajas (0,29 ppm Ag; n=1), mientras que las piritas con inclusiones minerales presentan una concentración promedio de 9,08 ppm Ag (n=10, Apéndice 10). Mediante LA-ICP-MS análisis en calcopiritas sin inclusiones minerales de la zona de alteración QS se determinó un contenido promedio de 2,79 ppm de Ag y un valor promedio de 104,82 ppm de Ag para calcopiritas con inclusiones minerales. La Ag es el elemento traza más abundante en las SSCu, con contenidos promedios de 7.907 ppm, 2.148 ppm y 820,37 ppm para la tetrahedrita, tennantita y enargita respectivamente. Esta zona de alteración al ser la de más baja temperatura presenta las razones más bajas Cd:Zn en calcopiritas (0,001 hasta 0,025), confirmando lo hecho por Luke et al. (2018). Las concentraciones de Ag y elementos asociados en sulfosales de Cu (SSCu) se muestran en la Figura 65. En las SSCu los pares de elementos Ag vs. Sb presentan una tendencia positiva con un coeficiente de correlación $r=0,96$, en donde el extremo enriquecido tanto en Ag como Sb corresponde a la tetrahedrita, en la zona media del gráfico se encuentra la tennantita, mientras que el extremo empobrecido del par de elementos corresponde a la enargita (Fig. 66 A). Los elementos mayores medidos en sulfuros de plata de la zona de alteración QS mediante EMPA muestran rangos desde 82,90 hasta 87,94 wt% Ag, y 4,28 hasta 16,15 wt% S. Estos sulfuros de Ag muestran concentraciones de: Cu (<3,86 wt%), As (< 2,86 wt%), Fe (<1,37 wt%), Hg (<0,23 wt%), Te (<0,20 wt%), Se (<0,07 wt%) y Pb (<0,05 wt%). El Au presenta valores con rangos que van desde 0,03 hasta 0,17 wt%, con un contenido promedio de 0,08 wt%.

La Figura 71 muestra que la zona de alteración cuarzo-sericita presenta una zonación mineral pirita>calcopirita>>enargita-tennantita-tetrahedrita, con una zonación metálica de $Cu\pm Ag\pm As\pm Sb\pm Zn\pm Bi\pm Hg\pm Pb\pm Cd$, según los resultados EMPA y LA-ICP-MS y las observaciones realizadas mediante SEM y FESEM en los sulfuros de esta zona de alteración mineral.

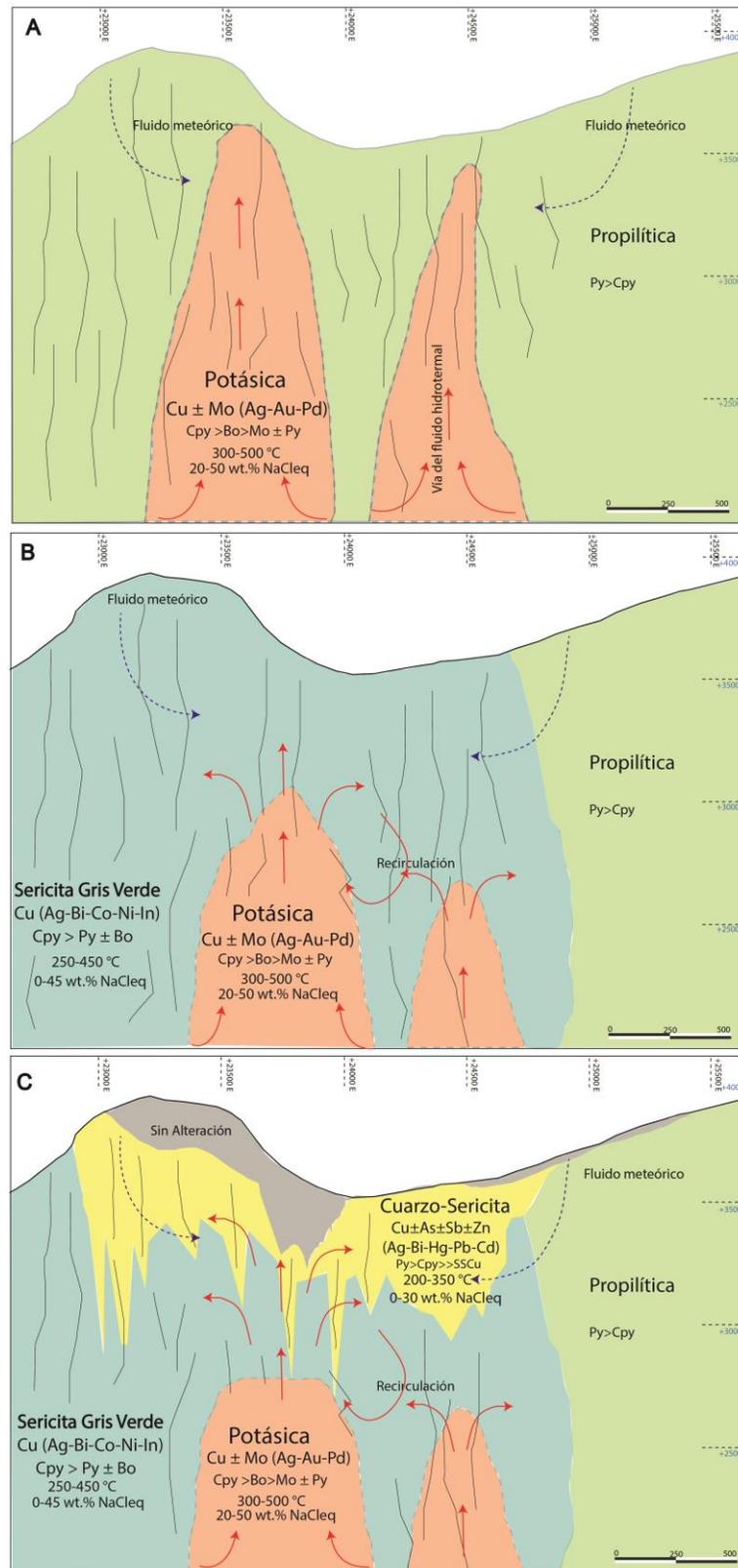


Figura 71. Modelo de alteración y mineralización de Ag en Río Blanco con patrón de zonación de metales. A) Primer evento alteración potásica con halo distal propilítico; B) Segundo evento de alteración sericita gris verde que se sobrepone a la zona potásica y propilítica; C) Evento final de alteración cuarzo-sericita sobrepuesto a la alteración sericita gris verde. Línea roja fluido magmático-hidrotermal, línea entrecortada = fluido meteórico.

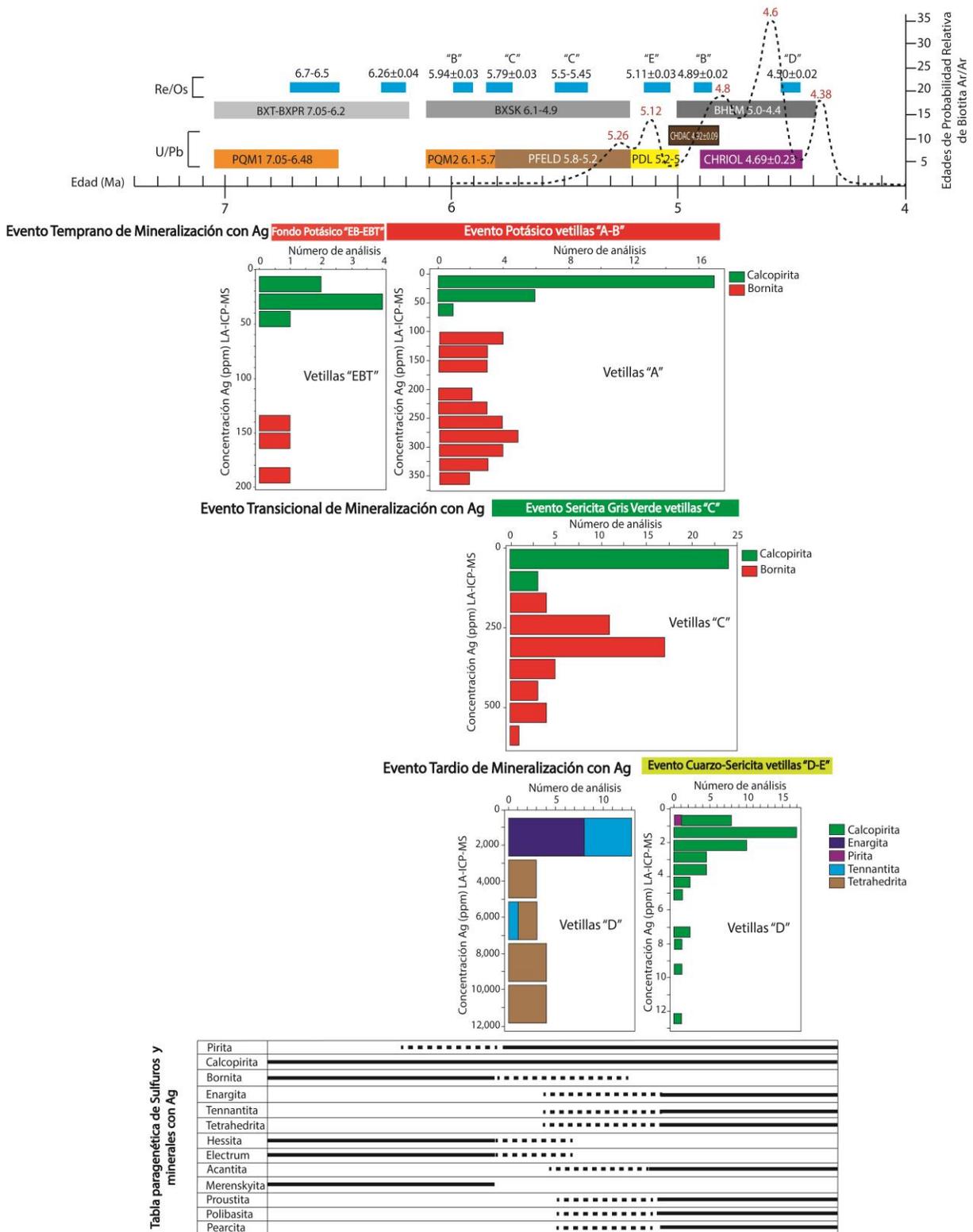


Figura 72. Modelo de tres etapas para la mineralización de Ag en el yacimiento Río Blanco. A) Modelo genético del yacimiento Río Blanco con eventos intrusivos (edades U/Pb en zircón); eventos de mineralización (Re/Os), eventos de alteración (Ar/Ar). B) Histogramas de concentraciones de Ag medidos mediante LA-ICP-MS por cada zona de alteración en sulfuros y sulfosales de cobre. C) Secuencia paragenética de sulfuros, sulfosales de cobre y minerales de plata. Modelo genético del yacimiento Río Blanco modificado de Deckart et al. (2005, 2013) y Hermosilla (2015)

CAPITULO 7. CONSIDERACIONES GENÉTICAS PARA LA MINERALIZACIÓN DE PLATA EN SISTEMAS DE TIPO PÓRFIDO

Los antecedentes presentados en esta tesis permiten concluir que mineralización de Ag en el yacimiento de pórfido Cu-Mo Río Blanco está estrechamente acoplada a los eventos de alteración y mineralización de Cu-Mo. Se pudo comprobar que la Ag ingresa al sistema desde las etapas tempranas de alteración hidrotermal y mineralización de cobre (alteración potásica, vetillas tipo “EB”-“EBT”-“A”), siendo incorporada mayoritariamente como solución sólida en calcopirita (concentración promedio 3,89 ppm Ag), bornita (concentración promedio 235,38 ppm Ag). De manera subordinada, la Ag se incorporará durante el evento potásico en forma de inclusiones minerales micro a nanométricas de hessita (Ag_2Te) y electrum (AuAg) en calcopiritas y bornitas. Durante un segundo evento (transicional) de alteración/ mineralización (alteración sericita gris verde, vetillas tipo “C”), la Ag se incorpora predominantemente en solución sólida en calcopiritas (concentración promedio 1,63 ppm), bornita (concentración promedio 415,6 ppm). Además, la Ag presenta en una mayor variedad y abundancia mineralógica, siendo representada más comúnmente por inclusiones micro a nanométricas de minerales de Ag en calcopiritas \pm bornita tales como hessita (Ag_2Te), electrum (AuAg), acantita (Ag_2S), proustita (Ag_3AsS_3), polibasita ($\text{Ag,Cu}_6(\text{Sb,As})_2(\text{Ag}_9\text{CuS}_4)$), pearcita ($\text{Ag}_9\text{CuS}_4(\text{Ag,Cu})_6(\text{As,Sb})_2\text{S}_7$) y sulfuros de Ag-Bi-Cu-Fe [$(\text{Cu,Ag})_3\text{BiS}_3$]. El evento final de mineralización de Ag corresponde al evento tardío de mineralización de Cu-Mo, que se concentra en la parte más somera del yacimiento (alteración cuarzo-sericita, vetillas “D” y “E”). En esta evento la Ag se asocia mayoritariamente a las sulfosales de cobre [(enargita (contenido promedio 820,37 ppm Ag), tennantita (contenido promedio 2.148 ppm Ag) y tetrahedrita (contenido promedio 7.907 ppm Ag)], estando presente en solución sólida en estos minerales, además de calcopirita (contenido promedio 2,79 ppm Ag) y piritas (contenido promedio 0,29 ppm Ag), los minerales más comunes de Ag son: sulfuros de Ag (Ag_2S), sulfuros de Ag-Cu-As (proustita, polibasita, pearcita) y sulfuros de Ag-Bi-Cu-Fe (argento witchenita $(\text{Cu,Ag})_3\text{BiS}_3$).

Kusakabe et al. (1990) analizó inclusiones fluidas de lo que describió como zona de alteración potásica a propilítica, y de la zona potásica con alteración cuarzo-sericita en el sector Río Blanco, documentando además, temperaturas de homogenización entre 430° y 320°C en Río Blanco, cabe mencionar que no fueron encontradas diferencias de temperaturas para los fluidos con los diferentes ensambles de alteración hidrotermal.

Vargas et al. (1999) reporta inclusiones fluidas hipersalinas, ricas en vapor y líquido, de los sectores La Americana y Sur-Sur. Las inclusiones hipersalinas contienen de 30 a 55 wt% NaCl_{eq} y fueron atrapadas a temperaturas de 225° a 500°C. Las inclusiones fluidas ricas en líquido van desde baja salinidad hasta 30 wt% NaCl_{eq} , atrapadas a temperaturas de 150° hasta 450°C.

Basado en un estudio de inclusiones fluidas mediante LA-ICP-MS en el yacimiento tipo pórfido de Cu-Au Bajo la Alumbraera, Argentina, Ulrich et al. (2002), encontró que las inclusiones fluidas ricas en vapor tienen contenidos de Ag <70 ppm, Cu 30.000 ppm, Fe 29.000 ppm, Zn 6.500 ppm, Pb 620 ppm, Sb <2 ppm, salinidad de 9,5 NaCl_{eq} , temperatura de homogenización 395°C; mientras que las inclusiones fluidas hipersalinas tienen contenidos de Fe 130.000 ppm, Cu 5.500 ppm, Zn 9.900 ppm, Pb 2.400 ppm, As 50 ppm

y no reporta concentraciones de Ag, con salinidades de 49,90 wt% NaCl_{eq} y temperatura de homogenización de 471°C.

Frikken et al. (2005) realizó un estudio de inclusiones fluidas en las brechas del sector Sur-Sur en Río Blanco y menciona que el principal estadio de depositación de calcopirita en el cemento de sulfuro en Sur-Sur se estima que ocurrió a temperaturas de aproximadamente 450° a 300°C, basado en el rango de temperaturas de homogenización obtenidas a partir de inclusiones fluidas en el cemento de cuarzo.

Kouzmanov y Pokrovski (2012) muestran que la Ag tiene una concentración promedio de decenas de ppm en todos los 4 tipos de inclusiones fluidas (monofásicas, ricas en vapor, líquido hipersalino, acuosas de baja salinidad), sin embargo, en inclusiones de líquido hipersalino la Ag puede alcanzar una concentración de varios miles de ppm, con un máximo de hasta 3.400 ppm (Kouzmanov y Pokrovski 2012), es decir, la Ag está generalmente enriquecida en el líquido hipersalino y que la gran mayoría de las inclusiones fluidas monofásicas e hipersalinas están subsaturadas con respecto a Ag₂S, ZnS y PbS a una temperatura de 400°C y un pH<5. Zinc y Pb muestran un comportamiento similar a la Ag y podría deberse al transporte de estos metales predominantemente como complejos clorurados altamente solubles. Metales como Ag, Mo, Bi tienen coeficientes de partición (K= Concentración vapor/Concentración líquido) entre 0,1 y 1, con pocas excepciones donde se enriquecen en la fase vapor (Kouzmanov y Pokrovski 2012). Por otra parte, estudios experimentales y termodinámicos (Akinfiyev y Zotov 2001; Pokrovski et al. 2013) demuestran que la Ag forma complejos clorurados (AgCl₂⁻ y AgCl₃²⁻) en fluidos acuosos salinos en rangos de temperatura de 200-600 °C (densidades >0,3-0,4 g/cm³), y cuya solubilidad estaría controlada por reacciones sensibles a los cambios de pH, salinidad y fugacidad de azufre, como por ejemplo:



Según Kouzmanov y Pokrovski (2012) dos factores fundamentales que controlan el transporte de metales en una fase fluida son 1) la naturaleza de las especies disueltas (cloruro vs sulfuro vs. oxihidroxido) y 2) la composición química y la estabilidad de las principales fases minerales. En Río Blanco los minerales más comunes de Ag son los sulfuros de Ag.

Además, la solubilidad de la Ag se incrementa con el incremento de la temperatura, salinidad (NaCl_{eq}) y condiciones ácidas de pH (Kouzmanov y Pokrovski 2012)

El modelamiento realizado por Kouzmanov y Pokrovski (2012) muestra que el enfriamiento de un fluido magmático, acompañado por la interacción agua roca, es probablemente la mayor causa de la depositación de la mayor cantidad de metales en sistemas porfíricos, que para el caso de Río Blanco resultaría en la formación de un núcleo potásico rico en Cu ± Mo ± Ag ± Au ± Pd, donde el fluido de origen magmático hidrotermal de más alta temperatura estaría subsaturado de Ag y otros metales nobles como Au y Pd. La zona transicional (sericita gris verde) muestra contenidos de metales y metaloides ricos en Cu ± Ag ± Bi ± Co ± Ni. Según los estudios de inclusiones fluidas (Frikken et al. 2005; Davidson et al. 2005) el fluido hidrotermal en esta zona de alteración empieza a perder temperatura por interacción agua-roca, cambiando el contenido de la salinidad por mezcla de fluidos, generando un cambio en el pH, lo que ayudaría a una

disminución en la solubilidad de la Ag, generando precipitación de minerales de Ag. En este caso el fluido estaría sub-sobresaturado de Ag; la zona de alteración cuarzo-sericita (QS) muestra una zonación de metales ricos en $\text{Cu} \pm \text{Ag} \pm \text{As} \pm \text{Sb} \pm \text{Zn} \pm \text{Bi} \pm \text{Hg} \pm \text{Pb} \pm \text{Cd} \pm \text{Au}$ (Fig. 71), en esta zona de alteración hidrotermal, el fluido hidrotermal sufre pérdida de la temperatura, cambio en el pH por interacción con fluido meteórico, lo que genera pérdida de solubilidad de Ag y la posterior precipitación de Ag, lo que confirmaría que el fluido se encuentra sobresaturado de Ag la cual se aloja en su gran mayoría en las sulfosales de Cu (enargita-tennantita-tetrahedrita) y como minerales de Ag como acantita, pearcita, polibasita, proustita.

En Río Blanco se identificó que el Au se lo puede encontrar asociado a piritas con contenidos que varían entre 0,04 a 25,4 ppm, con un valor promedio de 6,8 ppm. Los mayores contenidos de Au en piritas, se los encuentra relacionado a inclusiones de minerales que contienen Au, As y Cu, según los datos LA-ICP-MS. Los resultados de los mapas LA-ICP-MS realizado en un grano de pirita (Fig. 52), demuestran que el Au se encuentra como inclusiones micro a nano métricas en bandas ricas en As. A pesar de ser considerado un mineral de ganga, una investigación más detallada de piritas en el yacimiento es necesaria para conocer el potencial de este sulfuro como huésped de metales nobles.

Otro mineral huésped de Au en el yacimiento a ser tomado en consideración es la bornita. La bornita y el Au presentan una correspondencia positiva con un coeficiente de correlación $r=0,8$ en el yacimiento Río Blanco (Fig. 36F). Mediante observaciones SEM se lograron identificar micro a nano partículas de minerales con contenidos de Au en bornitas (Figs. 43 D, E). Los mapas LA-ICP-MS demuestran que el Au se encuentra como nano inclusiones al interior de la bornita (Fig. 64 C). Las concentraciones de Au en bornitas según los resultados de los análisis LA-ICP-MS varían desde 0,01 hasta 0,09 ppm, con un valor promedio de 0,05 ppm.

Simon et al. (2000) realizó estudios experimentales para determinar la distribución de Au en el sistema Cu-Fe-S a temperaturas entre 400° a 700°C, mostrando que para todas las temperaturas la bornita contiene un orden de magnitud más Au que la calcopirita. Además menciona que la bornita puede contener cerca de 1 por ciento de Au a temperaturas de 700°C o más y sugiere que la bornita podría ser el huésped dominante de Au a altas temperaturas en depósitos tipo pórfido de Cu-Au. La cantidad de Au en la bornita es además fuertemente dependiente de la composición de la bornita, siendo más alto en bornitas con composiciones estequiométricas (Cu_5FeS_4), y disminuye hacia composiciones ricas o pobres en Cu.

El Au fue identificado en otros depósitos tipo pórfido de cobre en solución sólida en sulfuros de Cu-Fe y como pequeños granos de Au nativo, usualmente a lo largo de los bordes de grano de la bornita (Kesler et al. 2002). Estudios mediante SIMS de minerales de mena de depósitos tipo pórfido de Cu mostraron que la bornita contiene cerca de 1 ppm de Au, mientras que la calcopirita contiene cerca de un orden de magnitud menos (Kesler et al. 2002). Valores altos de Cu y Au generalmente coinciden en la parte central de los depósitos tipo pórfido. En depósitos como Grasberg, Bingham, Granisle, Panguna y Santo Tomas, el contenido de Au está asociado a la alteración potásica temprana, principalmente como inclusiones de Au nativo de tamaños 5-100 μm o como sobre crecimiento de electrum (Rubin y Kyle 1997). Crespo et al. (2018) observó en Río Blanco

algo similar a los observado por Kesler et al. (2002), inclusiones micro a nanométricas de minerales de Au, las cuales ocurren a lo largo de los bordes de grano en bornita (Fig. 43).

Otros metales nobles de interés (a parte del Au) corresponden a los denominados elementos del grupo del platino (PGE del inglés *platinum group elements*).

Crespo et al. (2018) realizó una inspección detallada de las inclusiones minerales en calcopiritas y bornitas de la zona de alteración potásica, demostrando la presencia de micro a nano inclusiones de minerales del grupo del platino (PGM del inglés *platinum group minerals*), teluros de paladio (PdTe_2 , merenskyita) (Fig. 42). Las inclusiones de PGM ocurren usualmente a lo largo de los bordes de grano de calcopirita y bornitas y sus morfologías varían de subhedral a tabular, con tamaños que van desde ~400 nm hasta ~4 μm . En la mayoría de los granos se detectaron Pd y Te, junto con Cu, Fe y S de la matriz del sulfuro hospedante (Figs. 42 A, B y D). Los análisis FESEM-EDS de los granos que contienen Pd-Te son consistentes con el mineral merenskyita, $(\text{Pd,Pt})(\text{Te,Bi})_2$. Los PGM fueron encontrados en las vetillas tempranas tipo “EBT” caracterizadas por cuarzo \pm feldespato K \pm calcopirita + bornita \pm anhidrita con halos de biotita secundaria, y en las vetillas tipo “A” con cuarzo \pm feldespato K \pm calcopirita, las cuales son vetillas características de la zona de alteración potásica penetrativa. Mediante análisis cuantitativo a un grano de merenskyita (Fig. 42 C), se pudo cuantificar las concentraciones de los elementos mayores y menores de este mineral: ~23,7 wt% Pd y 65,3 wt% Te, 1,3 wt% Pt, 0,4 wt% Bi, 0,1 wt% Au, y 0,1 wt% Os (Apéndice 5) (Crespo et al. 2018).

La ocurrencia mineralógica de minerales que contienen Pd (merenskyita) en Río Blanco indica que el Pd fue probablemente introducido durante la etapa de alteración potásica temprana, a partir de un fluido hidrotermal de alta temperatura. Xiong et al. (2000) concluyó que en los estadios tempranas de formación de pórfidos Cu-Mo, los fluidos son completamente capaces de transportar al menos 10 ppb de Pd. Experimentos recientes de Sullivan et al. (2018), mostró que la solubilidad de Pd se incrementa con la fugacidad de oxígeno ($f\text{O}_2$), lo que indica que el Pd se disuelve en la mezcla del fundido silicato con el buffer níquel + níquel oxígeno (NNO) entre 0 y +1. Aunque la adición de Cl tiene un efecto insignificante en la solubilidad de Pd, los estudios experimentales han demostrado que PdCl_4^- predomina entre 25 y 300 °C. Este complejo es la principal especie en las concentraciones de Cl⁻ observadas en la mayoría de los fluidos hidrotermales (Gammons 1995; 1996) . Dado que los ligantes de cloruro se invocan generalmente para el transporte de Cu y Au en el entorno de pórfido (Sillitoe 2010; Kouzmanov y Pokrovski 2012), la cercana asociación de sulfuros de cobre e inclusiones de metales nobles (Au-Pd-Ag) en Río Blanco podría ser explicado, en parte por un mecanismo similar de transporte y depositación de sus minerales huésped. Un mecanismo alternativo de enriquecimiento de PGE podría envolver fases Pd-Bi-Te, que pueden permanecer fundidos por encima de los 489 °C (McFall et al. 2017). Los autores mencionados proveen evidencia de altas concentraciones de Pd, Bi en inclusiones salinas del pórfido de cobre Skouries en Grecia, lo que sugiere que los fundidos Bi-Te podrían actuar como colectores de PGE en fluidos hidrotermales de alta temperatura.

Contenidos anómalos de PGE fueron previamente reportados en sulfuros de Cu-Fe y concentrados de flotación de varios depósitos tipo pórfido Cu-Au (Tarkian y Stribny 1999), donde altos contenidos de Pd (130-1900 ppb) están asociados con altos

contenidos de Au (1-28 ppm). Adicionalmente, Pašava et al. (2010) mostró en el pórfido Cu-Au-Mo Kalmarky en Uzbekistán concentraciones promedio de 55 ppb Pd, 5,5 ppb Pt, y 4,1 ppm de Au para mineralización diseminada y stockwork de alta ley Cu-Au-Mo. Economou-Eliopoulos et al. (2000), reportó contenidos de Pd relativamente altos en el pórfido de cobre Skouries en Grecia, rangos entre 60 y 200 ppb Pd (promedio 110 ppb). Además, Economou-Eliopoulos (2005) concluyó que los pórfidos con contenidos de PGE tienen características similares, incluyendo: a) su asociación con sistemas alcalinos o calco alcalinos ricos en K; b) la ocurrencia dominante de minerales con contenidos de Pd (merenskyita) dentro de los sulfuros de cobre en asociación con telurios de Au-Ag; y c) la asociación Pd, Pt y Au con el ensamble magnetita-bornita-calcopirita, dentro de la zona de alteración potásica pervasiva en la parte central de los depósitos.

El In es un elemento importante para tomar en consideración para futuros trabajos, ya que el In es un metal que está siendo usado para aplicaciones de alta tecnología. Actualmente el In es un mineral que se obtiene como un subproducto de la refinación de la esfalerita (ZnS). El In se incorpora en la estructura de la esfalerita mediante una sustitución acoplada: $\text{Cu}^{\text{I}} + \text{In}^{\text{III}} \Leftrightarrow 2\text{Zn}^{\text{II}}$ (Nance 2013). Los yacimientos en donde se ha estudiado este elemento son los denominados Sulfuros Masivos Volcanogénicos (VMS del inglés *Volcanogenic Massive Sulfide*). En el yacimiento Río Blanco se analizaron piritas, calcopiritas, bornitas, enargitas, tennantitas y tetrahedritas mediante LA-ICP-MS (Apéndice 6-9) de las diferentes zonas de alteración hidrotermal, en donde se determinó que In es el elemento traza más común en las calcopiritas, (N=147) con concentraciones que varían desde 0,55 hasta 26,30 ppm, con un contenido promedio de 4,30 ppm In (Apéndice 7). Además, todos los análisis LA-ICP-MS en las sulfosales de cobre (enargita, tennantita y tetrahedrita) (n=26) presenta concentraciones de In que varían desde 0,56 hasta 16,3 ppm, con un valor promedio de 4,64 ppm (Apéndice 9). Los resultados LA-ICP-MS de esta tesis nos muestra que el In es un elemento que se particiona en calcopiritas y sulfosales de Cu en depósitos magmáticos hidrotermales como Río Blanco, y la calcopirita al ser el sulfuro de Cu más abundante en el yacimiento, es el principal mineral huésped de In en Río Blanco.

Otro elemento asociado a metales nobles en Río Blanco es el Bi. En sistemas naturales hidrotermales el Bi ocurre predominantemente como metal nativo, como bismutinita (Bi_2S_3) o sulfosales de Bi (Ciobanu et al. 2009). Cook et al. (2011) encontró concentraciones significativas de Bi en bornitas (cientos a miles de ppm), siendo la witichenita (Cu_3BiS_3) el mineral más común encontrado. Al igual que la Ag, el Bi imita el comportamiento del Cu y estarían presentes en solución sólida en la estructura de la bornita (Cook et al. 2011). En el trabajo de Cook et al. (2011) se identificó una tendencia marcada entre Ag y Bi en los sulfuros de Cu-Fe analizados. Trabajos experimentales Sugaki et al. (1980, 1981, 1984) muestran una sustancial incorporación de Bi en bornitas, entre 17 wt% a 420°C y 10wt% a 300°C en el sistema Cu-Fe-Bi-S a 300° y 420°C. El Bi es mucho menos soluble en fluidos típicos hidrotermales en forma de complejos de hidróxido y se requieren de altas temperaturas (>400°C) para transportar cantidades significativas de Bi en fluidos acuosos (Tooth et al. 2013)

Bismuto es un elemento calcófilo presente en la bornita como elemento menor, presentando una elevada concentración en todos los análisis LA-ICP-MS. En Río Blanco el Bi es uno de los elementos más comunes presentes en las bornitas con concentraciones que varían desde 3,4 hasta 5.940 ppm, con un valor promedio de 827,87

ppm mediante LA-ICP-MS análisis. Mediante observaciones SEM se pudo identificar que el mineral más común encontrado de Bi es la witichenita (Fig. 41 F). En esta tesis se realizó el gráfico de concentración de Ag vs. Bi (Fig. 61), en función de las zonas de alteración identificándose una correlación fuerte positiva entre Ag-Bi, además en la Figura 61 se adicionaron datos de otros yacimientos del trabajo realizado por Cook et al. (2011). La tendencia entre Ag-Bi en bornita, estaría relacionada a la temperatura de depositación de la bornita, en donde las bornitas de más alta temperatura (zona de alteración potásica) presentan razones Ag:Bi más altas, mientras que las bornitas de más baja temperatura (zona de alteración sericita gris verde) las razones Ag:Bi son más bajas.

Los datos recopilados en este trabajo comprueban que la mineralización de Ag en el yacimiento Río Blanco se halla relacionada con la presencia de elementos traza en los sulfuros de Cu-Fe y las sulfosales de cobre como son Sb, Cd, Hg, Zn, Bi, As, In y Pb, mismos que se incorporan de diferente manera en los sulfuros y sulfosales. La identificación de estas asociaciones minerales, en especial los que mayor correspondencia presenten con la Ag, como es el caso del Sb ($r=0,97$) y Cu, podrían ser tomados como elementos trazadores para reconocer zonas con mayor enriquecimiento en Ag.

La ocurrencia de minerales con contenidos de Ag, Pd, Pt, Au, In y Bi en sulfuros de cobre en Río Blanco abre nuevas vías de investigación destinadas a evaluar el contenido de metales nobles y elementos críticos en depósitos del tipo pórfido de Cu. Además, la presencia de minerales que contienen PGE en la zona de alteración potásica en el PCD de Río Blanco plantea preguntas relevantes para la comprensión de la especiación y la solubilidad de los metales nobles durante la mineralización y alteración hidrotermal. La ocurrencia de metales críticos en Río Blanco aporta con nueva información que no está disponible en yacimientos del tipo pórfido de Cu de clase mundial, y esta información tiene implicancia no solo para la geología económica, sino también para los procesos geometalúrgicos necesarios para el aprovechamiento de estos elementos críticos.

CAPITULO 8. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del presente trabajo son las siguientes:

- Los contenidos de Ag a nivel de yacimiento presentan rangos de concentraciones que varían entre 0,04 ppm hasta los 28,1 ppm, con un valor promedio de 1,78 ppm.
- En base al análisis estadístico de las muestras de los sondeos a diamantina se obtuvo correspondencias lineales positivas entre Ag con Cu, In, Se, Sb, As, Bi, Mo, Re, Zn y Pb (Tabla 2).
- En base a los diagramas de dispersión (Figs. 23 A y B), se observa una fuerte correspondencia entre Ag vs. Cu y Ag vs. In. Esta correspondencia entre Ag vs. Cu, indica que la Ag está íntimamente relacionada con sulfuros de Cu (calcopirita, bornita), así como también a las sulfosales de Cu (tennantita, tetrahedrita y enargita).
- La correspondencia que existe entre Ag vs. calcopirita (Fig. 36 B) y al hecho de que la calcopirita es el sulfuro de cobre más abundante en Río Blanco, se infiere que este sulfuro de Cu-Fe es el mineral huésped más importante de Ag en el yacimiento.
- Se determinó la existencia de un comportamiento acoplado entre Ag-Cu-In. Estos tres elementos presentan variaciones similares en profundidad a lo largo del sondeo, tanto en zonas de empobrecimiento de Ag-Cu-In, como en zonas enriquecidas de estos tres elementos (Fig. 33). En las zonas donde aumentan los contenidos de Cu, aumentan los contenidos de Ag e In, y en el caso contrario, en las zonas donde disminuyen los contenidos de Cu, disminuyen los contenidos de Ag e In.
- Para el caso del As y Sb, estos dos elementos presentan un comportamiento variable con la Ag, es decir, existe un acoplamiento de estos tres elementos en las zonas más someras del yacimiento, mientras que para las partes más profundas estos tres elementos se desacoplan (Fig. 34). El comportamiento variable entre As y Sb con la Ag, indicaría que estos tres elementos se correlacionan únicamente en los eventos de alteración hidrotermales transicionales a tardíos, relacionado con las sulfosales de Cu.
- El análisis estadístico de las muestras geometalúrgicas indica que la Ag presenta correspondencias positivas moderadas con bornita, calcopirita (Fig. 36 A y B). Además, el Au presenta una correspondencia positiva con la bornita con coeficiente de correlación $r=0,80$ (Fig. 36 F).
- Los datos QEMSCAM demuestran que el sulfuro más abundante en Río Blanco es la pirita, con un valor promedio de 52% (promedio modal), mientras que el sulfuro de cobre más importante es la calcopirita con un valor promedio de 44%, seguido de la bornita con un contenido promedio de 2,2 %, la enargita con un contenido promedio de 0,53%. La molibdenita presenta un contenido promedio de 0,96%. El restante 0,96% correspondería a esfalerita, galena, tennantita, covelina, calcosina, tetrahedrita y arsenopirita.
- Mediante observaciones SEM se pudo identificar que los minerales de Ag más comunes son los sulfuros de Ag (Ag_2S), los cuales están presentes como inclusiones, rellenando vetillas o fracturas entre calcopirita-pirita-magnetita (Figs. 39). Otros minerales de plata con relevancia son los telururos de Ag (hessita, Ag_2Te),

que por lo general se presentan como micro a nanopartículas < 2µm diseminadas en calcopirita y bornitas (Fig. 40).

- La inspección detallada mediante SEM y FESEM de granos de calcopirita y bornita, reveló la presencia de inclusiones de tamaño micro a nanométrico de minerales del grupo del platino (PGM), los análisis FESEM-EDS y EMPA-WDS, fueron consistentes con el mineral merenskyita (Pd,Pt)(Te,Bi)₂ (Fig. 42).
- Los análisis LA-ICP-MS en piritas muestran cantidades significantes de As (<3.360 ppm), Cu (<3.170 ppm), Co (<2.360 ppm), Ni (<717 ppm), mientras que el Au presenta contenidos que varían entre 0,04 hasta 25,4 ppm. Además las piritas presentan inclusiones minerales enriquecidas en Cu, As, Bi, Au, Ag, Zn, Pb, Hg y Te. Algunas piritas de la zona de alteración cuarzo-sericita presentan una zonación oscilatoria en el borde de grano, con bandas ricas en As-Ag-Cu (Fig. 50), estas bandas enriquecidas en As-Ag-Cu se encuentran reemplazando al Fe y S en la estructura de la pirita.
- Mapas de elementos traza mediante LA-ICP-MS de un grano de pirita (Fig. 52) mostro una zonación en el núcleo rica en Co, Ni, Pb y Bi, seguido de una banda enriquecida en As. Los análisis puntuales de Au coinciden con la banda enriquecida en As. Estas intercalaciones de zonas enriquecidas en Co-Ni-Pb-Bi con banda rica en As, demuestran que los fluidos hidrotermales responsables de la depositación de pirita evolucionaron en el tiempo y existe un particionamiento selectivo de metales en la pirita.
- Los contenidos de Ag mediante LA-ICP-MS en calcopiritas van desde 0,26 hasta 348 ppm, con un valor promedio de 16,44 ppm. Algunos granos de calcopirita presentan inclusiones ricas en Ag, Se, As, Zn, Bi, Co, Ni, Hg, Sb (Anexo J). Mediante mapas composicionales EMPA-WDS se pudo identificar que Ag tanto en calcopiritas y bornitas se encuentra distribuida uniformemente a través del grano mineral, siendo la bornita la que presenta mayores concentraciones de Ag (Fig. 59).
- Los elementos traza más importantes en bornitas determinados mediante LA-ICP-MS son: Se, As, Ni, Co, Cr, Pb. Plata y el Bi son los elementos menores que se encuentran presentes en todos los análisis en bornitas, con concentraciones promedio de 356,2 ppm Ag y 827,87 ppm Bi. La bornita es uno de los sulfuros de Cu-Fe portadores de Ag de mayor interés en el yacimiento Río Blanco. Los contenidos de Ag en bornita varían desde 106 hasta 1.380 ppm.
- Existe una tendencia en las razones Ag:Bi en las bornitas, en donde se pudo identificar que las zonas más profundas relacionadas con la zona de alteración potásica (Bt>FK; FK>Bt) tienen razones que van entre 0,3 hasta 3,08; la zona transicional SGV>Fk-Bt presenta una menor razón Ag:Bi entre 0,34 hasta 1,43, y por último la zona de alteración SGVm presenta las menores razones Ag:Bi entre 0,19 hasta 0,25 (Fig. 61). Las bornitas de más alta temperatura presentan las razones más altas de Ag:Bi, mientras que las de más baja temperatura tienen una menor razón de Ag:Bi. Las diferentes razones de incorporación Ag:Bi en la bornita se podría deber a cambios físicos-químicos al momento de la depositación de los sulfuros de cobre, que podrían estar gatillados por una disminución en la temperatura del fluido o mezcla de fluidos.
- Mapas de elementos traza mediante LA-ICP-MS de un grano de bornita (Fig. 64) muestra que la Ag presenta un enriquecimiento en el borde de grano en la zona del grano en donde existe los menores contenidos de Fe (Figs. 64 B, F), mientras

que los metales nobles como Au y Pd se encuentran como inclusiones nanométricas al interior de la bornita (Figs. 64 C y D).

- Mediante LA-ICP-MS se pudo confirmar que la Ag es el elemento menor más abundante en las sulfosales de cobre, y presentan contenidos promedio: enargita 820,37 ppm Ag, tennantita 2.148 ppm, y tetrahedrita 7.907 ppm. La tetrahedrita presenta mayores concentraciones de Sb, Ag, Bi, Cd, Hg y Co, con respecto a la tennantita y enargita.
- Los mapas EMPA-WDS (Figs. 68) mostraron que la Ag se encuentra en mayor cantidad en la tetrahedrita que en la tennantita, identificando la existencia de un acoplamiento entre Ag y Sb en las sulfosales de Cu, lo cual es corroborado por los diagramas de dispersión Ag vs. Sb en sulfosales de Cu (Fig. 66 A).
- Análisis puntuales EMPA-WDS en sulfuros de Ag presentan concentraciones de que van desde 82,90 hasta 87,94 wt%Ag y 4,28 hasta 16,15 wt%S. Los sulfuros de Ag contienen un valor promedio de Au de 0,08 wt% (Apéndice 5).
- Varios granos de telurios de paladio (merenskyita) fueron encontrados en calcopiritas y bornitas de la zona de alteración potásica. Se pudo identificar mediante análisis EMPA-WDS contenidos de Pd con rangos que van desde 19,18 hasta 23,69 wt% y Te con contenidos que van desde 48,10 hasta 65,34 wt% (Apéndice 5).
- Los eventos de alteración hidrotermal y mineralización de cobre, están íntimamente relacionados con los eventos de mineralización de Ag en Río Blanco, para lo cual se plantea tres eventos de mineralización de Ag.
- El primer evento relacionado con la zona de alteración potásica de fondo de la roca de caja, donde predominan las vetillas tipo “EB”-“EBT” en la cual, la Ag se incorporaría en solución sólida en las calcopiritas y bornitas, así como también como micro a nano inclusiones de telurios de Ag y electrum. Adicional la intrusión de los diferentes pórfidos generan halo de alteración potásico desarrollándose las vetillas tipo “A” y “B”, y los sulfuros predominantes son calcopiritas, bornitas y en menor cantidad piritas, al igual que el fondo potásico de la roca de caja, la Ag se incorpora en solución sólida en estos sulfuros y como inclusiones de hessita y electrum. En el núcleo potásico se observa una zonación de metales $Cu \pm Mo \pm Ag \pm Au \pm Pd$, en base a los resultados EMPA y LA-ICP-MS y a lo observado con SEM y FESEM en los sulfuros y sulfosales de cobre.
- Un segundo evento de mineralización de Ag, relacionado al evento transicional de depositación de Cu, mismo que se relaciona con la zona de alteración sericita gris verde y son características las vetillas del tipo “C”. La Ag se deposita como solución sólida en los sulfuros de Cu-Fe, además como inclusiones minerales de hessita, electrum, sulfuros de Ag, sulfuros de AgCuAs, sulfuros de AgBiCuFe. La zonación metálica en esta zona de alteración corresponde a $Cu \pm Ag \pm Bi \pm Co \pm Ni$, según los análisis EMPA y LA-ICP-MS y a lo observado mediante SEM.
- El evento final de mineralización de Ag corresponde al evento tardío, relacionado al evento de alteración cuarzo-sericita, donde aparecen las vetillas tipo “D” y “E” con una zonación mineral piritas>calcopirita>>enargita-tennantita-tetrahedrita. La plata se concentra en mayor cantidad en la estructura de las tetrahedrita, tennantita y enargitas, además, se observaron minerales como sulfuros de Ag, sulfuros de AgCuAs y sulfuros de AgBiCuFe. Una zonación metálica de $Cu \pm Ag \pm As \pm Sb \pm Zn \pm Bi \pm Hg \pm Pb \pm Cd$, según los resultados EMPA y LA-ICP-MS y las observaciones realizadas mediante SEM y FESEM.

- Apoyado en los trabajos de inclusiones fluidas de varios autores (Kusakabe et al. 1990; Vargas et al. 1999; Frikken et al. 2005; Kouzmanov y Pokrovski 2012), se puede mencionar que la Ag en el yacimiento Río Blanco puede ser transportada en altas cantidades por un fluido hipersalino como complejos clorurados altamente solubles a temperaturas sobre los 400°C, donde la solubilidad de la Ag se incrementa con el incremento de la temperatura, salinidad y condiciones ácidas de pH. La precipitación de minerales de Ag podría deberse a una pérdida de temperatura por interacción fluido-roca, mezcla de fluidos, cambio en el pH del fluido, lo que disminuye la solubilidad de metales y posterior precipitación de Ag.
- La ocurrencia de minerales con contenidos de Ag, Pd, Pt, Au, In y Bi en sulfuros de cobre en Río Blanco abre nuevas vías de investigación destinadas a evaluar el contenido de metales nobles y elementos críticos en depósitos del tipo pórfido de Cu. Además, la presencia de minerales que contienen PGE en la zona de alteración potásica en el PCD de Río Blanco plantea preguntas relevantes para la comprensión de la especiación y la solubilidad de los metales nobles durante la mineralización y alteración hidrotermal.
- La ocurrencia de metales críticos en Río Blanco aporta con nueva información que no está disponible en yacimientos del tipo pórfido de Cu de clase mundial, y esta información tiene implicancia no solo para la geología económica, sino también para los procesos geometalúrgicos necesarios para el aprovechamiento de estos elementos críticos.

BIBLIOGRAFIA

- Aguirre, L. 1960. "Geología de Los Andes de Chile central: Provincia de Aconcagua." *Instituto Investigaciones Geológicas* 9: 1-70.
- Akinfiyev, N. N., y Zotov, A. V. 2001. "Thermodynamic description of chloride, hydrosulfide, and hydroxo complexes of Ag(I), Cu(I), and Au(I) at temperatures of 25–500 ° C and pressures of 1–2000 Bar." *Geochemistry International* 39: 1083–1099.
- Armijo, R., Rauld R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., y Kausel, E. 2010. "The west Andean thrust, the San Ramón fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile." *Tectonics* 29 (4): 1–34.
- Barra, F., Deditius, A., Reich, M., Kilburn, M. R., Guagliardo, P., y Roberts, M. P. 2017. "Dissecting the Re-Os molybdenite geochronometer." *Scientific Reports* 7: 16054.
- Beccar, I., Vergara, M., y Munizaga, F. 1986. "Edades K-Ar de la Formación Farellones, en el cordón del cerro La Parva, Cordillera de Los Andes de Santiago, Chile." *Revista Geológica de Chile* 28: 109-113.
- Butler, I. B., y Nesbitt, R. W. 1999. "Trace element distributions in the chalcopyrite wall of a black smoker chimney: insights from laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS)." *Earth and Planetary Science Letters* 167 (3–4): 335–345.
- Cabri, L. J., Newville, M., Gordon, R. A., Crozier, E. D., Sutton, S. R., McMahon, G., y Jiang D. T. 2000. "Chemical speciation of gold in arsenopyrite." *The Canadian Mineralogist* 38 (5): 1265–1281.
- Cembrano, J., Lavenue, A., Yañez, G., Riquelme, R., García, M., Gonzáles, G., y Hérail, G. 2007. "Neotectonics." *Geological Society London Special Publications*.
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J., Gans, P., Kay, M., y Muñoz, N. 2002. "Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°- 36° S L)." *Journal of South America Earth Sciences* 15: 117–139.
- Chouinard, A., Paquette, J., y Williams-Jones, A. E. 2005. "Crystallographic controls on trace-element incorporation in auriferous pyrite from the Pascua epithermal high-sulfidation deposit, Chile-Argentina." *The Canadian Mineralogist* 43 (3): 951–963.
- Cioacă, M. E., Munteanu, M., Qi, L., y Costin, G. 2014. "Trace element concentrations in porphyry copper deposits from Metaliferi Mountains, Romania: A reconnaissance Study." *Ore Geology Reviews* 63: 22–39.
- Ciobanu, C. L., Cook, N. J., Pring, A., Brugger, J., Danyushevsky, L. V, y Shimizu, M. 2009. "‘Invisible Gold’ in Bismuth Chalcogenides." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73 (7): 1970–99. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.01.006>.

- CODELCO. 2018. "División Andina - CODELCO - Corporación Nacional Del Cobre." 2018. <https://www.codelco.com/andina>.
- Cook, N., y Chryssoulis, S. 1990. "Concentrations of 'Invisible Gold'; in the common sulfides." *The Canadian Mineralogist* 28: 1–16.
- Cook, N. J., Ciobanu, C. L., Danyushevsky, L. V., y Gilbert, S. 2011. "Minor and trace elements in bornite and associated Cu-(Fe)-sulfides: A LA-ICP-MS study." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75 (21): 6473–96.
- Cook, N. J., Ciobanu, C. L., Pring, A., Skinner, W., Shimizu, M., Danyushevsky, L. V., Saini-Eidukat, B., y Melcher, F. 2009. "Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73: 4761–4791.
- Costagliola, P., Di Benedetto, F., Benvenuti, M., Bernardini, G. P., Curzio, C., Lattanzi, P. F., y Romanelli M. 2003. "Chemical speciation of Ag in galena by EPR spectroscopy." *American Mineralogist* 88: 1345–1350.
- Crespo, J., Reich, M., Barra, F., Verdugo, J., y Martínez, C. 2018. "Critical Metal Particles in Copper Sulfides from the Supergiant Río Blanco Porphyry Cu–Mo Deposit, Chile." *Minerals* 8 (11): 519.
- Davidson, P., Kamenetsky, V., Cooke, D. R., Frikken, P., Hollings, P., Ryan, C., Achterbergh, E. V., et al. 2005. "Magmatic precursors of hydrothermal fluids at the Río Blanco Cu-Mo deposit, Chile: Links to silicate magmas and metal transport." *Economic Geology* 100 (5): 963–978.
- Deckart, K., Clark, A. H., Aguilar, C. A., Vargas R. R., Bertens, A. N., Mortensen, J. K., y Fanning, M. 2005. "Magmatic and hydrothermal chronology of the giant Río Blanco porphyry copper deposit, central Chile: Implications of an integrated U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Database." *Economic Geology* 100 (5): 905–934.
- Deckart, K., Clark, A. H., Cuadra, P., y Fanning, M. 2013. "Refinement of the time-space evolution of the giant Mio-Pliocene Río Blanco-Los Bronces porphyry Cu-Mo cluster, Central Chile: New U-Pb (SHRIMP II) and Re-Os geochronology and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology data." *Mineralium Deposita* 48: 57–79.
- Deckart, K., Silva, W., Spröhnle, C., y Vela, I. 2014. "Timing and duration of hydrothermal activity at the Los Bronces porphyry cluster: An update." *Mineralium Deposita* 49 (5): 535–546.
- Deditius, A. P., Reich, M., Kesler, S. E., Utsunomiya, S., Chryssoulis, S. L., Walshe, J., y Ewing, R. C. 2014. "The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 140: 644–670.
- Díaz, C., y Solé, M.. 2014. "Asociaciones de Alteración." Los Andes: Reporte Interno CODELCO-Andina.
- Drake, R. E., Charrier, R., Thiele, R., Munizaga, F., Padilla, H., y Vergara, M.. 1982. "Distribución y edades K/Ar de volcanitas post-Neocomianas en la Cordillera

Principal entre 32° y 36° LS: Implicaciones estratigráficas y tectónicas para el Mesozoico de Chile Central.” In *Congreso Geológico Chileno 3*: 42-78.

- Economou-Eliopoulos, M. 2005. “Platinum-group element potential of porphyry deposits.” *Mineralogical Association of Canada Short Course 35*: 203–245.
- Economou-Eliopoulos, M., y Eliopoulos, D. G. 2000. “Palladium, platinum and gold concentration in porphyry copper systems of Greece and their genetic significance.” *Ore Geology Reviews 16* (1–2): 59–70.
- Ferraz, G., y Cruz, J. 2011. “Inventario de Recursos Geológicos 2011. Reporte Interno CODELCO-Andina.”
- Foard, E. E., y Shawe, D. R. 1989. “The Pb-Bi-Ag-Cu-(Hg) chemistry of galena and some associated sulfosalts: A review and some new data from Colorado, California and Pennsylvania.” *The Canadian Mineralogist. 27*: 363-382.
- Foard, E. E., y Shawe, D. R. 1988. “Coexisting galena, PbS and sulfosalts: Evidence for multiple episodes of mineralization in the Round Mountain and Manhattan gold districts, Nevada.” *Canadian Mineralogist 26*: 355–76.
- Franchini, M., McFarlane, C., Maydagán, L., Reich, M., Lentz, D. R., Meinert, L., y Bouhier, V. 2015. “Trace metals in pyrite and marcasite from the Agua Rica porphyry-high sulfidation epithermal deposit, Catamarca, Argentina: Textural features and metal zoning at the porphyry to epithermal transition.” *Ore Geology Reviews 66*: 366–387.
- Frikken, P. 2004. “Breccia-hosted copper-molybdenum mineralisation at Río Blanco, Chile.” *Tesis Doctoral. University of Tasmania, 248p.*
- Frikken, P.H., Cooke, D. R., Walshe, J. L., Archibald, D., Skarmeta, J., Serrano, L., y Vargas, R. 2005. “Mineralogical and isotopic zonation in the Sur-Sur tourmaline Breccia, Río Blanco-Los Bronces Cu-Mo deposit, Chile: Implications for ore genesis.” *Economic Geology 100* (5): 935–961.
- Fuentes, F., Vergara, M., Aguirre, L., y Féraud, G. 2002. “Relaciones de contacto de unidades volcánicas terciarias de los Andes de Chile Central (33°S): una reinterpretación sobre la base de dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$.” *Revista Geológica de Chile 29* (2): 207–225.
- Gammons, C.H. 1995. “Experimental investigations of the hydrothermal geochemistry of platinum and palladium: IV. The stoichiometry of Pt(IV) and Pd(II) chloride complexes at 100 to 300°C.” *Geochimica et Cosmochimica Acta 59* (9): 1655–1667.
- Gammons, C. H. 1996. “Experimental investigations of the hydrothermal geochemistry of platinum and palladium: V. Equilibria between platinum metal, Pt(II), and Pt(IV) chloride complexes at 25 to 300°C.” *Geochimica et Cosmochimica Acta 60* (10): 1683–1694.
- Gana, P., and Wall, R. 1997. “Evidencias Geocronológicas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y K/Ar de un hiatus

- Cretácico superior-Eoceno en Chile Central (33-33°30'S)." *Andean Geology* 24 (2): 145–163.
- Gasparrini, C., y Lowell, G. R. 1985. "Silver-bearing inclusions in 'argentiferous' galena from the Silvermine District in southeastern Missouri." *The Canadian Mineralogist* 23: 99–102.
- George, L., Cook, N. J, Crowe, B., y Ciobanu, C. L. 2018. "Trace elements in hydrothermal chalcopyrite." *Mineralogical Magazine* 81: 59–88.
- Harris, D. C., y Cabri, L. J.. 1984. "Silver-bearing chalcopyrite, a principal source of silver in the Izok Lake massive-sulfide deposit: confirmation by electron and proton-microprobe analyses." *The Canadian Mineralogist* 22: 493–498.
- Hermosilla, J.. 2015. "Caracterización geológica y cronológica de los eventos de intrusión/brechización y alteración/mineralización del yacimiento Río Blanco, región Valparaíso, Chile." Universidad Católica del Norte.
- Hollings, P., y Cooke, D. 2005. "Regional geochemistry of tertiary igneous rocks in central Chile: implications for the geodynamic environment of giant porphyry copper and epithermal gold mineralization." *Economic Geology* 100: 887–904.
- Jochum, K. P., Willbold, M., Raczek, I., Stoll, B., y Herwig, K. 2005. "Chemical characterisation of the USGS reference glasses GSA-1G, GSC-1G, GSD-1G, GSE-1G, BCR-2G, BHVO-2G and BIR-1G using EPMA , ID-TIMS , ID-ICP-MS and LA-ICP-MS." *Geostandards and Geoanalytical Research* 29 (3): 285–302.
- Johnson, K. M, Hammarstrom, J. M., Zientek, M. L., y Dicken, C. L. 2014. "Global mineral resource assessment estimate of undiscovered copper resources of the world, 2013 Introduction." *U.S. Geological Survey Fact Sheet 2014-3004*, 3.
- Kay, S. M., Maksaev, V. Moscoso, R., Mpodozis, C., y Nasi, C. 1987. "Probing the evolving andean lithosphere: mid-Late Tertiary magmatism in Chile (29°-30°30'S) over the modern zone of subhorizontal subduction." *Journal of Geophysical Research* 92 (B7): 6173–6189.
- Kay, S. M., Maksaev, V., Moscoso, R., Mpodozis, C., Nasi, C., y Gordillo, C. E. 1988. "Tertiary andean magmatism in Chile and Argentina between 28°S and 33°S: Correlation of magmatic chemistry with a changing Benioff zone." *Journal of South American Earth Sciences* 1 (1): 21–38.
- Kay, S. M., Mpodozis, C., y Coira, B.. 1999. "Neogene magmatism, tectonism, and mineral deposits of the Central Andes (22 S to 33 S Latitude)." *Society of Economic Geology Special Publication* 7: 27–59.
- Kesler, S. E., Chryssoulis, S. L., and Simon, G.. 2002. "Gold in porphyry copper deposits: Its abundance and fate." *Ore Geology Reviews* 21 (1–2): 103–124.
- Klohn, G. 1960. "Geología de La Cordillera de Los Andes de Chile Central: Provincias de Santiago."

- Kouzmanov, K., y Pokrovski, G.. 2012. "Hydrothermal controls on metal distribution in porphyry Cu (-Mo-Au) systems." *Society of Economic Geologist Special Publication* 16: 573–618.
- LAMARX. 2014. "Microanálisis, Lamarx." 2014 en línea, (Consulta 05-12-2018). <<http://lamarx.famaf.unc.edu.ar/?q=microanálisis>>.
- Longerich, H. P., Jackson, S. E., y Günther, D. 1996. "Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometric transient signal data acquisition and analyte concentration calculation." *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 11 (9): 899–904.
- Maldonado, L., Hermosilla, J., Díaz, C., y Solé, M.. 2014. "Unidades Litológicas." Los Andes: Reporte Interno, CODELCO-Andina.
- Martínez, C. 2013. "Caracterización mineralógica, química y dominios minerales asociados al arsenico yacimiento Río Blanco, División Andina, Codelco-Chile." Universidad de Concepción.
- Mathur, R., Ruiz, J., y Munizaga, F.. 2001. "Insights into andean metallogenesis from the perspective of Re-Os analyses of sulfides." *South American Symposium on Isotope Geology, Pucon, Chile 4pp*.
- McFall, K. A., Naden, J., Roberts, S., Baker, T., Spratt, J., y McDonald, I.. 2018. "Platinum-group minerals in the Skouries Cu-Au (Pd, Pt, Te) porphyry deposit." *Ore Geology Reviews* 99 (August): 344–364.
- McFall, K., Roberts, S., Naden, J., Wilkinson, C., Wilkinson, J., y Boyce, A. 2017. "Hydrothermal transport of PGEs in porphyry systems – a fluid history of the Skouries Cu–Au (PGE) porphyry deposit." *Applied Earth Science* 126 (2): 79–80.
- Mpodozis, C., y Ramos, V. 1989. "The Andes of Chile and Argentina." In *Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science*, 60–90.
- Mpodozis, C., y Cornejo, P. 2012. "Cenozoic tectonics and porphyry copper systems of the Chilean Andes." *Society of Economic Geologists Special Publication*, 329-360
- Nance, John. 2013. "Thermodynamic properties of Indium in hydrothermal ore systems."
- National Research Council. 2008. *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*. <https://doi.org/10.17226/12034>.
- Palenik, C. S., Utsunomiya, S., Reich, M., Kesler, S. E., Wang, L., y Ewing, R. C. 2004. "Invisible gold revealed: direct imaging of gold nanoparticles in a Carlin-type deposit." *American Mineralogist* 89: 1359–1366.
- Pašava, J., Vymazalová, A., Košler, J., Koneev, R. I., Jukov, A. V., y Khalmatov, R. A. 2010. "Platinum-group elements in ores from the Kalmakyr porphyry Cu-Au-Mo deposit, Uzbekistan: bulk geochemical and laser ablation ICP-MS data." *Mineralium Deposita* 45 (5): 411–418.

- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J., y Hergt, J.. 2011. "Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data." *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 26 (12): 2508–2518.
- Piquer, J., Skarmeta, J., y Cooke, D. R. 2015. "Structural evolution of the Rio Blanco-Los Bronces district, Andes of Central Chile: controls on stratigraphy, magmatism, and mineralization." *Economic Geology* 110 (8): 1995–2023.
- Pokrovski, G. S., Borisova, A. Y., y Bychkov, A. Y.. 2013. "Speciation and transport of metals and metalloids in geological vapors." *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 76 (1): 165–218.
- Ramos, V. A. 1994. "Terranes of southern Gondwanaland and their control in the Andean structure (30°-33°S Latitude)." In *Tectonics of the Southern Central Andes* 249–261. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Reich, M., Kesler, S. E., Utsunomiya, S., Palenik, C. S., Chryssoulis, S. L., y Ewing, R. C. 2005. "Solubility of gold in arsenian pyrite." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69 (11): 2781–2796.
- Reich, M., Utsunomiya, S., Kesler, S. E., Wang, L., Ewing, R. C., y Becker, U. 2006. "Thermal Behavior of Metal Nanoparticles in Geologic Materials." *Geology* 34 (12): 1033–1036.
- Reich, M., Chryssoulis, S. L., Deditius, A., Palacios, C., Zúñiga, A., Weldt, M., y Alvear, M. 2010. "Invisible' silver and gold in supergene digenite (Cu_{1.8}S)." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74 (21): 6157–6173.
- Reich, M., Deditius, A., Chryssoulis, S. L., Li, J. W., Ma, C. Q., Parada, M. A., Barra, F., y Mittermayr, F. 2013. "Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 104: 42–62.
- Reich, M., Palacios, C., Barra, F., y Chryssoulis, S. L. 2013. "'Invisible' silver in chalcopyrite and bornite from the Mantos Blancos Cu Deposit, northern Chile." *European Journal of Mineralogy* 25 (3): 453–460.
- Rivano, S. 1996. "Carta geológica de Chile, Hojas Quillota y Portillo, Regiones de Valparaiso y Coquimbo, V Región." *Servicio Nacional de Geología de Chile* 73.
- Rivano, S., Godoy, E., Vergara, M., y Villaroel, R. 1990. "Redefinicion de la Formacion Farellones en la Cordillera de los Andes de Chile Central (32-34°S)." *Andean Geology* 17 (2): 205–214.
- Román, N., Reich, M., Leisen, M., Morata, D., Barra, F., y Deditius, A. 2019. "Geochemical and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 246: 60–85.
- Rubin, J. N., y Kyle, J. R. 1997. "Precious metal mineralogy in porphyry-, skarn-, and replacement-type ore deposits of the Ertzberg (Gunung Bijih) District, Irian Jaya,

- Indonesia." *Economic Geology* 92: 535–550.
- Serrano, L., Vargas, R., Stambuck, V., Aguilar, C., Galeb, M., Holmgren, C., Contreras, A., et al. 1998. "The late Miocene to early Pliocene Río Blanco-Los Bronces copper deposit, central Chilean Andes." In *Andean Copper Deposits: New Discoveries, Mineralization, Styles and Metallogeny*, 119–130.
- Shalaby, I. M., Stumpfl, E., Helmy, H. M., Mahallawi, M. E., y Kamel, O. A. 2004. "Silver and silver-bearing minerals at the Um Samiuki volcanogenic massive sulphide Deposit, Eastern Desert, Egypt." *Mineralium Deposita* 39: 608–21.
- Sharp, T. G., y Buseck, P. R. 1993. "The distribution of Ag and Sb in galena: Inclusions versus solid solution." *American Mineralogist* 78: 85–95.
- Sillitoe, Richard H. 2010. "Porphyry copper systems." *Economic Geology* 105 (1): 3–41.
- Sillitoe, Richard H. 2012. "Copper provinces". *Society of Economic Geologists*: 1-18.
- Simon, G., Kesler, S. E., Essene, E. J., y Chryssoulis, S. L. 2000. "Gold in porphyry copper deposits: Experimental determination of the distribution of gold in the Cu-Fe-S system at 400° to 700°C." *Economic Geology* 95 (2): 259–270.
- Sinclair, W. D. 2007. "Porphyry deposits." *Geological Association of Canada*, 5: 223–243.
- Sinclair, W. D., Kooiman, G. J. A., Martin, D. A., y Kjarsgaard, I. M. 2006. "Geology, geochemistry and mineralogy of Indium resources at Mount Pleasant, New Brunswick, Canada ." *Ore Geology Reviews* 28: 123–145.
- Skewes, A., y Stern, C. 1994. "Tectonic trigger for the formation of late Miocene Cu-rich breccia pipes in the Andes of Central Chile." *Geology* 22:551-554.
- Skewes, A., Holmgren, C., y Stern, C. 1997. "Isótopos de oxígeno e inclusiones fluidas en la brecha magmática hidrotermal Donoso, Los Bronces, Chile." *Congreso Geológico Chileno* 8: 1158–1161.
- Skewes, A., Holmgren, C., y Stern, C. 2003. "The Donoso copper-rich, tourmaline-bearing breccia pipe in Central Chile: petrologic, fluid inclusion and stable isotope evidence for an origin from magmatic fluids." *Mineralium Deposita* 38: 2–21.
- Geological Society of America. 2013. "Critical minerals and materials," 2013. GSA Position Statement.
- Solé, M., Días, C., Tapia, C., y Rodríguez, J. 2014. "Modelamiento geológico integrado sector comprendido entre las secciones XC-055 a XC-455 sectores Río Blanco-Don Luis, yacimiento Río Blanco." Reporte interno, CODELCO-Andina.
- Spiess, F. 2017. "Distribucion y ocurrencia de mercurio en el yacimiento de tipo pórfido cobre-molibdeo Río Blanco, Reción de Valparaíso, Chile." Universidad de Chile.
- Stambuk, V., Blondel, J., y Serrano, L.. 1982. "Geología del yacimiento Río Blanco."

Congreso Geológico Chileno, 2, E419-E442.

- Stern, C. 1989. "Pliocene to present migration of the volcanic front, Andean Southern Volcanic Zone." *Andean Geology* 16 (2): 145–162.
- Stern, C., y Skewes, A. 1995. "Miocene to present magmatic evolution at the northern end of the Andean Southern Volcanic Zone, Central Chile." *Andean Geology* 22 (2): 261–272.
- Suazo, H. 2014. "Ocurrencia y asociación mineralógica de la plata presente en los concentrados finales de cobre de División Andina, yacimiento Río Blanco, CODELCO Chile." Universidad de Concepción.
- Sullivan, N. A., Zajacz, Z., y Brenan, J. M. 2018. "The solubility of Pd and Au in hydrous intermediate silicate melts: the effect of oxygen fugacity and the addition of Cl and S." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 231: 15–29.
- Tarkian, M., y Stribny, B.. 1999. "Platinum-group elements in porphyry copper deposits: A reconnaissance study." *Mineralogy and Petrology* 65 (3–4): 161–183.
- Tarkian, M., Hunken, U., Tokmakchieva, M., y Bogdanov, K.. 2003. "Precious-metal distribution and fluid-inclusion petrography of the Elatsite porphyry copper deposit, Bulgaria." *Mineralium Deposita* 38: 261–281.
- Thiele, R. 1980. "Hoja Geológica de Santiago, Región Metropolitana, Chile." *Servicio Nacional de Minería*. 29:21.
- Tooth, B., Etschmann, B., Pokrovski, G. S., Testemale, D., Hazemann, J. L., Grundler, P. V., y Brugger, J. I. 2013. "Bismuth speciation in hydrothermal fluids: An X-ray absorption spectroscopy and solubility study." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 101: 156–172.
- Toro, J., Ortuzar, J., Zamorano, J., Cuadra, P., Hermosilla J., y Spröhnle, C. 2012. "Protracted magmatic-hydrothermal history of the Río Blanco-Los Bronces district, Central Chile: development of world's greatest known concentration of Copper." *Society of Economic Geologist Special Publication* 16: 105–126.
- Ulrich, T., Gunther, D., y Heinrich, C. A. 2002. "The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina." *Economic Geology* 96: 1889–1920.
- Vargas, R., Gustafson, L., Vukasovic, M., Tidy, E., y Skewes, A. 1999. "Ore breccias in the Río Blanco-Los Bronces porphyry copper deposit, Chile." *Society of Economic Geologist Special Publication* 7: 281–298.
- Warnaars, F., Holmgren, C., y Barassi, S. 1985. "Porphyry copper and tourmaline breccias at Los Bronces-Río Blanco, Chile." *Economic Geology* 80 (6): 1544–1565.
- Wilson, S. A., Ridley, W. I., y Koenig A. E. 2002. "Development of sulfide calibration standards for the laser ablation inductively-coupled plasma mass spectrometry

technique.” *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 17 (4): 406–409.

Xiong, Y., y Wood S. A. 2000. “Experimental quantification of hydrothermal solubility of platinum-group elements with special reference to porphyry copper environments.” *Mineralogy and Petrology* 68 (1–3): 1–28.

Yáñez, G., Cembrano, J., Pardo, M., Ranero, C., y Selles, D. 2002. “The Challenger-Juan Fernández-Maipo major tectonic transition of the Nazca-Andean subduction system at 33-34S: geodynamic evidence and implications.” *Journal of South American Earth Sciences* 15: 23–38.

Yano, R. I. 2012. “Trace element distribution in chalcopyrite-bearing porphyry and skarn deposits.” University of Nevada. (Doctoral dissertation).

ANEXOS Y APENDICES

Apéndice 1: Análisis representativos de pirita mediante EMPA.

Muestra	S	Fe	Co	Ni	Cu	Au	Ag	Zn	As	Sb	Se	Te	Hg	Pb	Bi	Total
Sondaje 4320																
224.2	53.09	47.82	0.08	bdl	0.02	bdl	0.06	bdl	bdl	101.08						
224.2	53.25	47.66	0.10	bdl	0.03	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	0.02	0.03	bdl	bdl	bdl	101.13
224.2	53.41	47.76	0.13	0.04	bdl	0.04	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	101.46
224.2	53.26	47.70	0.07	bdl	0.03	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.10	bdl	bdl	101.18
224.2	53.51	47.94	0.15	0.02	bdl	0.07	bdl	bdl	101.70							
224.2	52.36	47.71	0.03	bdl	0.01	0.04	bdl	bdl	bdl	100.16						
224.2	53.17	47.48	0.05	0.02	bdl	bdl	bdl	0.03	0.07	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	100.87
224.2	52.99	47.50	0.05	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	0.01	0.16	bdl	bdl	100.82
224.2	53.09	47.72	0.05	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	100.92						
224.2	52.75	47.87	0.08	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	100.76							
531.5	51.25	47.27	0.96	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	99.56
531.5	50.61	46.83	1.11	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	98.70
531.5	51.01	47.38	0.79	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.12	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.32
531.5	52.57	47.71	0.54	bdl	0.11	bdl	bdl	100.92								
531.5	52.71	47.57	0.55	bdl	0.05	bdl	0.14	bdl	bdl	101.02						
531.5	52.57	47.70	0.48	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.79
531.5	53.04	47.97	0.59	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	0.10	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	101.75
531.5	52.47	47.98	0.20	0.03	0.02	bdl	0.01	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	0.12	bdl	bdl	100.87
531.5	52.47	48.29	0.24	0.03	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.01	0.02	bdl	0.04	bdl	bdl	101.15
Sondaje 4687																
M-3538	53.14	48.11	0.07	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	0.14	bdl	0.02	bdl	0.04	bdl	bdl	101.58
M-3538	53.16	48.14	0.09	0.05	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	101.49						
M-3538	53.05	47.99	0.06	0.01	0.05	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	101.18
M-3538	53.13	48.15	0.05	0.03	0.07	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	101.52
M-3538	53.62	47.97	0.08	0.10	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	0.06	bdl	bdl	101.86
M-3538	53.33	47.91	0.03	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	0.04	bdl	bdl	bdl	101.39
M-3538	53.39	47.81	0.22	bdl	0.07	0.09	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	101.64

M-3538	53.32	47.71	0.08	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	101.19
M-3538	53.46	47.70	0.07	0.01	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	101.30
M-3544	53.47	47.69	0.17	0.02	0.02	0.06	0.01	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	101.52
M-3544	53.10	47.69	0.14	0.01	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	101.03
M-3544	53.16	47.52	0.12	0.06	0.03	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.96
M-3544	53.55	47.41	0.15	0.02	0.01	0.08	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	101.33
M-3544	53.22	47.82	0.09	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	101.19
M-3544	53.13	47.50	0.16	0.04	0.01	bdl	0.02	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	0.09	bdl	bdl	100.99
M-3544	53.23	47.45	0.10	bdl	bdl	0.02	0.03	bdl	0.02	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl	0.03	100.95
M-3544	52.73	46.41	0.08	0.01	0.12	0.03	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	99.46
M-3544	52.20	46.86	0.07	bdl	0.04	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	99.24
M-3544	52.37	47.07	0.11	0.04	0.02	bdl	bdl	bdl	0.08	bdl	0.05	bdl	0.10	bdl	bdl	99.84
M-3544	51.16	46.89	0.12	0.06	bdl	bdl	0.01	0.01	0.09	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	98.38
M-3544	51.48	46.65	0.07	0.03	0.03	0.04	bdl	bdl	0.04	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	98.41

Sondaje TSS-62

32.4	53.01	46.84	0.05	0.09	0.02	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.05
32.4	53.09	46.34	0.07	0.70	0.02	0.08	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.03	bdl	bdl	bdl	100.36
32.4	53.26	46.36	0.15	0.04	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	99.89
32.4	53.24	46.47	0.45	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	100.25
32.4	52.91	46.73	0.08	0.02	0.03	0.07	bdl	bdl	0.11	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.95
32.4	52.69	46.51	0.06	0.08	0.05	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.01	0.02	bdl	bdl	bdl	99.45
286.5	52.50	47.13	0.08	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.81
286.5	51.65	47.43	0.04	bdl	bdl	0.10	bdl	bdl	0.09	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	99.34
286.5	51.47	46.52	0.05	0.01	0.07	0.03	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	98.30
286.5	51.25	46.69	0.08	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	98.10
286.5	51.35	46.91	0.06	bdl	0.17	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	98.57
286.5	50.84	46.70	0.05	bdl	0.06	0.05	bdl	bdl	bdl	0.01	0.04	bdl	0.05	bdl	bdl	97.82
286.5	51.43	47.69	0.06	0.01	0.03	bdl	bdl	bdl	0.20	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.42
286.5	51.98	47.80	0.08	bdl	0.05	0.04	bdl	0.02	0.04	bdl	0.02	0.01	bdl	bdl	bdl	100.04
286.5	52.05	47.57	0.04	0.02	0.24	bdl	bdl	bdl	0.14	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	100.08
286.5	43.13	39.44	0.02	bdl	2.72	bdl	0.62	bdl	11.15	0.35	0.04	bdl	0.05	0.72	bdl	98.22
286.5	42.88	39.53	0.05	bdl	2.81	bdl	0.57	bdl	11.47	0.23	0.01	bdl	0.09	0.95	bdl	98.60
286.5	52.36	47.03	0.08	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.09	bdl	bdl	99.65
286.5	52.41	46.99	0.04	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	0.13	0.03	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	99.74

286.5	52.13	46.94	0.05	bdl	0.22	bdl	bdl	bdl	0.17	0.01	bdl	bdl	0.07	bdl	bdl	99.59
286.5	52.46	46.46	0.07	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	0.02	bdl	0.08	bdl	bdl	99.14
286.5	52.05	46.78	0.03	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	0.09	bdl	bdl	99.07
693	53.19	46.50	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl	0.01	0.03	0.03	bdl	bdl	99.91
693	53.01	45.99	0.07	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	99.17
693	53.11	46.56	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	0.03	bdl	bdl	99.77
693	52.97	46.21	0.06	0.02	0.02	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.37
788.5	53.08	46.78	0.17	0.02	0.02	bdl	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.15
788.5	52.83	46.58	0.09	0.04	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	99.61
788.5	53.21	46.50	0.09	0.04	0.13	bdl	0.02	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.07
788.5	53.20	46.89	0.14	0.03	0.09	0.04	bdl	bdl	0.02	0.01	bdl	bdl	0.14	bdl	bdl	100.56
Sondaje DDH-386																
459	53.07	46.78	0.05	bdl	0.01	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	0.12	bdl	bdl	100.11
459	53.30	46.40	0.09	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	0.11	bdl	0.02	bdl	0.06	bdl	bdl	99.99
459	53.40	46.55	0.07	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.06	100.19
459	53.03	46.48	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.06	bdl	bdl	99.68
459	53.21	46.72	0.09	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	0.02	0.01	0.03	bdl	bdl	100.17
459	53.17	46.63	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.09	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	100.02
Mínimo	42.88	39.44	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.72	0.03	97.82
Máximo	53.62	48.29	1.11	0.70	2.81	0.10	0.62	0.04	11.47	0.35	0.05	0.04	0.16	0.95	0.06	101.86
Mediana	53.02	47.20	0.08	0.03	0.03	0.04	0.02	0.02	0.07	0.01	0.02	0.03	0.06	0.83	0.04	100.13
Promedio	52.45	47.01	0.15	0.05	0.15	0.05	0.12	0.02	0.57	0.08	0.02	0.02	0.07	0.83	0.05	100.19
Cuenta	76.00	76.00	76.00	34.00	52.00	23.00	11.00	6.00	45.00	8.00	26.00	19.00	32.00	2.00	3.00	76.00

Nota: bdl = bajo el límite de detección. Los límites de detección (wt%) se muestran bajo cada elemento

Apéndice 2: Análisis representativos de calcopiritas mediante EMPA

Muestra	Cu	S	Fe	Zn	Pb	As	Sb	Se	Te	Au	Ag	Hg	Bi	Co	Ni	Total
Sondaje 4320																
224.2	34.47	34.50	30.34	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	0.02	bdl	0.02	0.08	bdl	bdl	bdl	99.48
224.2	34.33	34.29	30.44	bdl	bdl	0.07	0.03	bdl	bdl	bdl	0.03	0.12	bdl	bdl	bdl	99.31
224.2	34.40	34.50	30.31	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.24
224.2	34.75	34.55	30.37	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	0.12	bdl	bdl	bdl	99.83
224.2	34.49	34.51	30.54	0.01	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	99.70
224.2	34.02	34.76	30.52	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	0.02	bdl	0.11	bdl	bdl	99.45
224.2	34.04	34.07	30.41	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	0.12	bdl	bdl	bdl	98.65
224.2	34.40	33.97	30.71	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	0.03	0.03	bdl	bdl	bdl	99.20
224.2	34.15	34.33	30.49	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	99.02
224.2	34.18	34.15	30.18	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl	98.58						
373.1	34.94	35.01	30.49	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	100.50
373.1	34.94	35.01	30.55	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	100.60
373.1	34.87	34.75	30.46	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.02	0.02	0.03	bdl	bdl	bdl	100.19
373.1	34.96	34.91	30.29	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	0.07	0.06	bdl	bdl	100.32
373.1	34.82	35.11	30.60	0.02	bdl	0.05	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.62
373.1	34.83	35.21	30.34	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	0.03	0.03	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	100.58
373.1	34.75	34.87	30.35	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.08
373.1	35.43	34.11	29.81	0.02	bdl	0.04	0.01	bdl	bdl	0.02	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	99.46
373.1	35.67	34.94	28.57	0.46	bdl	1.20	0.08	0.03	0.04	bdl	0.05	bdl	0.09	bdl	bdl	101.14
531.5	33.88	34.53	30.35	bdl	bdl	0.02	bdl	0.04	0.03	0.03	0.23	bdl	bdl	bdl	bdl	99.11
531.5	34.35	34.01	30.77	0.06	bdl	0.06	0.02	bdl	bdl	0.05	0.14	bdl	bdl	bdl	bdl	99.45
531.5	34.82	34.92	30.83	0.02	bdl	0.05	0.02	0.02	bdl	0.02	bdl	0.07	0.08	bdl	bdl	100.86
531.5	34.70	34.94	30.38	0.35	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.41
531.5	35.13	34.95	30.68	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	0.14	bdl	bdl	bdl	100.92
531.5	34.74	34.58	30.57	0.01	bdl	0.12	0.01	bdl	bdl	0.05	0.02	bdl	0.03	bdl	bdl	100.13
531.5	34.77	34.89	30.62	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	100.44
531.5	34.87	34.99	31.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	100.90
531.5	34.74	34.93	30.98	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	0.03	0.06	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	100.80
531.5	35.04	35.07	30.94	bdl	bdl	0.02	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	101.18

Sondaje DDH-386

133.9	34.55	34.50	30.19	bdl	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	0.06	bdl	bdl	99.41
133.9	34.65	34.76	30.29	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	99.78
133.9	34.65	35.15	30.16	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	100.05
133.9	34.50	35.23	30.05	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	99.88
133.9	34.62	34.63	30.33	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	0.04	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.72
133.9	34.69	34.12	29.87	bdl	0.03	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	98.80
133.9	34.77	34.57	30.08	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	0.03	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	99.59
133.9	35.10	35.23	30.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	100.42
459	34.85	34.03	30.50	bdl	0.06	0.09	bdl	0.04	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	0.07	bdl	99.67
459	34.65	34.18	30.50	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.10	0.06	0.03	bdl	99.57
459	34.51	34.77	30.04	bdl	0.08	0.10	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	0.05	bdl	0.04	bdl	99.63
459	34.80	34.83	29.60	bdl	0.04	0.08	bdl	0.01	0.03	0.03	0.02	bdl	bdl	0.03	bdl	99.49
459	34.76	34.35	30.35	0.03	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl	0.10	bdl	0.05	bdl	99.76
477.9	34.35	34.66	30.87	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	0.02	0.01	0.05	bdl	0.06	bdl	100.07
477.9	34.36	34.44	30.73	bdl	bdl	0.12	bdl	0.02	0.01	bdl	bdl	bdl	0.03	0.05	bdl	99.82
477.9	34.14	34.10	30.85	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	99.21
477.9	34.43	34.30	30.72	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.04	0.01	bdl	0.03	bdl	bdl	99.57
477.9	34.21	34.80	30.71	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	99.86
477.9	34.21	34.83	30.79	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.06	bdl	99.96
477.9	34.33	34.78	30.66	bdl	0.07	0.06	bdl	0.02	0.03	bdl	bdl	0.07	bdl	0.04	bdl	100.09
477.9	34.17	34.94	30.52	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	0.06	bdl	0.03	bdl	99.78
564	35.26	34.50	29.99	bdl	0.06	0.02	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	0.11	bdl	0.01	bdl	100.00
564	35.11	34.48	30.32	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	100.01
564	35.24	34.79	30.46	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	100.56
564	35.30	34.71	30.35	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	100.52
564	35.38	34.92	30.45	bdl	0.07	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	0.12	bdl	0.01	bdl	100.98
564	35.55	34.26	29.88	bdl	0.03	0.03	bdl	0.03	0.02	bdl	0.04	0.03	0.07	0.06	bdl	100.00
564	35.69	34.38	29.84	bdl	0.04	0.06	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	0.09	0.05	0.02	bdl	100.19
564	35.04	34.40	29.70	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	0.02	bdl	0.02	0.03	bdl	0.03	bdl	99.28
564	35.06	34.22	29.48	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	0.01	bdl	bdl	0.05	bdl	98.87
598	33.92	34.41	30.70	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	0.09	bdl	bdl	0.04	bdl	99.21
598	33.93	34.44	30.45	bdl	bdl	0.07	bdl	0.03	bdl	0.04	0.07	bdl	0.06	0.07	bdl	99.19
598	34.20	34.33	30.71	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	0.09	0.03	0.09	0.04	bdl	99.52

598	34.16	34.40	30.88	bdl	0.04	0.06	bdl	bdl	bdl	0.02	0.08	bdl	bdl	0.02	bdl	99.66
598	34.30	34.47	31.02	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	0.03	bdl	99.98
618	34.42	34.72	30.84	bdl	bdl	0.15	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	100.23
618	34.46	34.75	30.83	bdl	0.02	0.04	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	100.19
618	34.32	34.48	30.68	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	0.07	bdl	99.63
618	34.22	34.74	30.81	bdl	0.05	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	0.06	0.05	bdl	100.03
618	34.89	34.08	29.65	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	0.06	0.03	bdl	98.79
618	35.00	34.24	29.76	bdl	0.12	0.05	0.04	bdl	99.24							
700.1	34.82	34.13	30.02	0.01	bdl	0.04	0.01	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	99.05
700.1	34.84	34.00	30.05	bdl	bdl	0.12	0.02	0.03	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.10
700.1	35.00	33.65	29.99	0.01	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	98.85
700.1	33.68	33.67	30.08	0.08	bdl	bdl	0.02	0.03	bdl	bdl	0.02	0.08	bdl	bdl	bdl	97.67
700.1	34.70	33.35	30.09	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.08	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	98.25
700.1	33.65	33.10	29.87	0.14	bdl	0.07	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	0.28	bdl	bdl	97.15
700.1	35.48	33.47	30.14	bdl	0.07	0.12	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.30
700.1	34.75	34.56	30.57	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.08	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	100.00
700.1	34.54	34.69	30.43	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.08	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	99.76
700.1	34.78	34.73	30.30	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.04	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	99.99
700.1	34.94	34.92	29.96	bdl	bdl	0.10	bdl	bdl	99.93							
700.1	34.91	34.16	30.32	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	0.03	bdl	0.01	0.04	bdl	bdl	bdl	99.55
700.1	34.66	34.93	30.31	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	99.95						
700.1	34.52	34.84	30.37	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	99.81
700.1	34.28	34.85	30.60	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	0.05	0.06	bdl	99.93
700.1	34.38	34.86	30.44	bdl	0.03	bdl	bdl	0.03	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	99.82
700.1	34.22	34.39	30.39	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	99.07
700.1	34.48	34.22	30.51	bdl	0.05	bdl	bdl	0.05	bdl	99.31						
700.1	34.53	34.74	30.50	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	0.05	bdl	99.92
700.1	34.38	34.57	30.29	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.06	bdl	0.08	0.03	bdl	99.44
700.1	34.29	34.64	30.42	bdl	bdl	0.05	bdl	0.04	bdl	0.04	0.03	bdl	bdl	0.04	bdl	99.56
700.1	34.58	34.08	30.33	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	0.06	bdl	bdl	0.03	0.02	bdl	99.13
700.1	33.96	34.45	30.15	bdl	0.10	bdl	bdl	0.07	bdl	98.75						
700.1	33.93	34.70	30.32	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	0.05	bdl	bdl	0.04	bdl	99.15
700.1	34.21	34.81	30.40	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	0.07	0.03	bdl	0.03	bdl	99.60
700.1	34.20	34.53	30.41	bdl	0.08	0.05	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl	bdl	0.07	0.06	bdl	99.47

Sondaje DDH-812

221.7	34.70	34.97	30.49	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	0.03	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	100.25
221.7	34.78	35.04	30.45	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.33
221.7	34.81	34.98	30.69	bdl	0.05	bdl	bdl	100.54								
221.7	34.52	34.69	30.34	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.60
221.7	34.78	34.41	30.41	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	99.64							
221.7	34.93	34.61	30.30	0.01	bdl	0.12	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	0.09	0.06	bdl	bdl	100.13
221.7	34.59	34.95	30.40	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	0.02	bdl	0.01	0.06	bdl	bdl	bdl	100.09
221.7	34.88	34.93	30.69	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.59
221.7	34.87	34.67	30.32	bdl	bdl	0.03	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.92
221.7	34.89	34.40	30.32	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.66
221.7	35.22	34.83	30.36	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.46
221.7	34.90	34.65	30.24	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	99.83							
221.7	34.79	34.74	30.26	bdl	bdl	0.16	0.02	0.02	0.01	0.13	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	100.16
377.5	34.29	34.58	30.81	0.04	bdl	0.03	0.02	bdl	0.01	bdl	bdl	0.03	0.04	bdl	bdl	99.85
377.5	34.45	34.59	30.79	bdl	0.04	0.05	bdl	bdl	99.93							
377.5	34.36	34.82	30.82	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.05
377.5	34.28	34.80	30.61	bdl	bdl	99.71										
377.5	34.54	34.66	30.83	0.02	bdl	0.06	bdl	bdl	100.11							
377.5	34.23	34.82	30.70	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	0.02	0.07	bdl	bdl	bdl	99.88
377.5	34.41	34.60	30.76	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	0.03	0.02	0.03	0.11	bdl	bdl	100.01
377.5	34.51	34.35	30.87	bdl	bdl	0.12	bdl	0.05	bdl	bdl	0.02	0.08	bdl	bdl	bdl	100.00
377.5	34.42	34.59	30.60	bdl	0.07	0.08	bdl	bdl	99.78							
377.5	34.53	34.58	30.65	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.82
563.4	34.93	34.46	30.42	bdl	0.06	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	99.91
563.4	35.24	34.75	30.44	bdl	0.06	0.05	bdl	0.02	bdl	100.57						
563.4	34.88	34.63	30.28	bdl	bdl	0.02	bdl	0.02	bdl	bdl	0.05	0.10	bdl	0.07	bdl	100.07
563.4	34.85	34.44	29.84	bdl	0.07	0.02	bdl	bdl	0.02	0.14	0.04	bdl	bdl	0.06	bdl	99.49
563.4	34.83	34.52	29.77	bdl	0.03	0.09	bdl	bdl	0.03	0.07	0.01	0.15	bdl	0.06	bdl	99.57
871	34.73	34.69	30.34	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	99.79
871	34.80	34.92	30.66	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.42
871	34.73	34.93	30.40	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	0.02	0.08	bdl	bdl	bdl	100.19
871	34.74	35.08	30.61	0.02	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	100.48
871	34.84	34.97	30.57	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.40

871	34.16	34.74	29.48	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	0.01	0.07	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	98.55
871	35.12	34.90	30.41	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.03	0.03	0.09	bdl	bdl	bdl	100.62
871	34.71	34.84	30.49	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	0.09	0.07	bdl	bdl	100.24
871	34.85	35.15	30.37	bdl	bdl	0.06	bdl	0.02	0.03	bdl	0.02	0.06	bdl	bdl	bdl	100.57
871	34.76	34.49	30.19	bdl	bdl	0.02	bdl	0.02	0.01	0.04	0.02	0.13	bdl	bdl	bdl	99.69

Sondaje 4687

M-3538	35.44	35.13	30.35	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	100.96							
M-3538	35.20	34.70	30.47	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	0.02	bdl	bdl	0.10	bdl	bdl	bdl	100.53
M-3538	35.28	34.85	30.33	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	0.01	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	100.54
M-3538	34.69	34.88	30.91	bdl	0.09	bdl	bdl	bdl	100.58							
M-3538	35.00	34.84	30.71	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.57
M-3538	34.95	34.88	30.77	0.02	bdl	0.07	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	100.75
M-3538	35.37	35.35	30.55	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.09	0.01	0.03	bdl	bdl	bdl	101.43
M-3544	34.40	34.09	30.61	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.17
M-3544	34.28	34.06	30.28	bdl	bdl	0.12	bdl	bdl	0.03	0.10	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	98.88
M-3544	34.42	34.42	30.42	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	0.02	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	99.42
M-3544	34.28	34.12	30.72	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	99.23
M-3544	34.40	34.32	30.55	bdl	0.03	0.03	bdl	bdl	bdl	0.03	0.02	0.07	bdl	bdl	bdl	99.47
M-3544	34.36	34.29	30.00	bdl	bdl	0.04	bdl	0.02	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	98.73
M-3544	34.23	34.07	29.74	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	98.07
M-3544	33.91	34.19	29.68	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	0.03	bdl	0.01	bdl	0.04	bdl	bdl	97.90
M-3544	33.74	34.06	29.93	0.03	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	97.81						
M-3544	33.84	34.18	29.89	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	98.09
M-3544	33.96	34.56	30.21	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	98.80							
M-3544	33.84	34.68	30.22	bdl	bdl	0.19	bdl	bdl	bdl	0.11	bdl	0.09	bdl	bdl	bdl	99.13
M-3544	34.10	34.52	30.29	bdl	0.02	0.04	0.05	bdl	bdl	99.02						

Sondaje TSS-62

32.4	34.83	35.01	30.62	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.11	bdl	bdl	bdl	100.62
32.4	34.98	34.57	30.30	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	0.10	bdl	bdl	99.99
32.4	34.35	34.98	30.29	0.03	bdl	0.03	bdl	0.03	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.74
32.4	34.55	35.07	30.49	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	0.05	bdl	bdl	100.20
32.4	35.11	34.53	30.41	0.03	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	100.22
32.4	35.09	34.79	30.37	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.05	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	100.35
32.4	34.79	34.97	30.27	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.04	0.05	bdl	bdl	100.21

32.4	34.98	34.52	30.14	bdl	bdl	0.07	bdl	bdl	0.05	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.79
32.4	34.69	34.61	30.51	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	0.02	0.03	bdl	bdl	bdl	99.90
32.4	34.68	34.53	30.36	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	0.05	0.01	bdl	0.03	bdl	bdl	99.72
32.4	34.50	34.47	31.03	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.05	0.04	0.05	bdl	0.04	bdl	100.22
32.4	34.31	34.67	31.26	bdl	bdl	0.08	bdl	0.04	bdl	100.37						
32.4	34.27	34.85	30.96	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	0.04	bdl	100.20
32.4	34.12	34.64	30.82	bdl	bdl	0.04	bdl	0.01	0.01	0.05	bdl	0.13	bdl	0.08	bdl	99.90
32.4	34.08	34.52	30.73	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	bdl	0.06	0.24	bdl	bdl	0.05	bdl	99.79
32.4	33.76	34.37	30.58	bdl	bdl	0.08	bdl	0.01	0.02	bdl	0.60	0.04	bdl	bdl	bdl	99.47
286.5	34.25	34.70	30.53	bdl	0.02	0.20	bdl	0.03	bdl	99.76						
286.5	35.03	34.61	28.55	0.06	0.02	1.18	0.34	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.04	0.03	bdl	99.90
286.5	35.21	34.85	28.07	0.05	bdl	1.53	0.54	0.05	bdl	bdl	0.02	bdl	0.08	0.03	bdl	100.43
286.5	35.23	34.57	28.51	0.08	0.02	1.33	0.10	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	0.02	bdl	99.92
129.8	34.75	33.65	30.52	bdl	0.04	bdl	0.02	0.04	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	99.10
129.8	34.52	33.26	30.62	bdl	bdl	0.12	bdl	bdl	bdl	0.05	0.03	0.10	bdl	0.02	bdl	98.72
129.8	34.52	34.60	30.07	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	0.02	bdl	0.04	0.08	bdl	0.04	bdl	99.39
693	34.90	34.77	30.22	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	0.01	bdl	bdl	0.03	bdl	100.02
693	35.06	34.53	30.44	bdl	0.05	0.03	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	0.05	bdl	100.23
693	34.96	34.78	30.40	bdl	0.03	0.05	bdl	bdl	bdl	0.09	0.01	bdl	0.09	0.05	bdl	100.46
788.5	34.64	34.18	29.92	bdl	bdl	0.02	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	0.04	bdl	98.91
788.5	34.53	34.17	29.83	bdl	0.10	0.07	bdl	0.04	bdl	98.75						
788.5	34.68	34.21	29.91	bdl	bdl	0.08	bdl	0.03	bdl	98.92						
Mínimo	33.65	33.10	28.07	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.01	0.00	97.15
Máximo	35.69	35.35	31.26	0.46	0.10	1.53	0.54	0.05	0.05	0.14	0.60	0.15	0.28	0.08	0.00	101.43
Mediana	34.68	34.61	30.41	0.02	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02	0.05	0.02	0.07	0.06	0.04	0.00	99.83
Promedio	34.63	34.58	30.36	0.06	0.05	0.11	0.07	0.03	0.02	0.05	0.04	0.07	0.06	0.04	0.00	99.77
Cuenta	183.00	183.00	183.00	32.00	37.00	95.00	17.00	55.00	57.00	60.00	87.00	67.00	47.00	66.00	0.00	183.00

Nota: bdl = bajo el límite de detección. Los límites de detección (wt%) se muestran bajo cada elemento

Apéndice 3: Análisis representativos de bornitas mediante EMPA

Muestra	Cu	S	Fe	Zn	Pb	As	Sb	Se	Te	Au	Ag	Hg	Bi	Co	Ni	Total
Sondaje DDH-386																
133.9	62.36	24.91	11.05	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	0.52	0.10	0.95	bdl	bdl	99.92
133.9	61.64	26.08	10.91	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	0.02	bdl	0.52	bdl	0.83	bdl	bdl	100.02
133.9	61.94	25.10	10.87	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	0.01	bdl	0.42	bdl	0.91	bdl	bdl	99.32
133.9	60.79	25.74	10.36	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	0.48	bdl	0.84	bdl	bdl	98.24
133.9	61.78	25.12	10.71	bdl	bdl	bdl	bdl	0.06	bdl	0.03	0.44	bdl	0.95	bdl	bdl	99.09
133.9	62.48	24.52	10.79	bdl	bdl	bdl	0.02	0.05	0.05	0.04	0.52	bdl	0.87	bdl	bdl	99.35
133.9	61.80	25.18	10.82	bdl	bdl	bdl	0.02	0.02	bdl	bdl	0.48	bdl	0.97	bdl	bdl	99.29
133.9	61.70	25.57	11.04	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	0.39	0.09	0.88	bdl	bdl	99.69
133.9	61.81	25.42	11.09	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	0.02	bdl	0.39	bdl	0.74	bdl	bdl	99.49
133.9	61.77	25.43	10.99	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	0.02	0.06	0.42	0.04	0.86	bdl	bdl	99.64
133.9	61.16	25.55	11.13	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	0.41	bdl	0.84	bdl	bdl	99.13
133.9	61.91	24.94	10.93	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	0.45	0.05	0.77	bdl	bdl	99.08
564	60.05	27.05	11.77	bdl	0.07	0.15	bdl	bdl	bdl	bdl	0.12	bdl	bdl	0.04	bdl	99.25
564	59.65	27.10	11.90	bdl	bdl	0.03	bdl	0.14	bdl	bdl	0.10	0.07	0.04	bdl	bdl	99.04
564	63.85	25.55	10.99	bdl	0.14	0.10	bdl	0.02	bdl	100.65						
564	63.90	25.48	11.09	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	0.03	bdl	0.13	0.05	bdl	bdl	bdl	100.74
564	62.67	25.76	11.62	bdl	0.07	0.08	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	0.06	bdl	bdl	100.30
564	62.88	25.93	11.27	bdl	bdl	0.13	bdl	0.02	bdl	bdl	0.06	0.09	bdl	0.02	0.01	100.42
564	62.47	26.02	11.28	bdl	bdl	0.12	bdl	bdl	bdl	0.05	0.06	0.10	0.07	0.02	bdl	100.22
598	62.81	25.06	10.89	0.03	bdl	bdl	bdl	0.02	0.02	bdl	0.27	bdl	bdl	0.01	bdl	99.11
598	62.83	25.22	10.66	bdl	bdl	0.11	bdl	bdl	0.03	bdl	0.26	bdl	bdl	bdl	bdl	99.11
598	63.07	24.97	10.90	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	0.22	bdl	0.09	0.01	bdl	99.33
598	63.26	25.46	10.84	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	0.23	0.07	bdl	0.03	bdl	99.94
598	63.19	25.18	10.85	bdl	0.07	0.12	bdl	0.03	bdl	0.03	0.25	bdl	0.18	0.05	bdl	99.95
598	62.77	24.78	10.45	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	0.04	0.23	0.06	bdl	bdl	bdl	98.35
598	62.67	24.77	10.65	bdl	bdl	0.03	bdl	0.02	bdl	0.07	0.24	0.15	bdl	bdl	bdl	98.61
598	62.74	24.52	10.42	0.02	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.24	bdl	bdl	bdl	bdl	97.96
618	61.44	26.47	11.66	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.07	0.11	bdl	bdl	0.01	bdl	99.76
618	60.97	25.84	11.66	bdl	0.04	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	0.13	0.04	bdl	0.01	bdl	98.76

618	61.18	26.16	11.81	bdl	0.03	0.05	bdl	0.04	0.03	bdl	0.13	bdl	bdl	0.02	0.02	99.47
618	61.55	26.31	11.68	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	0.05	0.11	bdl	0.06	bdl	bdl	99.86
618	60.20	27.44	12.07	bdl	0.02	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	0.13	bdl	bdl	bdl	bdl	99.87
618	59.45	27.19	11.79	bdl	0.04	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	0.13	bdl	bdl	bdl	bdl	98.63
618	61.26	25.98	11.46	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	0.03	0.09	bdl	bdl	0.04	bdl	98.92
700.1	61.50	24.81	11.19	bdl	bdl	0.04	bdl	0.03	0.04	0.07	0.12	0.05	0.06	bdl	bdl	97.91
700.1	62.44	24.07	11.25	bdl	0.15	bdl	0.12	bdl	bdl	98.04						
700.1	61.62	24.18	11.20	bdl	bdl	0.08	bdl	0.01	0.01	0.05	0.15	bdl	0.04	bdl	bdl	97.36
700.1	63.39	24.31	11.06	bdl	bdl	0.04	bdl	0.02	bdl	bdl	0.16	bdl	0.12	bdl	bdl	99.10
700.1	62.93	24.74	11.27	bdl	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	0.13	0.11	bdl	bdl	bdl	99.26
700.1	63.52	25.67	11.47	bdl	bdl	bdl	0.01	0.06	bdl	bdl	0.14	bdl	0.11	bdl	bdl	100.98
700.1	63.04	25.67	11.33	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.15	0.04	0.04	bdl	bdl	100.29
700.1	62.20	25.09	11.35	0.05	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	0.05	0.16	bdl	0.19	bdl	bdl	99.14
700.1	63.58	25.45	11.22	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	0.16	0.09	0.10	bdl	bdl	100.63
700.1	63.41	25.59	11.30	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	0.11	0.09	bdl	bdl	bdl	100.57
700.1	62.81	25.93	11.49	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	bdl	0.16	bdl	bdl	bdl	bdl	100.47
700.1	63.08	25.52	11.39	0.02	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	0.14	bdl	bdl	bdl	bdl	100.23
700.1	62.43	25.87	11.47	bdl	bdl	0.02	0.01	bdl	0.02	bdl	0.15	bdl	0.05	bdl	bdl	100.03
700.1	62.94	25.69	11.38	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	0.12	0.17	0.04	bdl	bdl	bdl	100.39
700.1	62.43	25.95	11.13	bdl	0.17	0.03	bdl	bdl	bdl	99.71						
700.1	62.55	25.83	11.24	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	0.15	bdl	bdl	bdl	bdl	99.83
700.1	62.65	25.69	11.41	bdl	0.04	0.03	bdl	0.03	bdl	0.04	0.21	bdl	0.09	bdl	bdl	100.19
700.1	62.46	25.65	11.28	bdl	bdl	0.04	bdl	0.01	bdl	0.06	0.20	0.07	bdl	bdl	bdl	99.78
700.1	62.68	26.03	11.45	bdl	bdl	0.14	bdl	0.01	bdl	0.06	0.19	bdl	bdl	0.01	bdl	100.58
700.1	62.61	25.80	11.37	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	0.18	bdl	0.10	0.02	bdl	100.12
700.1	62.44	25.86	11.38	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	0.03	bdl	0.16	bdl	bdl	bdl	bdl	99.94
700.1	62.06	26.01	11.30	bdl	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	0.15	0.07	0.09	0.03	bdl	99.77
700.1	61.86	25.92	11.39	bdl	bdl	0.11	bdl	bdl	bdl	bdl	0.15	0.09	0.07	0.04	bdl	99.63
700.1	62.28	25.77	11.46	bdl	0.17	0.03	bdl	0.02	bdl	99.73						
700.1	62.56	25.80	11.44	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	0.02	bdl	0.15	bdl	bdl	0.02	bdl	100.02
700.1	61.46	26.26	11.51	bdl	0.06	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	0.16	0.10	bdl	0.02	bdl	99.60
700.1	61.34	25.74	11.42	bdl	0.03	0.10	bdl	bdl	bdl	bdl	0.14	bdl	0.14	bdl	bdl	98.92
700.1	61.82	25.70	11.56	bdl	bdl	0.05	bdl	0.05	bdl	0.03	0.15	bdl	bdl	bdl	bdl	99.39
700.1	61.72	25.64	11.37	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	0.14	0.19	0.17	0.21	0.05	bdl	99.50

700.1	61.56	25.71	11.38	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.15	bdl	0.09	0.02	bdl	98.98
700.1	61.57	25.63	11.39	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	0.02	bdl	0.19	0.12	0.03	0.02	bdl	99.03
Sondaje DDH-812																
221.7	63.35	24.70	10.94	bdl	bdl	0.05	bdl	0.07	bdl	bdl	0.18	bdl	bdl	bdl	bdl	99.30
221.7	63.34	25.26	10.93	bdl	0.03	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	0.14	bdl	bdl	bdl	bdl	99.73
221.7	62.92	25.17	11.01	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	0.15	0.05	bdl	bdl	bdl	99.33
221.7	63.04	25.07	10.99	bdl	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	0.14	bdl	bdl	bdl	bdl	99.31
221.7	62.86	25.49	11.17	bdl	bdl	0.04	0.02	bdl	bdl	bdl	0.12	0.04	0.04	bdl	bdl	99.79
221.7	63.17	24.84	11.16	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	0.15	0.06	0.05	bdl	bdl	99.47
221.7	62.52	25.24	11.25	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	0.16	0.08	bdl	bdl	bdl	99.27
221.7	63.24	25.71	11.49	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	0.02	bdl	0.14	bdl	bdl	bdl	bdl	100.65
221.7	63.23	25.27	11.09	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	0.14	0.13	bdl	0.04	bdl	bdl	99.93
221.7	63.36	25.39	11.23	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	0.16	bdl	0.09	bdl	bdl	100.31
221.7	63.50	25.29	11.16	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	0.05	0.02	0.16	bdl	bdl	bdl	bdl	100.21
221.7	63.17	25.88	11.20	bdl	0.15	bdl	bdl	bdl	bdl	100.41						
221.7	63.36	24.99	11.25	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	0.16	0.05	0.06	bdl	bdl	99.89
221.7	63.02	25.46	11.37	bdl	0.18	bdl	bdl	bdl	bdl	100.03						
221.7	63.55	25.37	11.18	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	0.03	0.04	0.15	bdl	bdl	bdl	bdl	100.37
377.5	62.92	25.56	11.38	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	bdl	0.05	0.11	0.03	0.18	bdl	bdl	100.27
377.5	62.20	25.70	11.49	bdl	bdl	bdl	0.01	0.03	bdl	0.07	0.12	0.04	bdl	bdl	bdl	99.67
377.5	62.33	25.75	11.45	bdl	bdl	0.05	bdl	0.04	bdl	0.03	0.09	bdl	0.09	bdl	bdl	99.83
377.5	62.31	25.86	11.33	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	0.02	bdl	0.09	bdl	0.13	bdl	bdl	99.80
377.5	62.49	25.90	11.39	bdl	bdl	0.04	bdl	0.02	bdl	0.04	0.09	0.06	bdl	bdl	bdl	100.04
377.5	62.16	25.68	11.34	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	0.18	bdl	bdl	bdl	bdl	99.40
377.5	62.53	25.73	11.46	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	0.03	bdl	0.14	0.07	bdl	bdl	bdl	100.00
377.5	62.56	25.91	11.38	bdl	bdl	0.04	0.01	bdl	bdl	bdl	0.14	bdl	0.13	bdl	bdl	100.17
377.5	62.50	25.89	11.53	bdl	bdl	0.08	bdl	0.02	bdl	0.04	0.16	bdl	0.07	bdl	bdl	100.30
377.5	62.13	26.07	11.36	bdl	0.06	bdl	bdl	0.05	0.02	bdl	0.16	bdl	0.04	bdl	bdl	99.90
377.5	62.17	25.88	11.43	bdl	0.13	bdl	bdl	bdl	bdl	99.62						
377.5	61.87	25.86	11.44	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	0.04	0.04	0.18	bdl	bdl	bdl	bdl	99.44
377.5	62.14	26.04	11.49	bdl	bdl	0.06	bdl	0.02	bdl	bdl	0.15	bdl	0.04	bdl	bdl	99.94
377.5	62.54	25.92	11.47	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl	0.06	0.17	bdl	0.03	bdl	bdl	100.24
377.5	62.44	25.86	11.34	bdl	bdl	bdl	0.02	0.02	bdl	bdl	0.17	bdl	bdl	bdl	bdl	99.86
377.5	61.90	26.38	11.79	0.02	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	100.25

377.5	61.39	26.70	12.03	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	0.03	bdl	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	100.24
563.4	63.42	23.93	11.08	bdl	bdl	0.11	bdl	bdl	bdl	bdl	0.11	bdl	bdl	bdl	0.02	98.67
563.4	63.28	24.13	11.08	bdl	0.03	0.09	bdl	bdl	bdl	0.09	0.10	bdl	0.04	bdl	0.02	98.87
563.4	63.07	24.16	11.12	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	0.03	bdl	98.55
563.4	63.23	24.40	11.18	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	0.09	bdl	bdl	bdl	bdl	98.93
563.4	63.66	23.93	11.01	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	0.02	bdl	0.11	0.07	bdl	bdl	bdl	98.84
563.4	62.93	26.15	11.20	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	0.02	0.03	0.09	bdl	bdl	bdl	bdl	100.49
563.4	63.24	26.08	11.29	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	0.11	0.07	bdl	bdl	bdl	100.88
563.4	63.46	25.76	11.26	bdl	0.05	bdl	bdl	0.03	bdl	bdl	0.11	bdl	0.04	0.02	bdl	100.73
563.4	63.63	25.57	11.18	bdl	0.03	bdl	bdl	0.02	bdl	0.05	0.13	0.04	bdl	0.02	0.01	100.69
871	62.04	26.05	10.89	bdl	bdl	0.03	0.01	0.03	bdl	bdl	0.09	bdl	bdl	bdl	bdl	99.14
871	62.14	25.97	11.05	bdl	bdl	0.10	bdl	0.03	bdl	bdl	0.09	bdl	bdl	bdl	bdl	99.39
871	62.48	26.17	11.62	bdl	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl	bdl	0.10	0.04	bdl	bdl	bdl	100.50
871	62.89	25.70	11.51	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	0.03	0.07	0.08	bdl	0.07	bdl	bdl	100.36
871	62.71	25.52	11.06	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	bdl	0.09	bdl	0.04	bdl	bdl	99.46
871	62.45	25.07	11.30	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	0.08	0.05	0.04	bdl	bdl	99.00
871	62.04	25.64	12.00	bdl	bdl	0.04	0.03	0.04	bdl	bdl	0.10	0.05	0.05	bdl	bdl	100.00
871	63.00	25.63	11.81	bdl	bdl	0.05	bdl	0.07	0.02	bdl	0.17	bdl	bdl	bdl	bdl	100.76
871	63.14	25.64	11.59	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	0.12	bdl	bdl	bdl	bdl	100.52
871	62.34	25.38	11.63	bdl	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl	0.05	0.13	bdl	0.03	bdl	bdl	99.64
871	62.00	25.18	11.49	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	0.18	0.10	bdl	bdl	bdl	99.00
871	63.55	25.92	11.11	bdl	bdl	0.03	bdl	0.02	bdl	0.04	0.15	0.04	bdl	bdl	bdl	100.86
871	63.13	25.70	11.28	bdl	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	0.14	bdl	bdl	bdl	bdl	100.32
871	62.96	25.97	11.52	bdl	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl	0.03	0.12	0.09	bdl	bdl	bdl	100.76
Mínimo	59.45	23.93	10.36	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	97.36
Máximo	63.90	27.44	12.07	0.05	0.08	0.15	0.04	0.14	0.05	0.14	0.52	0.17	0.97	0.05	0.02	100.98
Mediana	62.53	25.67	11.30	0.02	0.04	0.05	0.01	0.03	0.02	0.05	0.15	0.07	0.09	0.02	0.02	99.78
Promedio	62.45	25.56	11.28	0.03	0.05	0.06	0.02	0.04	0.02	0.05	0.17	0.07	0.25	0.02	0.02	99.69
Cuenta	120.00	120.00	120.00	6.00	19.00	55.00	15.00	58.00	37.00	39.00	120.00	45.00	55.00	25.00	5.00	120.00

Nota: bdl = bajo el límite de detección. Los límites de detección (wt%) se muestran bajo cada elemento

Apéndice 4: Análisis representativos de sulfosales de cobre mediante EMPA

Muestra		Cu	S	Fe	As	Sb	Zn	Pb	Se	Te	Au	Ag	Hg	Bi	Co	Ni	Mn	Total	
		0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01		
Sondaje DDH-386																			
133.9	Tet	36.70	24.43	0.71	4.74	13.19	6.88	bdl	0.09	bdl	bdl	0.50	0.20	10.74	bdl	bdl	bdl	98.19	
477.9	Ten	37.82	30.94	13.56	8.60	2.85	4.61	bdl	0.08	bdl	bdl	0.02	bdl	1.42	0.05	bdl	bdl	99.95	
477.9	Ten	40.25	27.78	3.20	14.21	5.19	7.53	bdl	0.10	bdl	bdl	0.01	bdl	1.67	0.04	bdl	bdl	100.01	
564	Ten	46.12	28.15	5.94	19.23	0.11	bdl	0.16	0.04	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	99.83	
564	Ten	46.93	27.54	5.03	18.89	0.35	0.25	0.09	0.04	bdl	bdl	0.11	bdl	bdl	0.10	bdl	bdl	99.33	
564	Ten	46.90	27.30	5.05	18.03	0.81	0.18	0.84	0.20	bdl	bdl	0.26	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	99.65	
700.1	Ten	43.00	26.94	0.65	18.73	0.31	7.76	0.09	0.07	0.39	bdl	0.25	0.14	0.12	0.10	bdl	bdl	98.56	
700.1	Ten	43.01	27.54	0.69	18.83	0.08	7.76	0.03	0.13	0.08	0.02	0.14	0.15	bdl	0.09	bdl	bdl	98.54	
700.1	Ten	43.61	27.47	0.55	19.40	0.20	7.73	bdl	0.07	0.15	0.04	0.14	0.16	bdl	0.08	bdl	bdl	99.60	
Sondaje 4320																			
373.1	Ten	43.45	28.79	0.58	20.03	0.40	8.03	0.03	0.07	0.03	bdl	0.18	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	101.63	
373.1	Ten	44.03	28.53	0.57	20.10	0.15	7.87	bdl	0.09	bdl	0.04	0.09	0.03	bdl	bdl	bdl	0.02	101.53	
373.1	Ten	43.66	28.41	0.93	20.17	0.41	7.82	bdl	0.07	0.02	bdl	0.12	0.04	bdl	bdl	bdl	0.02	101.68	
373.1	Ten	39.74	30.75	11.25	10.83	1.68	4.56	0.13	0.07	bdl	0.08	0.19	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	99.29	
373.1	Ten	43.64	28.36	0.97	19.50	0.39	7.83	bdl	0.07	bdl	0.07	0.12	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	100.96	
373.1	Ten	43.93	28.14	0.84	20.10	0.44	7.75	bdl	0.04	bdl	bdl	0.13	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	101.39	
373.1	Ten	44.10	28.30	1.31	19.85	0.39	7.52	bdl	0.12	0.02	0.04	0.09	0.09	bdl	bdl	bdl	0.02	101.85	
373.1	Ten	44.44	28.42	0.69	20.02	0.09	7.49	bdl	0.11	bdl	bdl	0.13	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	101.49	
373.1	Ten	44.11	28.35	0.75	19.97	0.44	7.77	bdl	0.07	bdl	bdl	0.11	bdl	0.13	bdl	bdl	0.01	101.73	
373.1	Ten	43.46	28.40	0.63	19.68	1.33	7.84	0.09	0.05	bdl	bdl	0.14	bdl	0.04	bdl	bdl	0.02	101.68	
373.1	Ten	43.60	28.37	0.88	18.49	2.59	7.42	0.15	0.07	bdl	0.04	0.18	bdl	0.05	bdl	bdl	0.01	101.84	
373.1	Ten	43.83	28.45	0.99	19.88	0.56	7.68	bdl	0.07	0.02	bdl	0.16	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	101.67	
373.1	Ten	44.23	28.06	1.35	19.44	0.60	7.52	0.03	0.11	bdl	0.03	0.14	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	101.52	
373.1	Ten	44.09	27.68	0.50	20.10	0.10	8.01	0.29	0.02	bdl	bdl	0.15	0.04	0.07	bdl	bdl	0.02	101.08	
373.1	Ten	44.09	27.77	0.81	19.92	0.36	7.67	bdl	0.08	bdl	0.07	0.17	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	100.97	
373.1	Ten	44.10	27.88	0.93	20.12	0.04	7.37	bdl	0.07	bdl	0.12	0.15	0.05	0.10	bdl	bdl	0.02	100.97	
373.1	Ten	44.04	28.13	0.89	20.12	0.08	7.95	0.09	0.07	bdl	bdl	0.12	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	101.51	
373.1	Ten	43.77	28.16	0.74	19.90	0.31	7.55	0.08	0.08	bdl	bdl	0.21	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	100.81	
373.1	Enr	48.82	32.76	0.65	18.83	0.02	0.06	bdl	0.10	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	101.31	

373.1	Enr	49.40	32.63	0.11	19.03	bdl	0.06	bdl	0.08	0.03	0.03	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	101.42
373.1	Enr	49.37	32.34	0.13	19.05	0.03	0.10	bdl	0.15	bdl	0.06	0.06	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	101.33
373.1	Enr	48.60	32.47	0.85	18.86	0.05	0.13	0.12	0.12	bdl	bdl	0.23	bdl	0.05	bdl	bdl	0.01	101.48
373.1	Ten	43.85	28.53	1.10	20.00	0.07	7.04	0.11	0.11	bdl	0.04	0.21	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	101.09
Sondaje 4687																		
M-3544	Ten	42.29	27.70	2.82	18.57	bdl	5.15	bdl	0.06	bdl	bdl	1.24	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	97.86
M-3544	Ten	41.31	28.07	2.00	19.01	bdl	6.47	bdl	0.10	bdl	0.06	0.25	0.09	bdl	bdl	bdl	0.02	97.38
M-3544	Ten	41.51	28.13	2.78	18.33	bdl	5.15	bdl	0.07	bdl	bdl	1.90	bdl	0.05	bdl	bdl	0.02	97.95
Sondaje TSS-62																		
286.5	Ten	42.42	25.06	5.99	16.09	4.12	2.11	bdl	0.06	bdl	bdl	0.12	0.20	2.37	bdl	bdl	bdl	98.54
286.5	Tet	37.83	24.89	2.33	0.24	29.28	4.89	bdl	0.07	bdl	0.03	0.87	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.44
286.5	Tet	38.13	25.15	2.38	1.60	27.33	4.84	bdl	0.03	bdl	bdl	0.99	0.03	0.20	bdl	bdl	bdl	100.68
286.5	Tet	37.74	24.83	2.23	0.77	28.15	5.04	bdl	bdl	bdl	0.04	0.86	0.10	0.23	bdl	bdl	bdl	100.00
286.5	Tet	37.73	24.67	2.36	0.17	29.48	4.87	bdl	0.02	bdl	bdl	0.91	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.21
286.5	Tet	37.04	23.78	2.65	0.31	29.34	4.53	bdl	0.01	bdl	0.03	0.97	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	98.68
286.5	Ten	42.65	27.67	6.03	19.21	1.81	2.10	bdl	0.13	bdl	bdl	0.15	0.04	bdl	bdl	bdl	0.04	99.83
286.5	Ten	41.93	27.35	6.47	17.75	3.68	1.70	bdl	bdl	bdl	0.13	0.25	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	99.31
286.5	Ten	43.73	27.71	6.12	19.98	0.61	1.86	bdl	0.04	bdl	bdl	0.15	bdl	0.04	bdl	bdl	0.02	100.25
286.5	Ten	43.13	27.17	5.66	17.36	4.33	2.14	bdl	0.08	bdl	0.06	0.20	0.06	0.25	bdl	bdl	0.01	100.45
286.5	Tet	38.22	24.19	2.36	0.27	29.37	4.99	bdl	0.03	bdl	bdl	0.96	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	100.45
286.5	Tet	38.62	24.56	2.46	1.38	27.62	4.84	bdl	bdl	bdl	bdl	0.94	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	100.49
286.5	Tet	39.04	24.71	2.48	3.67	24.20	4.87	bdl	0.03	bdl	0.03	0.91	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	100.00
286.5	Tet	39.25	24.64	1.60	3.59	24.48	6.03	bdl	0.02	bdl	bdl	0.68	0.12	bdl	bdl	bdl	0.01	100.43
286.5	Ten	42.20	26.29	2.27	13.89	8.96	5.89	bdl	0.06	bdl	bdl	0.18	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.76
286.5	Ten	42.02	26.19	1.95	13.20	10.23	6.10	bdl	0.05	bdl	bdl	0.21	0.15	0.05	bdl	bdl	0.01	100.17
286.5	Tet	40.02	24.94	1.93	6.71	19.80	5.87	bdl	0.03	bdl	bdl	0.52	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	99.90
286.5	Tet	39.52	24.81	1.73	4.41	23.36	5.88	bdl	0.07	bdl	bdl	0.60	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	100.46
286.5	Tet	40.29	25.18	3.09	7.51	17.90	4.38	bdl	0.03	bdl	bdl	0.57	0.14	0.81	bdl	bdl	bdl	99.89
286.5	Tet	40.47	25.15	3.94	8.30	16.88	3.59	bdl	0.05	bdl	bdl	0.56	0.04	0.78	bdl	bdl	0.02	99.76
286.5	Ten	45.65	27.36	4.81	20.40	bdl	1.71	bdl	0.06	0.01	bdl	0.18	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	100.21
286.5	Ten	45.11	27.15	4.17	19.70	0.01	2.55	bdl	0.07	bdl	bdl	0.16	0.08	0.04	bdl	bdl	0.03	99.08
286.5	Ten	45.32	27.15	4.41	20.24	0.02	2.31	bdl	0.04	0.01	0.03	0.22	0.09	bdl	bdl	bdl	0.03	99.87
286.5	Ten	45.54	27.15	4.64	19.76	bdl	2.22	bdl	0.11	bdl	bdl	0.17	0.23	bdl	bdl	bdl	bdl	99.84
286.5	Ten	45.38	27.20	4.44	19.62	0.03	1.83	bdl	0.07	bdl	0.07	0.21	0.27	bdl	bdl	bdl	bdl	99.13

286.5	Ten	43.58	28.54	5.61	19.95	0.23	2.43	0.06	0.07	0.04	0.06	0.12	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	100.76
286.5	Ten	42.41	28.32	5.91	17.39	3.63	2.37	0.04	0.07	bdl	bdl	0.18	0.10	bdl	bdl	0.02	bdl	100.44
286.5	Tet	38.64	25.48	4.22	5.24	22.40	3.66	bdl	0.05	bdl	bdl	0.88	0.18	bdl	bdl	0.04	bdl	100.79
286.5	Tet	38.94	25.58	1.88	4.49	23.17	5.93	bdl	0.01	bdl	bdl	0.51	0.09	0.03	0.02	bdl	bdl	100.66
286.5	Ten	41.54	27.55	2.70	14.23	8.53	5.35	0.06	0.06	bdl	0.12	0.17	0.18	bdl	0.04	bdl	bdl	100.52
286.5	Tet	37.54	24.69	2.49	0.47	29.15	4.76	bdl	0.06	bdl	bdl	0.83	0.11	0.15	bdl	bdl	bdl	100.26
286.5	Ten	43.31	28.34	4.98	19.46	0.65	3.05	bdl	0.05	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	99.92
286.5	Tet	39.85	26.37	2.51	8.00	17.97	5.56	0.06	0.07	bdl	0.07	0.41	0.06	0.05	bdl	bdl	bdl	100.97
286.5	Tet	40.19	26.10	2.19	9.11	16.28	5.87	bdl	0.06	bdl	0.09	0.33	0.21	bdl	0.02	bdl	bdl	100.47
286.5	Ten	41.20	27.41	4.63	12.77	10.60	3.52	bdl	0.07	bdl	bdl	0.26	bdl	0.14	0.04	bdl	bdl	100.65
286.5	Tet	39.43	25.99	1.28	6.39	20.28	6.43	bdl	0.01	bdl	bdl	0.46	bdl	0.24	bdl	bdl	bdl	100.53
286.5	Tet	38.77	25.19	0.76	3.26	24.79	7.03	bdl	bdl	bdl	bdl	0.48	0.18	0.34	bdl	bdl	bdl	100.81
286.5	Tet	39.59	25.70	3.50	6.01	21.43	4.29	bdl	0.07	bdl	bdl	0.83	0.23	bdl	bdl	bdl	bdl	101.67
286.5	Tet	38.66	25.66	2.90	5.61	20.87	5.58	bdl	0.04	bdl	0.07	0.75	0.24	0.35	0.02	bdl	bdl	100.75
286.5	Ten	43.46	28.32	5.27	19.95	0.05	2.74	0.10	0.09	bdl	bdl	0.13	0.09	bdl	bdl	bdl	bdl	100.21
286.5	Tet	37.32	24.55	2.86	0.64	29.13	4.30	0.02	0.02	bdl	bdl	1.01	0.18	0.06	bdl	bdl	bdl	100.09
286.5	Ten	42.69	28.16	5.75	19.54	0.04	2.34	bdl	0.03	bdl	bdl	0.10	0.16	bdl	bdl	bdl	bdl	98.83
286.5	Tet	40.47	26.07	4.48	10.26	13.70	2.68	0.03	0.05	bdl	0.09	0.54	0.03	0.62	0.03	bdl	bdl	99.03
286.5	Tet	39.76	25.85	3.99	8.35	17.02	3.05	bdl	0.08	bdl	bdl	0.65	0.04	0.55	bdl	0.02	bdl	99.36
788.5	Ten	42.49	27.57	1.38	18.68	1.33	6.93	bdl	0.10	bdl	bdl	0.00	0.08	bdl	bdl	bdl	bdl	98.56
788.5	Ten	43.42	27.81	1.56	19.92	0.13	7.02	0.08	0.07	0.03	bdl	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	100.08
788.5	Ten	43.30	27.86	1.36	19.89	bdl	7.14	bdl	0.06	bdl	bdl	0.34	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	100.00
788.5	Ten	43.56	28.07	3.95	19.66	bdl	3.95	bdl	0.11	bdl	bdl	0.08	0.09	bdl	0.05	bdl	bdl	99.52
788.5	Ten	43.32	27.50	1.77	19.90	0.03	7.01	0.03	0.08	bdl	bdl	0.06	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	99.76

Nota: bdl = bajo el límite de detección. Los límites de detección (wt%) se muestran bajo cada elemento

Apéndice 5: Análisis representativos de sulfuros de plata y telururos de paladio mediante EMPA

Muestra	Ag	S	Cu	Fe	As	Sb	Zn	Pb	Se	Te	Hg	Bi	Au	Co	Ni	Total
Sondaje TSS-62	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	
129.8	83.81	13.83	1.31	0.75	0.08	bdl	bdl	bdl	bdl	0.16	bdl	bdl	0.08	bdl	bdl	100.02
129.8	84.67	14.02	1.10	0.68	0.03	bdl	bdl	bdl	0.05	0.12	0.17	0.04	bdl	bdl	bdl	100.89

129.8	83.58	14.47	1.02	0.78	0.11	bdl	0.01	bdl	bdl	0.18	0.15	bdl	0.17	0.05	bdl	100.52
32.4	83.50	13.01	1.37	0.57	0.02	bdl	0.01	0.05	0.05	0.16	0.09	bdl	0.08	bdl	bdl	98.91
32.4	84.82	13.92	1.06	0.72	0.07	bdl	bdl	0.05	0.02	0.17	0.21	bdl	0.03	bdl	bdl	101.05
32.4	84.79	13.44	1.13	0.79	0.07	bdl	bdl	bdl	0.05	0.18	0.23	bdl	0.10	bdl	bdl	100.81
32.4	82.90	16.15	1.40	1.37	0.10	bdl	0.02	0.03	0.07	0.15	0.14	0.03	0.06	0.03	bdl	102.46
32.4	87.94	4.28	3.86	1.10	2.86	bdl	bdl	0.03	bdl	0.20	bdl	bdl	bdl	bdl	0.04	100.32
Mínimo	82.90	4.28	1.02	0.57	0.02		0.01	0.03	0.02	0.12	0.09	0.03	0.03	0.03	0.04	98.91
Máximo	87.94	16.15	3.86	1.37	2.86		0.02	0.05	0.07	0.20	0.23	0.04	0.17	0.05	0.04	102.46
Mediana	84.24	13.88	1.22	0.77	0.08		0.01	0.04	0.05	0.16	0.16	0.04	0.08	0.04	0.04	100.66
Promedio	84.50	12.89	1.53	0.85	0.42		0.01	0.04	0.05	0.16	0.16	0.04	0.08	0.04	0.04	100.62
Cuenta	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00		3.00	4.00	5.00	8.00	6.00	2.00	6.00	2.00	1.00	8.00

Muestra	Te	Pd	Cu	S	Fe	Pt	As	Re	Rh	Ru	Ir	Os	Au	Ag	Bi	Total
	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.06	
<u>DDH386-564</u>																
564-C1-PdTe1	48.10	19.18	12.58	8.79	6.41	0.18	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl	95.35
<u>DDH386-564</u>																
C4-PdTe8	65.34	23.69	2.75	1.56	1.83	1.32	n.d	n.d	b.d	n.d	b.d	0.12	0.13	b.d	0.35	97.11

Nota: bdl = bajo el límite de detección. Los límites de detección (wt%) se muestran bajo cada elemento

Apéndice 6: Análisis de elementos traza en pirita mediante LA-ICP-MS

Muestra	Ag	Au	Bi	Hg	Pb	Zn	Se	Te	As	Sb	Ge	In	Sn	Co	Ni	Mn	Cr	Ga	Mo	Cu
	0.19	0.02	0.03	0.35	0.10	1.10	5.00	0.60	1.50	0.60	1.00	0.02		0.50	1.00	1.50	0.70		1.00	3.00
<u>Sondaje TSS-62</u>																				
286.5	2.63	bdl	3.53	7.30	15.80	19.00	bdl	bdl	2.40	bdl	11.10	0.04	bdl	26.90	19.20	8.20	bdl	bdl	bdl	140.00
286.5	bdl	bdl	0.11	bdl	0.56	bdl	9.30	bdl	bdl	bdl	11.10	bdl	bdl	324.00	15.10	1.47	bdl	bdl	bdl	13.40
286.5	bdl	bdl	3.48	bdl	1.32	bdl	18.60	4.90	bdl	bdl	11.60	0.04	bdl	110.00	23.90	bdl	bdl	bdl	bdl	77.00
286.5	0.29	bdl	1.77	bdl	0.24	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	9.80	bdl	bdl	180.00	32.00	bdl	bdl	bdl	bdl	186.00
286.5	bdl	bdl	0.51	bdl	bdl	bdl	9.70	bdl	2.70	bdl	11.60	bdl	bdl	190.00	42.60	bdl	1.40	bdl	bdl	bdl
286.5	bdl	bdl	0.68	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	3.30	bdl	11.30	bdl	bdl	277.00	90.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
286.5	bdl	2.68	0.74	bdl	0.13	bdl	13.40	6.80	1840.00	bdl	9.70	bdl	bdl	6.40	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	48.80

286.5	2.70	0.24	9.80	bdl	13.30	bdl	5.40	1.61	78.00	bdl	11.40	bdl	bdl	19.80	4.40	bdl	bdl	bdl	bdl	396.00
286.5	52.00	25.40	92.00	bdl	139.00	14.20	bdl	9.50	3360.00	bdl	9.80	4.60	bdl	107.00	111.00	bdl	bdl	0.48	0.46	153.00
286.5	0.46	0.63	7.60	bdl	1.07	bdl	bdl	5.50	542.00	0.68	10.70	1.63	bdl	14.20	1.52	bdl	bdl	0.39	bdl	580.00
286.5	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	11.90	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	3170.00
286.5	bdl	bdl	0.10	bdl	0.11	bdl	bdl	bdl	10.70	bdl	10.20	bdl	bdl	1.79	2.31	bdl	bdl	bdl	bdl	349.00
286.5	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	5.40	bdl	bdl	bdl	11.50	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	580.00
286.5	bdl	0.04	bdl	bdl	bdl	1.66	bdl	3.41	94.00	bdl	11.90	bdl	bdl	17.20	3.90	bdl	1.42	bdl	bdl	225.00
286.5	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	1.87	bdl	1.65	37.50	bdl	12.30	bdl	bdl	15.90	1.88	bdl	bdl	bdl	bdl	162.00
286.5	0.95	bdl	0.85	bdl	0.92	1.62	bdl	bdl	810.00	28.70	14.00	bdl	0.41	bdl	bdl	bdl	1.77	bdl	bdl	2540.00
286.5	bdl	1.31	2.40	bdl	0.30	bdl	bdl	2.16	510.00	bdl	11.40	0.10	bdl	20.80	2.07	bdl	0.79	bdl	bdl	181.00
286.5	26.60	17.70	158.00	0.36	46.30	84.00	bdl	10.20	2330.00	5.90	13.10	13.90	0.52	10.50	43.00	8.20	0.67	1.67	bdl	680.00
286.5	3.90	bdl	2.40	bdl	3.60	bdl	6.80	bdl	7.30	bdl	7.60	0.19	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	880.00
286.5	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	6.70	bdl	bdl	bdl	8.30	bdl	bdl	bdl	0.11	bdl	bdl	bdl	bdl	272.00
286.5	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	9.30	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	139.00

Sondaje 4687

M-3544	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	17.70	2.05	bdl	bdl	9.70	bdl	bdl	61.90	315.00	bdl	bdl	bdl	bdl	16.20
M-3544	bdl	bdl	0.14	bdl	bdl	bdl	11.80	bdl	bdl	bdl	10.00	bdl	bdl	191.00	100.00	bdl	bdl	bdl	bdl	4.60
M-3544	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	35.80	bdl	bdl	bdl	9.60	bdl	bdl	55.90	227.00	bdl	0.97	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	17.50	bdl	1.70	bdl	9.80	bdl	bdl	237.00	224.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	0.42	bdl	0.86	bdl	bdl	2.06	14.50	bdl	bdl	bdl	8.70	bdl	bdl	416.00	142.00	bdl	bdl	bdl	bdl	810.00
M-3544	0.64	bdl	0.95	bdl	bdl	bdl	27.00	0.34	bdl	bdl	8.80	bdl	bdl	38.60	95.00	bdl	bdl	bdl	bdl	835.00
M-3544	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	130.00	bdl	bdl	bdl	9.25	bdl	bdl	425.00	113.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	62.00	bdl	2.30	bdl	9.10	bdl	bdl	532.00	513.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	74.00	bdl	2.80	bdl	8.20	bdl	bdl	292.00	281.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	31.00	bdl	bdl	bdl	8.30	bdl	bdl	399.00	72.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	45.50	bdl	1.90	bdl	9.00	bdl	bdl	614.00	342.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	0.27	bdl	0.15	bdl	61.00	1.92	3.60	bdl	9.55	bdl	bdl	349.00	374.00	bdl	0.76	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	28.00	bdl	1.90	bdl	7.65	bdl	bdl	496.00	442.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	bdl	0.22	bdl	bdl	32.10	bdl	bdl	bdl	8.10	bdl	bdl	619.00	165.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	13.20	bdl	bdl	bdl	10.30	bdl	bdl	2360.00	155.00	bdl	0.64	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	20.00	bdl	4.80	bdl	9.60	bdl	bdl	94.00	635.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	37.00	bdl	3.30	bdl	9.30	bdl	bdl	213.00	717.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	137.00	bdl	6.80	bdl	11.50	bdl	bdl	142.00	479.00	bdl	1.99	bdl	bdl	bdl
M-3544	0.52	bdl	0.48	bdl	0.52	bdl	13.00	bdl	bdl	bdl	10.10	bdl	bdl	748.00	246.00	bdl	0.82	bdl	bdl	98.00

M-3544	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	170.00	bdl	bdl	bdl	9.80	bdl	bdl	281.00	155.00	bdl	bdl	bdl	bdl	4.90
M-3544	bdl	bdl	3.30	bdl	0.46	bdl	1320.00	1.40	3.20	bdl	9.20	bdl	0.27	585.00	438.00	bdl	bdl	bdl	bdl	170.00
Mínimo	0.29	0.04	0.10	0.22	0.11	1.62	5.40	0.34	1.70	0.68	7.60	0.04	0.27	1.79	0.11	1.47	0.64	0.39	0.46	4.60
Máximo	52.00	25.40	158.00	7.30	139.00	84.00	1320.00	10.20	3360.00	28.70	14.00	13.90	0.52	2360.00	717.00	8.20	1.99	1.67	0.46	3170.00
Mediana	0.95	1.31	0.95	0.36	0.74	2.06	20.00	2.16	5.80	5.90	9.80	0.19	0.41	190.50	112.00	8.20	0.90	0.48	0.46	183.50
Promedio	8.28	6.86	13.81	2.63	13.99	17.77	81.84	3.96	402.51	11.76	10.12	2.93	0.40	290.86	183.97	5.96	1.12	0.85	0.46	488.88
Cuenta	11	7	21	3	16	7	29	13	24	3	42	7	3	36	36	3	10	3	1	26

Nota: bdl = bajo el límite de detección. Los límites de detección (wt%) se muestran bajo cada elemento

Apéndice 7: Análisis de elementos traza en calcopirita mediante LA-ICP-MS

Muestra	Ag	Au	Bi	Hg	Pb	Zn	Se	Te	As	Sb	Ge	In	Sn	Co	Ni	Mn	Cr	Cd	Tl	Ga	Mo
	0.50	0.0 1	0.10	0.50	0.50	6.60	22.00	0.70	7.00	1.50	3.90	0.08	0.80	1.70	1.30	5.60	1.50	0.30	0.05	1.05	1.5 0
Sondaje 4320																					
373.1	3.60	bdl	2.55	bdl	bdl	24.20	bdl	bdl	bdl	bdl	7.40	6.04	3.68	15.00	bdl	31.00	bdl	bdl	bdl	6.90	bdl
373.1	bdl	bdl	0.62	bdl	bdl	236.00	bdl	bdl	bdl	bdl	5.70	6.17	7.60	16.00	bdl	16.00	2.00	bdl	bdl	6.80	0.4 3
373.1	1.86	bdl	bdl	bdl	bdl	88.00	20.00	bdl	bdl	bdl	6.60	5.83	10.40	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	3.90	bdl
373.1	4.33	bdl	1.45	bdl	1.39	152.00	bdl	bdl	bdl	bdl	10.50	5.96	11.80	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	4.20	bdl
373.1	3.52	bdl	0.64	bdl	bdl	105.00	bdl	bdl	bdl	bdl	5.20	6.23	15.60	bdl	bdl	bdl	6.00	bdl	bdl	bdl	bdl
373.1	239.0 0	bdl	25.20	bdl	990.0 0	13000.0 0	5.60	bdl	5530.00	184.0 0	bdl	10.1 0	bdl	bdl	bdl	22.00	bdl	8.30	10.6 0	bdl	bdl
373.1	12.80	bdl	3.39	bdl	8.80	bdl	7.10	bdl	bdl	bdl	10.10	6.25	3.10	bdl	bdl	bdl	5.00	bdl	bdl	bdl	bdl
373.1	7.50	bdl	4.83	bdl	10.60	bdl	27.00	bdl	bdl	bdl	21.10	5.62	2.64	15.00	52.00	bdl	18.00	bdl	bdl	bdl	bdl
373.1	3.10	bdl	2.22	bdl	5.60	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	9.00	6.41	4.48	bdl	bdl	17.00	3.50	bdl	bdl	bdl	bdl
373.1	bdl	bdl	1.72	bdl	4.10	19.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	5.52	4.46	bdl	bdl	12.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
373.1	bdl	bdl	4.08	bdl	11.70	76.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	5.76	4.27	12.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	5.40	bdl
373.1	bdl	bdl	0.64	7.40	bdl	69.00	7.40	bdl	bdl	bdl	bdl	5.51	4.90	9.70	bdl	14.00	6.30	bdl	bdl	5.90	bdl
Sondaje TSS-62																					
286.5	2.49	bdl	1.18	bdl	2.07	bdl	31.00	bdl	bdl	bdl	9.40	2.85	4.07	bdl	bdl	bdl	bdl	0.87	bdl	bdl	bdl
286.5	1.92	bdl	0.45	bdl	3.59	bdl	38.00	bdl	12.80	bdl	6.90	3.85	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
286.5	10.50	bdl	1.44	bdl	68.00	25.00	bdl	bdl	186.00	bdl	8.80	2.70	bdl	bdl	bdl	23.60	6.80	bdl	bdl	bdl	bdl
286.5	3.00	bdl	2.28	bdl	4.36	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	8.90	2.58	1.79	bdl	bdl	bdl	5.50	bdl	bdl	bdl	bdl
286.5	3.58	bdl	0.60	bdl	3.90	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	4.59	2.60	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl

286.5	3.95	bdl	0.77	4.62	9.00	bdl	43.00	2.60	bdl	bdl	6.50	3.35	2.28	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	
286.5	1.57	bdl	1.04	bdl	1.57	25.40	38.00	bdl	bdl	bdl	6.60	4.97	2.30	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	
286.5	2.58	bdl	0.91	0.92	5.90	bdl	56.00	bdl	bdl	bdl	7.00	5.04	1.99	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	
286.5	1.02	bdl	bdl	bdl	bdl	14.40	40.00	bdl	bdl	bdl	bdl	4.73	3.10	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	
286.5	17.60	bdl	7.65	3.41	16.30	219.00	78.00	bdl	663.00	bdl	6.60	4.92	2.75	bdl	bdl	8.10	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	
286.5	1.82	bdl	4.45	bdl	0.76	37.80	24.00	bdl	57.00	9.00	17.20	10.4 1	1.58	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	
286.5	1.72	bdl	7.78	bdl	4.59	27.20	24.00	bdl	bdl	2.50	17.50	11.7 5	2.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	
286.5	4.04	bdl	9.11	bdl	3.60	29.10	22.00	bdl	bdl	1.91	17.70	11.6 9	2.33	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	
286.5	1.05	bdl	1.11	2.77	bdl	14.80	30.00	bdl	bdl	bdl	19.10	10.3 7	2.50	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	
286.5	12.70	bdl	262.0 0	11.8 0	4.54	535.00	37.00	bdl	4290.00	163.0 0	15.30	14.8 0	3.17	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	9.80	bdl	3.97	bdl
286.5	bdl	bdl	1.70	bdl	1.15	22.90	bdl	bdl	bdl	bdl	15.40	14.8 7	3.50	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	13.3 0	bdl
286.5	1.65	bdl	8.51	1.09	3.50	7.90	bdl	bdl	81.00	4.90	18.10	9.31	4.04	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
286.5	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	43.10	bdl	bdl	bdl	10.10	7.70	13.3 3	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
286.5	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	68.00	bdl	bdl	bdl	bdl	5.90	4.13	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
286.5	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	83.00	bdl	bdl	bdl	1.90	bdl	9.48	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
286.5	58.00	bdl	3.68	7.80	62.00	1240.00	bdl	bdl	15200.0 0	315.0 0	5.00	26.3 0	2.79	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	1.17	bdl	bdl
286.5	48.00	bdl	470.0 0	14.5 0	19.00	3800.00	bdl	bdl	16300.0 0	244.0 0	194.0 0	15.0 3	10.70	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	26.3 0	bdl	4.90	bdl
286.5	1.03	bdl	1.44	bdl	2.11	50.50	bdl	bdl	142.00	6.80	347.0 0	12.9 8	27.10	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	14.2 0	bdl
286.5	bdl	bdl	0.20	bdl	bdl	65.60	bdl	bdl	bdl	bdl	351.0 0	11.8 2	20.60	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	7.40	bdl

Sondaje DDH-386

133.9	73.00	bdl	3.53	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	11.90	bdl	1.56	bdl	116.00	bdl	bdl	10.30	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
133.9	41.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	3.70	bdl	bdl	bdl	bdl	2.14	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
133.9	34.90	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	10.10	bdl	bdl	bdl	bdl	1.85	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
133.9	36.80	bdl	5.33	bdl	bdl	bdl	18.60	bdl	bdl	bdl	25.00	1.78	bdl	50.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
133.9	35.80	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	34.00	bdl	bdl	bdl	24.00	1.97	bdl	310.00	bdl	16.00	bdl	bdl	bdl	bdl	10.5 0	bdl
133.9	79.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.31	bdl	240.00	bdl	bdl	1.50	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
133.9	79.00	bdl	162.0 0	3.10	bdl	bdl	31.00	bdl	bdl	bdl	bdl	2.14	bdl	1700.0 0	bdl	25.00	5.50	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
598	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	29.0 0	bdl	bdl	34.00	2.35	bdl	bdl	200.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.9 0
598	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	33.00	bdl	bdl	5.35	bdl	bdl	94.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
598	13.10	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	32.00	8.20	bdl	bdl	140.00	bdl	13.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
598	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	33.00	bdl	bdl	bdl	bdl	4.65	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	2.70	bdl	bdl	bdl	1.49	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.36	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl

700.1	1.69	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	30.00	bdl	bdl	bdl	8.60	1.68	1.55	bdl	4.40	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	1.52	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	110.00	bdl	bdl	bdl	9.70	1.50	4.34	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	2.44	bdl	bdl	bdl	0.99	bdl	120.00	5.10	bdl	bdl	7.50	1.69	2.62	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	2.99	bdl	bdl	bdl	0.55	bdl	220.00	bdl	bdl	bdl	bdl	1.95	3.35	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	2.20	bdl	bdl	bdl	11.70	22.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.98	bdl	3.90	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	1.69	bdl	0.21	bdl	6.40	26.50	20.00	bdl	bdl	bdl	bdl	1.28	bdl	3.70	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	1.79	bdl	bdl	bdl	2.05	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	1.04	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.60
700.1	bdl	bdl	bdl	bdl	4.40	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	8.00	1.49	bdl	2.30	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	1.90	bdl	0.24	bdl	14.40	26.70	bdl	bdl	bdl	bdl	6.40	1.33	bdl	3.80	bdl	bdl	bdl	2.10	bdl	bdl	1.71
700.1	1.75	bdl	bdl	bdl	3.68	bdl	42.00	bdl	bdl	bdl	7.00	1.66	bdl	3.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	3.94	bdl	1.09	bdl	5.30	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	1.34	bdl	3.70	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	bdl	bdl	bdl	0.90	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.87	0.67	bdl	bdl	bdl	bdl	1.30	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	0.39	bdl	0.14	bdl	1.30	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.88	0.66	0.36	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	bdl	bdl	bdl	0.97	0.38	bdl	9.60	bdl	bdl	bdl	3.10	0.61	0.77	bdl	bdl	bdl	1.40	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	bdl	bdl	bdl	bdl	0.22	2.90	9.80	bdl	bdl	bdl	2.30	0.55	0.50	0.72	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	0.44	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.65	0.60	0.63	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	0.26	bdl	bdl	bdl	0.98	3.50	11.50	bdl	bdl	bdl	bdl	0.59	0.86	0.97	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	0.52	bdl	bdl	1.33	bdl	bdl	14.10	bdl	bdl	bdl	2.83	0.64	0.75	bdl	bdl	bdl	1.20	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	2.23	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	41.00	bdl	bdl	bdl	6.00	2.47	1.07	2.10	2.80	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	0.92	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.25	1.93	3.10	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	0.87	bdl	bdl	bdl	3.20	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.48	3.12	3.60	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	4.50	2.15	2.41	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	8.10	bdl	bdl	bdl	bdl	6.90	2.16	4.31	3.30	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	0.68	bdl	bdl	bdl	0.56	bdl	17.00	bdl	bdl	bdl	5.60	2.08	3.54	3.46	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	bdl	bdl	bdl	bdl	0.62	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	4.70	2.17	3.05	2.68	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
Sondaje DDH-812																					
221.7	44.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	1300.00	bdl	bdl	bdl	bdl	4.66	19.20	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
221.7	bdl	bdl	bdl	bdl	8.40	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	4.61	15.20	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
221.7	21.50	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	1.60	bdl	bdl	bdl	4.32	18.80	bdl	bdl	bdl	820.00	bdl	bdl	bdl	bdl
221.7	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	5.30	15.40	bdl	300.00	bdl	1440.00	bdl	bdl	bdl	bdl
221.7	58.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	14100.00	bdl	bdl	bdl	bdl	2.21	bdl	bdl	16000.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
221.7	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.66	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
221.7	34.00	bdl	bdl	18.20	bdl	bdl	bdl	bdl	230.00	bdl	133.00	4.20	bdl	bdl	170.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl

221.7	23.60	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	101.00	4.00	bdl	340.00	bdl	bdl	103000.00	bdl	bdl	bdl	2.70
221.7	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	3.34	bdl	90.00	bdl	bdl	bdl	4.60	bdl	bdl	bdl
221.7	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	4.20	22.80	bdl	bdl	bdl	5700.00	bdl	bdl	bdl	bdl
221.7	16.70	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	3.58	bdl	bdl	bdl	bdl	7800.00	bdl	bdl	bdl	bdl
221.7	35.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	3.40	bdl	100.00	bdl	bdl	2200.00	2.30	bdl	bdl	bdl
377.5	5.10	bdl	2.11	bdl	8.50	bdl	bdl	1.30	bdl	bdl	9.10	4.83	3.00	bdl	65.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.69
377.5	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.88	6.50	bdl	bdl	bdl	8.80	bdl	bdl	bdl	1.50
377.5	16.20	bdl	bdl	bdl	9.10	bdl	bdl	2.10	bdl	bdl	bdl	2.96	3.60	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
377.5	7.30	0.03	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	13.60	5.22	bdl	bdl	bdl	bdl	11.00	bdl	bdl	5.60	bdl
377.5	bdl	bdl	1.24	bdl	10.80	bdl	bdl	6.40	bdl	bdl	bdl	4.37	3.10	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
377.5	bdl	bdl	bdl	bdl	36.90	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.90	8.50	49.00	bdl	bdl	7.60	5.10	bdl	bdl	bdl
377.5	bdl	bdl	bdl	bdl	31.30	bdl	bdl	bdl	bdl	7.70	bdl	2.43	8.10	55.00	bdl	bdl	8.80	1.60	bdl	bdl	bdl
377.5	bdl	bdl	bdl	bdl	71.20	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.85	9.10	bdl	bdl	bdl	24.00	bdl	bdl	bdl	bdl
377.5	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	3.13	6.60	15.00	bdl	22.00	bdl	bdl	bdl	bdl	1.70
377.5	bdl	bdl	bdl	bdl	33.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.65	3.74	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
563.4	26.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	60.00	bdl	bdl	bdl	bdl	3.14	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
563.4	24.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	5.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
563.4	38.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	59.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
563.4	22.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	70.00	bdl	bdl	bdl	bdl	5.30	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
563.4	28.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	360.00	bdl	bdl	bdl	27.00	2.25	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
563.4	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	80.00	bdl	bdl	bdl	bdl	2.51	72.30	63.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
563.4	bdl	bdl	bdl	bdl	42.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	3.31	110.00	39.00	68.00	bdl	23.00	bdl	bdl	bdl	bdl
563.4	8.20	bdl	bdl	bdl	65.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.24	29.70	bdl	100.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
563.4	5.50	bdl	bdl	bdl	58.60	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.34	27.50	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
563.4	bdl	bdl	bdl	bdl	21.00	bdl	43.00	bdl	bdl	bdl	bdl	2.86	36.20	bdl	bdl	bdl	18.00	bdl	bdl	bdl	bdl
871	2.60	bdl	bdl	bdl	2.57	bdl	39.00	bdl	bdl	bdl	bdl	2.92	1.08	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
871	1.31	bdl	bdl	bdl	1.32	bdl	16.00	bdl	bdl	bdl	5.20	2.94	1.86	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
871	2.17	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	42.00	bdl	bdl	bdl	bdl	2.57	12.06	1.78	0.19	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
871	0.94	bdl	bdl	bdl	0.65	bdl	44.00	bdl	bdl	bdl	5.50	2.63	14.10	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
871	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	35.00	bdl	bdl	bdl	7.10	2.46	28.00	bdl	bdl	bdl	3.40	bdl	bdl	bdl	bdl
871	0.85	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	45.00	bdl	bdl	bdl	7.60	2.62	28.50	bdl	bdl	bdl	bdl	0.52	bdl	bdl	bdl
871	1.61	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	64.00	bdl	bdl	bdl	8.30	3.03	8.22	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
871	0.88	bdl	bdl	bdl	0.57	bdl	54.00	bdl	bdl	bdl	5.70	2.86	9.64	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl

Sondaje 4687

M-3544	1.37	bdl	1.08	bdl	4.79	92.00	15.00	bdl	bdl	bdl	8.80	3.79	3.48	bdl	bdl	bdl	bdl	0.73	bdl	bdl	bdl
M-3544	1.78	bdl	1.47	bdl	4.95	116.00	bdl	bdl	bdl	bdl	5.30	3.81	3.35	bdl	bdl	bdl	bdl	1.90	0.15	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	0.65	bdl	1.01	138.00	bdl	bdl	bdl	bdl	5.00	3.75	5.19	bdl	bdl	bdl	2.50	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	0.45	bdl	1.00	87.00	27.00	1.38	bdl	bdl	6.90	3.87	5.27	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	1.06	bdl	8.80	86.00	42.00	3.10	bdl	bdl	7.00	3.99	4.24	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	1.20	bdl	3.06	bdl	6.40	74.60	27.00	bdl	8.20	bdl	8.70	4.01	4.60	bdl	bdl	bdl	bdl	1.85	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	1.35	bdl	9.00	86.00	10.00	bdl	bdl	bdl	7.80	4.07	3.11	bdl	bdl	bdl	bdl	1.43	bdl	bdl	bdl
M-3544	4.80	bdl	5.85	bdl	1.12	8.30	37.00	bdl	6.80	bdl	7.50	3.68	1.91	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	1.22	bdl	6.70	102.00	33.00	bdl	bdl	bdl	bdl	3.65	3.39	bdl	bdl	bdl	2.90	2.10	bdl	bdl	bdl
M-3544	2.54	bdl	1.51	bdl	11.40	67.00	47.00	bdl	bdl	bdl	4.60	3.62	3.54	bdl	bdl	bdl	4.00	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	1.71	bdl	1.10	bdl	6.70	28.50	bdl	2.80	bdl	bdl	5.00	3.84	4.38	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	1.54	bdl	0.83	bdl	8.90	66.00	bdl	bdl	bdl	bdl	5.50	3.92	3.64	bdl	bdl	bdl	2.70	0.80	bdl	bdl	bdl
M-3544	0.97	bdl	1.64	0.82	3.10	20.20	42.00	bdl	bdl	bdl	6.00	3.61	3.17	bdl	bdl	bdl	2.40	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	1.10	bdl	0.79	bdl	6.38	22.70	30.00	1.39	bdl	bdl	5.20	3.38	2.58	bdl	bdl	bdl	2.70	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	0.89	bdl	0.73	0.72	9.80	60.00	22.00	bdl	bdl	bdl	3.90	3.73	4.45	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	1.00	bdl	0.85	0.90	5.38	56.00	29.00	bdl	bdl	bdl	3.90	3.58	3.97	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	1.71	bdl	0.94	bdl	1.41	390.00	43.00	bdl	bdl	bdl	8.60	4.41	11.59	bdl	bdl	bdl	2.80	4.40	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	0.73	1.44	0.94	237.00	25.00	1.17	bdl	bdl	5.70	3.76	9.83	bdl	bdl	bdl	bdl	3.10	bdl	bdl	bdl
M-3544	2.16	$\frac{0.0}{2}$	1.21	bdl	5.16	330.00	37.00	1.90	bdl	bdl	bdl	4.24	12.40	bdl	bdl	bdl	bdl	3.60	bdl	bdl	bdl
M-3544	1.31	bdl	0.72	1.31	2.59	216.00	22.00	1.30	bdl	bdl	7.30	3.68	9.74	bdl	bdl	bdl	bdl	2.20	bdl	bdl	bdl
M-3544	1.18	bdl	1.02	1.09	1.66	360.00	bdl	3.00	bdl	bdl	7.30	3.76	11.40	bdl	bdl	bdl	bdl	5.40	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	0.53	2.05	bdl	142.00	bdl	2.10	bdl	bdl	6.40	3.96	10.97	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	0.97	bdl	1.20	1.46	5.63	199.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	3.50	8.83	bdl	bdl	bdl	bdl	2.16	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	0.41	bdl	0.95	550.00	25.00	3.00	bdl	bdl	8.10	4.01	10.80	bdl	bdl	bdl	bdl	5.10	bdl	1.81	bdl
M-3544	2.13	bdl	1.29	bdl	5.52	206.00	23.00	bdl	bdl	bdl	6.00	4.06	6.92	bdl	bdl	bdl	bdl	3.00	bdl	bdl	bdl
M-3544	7.17	bdl	0.87	1.58	1.21	131.00	bdl	bdl	bdl	bdl	6.50	3.67	6.63	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	$\frac{348.0}{0}$	bdl	3.52	1.18	6.50	259.00	35.00	2.10	bdl	bdl	6.00	3.88	7.21	bdl	bdl	bdl	2.70	bdl	bdl	1.79	bdl
M-3544	0.69	bdl	0.48	1.16	2.30	113.00	45.00	bdl	13.70	bdl	5.50	4.07	7.36	bdl	bdl	bdl	2.50	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	bdl	bdl	0.31	bdl	2.54	79.00	bdl	bdl	bdl	bdl	8.40	3.79	5.66	bdl	bdl	bdl	bdl	1.22	bdl	bdl	bdl
M-3544	9.65	bdl	1.95	1.08	10.40	121.00	bdl	0.81	bdl	bdl	7.70	3.62	4.53	bdl	bdl	3.70	bdl	1.58	bdl	bdl	bdl
M-3544	2.03	bdl	0.68	1.64	1.68	59.90	31.00	0.94	bdl	bdl	8.40	3.70	4.38	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	1.94	bdl	1.91	bdl	17.40	97.00	bdl	bdl	bdl	bdl	8.10	4.34	3.68	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	1.46	bdl	6.96	bdl	29.80	39.00	bdl	bdl	bdl	bdl	9.30	4.39	4.04	bdl	bdl	8.80	bdl	bdl	bdl	3.70	bdl

M-3544	7.70	bdl	2.61	bdl	3.85	54.50	bdl	bdl	bdl	bdl	5.30	4.84	3.69	bdl	bdl	233.0 0	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
M-3544	1.40	bdl	1.54	bdl	11.10	48.60	bdl	bdl	bdl	bdl	4.10	3.87	2.99	1.96	17.30	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	
Mínimo	0.26	0.0 2	0.14	0.72	0.22	2.90	3.70	0.81	6.80	1.90	2.30	0.55	0.36	0.72	0.19	3.70	1.20	0.52	0.15	1.79	0.4 3
Máximo	348.0 0	0.0 3	470.0 0	18.2 0	990.0 0	13000.0 0	14100.0 0	29.0 0	16300.0 0	315.0 0	351.0 0	26.3 0	110.0 0	1700.0 0	16000.0 0	233.0 0	103000.0 0	26.3 0	10.6 0	14.2 0	2.7 0
Mediana	2.52	0.0 3	1.24	1.44	4.87	71.80	33.00	2.10	142.00	9.00	7.30	3.68	4.24	10.85	81.00	16.50	5.75	2.18	1.17	5.50	1.6 0
Promedio	16.44	0.0 3	14.16	3.53	20.80	366.32	257.78	3.65	2850.23	74.05	20.91	4.30	8.58	96.43	1229.55	32.30	3188.87	3.93	3.97	6.27	1.5 3
Cuenta	104	2	75	27	92	68	71	20	15	13	94	147	109	34	14	14	38	26	3	16	8

Nota: bdl = bajo el límite de detección. Los límites de detección (wt%) se muestran bajo cada elemento

Apéndice 8: Análisis de elementos traza en bornita mediante LA-ICP-MS

	Ag	Au	Bi	Hg	Pb	Zn	Se	Te	As	Sb	Ge	In	Sn	Co	Ni	Mn	Cr	Cd	Tl	Ga	Mo
Muestra	0.80	0.02	0.10	0.80	0.40	5.00	30.00	0.90	5.00	1.20	3.00	0.02	0.50	1.20	0.90	4.50	2.20	0.80	0.02	1.30	3.20
Sondaje DDH-386																					
133.9	1040.00	bdl	4160.00	bdl	bdl	bdl	4.40	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.30	bdl	bdl	bdl	bdl
133.9	1010.00	bdl	5340.00	bdl	2.49	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	8.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
133.9	1080.00	bdl	4590.00	1.55	bdl	bdl	3.80	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	21.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
133.9	1130.00	bdl	5940.00	bdl	2.73	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	31.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.80	bdl
133.9	1140.00	bdl	5410.00	1.58	1.60	bdl	3.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	31.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
133.9	1380.00	bdl	5510.00	bdl	2.37	bdl	5.60	bdl	bdl	bdl	6.30	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.50	bdl
133.9	1010.00	bdl	4810.00	bdl	1.61	bdl	5.20	bdl	bdl	bdl	28.00	bdl	bdl	40.00	bdl	bdl	4.90	bdl	bdl	bdl	bdl
598	401.00	bdl	397.00	bdl	1.18	bdl	25.00	27.00	bdl	bdl	bdl	0.24	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
598	497.00	bdl	481.00	bdl	bdl	bdl	29.00	23.00	bdl	bdl	bdl	0.39	bdl	bdl	bdl	bdl	9.20	bdl	bdl	bdl	bdl
598	462.00	bdl	413.00	bdl	bdl	bdl	17.00	bdl	bdl	bdl	bdl	0.44	bdl	bdl	bdl	bdl	5.40	bdl	bdl	bdl	bdl
598	609.00	bdl	426.00	bdl	bdl	bdl	bdl	115.00	bdl	bdl	bdl	0.37	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
598	490.00	bdl	448.00	bdl	bdl	bdl	15.00	42.00	bdl	bdl	12.40	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	8.30	bdl	bdl	bdl	bdl
598	353.00	bdl	361.00	bdl	bdl	bdl	bdl	11.30	21.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
598	433.00	bdl	580.00	bdl	bdl	bdl	bdl	41.00	85.00	bdl	24.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	20.00	1.70	bdl	bdl	bdl
598	382.00	bdl	534.00	23.40	bdl	bdl	bdl	39.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	91.00	bdl	bdl	6.30	bdl	bdl	bdl
598	335.00	bdl	559.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	50.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
598	383.00	bdl	500.00	bdl	bdl	bdl	bdl	25.00	bdl	bdl	24.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
598	399.00	bdl	594.00	bdl	bdl	bdl	bdl	53.00	79.00	bdl	33.00	bdl	bdl	bdl	bdl	106.00	bdl	7.50	bdl	bdl	3.70

700.1	311.00	bdl	675.00	bdl	2.15	bdl	52.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	282.00	bdl	585.00	bdl	1.27	bdl	35.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	316.00	bdl	587.00	bdl	82.00	bdl	24.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	327.00	bdl	740.00	bdl	bdl	bdl	198.00	2.70	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	1.48
700.1	286.00	bdl	659.00	bdl	0.77	bdl	116.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	282.00	bdl	632.00	bdl	bdl	bdl	130.00	6.70	10.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	260.00	0.01	637.00	bdl	0.97	bdl	232.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	287.00	bdl	593.00	bdl	2.41	bdl	123.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	276.00	bdl	576.00	1.23	bdl	bdl	157.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	266.00	bdl	644.00	bdl	0.97	bdl	68.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.95	bdl	bdl	bdl
700.1	189.00	bdl	480.00	bdl	13.10	bdl	11.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	196.00	bdl	522.00	bdl	15.60	bdl	12.00	bdl	bdl	bdl	4.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	306.00	bdl	611.00	bdl	1.34	bdl	bdl	bdl	14.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	316.00	bdl	616.00	2.40	4.90	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	6.60	bdl	bdl	0.04	bdl	bdl
700.1	537.00	bdl	656.00	2.66	9.70	bdl	22.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	477.00	bdl	619.00	2.30	8.90	bdl	26.00	bdl	bdl	bdl	bdl	0.12	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	510.00	0.09	578.00	bdl	12.70	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	5.60	4.60	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	316.00	bdl	586.00	bdl	bdl	bdl	33.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	291.00	bdl	556.00	bdl	0.74	bdl	38.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	263.00	bdl	529.00	bdl	bdl	bdl	31.00	5.40	bdl	bdl	4.10	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	254.00	bdl	538.00	bdl	bdl	bdl	41.00	bdl	bdl	bdl	3.70	bdl	bdl	bdl	3.10	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	292.00	bdl	589.00	2.70	0.72	bdl	60.00	0.62	6.90	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	255.00	bdl	556.00	bdl	bdl	bdl	49.00	1.23	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	241.00	bdl	646.00	1.88	4.81	bdl	43.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	200.00	bdl	594.00	bdl	4.31	bdl	36.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	6.30	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	195.00	bdl	554.00	1.59	2.72	bdl	bdl	3.20	bdl	bdl	4.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	6.10	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	258.00	bdl	478.00	bdl	0.79	bdl	12.00	1.60	bdl	bdl	bdl	0.05	bdl	bdl	1.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	282.00	bdl	542.00	bdl	0.67	bdl	bdl	2.80	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.51	bdl	3.10	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	279.00	bdl	469.00	bdl	0.52	bdl	bdl	3.10	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	280.00	bdl	526.00	bdl	bdl	bdl	17.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	253.00	bdl	499.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	5.60	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	270.00	bdl	463.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	4.40	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	3.00	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	273.00	0.03	480.00	bdl	1.46	bdl	14.00	bdl	bdl	bdl	3.10	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	1.90	bdl	bdl	bdl	bdl
700.1	316.00	bdl	514.00	0.85	1.70	bdl	44.00	0.95	bdl	bdl	4.10	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	2.50	bdl	bdl	bdl	bdl

Sondaje DDH-812

221.70	325.00	bdl	321.00	bdl	bdl	bdl	700.00	3.40	80.00	13.60	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	250.00	bdl	bdl	bdl	bdl
221.70	318.00	bdl	407.00	bdl	4.20	bdl	600.00	bdl	101.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	530.00	160.00	bdl	bdl	bdl	bdl
221.70	367.00	bdl	417.00	bdl	3.10	bdl	bdl	bdl	80.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	540.00	131.00	bdl	bdl	bdl	bdl
221.70	248.00	bdl	359.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	1.30	bdl	bdl
221.70	366.00	bdl	320.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	180.00	bdl	bdl	1.40	bdl	bdl	bdl	bdl	1200.00	bdl	bdl	bdl
221.70	240.00	bdl	245.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	168.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	32.00
221.70	283.00	bdl	257.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	160.00	68.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
221.70	307.00	bdl	289.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
221.70	288.00	bdl	236.00	bdl	1.09	bdl	390.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	200.00	bdl	bdl	bdl	bdl
221.70	285.00	bdl	249.00	bdl	bdl	bdl	260.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	70.00	bdl	bdl	2500.00	bdl	bdl	bdl
377.50	118.00	bdl	356.00	bdl	2.42	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	10.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
377.50	146.00	bdl	419.00	1.02	bdl	bdl	bdl	10.50	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	8.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
377.50	129.00	bdl	410.00	bdl	bdl	bdl	bdl	11.20	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	14.90	bdl	24.00	bdl	bdl	bdl	bdl
377.50	111.00	bdl	378.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	113.00	8.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
377.50	160.00	bdl	419.00	bdl	1.15	bdl	bdl	bdl	1.90	1.60	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.87	bdl	bdl	bdl
377.50	248.00	bdl	383.00	bdl	bdl	bdl	bdl	12.80	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
377.50	327.00	bdl	448.00	bdl	bdl	bdl	bdl	22.60	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl	10.00	bdl	17.00	bdl	bdl	bdl	bdl
377.50	325.00	bdl	427.00	bdl	bdl	bdl	bdl	22.50	bdl	bdl	bdl	0.16	bdl	15.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
377.50	210.00	bdl	338.00	2.02	bdl	bdl	bdl	7.00	bdl	bdl	bdl	0.45	bdl	12.00	bdl	bdl	2.60	bdl	bdl	bdl
377.50	267.00	bdl	379.00	bdl	bdl	bdl	bdl	24.00	bdl	bdl	3.00	0.37	bdl	11.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
377.50	270.00	0.07	334.00	bdl	bdl	bdl	bdl	58.00	bdl	bdl	8.80	0.57	39.00	bdl	bdl	bdl	4.10	bdl	bdl	bdl
377.50	241.00	bdl	334.00	bdl	bdl	bdl	bdl	11.00	bdl	bdl	bdl	0.37	bdl	bdl	bdl	bdl	9.10	bdl	bdl	bdl
377.50	274.00	bdl	344.00	bdl	bdl	bdl	bdl	57.00	bdl	bdl	bdl	0.55	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
377.50	318.00	bdl	368.00	bdl	bdl	bdl	bdl	62.00	bdl	bdl	11.60	0.53	bdl	32.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
377.50	222.00	bdl	393.00	bdl	bdl	bdl	bdl	48.00	bdl	bdl	7.50	0.59	bdl	19.00	bdl	26.00	bdl	bdl	bdl	bdl
377.50	106.00	bdl	256.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	11.70	bdl	bdl	3.20	0.42	bdl	bdl
377.50	110.00	bdl	170.00	bdl	3.50	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	13.00	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
563.40	197.00	bdl	4.33	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	55.00	bdl	bdl	bdl
563.40	151.00	bdl	3.62	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.07	bdl	bdl	bdl	bdl	28.00	bdl	bdl	bdl
563.40	136.00	bdl	3.40	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	13.20	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	33.00	bdl	bdl	bdl
871	169.00	bdl	54.80	bdl	32.80	bdl	258.00	15.70	bdl	1.71	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	1.43
871	296.00	bdl	200.00	bdl	70.00	bdl	193.00	30.10	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	1.48	bdl	bdl
871	245.00	bdl	265.00	5.30	275.00	bdl	192.00	8.90	bdl	bdl	bdl	bdl	0.60	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl

Mínimo	106.00	0.01	3.40	0.85	0.52	0.00	3.00	0.62	5.60	1.71	1.60	0.01	0.60	8.00	0.51	5.60	1.90	0.42	0.03	1.43	1.48
Máximo	1380.00	0.09	5940.00	23.40	275.00	0.00	700.00	115.00	180.00	13.60	33.00	1.40	39.00	160.00	540.00	160.00	2500.00	7.50	0.04	32.00	3.70
Mediana	285.00	0.05	480.00	1.95	2.41	0.00	37.00	12.80	64.50	1.90	6.30	0.37	19.80	17.00	91.00	17.00	6.20	1.39	0.03	2.65	2.59
Promedio	356.22	0.05	827.87	3.61	14.88	0.00	102.98	23.12	59.38	5.74	10.57	0.37	19.80	31.23	168.29	45.65	181.78	2.57	0.03	9.68	2.59
Cuenta	85	4	85	14	39	0	42	35	12	3	19	18	2	16	9	11	24	8	2	4	2

Nota: bdl = bajo el límite de detección. Los límites de detección (wt%) se muestran bajo cada elemento

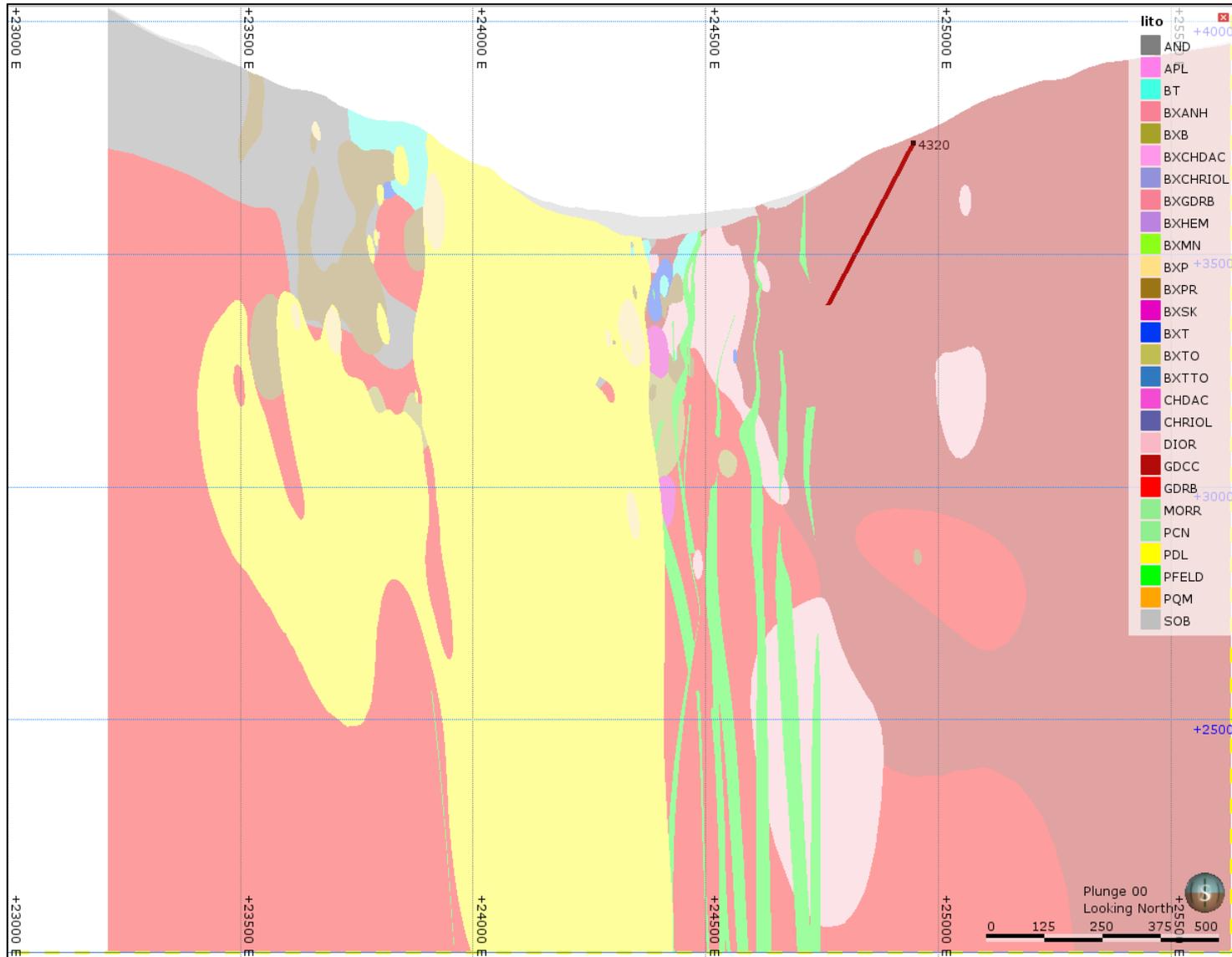
Apéndice 9: Análisis de elementos traza en sulfosales de cobre mediante LA-ICP-MS

		Ag	Au	Bi	Hg	Pb	Zn	Se	Te	As	Sb	Ge	In	Sn	Co	Ni	Mn	Cr	Cd	Tl	Ga	Mo
Muestra		1.00	0.02	50.00	3.00	0.60	10.00	20.00	1.50	10.00	5.00	2.30	0.10	0.90	1.70	2.00	1.50	2.00	1.50	0.10	1.20	3.00
Sondaje 4320																						
373.10	Enr	750.00	bdl	0.36	9.40	1060.00	50000.00	23.00	1.90	67000.00	2800.00	5.90	0.67	0.64	bdl	18.00	bdl	bdl	117.00	3.00	2.00	7.50
373.10	Enr	690.00	bdl	0.17	5.80	760.00	40400.00	bdl	bdl	45000.00	3510.00	bdl	0.62	bdl	12.00	14.90	bdl	bdl	20.20	3.10	3.00	25.50
373.10	Enr	860.00	bdl	1.23	9.50	1380.00	71000.00	1100.00	4.50	55000.00	3400.00	bdl	1.26	bdl	18.00	bdl	bdl	90.00	160.00	4.80	4.20	11.30
373.10	Enr	398.00	bdl	0.16	4.30	480.00	34400.00	30.00	bdl	30600.00	1440.00	bdl	0.56	bdl	6.00	13.90	bdl	bdl	20.70	bdl	bdl	9.90
373.10	Enr	1080.00	bdl	0.34	6.20	1560.00	79000.00	bdl	bdl	48000.00	10600.00	bdl	7.50	bdl	38.00	bdl	17.00	bdl	264.00	7.50	bdl	bdl
373.10	Enr	1500.00	0.28	5.80	4.70	1930.00	41200.00	bdl	bdl	16900.00	660.00	6.70	13.30	0.61	5.00	23.00	7.00	2.00	95.00	9.10	bdl	5.70
373.10	Enr	810.00	0.66	5.50	5.20	3000.00	59000.00	4.90	bdl	23700.00	1380.00	4.40	16.30	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	114.00	19.90	1.80	bdl
373.10	Enr	475.00	bdl	6.50	5.90	1090.00	29500.00	3.00	bdl	9300.00	308.00	bdl	1.38	bdl	4.00	bdl	bdl	bdl	16.10	2.79	2.00	4.00
Sondaje TSS-62																						
286.50	Tet	9510.00	bdl	352.00	135.00	8.80	63300.00	bdl	5.50	2410.00	190000.00	bdl	3.42	bdl	110.50	bdl	13.20	bdl	1430.00	bdl	bdl	bdl
286.50	Tet	9110.00	bdl	341.00	130.60	16.80	54500.00	bdl	5.40	6350.00	174000.00	bdl	3.92	bdl	89.90	bdl	10.50	bdl	1329.00	2.70	bdl	bdl
286.50	Tet	6240.00	bdl	960.00	104.00	4.01	42500.00	bdl	1.50	5630.00	119000.00	bdl	5.98	bdl	75.10	bdl	7.50	bdl	810.00	bdl	bdl	bdl
286.50	Tet	7900.00	bdl	498.00	370.00	15.30	42400.00	bdl	bdl	7490.00	143600.00	bdl	5.29	bdl	88.00	bdl	10.90	bdl	712.00	0.47	bdl	1.35
286.50	Tet	5430.00	bdl	553.00	343.00	9.80	46300.00	bdl	2.90	39200.00	102500.00	bdl	0.74	bdl	142.40	bdl	bdl	bdl	578.00	0.29	bdl	bdl
286.50	Ten	1373.00	bdl	226.00	109.00	2.45	34300.00	bdl	bdl	155000.00	16400.00	bdl	4.27	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	262.00	0.66	bdl	bdl
286.50	Ten	695.00	0.03	120.00	38.20	45.40	15800.00	bdl	1.46	84000.00	6530.00	2.80	3.52	bdl	3.84	2.60	bdl	2.40	191.00	0.03	bdl	bdl
286.50	Tet	4380.00	bdl	1460.00	319.00	23.80	52700.00	bdl	5.40	46400.00	105900.00	bdl	2.92	bdl	160.20	bdl	bdl	2.70	708.00	3.44	bdl	bdl
286.50	Tet	8970.00	bdl	2910.00	566.00	43.60	80200.00	bdl	7.30	25400.00	196000.00	bdl	4.74	bdl	124.40	bdl	5.60	2.50	985.00	2.18	bdl	bdl
286.50	Tet	9700.00	bdl	3810.00	533.00	56.00	129600.00	bdl	9.90	61000.00	248000.00	bdl	3.88	bdl	221.00	bdl	9.30	bdl	1264.00	4.40	bdl	bdl
286.50	Tet	11980.00	bdl	7960.00	785.00	73.60	170900.00	bdl	14.80	56600.00	328000.00	bdl	7.87	bdl	250.00	bdl	10.10	bdl	1637.00	3.07	bdl	2.30
286.50	Tet	4490.00	bdl	3500.00	328.00	17.70	75700.00	20.00	9.50	27700.00	130100.00	bdl	3.36	bdl	103.30	bdl	4.20	bdl	821.00	1.24	bdl	bdl

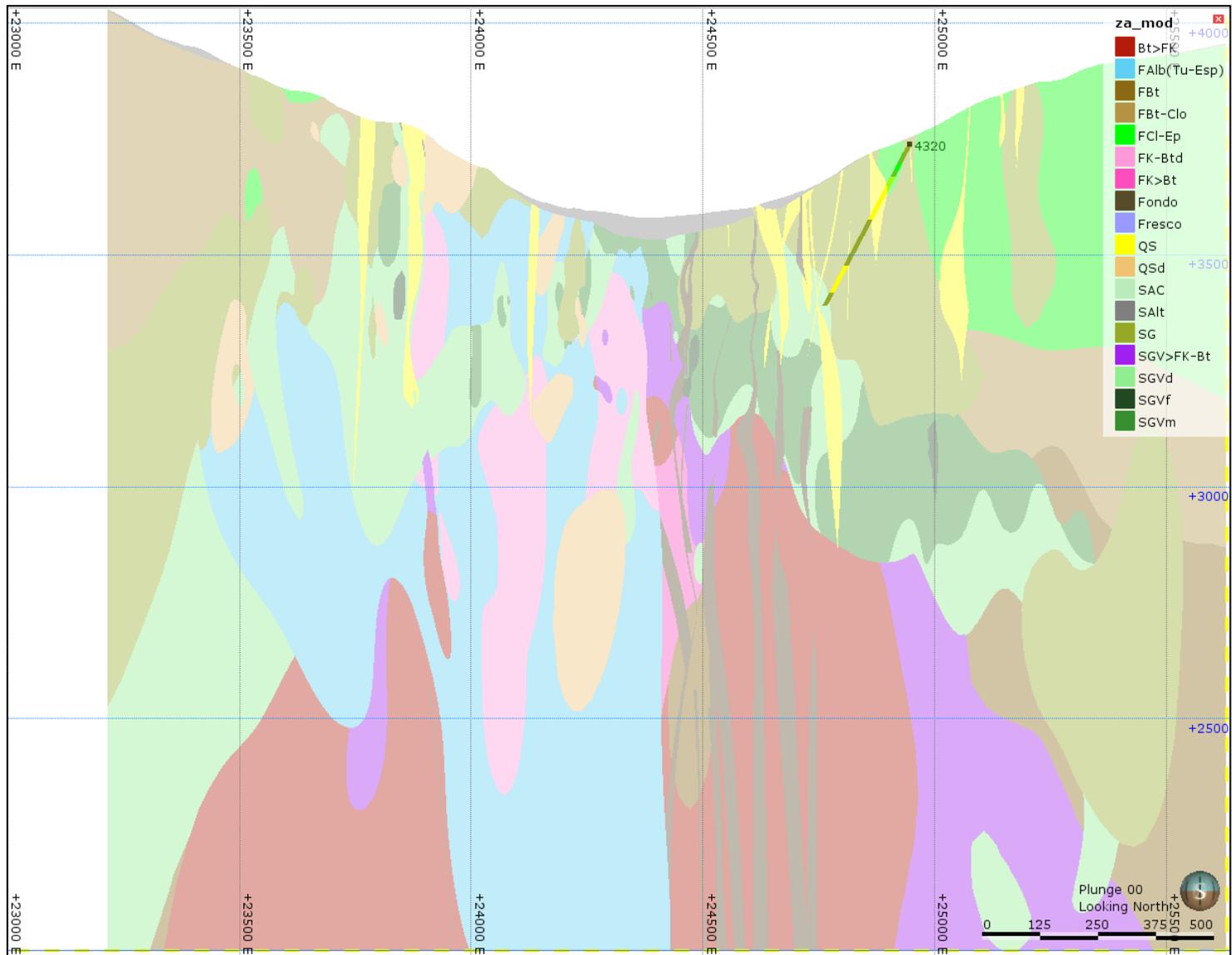
286.50	Tet	3070.00	bdl	970.00	169.00	1.05	24300.00	9.00	bdl	3900.00	63100.00	bdl	2.41	bdl	43.40	bdl	3.96	bdl	382.00	bdl	bdl	bdl
286.50	Tet	11500.00	bdl	1330.00	405.00	8.60	76000.00	37.00	14.30	12210.00	187100.00	bdl	5.05	bdl	92.00	bdl	bdl	bdl	1630.00	bdl	bdl	bdl
286.50	Tet	10520.00	bdl	316.00	555.00	11.10	113800.00	bdl	33.60	46100.00	201000.00	bdl	8.98	bdl	105.00	bdl	bdl	8.40	2120.00	0.15	bdl	bdl
286.50	Ten	1630.00	bdl	326.00	189.00	2.77	74400.00	19.00	11.60	135000.00	48000.00	bdl	bdl	bdl	119.00	bdl	bdl	5.10	923.00	bdl	bdl	bdl
286.50	Ten	5980.00	bdl	434.00	356.00	14.50	78600.00	24.00	bdl	77900.00	131000.00	bdl	0.89	bdl	149.00	bdl	bdl	5.90	1154.00	bdl	bdl	bdl
286.50	Ten	915.00	bdl	1020.00	230.00	98.00	84400.00	bdl	41.40	423000.00	16900.00	bdl	5.37	bdl	14.90	bdl	bdl	bdl	1052.00	11.20	bdl	bdl
286.50	Ten	2300.00	bdl	900.00	360.00	24.50	57400.00	bdl	6.80	224000.00	63400.00	bdl	6.47	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	663.00	2.24	bdl	bdl
Mínimo		398.00	0.03	0.16	4.30	1.05	15800.00	3.00	1.46	2410.00	308.00	2.80	0.56	0.61	3.84	2.60	3.96	2.00	16.10	0.03	1.80	1.35
Máximo		11980.00	0.66	7960.00	785.00	3000.00	170900.00	1100.00	41.40	423000.00	328000.00	6.70	16.30	0.64	250.00	23.00	17.00	90.00	2120.00	19.90	4.20	25.50
Mediana		3070.00	0.28	352.00	169.00	24.50	57400.00	21.50	6.80	45000.00	63400.00	5.15	3.90	0.63	89.90	14.90	9.30	3.90	708.00	2.90	2.00	6.60
Promedio		4528.00	0.32	1037.26	225.03	434.73	63762.96	126.99	10.46	64251.48	92393.63	4.95	4.64	0.63	85.87	14.48	9.02	14.88	720.67	4.11	2.60	8.44
Cuenta		27	3	27	27	27	27	10	17	27	27	4	26	2	23	5	11	8	27	20	5	8

Nota: bdl = bajo el límite de detección. Los límites de detección (wt%) se muestran bajo cada elemento

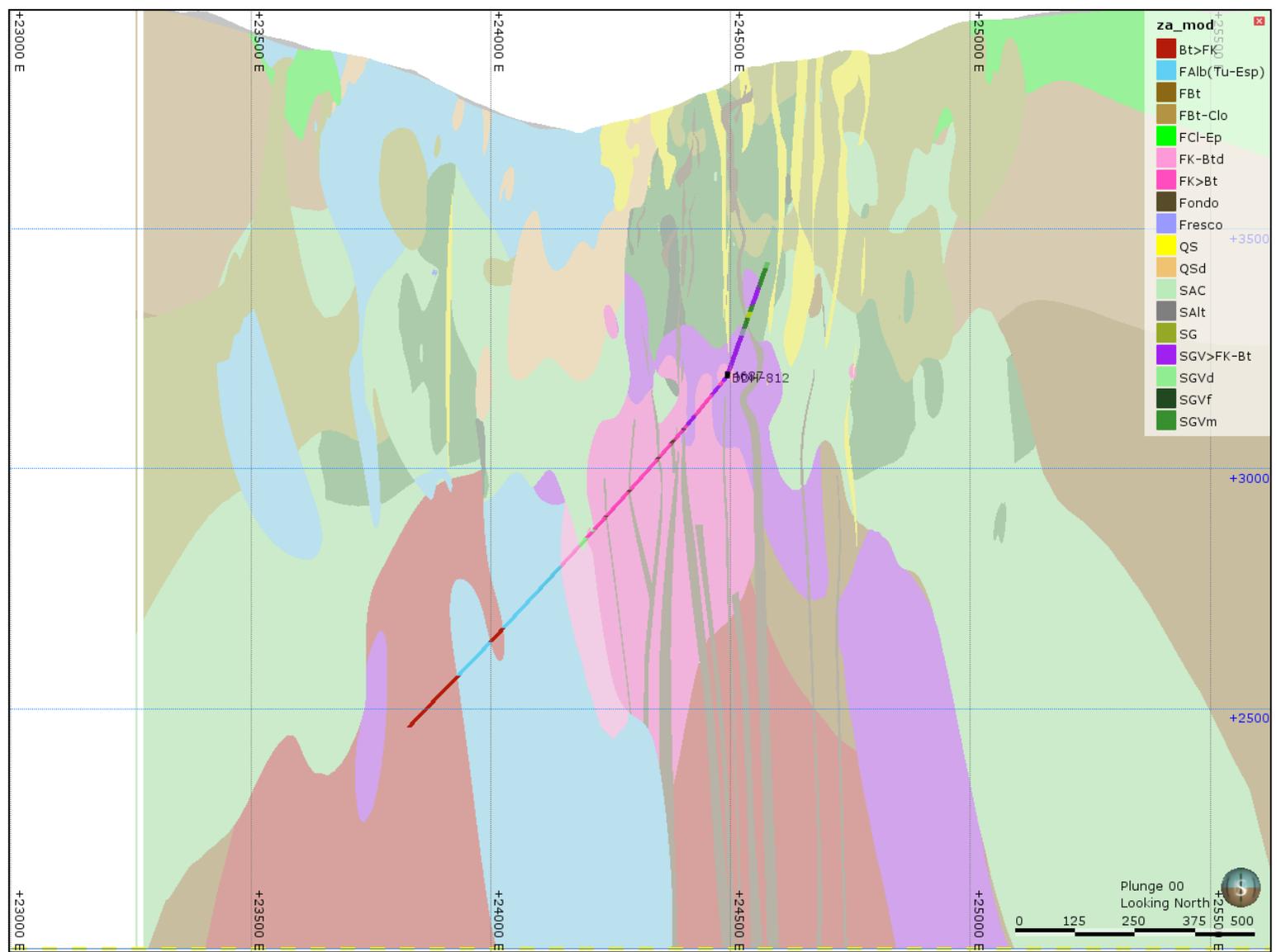
Anexo A: Perfil geológico incluyendo el sondaje DDH-4320.



Anexo B: Perfil de alteración incluyendo el sondaje DDH-4320.



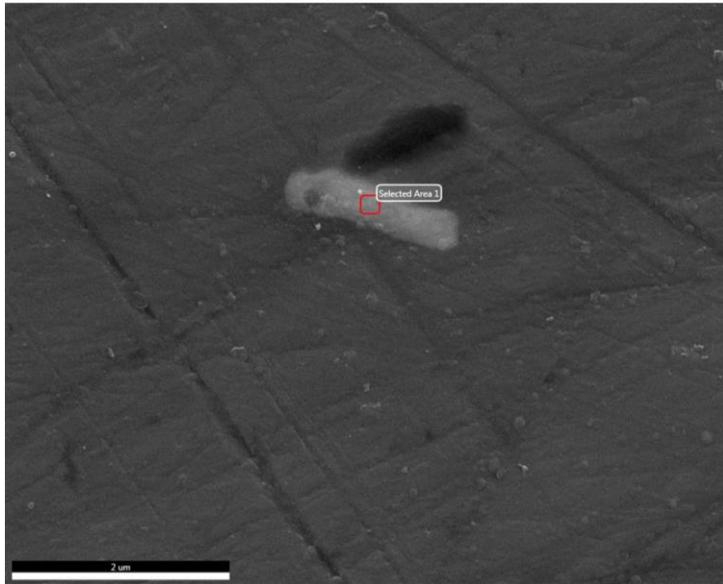
Anexo D: Perfil de alteración incluyendo los sondajes 4687, DDH-812.



Anexo E: FESEM-EDS análisis de microinclusiones de teluros de Ag en calcopiritas

Sample Name: DDh386_133.9

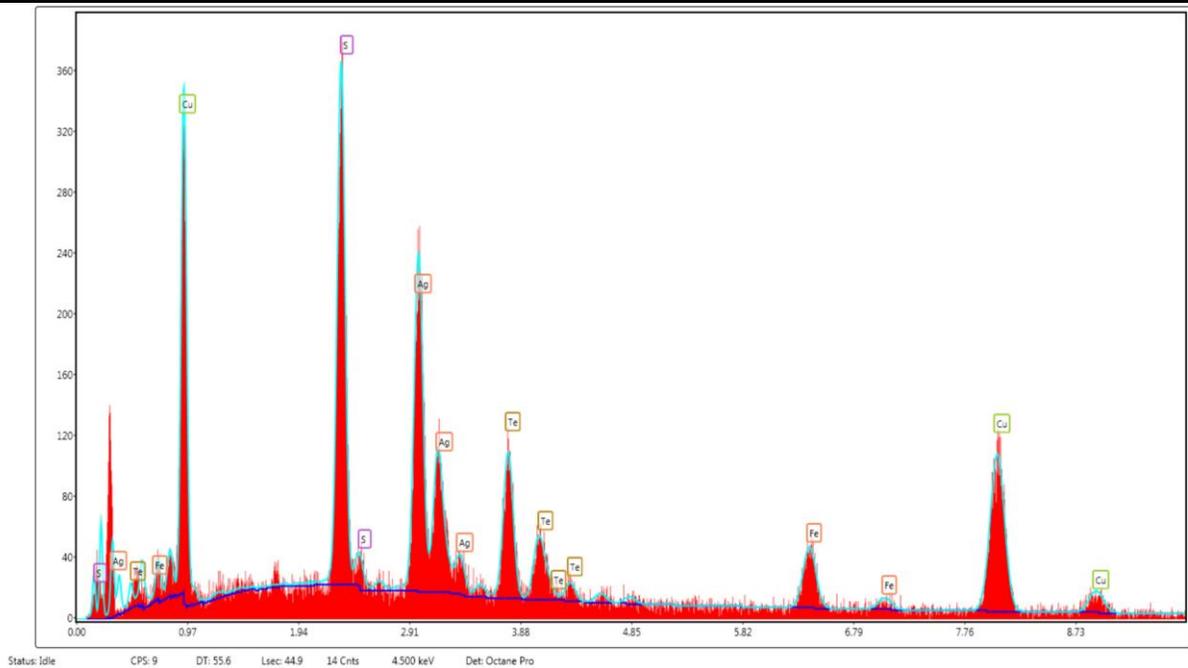
Area 2



eZAF Smart Quant Results

Elemen	Weight	Atomic	Net Int.
S K	15.73	31.95	128.76
AqL	24.08	14.54	92.78
TeL	17.95	9.16	43.84
FeK	7.37	8.6	24.54
CuK	34.87	35.75	71.22

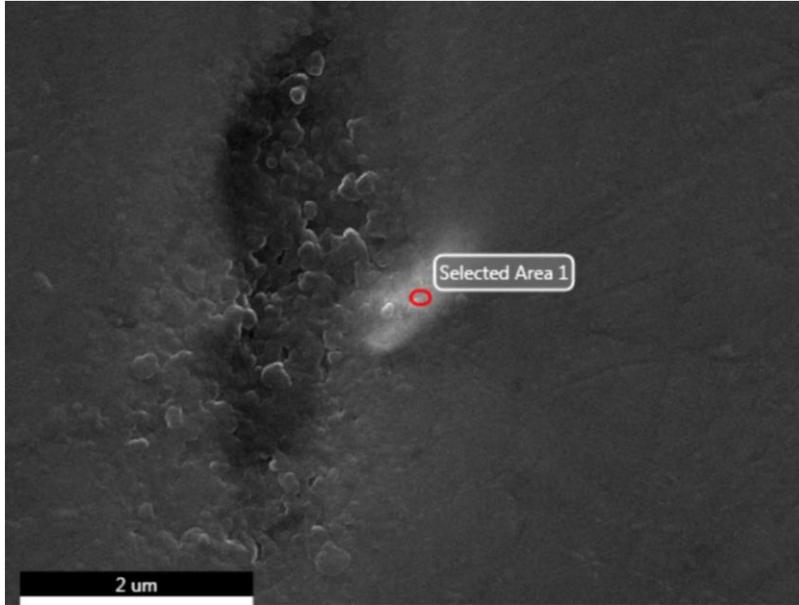
kV: 20 Mag 39151 Takeoff:35.4 Live Time(s): 44.9 Amp 0.96 Resolution:(eV) 123.



Anexo F: FESEM-EDS análisis de microinclusiones de teluros de Pd en calcopiritas y bornitas.

Sample Name: DDH386_477.5

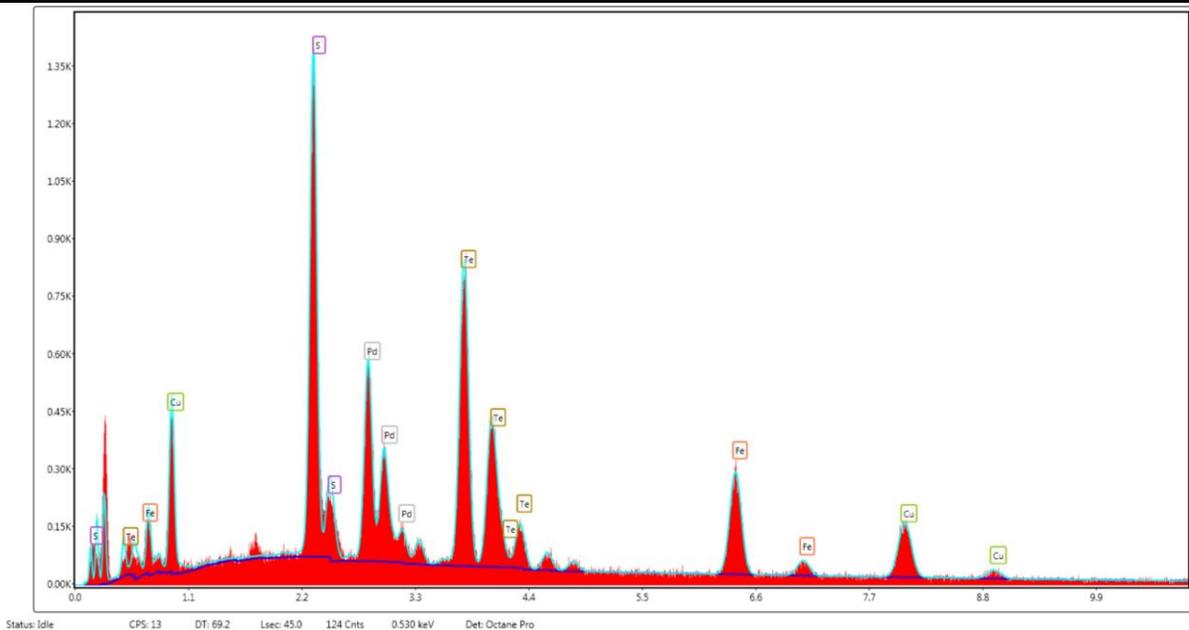
Area 7



eZAF Smart Quant Results

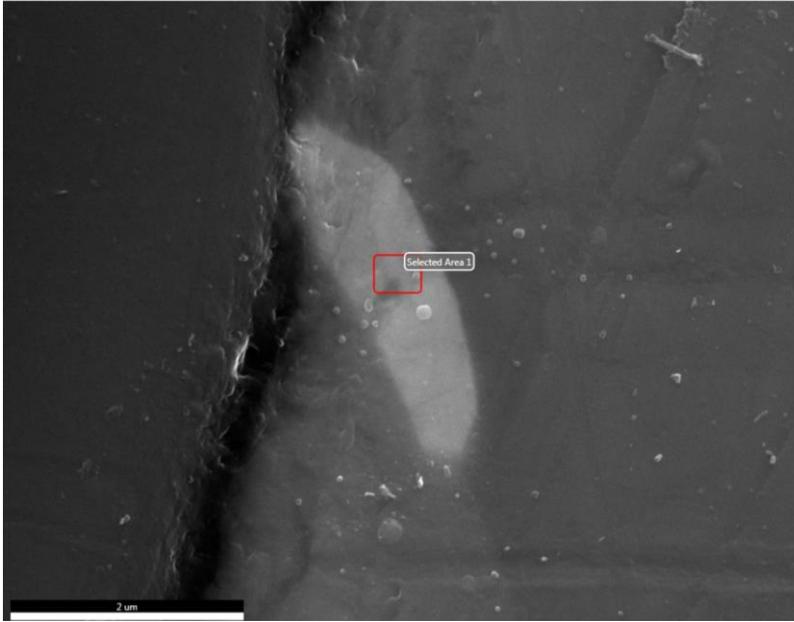
Element	Weight	Atomic	Net Int.
S K	16.3	35.35	492.41
PdL	15.09	9.86	213.58
TeL	40.9	22.29	372.56
FeK	14.41	17.94	163.63
CuK	13.3	14.56	97.67

kV: 20 Mag: 39151 Takeoff: 35.4 Live Time(s): 45 Amp 0.96 Resolution:(eV)123.9



Sample Name: DDH386_564

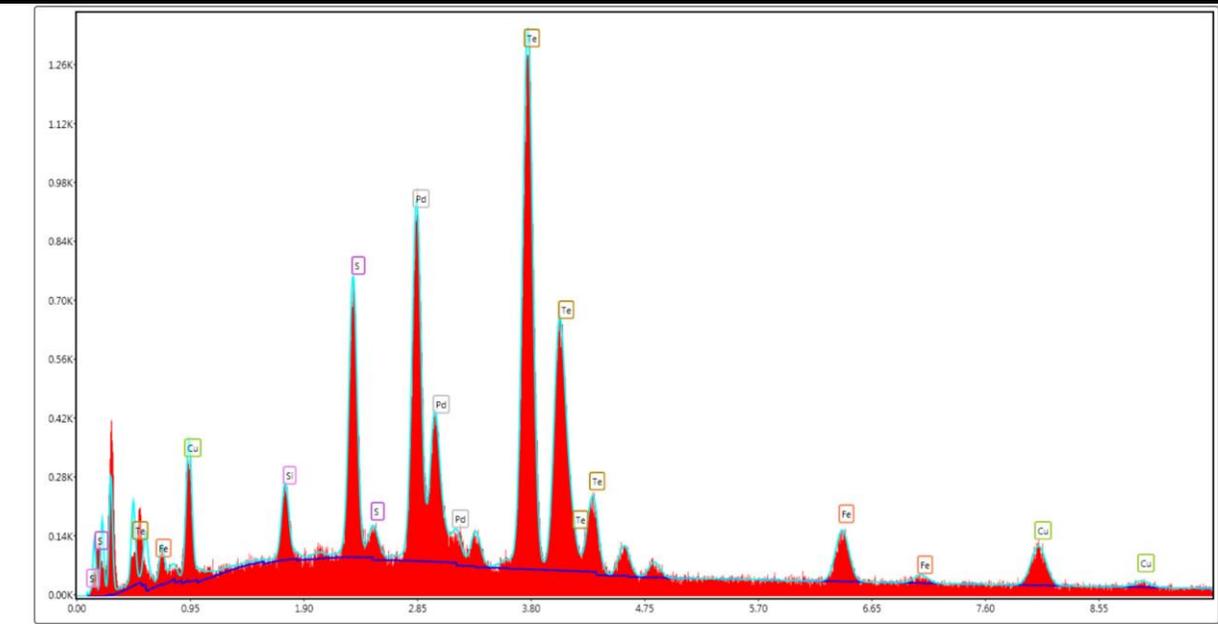
Area 1



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight	Atomic	Net Int.
SiK	2.04	6.27	57.69
S K	7.26	19.54	248.08
PdL	20.43	16.57	348.74
TeL	57.1	38.63	598.85
FeK	5.78	8.93	74.48
CuK	7.39	10.05	64.14

kV: 20 Mag: 39151 Takeoff: 35.6 Live Time(s): 45.1 Amp 0.96 Resolution:(eV 123.



Status: Idle CPS: 19 DT: 36.8 Lsec: 45.1 209 Cnts 0.530 keV Det: Octane Pro

Sample Name: DDH386_598

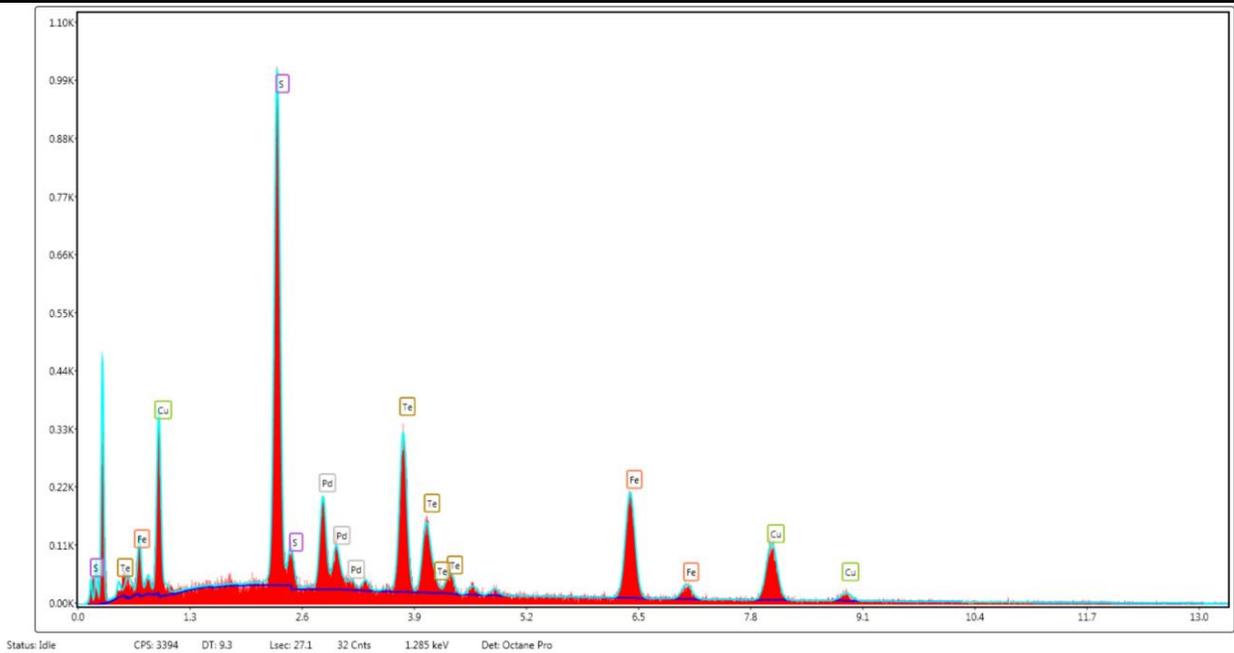
Area 7



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight	Atomic	Net Int.
S K	22.33	41.62	604.77
PdL	9.7	5.45	118.35
TeL	28.72	13.45	234.52
FeK	19.87	21.26	202.96
CuK	19.38	18.22	123.47

kV: 20 Mag:39151 Takeoff:37 Live Time(s): 27.1 Amp 0.96 Resolution:(e 123.



Anexo G: FESEM-EDS análisis de microinclusiones de electrum en bornita.

Sample Name: DDH386_598

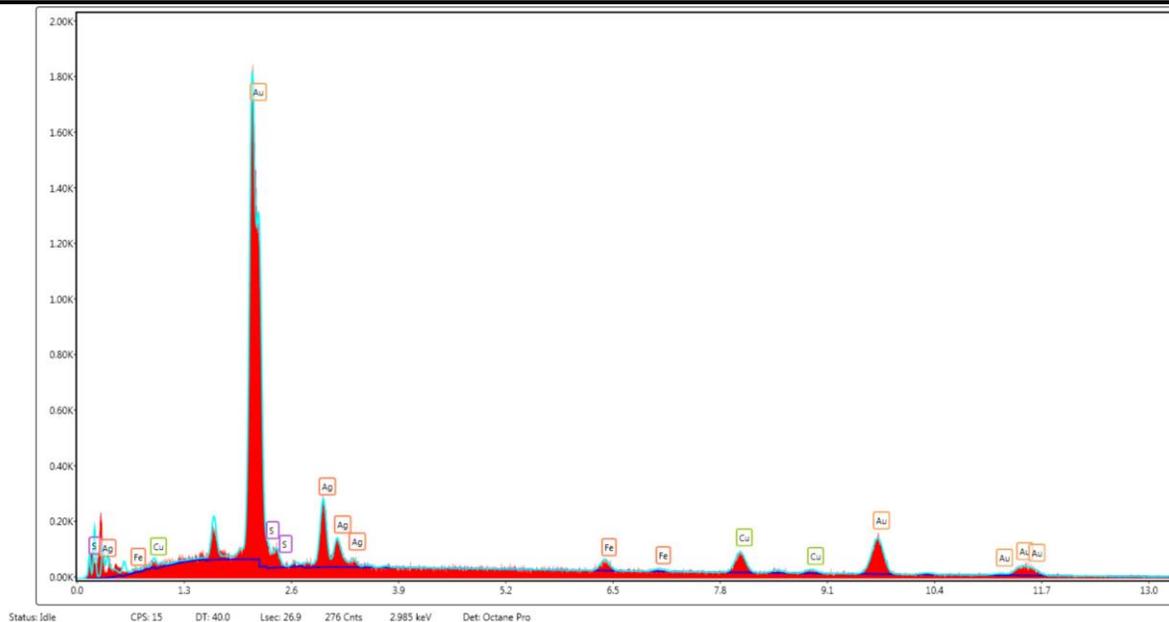
Area 8



eZAF Smart Quant Results

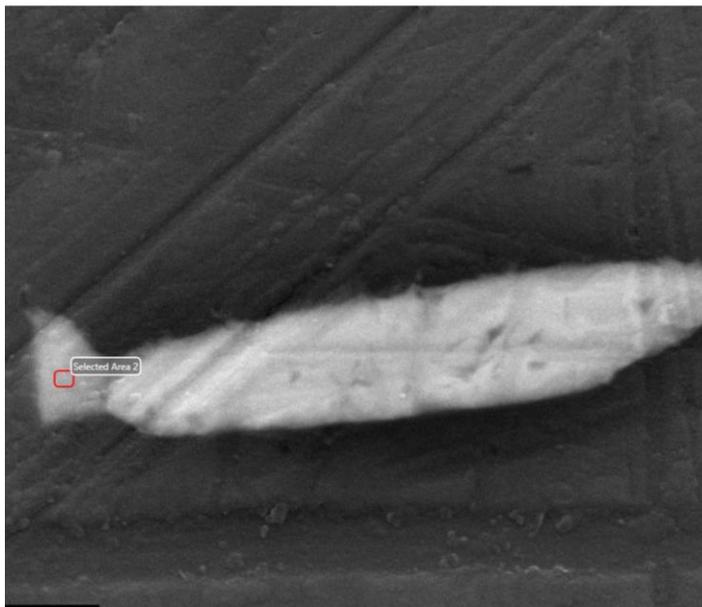
Elemen	Weigh	Atomic	Net Int.
S K	1.93	8.22	47.64
AuL	14.17	17.95	164.76
FeK	2.65	6.49	40.09
CuK	7.52	16.17	83.33
AuL	73.74	51.17	171.85

kV: 20 Mag: 32625 Takeoff: 35.6 Live Time(s): 26.9 Amp 0.96 Resolution:(eV 123.



Sample DDH812_375

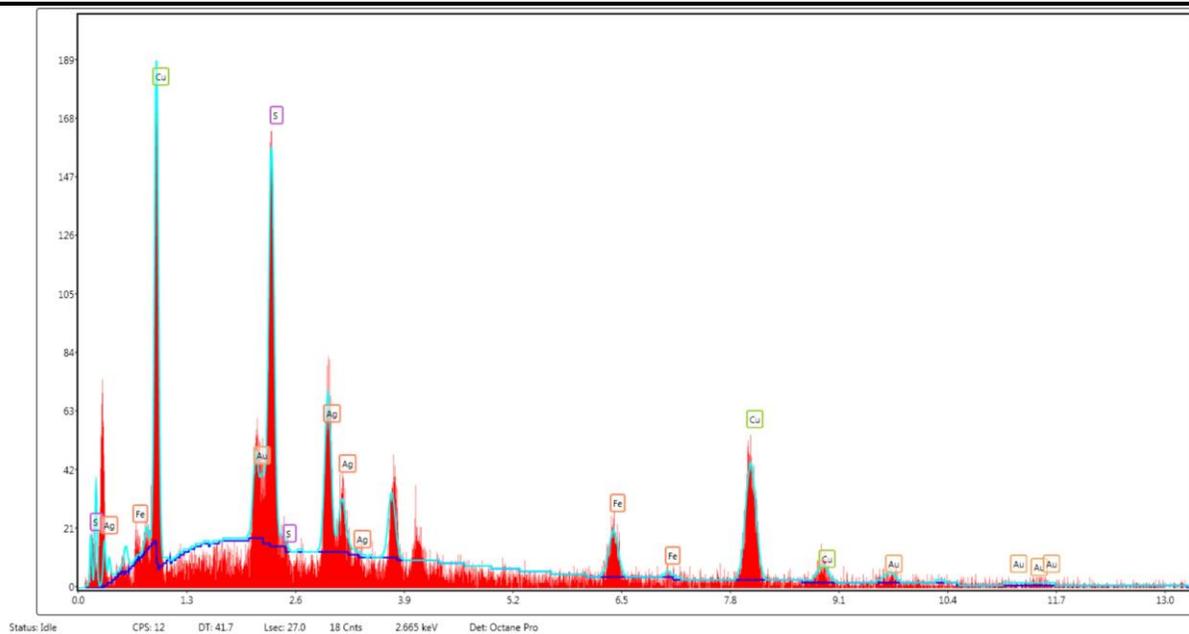
Area 4



eZAF Smart Quant Results

Elemen	Weight	Atomic	Net Int.
S K	18.98	37.42	88.8
AqL	18.27	10.7	38.62
FeK	7.81	8.85	16.8
CuK	37.68	37.49	48.35
AuL	17.25	5.54	5.18

kV: 20 Mag 52201 Takeoff 37.1 Live Time(s):27 Amp 0.96 Resolution:(eV)123.9



Anexo H: FESEM-EDS análisis de microinclusiones de AuAgHg y AuAgTe en bornita.

Sample Name: DDH386_700.1

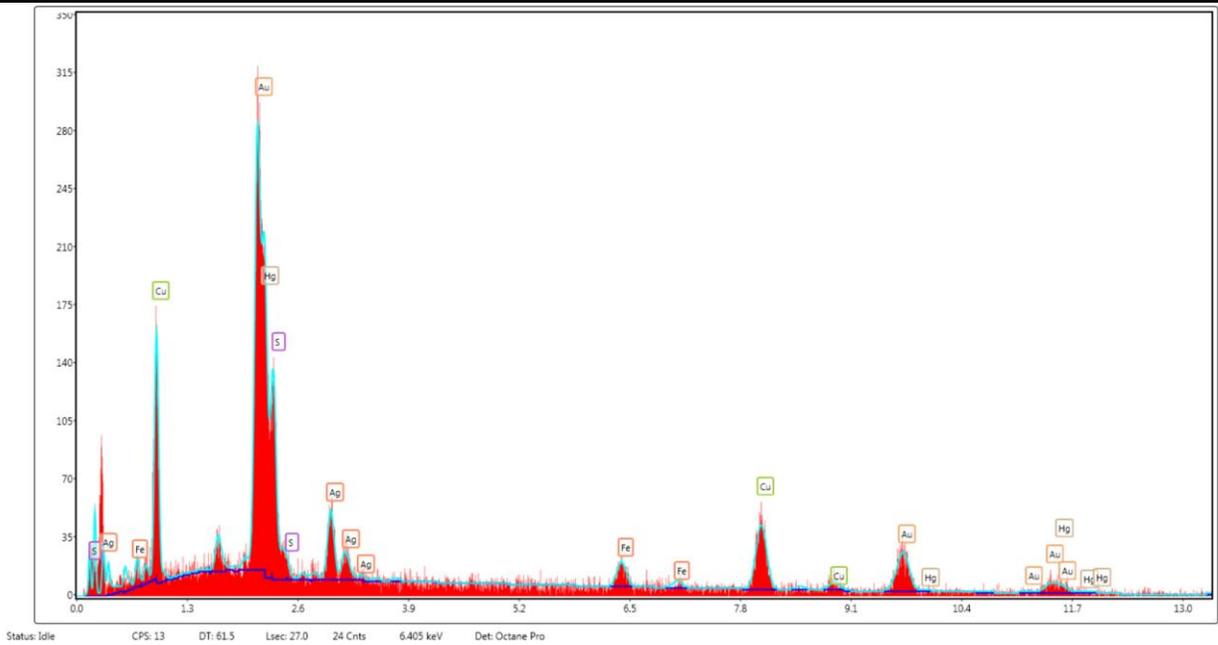
Area 3



eZAF Smart Quant Results

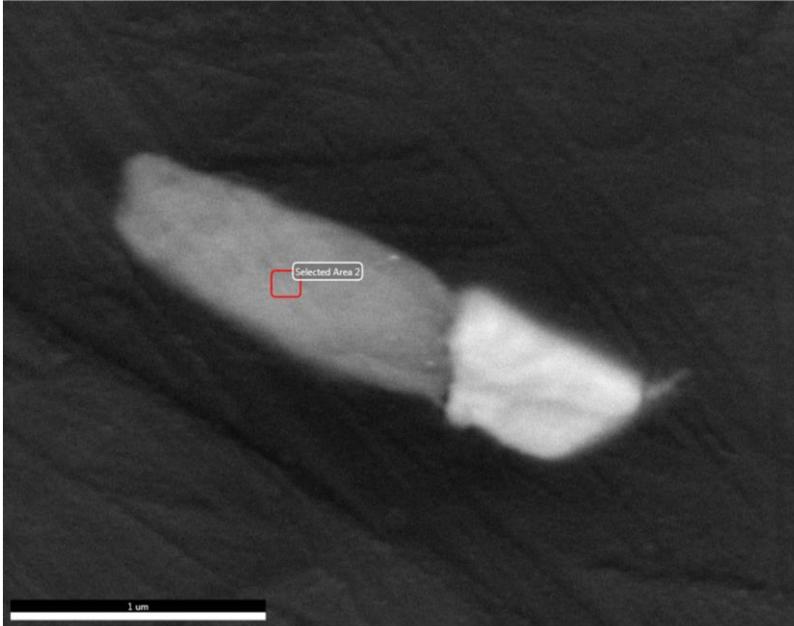
Element	Weight	Atomic	Net Int.
S K	10.36	30.71	69.35
AgL	9.4	8.28	28.53
FeK	3.94	6.7	14.96
CuK	17.3	25.87	44.75
AuL	56.3	27.16	31.38
HgL	2.7	1.28	1.34

kV: 20 Mag: 97876 Takeoff: 35.5 Live Time(s): 27 Amp 0.96 Resolution:(eV)123.9



Sample Name: DDH386_700.1

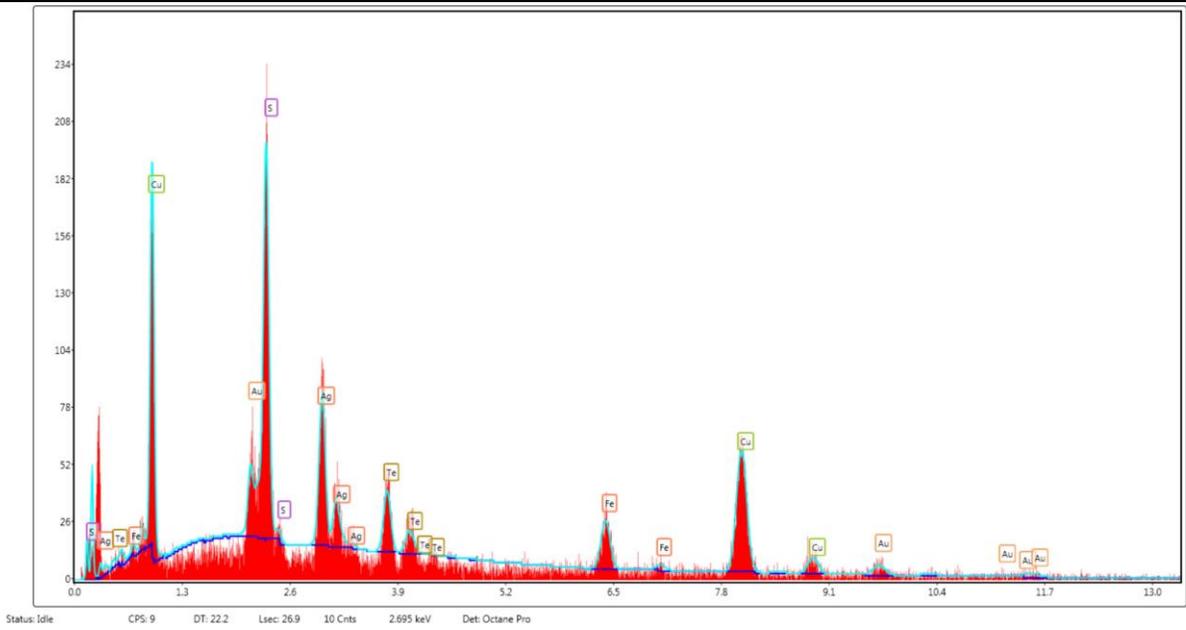
Area 3



eZAF Smart Quant Results

Elemen	Weigh	Atomic	Net Int.
S K	17.18	35.03	112.52
AqL	15.86	9.61	48.12
TeL	10.13	5.19	21.04
FeK	7.63	8.94	22.52
CuK	35.72	36.76	64.2
AuL	13.49	4.48	5.79

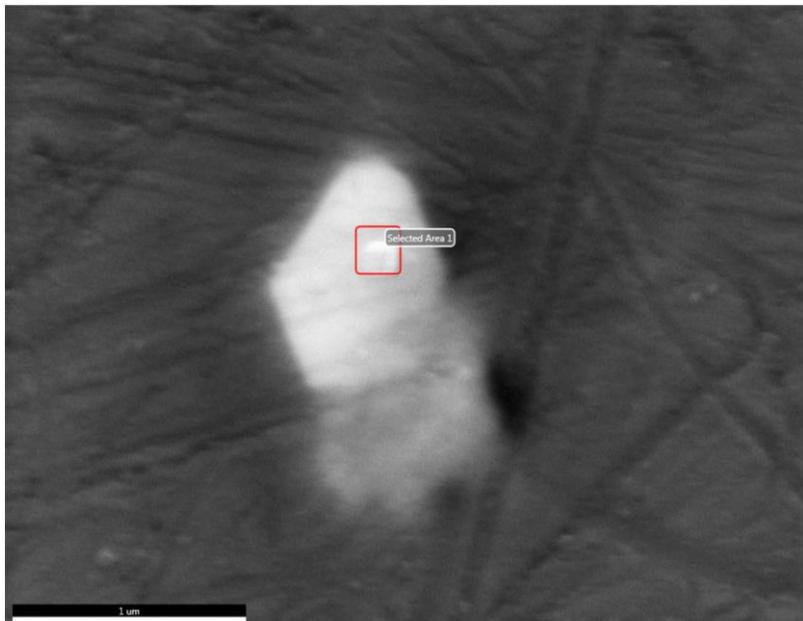
kV: 20 Mag: 97876 Takeoff: 35.5 Live Time(s): 26.9 Amp 0.96 Resolution:(eV) 123.9



Anexo I: FESEM-EDS análisis de microinclusiones de merenskyita y hessita en bornita.

Sample Name: DDH812_375

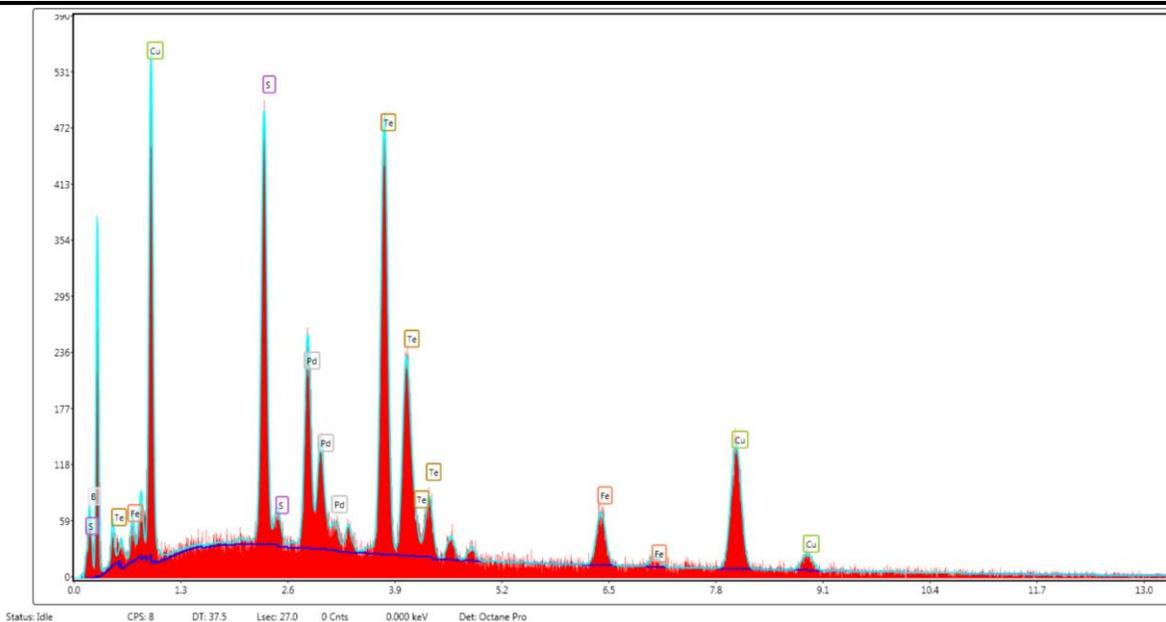
Area 2



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight	Atomic	Net Int.
B K	18.33	61.16	14.51
S K	8.99	10.12	282.63
PdL	10	3.39	151.65
TeL	37.35	10.56	358.13
FeK	4.91	3.17	57.26
CuK	20.42	11.6	150.63

kV: 20 Mag: 78301 Takeoff: 37.4 Live Time(s): 27 Amp 0.96 Resolution:(eV)123.9



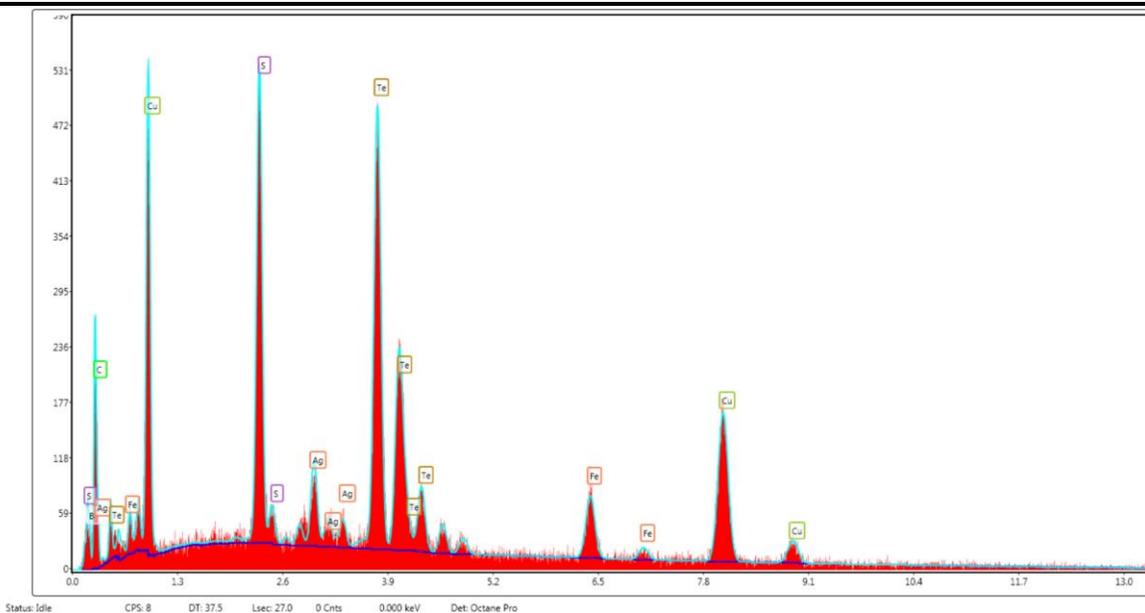
Area 2



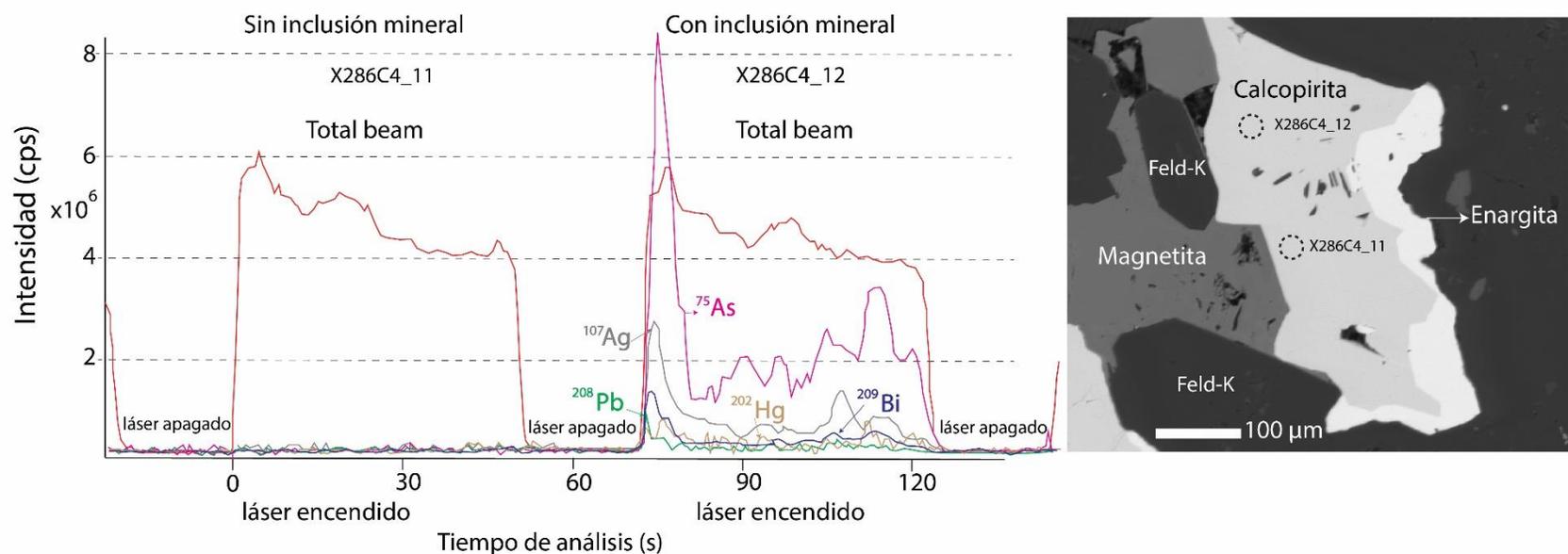
eZAF Smart Quant Results

Element	Weight	Atomic	Net Int.
B K	14.74	34.43	14.74
C K	20.42	42.95	77.36
S K	7.7	6.07	316.79
AgL	3.24	0.76	63.58
TeL	29.43	5.83	369.15
FeK	4.57	2.06	67.9
CuK	19.9	7.91	182.34

kV: 20 Mag: 78301 Takeoff: 37.4 Live Time(s): 27 Amp 0.96 Resolution:(eV)123.9

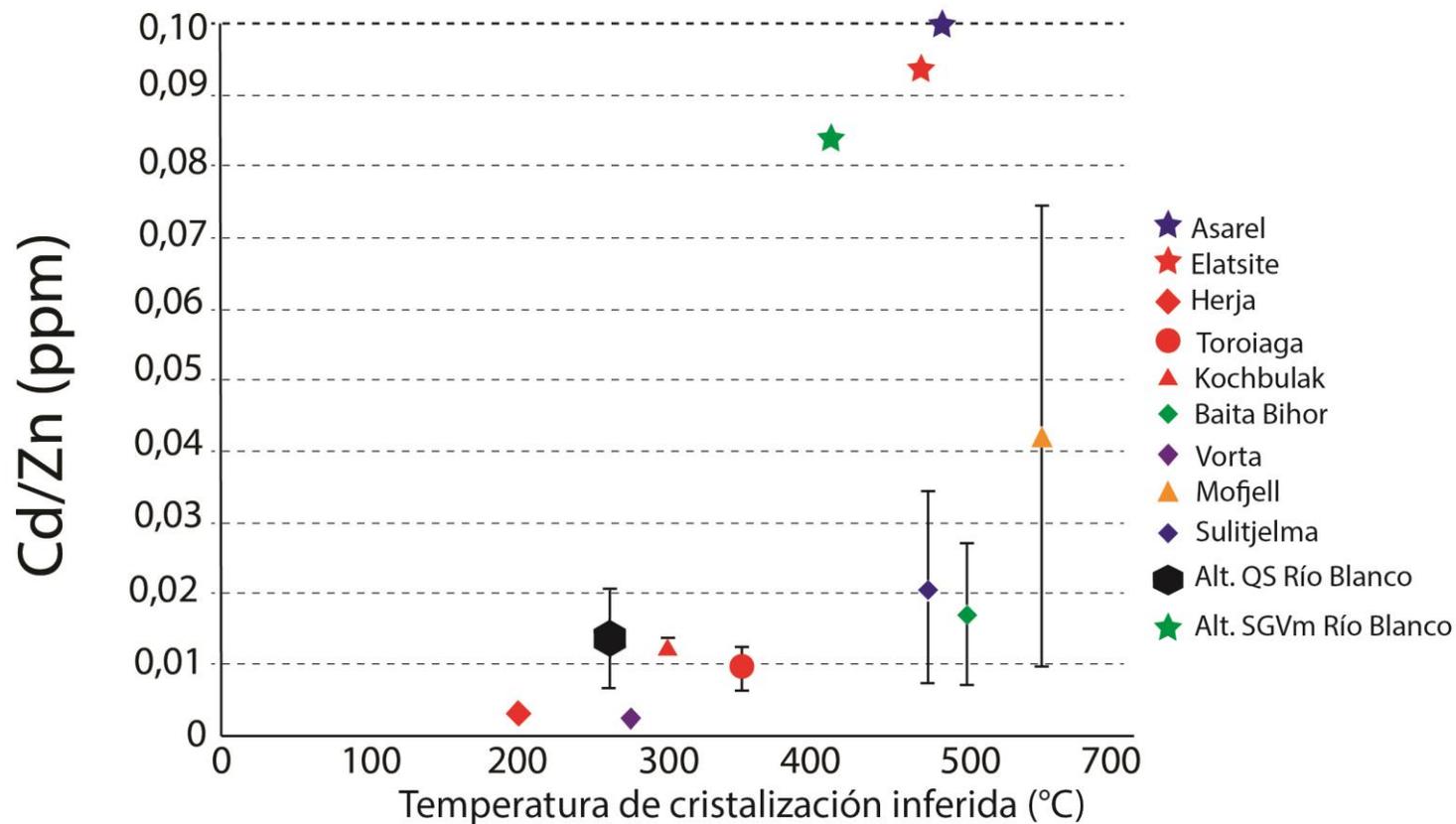


Anexo J: Perfiles de concentración LA-ICP-MS (tiempo vs. intensidad) de isótopos seleccionados en calcopirita de la zona de alteración cuarzo-sericita. (Sondaje TSS-62_286.5).



Análisis X286C5_11 sin inclusión mineral, análisis X286.5C4_12 con inclusión mineral de ⁷⁵As, ¹⁰⁷Ag, ²⁰⁸Pb, ²⁰²Hg, ²⁰⁹Bi. La señal total beam representada en color rojo. Imagen de electrones electrodispersados de un grano de calcopirita-enargita, círculos segmentados representan los análisis LA-ICP-MS.

Anexo K: Diagrama de razones Cd:Zn en calcopiritas con temperaturas de cristalización inferida, modificado de Luke et. Al., 2018



Asarel, Elatsite y Río Blanco son yacimientos tipo pórfido de cobre; Herja, Toroinga y Kochbulak son yacimientos epitermales; Baita Bihor yacimiento skarn; Vorta y Sulitjelma yacimientos VMS; Mofjell yacimiento SEDEX; Río Blanco yacimiento pórfido de Cu-Mo, alteración sericita gris verde moderada (SGVm) presenta una elevada razón Cd:Zn (estrella verde), alteración cuarzo-sericita (QS), presenta razones Cd:Zn entre 0,001 y 0,025. Las temperaturas de cristalización inferidas para Río Blanco fueron tomadas del trabajo de Frikken 2004.