



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



**MODELO TRIDIMENSIONAL DE UNIDADES DE
MINERALIZACIÓN DEL YACIMIENTO ANTUCOYA.
REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE.**



Memoria para optar al Título de Geóloga

Javiera Andrea Adriazola Cuevas

Profesor Patrocinante: Dr. Oscar Jerez Riveros
Profesional Guía: Sra. Xiomara Rubio Pereira
Profesores Comisión: Dra. Fernanda Álvarez Amado
Msc. Abraham González Martínez

Concepción, 2021

A mi madre y hermanos



ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.2. ALCANCES	2
1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS	3
1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO	4
1.4.1. ETAPA DE GABINETE 1	4
1.4.2. ETAPA DE TERRENO.....	4
1.4.3. ETAPA DE GABINETE 2	4
1.5. TRABAJOS ANTERIORES	5
1.6. AGRADECIMIENTOS	6
2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	8
2.1. ROCAS ESTRATIFICADAS	8
2.1.1. FORMACIÓN EL TOCO (Pzt).....	8
2.1.2. FORMACIÓN LA NEGRA (Jln).....	8
2.1.3. FORMACIÓN AUGUSTA VICTORIA (Ksc)	10
2.1.4. GRAVAS Y SEDIMENTOS ALUVIALES (OMga)	11
2.2. ROCAS INTRUSIVAS	11
2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	11
2.3.1. SISTEMA DE FALLAS DE ATACAMA (SFA)	11
2.3.2. PLEGAMIENTOS.....	12
2.3.3. DISCORDANCIAS	13
2.4. MARCO METALOGENÉTICO	13
2.4.1. FRANJA DE PÓRFIDOS CRETÁCICO INFERIOR	15
3. GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO	16
3.1. UNIDADES LITOLÓGICAS	17
3.1.1. UNIDADES ESTRATIFICADAS	17
3.1.1.1. Unidad Volcánica	17
3.1.1.2. Depósitos No Consolidados	18
3.1.2. ROCAS NO ESTRATIFICADAS.....	18
3.1.2.1. Intrusivo granodiorítico	18
3.1.2.2. Pórfido Antucoya	19
3.1.2.3. Pórfido Buey Muerto	19
3.1.2.4. Pórfido Tonalítico	20
3.1.2.5. Brechas	20
3.1.2.6. Pórfido Postmineral	21
3.1.2.7. Diques tardíos	21
3.2. ESTRUCTURAS	21
3.3. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL	23
3.3.1. ALTERACIÓN POTÁSICA	23

3.3.2. ALTERACIÓN CLORÍTICA	23
3.3.3. ALTERACIÓN CUARZO-SERICÍTICA	24
3.3.4. ALTERACIÓN PROPILÍTICA	24
3.3.5. ALTERACIÓN SUPÉRGENA	24
3.4. MINERALIZACIÓN.....	24
3.4.1. MINERALIZACIÓN HIPÓGENA	25
3.4.2. MINERALIZACIÓN SUPÉRGENA	26
3.4.2.1. Zona Lixiviada.....	26
3.4.2.2. Zona de Oxidados de Cobre	26
3.4.2.3. Zona Mixta.....	26
3.4.2.4. Zona de Sulfatos	27
4. CONTEXTO GEOMETALÚRGICO.....	28
4.1. LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE COBRE	28
4.2. PROCESO EN ANTUCOYA	29
4.3. MODELO DE UNIDADES GEOMETALÚRGICAS.....	31
4.3.1. INFORMACIÓN HISTÓRICA.....	31
4.3.2. UGM ACTUALES	33
5. BASE DE DATOS	35
5.1. MAPEO GEOLÓGICO	35
5.1.1. MINERALOGÍA	35
5.1.1.1. Óxidos de cobre	35
5.1.1.2. Sulfuros	36
5.1.1.3. Minerales de alteración.....	37
5.1.1.4. Óxidos de hierro	38
5.1.2. ESTRUCTURAS.....	38
5.1.3. LITOLOGÍA.....	38
5.1.4. ZONA DE ALTERACIÓN	39
5.1.5. ZONA MINERAL	39
5.2. NIR.....	40
5.3. MINERALOGÍA AUTOMATIZADA TIMA (TESCAN).....	41
5.4. DRX.....	42
5.5. INFORMACIÓN QUÍMICA.....	42
5.5.1. COBRE TOTAL Y COBRE SOLUBLE.....	42
5.5.2. EXTRACCIÓN PARCIAL	42
5.5.3. EXTRACCIÓN PARCIAL	43
5.5.4. EXTRACCIÓN SECUENCIAL.....	44
5.6. INFORMACIÓN GEOMETALÚRGICA.....	44
6. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	45
6.1. VALIDACIÓN DE LA BASE DE DATOS	45
6.1.1. VALIDACIÓN MAPEO GEOLÓGICO	45
6.1.1.1. Zona de alteración.....	45
6.1.1.2. Zona mineral.....	49
6.1.1.3. Leyes visuales.....	52
6.1.2. VALIDACIÓN ESTUDIOS MINERALÓGICOS.....	55
6.1.2.1. Validación resultados TESCAN con análisis químicos.....	55
6.1.2.2. Comparación mineralogía TESCAN y DRX	56

6.1.3. VALIDACIÓN MENAS EXTRACCIÓN PARCIAL	57
6.1.3.1. Mapeo en terreno	59
6.1.3.2. Base de datos de mapeo	59
6.1.3.3. Análisis mineralógicos	63
6.2. ANÁLISIS INFORMACIÓN QUÍMICA	64
6.2.1. CONTROL GEOLÓGICO DE CUT Y CUS (EN ÁCIDO SULFÚRICO)	65
6.3. ANÁLISIS DE ESTUDIOS MINERALÓGICOS	71
6.3.1. TESCAN.....	71
6.3.1.1. Grupo Baja Solubilidad	72
6.3.1.2. Grupo Baja Ley	72
6.3.1.3. Grupo Ley Media	73
6.3.1.4. Grupo Alta Ley	74
6.3.2. DRX.....	75
6.3.2.1. Grupo Baja Solubilidad	76
6.3.2.2. Grupo Baja Ley	77
6.3.2.3. Grupo Ley Media	77
6.3.2.4. Grupo Alta Ley	78
6.3.3. MAPEO	78
6.3.3.1. Grupo Baja Solubilidad	80
6.3.3.2. Grupo Baja Ley	81
6.3.3.3. Grupo Ley Media	82
6.3.3.4. Grupo Alta Ley	82
7. UNIDADES DE MINERALIZACIÓN	84
7.1. DEFINICIÓN DE UNIDADES	84
7.1.1. DATOS UTILIZADOS	84
7.1.2. ASOCIACIONES DE MENA	85
7.1.3. CODIGO DE CLASIFICACIÓN	89
7.2. CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES	91
7.2.1. CARACTERIZACIÓN GENERAL.....	91
7.2.1.1. Unidad PRI (Primario)	92
7.2.1.2. Unidad MIX (Mixto)	94
7.2.1.3. Unidad MIX-SEC (Mixto con sulfuros secundarios)	95
7.2.1.4. Unidad OXN-LIM (Óxidos negros y limonitas)	96
7.2.1.5. Unidad OXV (Oxidados verdes)	98
7.2.1.6. Unidad SULF (Sulfatos de hierro con cobre)	99
7.2.2. DIFERENCIAS POR SECTOR	100
7.2.2.1. Unidad PRI (Primario)	101
7.2.2.2. Unidad MIX (Mixto)	101
7.2.2.3. Unidad MIX-SEC (Mixto con sulfuros secundarios)	103
7.2.2.4. Unidad OXN-LIM (Óxidos negros y limonitas)	104
7.2.2.5. Unidad OXV (Oxidados verdes)	106
7.2.2.6. Unidad SULF (Sulfatos de hierro con cobre)	107
7.2.3. DIFERENCIAS POR ALTERACIÓN DOMINANTE.....	108
7.2.3.1. Unidad MIX (Mixto)	108
7.2.3.2. Unidad MIX-SEC (Mixto con sulfuros secundarios)	109
7.2.3.3. Unidad OXN-LIM (Óxidos negros y limonitas)	111

7.2.3.4. Unidad OXV (Oxidados verdes)	112
7.3. VALIDACIÓN DE UNIDADES	113
7.3.1. RESULTADOS DE SOLUBILIDAD	113
7.3.1.1. Extracción secuencial	113
7.3.1.2. Extracción parcial	115
7.3.2. MINERALOGÍA	116
7.3.2.1. TESCAN	116
7.3.2.2. NIR	118
7.4. RESPUESTA METALÚRGICA EN PRUEBAS ISO PH	119
8. MODELAMIENTO DE UNIDADES	123
8.1. CONDICIONES DE BORDE	123
8.2. SUPERFICIES DE CONTACTO Y CRONOLOGÍA DE SUPERFICIES	124
8.2.1. SUPERFICIE ROCA FRESCA	126
8.2.2. SUPERFICIE DE CONTACTO PRI	126
8.2.3. SUPERFICIE DE CONTACTO MIX-SEC	128
8.2.4. SUPERFICIE DE CONTACTO MIX	129
8.2.5. SUPERFICIE DE CONTACTO SULF	131
8.2.6. SUPERFICIE DE CONTACTO OXV - OXN-LIM	131
8.3. ESTRUCTURAS Y DOMINIOS ESTRUCTURALES	132
8.3.1. DOMINIO N	132
8.3.2. DOMINIO E	133
8.3.3. DOMINIO S	133
8.3.4. DOMINIO W	135
8.3.5. DOMINIO NW	136
8.3.6. DOMINIO CENTRAL	136
8.4. MODELO COMPLETO	137
9. CONCLUSIONES	14040
REFERENCIAS	1422

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación mina Antucoya	3
2. 1. Mapa geológico regional	9
2. 2. Franjas metalogenéticas de Chile	14
3. 1. Sectores del yacimiento simplificado	16
3. 2. Distribución de litologías en el yacimiento	17
3. 3. Esquema estructural de Antucoya	22
3. 4. Modelo de alteración y mineralización del yacimiento	25
4. 1. Etapas del proceso de Antucoya	30
4. 2. UGM conceptual 2013	32
4. 3. Vista en planta de modelos geometalúrgicos 2015-2016	32
4. 4. Clasificación de UGM de Antucoya	33

5. 1. Distribución de información de óxidos de cobre en el yacimiento	35
5. 2. Distribución de porcentajes de óxidos de cobre	36
5. 3. Distribución de porcentajes de sulfuros.....	37
5. 4. Distribución de información de minerales de alteración en el yacimiento.....	37
5. 5. Litologías del yacimiento según su abundancia en los sondajes mapeados	38
5. 6. Distribución de datos NIR en el yacimiento.....	40
5. 7. Distribución de datos TESCAN en el yacimiento	41
5. 8. Distribución de datos DRX en el yacimiento	42
5. 9. Distribución datos cobre total y cobre soluble en el yacimiento.....	43
5.10. Distribución datos extracción parcial en el yacimiento.....	43
5.11. Distribución muestras extracción secuencial en el yacimiento	44
5.12. Distribución de muestras con pruebas de extracción de cobre.....	45
6. 1. Porcentaje relativo de minerales de alteración por zona de alteración.....	46
6. 2. Distribución de porcentajes relativos de minerales de alteración mapeados por zona de alteración	46
6. 3. Minerales NIR por zona de alteración	47
6. 4. Minerales TESCAN por zona de alteración	47
6. 5. Mineralogía de ganga DRX por zona de alteración	48
6. 6. Porcentajes en volumen de menas mapeadas por zona mineral asignada	49
6. 7. Distribución de porcentajes de menas de mapeo por zona mineral.....	50
6. 8. Menas TESCAN por zona mineral.....	51
6. 9. Menas DRX por zona mineral	52
6.10. Distribución de errores en leyes de mapeo	53
6.11. Errores ley visual por alteración.....	53
6.12. Errores ley visual por zona mineral.....	54
6.13. Error ley visual por litología.....	55
6.14. Distribución de errores en leyes TESCAN.....	56
6.15. Gráficos de dispersión por mineral con porcentajes TESCAN y DRX.....	57
6.16. Ubicación de las secciones tipo en Antucoya.....	60
6.17. Brocantita mapeada comparada con PTXT en secciones tipo.....	60
6.18. Crisocola mapeada comparada con PTXT en secciones tipo	61
6.19. Óxidos negros mapeados comparados con PTXT en secciones tipo.....	62
6.20. Sulfatos (szomolnokita) mapeados comparados con PTXT en secciones tipo	63
6.21. Comparación de mineralogía TESCAN y estimada por PTXT.....	64
6.22. Comparación de mineralogía DRX y estimada por PTXT.....	64
6.23. Razón de solubilidad y cobre total por litología.....	66
6.24. Razón de solubilidad y cobre total por zona mineral	66
6.25. Razón de solubilidad y cobre total por zona de alteración	67
6.26. Diagrama ternario cuarzo-muscovita-caolinita	68
6.27. Diagrama ternario cuarzo-caolinita-plagioclasa.....	68
6.28. Diagrama ternario cuarzo-caolinita-calcita	69
6.29. Diagrama ternario cuarzo-caolinita-clinocloro.....	69
6.30. Diagrama ternario cuarzo-muscovita-szomolnokita.....	70
6.31. Diagrama ternario calcita-szomolnokita-clinocloro	70
6.32. División datos TESCAN en grupos CuT-RS y menas de cada uno	71
6.33. Menas TESCAN por subgrupos baja solubilidad.....	73
6.34. Menas TESCAN por subgrupos alta solubilidad-baja ley.....	73

6.35. Menas TESCOAN por subgrupos alta solubilidad-ley intermedia	74
6.36. Menas TESCOAN por subgrupos alta solubilidad-alta ley.....	75
6.37. División datos DRX en grupos CuT-RS y menas de cada uno	75
6.38. Menas DRX por subgrupos baja solubilidad.....	76
6.39. Menas DRX por subgrupos alta solubilidad-baja ley	77
6.40. Menas DRX por subgrupos alta solubilidad-ley intermedia	78
6.41. Menas DRX por subgrupos alta solubilidad-alta ley.....	79
6.42. División datos de mapeo en grupos CuT-RS y menas de cada uno	79
6.43. Menas mapeo por subgrupos baja solubilidad.....	80
6.44. Menas mapeo por subgrupos baja solubilidad filtrado.....	81
6.45. Menas mapeo por subgrupos alta solubilidad-baja ley.....	81
6.46. Menas mapeo por subgrupos alta solubilidad-ley intermedia	82
6.47. Menas TESCOAN por subgrupos alta solubilidad-alta ley.....	83
7. 1. Muestra de la unidad OXV	86
7. 2. Muestras de la unidad OXN-LIM.....	86
7. 3. Muestras de la unidad PRI.....	87
7. 4. Muestras de la unidad MIX	87
7. 5. Muestra de la unidad MIX-SEC	88
7. 6. Muestras de la unidad SULF	89
7. 7. Menas por RS	90
7. 8. Árbol de decisión para clasificación de unidades.....	90
7. 9. Porcentaje de tramos por unidad, del total de sondajes codificados	91
7.10. Distribución de cobre total y RS por unidad	92
7.11. Porcentajes relativos de menas y minerales de alteración de la unidad PRI	93
7.12. Datos de alta solubilidad unidad PRI	94
7.13. Porcentajes relativos de menas y minerales de alteración de la unidad MIX.....	94
7.14. Porcentajes relativos de menas y minerales de alteración de la unidad MIX-SEC.....	96
7.15. Porcentajes relativos de menas y minerales de alteración de la unidad OXN-LIM	97
7.16. Porcentajes relativos de menas y minerales de alteración de la unidad OXV.....	98
7.17. Porcentajes relativos de menas y minerales de alteración de la unidad SULF.....	99
7.18. División de sectores utilizada para comparación	100
7.19. Valores de cobre total y RS de la unidad PRI por sector	101
7.20. Menas y gangas de la unidad PRI por sector.....	102
7.21. Valores de cobre total y RS de la unidad MIX por sector.....	102
7.22. Menas y gangas de la unidad MIX por sector	103
7.23. Valores de cobre total y RS de la unidad MIX-SEC por sector	104
7.24. Menas y gangas de la unidad MIX-SEC por sector.....	104
7.25. Valores de cobre total y RS de la unidad OXN-LIM por sector	105
7.26. Menas y gangas de la unidad OXN-LIM por sector.....	105
7.27. Valores de cobre total y RS de la unidad OXV por sector	106
7.28. Menas y gangas de la unidad OXV por sector	106
7.29. Valores de cobre total y RS de la unidad SULF por sector.....	107
7.30. Menas y gangas de la unidad SULF por sector	107
7.31. Valores de cobre total y RS de la unidad MIX por mineral de alteración dominante....	109
7.32. Menas y gangas de la unidad MIX por mineral de alteración dominante	109
7.33. Valores de cobre total y RS de la unidad MIX-SEC por mineral de alteración dominante	110

7.34. Menas y gangas de la unidad MIX-SEC por mineral de alteración dominante	110
7.35. Distribución de los porcentajes de sulfuros secundarios por mineral de alteración dominante	111
7.36. Valores de cobre total y RS de la unidad OXN-LIM por mineral de alteración dominante	111
7.37. Menas y gangas de la unidad OXN-LIM por mineral de alteración dominante.....	112
7.38. Valores de cobre total y RS de la unidad OXV por mineral de alteración dominante...	112
7.39. Menas y gangas de la unidad OXV por mineral de alteración dominante	113
7.40. Resultados de solubilidad de muestras analizadas mediante extracción secuencial	114
7.41. Resultados de solubilidad de muestras analizadas mediante extracción parcial	115
7.42. Mineralogía TESCOAN promedio por unidad.....	117
7.43. Mineralogía de alteración mapeada por unidad.....	118
7.44. Mineralogía NIR por unidad.....	119
7.45. Resultados de pruebas de extracción de cobre	120
7.46. Razón entre extracción de cobre y RS en ácido sulfúrico	121
7.47. Razón de extracción de cobre / RS CUS de la unidad PRI	122
8. 1. Resultado de modelamiento según temporalidad de intrusión definida	125
8. 2. Metodología de revisión de anomalías espaciales	125
8. 3. Superficie ROCA FRESCA.....	127
8. 4. Superficie PRI.....	127
8. 5. Superficie MIX-SEC	128
8. 6. Cuerpos MIX-SEC asociados a rasgos estructurales.....	129
8. 7. Superficie MIX	130
8. 8. Superficies zona oxidada.....	131
8. 9. Estructuras y dominios estructurales del yacimiento	132
8.10. Deformación para un elipsoide de radios relativos 4-2-1	133
8.11. Sólidos unidades Dominio N.....	134
8.12. Sólidos unidades Dominio E	134
8.13. Sólidos unidades Dominio S.....	135
8.14. Sólidos unidades Dominio W	135
8.15. Sólidos unidades Dominio NW	136
8.16. Sólidos unidades Dominio Central.....	136
8.17. Sólidos unidades modelo completo	138
8.18. Secciones del yacimiento.....	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
4.1. Velocidad de disolución de especies de cobre en ácido sulfúrico diluido.....	28
5.1. Unidades geológicas (UG) consideradas para modelamiento	39
5.2. Zona de alteración y criterios de clasificación	39
5.3. Zonas minerales y criterios de definición.....	40
6.1. Comparación menas extracción parcial con mapeo en terreno	59

7.1. Tramos de sondaje por filtro aplicado	86
7.2. Estadística de porcentajes absolutos en volumen de menas de la unidad PRI	93
7.3. Estadística de porcentajes absolutos en volumen de menas de la unidad MIX.....	95
7.4. Estadística de porcentajes absolutos en volumen de menas de la unidad MIX-SEC	96
7.5. Estadística de porcentajes absolutos en volumen de menas de la unidad OXN-LIM	97
7.6. Estadística de porcentajes absolutos en volumen de menas de la unidad OXV	98
7.7. Estadística de porcentajes absolutos en volumen de menas de la unidad SULF.....	99
8.1. Coordenadas de los límites del modelo	124



RESUMEN

La mina Antucoya es un yacimiento perteneciente al Grupo Antofagasta Minerals S.A. (AMSA), en cuya propiedad se encuentran los pórfidos de cobre Antucoya y Buey Muerto, pertenecientes a la franja de pórfidos cretácicos del norte de Chile. Está enfocada en la extracción de la zona de oxidados de cobre del sistema mineralizado, a través de una explotación a rajo abierto y procesamiento en pilas dinámicas de lixiviación ácida, con una producción anual de 72,2 kt de Cu en el 2018. Para este efecto se trabaja con unidades geometalúrgicas de extracción (UGM) definidas en función la permeabilidad y calidades físicas de la roca, sin considerar como un parámetro la mineralogía de mena, aspecto relevante en los resultados del proceso, y del que no se tiene un modelo que permita el conocimiento acabado de su variación dentro del yacimiento.

La construcción de un modelo de asociaciones de mena, requiere comprender el comportamiento de los minerales en el yacimiento y las condiciones bajo las cuales se dan las diferentes asociaciones de mena. Para esto, se estudia la amplia base de datos disponible sobre Antucoya, conformada por mapeo de sondajes, estudios mineralógicos, análisis de laboratorio y pruebas geometalúrgicas. En primer lugar se hace una revisión y validación de la información a utilizar, para posteriormente comenzar a trabajar con la información química e identificar controles geológicos del contenido de cobre y la solubilidad. Luego, se divide la información en 4 grupos de trabajo definidos por sus valores de cobre total y solubilidad, con los cuales se intenta identificar relaciones entre las menas presentes y dichos valores químicos, para finalmente trabajar de forma individual con cada uno de aquellos grupos en la identificación de relaciones entre los minerales de mena, y también con respecto a minerales de alteración.

En base a los resultados del análisis anterior, se definen 6 unidades clasificadas según los porcentajes relativos de los minerales de mena mapeados e información química de cobre total y razón de solubilidad (RS): Unidad PRI, con más de un 90% relativo de sulfuros primarios (calcopirita y algo de bornita), RS muy baja y ley media-baja, asociada a alteraciones potásica-clorítica en zona profunda, unidad MIX, con coexistencia en proporción variable de calcopirita y oxidados (principalmente brocantita y crisocola), RS menor a 60 y ley media-alta, unidad MIX-SEC, de similares características a la unidad MIX pero con presencia de sulfuros secundarios sobre un 10% relativo, unidad OXN-LIM, caracterizados por la presencia de limonitas con cobre y óxidos negros como mena principal, y contenidos menores de oxidados solubles, de baja solubilidad y baja ley, unidad OXV, con brocantita, crisocola, atacamita y/o malaquita como menas principales, de alta ley y solubilidad, y finalmente, la unidad SULF, con sulfatos de hierro con cobre como mena predominante, de alta solubilidad y ley media-baja, asociada a zonas de alteración cuarzo-sericítica fuerte.

Con estas características se construye un código de clasificación para aplicar a la base de datos, y posteriormente la mineralogía de las unidades resultantes se valida con resultados de análisis de extracción parcial y secuencial, y con estudios de mineralogía automatizada TESCAN, verificando la mineralogía de mena promedio esperable para cada unidad. Finalmente se evalúa el comportamiento de cada unidad en pruebas de iso pH, en donde se observa que la extracción de cobre se relaciona directamente a la solubilidad de las unidades.

Ya definidas y validadas las unidades, se construye un modelo tridimensional en donde se representa la distribución espacial de cada una de ellas.

1. INTRODUCCIÓN

La mina Antucoya es un yacimiento perteneciente al Grupo Antofagasta Minerals S.A. (AMSA), en cuya propiedad se encuentran los pórfidos de cobre Antucoya y Buey Muerto, pertenecientes a la franja de pórfidos cretácicos del norte de Chile. Al 2019 el proyecto contaba con recursos de 835 Mt de mineral con una ley promedio de 0,32% de cobre.

La alteración y mineralización en el yacimiento Antucoya responde en parte al modelo tradicional de pórfidos cupríferos de Lowell y Guilbert (1970), con un núcleo potásico con mineralización hipógena de calcopirita y algo de bornita en el núcleo, que pasa a pirita principalmente, hacia la roca caja, y una sobreimposición de procesos supérgenos, que derivan en el desarrollo de una zona lixiviada en superficie y bajo ella, depositación de limonitas con cobre, sulfatos de hierro con cobre y oxidados verdes de cobre, constituidos por brocantita, y escasa atacamita, malaquita, crisocola y arcillas con cobre, que en profundidad gradan a una zona mixta en la transición entre hipógeno y supérgeno, con sulfuros primarios (calcopirita) coexistiendo con las menas oxidadas ya mencionadas. El desarrollo de sulfuros secundarios es muy restringido y de poca importancia económica, con escasa calcosina y covelina. Otro aspecto relevante de la geología de este yacimiento a destacar, son las diferencias en el desarrollo de las zonas minerales y de alteración en dos sectores del yacimiento: Antucoya (sector W), con predominancia de óxidos verdes y mixtos, y alteraciones potásica-clorítica, y Buey Muerto (sector E), con mayor desarrollo de las zonas lixiviadas y de sulfatos de hierro con cobre y alteración principalmente cuarzo-sericita.

Actualmente, la mina está enfocada en la extracción de la zona de oxidados de cobre del sistema mineralizado, a través de una explotación a rajo abierto y procesamiento en pilas dinámicas mediante lixiviación ácida, con una producción anual de 72,2 kt de Cu en el 2018. Para este efecto se trabaja con unidades geometalúrgicas de extracción (UGM) definidas en función de la permeabilidad y calidades físicas de la roca, sin considerar como un parámetro la mineralogía de mena, aspecto relevante en los resultados del proceso, y del que no se tiene un modelo que permita el conocimiento acabado de su variación dentro del yacimiento.

En Antucoya existe una gran base de datos de mapeo geológico de sondajes con registro de mineralogía de mena y ganga, además de algunos estudios mineralógicos con técnicas de DRX, NIR y TESCAN, que permiten conocer la variación de los minerales en cada zona, y cómo estos

se asocian entre sí, por lo que el objetivo de este trabajo es comprender la distribución de las diferentes asociaciones minerales de mena con toda la información disponible sobre mineralogía, y complementando con análisis químicos de cobre total y cobre soluble en ácido sulfúrico, para definir unidades modelables espacialmente que permitan hacer una interpretación de secciones y plantas del yacimiento para generar un modelo tridimensional que pueda ser incorporado al modelamiento de UGM.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

- Elaborar un modelo de unidades de mineralización que pueda ser utilizado para aportar información al modelamiento de UGM.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Unificar, filtrar y ordenar la base de datos, determinando variables y muestras a trabajar.
- Reconocer en terreno geología del yacimiento y asociaciones de mena identificables en mapeo macroscópico de sondajes para posterior validación de resultados obtenidos.
- Analizar información de estudios mineralógicos y base de datos de mapeo de sondajes, para identificar correlaciones entre la información de mineralogía de mena y ganga, y contrastar con resultados de análisis químicos de cobre soluble en ácido sulfúrico y cobre total.
- Mediante análisis de la información geológica identificar asociaciones de mena principales y definir unidades de mena modelables espacialmente. Caracterizarlas en cuanto a su contenido de cobre, solubilidad, distribución espacial, mineralogía de mena y ganga.
- Interpretar distribución espacial y tendencias estructurales para generar un modelo tridimensional.

1.2. ALCANCES

El trabajo se realiza sobre una base de datos reales provenientes de campañas de sondajes, estudios mineralógicos, pruebas de laboratorio y modelos geológicos existentes para el yacimiento Antucoya. Las principales variables en estudio corresponden a los porcentajes de minerales de mena, ley de cobre y solubilidad, además de la información geológica disponible.

Con este estudio se busca comprender el comportamiento de los minerales y reconocer las principales asociaciones de mena, para posteriormente construir un modelo tridimensional que permita identificar la distribución espacial de la mineralización en el yacimiento, utilizando la información validada de mayor cobertura en el área de Antucoya, que en este caso corresponde a la mineralogía de mapeo de sondajes, cobre total y cobre soluble en ácido sulfúrico.

Dentro de los alcances de esta memoria no se contempla una integración de toda la información geológica en un modelo tridimensional, sino que se limita a un modelo de unidades de mineralización que sirva para complementar los modelos ya existentes. Tampoco se considera la realización de pruebas o análisis nuevos, es decir, se trabajará con la información disponible actualmente, sin embargo, nueva información obtenida posterior a la finalización de este estudio podrá ser incorporada al modelo resultante.

1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS

La mina Antucoya está ubicada en la Cordillera de la Costa de la Región de Antofagasta, en el norte de Chile, a una altura promedio de 1700 m s.n.m., en el sector Cerros de Buey Muerto, a 125 km al NNE de Antofagasta y a 35 km al ENE de la mina Michilla. Las coordenadas UTM de su punto central son: 7.497.000 N y 409.250 E (Figura 1.1).

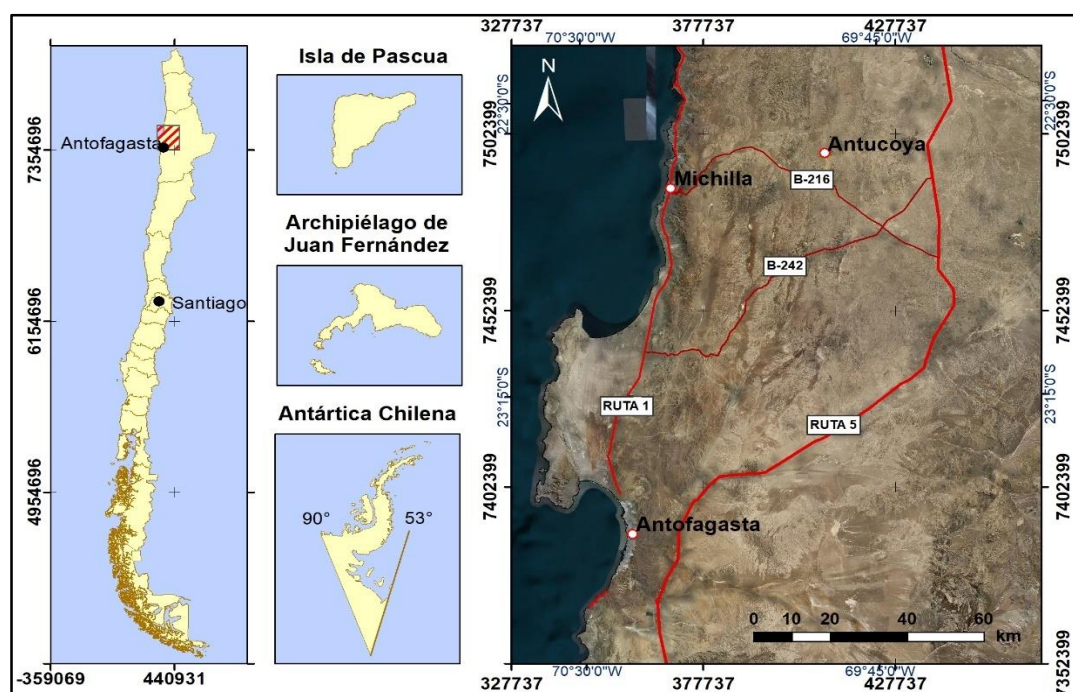


Figura 1.1: Mapa de ubicación mina Antucoya.

El acceso al área desde Antofagasta es a través de la carretera costera N° 1 hasta la planta Michilla a 105 km, y luego, por el camino B-216, en buen estado, por aproximadamente 45 km, hasta la mina. También es posible acceder desde la Ruta 5, por el camino B-216 o B-242.

1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

1.4.1. ETAPA DE GABINETE 1

Con el objetivo de conocer el contexto geológico y metalúrgico de la temática a abordar en esta tesis se realizará una etapa de revisión bibliográfica e informes:

- Revisión bibliográfica de directrices de geometalurgia de Antofagasta Minerals. Forma de trabajo para la generación de información, análisis de la data, definición de UGM's y modelamiento.
- Revisión bibliográfica (informes internos y publicaciones) de la geología regional y local del yacimiento.
- Revisión de informes respecto del proceso metalúrgico de tratamiento de los minerales de Antucoya.
- Recopilación, validación y revisión de la información de Antucoya: estudios mineralógicos y análisis químicos de sondajes y muestras bases de datos disponibles. La información será trabajada y visualizada con los *software* ioGAS y Leapfrog.

1.4.2. ETAPA DE TERRENO

Visitas a la mina, con la finalidad de conocer directamente la geología y el proceso metalúrgico del yacimiento, y comprender la base de datos utilizada en producción, para complementar la información adquirida en la etapa anterior. Se realiza mapeo geológico de algunos tramos de sondajes característicos, bajo la supervisión de los geólogos encargados de esta tarea, para ver en detalle asociaciones minerales de diferentes zonas del yacimiento, y para aprender el procedimiento de mapeo.

1.4.3. ETAPA DE GABINETE 2

Procesamiento de las bases de datos:

- Análisis de mapeos geológicos y estudios mineralógicos a muestras geometalúrgicas.
- Análisis de las correlaciones entre la información de mineralogía de mena, ganga y los resultados de análisis químicos de cobre soluble en ácido sulfúrico y cobre total, al igual que en la primera etapa de gabinete, la información será trabajada con los *software* ioGAS y Leapfrog.
- Definir asociaciones minerales que puedan ser modeladas.
- Analizar las asociaciones minerales y su respuesta metalúrgica en *test* iso pH.
- Relacionar las asociaciones de mena con resultados de análisis de extracción parcial y secuencial y de pruebas de extracción de cobre.
- Caracterizar las unidades definidas e interpretar la relación espacial de ellas mediante secciones y plantas del yacimiento.

1.5. TRABAJOS ANTERIORES

Numerosos estudios han sido realizados en el yacimiento Antucoya, entre los que se encuentran tanto informes internos de Antofagasta Minerals S. A., como publicaciones académicas. A continuación, se mencionan los más relevantes considerados en este trabajo.

Arellano (2003) realiza un estudio de la geología, alteración y mineralización en el pórfido Antucoya, poniendo principal atención en la distribución y control de esta última.

Perelló y otros (2003) describen la geología del pórfido de cobre Buey Muerto, identificando sus principales unidades geológicas y su relación con las estructuras de la zona.

Maksaev y otros (2006) determinaron la edad de cristalización del pórfido Antucoya con el método U-Pb indicando edades entre $142,7 \pm 1,6$ y $140,6 \pm 1,5$ Ma, lo que implica un período de emplazamiento relativamente corto de 2 Ma.

Rubio (2012), presenta los avances de estudios mineralógicos de Antucoya realizados mediante técnicas de DRX, TESCAN y petrografía/calcografía, entregando la recopilación y análisis de 70 muestras.

Aguirre y otros (2013), informe geometalúrgico de Antucoya, que contiene análisis de los resultados de pruebas metalúrgicas de columnas y pilas industriales, estudios mineralógicos y

análisis químicos de sondajes, para comprender el comportamiento de las variables metalúrgicas consumo de ácido y extracción de cobre, en función de variables geológicas, y generar el modelo geometalúrgico conceptual de estas para el proyecto Antucoya.

Ponce y otros (2013) realizan el modelo geológico de Antucoya basada en todos los datos y conocimiento geológico recopilado a la fecha, incluyendo una actualización de protocolos QA/QC del yacimiento y de toda la información geológica y de estimación del recurso mineral.

Lagos y otros (2015) presentan una revisión general de los aspectos geológicos del pórfido Antucoya, con énfasis en su litología, mineralogía de mena y vetillas.

GeoEstima (2016) realizan un modelo tridimensional de unidades geometalúrgicas, previo análisis estadístico de la base de datos de sondajes, caracterizaciones mineralógicas por difracción de rayos X (DRX) e infrarrojo cercano (NIR) y pruebas geometalúrgicas, para definir y caracterizar dichas unidades. Entrega modelo granulométrico, de intensidad de alteración cuarzo-sericítica, de caolinita y de zona mineral.



1.6. AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a todas las personas que fueron parte de este proceso de aprendizaje y trabajo, y que me permitieron completar con éxito esta Memoria de Título.

Este trabajo no hubiese sido posible sin la confianza, guía y apoyo de Xiomara Rubio quien me acompañó a lo largo de todo el proceso respondiendo todas mis dudas y entregándome todas las herramientas necesarias para cumplir los objetivos. Agradezco profundamente el patrocinio del Dr. Oscar Jerez, quien respaldó siempre este trabajo y mostró mucho compromiso en el desarrollo y perfeccionamiento del mismo, y a Osvaldo Gálvez, por la confianza entregada al permitirme desarrollar este tema bajo su tutoría. También quisiera agradecer a Ramón Aguirre, por toda su ayuda en la realización de la última parte de este trabajo, ya que sin él hubiese sido imposible obtener el producto final.

Asimismo, valoro la gran oportunidad que me dio Antofagasta Minerals S.A. de desarrollar este tema en sus dependencias con un gran equipo de trabajo, tanto en el edificio corporativo en Santiago, como en la mina Antucoya en Antofagasta. Agradezco especialmente a Mauricio

Garrido, por sus comentarios que contribuyeron a mejorar los resultados, y también a Gonzalo Mendoza, Gonzalo Fuster, Juan Moya, Jorge Ávila y Ariel Armella, por tener siempre la mejor disposición y ayudarme a resolver todos los inconvenientes o dudas que se me presentaban. Junto con esto, agradezco sinceramente a Sandra Diamond, por su buena disposición a orientarme durante los días en faena, y a Andrea Larraguibel y Daniela Fuentes, por su ayuda y coordinación en tantas gestiones y salidas a terreno.

La conversación con mis compañeros memoristas Mauro Castillo y Cristóbal Villanueva, ayudó a mejorar y solucionar problemas que acontecieron en la investigación, al igual que ocurrió durante toda nuestra carrera universitaria, por lo que no puedo dejar de agradecerles.

Finalmente agradezco a los profesores de la comisión, por su voluntad, paciencia y disposición, que permitió finalizar de la mejor forma este trabajo.



2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El yacimiento Antucoya se encuentra en una zona dominada por rocas sedimentarias y volcánicas dispuestas en forma discordante sobre un basamento metamórfico Devónico, intruidas por rocas plutónicas, que constituyen las raíces del Arco Magmático de La Negra (Mpodozis y Ramos, 1989). Todas estas rocas se ven afectadas por el Sistema de Fallas de Atacama, principal rasgo estructural, que controla la ocurrencia de los yacimientos tipo pórfido del área.

A continuación, se describen las principales unidades geológicas definidas en la zona, representadas en la Figura 2.1, y los rasgos estructurales más importantes, para finalmente revisar el contexto metalogénico en que el yacimiento se desarrolla.

2.1. ROCAS ESTRATIFICADAS

2.1.1. FORMACIÓN EL TOCO (Pzt)

Definida por Harrington (1961) corresponde a una intercalación rítmica de areniscas y lutitas, interpretadas como una secuencia de Bouma incompleta (Breitkreuz y Bahlburg, 1985), depositada en las cercanías de un ambiente deltaico (Breitkreuz y Bahlburg, 1985; Bobenrieth, 1980).

Se distribuye discontinuamente en la Cordillera de la Costa en dirección NNW-SSE, entre los 21°15'S y 22°15'S, con una potencia de 2.300 m (Breitkreuz y Bahlburg, 1985). Su base es desconocida, y hacia techo es sobreyacida en discordancia angular por la Formación La Negra (Breitkreuz y Bahlburg, 1985). Esta unidad además, es intruida por granitoides del Carbonífero Superior (Bobenrieth, 1980).

La edad de estas rocas ha sido asignada al Devónico debido a la presencia de flora fósil (Bobenrieth, 1980; Maksaev y Marinovic, 1980).

2.1.2. FORMACIÓN LA NEGRA (Jln)

Corresponde a una secuencia volcánica muy potente definida por García (1967), que aflora en la Cordillera de la Costa con una orientación NNE-SSW entre las localidades de Antofagasta y Chañaral (Charrier y otros, 2007).

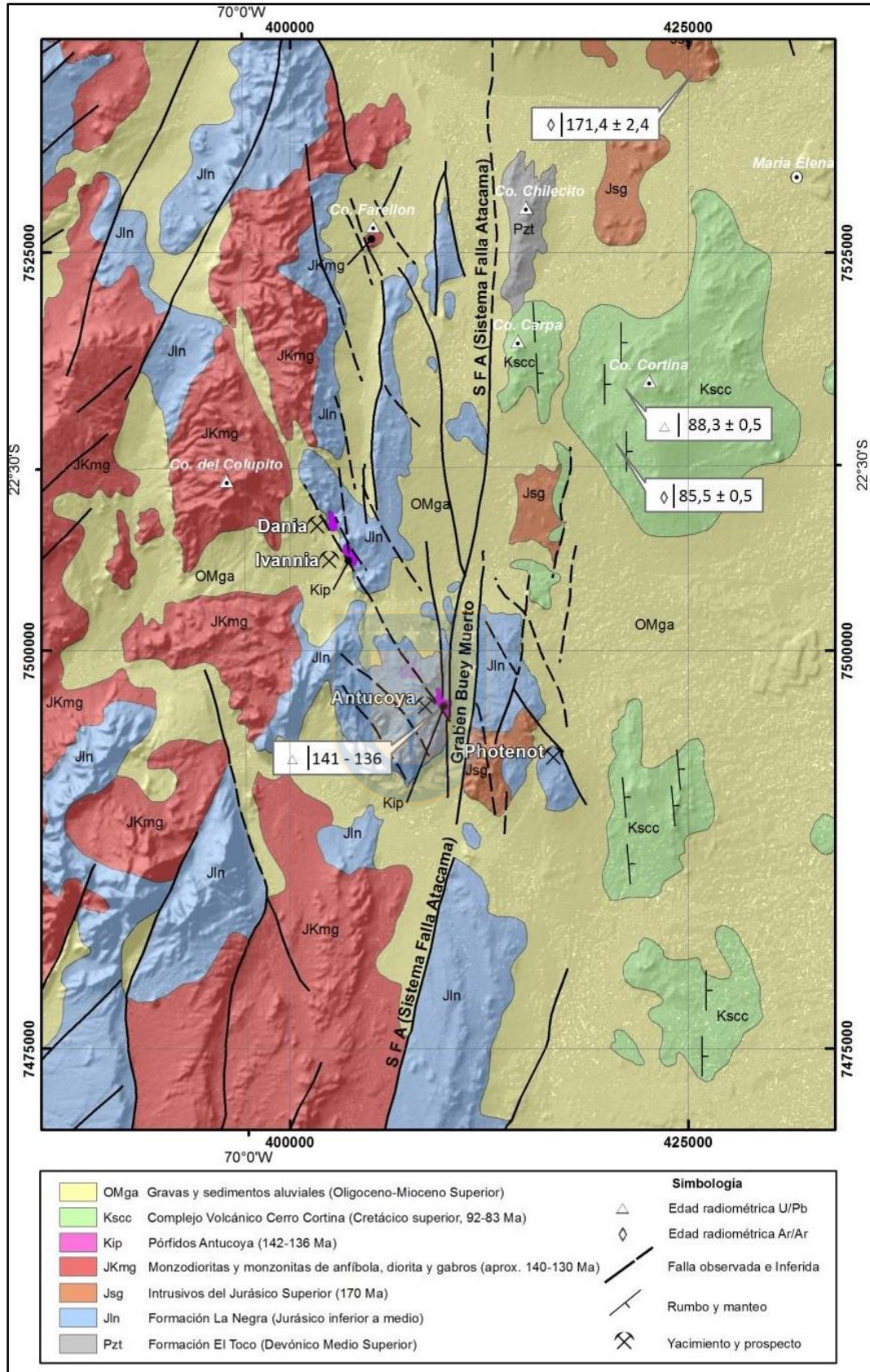


Figura 2.1: Mapa geológico regional. Ponce y otros (2013).

Comprende potentes espesores de coladas de lava, predominantemente andesitas basálticas, cantidades menores de basaltos y escasamente shoshonitas (Buchelt y Tellez, 1988), con textura porfídica a microporfídica, y en algunos casos amigdaloidal o brechoza (Ferraris y Di Biase, 1978). Contiene en menor medida rocas volcanoclásticas, principalmente tobas y brechas eruptivas, y sedimentarias, areniscas y conglomerados, depositados en un ambiente submarino (Bulchelt y Tellez, 1988).

Esta unidad, junto con las formaciones Oficina Viz, Camarca y Los Tarros, conforma el Arco Magmático La Negra (Charrier y otros, 2007; Mpodozis y Ramos, 1989), con una extensión de más de 1.000 km en el norte del país (Mpodozis y Ramos, 1989), que se origina en un contexto de subducción, bajo un régimen extensional a transtensional (Oliveros y otros, 2007).

La formación tiene un espesor estimado en 7.000 m (Buchelt y Tellez, 1988; Muñoz y otros, 1988), sobreyaciendo concordantemente a las formaciones Pan de Azúcar, La Posada y Cerros de Cuevitas (Muñoz y otros, 1988) y subyaciendo de manera concordante a las areniscas y conglomerados rojos de la Formación Caleta Coloso (Muñoz y otros, 1988).

Dataciones radiométricas indican una edad de 175 a 137 Ma, donde la principal actividad magmática estaría concentrada entre los 159 a 137 Ma (Oliveros, 2005; Basso, 2004).

2.1.3. FORMACIÓN AUGUSTA VICTORIA (Ksc)

Secuencia volcánica compuesta por coladas de lava andesíticas porfídicas y amigdaloidales, brechas volcánicas, ignimbritas y bancos silíceos de coloración blanca y gris (Arellano, 2003; García, 1967), definida por García (1967), también conocida como Complejo Volcánico Cerro Cortina (Ponce y otros, 2013).

Se distribuye en dos franjas discontinuas de orientación N-S, en donde sobreyace en discordancia angular a las rocas de la Formación La Negra y subyace en discordancia erosiva a depósitos terciarios y cuaternarios. La edad de la formación es Cretácico Superior-Paleógeno (Ferraris y Dibiase, 1978), determinada en base a sus relaciones estratigráficas. Se correlaciona con la Formación Azabache (Ferraris y Dibiase, 1978) y la Formación Chile-Alemania (Naranjo y Puig, 1984).

2.1.4. GRAVAS Y SEDIMENTOS ALUVIALES (OMga)

Sedimentos detríticos de origen aluvial y coluvial, constituidos por gravas polimícticas, arenas y limos no consolidados a semiconsolidados, de origen aluvial y coluvial, con clastos volcánicos, distribuidas principalmente en laderas y fondos de quebradas activas y antiguas.

Sobreyacen en discordancia angular a las unidades anteriores, encontrándose pobremente estratificados por la presencia de sulfatos y sales de nitrato (Arellano, 2003). La unidad ha sido atribuida al Terciario Inferior-Cuaternario (Arellano, 2003).

2.2. ROCAS INTRUSIVAS

Las rocas plutónicas existentes en el área representan las raíces del arco magmático de La Negra (Mpodozis y Ramos, 1989). Son cuerpos someros, con profundidad de cristalización cercana a 5 km (Dallmeyer y otros, 1996), clasificadas como rocas calcoalcalinas de arco (Oliveros y otros, 2007; Dallmeyer y otros, 1996; Buchelt y Tellez, 1988), y agrupadas en la superunidad del Batolito Costero. Presentan texturas faneríticas de grano fino a medio, a porfídicas, y composición variable desde gabros cuarcíferos y dioritas cuarcíferas a monzodioritas cuarcíferas, granodioritas y granitos (Rogers y Hawkesworth, 1989).

Sus edades de emplazamiento han sido determinadas entre 168 y 142 Ma (Oliveros, 2005; Boric y otros, 1990; Maksaev, 1990; Rogers, 1985), con sistemas de diques dioríticos y gabroicos que podrían alcanzar edades posteriores, al intruir rocas volcánicas de edades entre 168 y 112 Ma (Boric y otros, 1990; Maksaev, 1990).

Estas rocas junto con sus equivalentes volcánicos de la Formación La Negra han sido afectadas por un metamorfismo de enterramiento y metasomatismo de grado bajo a muy bajo entre los 160 y 100 Ma (Oliveros, 2005), destacándose la presencia de clorita, epidota, cuarzo, sericita, titanita, calcita y en menor medida zeolitas, prehnita, pumpeyita y actinolita (Oliveros y otros, 2008).

2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

2.3.1. SISTEMA DE FALLAS DE ATACAMA (SFA)

El rasgo estructural de mayor importancia en la zona es el Sistema de Fallas de Atacama (SFA),

compuesto de un conjunto de fallas paralelas de orientación general N-S (Scheuber y Andriessen, 1990), que se extiende por más de 1.000 km desde Iquique hasta el norte de La Serena entre las coordenadas 20°30'S a 29°45'S. La falla principal, denominada Falla Salar del Carmen, registra actividad contemporánea al desarrollo del arco del Jurásico-Cretácico Inferior del norte de Chile (Scheuber y Andriessen, 1990; Mpodozis y Ramos, 1989; Hervé, 1987a) con movimientos en el rumbo, y en etapas posteriores, con desplazamiento en el manteo (Hervé, 1987b).

Scheuber y González (1999) identifican 4 etapas de movimiento y generación de estructuras en el SFA, que comienzan con una etapa de movimientos sinestrales durante el Jurásico Inferior y Medio a causa de un movimiento al sur del bloque de antearco, que precede una etapa extensional, entre los 160 y 150 Ma, en donde se desarrollan fallas normales de orientación N-S en un dominio frágil a semifrágil. Posteriormente ocurre la intrusión de sistemas de diques verticales con rumbos NW-SE, N-S, NE-SW, por una extensión oblicua NW-SE, y finalmente, cerca de los 125 Ma, nuevamente movimientos sinestrales. Hervé (1987b), por su parte, plantea la existencia de una etapa de actividad más reciente, evidenciada en escarpes de falla de hasta 300 m en el sector de la Falla Paposo, que en conjunto con la modificación de patrones de drenaje, indicaría un desplazamiento normal entre el Mioceno Inferior medio y Mioceno Superior, quedando inactiva desde entonces.

2.3.2. PLEGAMIENTOS

La zona de estudio se encuentra muy plegada, variando el estilo de deformación para las diferentes formaciones. La Formación El Toco, está intensamente deformada de manera irregular, pero con ejes de plegamiento y estratificación de rumbo principalmente NW-SE, e inclinación SW predominante, por una fuerte compresión NE-SW (Breitkreuz y Bahlbur, 1985).

Las rocas de la Formación La Negra (Jurásico Medio-Jurásico Superior) tienen un plegamiento más suave, de gran magnitud y ejes de pliegue con buzamiento W a NW, con algunas estructuras monoclinales de rumbo N-S en el sector oriental de la Cordillera de la Costa, en bloques limitados por fallas normales (Ferraris y Di Biase, 1978).

Las rocas del Cretácico en la zona, también se encuentran deformadas, con un plegamiento suave, de gran longitud de onda, abierto y con ejes de pliegue NE-SW (Ferraris y Di Biase, 1978).

2.3.3. DISCORDANCIAS

En la zona se reconocen 3 discordancias principales, que representan diferentes eventos tectónicos de carácter regional que han afectado al norte de Chile, las cuales no son fáciles de identificar en el área de estudio por la amplia distribución de depósitos aluviales y coluviales (Arellano, 2003).

En primer lugar, la discordancia entre las formaciones El Toco y La Negra, marcada por un contrastante estilo de plegamiento entre ambas unidades, con un patrón de deformación complejo en la primera y pliegues suaves en la segunda, provocada por un episodio compresivo asociado a un cambio en el régimen de subducción en el margen pre-Andino durante el Carbonífero tardío, denominado localmente como “Orogenia El Toco” (Bahlburg y Breitzkreuz, 1991).

La segunda discordancia, es la que se encuentra entre las formaciones La Negra y Augusta Victoria, marcada por un conglomerado polimíctico que define el límite discordante entre ambas unidades (Arellano, 2003), y es atribuida a la Fase Tectónica Peruana del Campaniano (Camus, 2003).

La última discordancia, es la existente entre la Formación Augusta Victoria y la unidad de Gravas y Sedimentos Aluviales, en donde las últimas sobreyacen de manera subhorizontal capas de la Formación Augusta Victoria que mantean hacia el E en el sector de Cerro Lagarto (Arellano, 2003). Esta discordancia se asocia a la Fase Tectónica Quechua del Mioceno-Plioceno (Camus, 2003).

2.4. MARCO METALOGÉNÉTICO

En la historia de Chile la actividad minera ha sido muy importante, destacando siempre la extracción de Cu que se encuentra en yacimientos de tipo IOCG, estratoligados, vetiformes y, especialmente en pórfidos de Cu. Estos últimos, han llamado la atención internacional por su concentración espacial y tonelaje, llegando a alcanzar las categorías de gigantes y supergigantes (Cooke y otros, 2005), y situando al país como principal productor de Cu, con un 28% de la producción mundial en 2018 según lo informado por Cochilco.

En el contexto Andino estos yacimientos, formados por procesos y patrones evolutivos semejantes, se distribuyen en franjas de dirección N-S, las cuales representan diferentes épocas metalogénéticas asociadas a diferencias en los productos de dichos procesos entre los yacimientos pertenecientes a cada una de ellas.

Sillitoe (1988) reconoce seis franjas metalogénicas de pórfidos de cobre: Carbonífero Superior-Triásico, Cretácico Inferior, Cretácico Superior, Paleoceno-Eoceno Inferior, Eoceno Superior-Oligoceno y Mioceno Superior-Plioceno (Figura 2.2). Los pórfidos de cobre Antucoya y Buey Muerto pertenecen a la Franja de Pórfidos Cretácicos, la cual se revisará a continuación.

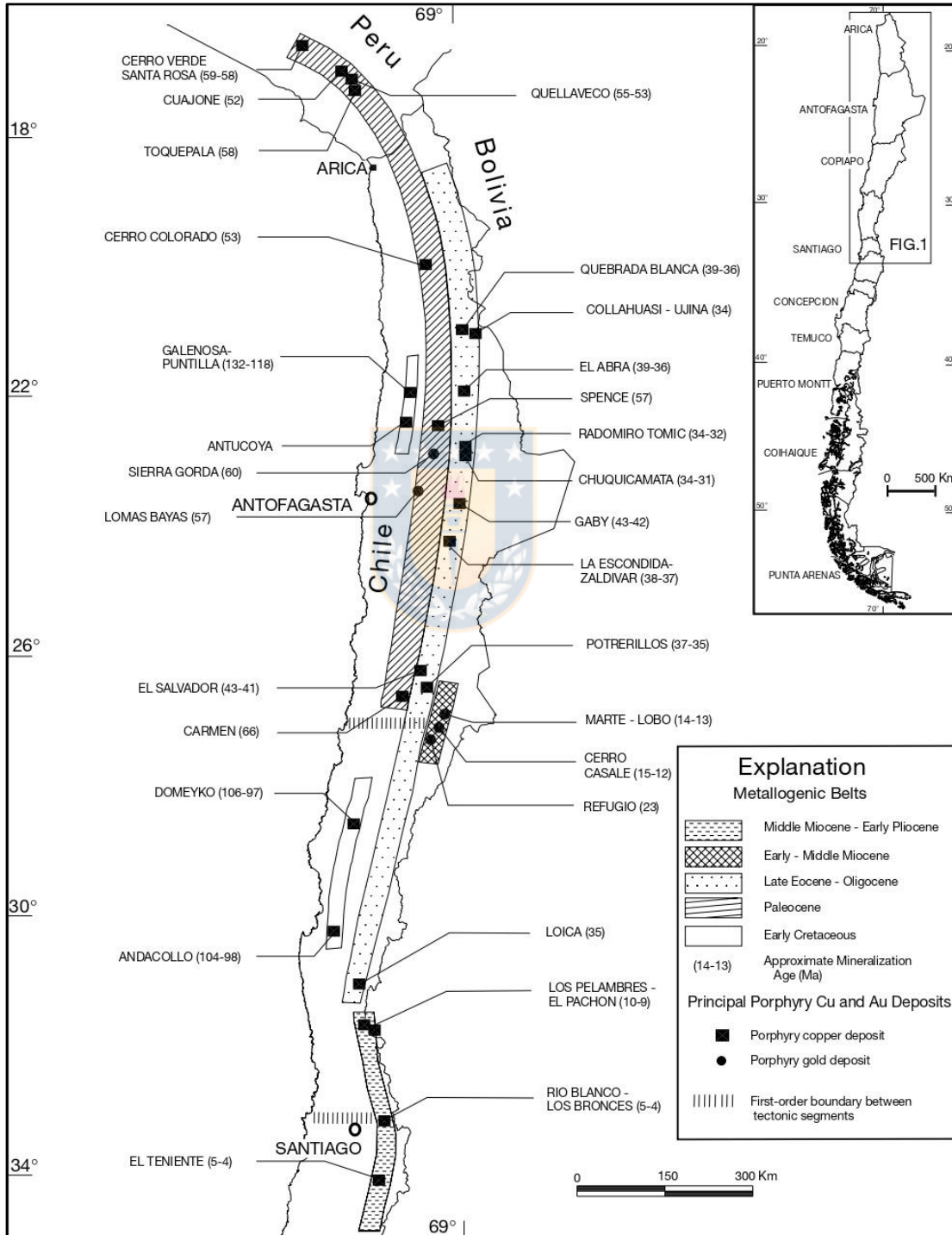


Figura 2.2: Franjas metalogénicas de Chile. Camus y Dilles (2001).

2.4.1. FRANJA DE PÓRFIDOS CRETÁCICO INFERIOR

Los pórfidos de cobre del Cretácico Inferior en Chile se han reconocido en el flanco oeste de la Cordillera de la Costa entre los 22°-26°S, en una extensión de 1.500 km a lo largo del margen, disminuyendo su edad hacia el sur, y siendo generalmente de menores tamaños y leyes en comparación a franjas más orientales.

Se han separado en 3 grupos según su ubicación en la franja (Camus, 2003): Al norte el grupo formado por Antucoya y Puntillas-Galenosa con una zona de oxidados de Cu con leyes cercanas a 0,5%, en Chile Central, el grupo más importante económicamente, con los depósitos Andacollo, Domeyko, Pajonales y Los Loros, y en el Sur de Chile, los yacimientos San José, Polcura y Galletué, que poseen solo mineralización primaria y tienen poca importancia económica.

Las litologías presentes en esta franja incluyen dioritas, dioritas cuarcíferas y gabros, como intrusivos pre-minerales, y pórfidos tonalíticos y dacíticos, como intrusivos interminerales, de señal geoquímica calcoalcalina alta en K o shoshonítica (Rogers, 1985). Su alteración, cuenta con una marcada zona potásica, evidenciada por biotita y feldespato potásico, que gradúa a propilítica con clorita, epidota y calcita a medida que aumenta la distancia del centro del depósito, y alteración fílica marginal, de mayor distribución en los yacimientos del grupo central. Han sufrido intensa erosión, lo que se infiere por la poca extensión de los cuerpos de alteración fílica, y el dominio de asociaciones de alteración-mineralización características de zonas más profundas (Camus, 2003).

El emplazamiento de estos depósitos coincide con un episodio de deformación y alzamiento, evidenciado en la discordancia angular entre la Formación La Negra y las rocas del Cretácico Inferior (Ponce y otros, 2013), evento relacionado a un cambio en las condiciones de esfuerzo en el margen continental, desde un sistema extensional en el Jurásico Superior a uno de condiciones transpresivas en el Cretácico Inferior (Maksaev y otros, 2006; Scheuber y González, 1999).

3. GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO

El depósito Antucoya corresponde a uno de los más grandes pórfidos de cobre de la Franja de Pórfidos Cretácicos de Chile, con un recurso de 835 Mt y ley promedio de 0,32% de Cu.

El modelo estructural corresponde a un sistema de Riedel sinestral donde la falla maestra de orientación NS se identifica con el SFA y la cizalla de Riedel sintética con la Falla Buey Muerto de orientación NW (Perelló y otros, 2003). La intersección de ambas estructuras genera un bloque dilatacional que alberga el mayor desarrollo en volumen del sistema de pórfidos emplazados en la parte inferior de la Formación La Negra, cuya alteración y mineralización está relacionada a intrusiones de pórfidos de edades entre 142 y 140 Ma.

La mineralización es del tipo pórfido cuprífero con la superposición de procesos supérgenos, lo que deriva en un desarrollo de una zona lixiviada en superficie y bajo ella, depositación de oxidados de cobre, zona mixta y sulfuros hipógenos, sin el desarrollo de un enriquecimiento secundario de importancia, y con un marcado contraste en el desarrollo de las diferentes zonas minerales en dos sectores del yacimiento: Antucoya, al W, y Buey Muerto, al E (Figura 3.1).

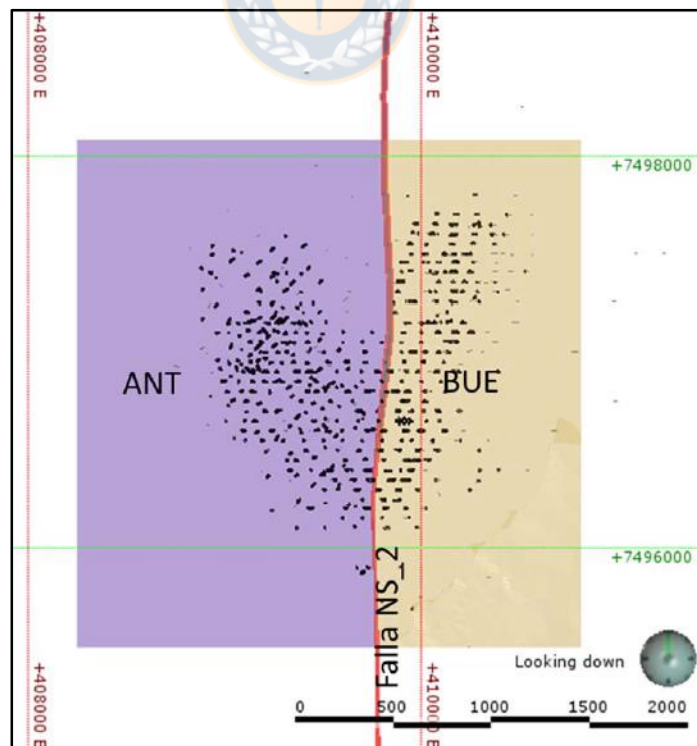


Figura 3.1: Sectores del yacimiento simplificado. Delimitación de sectores trabajada por GeoEstima (2017).

3.1. UNIDADES LITOLÓGICAS

Las litologías del depósito están compuestas principalmente por intrusiones porfídicas del Cretácico, emplazadas en rocas volcánicas jurásicas. A continuación, se describen las unidades litológicas, que se distribuyen en el yacimiento como se observa en la Figura 3.2.

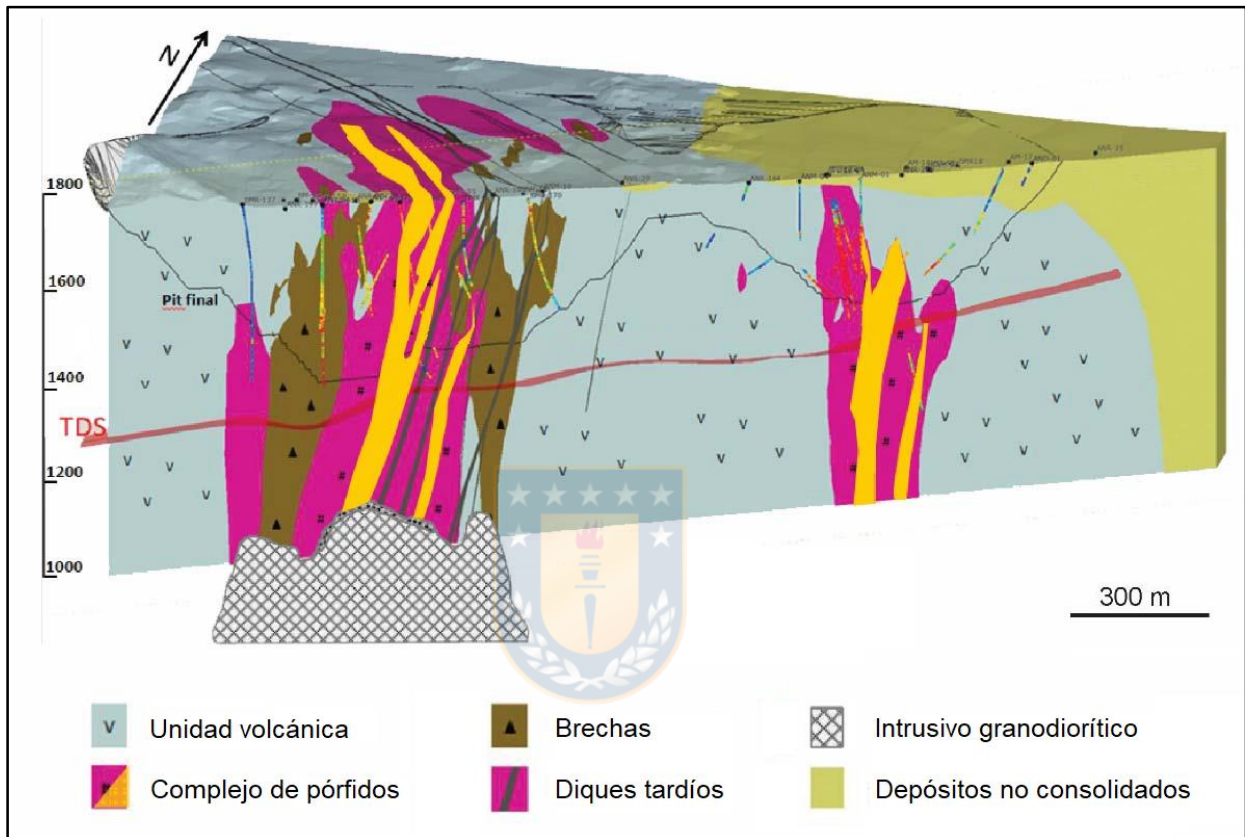


Figura 3.2: Distribución de litologías en el yacimiento. Modificado de Lagos y otros (2015).

3.1.1. UNIDADES ESTRATIFICADAS

3.1.1.1. Unidad Volcánica

Corresponde a las rocas volcánicas de la Formación La Negra del Jurásico Medio (según Ponce y otros (2013) aproximadamente 170 Ma en la zona del yacimiento), que constituyen la roca caja y la litología más abundante del yacimiento, con una potencia estimada de a lo menos 1.000 m, manteniendo entre 20° a 30° al NE (Lagos y otros, 2015).

En la sección superior de la secuencia presenta andesitas basálticas de color gris a negro con textura

porfídica de grano medio, fenocristales de plagioclasa, olivino y piroxenos, intercaladas con ocoítas amigdaloidales interpretadas como sills (Ponce y otros, 2013). Los estratos inferiores corresponden a una intercalación de rocas dacíticas y riolíticas, donde se desarrollan hornfels de albita y feldespatos potásico en las zonas de contacto con los pórfidos.

En el contacto entre el Pórfido Antucoya y la secuencia volcánica existe el desarrollo de hornfels de biotita, los que poseen una mejor mineralización en la zona adyacente al cuerpo principal del pórfido, en franjas con potencias de 50 a 100 m y leyes de 0,4 a 0,6 % de Cu (Ponce y otros, 2013).

3.1.1.2. Depósitos No Consolidados

En Antucoya se reconoce un relleno salino, de 1 a 3 m de potencia que aumenta hacia el sector sur, formado por gravas de clastos volcánicos, sedimentos finos postminerales y regolito, cementados por yeso y sales, como nitratos (Perelló y otros, 2003).

El sector oriental presenta una mayor cantidad de gravas, que constituyen la cuenca tectónica denominada Graben Buey Muerto (Perelló y otros, 2003) controlada por ramas del SFA, pobremente expuesta en superficie, conformada por depósitos aluviales, con niveles inferiores volcanosedimentarios no consolidados intercalados con depósitos clásticos más gruesos. Es una unidad post mineral, ya que contiene bloques de los pórfidos y rocas volcánicas alteradas provenientes del yacimiento Antucoya (Perelló y otros, 2003).

3.1.2. ROCAS NO ESTRATIFICADAS

3.1.2.1. Intrusivo granodiorítico

Corresponde a una granodiorita equigranular de anfíbol y biotita, de grano grueso, con alteración leve a biotita y feldespatos potásico y una escasa mineralización de calcopirita y pirita, con leyes de Cu cercanas al 0,12%. Usualmente se presenta en las partes más profundas del sistema porfídico, siendo interpretada como una cúpula magmática en la raíz del sistema de pórfidos relacionados con la mineralización principal de Antucoya (Ponce y otros, 2013). Existe un desarrollo de brechas con matriz granodiorítica en el ápice de esta unidad.

3.1.2.2. Pórfido Antucoya

Pórfido de composición granodiorítica que corresponde a la unidad más importante en volumen mineralizado del yacimiento. Abarca un área del orden de 1,5 km², con elongación NNW-SSE en el sector Antucoya y N-S en el sector buey muerto, en donde ha sido reconocida en una columna de 700 m.

La textura de esta roca es porfídica, con un bajo contraste granulométrico entre los fenocristales de plagioclasa y anfíbol, que representan un 25% de la roca, y las fases intersticiales, compuestas de plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo, biotita alterada a clorita, minerales opacos, zircón, apatito, alunita, rutilo, calcita y oxidados de cobre (Arellano, 2003; Ponce y otros, 2013).

Este intrusivo está cortado por un intenso stockwork de vetillas de cuarzo, algunas de ellas con oxidados de cobre (atacamita, brocantita, crisocola y copper wad), hematita y limonitas, y en menor medida, vetas tardías de calcita, anhidrita y minerales opacos.

Dataciones radiométricas en esta unidad señalan la edad del pórfido entre 142,7 y 139,7 Ma (Maksaev y otros, 2006).



3.1.2.3. Pórfido Buey Muerto

Consiste en un enjambre de filones de pórfido dacítico a daciandesíticos de carácter intermineral tardío, de dimensiones decamétricas, subverticales y orientados preferencialmente en dirección N45°W.

La distinción y el contacto con el Pórfido Antucoya es poco claro, pero se han reconocido fragmentos de este último relativamente redondeados incorporados en el Pórfido Buey Muerto, por lo que se reconocen como dos unidades diferentes. Además, a diferencia del Pórfido Antucoya posee una textura porfídica muy notoria con un alto contraste granulométrico (1:30 a 1:50) entre los fenocristales de plagioclasa y anfíbol alterado a clorita, y la masa fundamental afanítica con escaso cuarzo y biotita. La roca está afectada por alteración potásica evidenciada en biotita secundaria y anhidrita, donde no hay un desarrollo importante de vetillas. Además, posee algunos núcleos de alteración cuarzo-sericita poco desarrollada (Ponce y otros, 2013).

3.1.2.4. Pórfido Tonalítico

También nombrado como Pórfido Fino, está formado por tonalitas afectadas por una alteración argílica pervasiva y textura micro-porfídica con fenocristales relictos de plagioclasa de hasta 2 mm, fuertemente argilizados y parcialmente reemplazados por calcita. La masa fundamental, que corresponde al 90% de la roca, está formada por un agregado cristalino de cuarzo, plagioclasa argilizada, clorita, epidota, calcita y minerales opacos, provenientes de la alteración de los minerales máficos originales de la roca (Arellano, 2003). Destaca también la presencia de un stockwork de vetas de cuarzo y vetas tardías de calcita, además de fracturas que en sus paredes poseen limonitas y oxidados de Cu.

Escasamente distribuido en forma filoneana en el yacimiento, los contactos con los pórfidos Granodiorítico y Buey Muerto son irregulares, lo que sugiere que se trata de intrusiones compuestas o que intruyeron casi al mismo tiempo (Maksaev y otros, 2006).

3.1.2.5. Brechas

Corresponden a brechas magmático-hidrotermales en forma de pipa dispuestas de manera subvertical o con manto hacia el SW, que se encuentran a lo largo de los contactos entre los pórfidos, especialmente adyacentes al cuerpo principal del pórfido Antucoya, con mayor desarrollo en su borde occidental, y relacionadas a fallas de orientación NW. Se ha reconocido para esta litología un espesor vertical entre 250 y 350 m.

Los clastos que conforman estas brechas son fragmentos de pórfidos granodioríticos y tonalíticos alterados y mineralizados (Maksaev y otros, 2006), comparables a los pórfidos Antucoya y Buey Muerto, parcialmente reabsorbidos y redondeados, en una matriz ígnea-hidrotermal dacítica, con textura fina fluidal y cristales de plagioclasa, cuarzo y biotita fina (Ponce y otros, 2013). Arellano (2003) reconoce también la presencia de clastos volcánicos de composición dacítica.

Estas rocas presentan características contrastantes en el límite de 1.400 m s.n.m. (Maksaev y otros, 2006). En la parte superior presenta una matriz hidrotermal, cementada por cuarzo y biotita, además de venillas tardías de cuarzo, oxidados de cobre, sulfuros de cobre, óxidos de hierro y halos sericíticos. Bajo esta cota la brecha tiene características magmáticas con una matriz granodiorítica-diorítica con alteración a cuarzo, hematita y albita (Arellano, 2003).

3.1.2.6. Pórfido Postmineral

Sistema de filones dacíticos de coloración gris verdosa y textura porfídica gruesa, con amplia distribución en el yacimiento, en donde se encuentra cortando a todos los demás pórfidos. Sus límites son abruptos y tienen un margen con carbonato declinante, de 2-4 m (Ponce y otros, 2013).

Se presenta en forma de cuerpos tabulares y continuos de 4 a 8 m de espesor, con textura porfídica fluidal, alto contraste granulométrico (1:200) entre los fenocristales (1-4mm), constituidos por plagioclasa, anfíbol y biotita alterados levemente a clorita y epidota, y la masa fundamental (0,05-0,1mm). La mineralización en este pórfido es escasa, con leyes inferiores al 0,05% Cu, por lo que es considerado estéril. Posee características epizonales como un gran contraste granulométrico y textura pilotaxítica (Ponce y otros, 2013).

3.1.2.7. Diques tardíos

Corresponden principalmente a cuerpos de 1 a 20 m de potencia, sin mineralización con rumbo NW-SE que cortan a los pórfidos mineralizados y brechas hidrotermales, con un fuerte control estructural (Perelló y otros, 2003). Son principalmente de composición dacítica, con abundantes fenocristales de plagioclasa (25%) de hasta 4 mm, alterados parcialmente a sericita, de anfíbol (5%), alterados a biotita, clorita y minerales opacos, y ocasionalmente de cuarzo, de hasta 2 mm. La masa fundamental presenta textura pilotaxítica (Lagos y otros, 2015) y está compuesta por microlitos de plagioclasa argilizados, cuarzo, epidota y biotita diseminada reemplazada por clorita (Maksaev y otros 2006, Arellano, 2003), indicativos de una alteración propilítica (Perelló, 2003). También se han encontrado diques de composición andesítica y latítica, pero son raros dentro del yacimiento (Arellano, 2003).

3.2. ESTRUCTURAS

Existen dos sistemas estructurales principales que controlan la arquitectura del yacimiento: las estructuras N-S del SFA y la Zona de Falla Buey Muerto, con orientación NW-SE (Figura 3.3). En la zona de convergencia de estos dos sistemas, se genera un codo, en donde se encuentra la parte principal de las rocas mineralizadas y las zonas de mejor ley.

Los movimientos de fallas relacionados al emplazamiento de los cuerpos intrusivos, tuvieron lugar

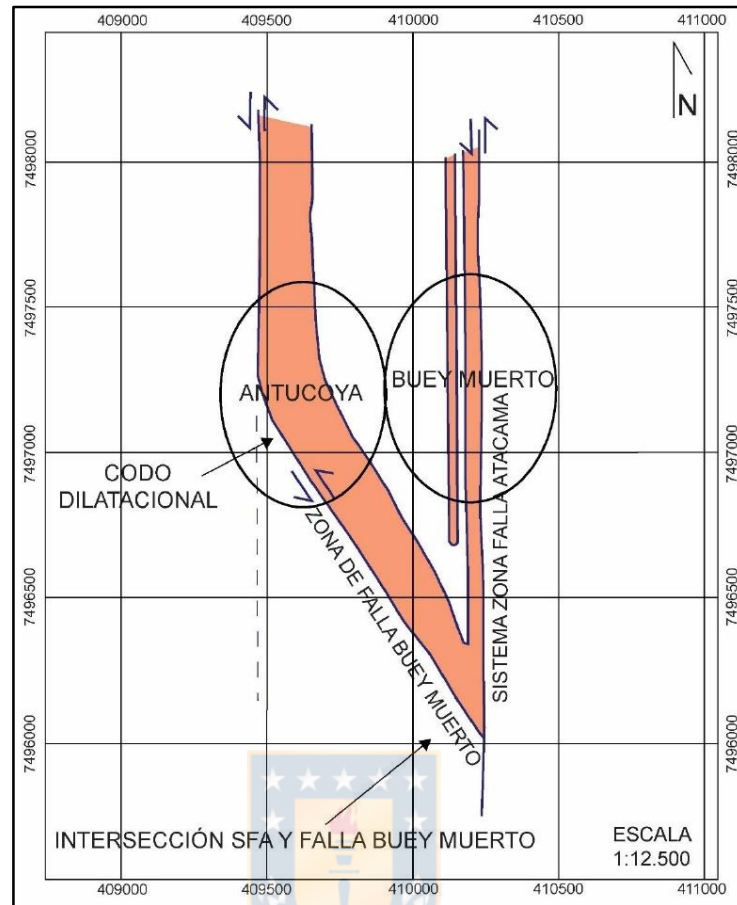


Figura 3.3: Esquema estructural de Antucoya. Modificado de Perelló y otros (2003).

entre los 142 y los 140 Ma, cuando la Zona de Falla Buey Muerto correspondía a un sistema de cizalle sinistral tipo Riedel subsidiario del SFA, controlado por una compresión NW-SE a escala regional (Maksaev y otros, 2006; Perelló y otros, 2003). Bajo este contexto, entre los 142 y 141 Ma existe un dominio de las estructuras N-S, relacionadas con profallas del SFA y el período de alteración y mineralización temprana, con el emplazamiento de la cúpula granodiorítica y el pórfido Antucoya, temprano e intermineral, conformando la herradura inicial del yacimiento. Posteriormente, entre los 141 y 140 Ma, el sistema cambia a una dominancia de las estructuras NW-SE, con los intrusivos interminerales tardíos y los diques dacíticos postminerales de carácter filoneano. Se atribuye también a la actividad del SFA, la exhumación del cuerpo mineralizado entre los 50 y 40 Ma que permitió el desarrollo de la alteración y mineralización supérgena, y la formación de la fosa tectónica adyacente a la falla (Ponce y otros, 2013).

En la zona primaria del yacimiento no se han reconocido zonas de falla de importancia a excepción

del extremo oriental de Buey Muerto, donde la roca ha sido intensamente fallada y correspondería a fallas mayores oblicuas al SFA. Por el contrario, en la zona supérgena, la alteración realiza las fracturas y vetas del yacimiento originando una roca medianamente fracturada. En la zona de sulfatos este efecto es aún más notorio por la lixiviación ácida y desarrollo de sulfatos de hierro, resultando en una roca intensamente fracturada.

3.3. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

La alteración hidrotermal en el yacimiento Antucoya responde en parte al modelo tradicional de pórfidos cupríferos de Lowell y Guilbert (1970), correspondiendo a la zona profunda de éste (Figura 3.3, Arellano, 2003). Sobreimpuesto a esta configuración, el depósito fue afectado por procesos de alteración supérgena, la cual se extiende hasta 350 m bajo la superficie (Maksaev y otros, 2006), lo que permitió el desarrollo de lixiviación y generación de oxidados de cobre.

3.3.1. ALTERACIÓN POTÁSICA

Evento de alteración potásica intensa, que afecta principalmente al Pórfido Antucoya y se evidencia por la presencia de biotitas y feldespatos potásicos (Lagos y otros, 2015). Presenta escasas vetillas de biotita tipo EB (Early Biotite) asociadas con magnetita y bornita, a las cuales se sobreimpone un denso stockwork de vetillas tipo A (cuarzo, calcopirita y bornita) usualmente muy delgadas (1-5 mm), con halos de feldespatos potásicos (Ponce y otros, 2013). Además, en algunos sectores del núcleo potásico en Antucoya, se puede apreciar raras vetillas tipo B, con molibdenita únicamente en la sutura (Ponce y otros, 2013). Esta alteración se encuentra en gran parte enmascarada por la sobreimposición de la alteración clorítica y cuarzo-sericita (Arellano, 2003), pero es preservada a profundidades mayores a 300 m (Perelló y otros, 2003).

3.3.2. ALTERACIÓN CLORÍTICA

Se desarrolla principalmente en las andesitas cercanas al borde del Pórfido Antucoya y en el límite con la alteración cuarzo-sericita de la zona potásica de éste. Este evento está marcado por el desarrollo de vetillas tipo C formadas por cuarzo, biotita, clorita, sericita, magnetita y calcopirita con halos de feldespatos potásicos y clorita (Ponce y otros, 2013).

3.3.3. ALTERACIÓN CUARZO-SERICÍTICA

Evidenciada por la presencia de rocas blanqueadas, con destrucción de la mineralogía y textura original, y una lixiviación casi total de calcio, magnesio y sodio (Arellano, 2003). Se caracteriza además, por la presencia de vetillas tipo D (cuarzo, sericita y pirita) con suturas de pirita y halos de cuarzo-sericítica, que se superponen a las demás vetillas y son el principal aporte de pirita en el sistema (Ponce y otros, 2013).

3.3.4. ALTERACIÓN PROPILÍTICA

Representa el halo más externo de alteración, se reconoce en las andesitas que forman la roca caja del depósito desde 50 a 100 m alrededor del complejo de pórfidos, donde la roca deja de tener esporádicas vetillas de tipo A (Ponce y otros, 2013). La mineralogía de alteración está compuesta por clorita, epidota y pirita en pequeñas cantidades. No se ha reconocido mineralización de cobre en estas rocas (Arellano, 2003).

3.3.5. ALTERACIÓN SUPÉRGENA

Los procesos de meteorización y percolación de soluciones de origen meteórico transforman los arreglos minerales de la alteración hipógena, debido a cambios en las condiciones del medio. En el depósito esta alteración presenta un amplio desarrollo lateral, expresándose en la totalidad del yacimiento, mientras que en profundidad se reconoce hasta los 1.300 m s.n.m. (Arellano, 2003).

Esta alteración se expresa destruyendo la mineralogía y textura original de la roca. En general, los feldespatos se encuentran reemplazados por arcillas y sericita, y los minerales máficos a clorita y óxidos de hierro. También existe la presencia de abundantes limonitas y sectores con sulfatos e hidrosulfatos de cobre, según la zona de alteración primaria (Ponce y otros, 2013).

3.4. MINERALIZACIÓN

La mineralización en Antucoya se presenta zonada desde el núcleo del pórfido hacia la roca de caja, y verticalmente producto del proceso de alteración supérgena y oxidación debido a la circulación de soluciones ácidas durante la formación del pediplano costero de Tarapacá en el Oligoceno-Mioceno (Mortimer y otros, 1974). Desde la superficie se reconoce una zona lixiviada, zona de oxidados de cobre, zona mixta y zona hipógena (Ponce y otros, 2013; Arellano, 2003), en

conjunto con el desarrollo de una zona de sulfatos (Figura 3.4). Existe una incipiente zona de enriquecimiento secundario con escasa covelina y calcosina, sin importancia desde el punto de vista operacional.

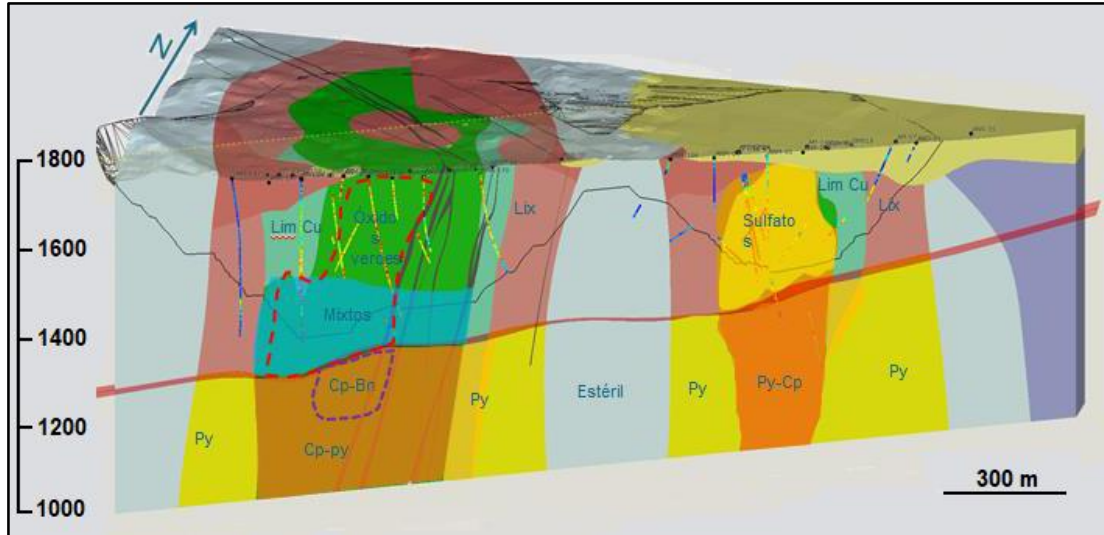


Figura 3.4: Modelo de alteración y mineralización del yacimiento. Lagos y otros (2015).

3.4.1. MINERALIZACIÓN HIPÓGENA

La mineralización hipógena en el yacimiento corresponde principalmente a calcopirita y pirita, conteniendo cantidades menores de bornita, y aparece a 380 m bajo la superficie, ligada a la fase de alteración tardimagmática (Arellano, 2003).

Como se mencionó previamente, en el Pórfido Antucoya la mineralización primaria se encuentra zonada desde su núcleo hacia la roca de caja, identificándose en el mismo orden, las siguientes zonas: calcopirita>bornita, calcopirita>pirita, pirita>calcopirita y un halo externo de pirita. Las leyes más altas de Cu y Au están relacionadas a la zona calcopirita>bornita y a la alteración potásica, seguidas por la zona de calcopirita>pirita en los contactos del pórfido. La mineralización aparece diseminada, reemplazando a máficos y en un stockwork de vetillas de cuarzo en el núcleo y en vetillas tipo C en los márgenes del cuerpo (Ponce y otros, 2013).

A su vez, en el Pórfido Buey Muerto existe un núcleo de calcopirita>pirita con leyes de 0,4-0,5% de Cu y <0,1 g/t de Au. Este sector está rodeado por un halo interno de pirita>calcopirita y un halo externo de pirita hospedados en andesitas, con leyes cercanas al 0,1% de Cu (Ponce y otros, 2013).

3.4.2. MINERALIZACIÓN SUPÉRGENA

3.4.2.1. Zona Lixiviada

Restringida a las zonas en donde hay pirita necesaria para generar las soluciones ácidas, susceptibles de lixiviar y removilizar el cobre presente en el sistema, dando lugar a una zona estéril. Espacialmente corresponde a la parte más superficial, con una asociación típica de minerales compuesta por arcillas y limonitas, principalmente hematita. No se desarrollan cuerpos lixiviados en los sectores donde ocurre directamente el reemplazo de las menas primarias por oxidados de cobre (Ponce y otros, 2013; Arellano, 2003).

3.4.2.2. Zona de Oxidados de Cobre

Se encuentra bajo la zona lixiviada y se caracteriza por la presencia de brocantita principalmente, atacamita, antlerita, crisocola, copper pitch y arcillas ricas en cobre subordinados (Ponce y otros, 2013; Maksaev y otros, 2006; Arellano, 2003), minerales que aparecen diseminados en la roca o rellenando fracturas.

Este dominio se forma por el reemplazo supérgeno *in situ* de mineralización primaria constituida por calcopirita (90%), pirita (8%) hacia los márgenes y bornita (2%) en el núcleo, en rocas con alteración potásica y cuarzo-sericita con vetillas tempranas de cuarzo tipo A, que generalmente se presentan formando un stockwork. El pH de las soluciones generado es levemente ácido (pH 4-5) debido a la escasa presencia de pirita, por lo que la depositación de oxidados de cobre es rica en atacamita en el sector Antucoya, mientras que en el pórfido Buey muerto es dominante la brocantita y antlerita, debido a soluciones de menor pH (1-3) (Ponce y otros, 2013).

3.4.2.3. Zona Mixta

Se caracteriza por la coexistencia de oxidados de cobre, sulfuros y limonitas en cantidades variables, aumentando la proporción de calcopirita en profundidad, por pérdida de la capacidad lixivante de las soluciones a medida que reaccionan con la mineralogía en sectores superiores.

En el sector Antucoya, predomina calcopirita como remanente en zonas con alteración potásica y con stockwork de vetillas de cuarzo, mientras que en el sector Buey Muerto, en condiciones de alteración cuarzo-sericítica dominante, se ha observado pirita > calcopirita y desarrollo incipiente

de calcosina y covelina fuertemente controlado por estructuras (Ponce y otros, 2013; Perelló y otros, 2003).

3.4.2.4. Zona de Sulfatos

Sector controlado estructuralmente por fallas y remanentes de vetas de pirita y cuarzo, que dan lugar a una zonación conformada por una parte central con agregados de sílice oquerosa, hidrosulfatos de hierro y escasa arcilla, y un halo de oxidados de cobre (brocantita y antlerita), seguido de un segundo halo más externo de color rojizo, con presencia de hematita y jarosita. La repetición de decenas de estas estructuras paralelas puede formar un cuerpo anastomosado de 100 a 200 m de ancho (Ponce y otros, 2013).

Las vetillas C son relevantes en esta zona y dado que conforman un stockwork, pasan a constituir zonas con alteración clorítica, con leyes entre 0,3 y 0,5% CuT. En el caso de Buey Muerto, se observa una amplia zona de sulfatos sobrepuesta a una zona de vetillas C, en la que la pirita alcanza 2-3% en volumen. Se interpreta que esta pirita está asociada al origen de esta zona, al generar soluciones ácidas que alteran la roca dando lugar a los sulfatos.



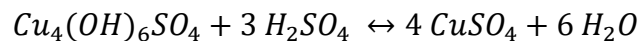
4. CONTEXTO GEOMETALÚRGICO

El trabajo a realizar está enfocado en incorporar información al modelo geometalúrgico del yacimiento, por lo que todo el análisis debe hacerse entendiendo el comportamiento de los minerales al someterse al proceso de lixiviación, conociendo el proceso de Antucoya y como se ha desarrollado la geometalurgia hasta el momento. A continuación se abarcan de forma resumida los aspectos más relevantes para contextualizar el desarrollo del trabajo.

4.1. LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE COBRE

La lixiviación es un proceso que consiste en la extracción de uno o más componentes de un mineral, mediante la utilización de un disolvente líquido. Este proceso involucra etapas de reacción y transporte de materia, que repercuten en la separación de los componentes originales del sólido, permitiendo la recuperación del metal de interés desde el mineral.

Históricamente la lixiviación se ha visto como un proceso que involucra reacciones ácido base, pues así sucede cuando se tratan los óxidos de cobre, donde se contacta el mineral con un ácido, obteniéndose una sal de cobre disuelta y agua. Esto se puede ver en el siguiente ejemplo de reacción de lixiviación ácida de un óxido de cobre (brocantita):



La velocidad de extracción de cobre está directamente relacionada con el número de electrones que se necesita remover para hacer soluble a cada una de las especies. La Tabla 4.1 entrega información cualitativa de cinéticas relativas en ácido sulfúrico, el agente lixivante ácido más común.

Tabla 4.1: Velocidad de disolución de especies de cobre en ácido sulfúrico diluido. Tomado de Domic (2001).

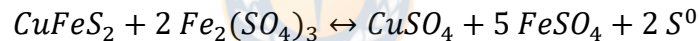
Cinética relativa	Tiempo de referencia	Especies minerales de cobre
Muy rápida (a temperatura ambiente)	Minutos (disolución completa)	Carbonatos (malaquita, azurita), sulfatos (chalcantita, brocantita), cloruros (atacamita).
Rápida (Requiere mayor acidez)	Horas (disolución completa)	Óxidos cúpricos (tenorita), silicatos (crisocola, diopstasa).
Moderada (requiere oxidante)	Días a semanas (disolución puede ser no completa)	Cobre nativo, óxidos cuprosos (cuprita, delafosita), óxidos complejos con manganeso (copper wad/pitch)
Lenta (requiere oxidante)	Semanas a meses (disolución puede ser completa)	Sulfuros simples (calcosina, covelina, digenita)
Muy lenta (requiere oxidante)	Años (disolución es incompleta)	Sulfuros complejos (bornita, calcopirita, enargita)

También es posible lixiviar compuestos sulfurados, en este caso mediante una reacción tipo redox, ya que los minerales sulfurados necesitan un agente que provoque una oxidación electroquímica en el mineral, típicamente Fe^{+3} . Los sulfuros secundarios como calcosina y covelina, son más solubles en ácido sulfúrico que sulfuros primarios, como calcopirita, pero aun así el tiempo de reacción para lixiviar el cobre puede variar entre horas y semanas, dependiendo del método que se utilice. Los sulfuros primarios, por ser especies muy estables, son más difíciles de tratar y por esto, el tiempo requerido para lixiviarlos es mucho mayor, entre meses y años. Es importante destacar que estas reacciones no consumen ácido, pero requieren condiciones ácidas para que ocurran, debido a que la solubilidad del sulfato férrico cae a valores cercanos a cero para soluciones con pH sobre 3. Ejemplos de la disolución de cobre para un mineral sulfurado secundario y primario respectivamente, se muestran a continuación:

Calcosina:



Calcopirita:



4.2. PROCESO EN ANTUCOYA

Antucoya es una planta de tratamiento de minerales oxidados de cobre, a través de pilas dinámicas de lixiviación, para lo cual cuenta con una línea de chancado primario, secundario y terciario, un aglomerador, una cancha de pilas de lixiviación y una planta convencional de extracción por solventes y electro-obtención. Todas estas etapas se representan de forma esquemática en la Figura 4.1, y a continuación se detallan en orden secuencial.

1. Minería a cielo abierto: la extracción se realiza a gran escala en el rajo Antucoya. Allí operan dos palas eléctricas y dos hidráulicas además de un cargador frontal, y el transporte se realiza a través de camiones.
2. Chancado: este proceso contempla tres tipos de chancadores: primario, secundario y terciario. Desde la mina el mineral llega al chancador primario con máximo 66 cm y finaliza el proceso por debajo los 12,7 mm (Caballero, 2017).

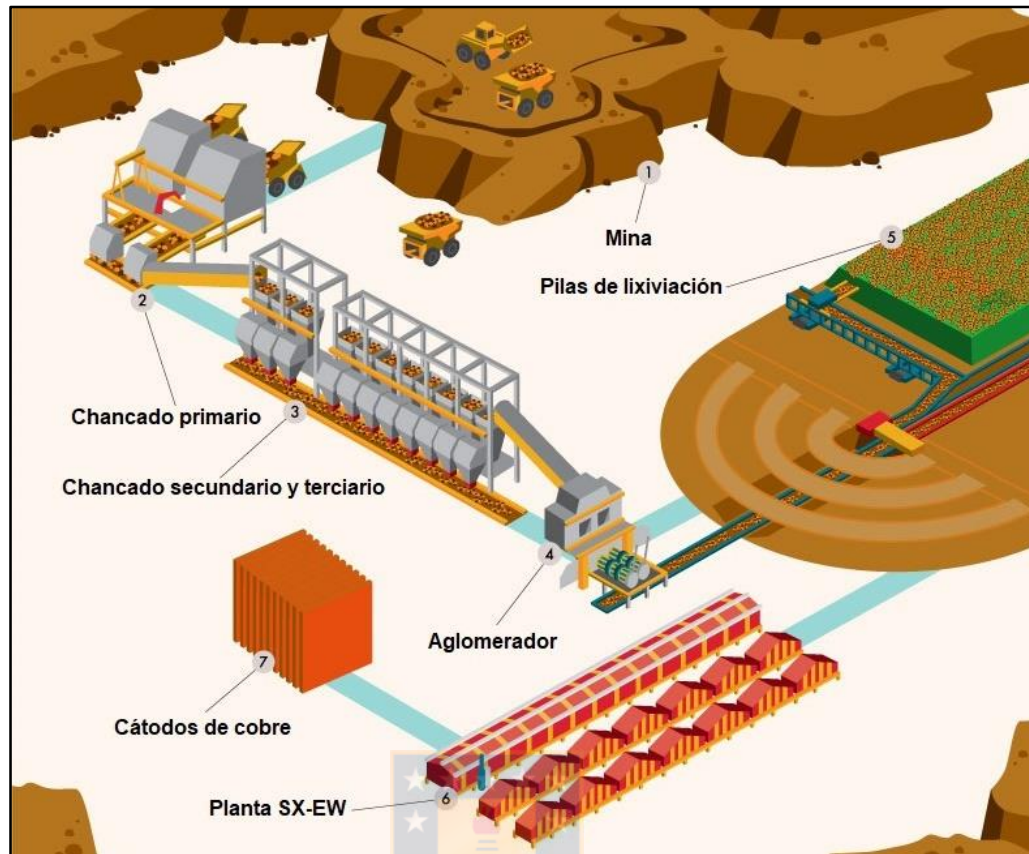


Figura 4.1: Etapas del proceso de Antucoya.

3. Aglomerado: una vez chancado el mineral, se introduce en tambores aglomeradores donde se mezcla con ácido sulfúrico y agua de mar. Esto permite que el mineral se sulfate y se forme una mezcla homogénea, que tiene la humedad y calidad física necesaria para el proceso siguiente de apilamiento.
4. Lixiviación en pilas: el material se transporta mediante correas y es depositado por un equipo esparcidor en pilas dinámicas de 4 m y posteriormente regado con soluciones ácidas que disuelven y arrastran el cobre desde el mineral hasta el fondo de la pila, donde se dispone de un sistema de drenes que recoge la solución desde la pila y la lleva a otro sector a través de canaletas impermeabilizadas. El tiempo de regado de la pila es de 42 días, donde completa su ciclo y el material se considera agotado. Una vez que las pilas se agotan, están son retiradas por una rotopala y transportado a través de correas a depósito de rípios.
5. Extracción por solvente: en esta etapa la solución se libera de impurezas y se concentra su contenido de cobre, pasando de 9 gpl a 45 gpl, mediante una extracción iónica.

6. Electro-obtención: aquí se recupera el cobre de la solución electrolito concentrado para producir cátodos de alta pureza (99,9% de cobre), que son el producto final.

4.3. MODELO DE UNIDADES GEOMETALÚRGICAS

Las unidades geometalúrgicas (UGM) corresponden a agrupaciones de uno o más dominios geológicos con un comportamiento metalúrgico unimodal, que puede ser modelada espacialmente. Para la operación de Antucoya se trabaja con UGM definidas a partir de la información y modelos desarrollados entre los años 2013 a 2019. La información geometalúrgica de *test* desarrollados en ese período permitió reconocer que la intensidad de la alteración presentaba un control importante sobre la respuesta del mineral en el proceso: perfil granulométrico después del chancado, extracción de cobre, consumo de ácido y calidades físicas. De esta forma se definió el parámetro denominado Índice cuarzo-sericita (IQS) que corresponde a un índice de alteración cuarzo-sericítica (QS), como sobreimposición al evento temprano. Este índice o intensidad de alteración QS discrimina los comportamientos metalúrgicos anteriormente indicados.

En los temas de calidades físicas y permeabilidad, se determinó que la sobreimposición de eventos supérgenos en ambientes muy ácidos produjo en Antucoya la lixiviación de la pirita (abundante en la alteración QS) generando la precipitación de sulfatos de hierro, donde destaca la szomolnokita como el principal mineral indicador de bajas calidades físicas de la roca en la pila. En zonas con menor pirita están presentes arcillas tipo caolín que se comportan como minerales de baja permeabilidad en la pila. En función de estos índices y mineralogías se desarrollaron UGM's dirigidas a identificar calidades físicas, e indirectamente consumos de ácidos y extracción de cobre.

4.3.1. INFORMACIÓN HISTÓRICA

A continuación, se resumen brevemente las etapas de desarrollo del modelamiento geometalúrgico desde que Antucoya era un proyecto, hasta el estado actual.

- 2013: Se crean UGM's conceptuales, con información existente de metalurgia del proyecto Antucoya, correspondiente a columnas de 1 m y mineralogía DRX, agregando algunas mineralogías QEMSCAN realizadas en el Instituto GEA, estudios CIC (capacidad de intercambio catiónico) y DRX, donde aparece la szomolnokita. En base a esta información se definen UGM's conceptuales de consumo ácido y extracción de cobre, con medias por

UGM indicadas en la Figura 4.2.

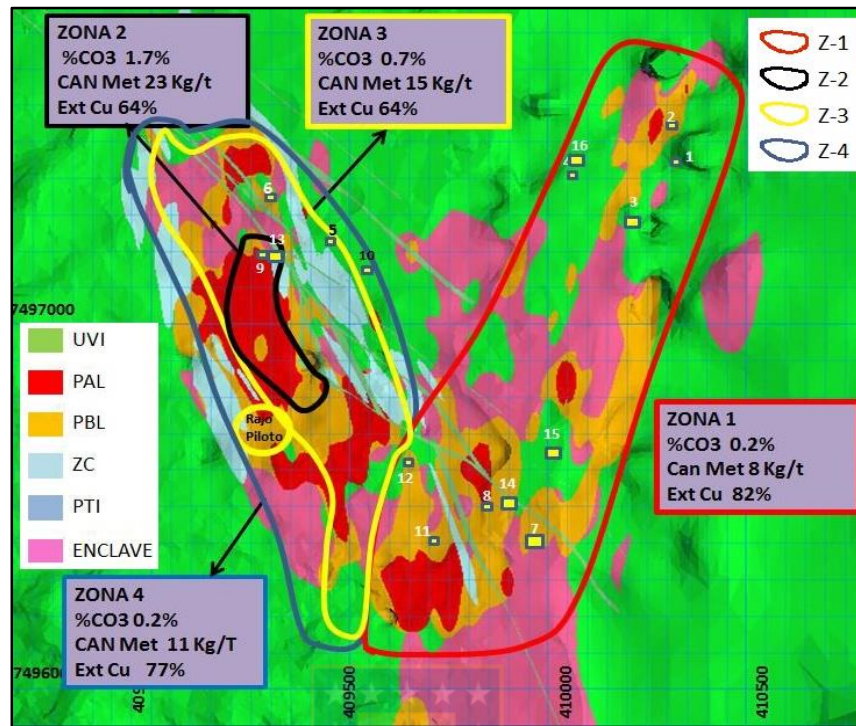


Figura 4.2: Unidades UGM conceptual 2013. Tomado de Aguirre y otros 2013.

- 2015-2016: Estudios de 196 muestras de sondajes, en los cuales se realizaron pruebas iso pH, de granulometría y estudios de mineralogía DRX. En base a los resultados se definieron unidades para consumo, extracción de cobre y dureza de chancado mediante perfiles granulométricos. Además, se realizaron análisis NIR a 6.795 muestras generando 6 modelos quimiométricos de las gangas relevantes. Se entregaron modelos de IQS para consumo de ácido, zona mineral para extracción de cobre, granulometrías y caolín (Figura 4.3).

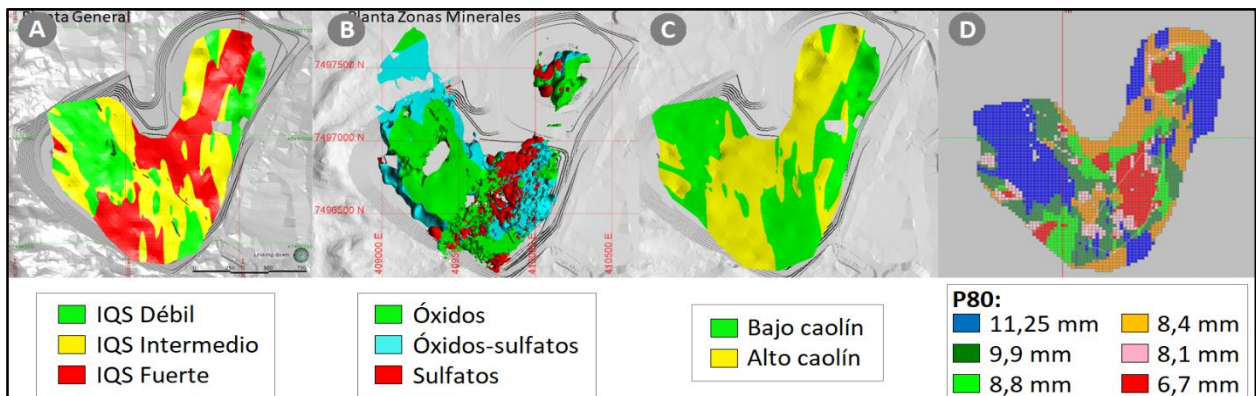


Figura 4.3: Vista en planta de modelos geometalúrgicos 2015-2016. A. Modelo de IQS; B. Modelo de zona mineral; C. Modelo intensidad caolinita; D. Modelo granulométrico.

- 2017-2019: Se agregan 639 estudios de pruebas iso pH, aumentan estudios NIR y 6.782 análisis químicos de extracción parcial para determinar menas. Se definen UGM's para calidades físicas vigentes actualmente.

4.3.2. UGM ACTUALES

El diagrama de clasificación que resume los criterios de definición para cada UGM se muestra en la Figura 4.2, y a continuación se describen las características principales de cada una de ellas.

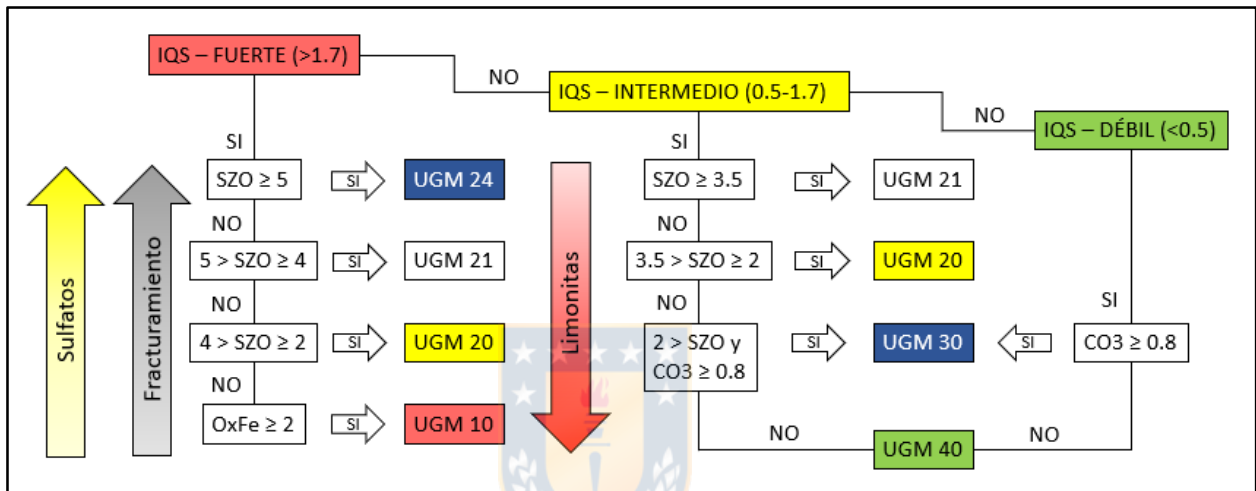


Figura 4.2: Clasificación de UGM de Antucoya. IQS (Índice de alteración cuarzo-sericita) = $(\%Sericita + \%cuarzo) / (\%clorita + \%calcita)$.

- UGM 10:** Rocas volcánicas indiferenciadas o rocas porfídicas de la zona de contacto, muy fracturadas y de color rojizo, con alteración cuarzo-sericita a la cual se sobreimpone una zona lixiviada con caolinita y abundantes óxidos de hierro. La mineralización principal son óxidos verdes (crisocola, atacamita y brocantita) y limonitas con cobre. Muy baja permeabilidad y bajos contenidos de szomolnokita.
- UGM 20:** Son rocas porfídicas, muy fracturadas y molidas, de color pardo amarillento, con una intensa alteración cuarzo-sericita-pirita y desarrollo sobreimpuesto de sulfatos de hierro con cobre, que constituyen la mineralización principal en esta unidad, y escasos óxidos verdes (atacamita) diseminados. Dentro de esta unidad, la categorización dependerá del contenido de sulfatos de hierro con cobre, siendo la UGM 20 aquella con sulfatos de hierro con cobre en roca competente, UGM 21 con mayor densidad de estructuras de sulfatos y menor competencia de la roca, y finalmente, la UGM 24, una roca completamente molida

con mayor intensidad de alteración y densidad de las estructuras de sulfatos. Unidad de menor calidad física.

- **UGM 30:** Pórfido granodiorítico competente, de color oscuro, con alteración potásica de feldespato o biotita, con alto contenido de carbonato y mineralización de oxidados de cobre con zonas primarias diseminadas. Roca muy competente y de alto consumo de ácido.
- **UGM 40:** Pórfido granodiorítico competente, de color verdoso y mayor grado de fracturamiento que la anterior, con alteración potásica más una superposición de alteración fílica o clorítica. La mineralización principal de esta unidad son los oxidados de cobre y zonas primarias diseminadas, al igual que la unidad anterior. Roca competente de bajo consumo de ácido.



5. BASE DE DATOS

La base de datos proporcionada por AMSA está constituida por mapeo de sondajes de 21 campañas realizadas entre los años 2006 y 2019, con información de litologías, mineralogías, zonas minerales y de alteración, análisis químicos, además de estudios mineralógicos y pruebas geometalúrgicas, realizadas entre los años 2016 y 2019.

5.1. MAPEO GEOLÓGICO

Es la mayor fuente de información geológica y mineralógica de Antucoya, con un total de 201.111 m de sondajes mapeados, bien distribuidos en toda la extensión del yacimiento. La información aquí contenida se obtiene mediante inspección visual macroscópica, y se registra en tramos de longitud variable, los cuales muestran diferencias en cuanto a disponibilidad de información, no habiendo registro de todas las variables para todos los tramos.

5.1.1. MINERALOGÍA

5.1.1.1. Óxidos de cobre

Abundancias en porcentajes relativos en volumen de las principales menas oxidadas del yacimiento: arcillas con cobre, atacamita, brocantita, crisocola, limonitas con cobre, malaquita, óxidos negros con cobre y sulfatos, que en el mapeo se refieren a sulfatos de hierro (principalmente szomolnokita), para los cuales se ha reconocido en Antucoya un contenido de cobre asociado. La distribución de los sondajes con información de óxidos de cobre se muestra en la Figura 5.1.

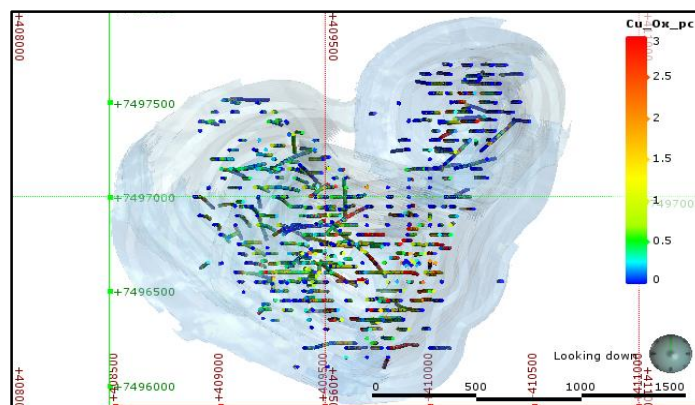


Figura 5.1: Distribución de información de óxidos de cobre en el yacimiento. Vista en planta del área sobre pit final como referencia.

Se debe mencionar que al ser la szomolnokita el principal sulfato de hierro identificado y al cual se relaciona un contenido de cobre de 17,3% en análisis de mineralogía automatizada, se hablará con frecuencia de “szomolnokita con cobre”, para hacer referencia a los casos en donde los sulfatos de hierro contienen efectivamente un porcentaje relevante de cobre.

Se mapea además el porcentaje en volumen total de óxidos de cobre, que permite transformar las cantidades relativas de cada mena mapeada a porcentajes absolutos, y posteriormente, en base a las menas identificadas, se estima una ley visual de cobre contenido en óxidos. Los porcentajes en volumen de cada óxido de cobre se representan en los gráficos de probabilidad con tramos compositados a 2 m en la Figura 5.2, en donde es posible reconocer como principales menas la brocantita y sulfatos (de hierro con cobre), seguidos de crisocola, limonitas con cobre, óxidos negros con cobre y arcillas con cobre, mientras que atacamita y malaquita son muy escasos.

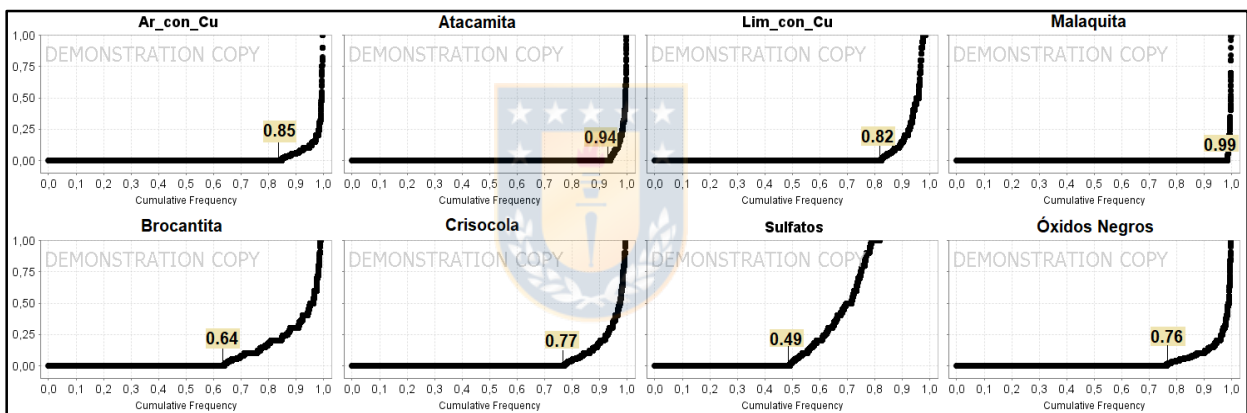


Figura 5.2: Distribución de porcentajes de óxidos de cobre. Eje vertical porcentajes en peso, eje horizontal frecuencia acumulada. Tramos de sondajes con mapeo de óxidos de cobre compositados a 2 m.

5.1.1.2. Sulfuros

Se registra la abundancia en porcentajes relativos en volumen de los sulfuros presentes en el yacimiento: pirita, calcopirita, bornita, calcosina, covelina, galena y esfalerita, y al igual que en el mapeo de óxidos se estima un porcentaje en peso total de sulfuros, que permite transformar a porcentajes absolutos de cada mineral, y una ley visual de cobre en base a los sulfuros de cobre presentes. Los tramos de sondaje con información de sulfuros coinciden prácticamente con todos aquellos con mapeo de óxidos de cobre, por lo que su distribución puede verse en la Figura 5.1.

Los porcentajes de sulfuros son muy bajos, como es posible observar en la Figura 5.3, en donde se

omite la galena, ya que tiene un porcentaje igual a cero en todos los sondeos mapeados. Esfalerita y bornita tienen porcentajes distintos a cero en menos de un 1%, y los sulfuros más abundantes son pirita (como ganga) y calcopirita (como mena).

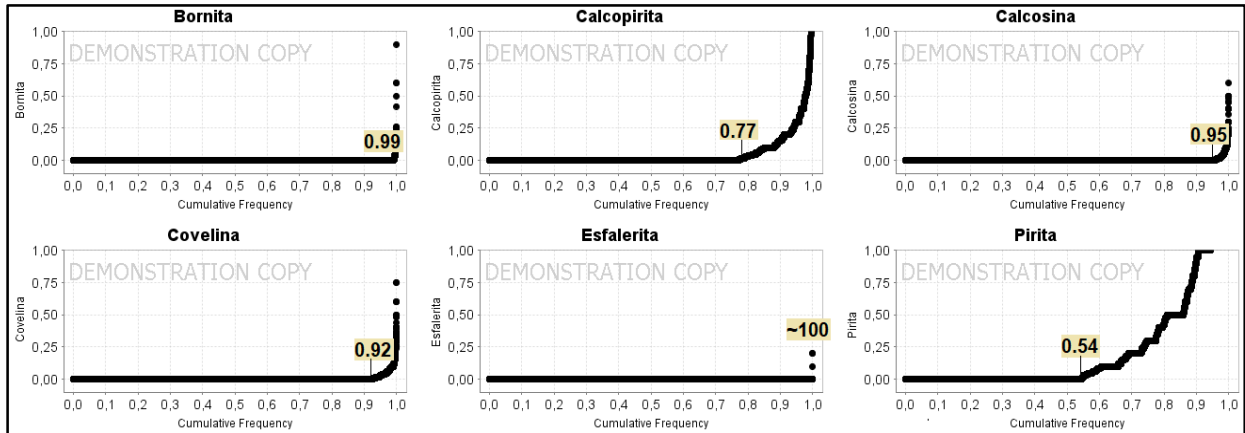


Figura 5.3: Distribución de porcentajes de sulfuros. Eje vertical porcentajes en peso, eje horizontal frecuencia acumulada. Tramos de sondeos con mapeo de sulfuros compositados a 2 m.

5.1.1.3. Minerales de alteración

En este caso se mapea solo la abundancia relativa de cada mineral con respecto a un 100% que corresponde al total de minerales de alteración, en donde se consideran: albita, arcillas, biotita, clorita, epidota, feldespato potásico, sericita, sílice y turmalina, sin embargo, albita, epidota y turmalina, tienen un bajo número de tramos con porcentajes mayores a cero, por lo que serán considerarlos como ausentes. Tienen una mayor distribución que la información de óxidos de cobre, como puede verse en la Figura 5.4.

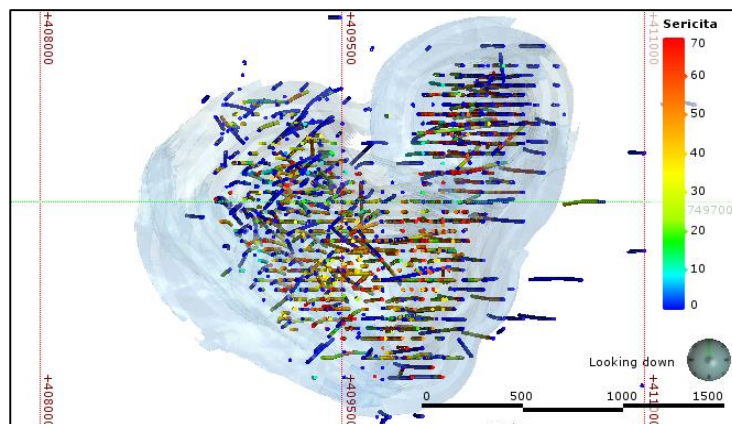


Figura 5.4: Distribución de información de minerales de alteración en el yacimiento. Vista en planta del área sobre el pit final como referencia.

5.1.1.4. Óxidos de hierro

Mapeo en porcentajes relativos de cada óxido de hierro con respecto a la suma de ellos, que pueden ser transformados a porcentajes absolutos con el dato de porcentaje en peso de óxidos de hierro total, que también se mapea. Los minerales mapeados en esta sección corresponden a hematita, jarosita y goethita.

Los tramos de sondaje con información de óxidos de hierro coinciden en su mayoría con aquellos que cuentan con mapeo de óxidos de cobre, por lo que su distribución puede verse en la Figura 5.1.

5.1.2. ESTRUCTURAS

Registradas en el mapeo geológico según el tipo de estructura: falla, zona de fracturamiento, zona de cizalle, brecha tectónica, veta pirita-cuarzo o sin estructura, asociadas a un tramo determinado, con un ángulo, en caso de que sea medible. Estas estructuras no se encuentran incorporadas en un modelo estructural, por lo que serán utilizadas únicamente para justificar anomalías mineralógicas puntuales, en caso de ser necesario.

5.1.3. LITOLOGÍA

Se describen las litologías presentes en cada tramo y se clasifican dentro de los tipos litológicos principales, representados en la Figura 5.5. Se registra además porcentaje de clastos y matriz si corresponde, y su textura.

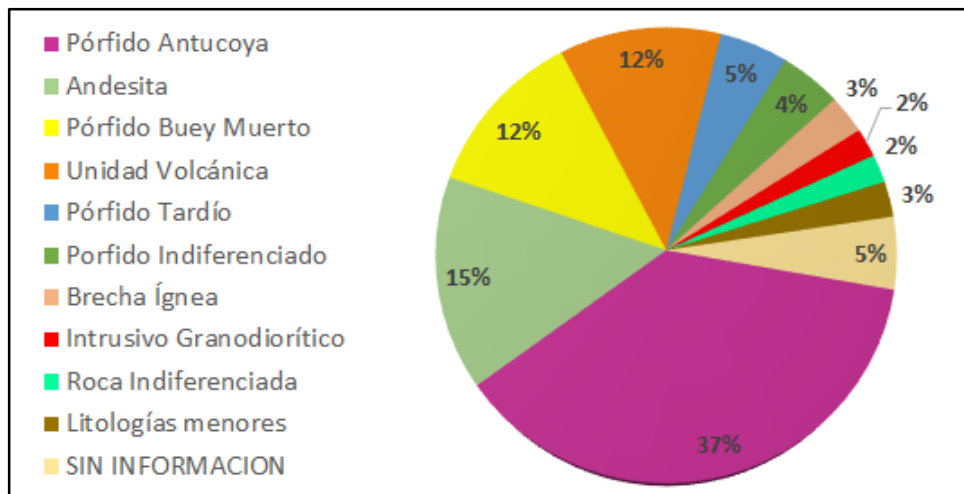


Figura 5.5: Litologías del yacimiento según su abundancia en los sondajes mapeados.
De un total de 195.503,44 m con mapeo de litología.

Las litologías porfídicas son muy difíciles de diferenciar de manera macroscópica, y la asignación de mapeo no se relaciona directamente con un control de la ley en el yacimiento, por lo que para el modelamiento se consideran unidades geológicas definidas por una combinación de las características litológicas texturales e isoleyes, obteniendo como resultado las unidades descritas en la Tabla 5.1, que también forman parte de la información disponible al extraerlo del modelo actual.

Tabla 5.1: Unidades geológicas (UG) consideradas para modelamiento.

UG	Descripción
PAL	Pórfido de alta ley
PBL	Porfido de baja ley
PTI	Pórfido tardío indiferenciado
UVI	Unidad volcánica indiferenciada
ZC	Brecha de contacto
ENC	Intrusivo granodiorítico y enclaves subvolcánicos
GRA	Gravas
SR	Sin recuperación

5.1.4. ZONA DE ALTERACIÓN

La zona de alteración se mapea en función de la abundancia y las asociaciones porcentuales de los minerales de alteración, señalando en cada caso una zona de alteración (Tabla 5.2) y la intensidad correspondiente: débil, moderada o intensa.

Tabla 5.2: Zona de alteración y criterios de clasificación.

N°	Código	Nombre	Descripción
1	SI	SIN INFORMACIÓN	
2	SR	SIN RECUPERACIÓN	
3	SA	SIN ALTERACIÓN	
4	ARG	ARGÍLICA	25-30% o más de volumen relativo de arcillas
5	CLO	CLORÍTICA	>50% de volumen relativo de clorita y <30% sericita
6	KBT	POTÁSICA DE BIOTITA	>50% de biotita secundaria
7	KF	POTÁSICA DE FELDESPATO POTÁSICO	≥10% de feldespato potásico siempre y cuando esté asociado a un stockwork de vetillas de cuarzo
8	PRO	PROPILÍTICA	Epidota y clorita (±Magnetita, ±calcita)
9	SCL	SERICITA-CLORITA	>50% de sericita + clorita
10	SER	SERICITICA	>50% de sericita + cuarzo
11	SILOQ	SÍLICE OQUEROSA	>50% de sílice oquerosa
12	SIL	SILICIFICACIÓN	>70% de sílice
13	SOD	SÓDICA	Albita

5.1.5. ZONA MINERAL

Se determina en base a la mineralogía de mena presente, existiendo 9 zonas minerales predefinidas,

cada una con criterios geológicos para su asignación resumidos en el procedimiento de mapeo. En la Tabla 5.3 se muestran las zonas minerales y los criterios de clasificación para cada una de ellas.

Tabla 5.3: Zonas minerales y criterios de definición.

Código	Nombre	Descripción
SI	Sin información	
SR	Sin recuperación	
EST	Estéril	Sin menas presentes, ni tampoco pirita o limonitas.
EXO	Grava exótica	Gravas con ocurrencia de óxidos de cobre.
LIM	Limonitas con Cu	Similar a LIX pero con limonitas con cobre.
LIX	Lixiviado	Minerales producto de oxidación, sin cobre.
MIX	Mixto	Óxidos de cobre, sulfuros y limonitas en cantidades variables.
PRI	Primario	Mineralización primaria de cobre y pirita fresca.
SEC	Enriquecimiento secundario	Presencia de sulfuros secundarios como calcosina y/o covelina, generalmente diseminados o en vetillas.
SULF	Sulfatos	Sulfatos de hierro con cobre >50% en porcentaje relativo de óxidos
OVN	Óxidos negros/verdes	Óxidos verdes y óxidos negros con cobre >50% en porcentaje relativo con respecto a sulfatos y limonitas con cobre.

5.2. NIR

11.220 tramos de 1 y 2 m de longitud, con determinación de porcentajes en peso de minerales de ganga relevantes en la definición de zonas de alteración: calcita, caolinita, clinocloro, cuarzo, muscovita, plagioclasa, szomolnokita y yeso, mediante mediciones de espectrometría de infrarrojo cercano. La distribución de estos datos puede verse en la Figura 5.6.

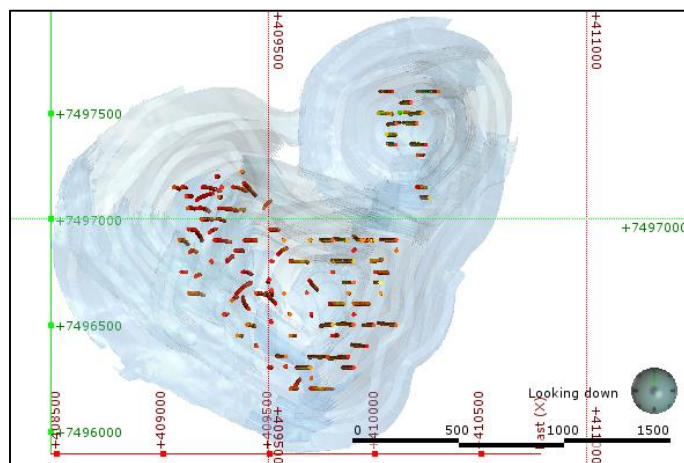


Figura 5.6: Distribución de datos NIR en el yacimiento. Vista en planta del área sobre el pit final como referencia.

Este método consiste en medir la radiación infrarroja en el rango 350-2.500 nm, sobre una muestra

pulverizada y compactada, la cual absorbe radiación en longitudes de onda específicas para cada mineral, entregando como resultado un espectro de reflectancia característico que permite la identificación de los minerales presentes por comparación con espectros de referencia.

5.3. MINERALOGÍA AUTOMATIZADA TIMA (TESCAN)

Análisis mineralógico automatizado a 170 muestras (tomadas de tramos de sondaje de metraje variable), que se distribuyen en todo el yacimiento, pero con una densidad de datos muy baja. Entrega porcentajes en peso de un gran número de minerales y se distribuyen como puede verse en la Figura 5.7.

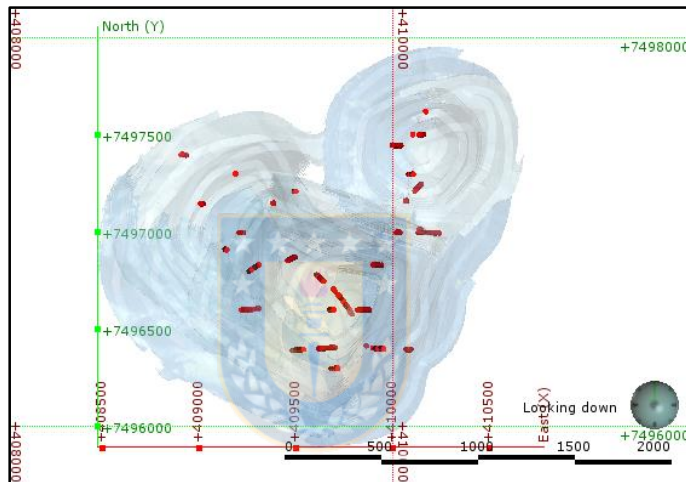


Figura 5.7: Distribución de datos Tescan en el yacimiento.
Vista en planta del área sobre el pit final como referencia.

Los análisis se realizan con el instrumento TIMA (*TESCAN Integrated Mineral Analyzer*) que funciona gracias a un SEM (*Scanning Electron Microscopy*) y espectrómetros de rayos X (EDS: *Energy Dispersive X-Ray Spectrometers*). La técnica consiste en dividir la imagen SEM en pequeños pixeles realizando un barrido sobre toda la muestra. En cada pixel se mide la señal de electrones retro-dispersados (BSE) al mismo tiempo que se adquiere un espectro de fluorescencia de rayos X con el que se pueden identificar los elementos químicos presentes. El espectro y señal BSE se comparan con las señales de minerales que se han almacenado previamente en una base de datos, y de esta manera es posible identificar el mineral presente en cada pixel y obtener un mapa mineralógico de alta resolución (hasta 3 μm).

5.4. DRX

Análisis DRX en 368 muestras, para identificación semicuantitativa de fases minerales. Este análisis consiste en irradiar con rayos X una muestra pulverizada formada por multitud de cristales dispuestos al azar (en todas las direcciones) y medir los ángulos con que los rayos se difractan. Los ángulos de difracción dependerán de las distancias interatómicas de las redes cristalinas, las cuales son específicas para diferentes minerales, permitiendo de esta manera identificar las fases presentes y, en conjunto con un análisis integral de la roca, estimar concentraciones de minerales en porcentajes en peso. La distribución de las muestras con análisis DRX se muestra en la Figura 5.8.

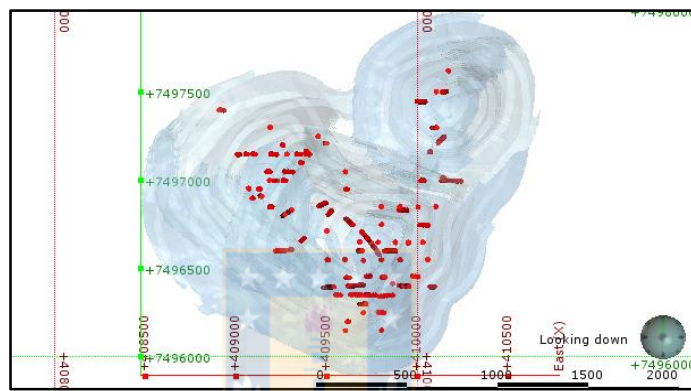


Figura 5.8: Distribución de datos DRX en el yacimiento. Vista en planta del área sobre el pit final como referencia.

5.5. INFORMACIÓN QUÍMICA

5.5.1. COBRE TOTAL Y COBRE SOLUBLE

Mediciones de cobre total y cobre soluble en H_2SO_4 al 5%, mediante espectrometría de absorción atómica, en 152.954 m de sondajes de 20 campañas realizadas entre los años 2006 y 2019, en tramos de 2 m de longitud, cuya distribución se muestra en la Figura 5.9.

5.5.2. EXTRACCIÓN PARCIAL

Medición de cobre total y cobre soluble en agua, en H_2SO_4 al 5%, en NaCN al 10% y en H_2SO_4 con Fe^{+3} , en 9.723 muestras de tramos de sondaje de 2 m de la campaña “2019-Pulpas-PTXT”, además de 456 muestras de tramos de metraje variable de otras campañas menores. Para estos análisis se utilizan muestras pulverizadas, 100% bajo #150 ASTM. Estos datos están concentrados en la zona central del yacimiento con una distribución muy localizada como se ve en la Figura 5.10.

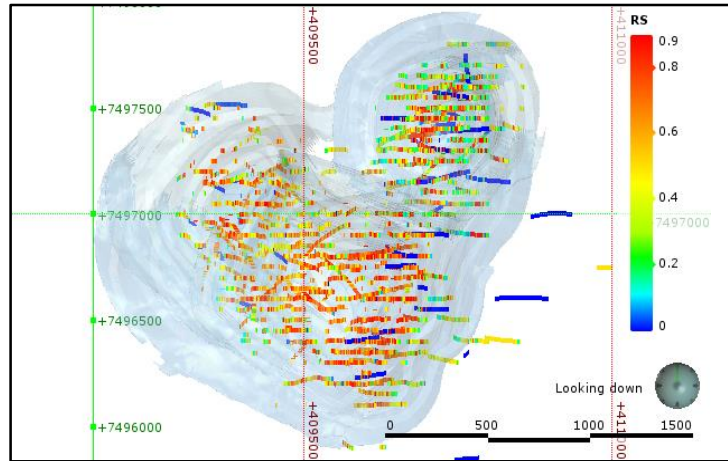


Figura 5.9: Distribución datos cobre total y cobre soluble en el yacimiento. Vista en planta del área sobre la pit final como referencia.

5.5.3. EXTRACCIÓN PARCIAL

Medición de cobre total y cobre soluble en agua, en H_2SO_4 al 5%, en NaCN al 10% y en H_2SO_4 con Fe^{+3} , en 9.723 muestras de tramos de sondaje de 2 m de la campaña “2019-Pulpas-PTXT”, además de 456 muestras de tramos de metraje variable de otras campañas menores. Para estos análisis se utilizan muestras pulverizadas, 100% bajo #150 ASTM. Estos datos están concentrados en la zona central del yacimiento, con una distribución muy localizada, como se observa en la Figura 5.10.

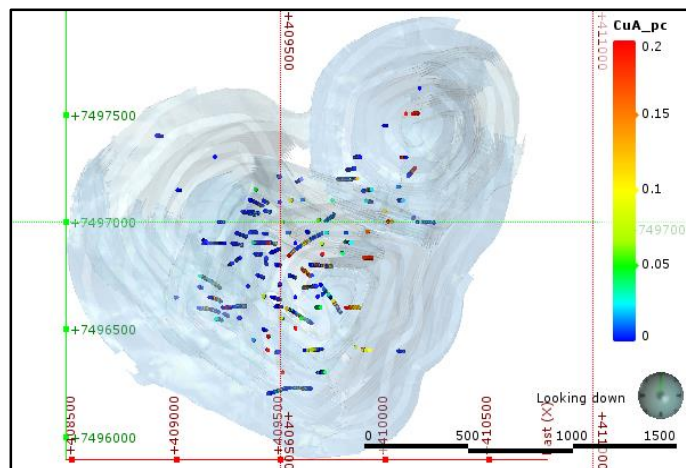


Figura 5.10: Distribución datos extracción parcial en el yacimiento. Vista en planta del área sobre pit final como referencia.

5.5.4. EXTRACCIÓN SECUENCIAL

Medición de cobre total, cobre soluble en H_2SO_4 al 5% y NaCN al 10%, y de cobre residual, en 192 muestras pulverizadas (100% bajo #150 ASTM) mediante análisis secuencial. A diferencia de los análisis de extracción parcial, en este caso se utiliza una misma muestra para todas las mediciones de solubilidad, realizando las pruebas en etapas, comenzando por la lixiviación de la muestra con H_2SO_4 . Se mide el cobre en la solución resultante de la primera etapa de lixiviación, y el residuo sólido es secado y posteriormente lixiviado con NaCN, para nuevamente extraer la solución resultante de esa segunda etapa de lixiviación, y finalmente medir el cobre restante en el residuo sólido. La distribución de las muestras analizadas se observa en la Figura 5.11.

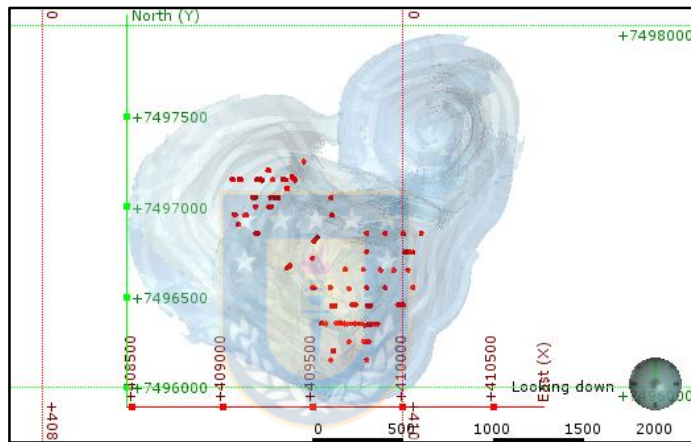


Figura 5.11: Distribución muestras extracción secuencial en el yacimiento. Vista en planta del área sobre pit final como referencia.

5.6. INFORMACIÓN GEOMETALÚRGICA

Constituida por 824 resultados de extracción de cobre obtenida mediante pruebas de lixiviación agitada en botellas a pH constante de 1.5, con una solución de H_2SO_4 en 639 muestras y con H_2SO_4 más ión Fe^{+3} en 193 muestras. La prueba se realiza en botellas con muestras de granulometría 95% bajo #10 ASTM, y la extracción de cobre se mide en la solución mediante espectrometría de absorción atómica. La distribución de las muestras con resultados de extracción puede verse en la Figura 5.12.

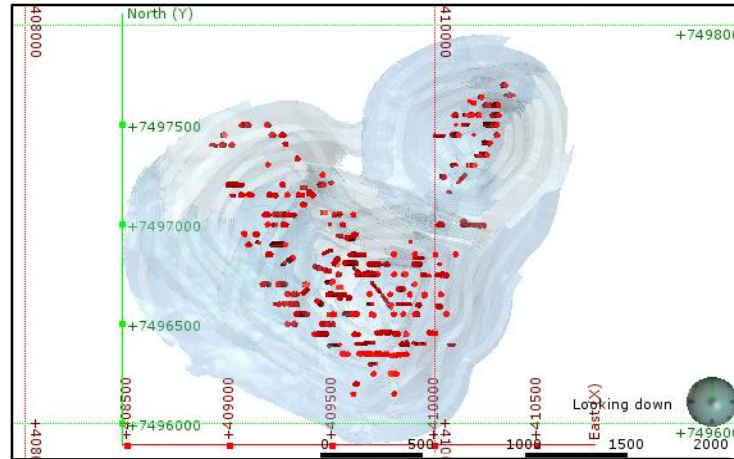


Figura 5.12: Distribución de muestras con pruebas de extracción de cobre. Vista en planta del área sobre pit final.

6. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

6.1. VALIDACIÓN DE LA BASE DE DATOS

6.1.1. VALIDACIÓN MAPEO GEOLÓGICO

El mapeo geológico contiene la información registrada por un geólogo, la que está controlada esencialmente por el criterio y experiencia de este, de manera que es natural que presente variaciones dependiendo de la persona responsable, pudiendo ser susceptible de errores o sesgos. Por esta razón debe ser validado, tanto en su consistencia con otros métodos, como en la coherencia del propio mapeo en sus diferentes variables.

6.1.1.1. Zona de alteración

La zona de alteración se determina en base a los porcentajes relativos de los minerales de alteración mapeados. Al contrastar estos porcentajes con la alteración (Figura 6.1), se evidencia una buena diferenciación de cada zona, distinguiéndose la zona de alteración sílice oquerosa por un alto porcentaje de sílice, la argílica por un alto contenido de arcillas, sericítica por abundante muscovita y cuarzo, sericítica-clorítica por contenidos de muscovita similares a los de clorita predominando por sobre otros minerales de alteración, clorítica por abundante clorita, la zona potásica de biotita por presencia de biotita y la potásica de feldespato por altos porcentajes de feldespato potásico.

A pesar de ser consistentes en general, los datos presentan un gran número de valores atípicos, y

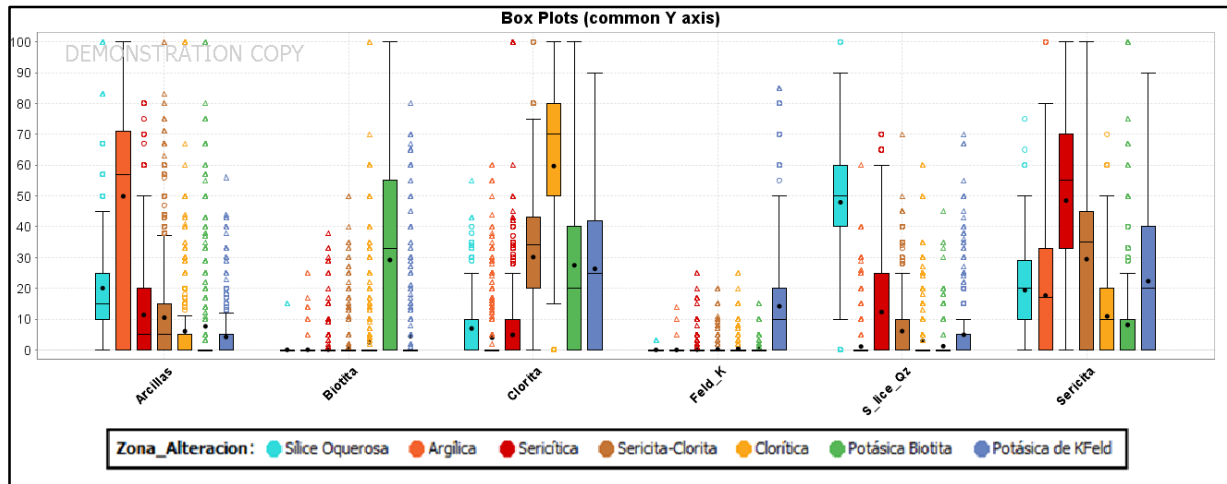


Figura 6.1: Porcentaje relativo de minerales de alteración por zona de alteración.

ciertos tramos con un 100% de minerales de alteración que no corresponden con los minerales característicos de la zona asignada, y que por consiguiente, no presentan tampoco los necesarios para clasificarlos en la zona de alteración en la cual se encuentran. Esto se puede ver de mejor forma en la Figura 6.2, en donde destaca un 45% de datos de la zona de alteración potásica de biotita, con un 0% de biotita, un 24% de datos de la alteración potásica de feldespato con 0% de feldespato potásico, un 17% de datos de la alteración clorítica con 0% de clorita y un 13% de datos de la alteración sílice oquerosa con 0% de sílice.

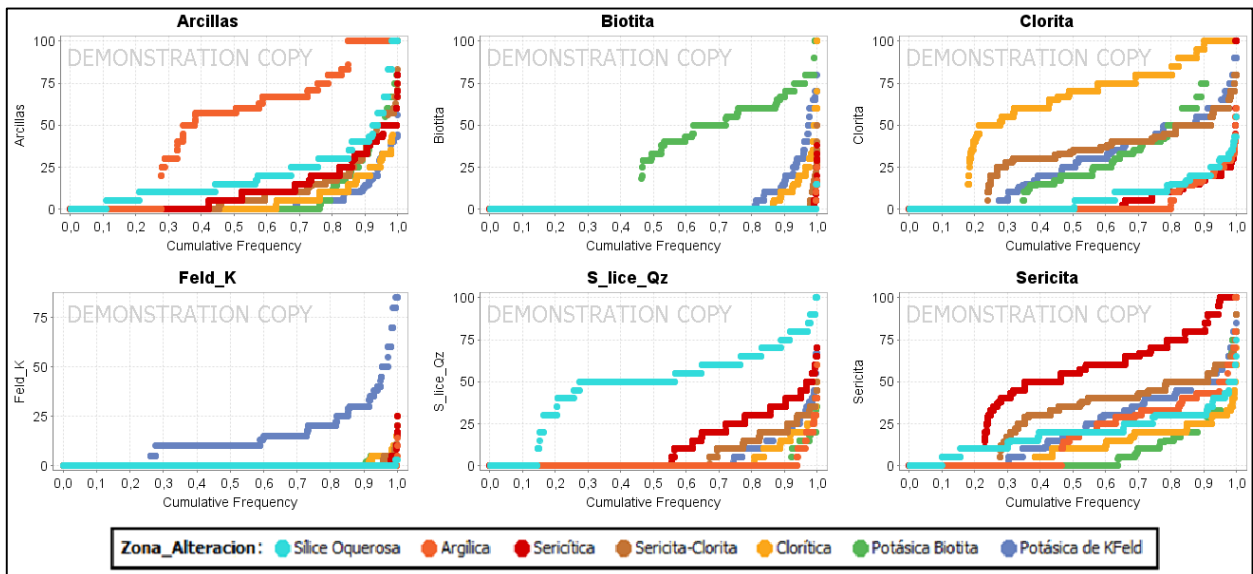


Figura 6.2: Distribución de porcentajes relativos de minerales de alteración mapeados por zona de alteración. Eje vertical porcentaje relativo con respecto al total de minerales de alteración mapeados, eje horizontal frecuencia acumulada.

Para validar la asignación de zonas de alteración en el mapeo, se contrasta la mineralogía de muestras determinada mediante diferentes estudios mineralógicos, con la zona de alteración establecida para el tramo desde donde dicha muestra fue tomada. En primer lugar se compara con mineralogía NIR, representando la abundancia de cada mineral de ganga por zona de alteración en la Figura 6.3, en donde se observa una buena relación entre las mineralogías obtenidas y las zonas asignadas, con porcentajes altos de cuarzo, muscovita y szomolnokita, y bajos de calcita, plagioclasa y clorita, en zonas de sílice oquerosa y argílica, y porcentajes altos de plagioclasa, clorita y calcita, y bajos de cuarzo, szomolnokita y muscovita en alteraciones cloríticas-potásicas.

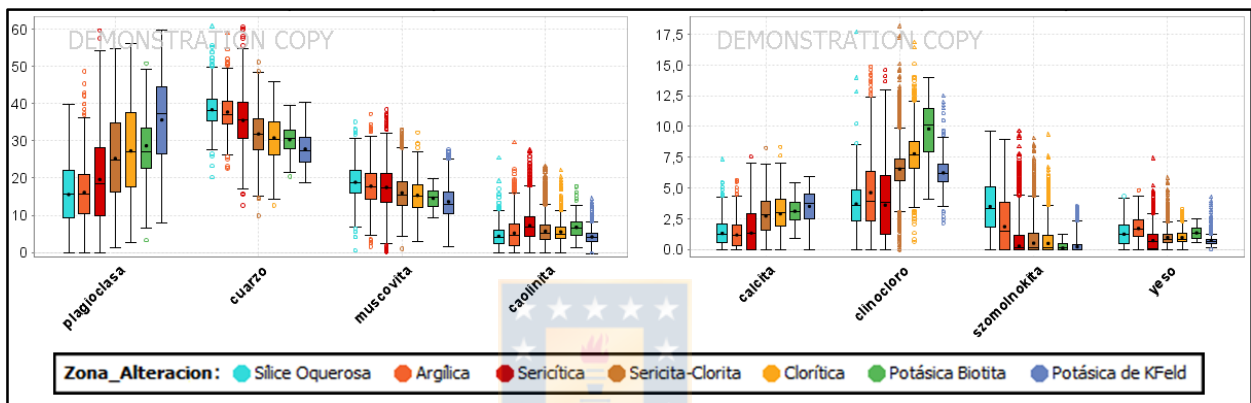


Figura 6.3: Minerales NIR por zona de alteración

El mismo análisis se realiza para la mineralogía de ganga TESCAN (Figura 6.4), obteniendo resultados similares a los anteriores, pero con diferencias en el comportamiento de la calcita, mucho más abundante en la zona argílica a diferencia de lo observado con NIR, y con variaciones en los rangos de porcentajes de caolinita, clinocloro y szomolnokita, menores en los análisis TESCAN.

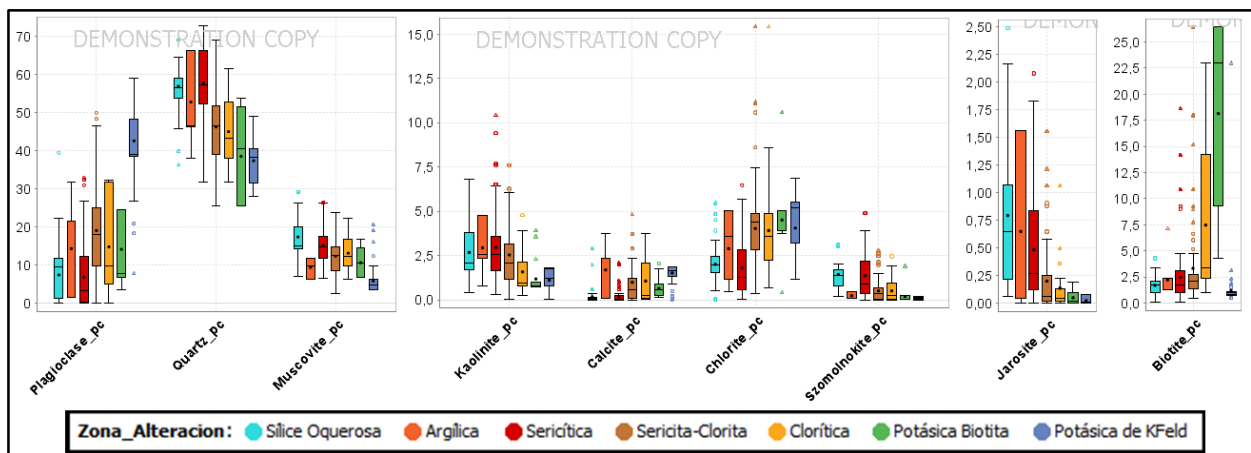


Figura 6.4: Minerales TESCAN por zona de alteración.

La mineralogía TESCAN incorpora también información de minerales como la jarosita, abundante en zonas de alteración sílice oquerosa y argílica, y muy escasa en las alteraciones cloríticas-potásicas, y la biotita, muy abundante en la zona potásica de biotita.

Finalmente, las gangas obtenidas mediante análisis de DRX (Figura 6.5), son también muy similares a los resultados previos, concordando el comportamiento de la calcita con los resultados TESCAN, pero contrarios a lo observado en la mineralogía NIR, al ser muy abundante en la zona argílica. Se incorpora además, información de minerales como la alunita, muy abundante en zona de alteración sílice oquerosa, y en menor medida en zona sericítica, y jarosita, que al igual que en la mineralogía TESCAN abunda en la zona de sílice oquerosa, argílica y sericítica, aunque en este caso, con menor diferencia con respecto a las demás alteraciones. Los rangos de porcentaje son similares a los obtenidos con NIR, a diferencia del porcentaje de cuarzo, que es considerablemente menor. De igual manera, el porcentaje de biotita es menor al determinado mediante TESCAN.

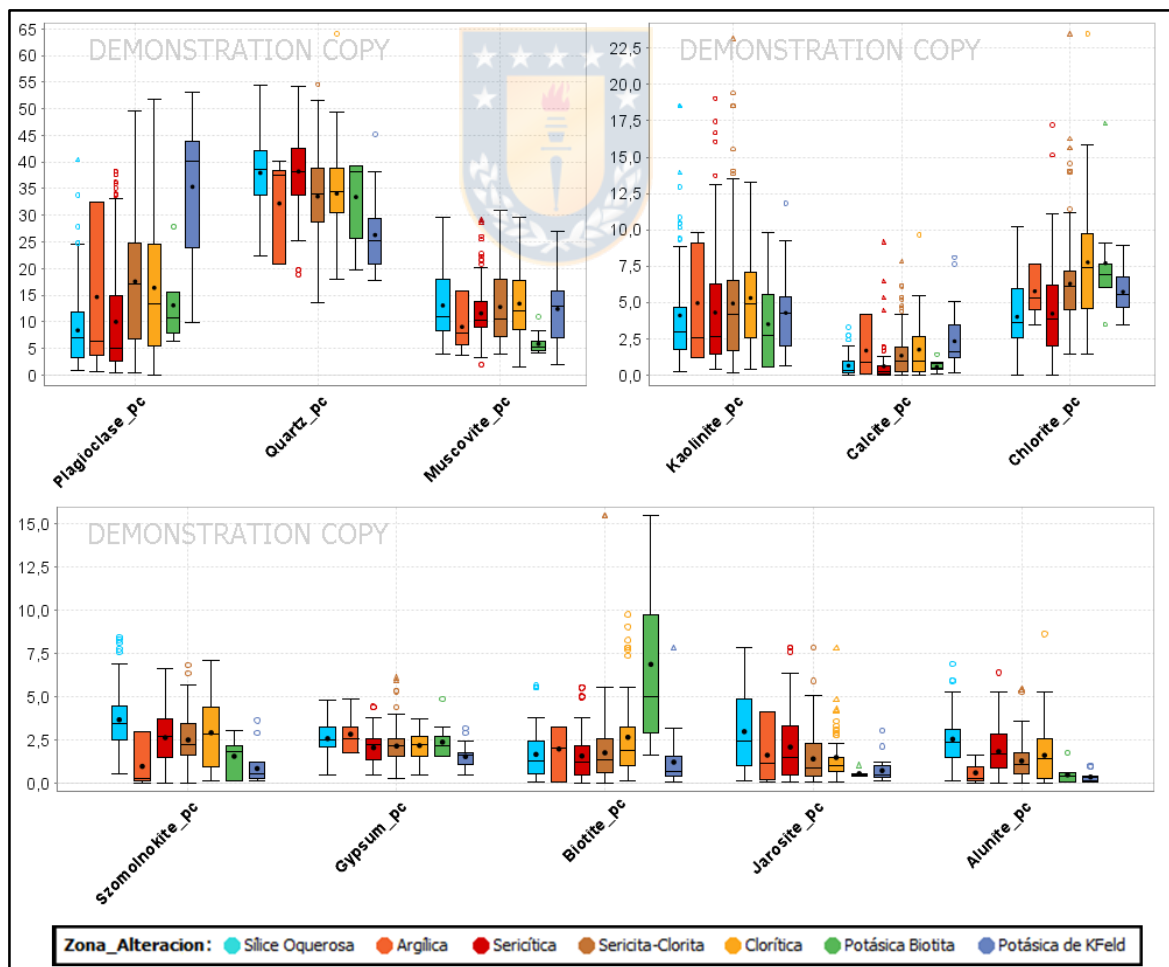


Figura 6.5: Mineralogía de ganga DRX por zona de alteración.

6.1.1.2. Zona mineral

La zona mineral se define en base a los porcentajes de los minerales de mena mapeados, los cuales permiten diferenciar de buena forma cada zona, como se puede corroborar en la Figura 6.6, en donde se muestran la distribución de los porcentajes de mena por zona mineral. En esta figura, es posible reconocer la zona de limonitas con cobre, por un alto contenido de este grupo mineral, la zona de enriquecimiento secundario, por la presencia de calcosina y/o covelina, la zona primaria, por abundante calcopirita, la zona de óxidos verdes-negros, por altos porcentajes de brocantita y óxidos negros y crisocola, la zona mixta, por la presencia de calcopirita y óxidos negros y/o verdes como brocantita y crisocola, la zona de sulfatos, por altos porcentajes de sulfatos de hierro con cobre, y finalmente, la zona lixiviada, con porcentajes bajos de todas las menas.

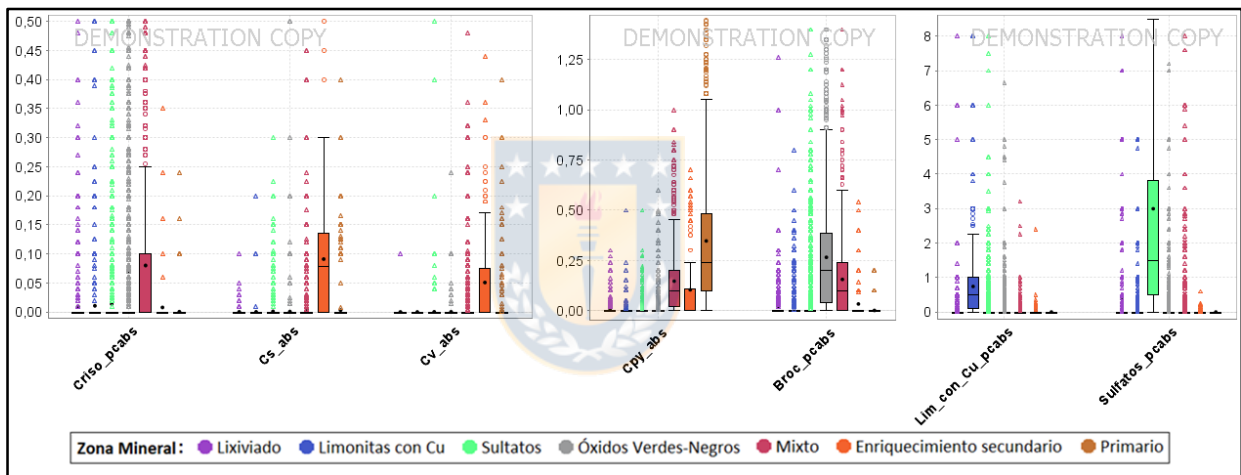


Figura 6.6: Porcentajes en volumen de menas mapeadas por zona mineral asignada.

A pesar de la buena diferenciación general, se reconoce variabilidad en las asociaciones de mena dentro de una misma zona mineral, lo que se puede observar de mejor forma en la Figura 6.7. Esto ocurre con la zona de sulfatos, en donde un 20% de los datos presenta brocantita, la cual constituye una mena importante en el yacimiento, mientras que el 80% restante no la contiene, por lo que este grupo, podría subdividirse en una zona de sulfatos-brocantita y otra de sulfatos, o bien precisar mejor el límite entre la zona de sulfatos y la de óxidos verdes-negros. De igual manera, en la zona de óxidos verdes-negros, solo un 20% de los datos contiene óxidos negros, por lo que también sería conveniente hacer la distinción entre una zona de óxidos verdes, y otra de óxidos negros-verdes. Cabe destacar, que estos dos grupos son los de mayor distribución en el yacimiento por lo que esta

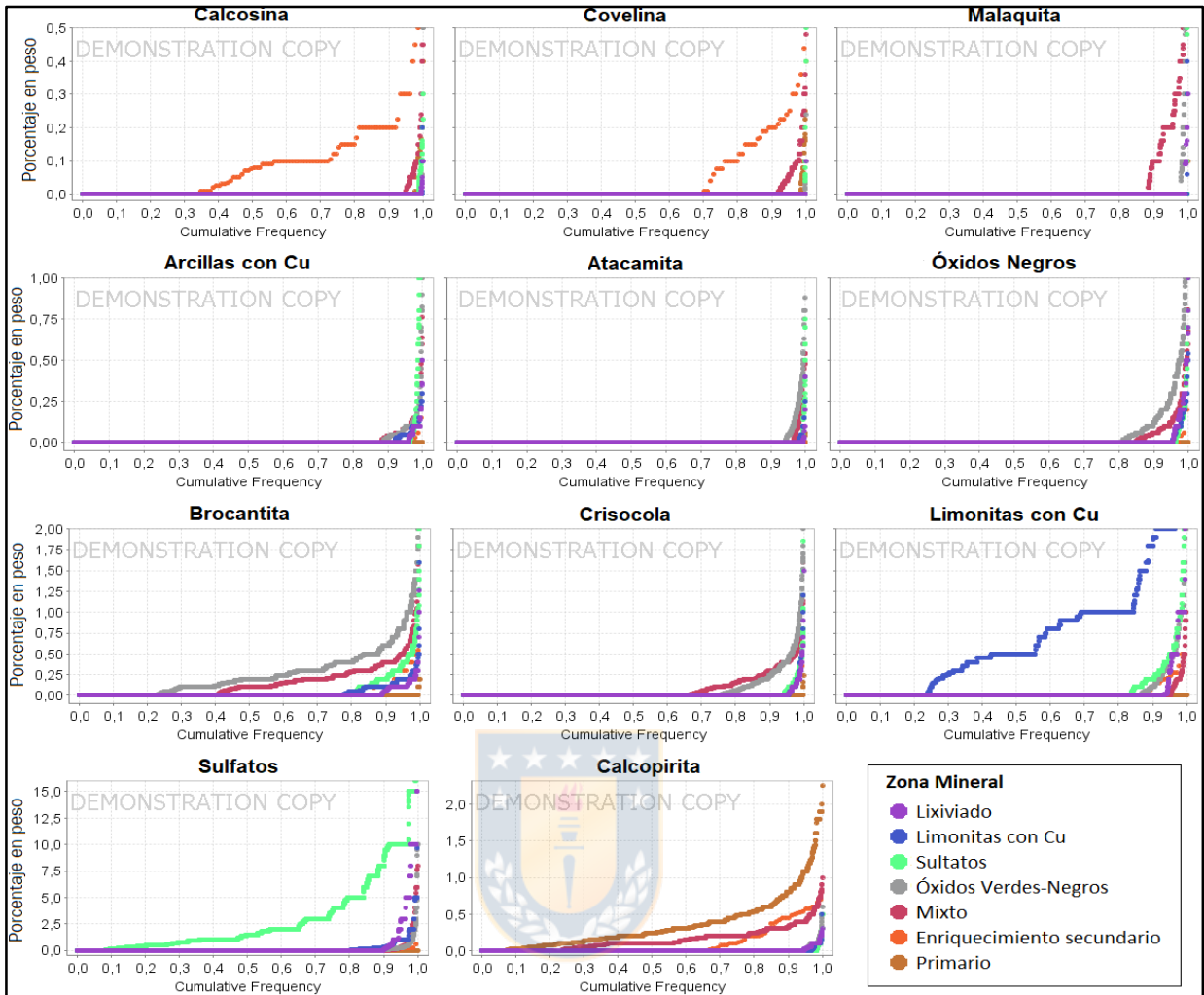


Figura 6.7: Distribución de porcentajes de menas de mapeo por zona mineral.

subdivisión no sería inadecuada. La zona mixta es otro grupo que presenta gran variabilidad mineralógica, sin embargo, al ser un grupo más pequeño la subdivisión podría resultar más difícil de manejar espacialmente.

Para validar la asignación de zonas minerales en el mapeo, se compara la mineralogía de mena obtenida mediante diferentes estudios mineralógicos con las zonas minerales. En primer lugar, se compara con mineralogía TESCO, representando las menas por zona mineral en la Figura 6.8. Se omiten minerales con abundancia menor a 0,5%, con más del 95% de los datos iguales a cero.

En esta figura se observa una buena relación entre la mineralogía y la zona asignada, con altos porcentajes de calcopirita en la zona primaria, altos porcentajes de óxidos de hierro con cobre en la zona de limonitas, una zona mixta con calcopirita y óxidos de cobre, zona de óxidos verdes-

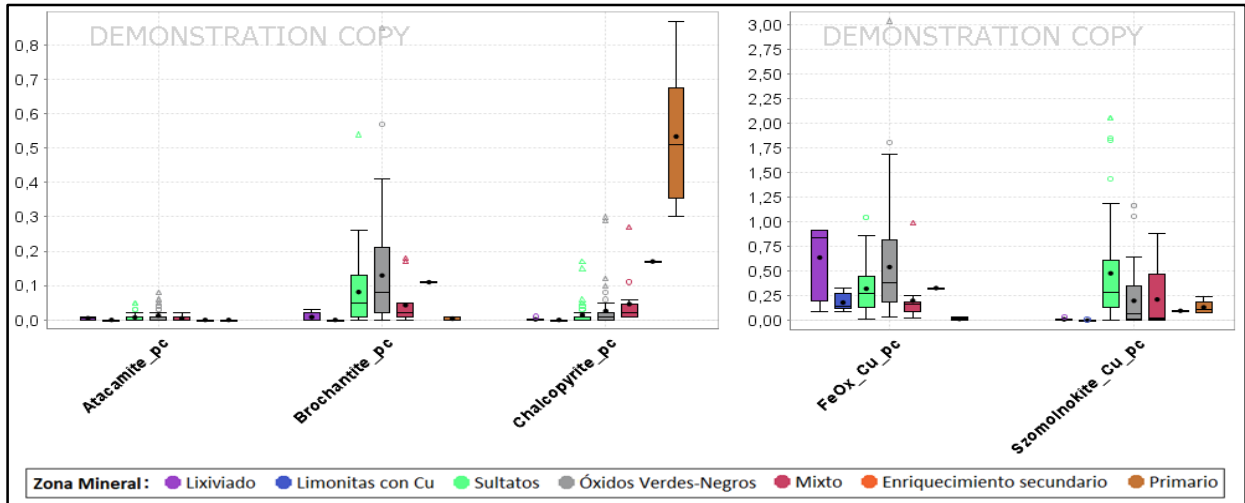


Figura 6.8: Menas Tescan por zona mineral.

negros con abundante brochantita (sin información de óxidos negros copper wad/pitch aunque con abundantes óxidos de hierro con cobre) y la zona de sulfatos con abundante szomolnokita (principal sulfato de hierro con cobre del yacimiento). Los porcentajes de brochantita son menores a los observados en el mapeo, y muestran una abundancia en la zona de sulfatos (de hierro con cobre) mayor a la registrada en el mapeo. Destacan además los bajos porcentajes de szomolnokita con cobre detectados con este método, muy por debajo de los porcentajes de mapeo, lo que posiblemente se debe a la dificultad de diferenciar szomolnokita con cobre de szomolnokita sin cobre de manera macroscópica, derivando en una sobrestimación del porcentaje de szomolnokita de mena en el mapeo.

La mineralogía DRX (Figura 6.9) varía considerablemente con respecto a las anteriores, diferenciándose de forma clara únicamente la zona primaria, con un alto contenido de calcopirita, mucho mayor a los observados en mapeo y Tescan. La atacamita se encuentra en mayor proporción con respecto a Tescan y mapeo, y su mayor abundancia está asociada a la zona secundaria, contrario a lo esperable, mientras que la brochantita se encuentra en rangos de porcentaje similares a los de mapeo y es levemente mayor en la zona de óxidos verdes-negros, pero con muy poca diferencia con las demás zonas. Los sulfuros secundarios covelina y roxbyita (mineral de la familia de la calcosina-digenita), se encuentran en proporción mucho más alta con respecto al mapeo y su mayor abundancia se asocia a las zonas mixta y lixiviada respectivamente, en donde el contenido de estos minerales no se esperaría que fuera tan alto. Finalmente, la szomolnokita, que en este caso corresponde a szomolnokita total (DRX no registra szomolnokita con cobre por

separado como TESCANA), se encuentra en cantidades similares a las de mapeo, confirmando que la sobrestimación de la szomolnokita de mena mapeada se debe a la imposibilidad de diferenciar la que tiene cobre del porcentaje total. Este mineral es más abundante en la zona de sulfatos, aunque en este caso con poca separación del resto de las zonas, como la de mixtos, óxidos verdes-negros, limonitas con cobre y enriquecimiento secundario, las cuales contienen también un porcentaje importante. DRX incorpora además, información mineralógica de antlerita, abundante en la zona de óxidos verdes, y sampleita, abundante en las zonas de óxidos verdes-negros y sulfatos, siendo consistente con lo esperable.

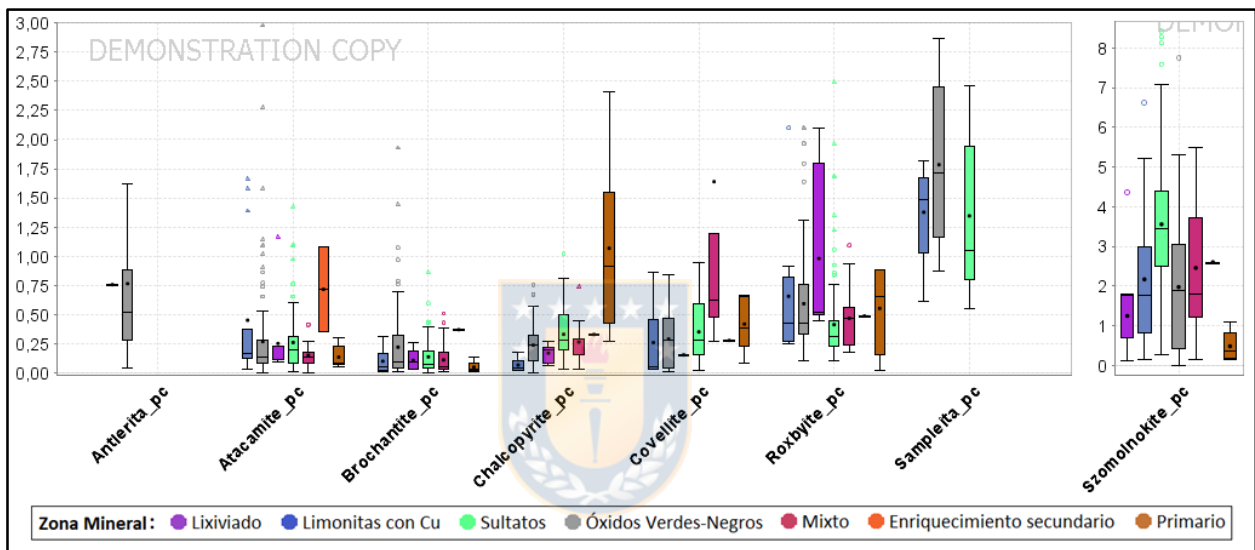


Figura 6.9: Menas DRX por zona mineral.

6.1.1.3. Leyes visuales

Se comparan las leyes visuales (suma ley de óxidos y ley de sulfuros) obtenidas del mapeo de sondajes con el cobre total medido mediante análisis químico para estos mismos tramos. Se representan los errores como la diferencia Ley Visual-CuT en la Figura 6.10, en donde se identifica que el 1% de los datos tiene errores mayores a 0,85% CuT, y el 7,8% de los datos una diferencia mayor a 0,4, que constituye un error muy alto. El 72,1% de los datos tiene una diferencia menor a 0,2, sin embargo 0,2 ya es una diferencia considerable para un yacimiento de baja ley, y solo el 49,9% de los datos presenta un error menor a 0,1. Además, el 80% de los datos tiene un error negativo, indicando subestimación en el mapeo geológico del contenido de cobre.

Debido a las importantes diferencias observadas en las leyes visuales del mapeo geológico y el

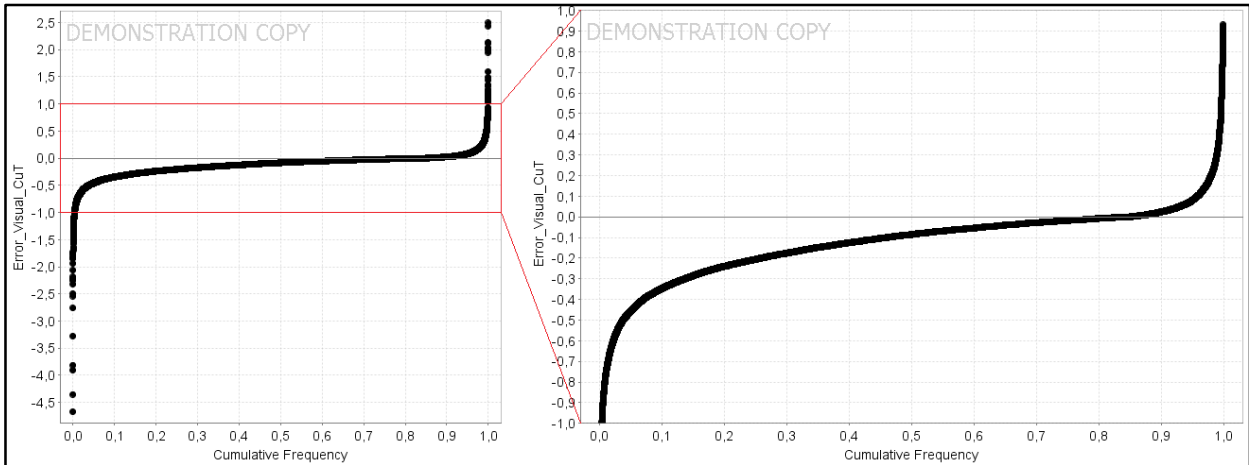


Figura 6.10: Distribución de errores en leyes de mapeo. Error igual a ley visual-CuT medido.

CuT medido, se analizan los datos para identificar posibles controles geológicos de estos errores, para lo cual se realiza una comparación del error por zona e intensidad de alteración (Figura 6.11), zona mineral y litología, en gráficos de caja.

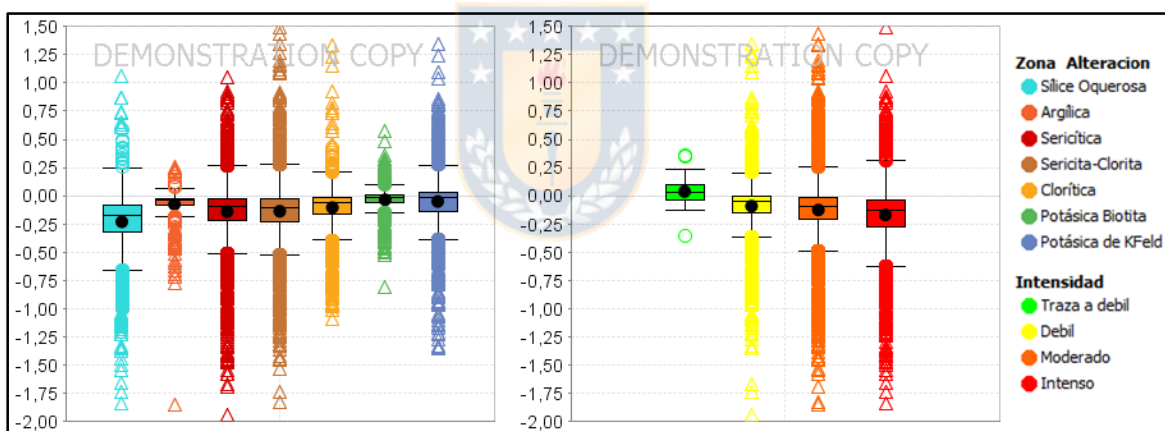


Figura 6.11: Errores ley visual por alteración. Zona de alteración e intensidad.

Los menores errores se asocian a las alteraciones argílica y potásica de biotita. Sin embargo, estas alteraciones son también las que concentran el menor número de datos, por lo que podría no ser representativo. Todas las alteraciones tienen error negativo, es decir, en todas se subestima el contenido de cobre en el mapeo, lo que es muy pronunciado en la alteración sílice oquerosa, y en menor medida en las alteraciones sericítica y sericítica-clorítica, lo que indica submapeo o no identificación de minerales, dentro de estas alteraciones.

Se reconoce una fuerte relación entre el grado de alteración y el error, siendo mayor en las zonas de alteración más intensa, en donde también ocurre una mayor subestimación de las leyes en el

mapeo, mientras que en el grado de alteración traza a débil, el error es menor y hay mayor sobrestimación de las leyes en el mapeo.

En cuanto a las zonas minerales (Figura 6.12), los menores errores se asocian a la zona lixiviada, de enriquecimiento secundario y primario, mientras que los más altos se asocian a zona de limonitas con cobre y sulfatos, con una subestimación importante de las leyes en el mapeo. Las zonas de óxidos verdes-negros y mixtos tienen errores intermedios, con subestimación de la ley menor que en las zonas de sulfatos y limonitas con cobre.

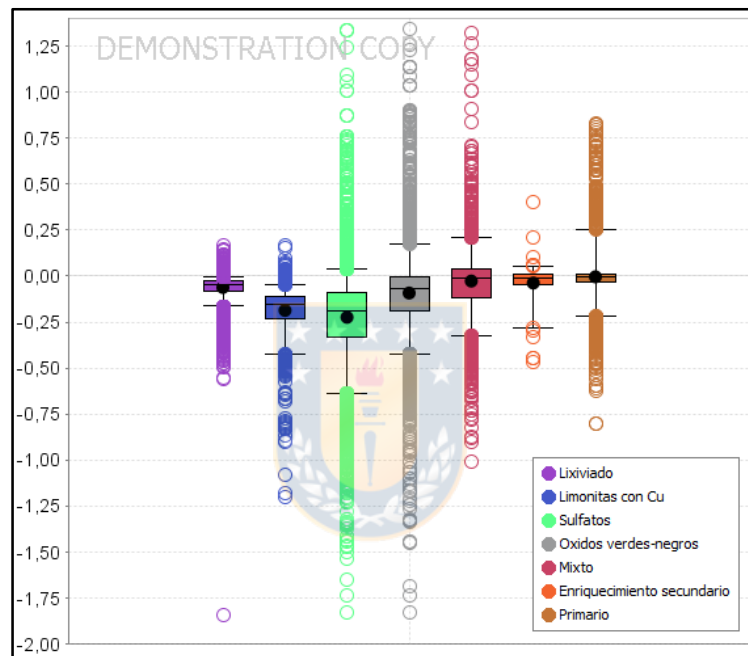


Figura 6.12: Errores ley visual por zona mineral.

Para el caso de las litologías (Figura 6.13), los menores errores se asocian a intrusivo y pórfido tardío, sin embargo, se debe considerar que estos también corresponden a grupos con el menor número de datos, bastante bajo con respecto al total. Las litologías de pórfido indiferenciado y unidad volcánica son las rocas con mayor error de leyes asociado, con subestimación de la ley en más del 75% de los datos, mientras que las litologías brecha ígnea y los pórfidos Buey Muerto y Antucoya, tienen errores un poco menores, con valores más cercanos al cero. Cabe destacar que los pórfidos Buey Muerto y Antucoya concentran sobre el 68% del total de datos.

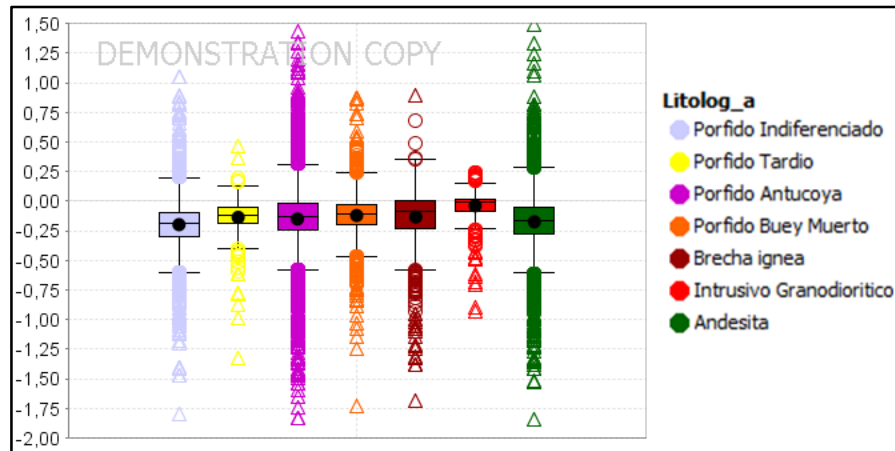


Figura 6.13: Error ley visual por litología.

6.1.2. VALIDACIÓN ESTUDIOS MINERALÓGICOS

La mineralogía de Antucoya es compleja, con variadas menas oxidadas, las cuales muchas veces no tienen una fórmula química estable y/o son amorfos, por los que su determinación mediante estudios mineralógicos es muy difícil de lograr adecuadamente. Por este motivo, se revisan los resultados de los análisis TESCAN y DRX para evaluar el grado de error que presentan y considerarlo en los análisis siguientes.

6.1.2.1. Validación resultados TESCAN con análisis químicos

A partir de la abundancia de minerales determinada por TESCAN y su estequiometría, es posible obtener una ley de cobre en base a este método. Utilizando este dato, y para validar los resultados de mineralogía de mena, se compara el cobre total medido para cada tramo de sondaje, con el cobre reconocido mediante el análisis TESCAN, y se representan los errores como la diferencia entre cobre TESCAN y el cobre total de análisis químico en la Figura 6.14, en donde se identifica que estos se encuentran entre -0,49 y 0,35, teniendo un rango menor que los errores en leyes de mapeo.

El 1,1% de los datos tiene una diferencia mayor a 0,35 y el 82% menor a 0,2, con menor porcentaje de datos dentro de dichos rangos de error con respecto a los obtenidos de mapeo. El 49% de los datos presenta una diferencia menor a 0,1, valor similar al obtenido con las leyes visuales.

Sobre el 90% de los datos presenta una subestimación de las leyes TESCAN con respecto al cobre total, indicando la existencia de menas no identificadas mediante este análisis, o bien porcentajes subestimados de minerales reconocidos.

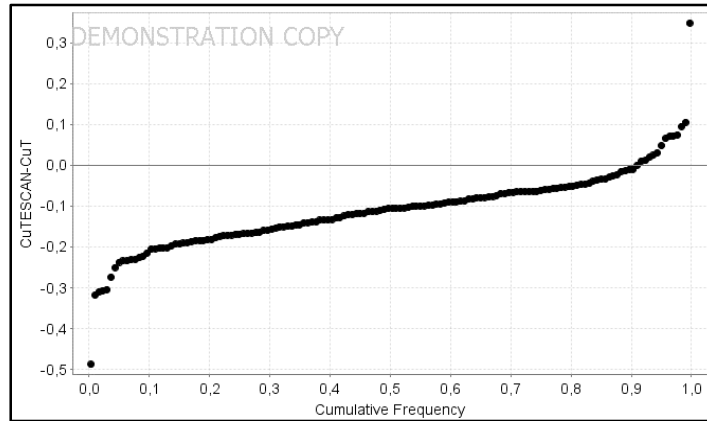


Figura 6.14: Distribución de errores en leyes TESCAN. Error igual a Cu TESCAN-CuT medido.

6.1.2.2. Comparación mineralogía TESCAN y DRX

Para la revisión de los resultados de DRX, no es posible realizar el análisis anterior, ya que este método no entrega resultados en base a una composición química con una estequiometría predeterminada para cada especie identificada, y además, el número de especies de mena que identifica es menor con respecto al análisis TESCAN. Es por esto que se compara ambos resultados, para evaluar el grado de correlación entre ambos.

En la Figura 6.15 se muestran las principales especies comparables entre ambos análisis, en donde la plagioclasa corresponde al mineral de mayor similitud de porcentajes entre los dos métodos. En el cuarzo se observa también un grado de correlación, aunque con un mayor rango de variabilidad, y la muscovita, no muestra ninguna relación, apareciendo una nube de puntos. Minerales como la clorita, caolinita, calcita y szomolnokita siguen una tendencia, en la mayoría de los casos con porcentajes mayores en DRX, pero con mucha variabilidad entre ambos resultados. En cuanto a las menas comparables, atacamita y calcopirita son en la mayoría de los casos sobrestimadas con DRX, mientras que la brocantita, es tanto sobrestimada, como subestimada con este método. En todas las menas se observa ausencia de correlación entre los porcentajes determinados por TESCAN y DRX.

Las diferencias observadas entre ambos métodos responden principalmente a los diferentes enfoques de ambas técnicas que hacen que se complementen mutuamente. DRX es especialmente útil para identificar minerales de ganga, en particular filosilicatos y minerales de tamaño menor a 2 μm , a diferencia de TESCAN, que presenta dificultades en la determinación de minerales muy finos al realizar su análisis en una grilla de pixeles con resolución máxima de 3 μm . Esto explica

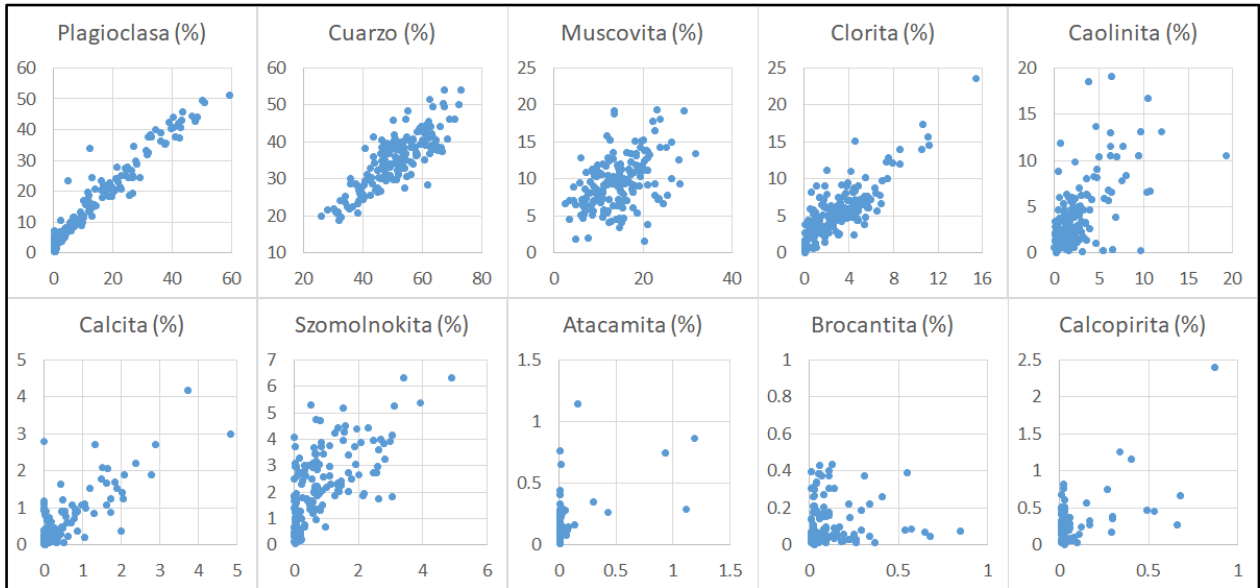


Figura 6.15: Gráficos de dispersión por mineral con porcentajes TESCAN y DRX. Porcentajes TESCAN en eje horizontal, y porcentajes DRX en eje vertical.

las diferencias observadas en minerales como la muscovita, la clorita y la caolinita. De igual forma, TESCAN entrega buenos resultados en la determinación de los minerales de mena presentes, al identificar la composición modal de la muestra, con límites de detección de 0,01%, a diferencia de DRX, que identifica únicamente fases cristalinas, con un límite de detección entre 0,5-3%, el cual varía dependiendo de la especie mineral y su grado de cristalinidad, no resultando la técnica más adecuada para identificar y cuantificar los minerales de mena existentes en Antucoya y explicando las diferencias observadas en los contenidos de atacamita, brocantita, calcopirita y szomolnokita.

6.1.3. VALIDACIÓN MENAS EXTRACCIÓN PARCIAL

Utilizando los resultados de las mediciones de extracción parcial de cobre es posible, en pórfidos de mena estable, estimar una composición mineralógica (mineralogía PTXT). Este análisis corresponde a un método químico de cuantificación de cobre, hierro y azufre, mediante distintas etapas de ataques con diferentes químicos, desarrollado por BHP (Williams, Gilligan y Preece, 2000), basándose en que la cantidad liberada de cobre es una constante determinada experimentalmente que depende de la especie mineral y el agente lixiviante, denominada “extracción limitante”.

A partir de estos valores y, con el supuesto teórico de que todo el cobre contenido en la muestra proviene de las especies minerales consideradas, se plantea un sistema matricial que permite

obtener los Copper Source Ratio (CSR) que indican la razón del total de cobre que proviene de cada especie y que multiplicados por el valor analítico de cobre total entregan el Copper Source Percent (CSP) correspondiente a la cantidad de cobre (ley de cobre) que proviene de cada mineral.

En Antucoya, dada la naturaleza principalmente oxidada del yacimiento, se modificó el método desarrollado en BHP (enfocado a sulfuros), resultando en una matriz de 5 componentes que representan a los diferentes óxidos agrupados de la siguiente forma:

- Brocantita PTXT: Brocantita, atacamita, malaquita, pseudomalaquita.
- CuG PTXT: Limonitas con cobre, óxidos negros (copper wad/pitch), cuprita, calcopirita.
- Crisocola PTXT: Crisocola, arcillas con cobre.
- Calcosina PTXT: Calcosina, digenita, tetraedrita, bornita.
- Szomolnokita PTXT: Szomolnokita con cobre.

Esta agrupación de minerales se realizó de acuerdo a sus comportamientos frente a la lixiviación con los diferentes compuestos, y se debe tener en consideración al momento de hacer comparaciones con otros métodos.

De parte de AMSA se recibe una planilla Excel con la mineralogía modal de menas obtenida a partir de la matriz desarrollada utilizando datos de solubilidad de la campaña “2019-Pulpas-PTXT”, la cual se somete a una validación para evaluar su utilidad en los objetivos de este trabajo.

Para comparar las asociaciones de mena inferidas utilizando los resultados de extracción parcial (PTXT) con datos de mineralogía normativa obtenida de mapeo, se utilizan los valores de CSR (Copper Source Ratio) que indican la proporción en que se encuentra cada uno de los minerales, con respecto al total correspondiente a la suma de todos los minerales considerados en la matriz, por lo que pueden contrastarse directamente con las proporciones de óxidos y sulfuros mapeadas (porcentaje de un óxido o sulfuro, con respecto al total de óxidos o sulfuros respectivamente). Para comparar con resultados de TESCAN y DRX en cambio, se debe hacer una transformación de los CSP (Copper Source Percent), ya que estos análisis entregan valores en porcentaje en peso de cada mineral. Para lograr esto se debe multiplicar el CSP por 100 y luego dividirlo por el porcentaje de cobre de la respectiva mena. Esto trae el inconveniente de tener que utilizar un valor de ley promedio de las leyes de todos los minerales que pertenecen al grupo, lo que afecta el cálculo.

6.1.3.1. Mapeo en terreno

Se realiza una revisión en terreno de los tramos con resultados de extracción parcial y su disponibilidad física para ser mapeados, descubriendo que gran parte de estos no se encontraban en la muestrera, por lo que solo fue posible mapear y comparar los resultados de los descritos en la Tabla 6.1. Se observa en dos tramos una sobrestimación importante (24 a 30%) de la szomolnokita en el mapeo, y en otro par de tramos, de crisocola (16 a 36%). La brocantita fue tanto sobrestimada, como subestimada en el mapeo con respecto a extracción parcial, en rangos que alcanzan una diferencia máxima de un 21%. En cuanto a los cobres negros, hay mayores similitudes, con dos tramos que alcanzan diferencias de un 18% entre ambos resultados. El tramo AVD12-4 (283,46-284) es el que tiene mayor coincidencia entre ambos resultados, siendo también uno de los tramos de menor extensión en metros.

Tabla 6.1: Comparación menas extracción parcial con mapeo en terreno. En celeste, porcentajes relativos de extracción parcial, y en blanco mapeo, con minerales agrupados de la forma antes señalada.

Sondaje	Desde (m)	Hasta (m)	Cobre refr.	Calcosina	Brocantita	Crisocola	Szomolnokita
ANTEX-14	444	446	90	6	4	0	0
			100	0	0	0	0
AVD12-4	90	92	2	2	21	4	71
			20	0	0	10	70
AVD12-4	283,5	284	7	10	53	13	17
			5	0	60	15	20
AVD12-4	284	284,5	8	10	54	24	5
			0	0	50	40	10
AVD12-4	284,5	285	8	10	54	24	5
			0	0	40	60	0
AVD12-4	292,2	293,15	12	5	56	20	6
			15	0	35	20	30
AVD12-4	313,85	316	18	7	51	24	0
			0	0	50	20	30

6.1.3.2. Base de datos de mapeo

Debido a la poca información que fue posible mapear directamente de tramos de sondajes con resultados de extracción parcial, se decidió realizar una comparación de los tramos con extracción parcial con el mapeo histórico registrado en la base de datos. Para esto, debido a que la cantidad de información es mucho mayor, se compararon ambos resultados en dos secciones tipo, graficando para cada sección, a la izquierda de la traza del sondaje las proporciones minerales de mapeo, y a la derecha estimaciones realizadas por extracción parcial. Estas secciones están ubicadas en el yacimiento como se muestra en la Figura 6.16.

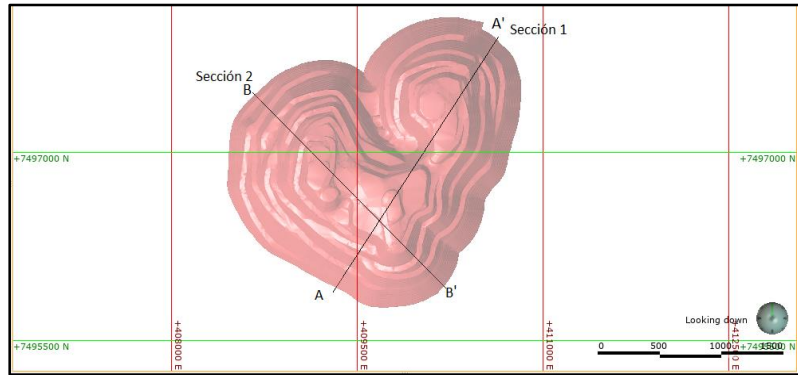


Figura 6.16: Ubicación de las secciones tipo en Antucoya. Sobre pit final.

En primer lugar, se comparan los resultados de brocantita, observándose una fuerte sobrestimación en las zonas en donde este mineral es reconocido, con respecto a la estimación mediante extracción parcial, lo que se repite en ambas secciones (Figura 6.17). A la vez, la estimación por extracción parcial reconoce brocantita prácticamente en todos los sondajes y para todas las profundidades en porcentajes variables, lo que no es consistente con la geología y leyes del yacimiento.

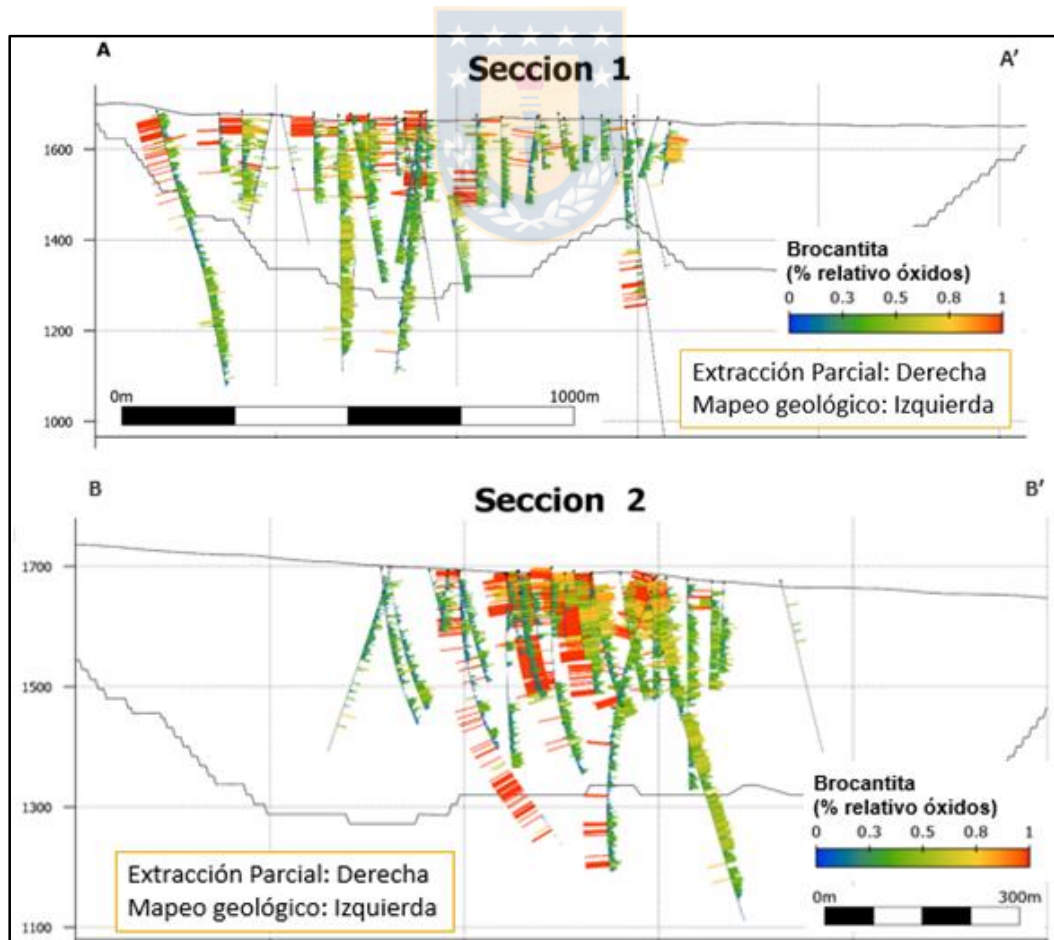


Figura 6.17: Brocantita mapeada comparada con PTXT en secciones tipo.

Los resultados de crisocola en la Figura 6.18 muestran menor contraste en la primera sección, pero en la segunda la sobrestimación de la crisocola mediante extracción parcial es considerable, y al igual que ocurre con la brocantita, se extiende a todo el yacimiento y a profundidades en donde los óxidos deberían ser escasos.

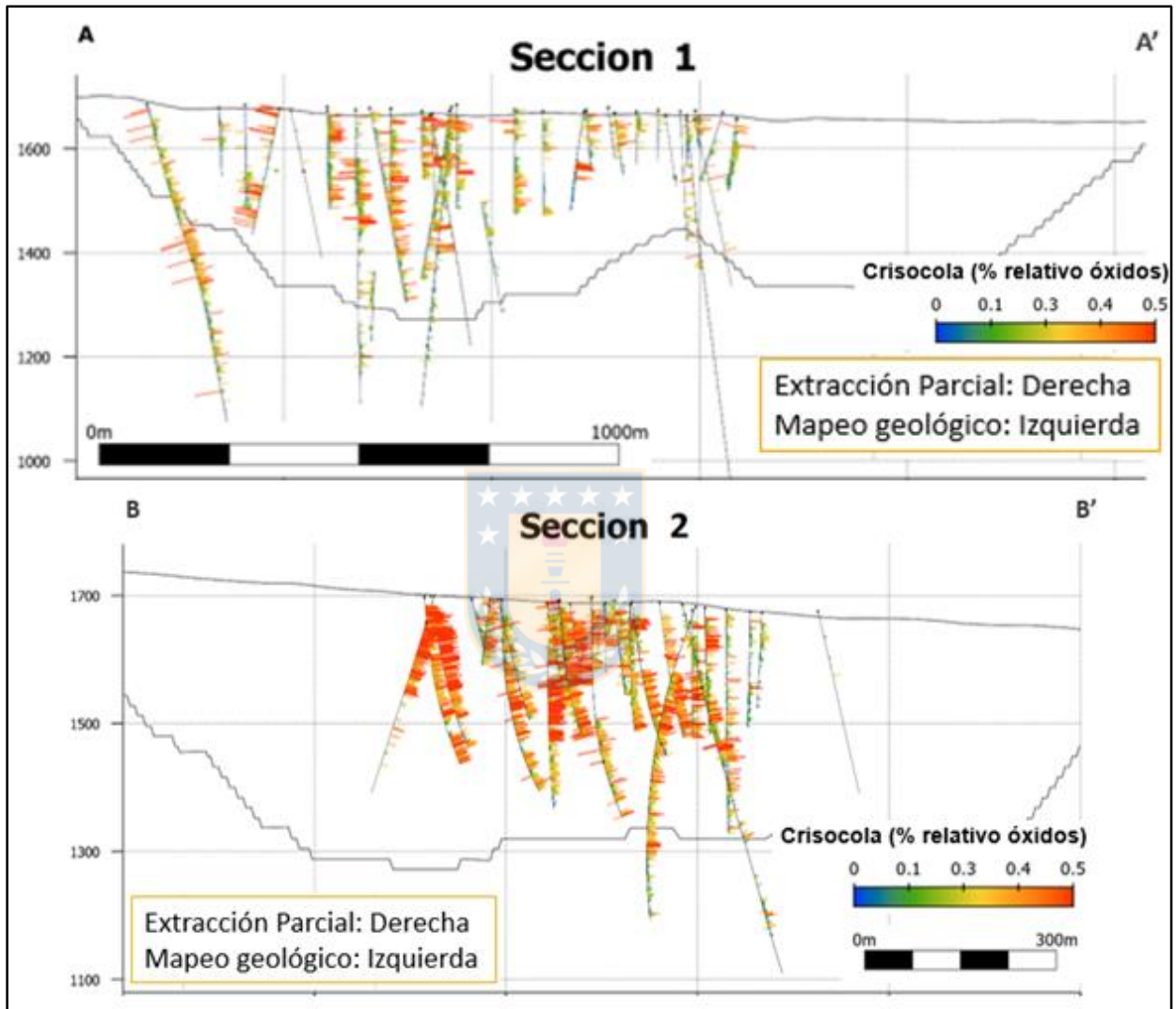


Figura 6.18: Crisocola mapeada comparada con PTXT en secciones tipo.

En la Figura 6.19 en donde se observan los resultados del cobre refractario (CuG), vuelve a ocurrir lo mismo observado en minerales anteriores, pero en este caso, según extracción parcial, hay una distribución más homogénea del contenido de cobres negros en el yacimiento, que aumenta en profundidad en donde se podría interpretar como calcopirita (mineral incluido dentro de este grupo en la estimación por extracción parcial), mientras que las zonas más superficiales corresponderían a óxidos negros y limonitas con cobre, en donde hay poca concordancia entre ambos resultados.

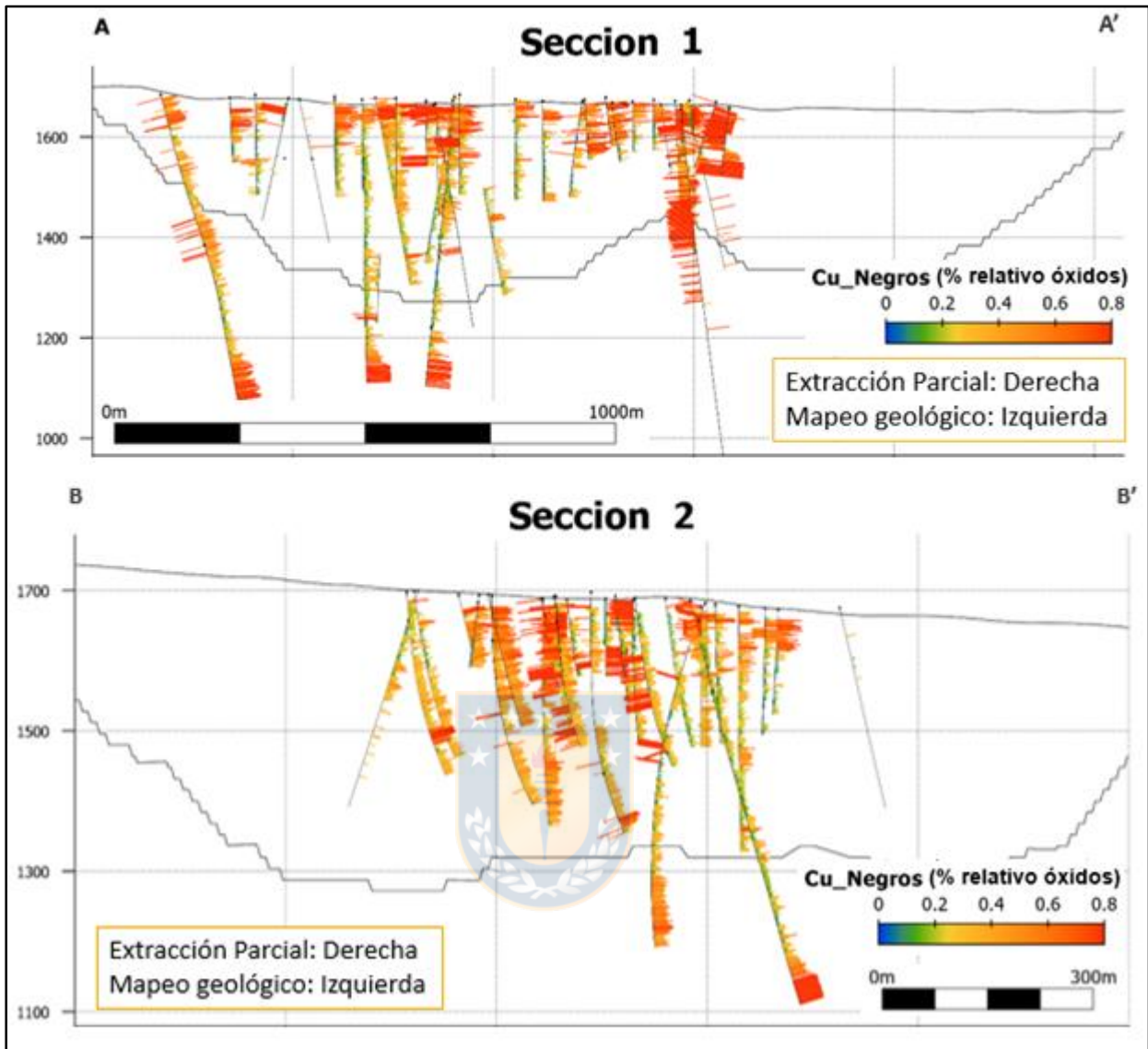


Figura 6.19: Óxidos negros mapeados comparados con PTXT en secciones tipo.

Finalmente, en el caso de la szomolnokita, el contraste de ambos resultados es aún mayor, con una fuerte sobrestimación de este mineral en el mapeo (Figuras 6.20), asociado a lo mencionado previamente, ya que la estimación por extracción parcial, al igual que los porcentajes TESCOAN, considera únicamente la szomolnokita con cobre, la cual es muy difícil de diferenciar de la szomolnokita total mediante inspección visual.

De esta forma, se comprueba una gran diferencia entre los resultados de mineralogía determinados con extracción parcial y los de mapeo.

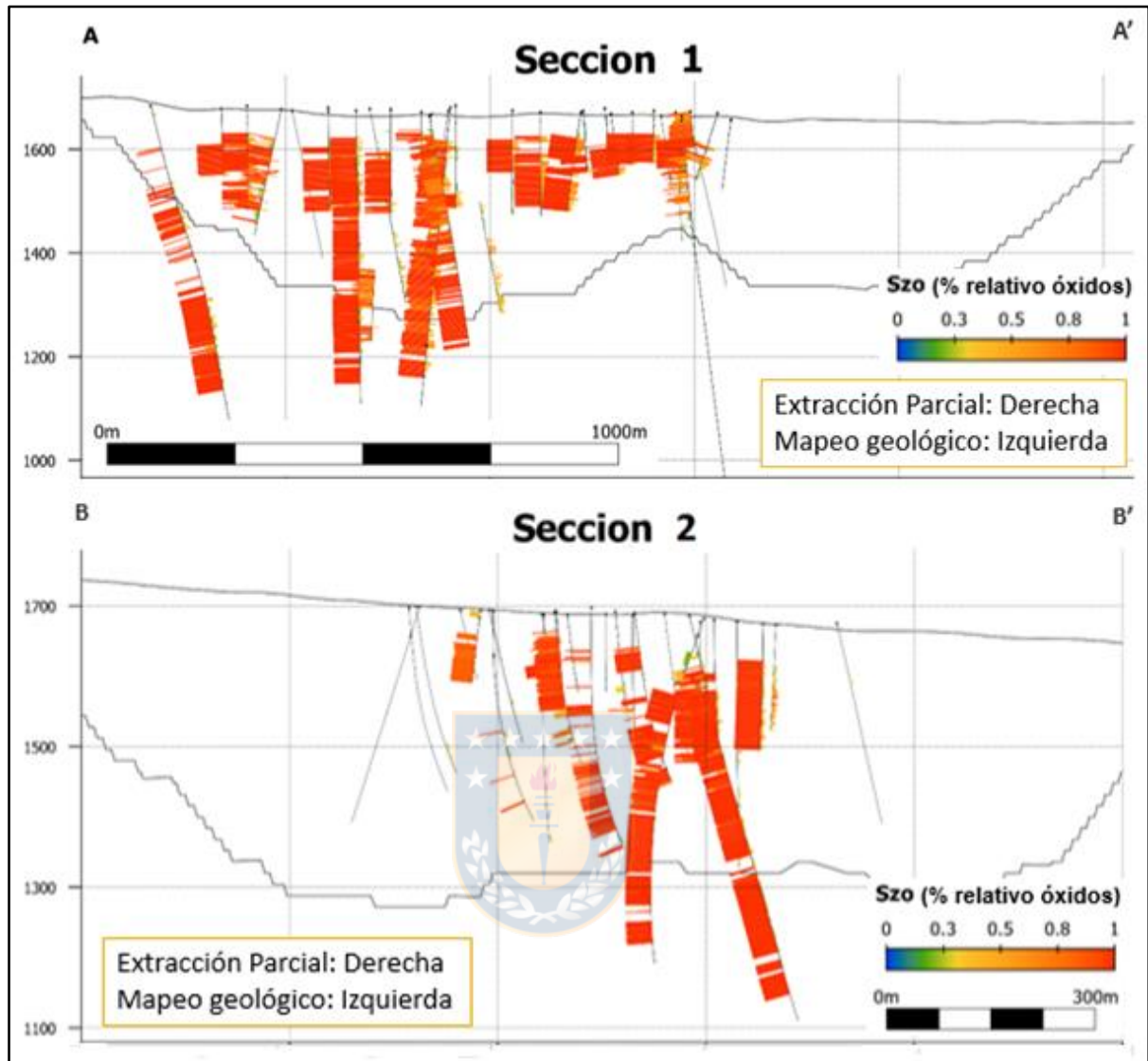


Figura 6.20: Sulfatos (szomolnokita) mapeados comparados con PTXT en secciones tipo.

6.1.3.3. Análisis mineralógicos

Para corroborar las tendencias antes vistas, se comparan los resultados de extracción parcial, con resultados de análisis por TESCAN, observándose poca relación entre ambos resultados y mucha dispersión de los datos (Figura 6.21). En el caso del CuG (óxidos negros con cobre), brocantita y calcopirita, se podría identificar una tendencia, pero aun así la relación es muy débil.

Al comparar con la mineralogía obtenida por DRX (Figura 6.22), los resultados tampoco son satisfactorios, con resultados aún menos relacionados que en el caso anterior.

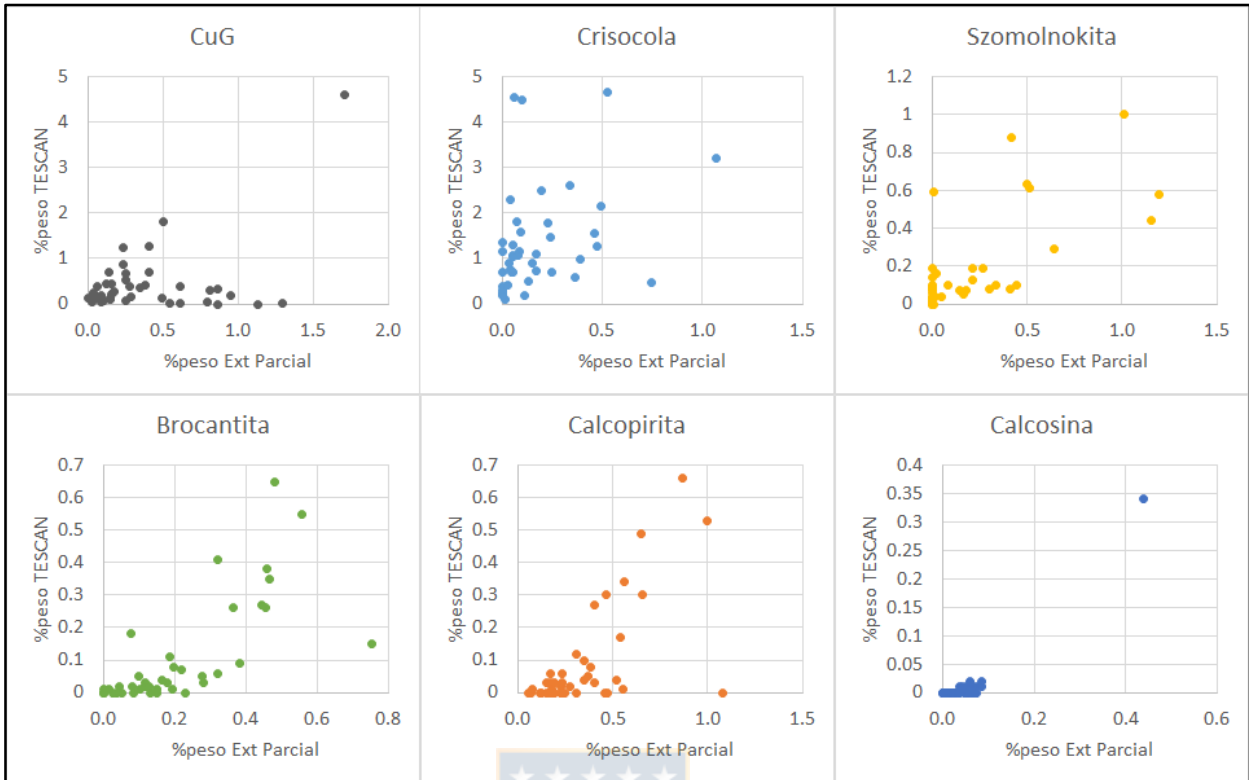


Figura 6.21: Comparación de mineralología TESCAN y estimada por PTXT.

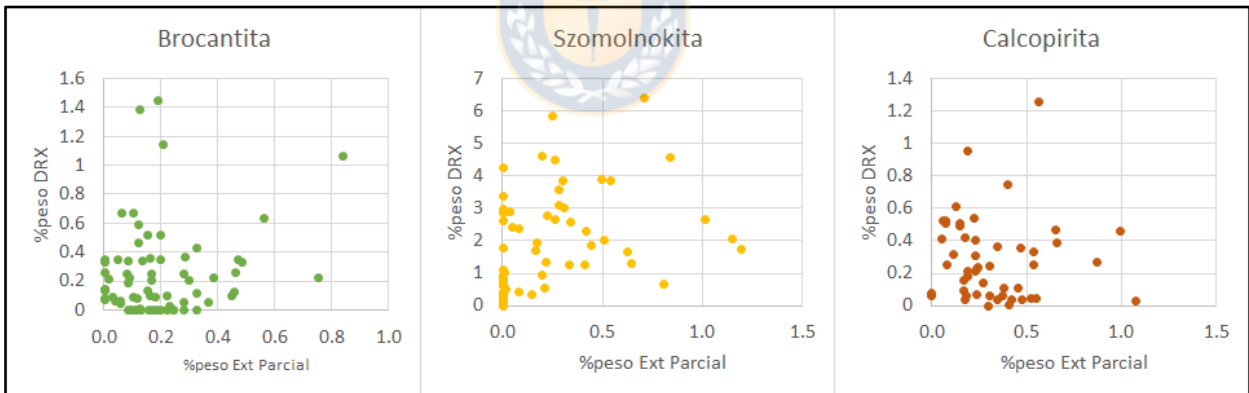


Figura 6.22: Comparación de mineralología DRX y estimada por PTXT.

6.2. ANÁLISIS INFORMACIÓN QUÍMICA

Se descarta la determinación de menas en base a extracción parcial por la poca correlación que muestra con el mapeo geológico y otros análisis mineralógicos. Los datos de solubilidad de extracción parcial tampoco se utilizan por la mala distribución de ellos en el yacimiento, y principalmente debido al hallazgo de incongruencias en revisiones internas llevadas a cabo por la empresa, que concluyen la necesidad de validar con certificados de laboratorio los resultados de la

campana “2019-Pulpas-PTXT”, que concentra la mayor parte de los datos, dejando muy poca información utilizable. Los resultados de análisis de extracción secuencial son muy localizados, por lo que son poco representativos para los análisis preliminares y tampoco serán considerados en esta primera instancia.

Por esta razón, se trabaja únicamente con las mediciones de cobre total y cobre soluble en ácido sulfúrico, disponibles en gran parte de los sondajes y en muestras de metraje constante (2 m), para identificar relaciones entre estos valores y mineralogía.

6.2.1. CONTROL GEOLÓGICO DE CUT Y CUS (EN ÁCIDO SULFÚRICO)

Como una primera aproximación a los minerales que controlaran estos valores, se revisa la variación de cobre total y cobre soluble en ácido sulfúrico con las litologías y zonas de mapeo. Para este análisis se trabaja con la razón de solubilidad (RS), la cual se calcula dividiendo el cobre total por el cobre soluble en ácido sulfúrico y multiplicando el resultado por 100, para obtener el porcentaje de cobre soluble en este ácido. Para calcular este valor se aplican algunos filtros a los datos, restando del análisis aquellos que cuentan con una o más de las siguientes condiciones:

- Datos con cobre soluble mayor al cobre total.
- Valores negativos de cobre soluble y/o cobre total.
- Datos de cobre total menores a 0,1, se omiten para cálculo de RS por el alto error que pueden inducir al hacer el cociente, pero si son considerados para el análisis de cobre total.

En primer lugar se evalúa el control litológico de estas variables, graficando RS y cobre total por litología en la Figura 6.23, en donde no se observan diferencias marcadas para cada litología, separándose únicamente las gravas, con una baja ley y baja RS, que corresponden a rocas estériles, el intrusivo granodiorítico, con baja RS y ley, pero valores más altos que los de gravas, indicando mineralogía poco soluble en ácido sulfúrico, y el pórfido tardío, con alta RS pero baja ley, lo que indica mineralogía de solubilidad similar a los demás pórfidos, pero en menor volumen. Cabe destacar además, que la roca indiferenciada, correspondiente a rocas en donde no se reconoce una litología generalmente debido a un fracturamiento y alteración intensa, tiene la mayor solubilidad de todas las litologías, por lo que se podría inferir la presencia de sulfatos de hierro con cobre, minerales muy solubles asociados usualmente a las características litológicas mencionadas.

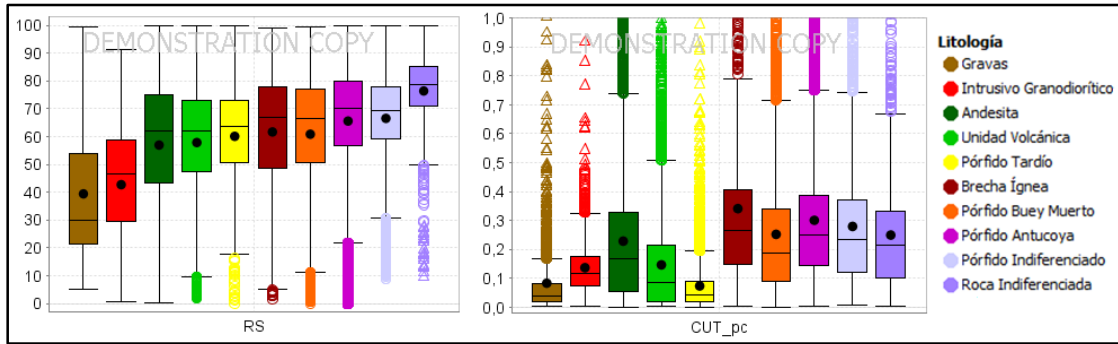


Figura 6.23: Razón de solubilidad y cobre total por litología.

Los valores de RS y cobre total también se grafican para cada zona mineral (Figura 6.24). En este caso tal como se espera, la RS se encuentra estrechamente relacionada a las zonas minerales mapeadas, con valores muy bajos para la zona primaria en donde mineralizan sulfuros de solubilidad muy baja, un poco mayores para la zona de enriquecimiento secundario y mixta, con sulfuros de mayor solubilidad y coexistencia con óxidos, y valores máximos para las zonas de óxidos verdes-negros y sulfatos, en donde predominan los minerales de cobre solubles. Las zonas lixiviada y de limonitas con cobre tienen RS intermedia, por lo que se infiere la coexistencia de minerales oxidados solubles y refractarios.

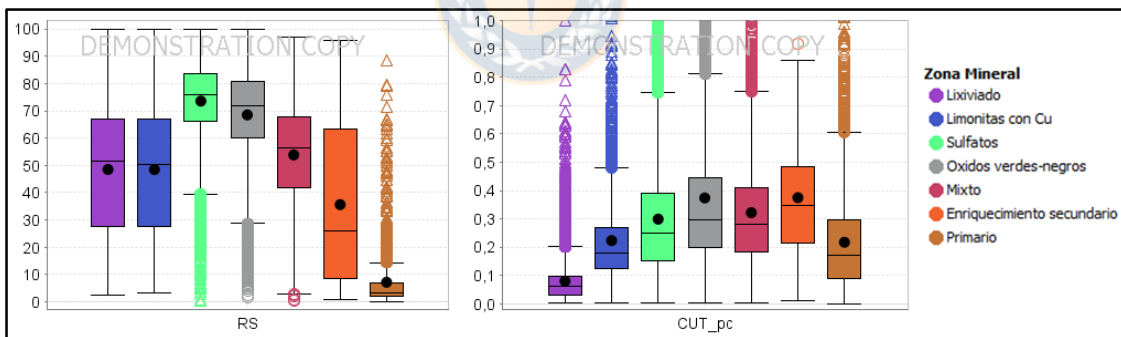


Figura 6.24: Razón de solubilidad y cobre total por zona mineral.

El cobre total también se encuentra relacionado a las zonas minerales, destacando la zona lixiviada con una ley muy baja, zonas oxidadas con ley ascendente desde limonitas con cobre hasta óxidos verdes-negros y zona mixta de ley similar a la de óxidos verdes-negros. En cuanto a las zonas de sulfuros, la zona de enriquecimiento secundario tiene una ley alta, bastante mayor a la de la zona primaria.

Se observan similitudes en los valores de RS y cobre total de las zonas de óxidos verdes-negros y sulfatos, las que podrían deberse a la alta presencia de sulfatos en zona de óxidos verdes-negros y

abundante brocantita en zona de sulfatos, que implican un límite difuso entre ambos grupos, ya discutidos en el capítulo anterior.

Al graficar los valores de RS y cobre total por zona de alteración (Figura 6.25), no se identifican diferencias importantes en la ley, sin embargo, la RS varía disminuyendo con las alteraciones más profundas, con mayor contenido de clorita y minerales de alteración potásica.

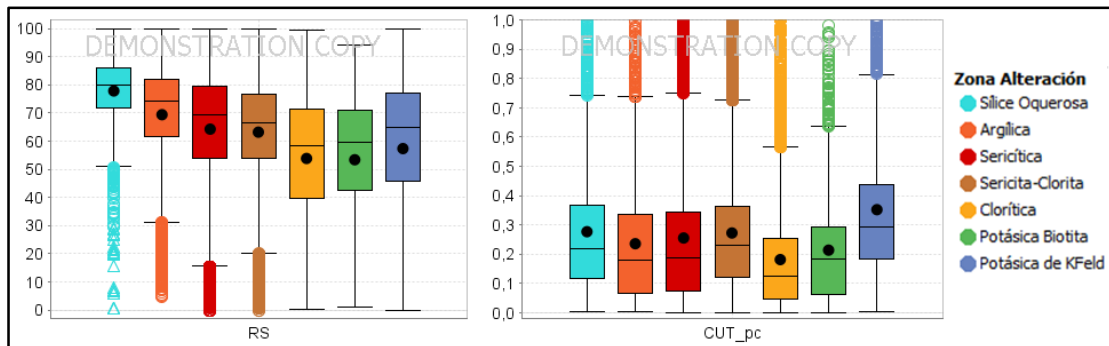


Figura 6.25: Razón de solubilidad y cobre total por zona de alteración.

Como el modelo de clasificación de alteración presentaba ciertos errores y subjetividades en la asignación de la zona, se trabaja con mineralogía NIR, para complementar el análisis enfocado a identificar posibles relaciones entre la RS y las zonas de alteración.

Para esta comparación, se utilizan diagramas ternarios graficando los tramos según sus porcentajes NIR, en diferentes combinaciones de minerales de alteración característicos, para definir zonas. Se muestran únicamente los diagramas en donde se observan mejores relaciones con valores químicos.

En primer lugar, se evalúa la relación de los minerales cuarzo, muscovita y caolinita (Figura 6.26), característicos de alteraciones de baja temperatura, para identificar diferencias en las proporciones de estos minerales que se asocian a variación en RS y/o cobre total. La mayor solubilidad se asocia a altos contenidos de cuarzo y muscovita, minerales que muestran un comportamiento similar, en cuanto a RS y cobre total. Esto indica una zona de alteración cuarzo-sericítica con poca caolinita, asociada a minerales de mena solubles, aunque con leyes variables, ya que si bien estas zonas concentran valores de alta ley, también se encuentran altas leyes en zonas de menor porcentaje cuarzo+sericita. De igual manera, hay valores de abundante cuarzo+sericita con ley baja-intermedia. Los mayores porcentajes de caolinita por su parte se asocian a bajas solubilidades y leyes medias-bajas.

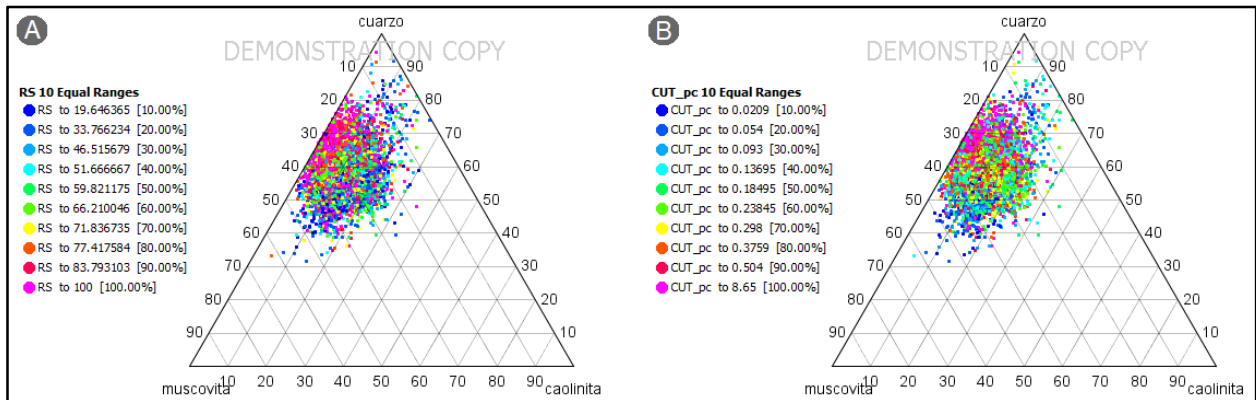


Figura 6.26: Diagrama ternario cuarzo-muscovita-caolinita. Con variación en colores de: A. RS; B. Cobre total.

Como el cuarzo se comporta similar a la muscovita en cuanto a contenido de cobre y solubilidad, en los siguientes gráficos se representará el cuarzo teniendo como consideración que representa también el comportamiento de la muscovita. Utilizando la plagioclasa como un indicador de zonas menos alteradas o con una alteración de mayor temperatura (profundidad), se grafica este mineral en proporción a los porcentajes de caolinita y cuarzo en la Figura 6.27 en donde se observa que a mayor proporción cuarzo/plagioclasa, la solubilidad aumenta, y viceversa, sin embargo las menores solubilidad siguen estando asociadas a zonas con altos porcentajes de caolinita, los que se dan principalmente en zonas con mayor proporción cuarzo/plagioclasa. Las leyes más altas se encuentran relacionadas principalmente a porcentajes relativos bajos de caolinita y alta proporción cuarzo/plagioclasa.

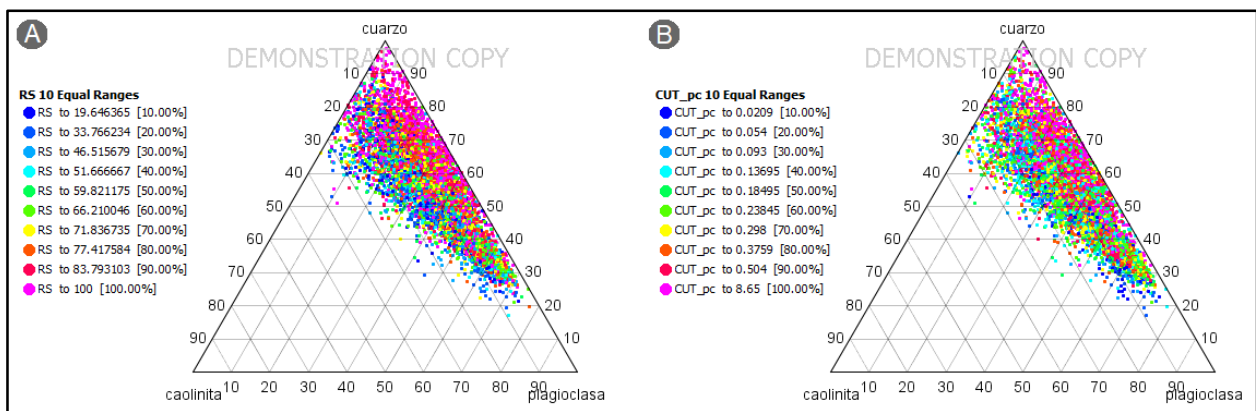


Figura 6.27: Diagrama ternario cuarzo-caolinita-plagioclasa. Con variación en colores de: A. RS; B. Cobre total.

Al graficar los mismos minerales previos, cuarzo y caolinita, pero en este caso con respecto a calcita en la Figura 6.28, se tiene que los mayores contenidos de cuarzo se asocian a alto porcentaje de cobre total, pero algunos de los valores de cobre total más bajos también se asocian a esta zona.

Al comparar con el diagrama de RS, en la zona rica en cuarzo hay una clara dominancia de las altas solubilidades, al igual que lo observado en gráficos anteriores. De igual forma los mayores porcentajes de caolinita vuelven a asociarse a bajas solubilidades, y altos porcentajes de calcita muestran solubilidades intermedias entre zonas caolínificadas y cuarzo-sericíticas.

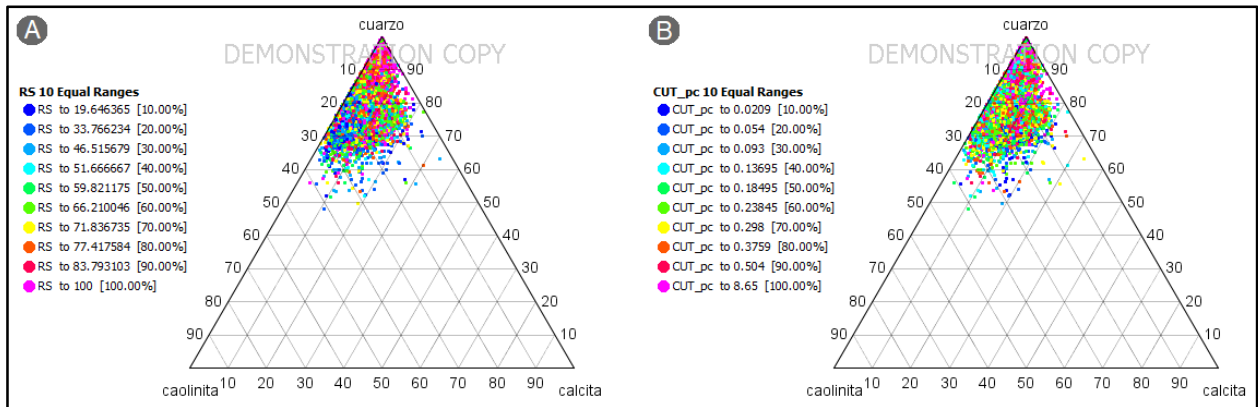


Figura 6.28: Diagrama ternario cuarzo-caolinita-calcita. Con variación en colores de: A. RS; B. Cobre total.

Se revisa como último mineral indicador de alteraciones de mayor temperatura, la clorita, graficada con respecto a caolinita y cuarzo, al igual que en los gráficos previos, en la Figura 6.29. Se observa algo similar a lo anterior en cuanto a variación de la RS, por lo que se podría inferir un comportamiento del clinocloro similar al de la calcita en cuanto a variación de solubilidad. Las zonas ricas en cuarzo con altos porcentajes de caolinita tienen bajo contenido de cobre total, mientras que en aquellas con mayor porcentaje de clinocloro hay, en general, leyes más altas. Al comparar con el diagrama de RS, en la zona rica en cuarzo hay una clara dominancia de las altas solubilidades, tal como se ha observado en todos los gráficos anteriores.

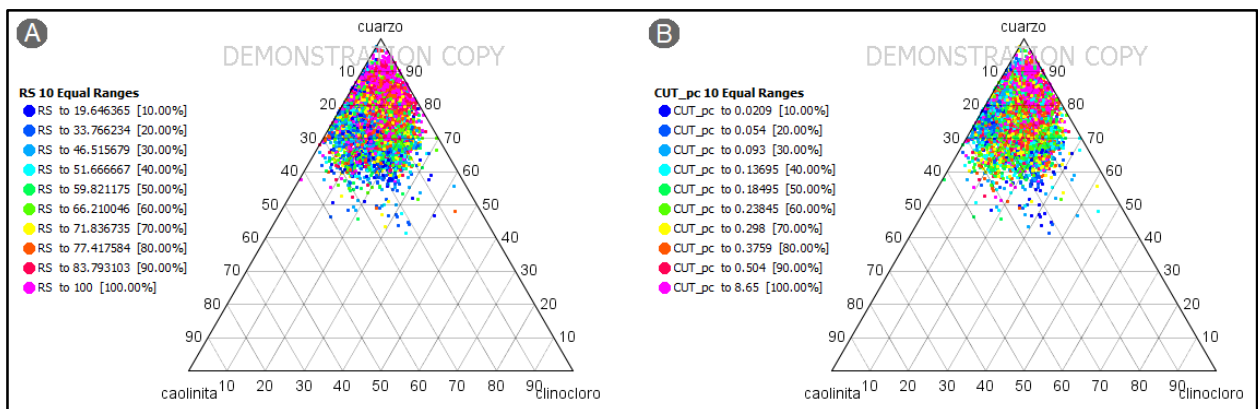


Figura 6.29: Diagrama ternario cuarzo-caolinita-clinocloro. Con variación en colores de: A. RS; B. Cobre total.

Para evaluar los factores más relevantes que controlan la solubilidad, se grafica cuarzo y muscovita, que ya se han visto asociados a altas solubilidades, ahora con respecto a szomolnokita (Figura 6.30), un sulfato de hierro muy soluble que al contener cobre podría ser un factor de mayor relevancia en la RS. Tal como se espera, la mayor solubilidad se encuentra asociada con altos contenidos de szomolnokita por sobre las altas solubilidades de las zonas cuarzo-sericíticas, encontrándose en la mayoría de los casos asociada a esta alteración. Al comparar con el gráfico de cobre total, se identifica que las zonas con razón cuarzo/sericita mayor, tienen una ley más alta, con lo que se tendría un contenido de szomolnokita con cobre mayor en las zonas ricas en cuarzo, en zonas de alteración sílice oquerosa.

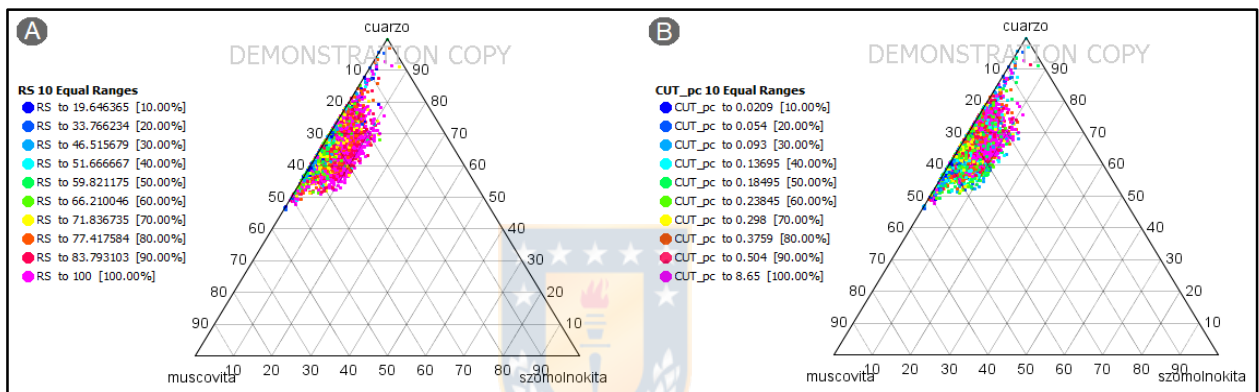


Figura 6.30: Diagrama ternario cuarzo-muscovita-szomolnokita. Con variación en colores de: A. RS; B. Cobre total.

Al analizar los minerales de alteración minoritarios, graficados en la Figura 6.31, se tiene que los menores contenidos de clinocloro se asocian a bajos contenidos de cobre total, mientras que en el diagrama de RS se asocian a altas solubilidades. Con respecto a estos dos minerales, la calcita no tiene un control importante en RS o cobre total.

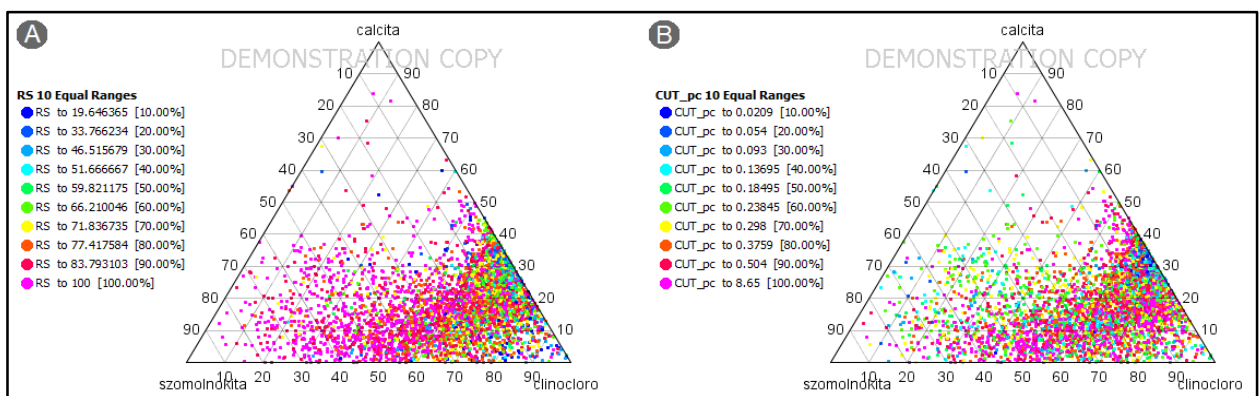


Figura 6.31: Diagrama ternario calcita-szomolnokita-clinocloro. Con variación en colores: A. RS; B. Cobre total.

6.3. ANÁLISIS DE ESTUDIOS MINERALÓGICOS

Para evaluar el grado de control que tiene la RS y el cobre total sobre la mineralogía, se trabaja con los estudios mineralógicos de DRX y TESCAN. Como ya se identificó una relación entre las zonas minerales y estos valores químicos, para cada método se realiza una división preliminar de los datos a trabajar, en base a su distribución en un gráfico de dispersión RS-cobre total.

Esta división de primer orden tiene el objetivo de obtener grupos de trabajo que ya estén asociados a ciertas diferencias en su mineralogía, y que al ser trabajados de manera individual, permitan establecer de mejor forma relaciones entre minerales de mena y ganga, para complementar el conocimiento sobre el control de la alteración en los minerales de interés en este yacimiento en particular.

6.3.1. TESCAN

En primer lugar, se trabaja con los resultados de mineralogía TESCAN, que contiene la información mineralógica más variada (mayor número de minerales identificados), pero con el menor número de muestras analizadas. Se realiza la división ya mencionada con el *software* Orange, utilizando el algoritmo *k-means* con variables normalizadas, resultando en 4 grupos que se muestran en la Figura 6.32. Inicialmente se separa un grupo de Baja Solubilidad que agrupa a los datos con RS cercana o menor a 40%, bien separado del resto de los datos, y un grupo de Alta Ley, también muy característico, con valores de cobre total mayores a 0,6%. El grupo intermedio es dividido en dos dando lugar a los grupos restantes, de Baja Ley y Ley Media.

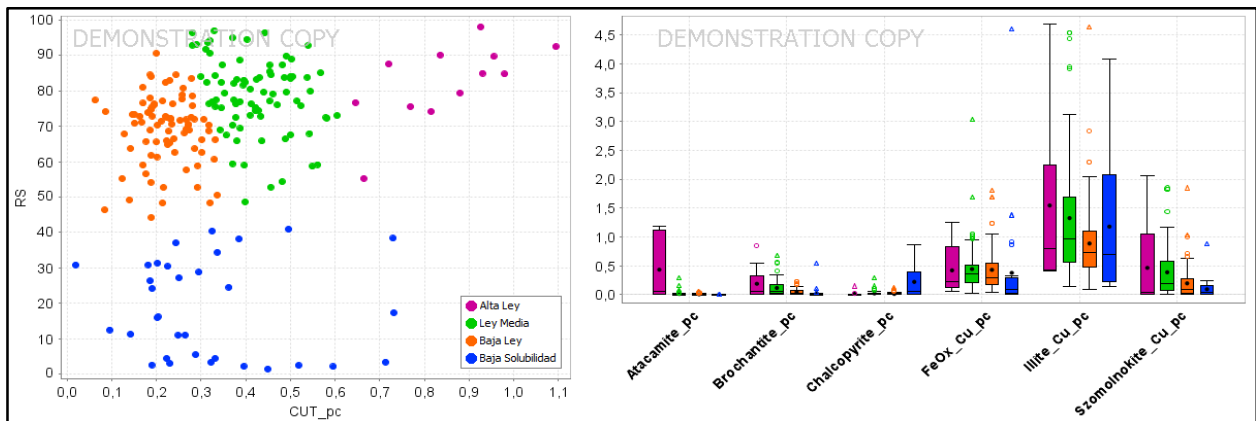


Figura 6.32: División datos TESCAN en grupos CuT-RS y menas de cada uno.

En el gráfico de menas por grupo, se identifican diferencias muy marcadas para el grupo de Alta Ley, con porcentajes altos de atacamita (ausente en todos los demás grupos), brocantita y szomolnokita con cobre, que constituyen las menas más relevantes del yacimiento. El grupo de Baja Solubilidad, muestra un contenido de menas característico también, con un alto porcentaje de calcopirita, mineral ausente en todos los demás grupos, y porcentaje de illita con cobre relevante, el cual también puede alcanzar altos valores en el grupo de Alta Ley.

Los grupos intermedios no contienen atacamita, ni calcopirita, y sus porcentajes de óxidos de hierro con cobre son similares para ambos, teniendo diferencias menos marcadas que los grupos extremos, y distinguiéndose únicamente por los porcentajes de brocantita, illita con cobre y szomolnokita, los cuales son levemente más altos en el grupo de Ley Media.

De esta manera, los 4 grupos se asocian a diferencias en su contenido de menas, lo que es claro en los grupos extremos, sin embargo, en los grupos intermedios es menos marcado. Por esta razón se complementa el análisis con una revisión de los minerales de ganga presentes, trabajando con cada grupo de manera individual, para reconocer las diferencias en minerales de alteración que mejor se reflejen en el comportamiento de las menas.

6.3.1.1. Grupo Baja Solubilidad

Al analizar este grupo en cuanto a su contenido de minerales de ganga se reconocen claramente dos grupos diferenciados principalmente por los contenidos de caolinita y calcita (Figura 6.33), que definen zonas de alteración distintas. Los grupos están espaciados en el gráfico y se considera como línea divisoria la recta definida por la ecuación: $4x - y = 0$. La zona calcítica se caracteriza por un alto contenido de calcopirita, ausente en la zona caolinítica, mientras que la zona caolinítica se caracteriza por un alto contenido de óxidos de hierro con cobre y arcillas con cobre.

6.3.1.2. Grupo Baja Ley

Los contenidos de gangas diferencian dos grupos principalmente en base al contenido de muscovita y calcita (Figura 6.34), nuevamente separando condiciones de alteración contrastantes. Para este caso, se considera como línea divisoria la recta definida por la ecuación: $5,2x - y + 9 = 0$. Los contenidos de mena son similares, variando levemente en las proporciones de illita con cobre, óxidos de hierro con cobre y szomolnokita con cobre. La zona calcítica tiene un mayor contenido

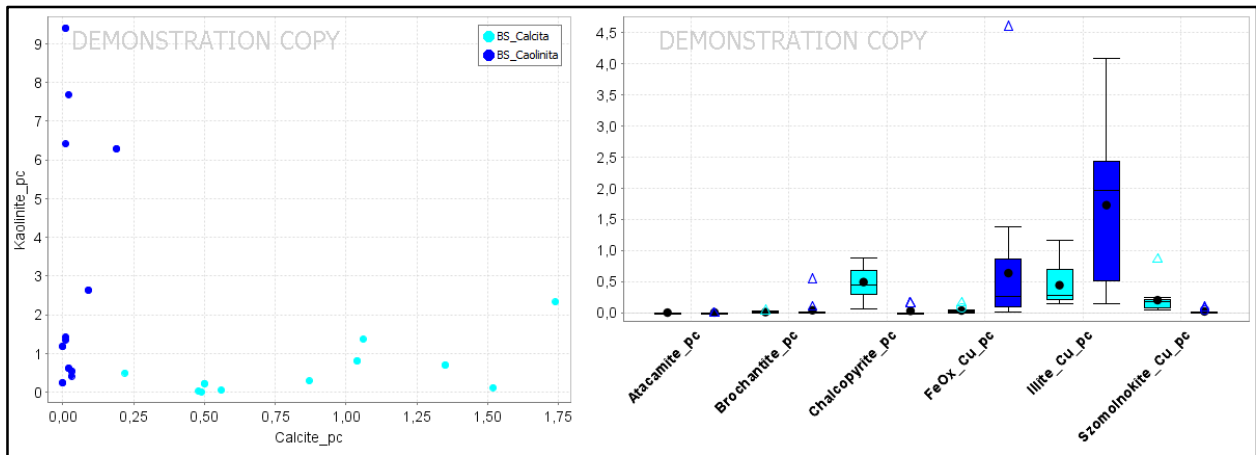


Figura 6.33: Menas Tescan por subgrupos baja solubilidad.

de illita con cobre mientras que la szomolnokita con cobre está prácticamente ausente, y la zona sericítica tiene un mayor contenido de óxidos de hierro con cobre y szomolnokita con cobre que zona calcítica, pero con contenido de illita con cobre importante de igual manera.

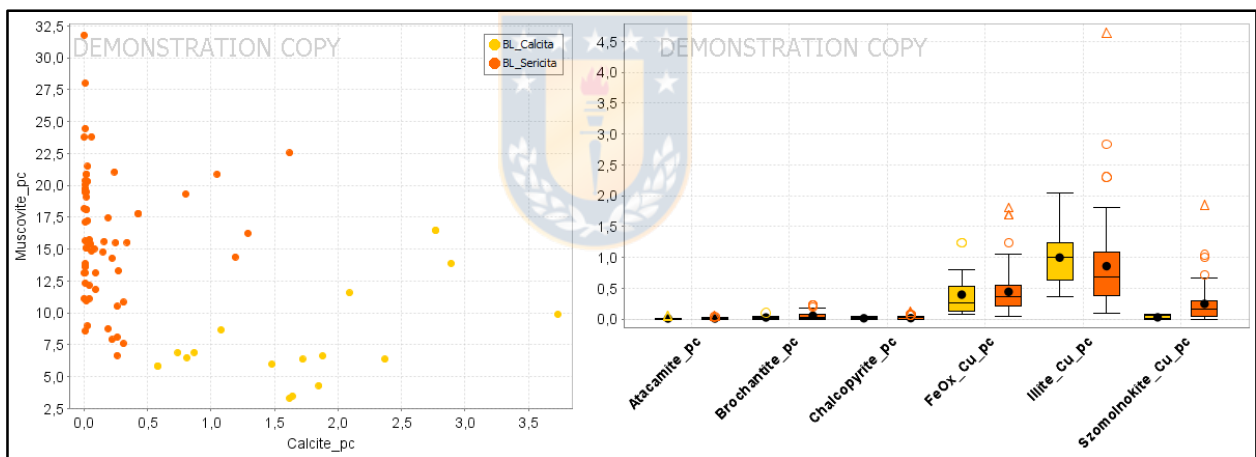


Figura 6.34: Menas Tescan por subgrupos alta solubilidad-baja ley.

6.3.1.3. Grupo Ley Media

En este grupo, el gráfico en donde mejor se marcan diferencias en los datos, corresponde al de calcita-szomolnokita (Figura 6.35), en donde se reconocen 3 grupos: Una zona rica en szomolnokita con valores sobre 1,8% (Grupo szomolnokita), distanciada del resto de los datos con porcentajes menores a 1,5%, en donde se separan los grupos de baja szomolnokita, con bajo contenido de calcita también (Grupo Baja szomolnokita), y el de baja szomolnokita y abundante calcita (Grupo Calcita). Los límites en este caso corresponden a rectas paralelas a los ejes definidas

por los quiebres observables gráficamente (espaciamiento entre grupos de datos).

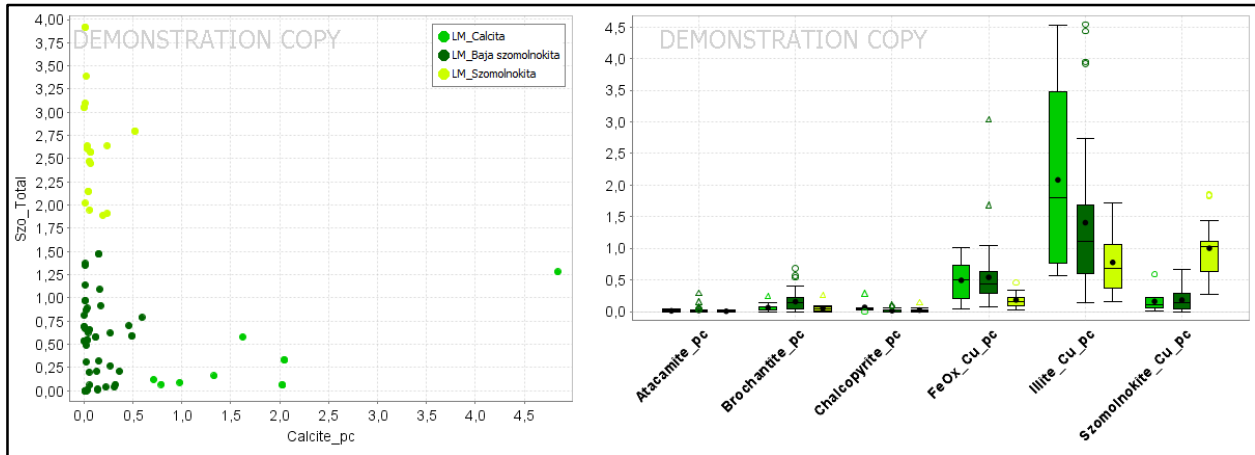


Figura 6.35: Menas Tescan por subgrupos alta solubilidad-ley intermedia.

En cuanto al contenido de menas, el grupo rico en szomolnokita se distingue fácilmente por el alto porcentaje de somolnokita con cobre, y contenidos de óxidos de hierro con cobre e illita con cobre menores que en los otros dos grupos. Los dos grupos restantes, tienen porcentajes minerales similares para óxidos de hierro con cobre y szomolnokita con cobre, diferenciándose en un mayor contenido de illita con cobre en la zona calcítica, y por un mayor porcentaje de brocantita en el grupo de Baja szomolnokita. Aun así, la distinción entre estos dos últimos grupos es compleja y podrían constituir uno solo, sin embargo, por la importancia de la brocantita como mineral de mena, se hace la separación en este caso. Cabe destacar que los contenidos de atacamita y calcopirita son prácticamente inexistentes en el grupo de Ley Media.

6.3.1.4. Grupo Alta Ley

Grupo poco numeroso (dentro de los datos con información mineralógica Tescan) pero con importantes diferencias en minerales muy característicos, por lo que se distinguen tres grupos definidos al igual que en el caso anterior, por su distribución en el gráfico (Figura 6.36). El primero de ellos con abundante calcita, representado por un solo dato, que se diferencia de los demás por un alto porcentaje de brocantita y óxidos de hierro con cobre. El siguiente grupo es rico en szomolnokita total, lo que en la mineralogía de mena se traduce en un alto porcentaje de szomolnokita con cobre, además de illita con cobre, y porcentajes de óxidos de hierro con cobre y brocantita muy bajos. Finalmente, el último grupo con bajo contenido de szomolnokita, que se caracteriza en cuanto a sus menas por ser el único subgrupo con presencia de atacamita, además de

contenidos de brocantita y óxidos de hierro con cobre intermedios entre los dos grupos anteriores, szomolnokita ausente e illita con cobre en un amplio rango de porcentaje.

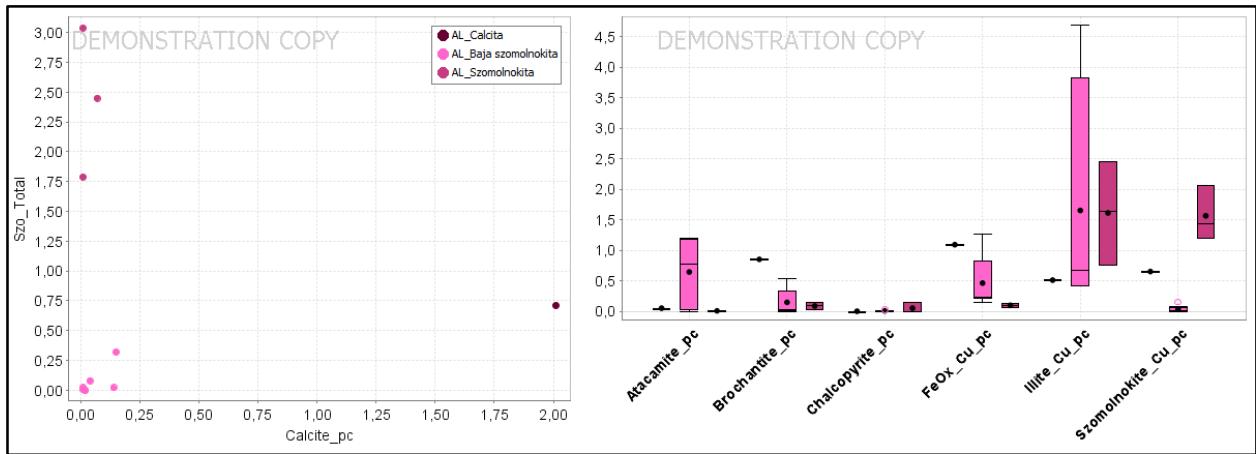


Figura 6.36: Menas Tescan por subgrupos alta solubilidad.

6.3.2. DRX

Para comparar los resultados obtenidos con la mineralogía Tescan, se realiza el mismo trabajo con mineralogía DRX, de la cual se tiene un mayor número de datos, pero con menos detalle en la identificación mineralógica. Se dividen los datos en las mismas zonas cobre total-RS trabajadas anteriormente, con el *software* Orange, utilizando el algoritmo *k-means* con variables normalizadas, resultando los grupos que se observan en la Figura 6.37. La mineralogía de mena obtenida para cada grupo no es consistente con lo observado previamente (con la mineralogía Tescan), y en este caso no es posible identificar una mineralogía característica para cada uno de ellos.

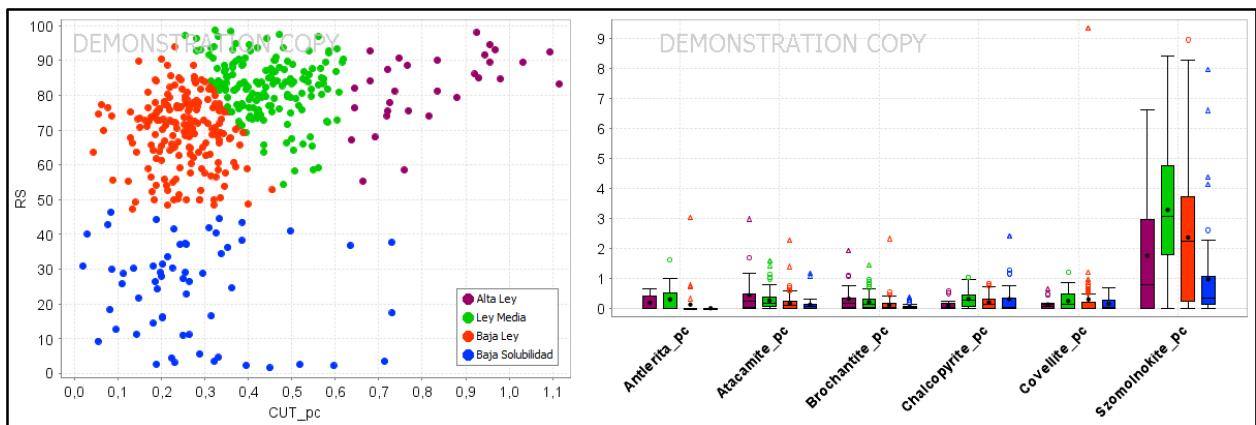


Figura 6.37: División datos DRX en grupos CuT-RS y menas de cada uno.

El grupo de Baja solubilidad, previamente caracterizado por un alto porcentaje de calcopirita (ausente en los demás grupos), en este caso tiene valores de calcopirita similares a los que se observan en los grupos de Ley Media y Baja, de mayor solubilidad. El grupo de Alta Ley contiene los mayores porcentajes de atacamita y brocantita, aunque con una diferencia menos marcada que en la mineralogía TESCOAN, y en el caso de la szomolnokita, los valores son menores a los de los grupos intermedios. Cabe destacar, sin embargo, que las diferencias en porcentajes de szomolnokita, pueden deberse a que el método DRX permite conocer solamente el porcentaje de szomolnokita total, el que se grafica como una referencia del porcentaje esperable de szomolnokita con cobre, el cual si es entregado con el análisis TESCOAN.

Los grupos intermedios tienen porcentajes similares de todos los minerales, pero siempre mayores en el grupo de Ley Media, el cual además contiene antlerita, mineral no registrado en la mineralogía TESCOAN, y que también se encuentra en el grupo de Alta Ley.

6.3.2.1. Grupo Baja Solubilidad

En este grupo se distinguen claramente las zonas caolinítica y calcítica (Figura 6.38) al igual que con la mineralogía TESCOAN, y se replica la recta divisoria utilizada para este grupo en dicho análisis. La diferenciación en cuanto a la mineralogía de mena de estas dos zonas es menos clara que con TESCOAN, en donde se distingue la zona calcítica por un contenido de calcopirita mucho más alto que la zona caolinítica, lo que en este caso no se observa. Al igual que con TESCOAN, la zona calcítica puede presentar un contenido importante de szomolnokita, lo que con este método es aún más acentuado.

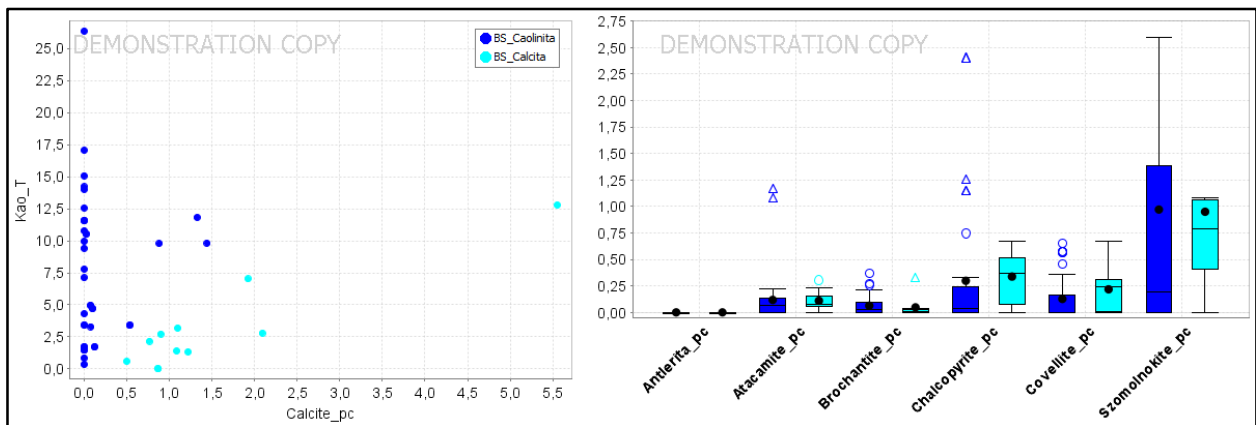


Figura 6.38: Menas DRX por subgrupos baja solubilidad.

6.3.2.2. Grupo Baja Ley

Al igual que con TESCAN es posible distinguir dos grupos principalmente en base al contenido de muscovita y calcita, sin embargo, los valores para hacer esta división varían con respecto al criterio definido para la mineralogía TESCAN, ya que los porcentajes de muscovita son en general más bajos en este caso (Figura 6.39). Por esta razón, se modifica la recta divisoria utilizada, disminuyendo la pendiente de manera de ajustarla mejor a la distribución de los datos, usando la ecuación $3x - y + 10 = 0$.

La separación de ambos grupos en cuanto a sus menas, al no haber medición de arcillas con cobre y óxidos negros importantes en este grupo, se puede establecer en base al contenido de szomolnokita, mayor en la zona sericítica, el que si bien no corresponde al contenido de szomolnokita con cobre, se relaciona directamente, por lo que sirve como una aproximación.

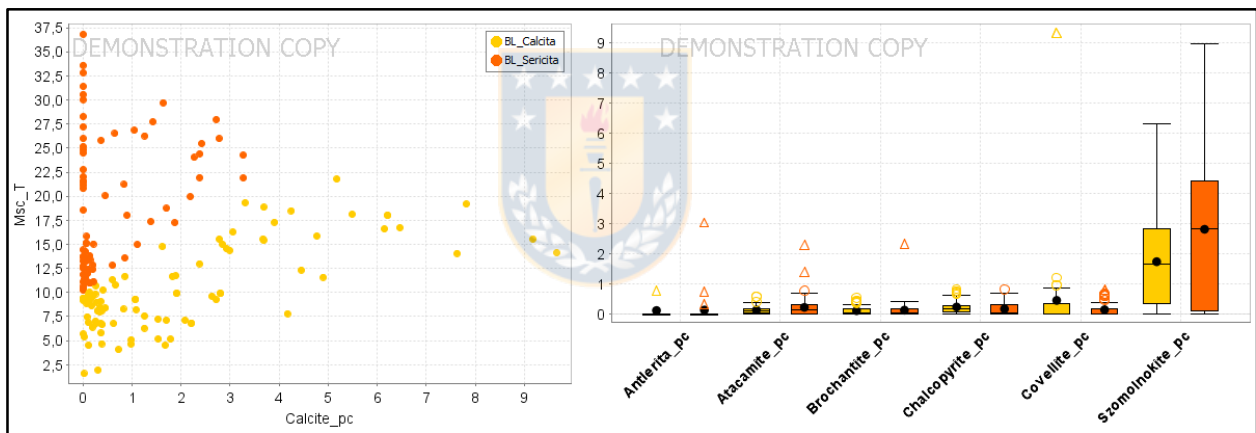


Figura 6.39: Menas DRX por subgrupos alta solubilidad-baja ley.

6.3.2.3. Grupo Ley Media

En este grupo se utilizan los valores de quiebre utilizados con TESCAN, diferenciando la zona de szomolnokita, que se separa de los demás grupos por su alto contenido en este mineral (mayor a 1,8%), y en los datos restantes se identifica un grupo con abundante calcita (mayor a 0,6%), y otro con bajo contenido tanto de calcita como de szomolnokita, que se denominará grupo Baja szomolnokita (Figura 6.40).

La diferenciación en cuanto a las menas de los dos grupos con escasa szomolnokita, está marcada por un contenido de óxidos verdes mucho mayor en el grupo rico en calcita, en donde se encuentra

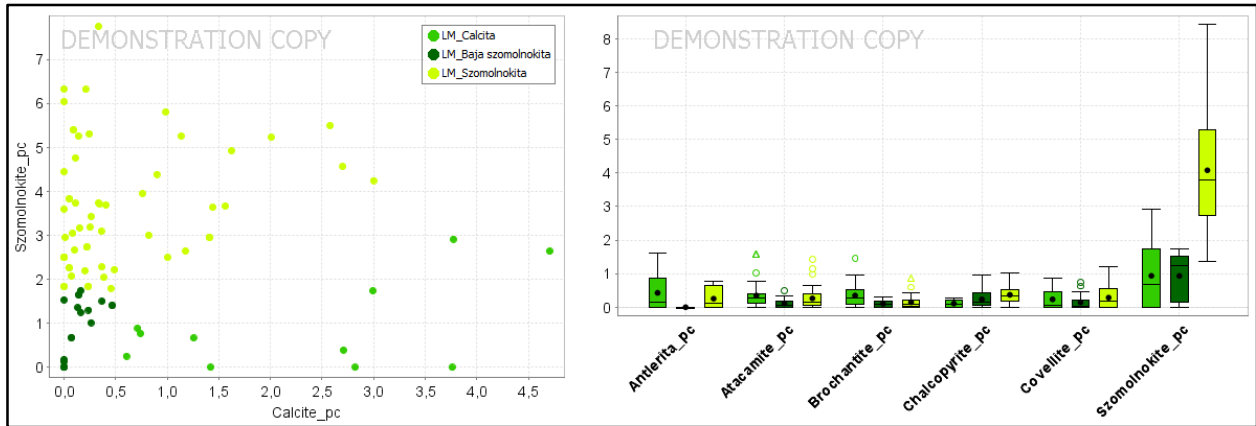


Figura 6.40: Menas DRX por subgrupos alta solubilidad-ley intermedia.

abundante brocantita, antlerita, ausente en el grupo Baja szomolnokita, y atacamita en un porcentaje levemente superior al del grupo Baja szomolnokita. Además de esta diferencia, la covelina se encuentra en mayor porcentaje en la zona calcítica, la calcopirita, en mayor proporción en el grupo Baja szomolnokita. Los porcentajes de szomolnokita son similares en ambos grupos.

6.3.2.4. Grupo Alta Ley

Se mantiene la división de grupos observada con la mineralogía TESCOAN (Figura 6.41). El primer grupo rico en calcita (mayor a 0,6%), se asocia a altos contenidos de óxidos verdes, principalmente brocantita y antlerita, y atacamita con porcentajes levemente superiores a los demás datos. El siguiente grupo, se caracteriza por ser rico en szomolnokita (mayor a 1,8%), lo que se espera se refleje en un alto contenido de szomolnokita con cobre como mena principal, y el último grupo, pobre en calcita y szomolnokita (el cual se denominará como Baja szomolnokita), contiene porcentajes muy bajos de todas las menas, destacando atacamita y brocantita como sus menas principales, pero que no se encuentran en porcentajes mayores a los del grupo rico en calcita. Este grupo en la mineralogía TESCOAN se caracterizó por tener un alto contenido de atacamita, que no se observa en este caso, por lo tanto, podría corresponder a un rasgo puntual, y no se justifica su separación de la zona calcítica.

6.3.3. MAPEO

Hacer la división de los 4 grupos principales según los valores de cobre total y RS, resulta complejo por el gran número de datos disponibles. Al aplicar el algoritmo *k-means* con el *software* Orange los grupos resultantes no son equiparables con los anteriores, al dividir el grupo intermedio en RS

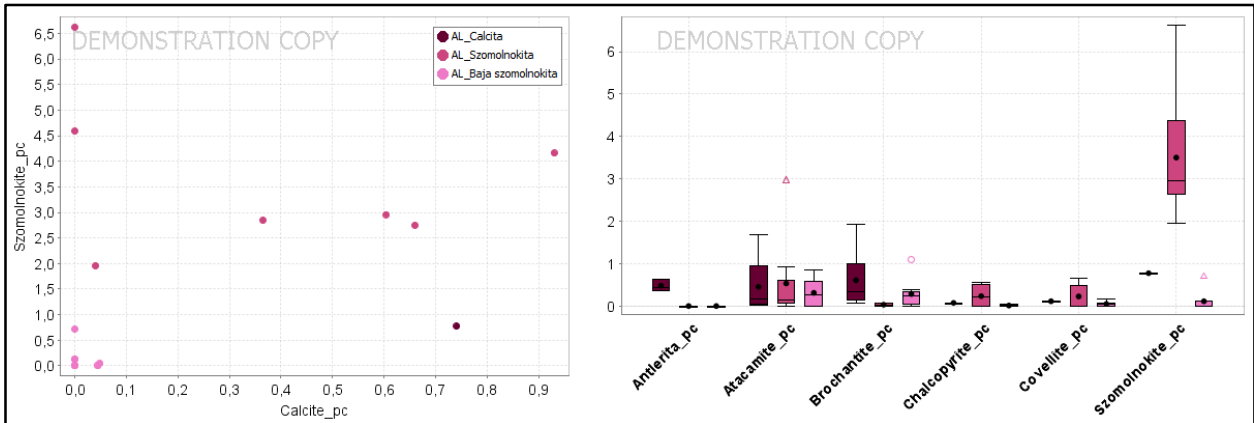


Figura 6.41: Menas DRX por subgrupos alta solubilidad-alta ley.

media y alta, en lugar de separar por ley baja y media, y por lo tanto no resultan útiles para realizar la comparación necesaria. Es por esto que se realiza un ajuste manual de la línea divisoria de los grupos de Baja Ley y Ley Media, utilizando como guía las rectas que dividen dichos grupos en los datos de DRX y TESCAN, obteniendo como límite la recta de ecuación $-3,3x - y + 1,79 = 0$. De esta forma, se obtienen los grupos que se observan en la Figura 6.42, en donde se separa en primer lugar el grupo más característico, correspondiente al de baja solubilidad, teniendo como valor de quiebre inicial $RS = 50$, y continuando por una recta que se ajusta a la forma de los datos en el gráfico, es decir, que pase por zonas en donde hay mayor separación entre los dos grupos. Se consideran dentro de este grupo también, los datos de RS bajo 40% y ley hasta 0,7%, ya que los valores de mayor ley, son más cercanos al grupo de alta ley. El grupo de alta ley, es el segundo grupo más sencillo de distinguir, diferenciándose de los demás por tener valores de cobre total mayores a 0,6%. Y finalmente los grupos intermedios cuya división se define por la recta ya descrita.

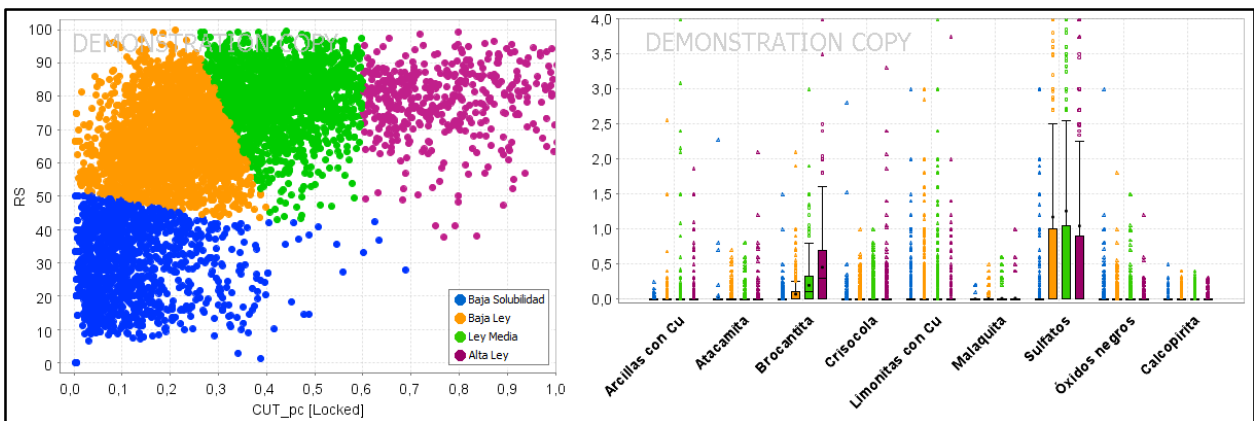


Figura 6.42: División datos de mapeo en grupos CuT-RS y menas de cada uno.

Los grupos cobre total-RS no muestran asociaciones de mena características para cada uno, manteniendo para todos los grupos de alta solubilidad contenidos altos de sulfatos de hierro con cobre, y porcentajes muy bajos de las demás menas. Un aspecto a destacar, corresponde al contenido de brocantita, que varía de menor a mayor porcentaje en los grupos de menor a mayor ley, indicando la importancia de dicho mineral en este parámetro químico.

En este caso, para hacer la subdivisión de cada uno de los grupos anteriores, se complementa la información de mapeo con la mineralogía de alteración obtenida mediante NIR.

6.3.3.1. Grupo Baja Solubilidad

Se separan las zonas caolinítica y calcítica utilizando los límites definidos con los resultados de las mineralogías TESCAN-DRX (Figura 6.43), es decir, la recta de ecuación $4x - y = 0$. La diferenciación en cuanto a la mineralogía de mena de estas dos zonas es difícil de observar debido a la gran cantidad de porcentajes de mena iguales a cero, por lo que se filtran los datos, excluyendo los tramos en donde la suma de todas las menas sea cero, y de esta forma es posible reconocer mejor la predominancia de limonitas con cobre en la zona caolinítica (Figura 6.44). Se identifica un mayor contenido de calcopirita en el grupo calcítico (observada previamente en mineralogías TESCAN y DRX), pero poco resaltado debido a la gran cantidad de datos con calcopirita igual a cero. Además, se destaca un gran número de datos con porcentajes importantes de sulfatos de hierro con cobre mapeados, muy altos para la baja RS de este grupo.

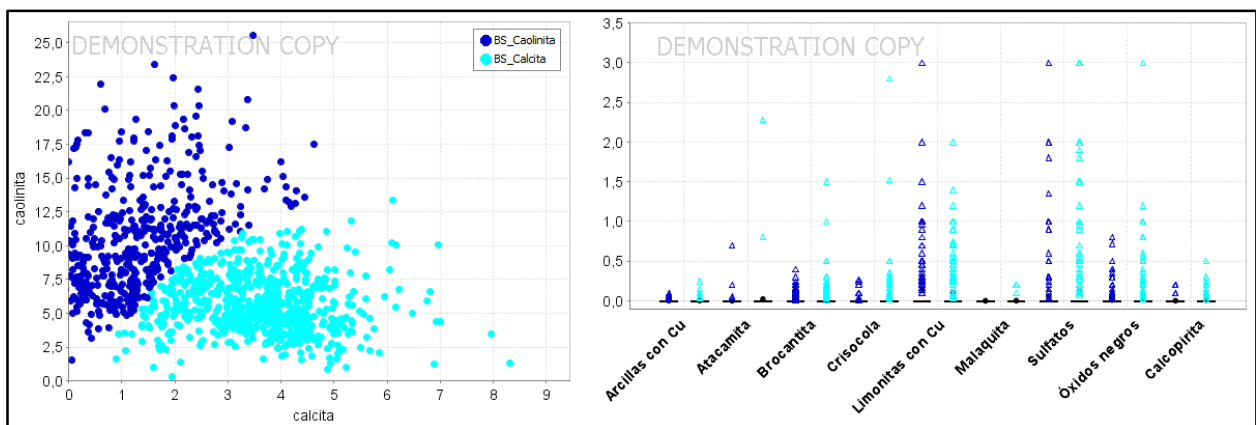


Figura 6.43: Menas mapeo por subgrupos baja solubilidad.

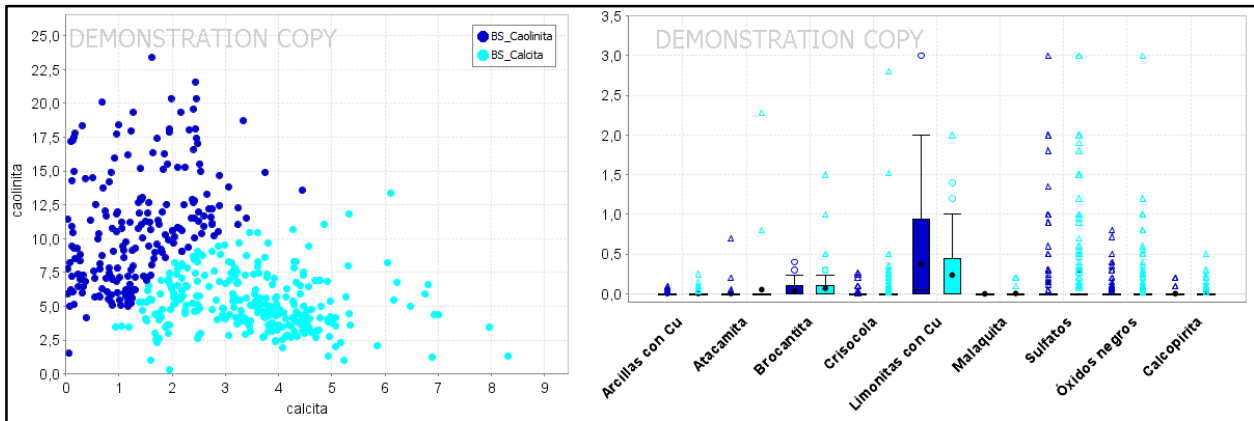


Figura 6.44: Menas mapeo por subgrupos baja solubilidad filtrado. Excluye datos con suma de menas igual cero.

6.3.3.2. Grupo Baja Ley

Se separan las zonas sericítica y calcítica, aunque resulta muy difícil de establecer el límite entre ambas debido a una gran densidad de datos en la zona central del gráfico, por lo que se decide utilizar la recta determinada para los análisis DRX, debido a la mayor similitud de los valores de muscovita y calcita de mapeo con los porcentajes de DRX que con los de TESCAN (Figura 6.45). El grupo sericítico contiene un alto porcentaje de sulfatos de hierro con cobre, mucho mayor al grupo calcítico, lo que mantiene relación con lo observado con las mineralogías anteriores, aunque con porcentajes mucho mayores, y una diferencia más pronunciada. La brocantita es escasa, sin embargo, es levemente mayor en la zona calcítica. Las demás menas no presentan porcentajes importantes, por lo que resulta difícil observar diferencias en menas como arcillas con cobre y óxidos negros, que en mineralogía TESCAN eran características.

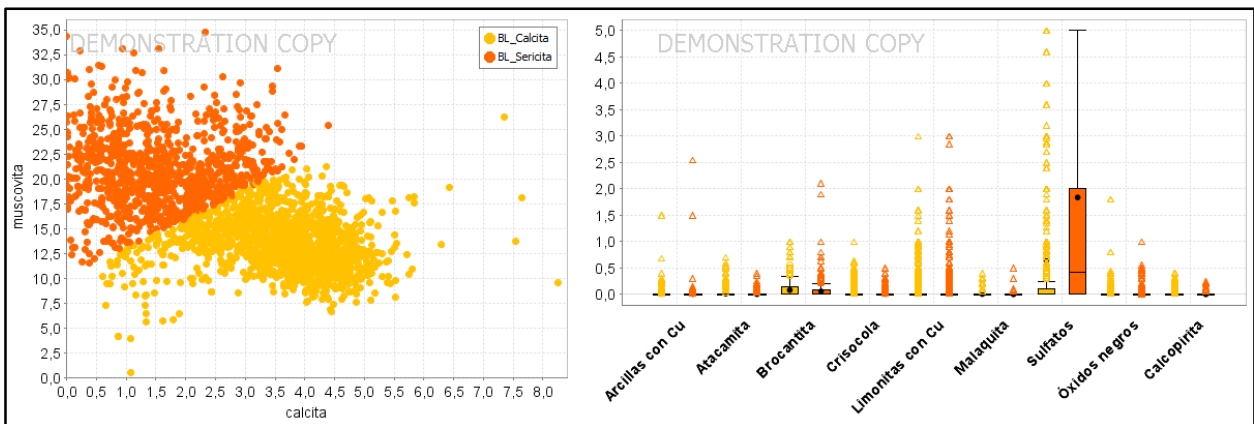


Figura 6.45: Menas mapeo por subgrupos alta solubilidad-baja ley.

6.3.3.3. Grupo Ley Media

Para este grupo, al ver la relación indirecta marcada entre los ambos minerales del gráfico, se decide distinguir dos grupos, uno rico en szomolnokita y otro rico en calcita (Figura 6.46), ya que a diferencia de lo observado en mineralogía TESCAN y DRX (en donde se analizaron 3 zonas para este grupo), los datos en las zonas de baja szomolnokita no muestran características que justifiquen su análisis por separado. Como línea divisoria se utiliza la recta de ecuación $0,67x - y + 1 = 0$.

El primer grupo, con porcentajes altos de szomolnokita, se relaciona en cuanto al contenido de menas a la abundancia de sulfatos de hierro con cobre (grupo al que pertenece la szomolnokita) y no contiene a ninguna otra mena en porcentajes importantes. Por otra parte, la zona calcítica, se relaciona a la presencia de brocantita como mena principal, siendo este resultado consistente con los anteriores en donde se vio a la brocantita recurrentemente relacionada a zonas calcíticas.

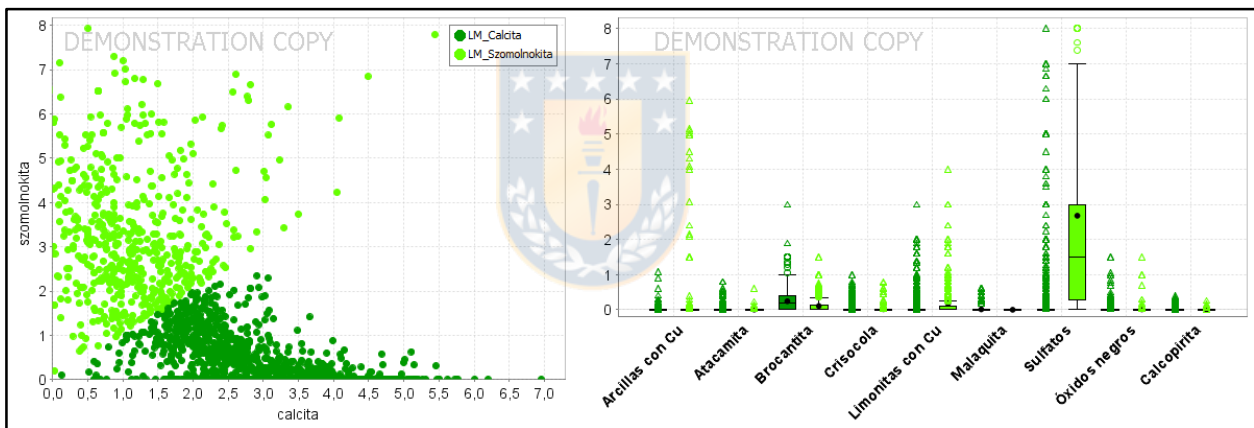


Figura 6.46: Menas mapeo por subgrupos alta solubilidad-ley intermedia.

6.3.3.4. Grupo Alta Ley

Este grupo, que en los análisis de mineralogía TESCAN había sido dividido en 3 zonas, se divide en este caso solamente en 2 (Figura 6.47), debido a las observaciones realizadas en el análisis de mineralogía DRX, en donde la separación de los datos de baja szomolnokita en 2 grupos, no se reflejaba en una diferencia en la mineralogía de mena, observaciones similares a las realizadas al analizar la información de mapeo, por lo que no existe justificación para dicha subdivisión. De esta forma, los dos subgrupos definidos para el grupo Alta Ley, se separan por la recta de ecuación $1,3x - 0,65 - y = 0$.

Así, se obtiene una zona rica en szomolnokita, caracterizada por presentar como mena principal sulfatos de hierro con cobre, con contenido de brocantita también relevante, y una segunda zona calcítica, con abundante brocantita, la cual representa la única mena presente en porcentajes considerables. Cabe mencionar que las zonas reconocidas en este grupo son similares a las identificadas para el grupo Ley Media.

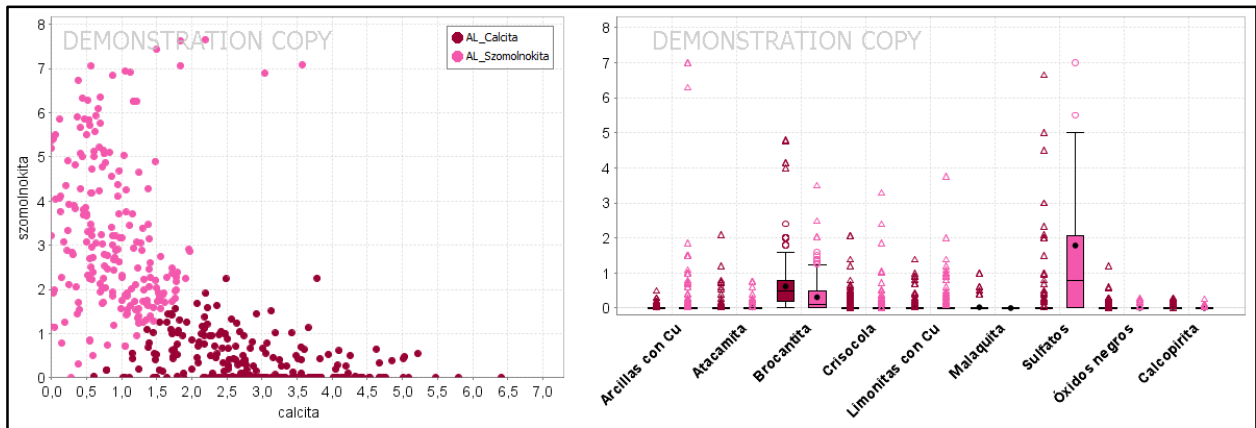


Figura 6.47: Menas mapeo por subgrupos alta solubilidad-alta ley.



7. UNIDADES DE MINERALIZACIÓN

Para la elaboración de un modelo geológico se requiere en primer lugar definir las unidades que serán modeladas. En este caso, éstas corresponden a unidades de mineralización, es decir, volúmenes de roca en donde las variables mineralógicas estudiadas, tienen un comportamiento homogéneo, es decir, que presentan una asociación mineralógica de mena similar bajo ciertos criterios y rangos aceptables de variabilidad.

En este yacimiento las unidades de mena se encuentran delimitadas en general por contactos subhorizontales, que separan zonas en donde prevalecen diferentes eventos geológicos, por lo cual la comprensión genética y fenomenológica del yacimiento y su evolución temporal, estudiada en los capítulos anteriores, es la base de la definición de las unidades a modelar.

7.1. DEFINICIÓN DE UNIDADES

7.1.1. DATOS UTILIZADOS

La definición de unidades se realiza en base a la información de mapeo, ya que es la de mayor distribución dentro del yacimiento, lo que es necesario para poder generar un modelo tridimensional, y se complementa con los datos químicos de cobre total y RS. Todos los datos fueron compositados a 2 m, y en el análisis se trabaja únicamente con los tramos de ese metraje.

Dentro de esta base de datos, se descartan aquellos tramos de sondajes sin información de mapeo de óxidos y sulfuros, al igual que aquellos tramos sin medición de cobre total, dejando solo los tramos con mapeo de ambos tipos de minerales y con información química de cobre total y RS.

Además, para aplicar los criterios de clasificación de unidades de mena, se descartan de la codificación los valores con cobre total menor a 0,1%, que serán considerados estéril, y además por el alto error que puede conllevar trabajar con valores de cobre total tan bajos en la RS (si el cobre total es bajo, el cobre soluble en ácido sulfúrico es más bajo, y por ende, los errores de medición pueden ser muy altos con respecto a los valores totales, lo que se reflejara en RS muy distintas a la realidad). Al igual que se omiten los tramos con suma de menas mapeadas igual a 0, ya que no entrega información sobre menas presentes para poder clasificarlos dentro de una unidad u otra. El impacto en el número total de tramos de cada filtro aplicado se resume en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Tramos de sondaje por filtro aplicado. Se comienza trabajando solo con los tramos de sondaje con mapeo de menas (óxidos o sulfuros), omitiendo tramos que únicamente registran litología, zonas (alteración, mineral) o minerales de alteración, y se muestran los tramos resultantes luego de aplicado cada uno de los filtros sobre el anterior.

Filtro aplicado	Metros de sondaje resultantes	N° de tramos
Ninguno	92.454	49.736
Con mapeo de óxidos	92.388	49.703
Con mapeo de sulfuros	91.565	49.229
Con información química	79.551	42.099
Tramos de metraje igual a 2 m	75.488	37.744
Suma de menas mapeadas mayor a 0	58.562	29.281
CuT \geq 0,1	50.996	25.498

7.1.2. ASOCIACIONES DE MENA

El mapeo geológico entrega porcentajes de 12 minerales de cobre: arcillas con cobre, atacamita, brocantita, crisocola, limonitas con cobre, malaquita, óxidos negros, sulfatos, bornita, calcosina, calcopirita y covelina. Los de mayor abundancia en el yacimiento son la brocantita y sulfatos de hierro con cobre, siendo también relevantes la calcopirita y óxidos negros, que además destacan por su impacto en la solubilidad de los tramos en donde se encuentran, mientras que los demás tienen una abundancia muy baja.

Para definir las principales asociaciones de mena, los minerales de menor abundancia se agrupan con los más importantes en base a su comportamiento observado en los análisis mineralógicos, su impacto en el proceso metalúrgico y a los procesos genéticos que comparten que determinan una distribución espacial coincidente, resultando 5 grupos minerales principales:

- **Óxidos verdes (OXV):** Representados principalmente por brocantita, con escasos tramos con crisocola, atacamita y/o malaquita en proporciones variables (Figura 7.1). Se disuelven completamente en ácido sulfúrico y se forman por oxidación de la mineralogía primaria en las partes superficiales de yacimientos con cobre. Pueden encontrarse en asociación con sulfatos de hierro con cobre, muchas veces en una proporción similar, sin embargo, en las zonas ricas en oxidados verdes los sulfatos de hierro con cobre son escasos. También se encuentran asociados a óxidos negros y limonitas con cobre, pero dentro de esta unidad se incluyen únicamente los tramos en donde el impacto de estas mineralogías en la solubilidad es bajo. Las zonas en donde los óxidos verdes coexisten con sulfuros primarios no serán incluidas dentro de esta unidad.

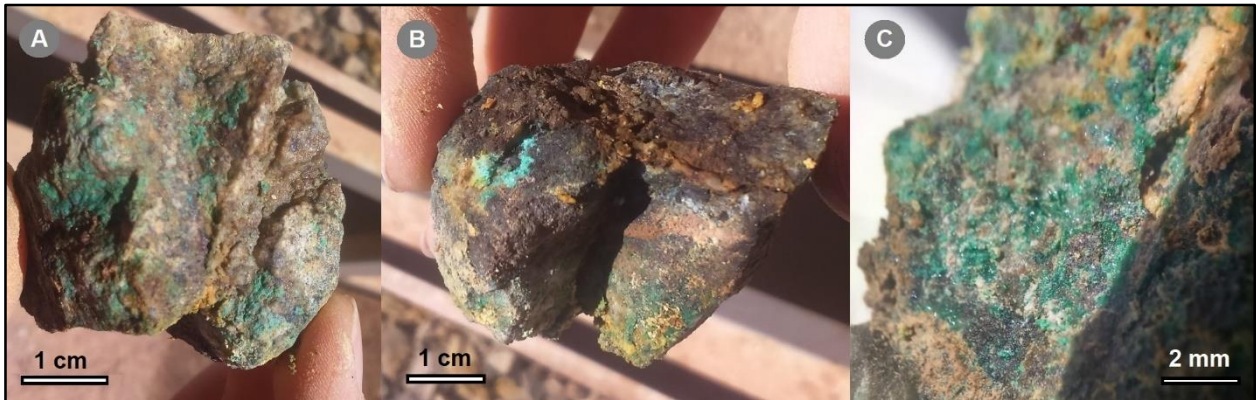


Figura 7.1: Muestra de la unidad OXV. A. Brocantita; B. Crisocola y atacamita; C. Atacamita a la lupa. (A, B y C corresponden a la misma muestra tomada del sondaje AVD12-4, 285 m).

- Óxidos negros y limonitas con cobre (OXN-LIM): Representado por óxidos negros (copper wad/pitch) e incluyendo también a los tramos con limonitas con cobre (Figura 7.2), agrupados principalmente por su comportamiento refractario que determina las zonas oxidadas con cobre de menor solubilidad y ley. Estos minerales se asocian a oxidados solubles y de mayor ley, sin embargo, dentro de esta unidad se incluyen los tramos en donde los óxidos negros y limonitas son predominantes por sobre las demás menas, lo que se refleja tanto en la ley como en la solubilidad. Dentro de las menas oxidadas de mayor solubilidad que pueden encontrarse dentro de esta unidad, la de mayor abundancia corresponde a crisocola.

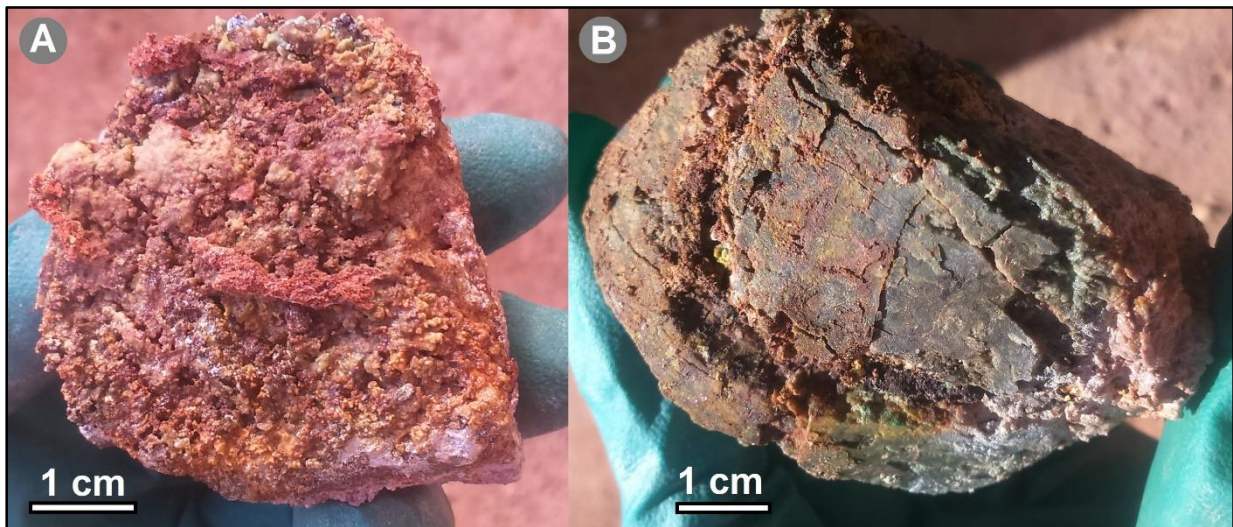


Figura 7.2: Muestras de la unidad OXN-LIM. A. Limonitas con cobre (muestra tomada del sondaje AVD12-11, 446 m); B. Óxidos negros y limonitas con cobre (muestra tomada del sondaje AVD12-11, 450 m).

- Sulfuros primarios (PRI): Mineralogía primaria y profunda representada por bornita, muy escasa, y calcopirita (Figura 7.3). Estos minerales a menores profundidades pueden asociarse a menas oxidadas, sin embargo, dentro de esta unidad se incluyen únicamente los tramos en donde las menas primarias son predominantes.

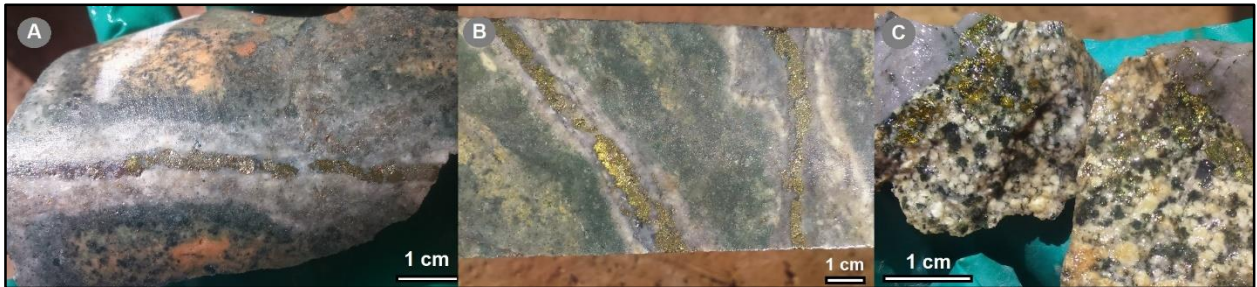


Figura 7.3: Muestras de la unidad PRI. A y B: Calcopirita en vetas (muestras tomadas de los sondajes AVD12-6, 493,4 m y AVD12-11, 572 m respectivamente); C: Calcopirita en halo de veta de cuarzo (muestra tomada del sondajes AVD12-6, 492 m).

- Mixto (MIX): Zonas de coexistencia de sulfuros primarios con menas oxidadas en proporciones variables, principalmente óxidos verdes como la muestra fotografiada en la Figura 7.4, y en menor medida sulfatos de hierro con cobre, óxidos negros y limonitas con cobre.



Figura 7.4: Muestras de la unidad MIX. Vetas de calcopirita parcialmente reemplazadas por brochantita (muestra tomada del sondaje AVD12-6, 86,6 m).

- Sulfuros secundarios (MIX-SEC): Subzona de la unidad MIX, en donde se reconoce presencia de sulfuros secundarios, calcosina y covelina. Estos minerales son escasos en el yacimiento, por lo que se incluirán en esta unidad los tramos que contengan sulfuros secundarios, aunque estos no sean predominantes, por la importancia de identificar estas zonas con el modelamiento para efectos de la producción. Estos sulfuros secundarios generalmente se asocian a sulfuros primarios, como se observa en la Figura 7.5, pero también pueden encontrarse con menas oxidadas.

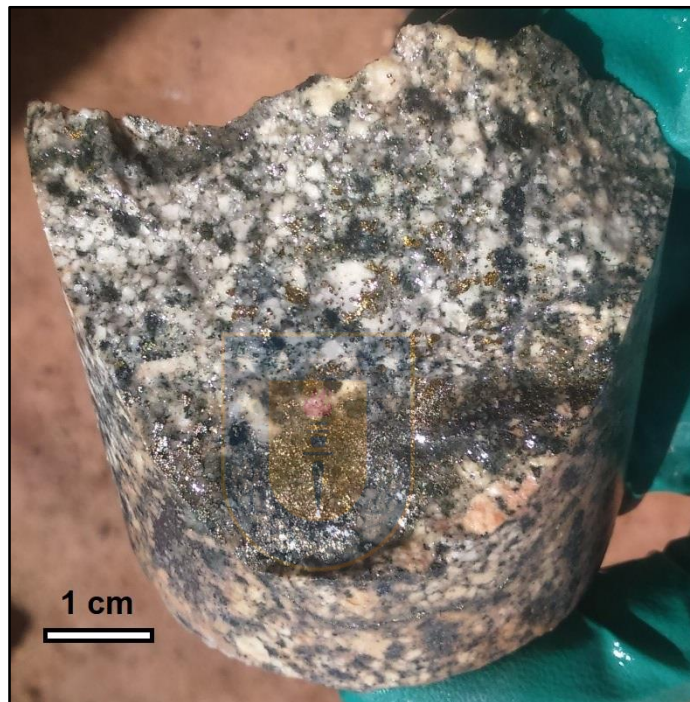


Figura 7.5: Muestra de la unidad MIX-SEC. Calcopirita y calcosina diseminadas (muestra tomada del sondaje AVD12-6, 491 m).

- Sulfatos (SULF): Corresponde a los sulfatos de hierro con cobre mapeados como “Sulfatos”, muy solubles (incluso en agua) y abundantes en el yacimiento, constituidos principalmente por szomolnokita, que corresponde a un mineral formado en depósitos oxidados ricos en pirita, bajo condiciones áridas y muy ácidas. En el yacimiento se dan como extensos halos de color amarillo en vetas de pirita, como se observa en la Figura 7.6. Pueden encontrarse asociados a oxidados verdes, muchas veces en proporciones similares, aunque como se mencionó para la unidad OXV, cuando los sulfatos de hierro con cobre son abundantes, los óxidos verdes son escasos. También pueden encontrarse asociados a

óxidos negros y limonitas con cobre, aunque en menor medida. Cabe recalcar que en este grupo se incluyen únicamente los sulfatos de hierro con cobre, mientras que sulfatos de cobre como la brocantita, se incluyen dentro del grupo de óxidos verdes.



Figura 7.6: Muestras de la unidad SULF. A. Szomolnokita (muestra tomada del sondaje ANH-174, 171 m); B y C. Veta de pirita con halo de sulfatos de hierro con cobre (szomolnokita) (muestras tomadas de los sondajes ANH-172, 128,7 m y ANH-172, 146,5 m respectivamente).

7.1.3. CÓDIGO DE CLASIFICACIÓN

Para codificar la base de datos se elabora una clasificación excluyente que permita asignar cada tramo a las asociaciones principales determinadas en la sección anterior, que constituyen las unidades a modelar, en base a los porcentajes de minerales de mena mapeados y la información química. Para las mineralogías, se suman los porcentajes absolutos mapeados de las 12 menas consideradas, y se trabaja con el porcentaje relativo de cada mena con respecto al porcentaje total.

En primer lugar, se separa la unidad SEC que contiene a todos aquellos tramos con SEC > 10% relativo y corresponde a la unidad más restringida espacialmente, con el objetivo de no acotar más su distribución con los filtros posteriores.

Luego de extraer esta unidad se aplica un gran filtro de primer orden en base a la RS, que separa las zonas de $RS \leq 60\%$ en donde se encuentran asociaciones con un porcentaje importante de minerales refractarios, de las zonas de $RS > 60$ con asociaciones que contienen principalmente OXV y SULF en proporciones variables, con un porcentaje de OXN y LIM lo suficientemente bajo para no afectar mayormente la solubilidad, y calcopirita prácticamente ausente, como puede verse en la Figura 7.7.

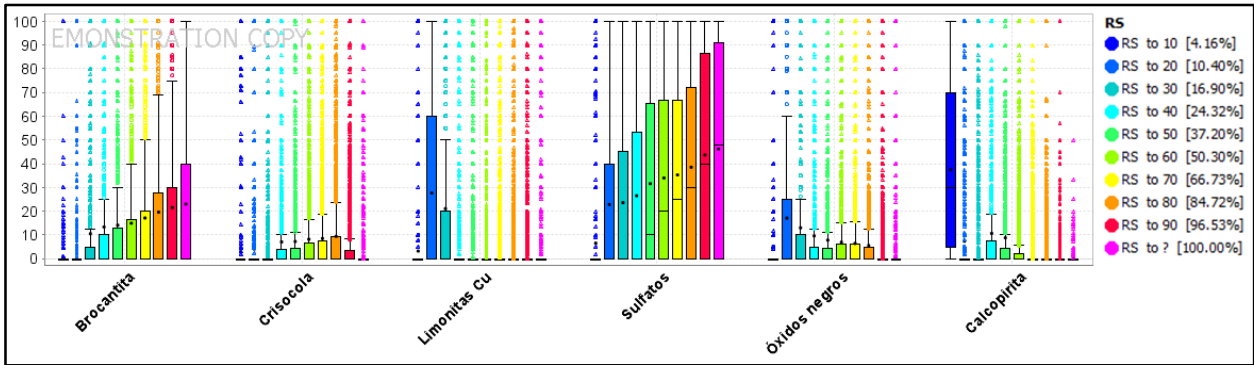


Figura 7.7: Menas por RS. Imagen que permite identificar quiebres de solubilidad que impactan en las menas.

Una vez aplicado el filtro de RS, resultan dos grupos, que pueden observarse en la Figura 7.8, en donde se muestra el árbol de decisión para clasificación de unidades completo. El primero de baja solubilidad, se divide según el porcentaje relativo de sulfuros primarios (calcopirita y bornita), separando la unidad PRI, que contienen aquellos datos con un valor igual o mayor a 90%, y el grupo de baja calcopirita (menor a 90% relativo de calcopirita y bornita), que a su vez, se divide en dos grupos: Unidad MIX, para datos con un porcentaje de sulfuros primarios mayor o igual a 10% (y menor a 90%), con lo que se representan las zonas que contienen calcopirita, y la unidad OXN-LIM, con datos cuyo porcentaje relativo de calcopirita y bornita es menor a 10%, es decir, prácticamente ausente.

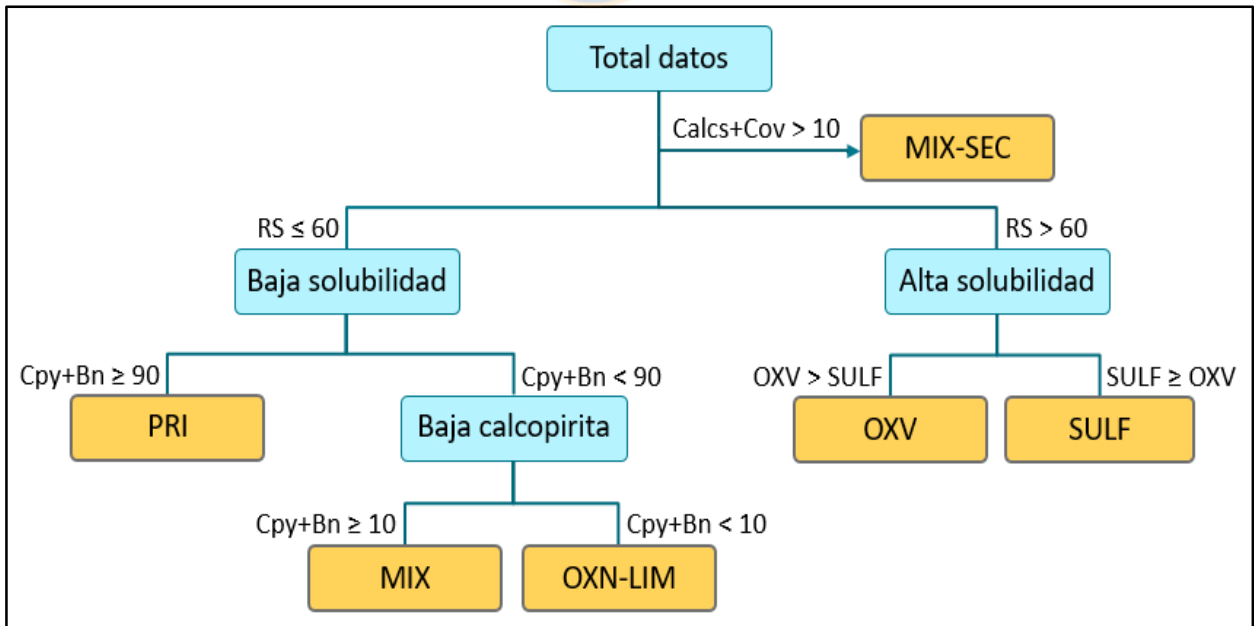


Figura 7.8: Árbol de decisión para clasificación de unidades.

El grupo de alta solubilidad se divide en dos unidades dadas por el grupo de menas dominante: OXV, corresponde a zonas ricas en brocantita, atacamita, malaquita y/o crisocola, y la unidad SULF, contiene las zonas en donde los sulfatos de hierro con cobre dominan por sobre los oxidados verdes, o se encuentran en donde ambos están en igual proporción. Dentro del grupo de alta solubilidad, hay algunos datos cuyo mapeo indica 0% de sulfatos y óxidos verdes, por lo que no existe un criterio para asignarlos a una unidad u otra, y por la alta solubilidad, no corresponden tampoco al mapeo que registran, muchas veces con un 100% de minerales refractarios, razón por la cual serán considerados datos anómalos y no se incluirán en la codificación. Estos datos representan un 2% del total de datos, como se muestra en la Figura 7.9, en donde también se grafica la proporción de todas las unidades en los sondajes codificados.

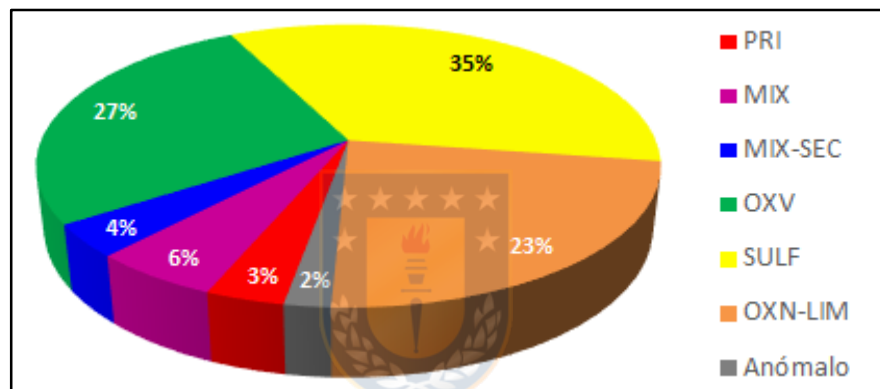


Figura 7.9: Porcentaje de tramos por unidad, del total de sondajes codificados.

7.2. CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES

7.2.1. CARACTERIZACIÓN GENERAL

Las unidades determinadas mediante el código desarrollado muestran buena relación con los valores de cobre total y RS, con diferencias que justifican su distinción, como puede observarse en la Figura 7.10. La unidad PRI destaca por su baja solubilidad, con valores mucho más bajos con respecto a las demás unidades, aunque con valores anómalos en cerca del 20% de los datos. Las unidades MIX y OXN-LIM, tienen distribución de RS muy similares, pero se diferencian claramente en las leyes, mayores en la unidad MIX. Algo similar ocurre con las unidades OXV y SULF, con igual distribución de RS, pero diferencias en el cobre total, mayor en la unidad OXV. La unidad MIX-SEC presenta gran variabilidad en la RS, pudiendo ser desde muy baja a muy alta, lo que tiene relación con la naturaleza de esta unidad que contiene sulfuros secundarios, los que

pueden estar acompañados tanto de sulfuros primarios, como de óxidos de cobre muy solubles. Las leyes de esta unidad son bastante altas.

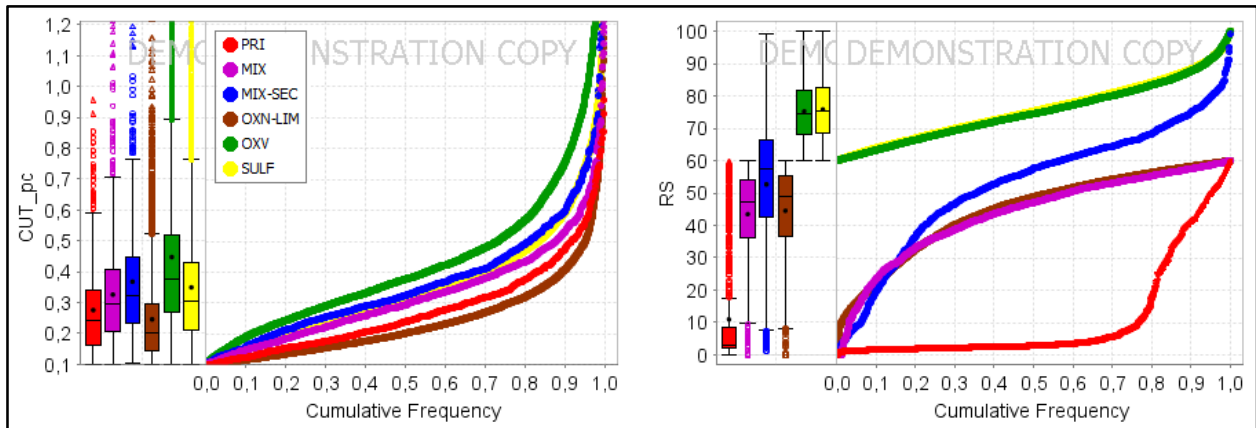


Figura 7.10: Distribución de cobre total y RS por unidad.

Estos valores químicos característicos, están relacionados con la mineralogía de mena, la que a su vez se asocia a la zona de alteración como ya se mencionó, por lo que se resumen a continuación los principales rasgos mineralógicos de cada unidad definida.

7.2.1.1. Unidad PRI (Primario)

Unidad caracterizada por un porcentaje relativo de sulfuros primarios igual o superior al 90%, que corresponde en la mayoría de los casos a calcopirita como puede verse en la Figura 7.11 (en donde no se grafica la bornita por presentarse en un número de tramos muy bajo, y solo en tramos de esta unidad). Esto se traduce en porcentajes absolutos (Tabla 7.2), en un promedio de 0,517% de calcopirita para esta unidad, aunque la distribución de esta variable es asimétrica, de manera que el valor de la mediana de 0,32% resulta más representativo. La bornita, calcosina y covelina, se encuentran en muy pocos tramos, con un sesgo en la distribución aún más marcado que el de los porcentajes de calcopirita, por lo que sus promedios son muy bajos y sus medianas 0.

Esta unidad se encuentra estrechamente asociada a zonas de alteración potásica, lo que se evidencia por la presencia de biotita y feldespato potásico como minerales de alteración (Figura 7.11), los cuales se encuentran ausentes o son muy escasos en las demás unidades, y también a zonas de alteración clorítica, con abundante clorita en la mayoría de los tramos. Por lo que se espera encontrar esta unidad en zonas profundas del yacimiento, bajo el límite hipógeno-supérgeno.

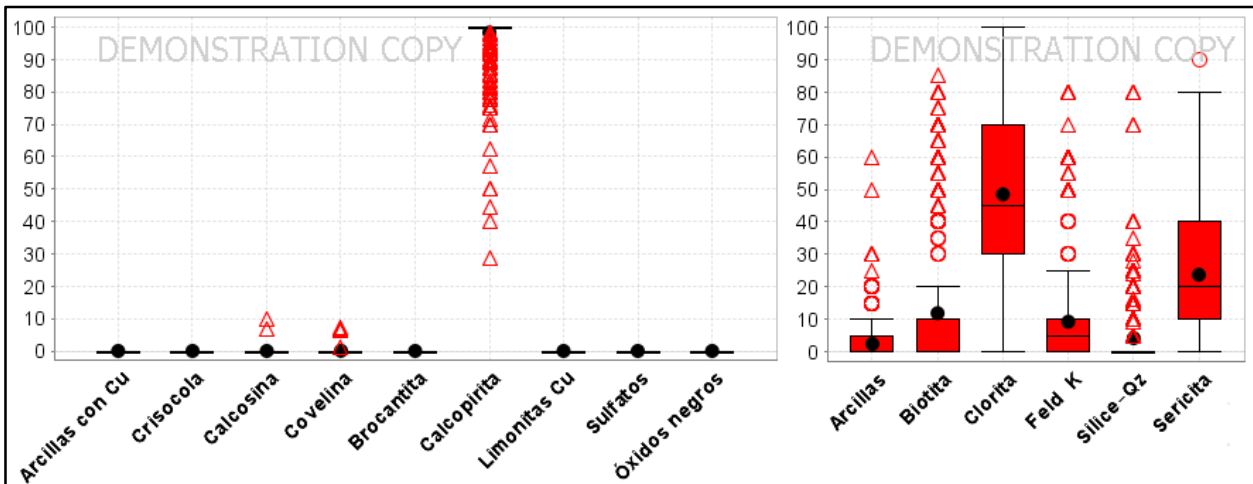


Figura 7.11: Porcentajes relativos de menas y minerales de alteración de la unidad PRI.

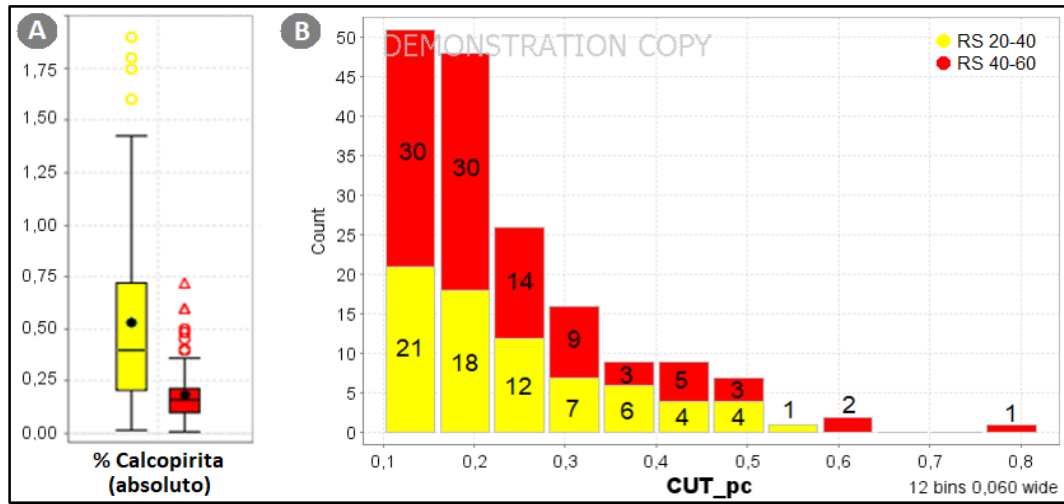
Tabla 7.2: Estadística de porcentajes absolutos en volumen de menas de la unidad PRI.

DS: Desviación estándar; Q1: Primer cuartil; Q3: Tercer cuartil.

Mineral	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DE	Q1	Q3
Calcopirita	0,015	1,9	0,517	0,32	0,438	0,2	0,7
Bornita	0	0,9	0,009	0	0,043	0	0
Calcosina	0	0,1	<0,001	0	0,004	0	0
Covellina	0	0,045	<0,001	0	0,002	0	0

Como ya se observó en la Figura 7.10, la solubilidad de esta unidad es notoriamente menor al resto de las unidades, debido a que los sulfuros primarios son insolubles en ácido sulfúrico, por lo que la RS no debería superar el 20%. Sin embargo, cerca del 20% de los datos muestran solubilidades mayores, por lo que estos datos se grafican con respecto al porcentaje de calcopirita y cobre total para identificar el origen del comportamiento anómalo, y se verifica que las mayores solubilidades (RS entre 40% y 60%), se asocian a los porcentajes de calcopirita más bajos (Figura 7.12A), mineral que al ser prácticamente la única mena en este grupo, se relaciona directamente al contenido de cobre. Es así como se observa que en la Figura 7.12B, tal como se espera, el 60% de los datos con RS mayor a 20%, corresponden a tramos con cobre total menor a 0,22 y el número de tramos en este rango de solubilidad disminuye al aumentar el contenido de cobre, al igual que la proporción de datos con RS entre 40-60% con respecto a los que se encuentran en el rango de RS 20-40%. De manera que la alta solubilidad observada en estos datos sería principalmente por un error asociado a la baja ley de las muestras, ya que si consideramos como ejemplo un valor de cobre total igual a 0,2, el cobre soluble esperable para esta unidad será menor a 0,02, valores muy bajos para una medición exacta, y en donde la más mínima variación, inducirá a un alto error al pasar a RS. Por otro lado, los casos en donde esta causa no sea aplicable, como por ejemplo para

los valores de solubilidad alta y alto contenido de cobre, posiblemente corresponden a tramos en donde se omitió en el mapeo la presencia de un óxido soluble.



7.2.1.2. Unidad MIX (Mixto)

La unidad MIX contiene gran variedad de menas, pero se caracteriza por presentar calcopirita en un porcentaje relativo mayor al 10%, en la mayoría de los casos mayor a 20%, asociada a menas oxidadas, las cuales corresponden en este caso principalmente a brocantita y crisocola, como puede observarse en la Figura 7.13. Los contenidos de sulfatos y óxidos negros son menores, sin embargo, en algunos tramos pueden constituir la principal mena oxidada.

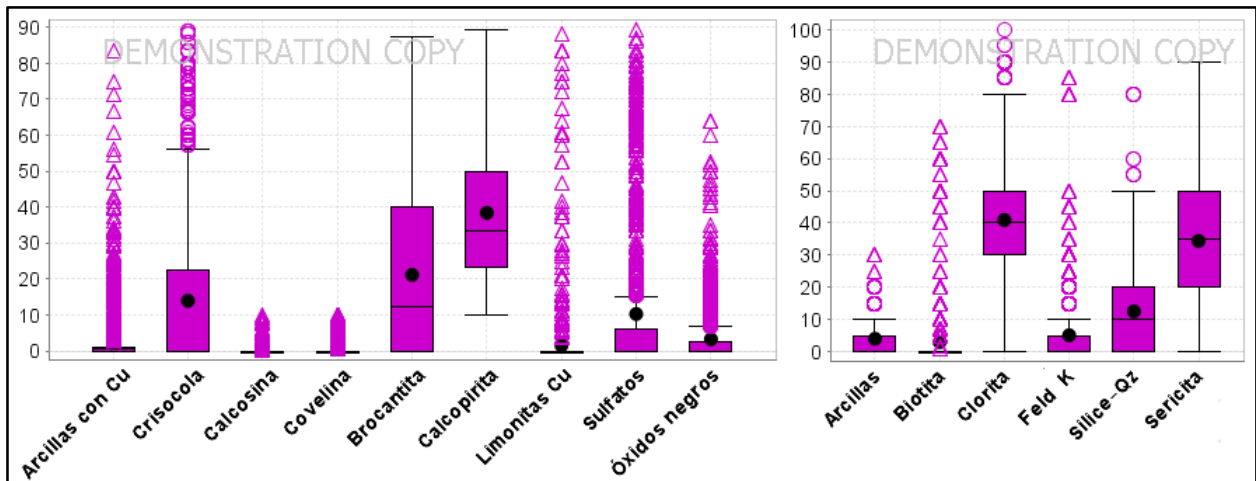


Figura 7.13: Porcentajes relativos de menas y minerales de alteración de la unidad MIX.

En términos de porcentajes absolutos, la constitución promedio de las muestras de esta unidad, corresponde a un 0,21% de calcopirita y un porcentaje similar de óxidos verdes, en donde predomina la brocantita por sobre la crisocola, como puede verse en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3: Estadística de porcentajes absolutos en volumen de menas de la unidad MIX.
DS: Desviación estándar; Q1: Primer cuartil; Q3: Tercer cuartil.

Mineral	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DE	Q1	Q3
Calcopirita	0,02	0,9	0,21	0,18	0,14	0,1	0,28
Brocantita	0	1	0,11	0,06	0,14	0	0,2
Crisocola	0	1,05	0,08	0	0,15	0	0,12
Sulfatos	0	1,17	0,07	0	0,16	0	0,03

Esta unidad se asocia a una alteración clorítica-sericítica, con rangos de porcentajes relativos similares de clorita y sericita, y con algunos tramos pertenecientes a la alteración potásica, evidenciada por la presencia de feldespatos potásico (Figura 7.13).

Como ya se mencionó, la solubilidad de esta unidad es media a baja, y la variación de ésta está controlada por la proporción de sulfuros con respecto a oxidados solubles, teniendo mayor solubilidad los tramos en donde el contenido de óxidos con respecto a los sulfuros es mayor.

7.2.1.3. Unidad MIX-SEC (Mixto con sulfuros secundarios)

Unidad caracterizada por la presencia de sulfuros secundarios en un porcentaje relativo mayor al 10%, pero que sin embargo, puede contener una gran variedad de menas, como se observa en la Figura 7.14. El mineral que se encuentra en mayor abundancia aparte de los sulfuros secundarios es la calcopirita, pero se debe tener en cuenta que también está ausente en varios tramos. Con respecto a las menas oxidadas, estas pueden encontrarse representadas tanto por sulfatos de hierro con cobre, como por arcillas con cobre, óxidos verdes u óxidos negros. Corresponde a un grupo muy heterogéneo.

En la Tabla 7.4 se resumen los descriptores estadísticos para los porcentajes absolutos de las menas más importantes de esta unidad, en donde destaca la calcopirita con una mediana de 0,18%, como la mena que en más casos acompaña a los sulfuros secundarios, mientras que los demás minerales se encuentran en cantidades subordinadas.

Al igual que la unidad MIX, la unidad MIX-SEC se asocia a la zona de alteración clorítica-sericítica, con rangos de porcentaje similares de ambos minerales de alteración, pero en este caso

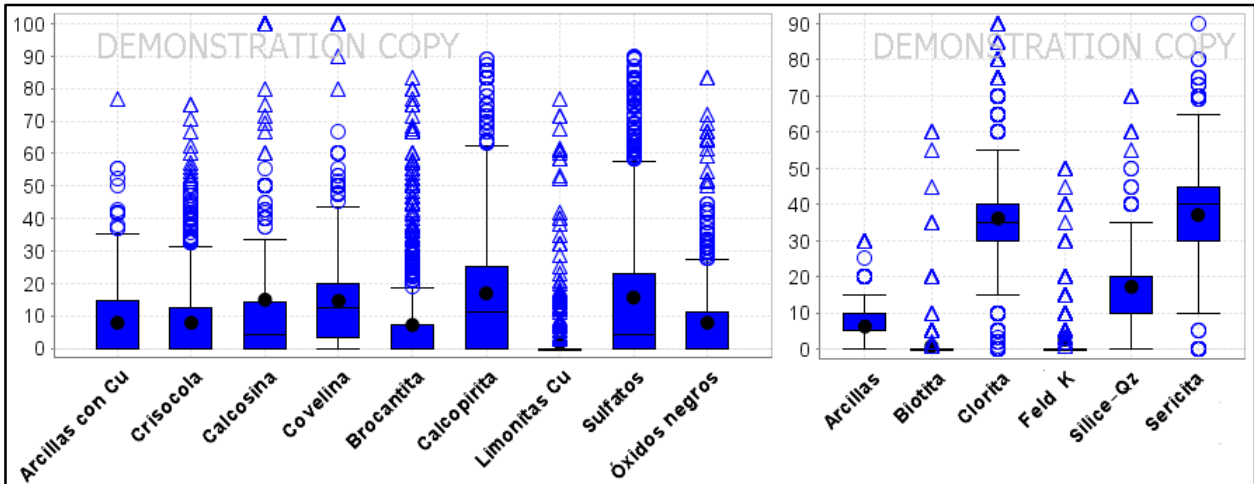


Figura 7.14: Porcentajes relativos de menas y minerales de alteración de la unidad MIX-SEC.

Tabla 7.4: Estadística de porcentajes absolutos en volumen de menas de la unidad MIX-SEC. DS: Desviación estándar; Q1: Primer cuartil; Q3: Tercer cuartil.

Mineral	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DE	Q1	Q3
Calcopirita	0	0,75	0,1	0,18	0,12	0	0,16
Sulfatos	0	2,25	0,12	0	0,22	0	0,15
Covellina	0	0,75	0,09	0	0,09	0,015	0,12
Calcosina	0	0,75	0,05	0	0,08	0	0,09
Arcillas con Cu	0	0,6	0,06	0	0,08	0	0,1
Crisocola	0	0,9	0,06	0	0,1	0	0,08

sin tramos identificados pertenecientes a zona de alteración potásica.

La solubilidad de esta unidad es la que muestra mayor variabilidad de todas, lo que se explica por la gran variedad de menas que pueden acompañar a los sulfuros secundarios, teniendo una mayor RS mientras mayor es la proporción de óxidos con respecto a sulfuros, y a su vez mientras mayor sea la solubilidad del óxido presente.

7.2.1.4. Unidad OXN-LIM (Óxidos negros y limonitas)

Esta unidad se caracteriza por presentar menas oxidadas, pero al tener una baja RS necesariamente corresponden a óxidos poco solubles, y en una proporción lo suficientemente alta para impactar a la solubilidad. Como se observa en la Figura 7.15, los principales óxidos insolubles presentes en la unidad corresponden a limonitas con cobre y óxidos negros los que dan nombre a la unidad, sin embargo, el mapeo registra un alto porcentaje relativo de sulfatos de hierro con cobre, los que se infiere corresponden en gran parte a sulfatos de hierro sin cobre, no diferenciable el uno del otro de manera macroscópica. También se encuentran en esta unidad óxidos verdes, brocantita y

crisocola, los cuales deben estar en porcentajes lo suficientemente bajos como para no verse reflejados en la solubilidad.

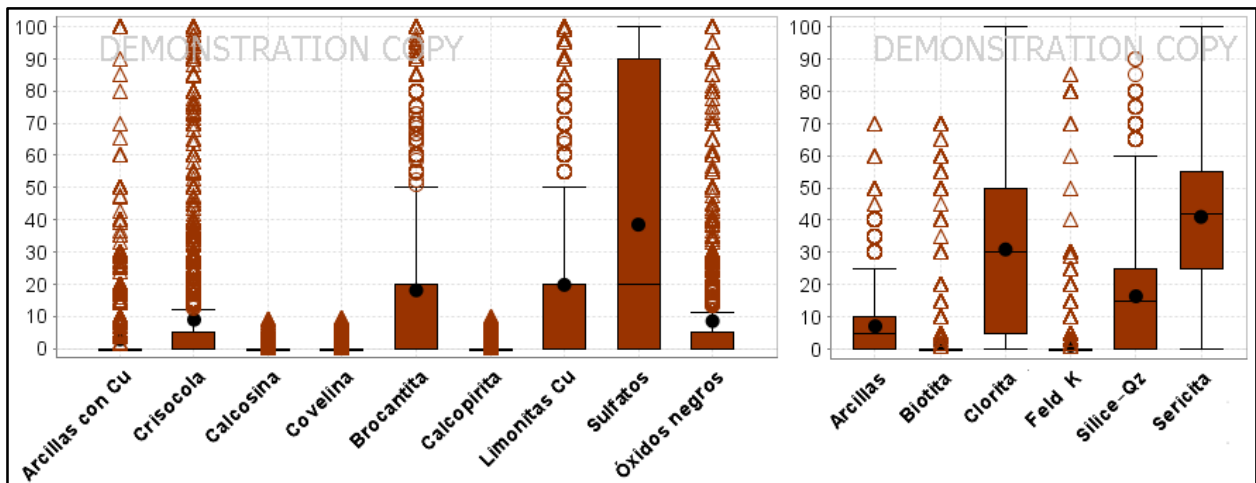


Figura 7.15: Porcentajes relativos de menas y minerales de alteración de la unidad OXN-LIM.

Los porcentajes absolutos a su vez (Tabla 7.5), muestran una predominancia de sulfatos de hierro con cobre, aunque teniendo en consideración lo antes mencionado que explica la sobrestimación de este valor. Fuera de esto, las limonitas con cobre corresponden a la principal mena de la unidad (en volumen) con un promedio de 0,22%, aunque con un fuerte sesgo negativo, dado por la ausencia de este mineral (según los datos de mapeo) en gran parte de los tramos. Los óxidos verdes se encuentran de manera subordinada, con un volumen equivalente a la mitad del de limonitas con cobre, y ausentes en la mayoría de los tramos, y los óxidos negros son aún más escasos que los anteriores, aunque por la solubilidad de la unidad, éstos podrían estar siendo subestimados con respecto a los porcentajes de óxidos verdes.

Tabla 7.5: Estadística de porcentajes absolutos en volumen de menas de la unidad OXN-LIM. DS: Desviación estándar; Q1: Primer cuartil; Q3: Tercer cuartil.

Mineral	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DE	Q1	Q3
Sulfatos	0	50	0,75	0,07	2,38	0	0,68
Limonitas con Cu	0	10	0,22	0	0,74	0	0,08
Brocantita	0	4,5	0,06	0	0,14	0	0,1
Crisocola	0	5,32	0,06	0	0,18	0	0,03
Óxidos negros	0	3	0,04	0	0,11	0	0,03

Los tramos de OXN-LIM se encuentran en zonas de alteración clorítica-sericítica, aunque con una proporción de sericita mayor con respecto a clorita que en las unidades de mixtos. La variación de la solubilidad dentro de esta unidad, al igual que en los dos casos anteriores, está controlada por la

proporción de minerales solubles e insolubles, en este caso correspondiente a óxidos verdes y sulfatos de hierro con cobre, con respecto a limonitas con cobre y óxidos negros.

7.2.1.5. Unidad OXV (Oxidados verdes)

Esta unidad se caracteriza por la predominancia de oxidados verdes por sobre otras menas (Figura 7.16), los cuales están representados por brocantita como mena principal, crisocola de menor abundancia, y atacamita y malaquita, de manera muy local. También puede hallarse en tramos de esta unidad, bajos porcentajes de óxidos negros, los que se encuentran en abundancia lo suficientemente baja como para no afectar la solubilidad.

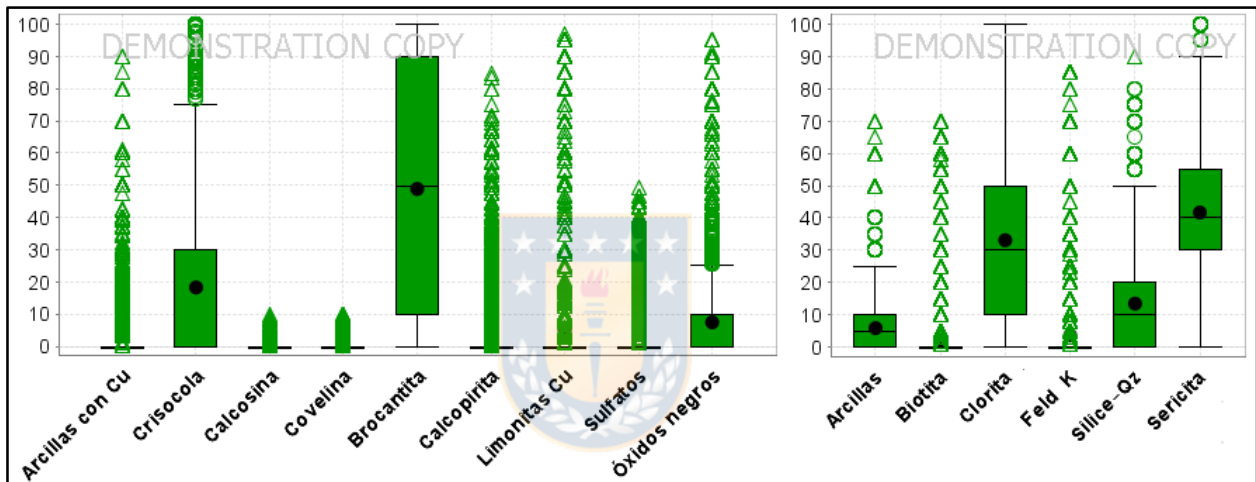


Figura 7.16: Porcentajes relativos de menas y minerales de alteración de la unidad OXV.

En porcentajes absolutos (Tabla 7.6), los porcentajes relativos previos se traducen en un contenido de brocantita promedio de 0,27%, el que puede estar complementado con crisocola, la que se encuentra en un promedio de 0,14%, aunque con un gran sesgo al estar ausente en un gran número de tramos, al grado tal de tener mediana igual a 0. Los óxidos negros y sulfatos están ausentes en la mayoría de los tramos, con una mediana igual a 0.

Tabla 7.6: Estadística de porcentajes absolutos en volumen de menas de la unidad OXV.

DS: Desviación estándar; Q1: Primer cuartil; Q3: Tercer cuartil.

Míneral	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DE	Q1	Q3
Brocantita	0	4,8	0,27	0,2	0,31	0,06	0,38
Crisocola	0	5	0,14	0	0,26	0	0,2
Óxidos negros	0	7,2	0,06	0	0,17	0	0,06
Sulfatos	0	1,35	0,045	0	0,11	0	0
LimCu	0	9,7	0,043	0	0,22	0	0

Esta unidad se encuentra en zonas de alteración clorítica-sericítica, con una proporción de sericita con respecto a clorita, similar a la de la unidad OXN-LIM.

7.2.1.6. Unidad SULF (Sulfatos de hierro con cobre)

La última unidad definida, corresponde a SULF, en donde la mena predominante son los sulfatos de hierro con cobre, los cuales se encuentran en un porcentaje relativo superior a 75% en el 75% de los datos (Figura 7.17). El contenido en otras menas es prácticamente nulo, destacando algunos escasos tramos con contenido de óxidos verdes, óxidos negros, limonitas con cobre y/o arcillas con cobre.

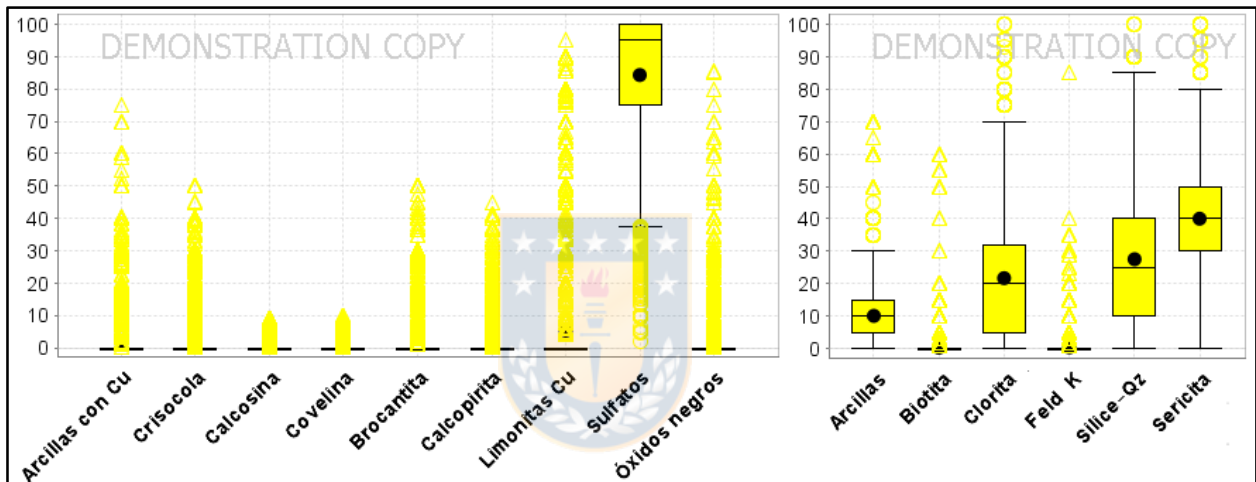


Figura 7.17: Porcentajes relativos de menas y minerales de alteración de la unidad SULF.

En cuanto a los porcentajes absolutos, los sulfatos de hierro con cobre se encuentran con una mediana de 1,28%, menor al promedio de 3,4% dado por tramos con contenidos muy altos de sulfatos, que pueden llegar al 90%. Los contenidos de óxidos verdes y limonitas con cobre, son despreciables, como se observa en la Tabla 7.7, al igual que los de arcillas con cobre y óxidos negros, menores a los anteriores, por lo que se omiten en la tabla.

Tabla 7.7: Estadística de porcentajes absolutos en volumen de menas de la unidad SULF. DS: Desviación estándar; Q1: Primer cuartil; Q3: Tercer cuartil.

Mineral	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DE	Q1	Q3
Sulfatos	0,007	90	3,4	1,28	6,18	0,6	3
Brocantita	0	4	0,05	0	0,14	0	0
Limonitas con Cu	0	9	0,06	0	0,27	0	0

Esta unidad se encuentra estrechamente relacionada a zonas de alteración cuarzo-sericítica intensa,

en muchos casos con sílice oquerosa, con bajos porcentajes de clorita y minerales de alteración potásica, y abundante sericita y sílice, como puede observarse en la Figura 7.17.

7.2.2. DIFERENCIAS POR SECTOR

Como se ha mencionado en capítulos previos, la geología de Antucoya tiene la particularidad de presentar dos sectores con características de mineralización y alteración contrastantes: Sector Antucoya (AN) al W, y sector Buey Muerto (BM) al E. La división de ambos sectores no está bien definida, pero en este caso se utilizará la línea dibujada en la Figura 7.18, en donde se observa una diferencia en las unidades de mena en planta, con predominancia de OXV en el sector Antucoya, y de SULF en el sector Buey Muerto.

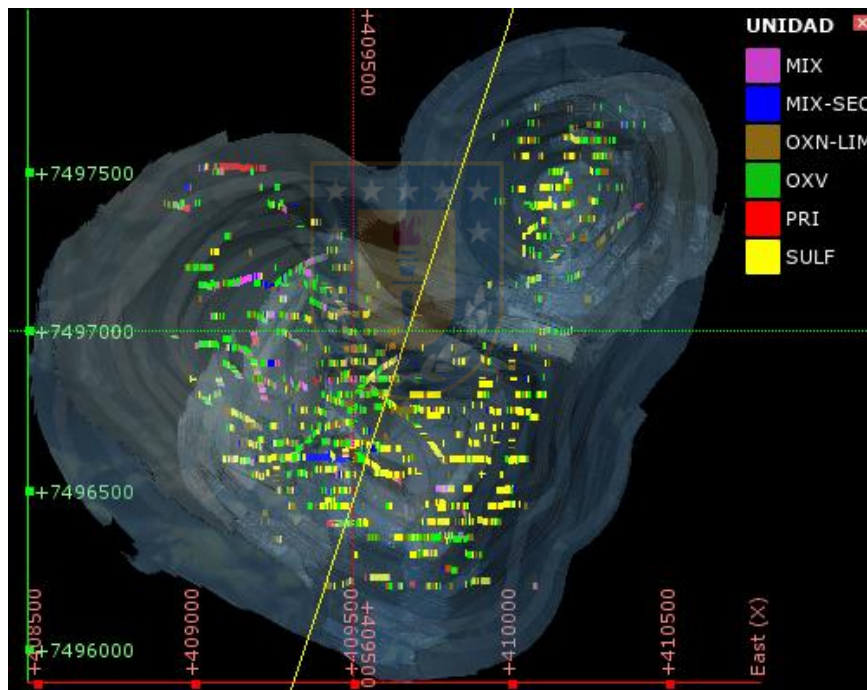


Figura 7.18: División de sectores utilizada para comparación. Sobre pit final como referencia, con distribución de unidades vista en planta. Al W sector Antucoya, y al E sector Buey Muerto.

Las diferencias geológicas entre ambos sectores, sin embargo, podrían estar asociadas no solo a la predominancia de ciertas unidades en un sector con respecto al otro, sino que también a diferentes características de una misma unidad según el sector en el cual se encuentre. Por esta razón, se revisan a continuación las características de cada unidad haciendo una comparación en base al contenido de cobre total, RS y porcentajes relativos de menas y gangas, de los tramos

pertenecientes al sector Antucoya, con respecto a los que se encuentran en el sector Buey Muerto, para caracterizar las diferencias entre ambos.

7.2.2.1. Unidad PRI (Primario)

La unidad PRI es la más homogénea de todas las unidades definidas, y al revisar las diferencias por sector se verifica que es similar en ambos sectores del yacimiento, encontrándose principalmente en el sector Antucoya, con un 74% de los tramos. En la Figura 7.19 se observa que los valores de cobre total son prácticamente coincidentes, al igual que la RS, la cual tiene más valores de alta solubilidad asociada al sector Antucoya que Buey Muerto, pero en este grupo los valores de alta solubilidad son producto de un error, por lo tanto, no representan diferencias reales.

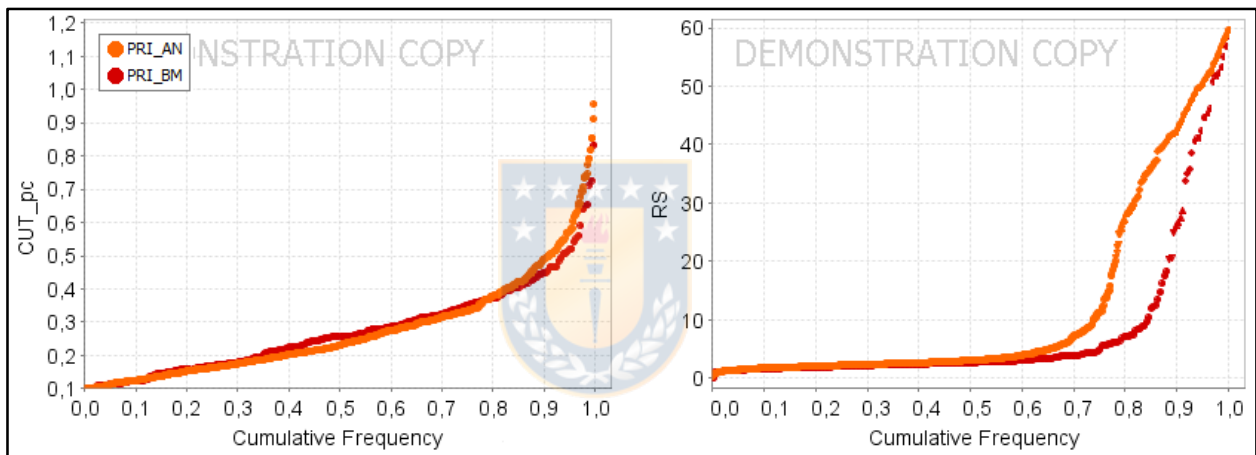


Figura 7.19: Valores de cobre total y RS de la unidad PRI por sector.

La mineralogía de mena también es homogénea (Figura 7.20), tanto en porcentajes relativos como en absolutos, al tener igual contenido de cobre total en las dos zonas. En cuanto a la alteración, se identifica una concentración de los tramos con alteración potásica en el sector Antucoya, con abundante biotita y feldespato potásico, mientras que el sector Buey Muerto es fuertemente clorítico. Esta diferencia en la alteración, sin embargo, no se refleja en el contenido de menas, por lo tanto, no corresponde una separación de esta unidad según sectores del yacimiento.

7.2.2.2. Unidad MIX (Mixto)

La unidad MIX está principalmente en el sector Antucoya, con un 91% de los tramos codificados en este sector. El cobre total, graficado en la Figura 7.21, no muestra gran diferencia entre ambos

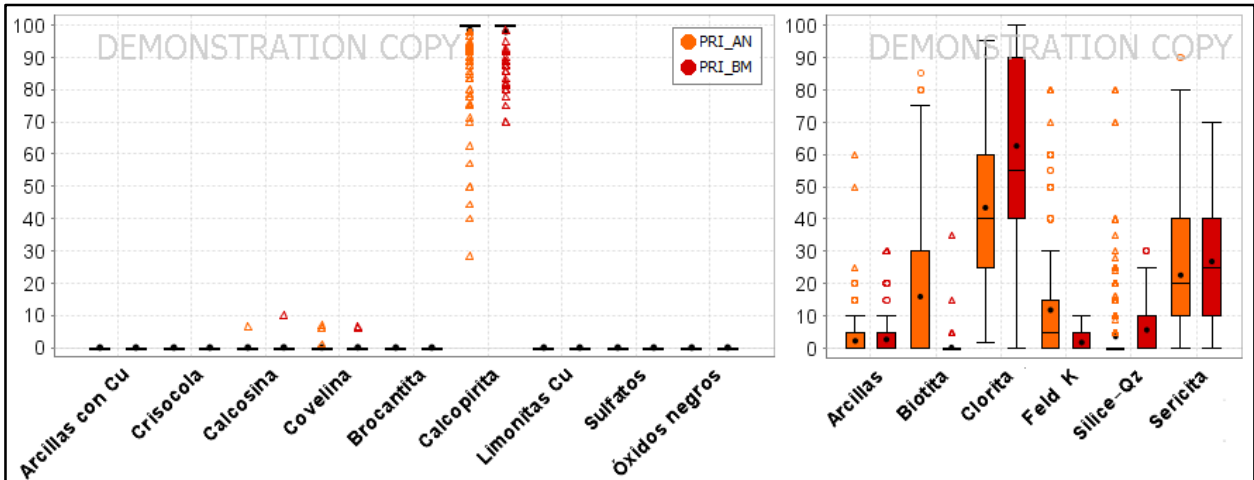


Figura 7.20: Menas y gangas de la unidad PRI por sector.

sectores, aunque los datos de ley más alta están en el sector Antucoya, lo que podría explicarse simplemente por la mayor cantidad de datos en esta zona. Los escasos datos presentes en el sector Buey Muerto, muestran una solubilidad menor que Antucoya en cerca del 50% de los tramos.

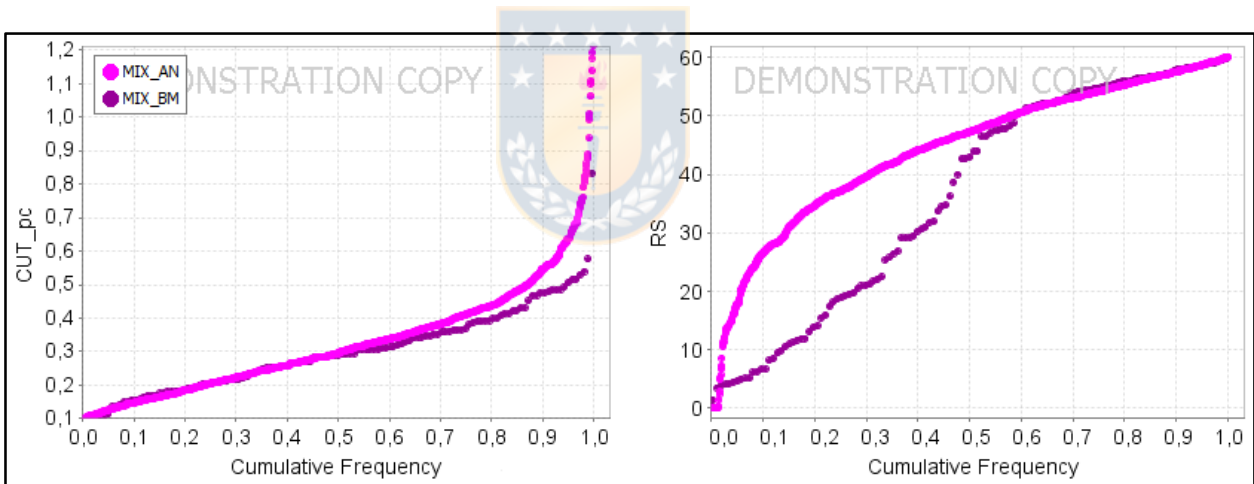


Figura 7.21: Valores de cobre total y RS de la unidad MIX por sector.

Con respecto a la mineralogía de esta unidad, se identifican disimilitudes entre ambos sectores, resumidas en la Figura 7.22. La diferencia más notoria se ve en el contenido de sulfatos de hierro con cobre, mucho más abundantes en el sector Buey Muerto, y prácticamente ausentes en el sector Antucoya, en donde a su vez hay mayor porcentaje relativo de óxidos verdes, brocantita y crisocola. La proporción de calcopirita se mantiene constante en ambos sectores, de manera que las asociaciones características para cada sector están dadas por calcopirita, con óxidos verdes como mena oxidada dominante en el caso de Antucoya, y sulfatos de hierro con cobre en el caso de Buey

Muerto. El sector Antucoya presenta además, bajos porcentajes de arcillas con cobre y óxidos negros en algunos tramos, y el sector Buey Muerto, bajos porcentajes de covelina. Esta variación en la mineralogía explica las diferencias en los valores de RS, mayores en el sector Antucoya, que contiene óxidos verdes, con mayor aporte de cobre soluble (mayor ley) con respecto a los sulfatos.

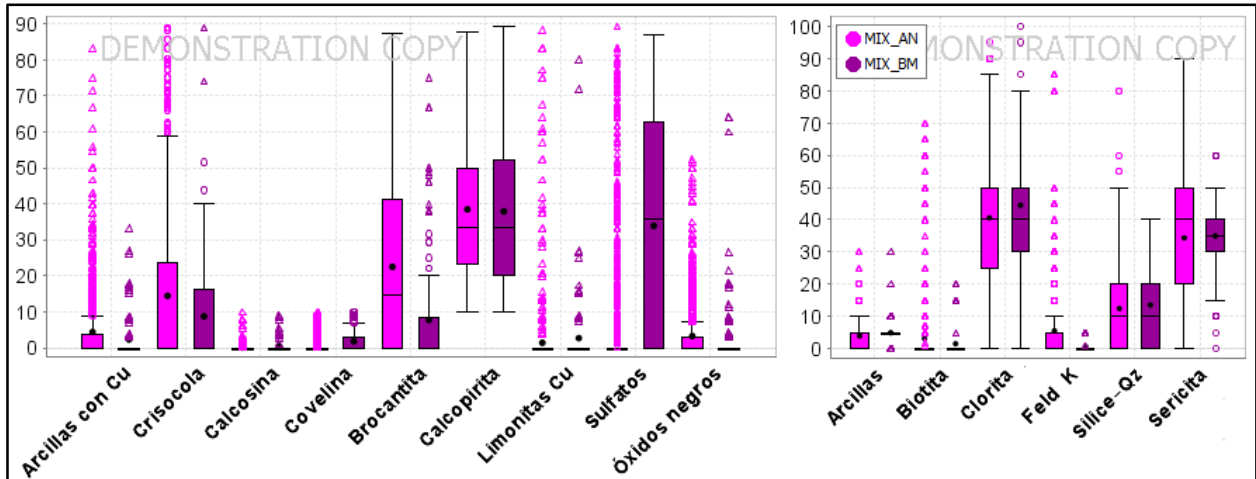


Figura 7.22: Menas y gangas de la unidad MIX por sector.

Las diferencias en el contenido de menas no se relacionan a grandes variaciones de los porcentajes de minerales de alteración mapeados, obteniendo promedios de sericita y clorita similares para ambos sectores. Los escasos tramos con alteración potásica se encuentran en el sector de Antucoya.

7.2.2.3. Unidad MIX-SEC (Mixto con sulfuros secundarios)

El 69% de los tramos codificados de esta unidad, se encuentran en el sector Antucoya, y sólo el 31% en el sector Buey Muerto. Los contenidos de cobre total en ambos sectores son muy similares, mientras que los valores de RS muestran diferencias, siendo mayores en Antucoya que en Buey Muerto en el 90% de los datos, como puede verse en la Figura 7.23, al igual que ocurre con la unidad anterior.

La mineralogía, graficada en la Figura 7.24, muestra similitudes en el contenido de calcopirita para ambos sectores, al igual que en el contenido de sulfuros secundarios, aunque en estos últimos se observan pequeñas diferencias, con valores más altos de calcosina en el sector Buey Muerto que en Antucoya. Sin embargo, se reconocen diferencias importantes en las menas oxidadas, las cuales definen asociaciones contrastantes similares a las observadas para la unidad MIX, con óxidos verdes, crisocola y brocantita, dominantes en el sector Antucoya y prácticamente ausentes en Buey

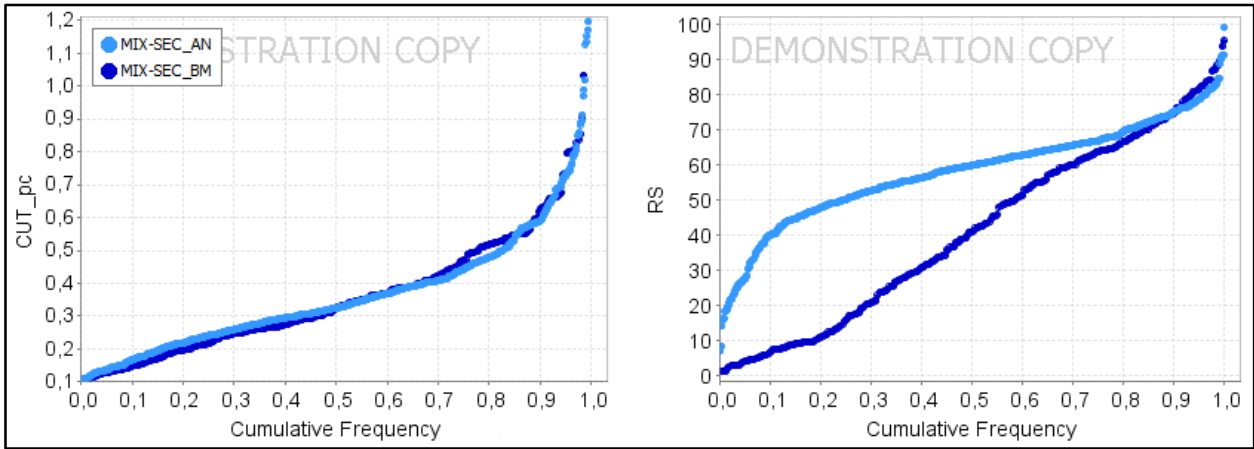


Figura 7.23: Valores de cobre total y RS de la unidad MIX-SEC por sector.

Muerto, similar a lo que ocurre con las arcillas con cobre y óxidos negros, mientras que en el sector Buey Muerto, los óxidos se encuentran representados principalmente por sulfatos, los cuales son escasos, o incluso ausentes, en la mayoría de los tramos. Los minerales de alteración por su parte, se encuentran en rangos similares en ambos sectores.

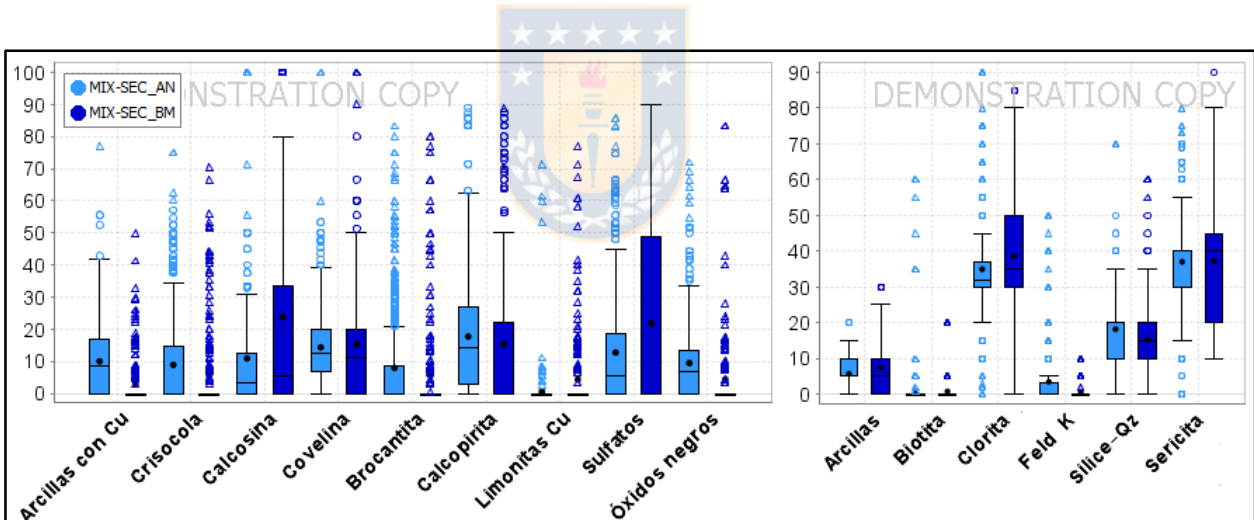


Figura 7.24: Menas y gangas de la unidad MIX-SEC por sector.

7.2.2.4. Unidad OXN-LIM (Óxidos negros y limonitas)

Los tramos pertenecientes a esta unidad se encuentran en proporciones similares en ambos sectores, aunque mayormente en el sector Antucoya con un 54% de los datos. Las leyes de cobre son muy cercanas en ambos sectores, mientras que la RS es levemente mayor en el sector Antucoya que en Buey Muerto, en cerca del 50% de los datos, como puede observarse en la Figura 7.25.

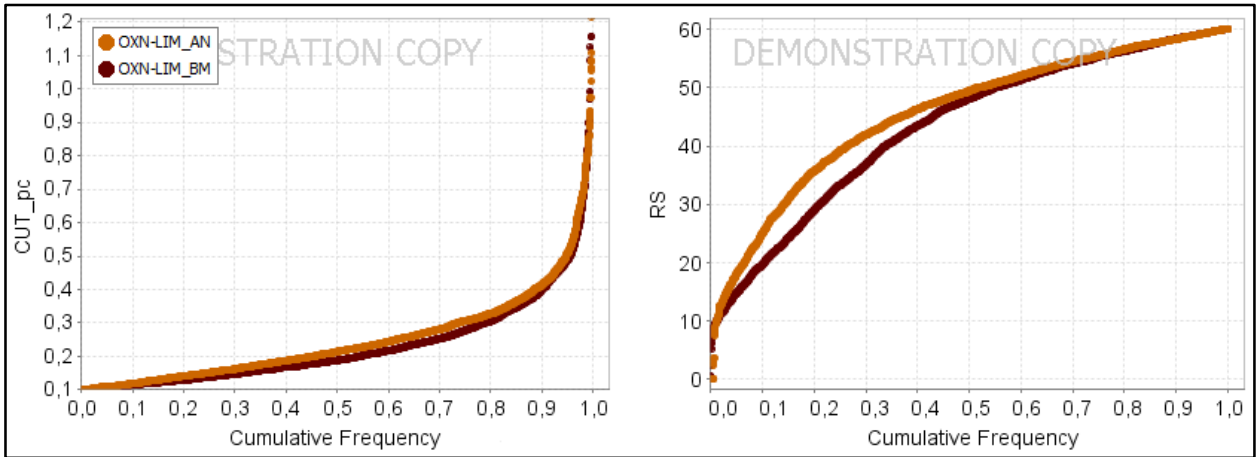


Figura 7.25: Valores de cobre total y RS de la unidad OXN-LIM por sector.

Las mineralogías varían de un sector a otro, como se observa en la Figura 7.26, lo que se evidencia en el contenido de limonitas con cobre, las cuales se presentan en abundancia en Buey Muerto, mientras que están ausentes en el sector Antucoya. Algo similar ocurre con los óxidos negros, aunque estos se encuentran en menor proporción y con menor diferencia entre ambos sectores. Otra diferencia relevante se da en los óxidos verdes, crisocola y brocantita, los cuales si bien son escasos, se presentan en algunos tramos del sector Antucoya, mientras que están ausentes o en baja proporción en los tramos del sector Buey Muerto.

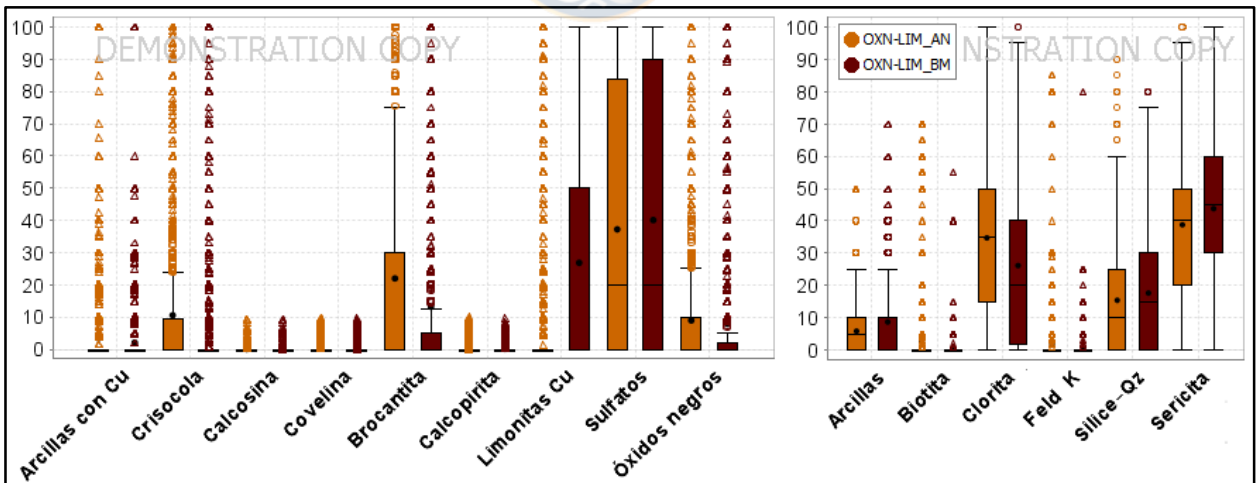


Figura 7.26: Menas y gangas de la unidad OXN-LIM por sector.

En cuanto a los minerales de alteración, se reconocen diferencias dadas principalmente por un mayor contenido de minerales de alteración cuarzo-sericítica en el sector Buey Muerto, el que a su vez contiene porcentajes más bajos de clorita, mientras que lo contrario ocurre en Antucoya.

7.2.2.5. Unidad OXV (Oxidados verdes)

Esta unidad se encuentra principalmente en el sector Antucoya, en donde las solubilidades son más bajas con respecto al sector Buey Muerto, y en donde se concentra un 69% de los tramos codificados. En cuanto a las leyes de cobre no hay diferencias destacables, como puede observarse en la Figura 7.27.

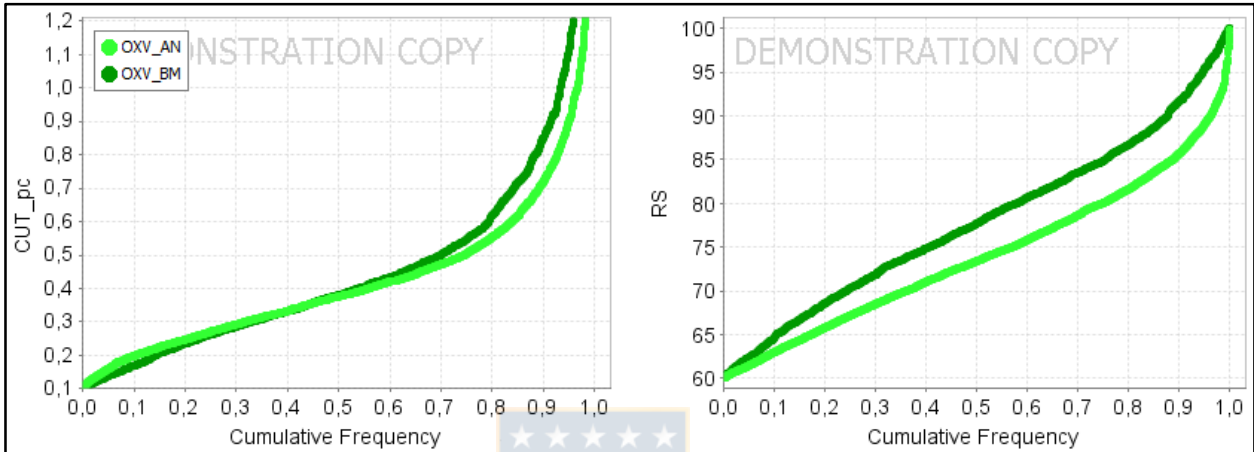


Figura 7.27: Valores de cobre total y RS de la unidad OXV por sector.

En este caso, no se identifican diferencias en las menas más relevantes y que definen la unidad (Figura 7.28), por lo que las asociaciones son similares en ambos sectores. Se destaca como una característica secundaria, que los bajos contenidos de sulfatos de hierro con cobre que pueden hallarse asociados a los óxidos verdes en esta unidad, se encuentran concentrados en el sector Buey Muerto, lo que podría explicar las diferencias de solubilidad observadas.

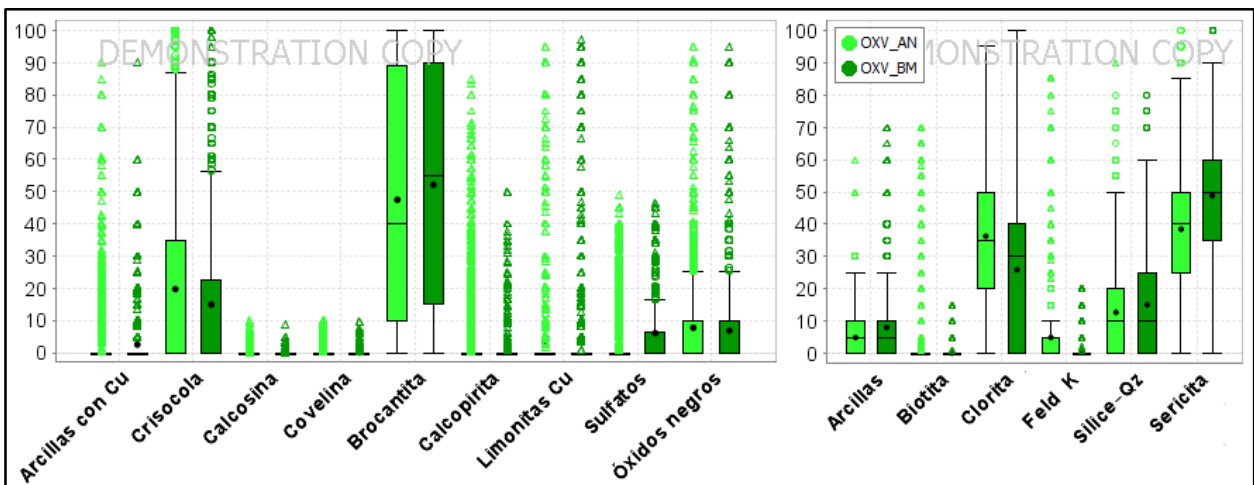


Figura 7.28: Menas y gangas de la unidad OXV por sector.

Con respecto a los minerales de alteración, se identifica igualmente una diferencia, al predominar minerales de alteración cuarzo-sericítica en el sector Buey Muerto, con baja proporción de clorita, mientras que en el sector Antucoya, la clorita es mayor, y se encuentra en proporciones similares a la sericita, tal como ocurre con la unidad OXN-LIM.

7.2.2.6. Unidad SULF (Sulfatos de hierro con cobre)

La unidad SULF, corresponde a la única que se encuentra en forma predominante en el sector Buey Muerto, con un 69% de los tramos codificados. No se identifican diferencias en las leyes entre ambos sectores (Figura 7.29), sin embargo, la solubilidad es mayor en el sector Buey Muerto, al igual que lo observado en la unidad OXV, lo que se explica de igual forma, por un mayor contenido de óxidos verdes y negros en Antucoya (Figura 7.30), de menor solubilidad que los sulfatos de hierro con cobre, disminuyendo levemente la solubilidad en este sector.

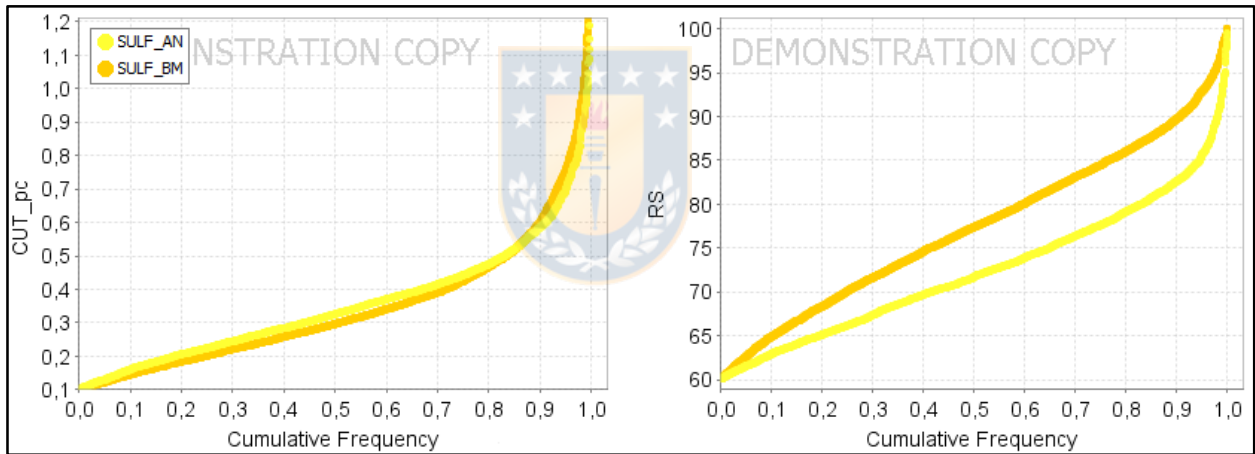


Figura 7.29: Valores de cobre total y RS de la unidad SULF por sector.

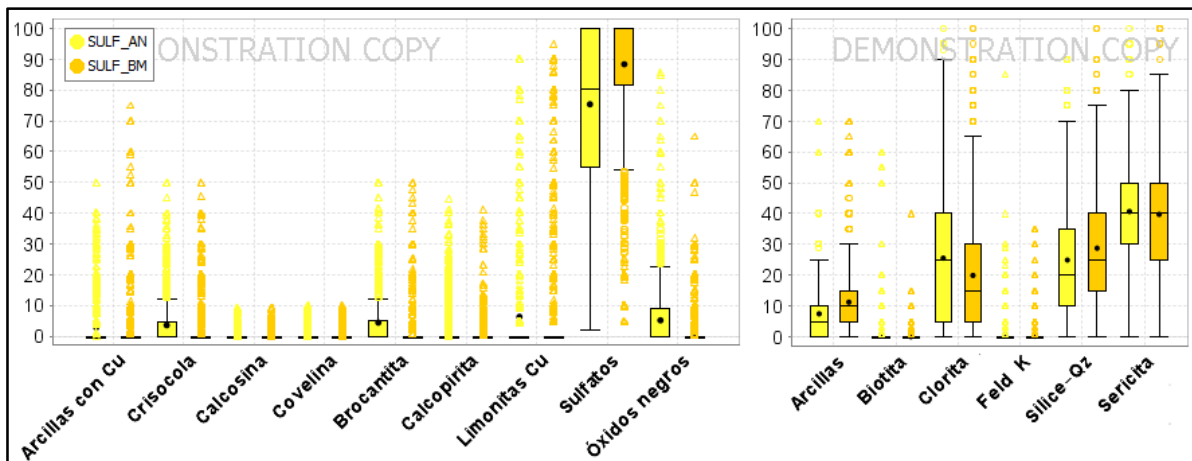


Figura 7.30: Menas y gangas de la unidad SULF por sector.

La mineralogía tanto de mena como de alteración (ganga), que se observa en la Figura 7.30, es bastante homogénea en ambos sectores. Leves diferencias se registran en el contenido de sulfatos que presenta mayor variabilidad (alcanzando hasta porcentajes más bajos) en el sector Antucoya con respecto a Buey Muerto, en donde se encuentra claramente definido sobre el 50% relativo. Además, existen bajas proporciones de crisocola, brocantita y óxidos negros, presentes en algunos tramos del sector Antucoya, y ausentes en Buey Muerto. En cuanto a gangas, la clorita es más abundante en Antucoya, pero aun así con proporciones muy similares en ambos sectores, y las arcillas se encuentran en mayor proporción en la zona de Buey Muerto.

7.2.3. DIFERENCIAS POR ALTERACIÓN DOMINANTE

Las unidades PRI y SULF tienen alteraciones dominantes claramente definidas por los minerales de alteración mapeados, correspondiendo a alteración potásica y cuarzo-sericítica respectivamente. Las demás unidades, muestran rangos de proporciones similares de clorita y sericita, y al hacer el análisis por sector, se identificó que la predominancia de uno de estos minerales sobre el otro, puede asociarse en algunos casos en diferencias en las menas, por lo que se decide revisar para cada una de estas unidades, la mineralogía según dos zonas: CLO, que corresponde a zonas en donde la clorita se encuentra en igual proporción o predomina por sobre la sericita, y SER, en donde la sericita es el mineral de alteración predominante entre los dos.

7.2.3.1. Unidad MIX (Mixto)

El 64% de los datos de esta unidad están en la zona CLO, la cual presenta leyes levemente superiores y RS menores a las de la zona SER, como puede verse en la Figura 7.31. La diferencia en RS se explica por una mayor proporción de óxidos solubles con respecto a sulfuros en la zona SER, mientras que la mayor ley que se observa en parte de los tramos de la zona CLO, está dada por un mayor porcentaje de brocantita, principal mena y control de la ley en el yacimiento.

Al analizar la mineralogía, graficada en la Figura 7.32, la zona CLO coincide con una asociación de calcopirita con óxidos verdes, crisocola y brocantita, y prácticamente sin otras menas, mientras que la zona SER, contiene una mayor diversidad de menas, con una asociación representada por calcopirita, óxidos verdes, arcillas con cobre, sulfatos y escasos óxidos negros. Además, se observa la relación entre las zonas CLO con la presencia de biotita de alteración y bajo contenido de sílice.

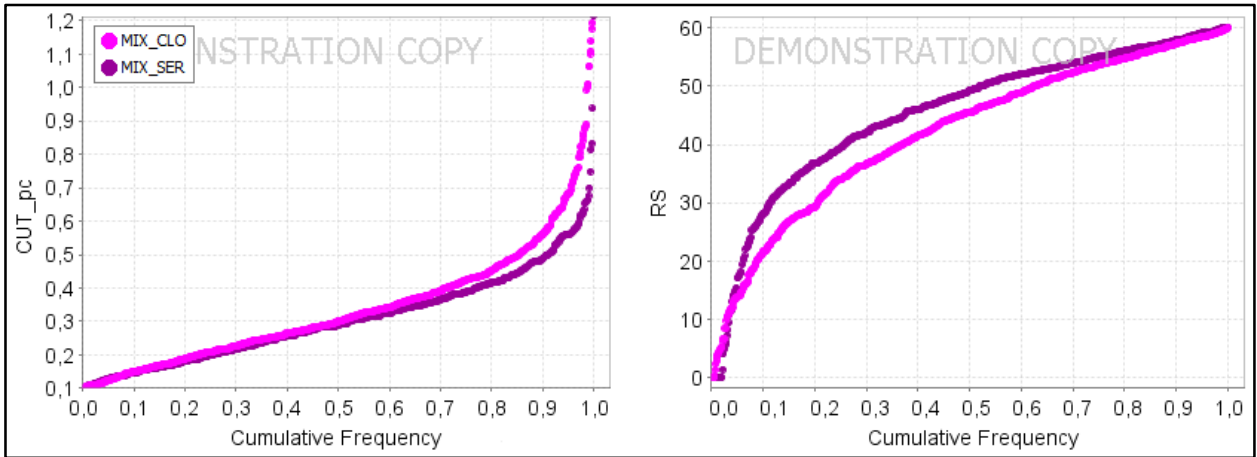


Figura 7.31: Valores de cobre total y RS de la unidad MIX por mineral de alteración dominante.

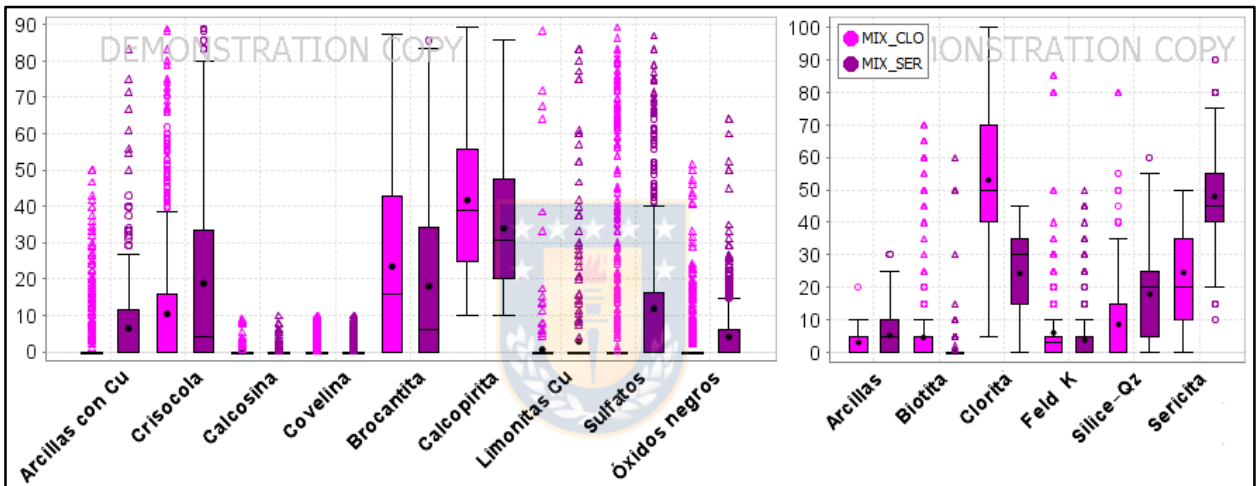


Figura 7.32: Menas y gangas de la unidad MIX por mineral de alteración dominante.

7.2.3.2. Unidad MIX-SEC (Mixto con sulfuros secundarios)

El 59% de los tramos codificados pertenecientes a esta unidad se encuentran en zonas SER, las cuales se asocian a leyes más bajas y mayor solubilidad que las zonas CLO, como puede observarse en la Figura 7.33.

Al igual que en el caso anterior, las diferencias en la RS, se explican por una mayor proporción de óxidos solubles con respecto a sulfuros en la zona SER, y la mayor ley de la zona CLO, por el mayor porcentaje de brocantita. Aunque en términos generales las diferentes zonas no se asocian a diferencias importantes en las menas (Figura 7.34). En cuanto a los minerales de alteración, se mantienen también las relaciones observadas para la unidad MIX, aunque con rangos de sericita y sílice más acotados para la zona SER.

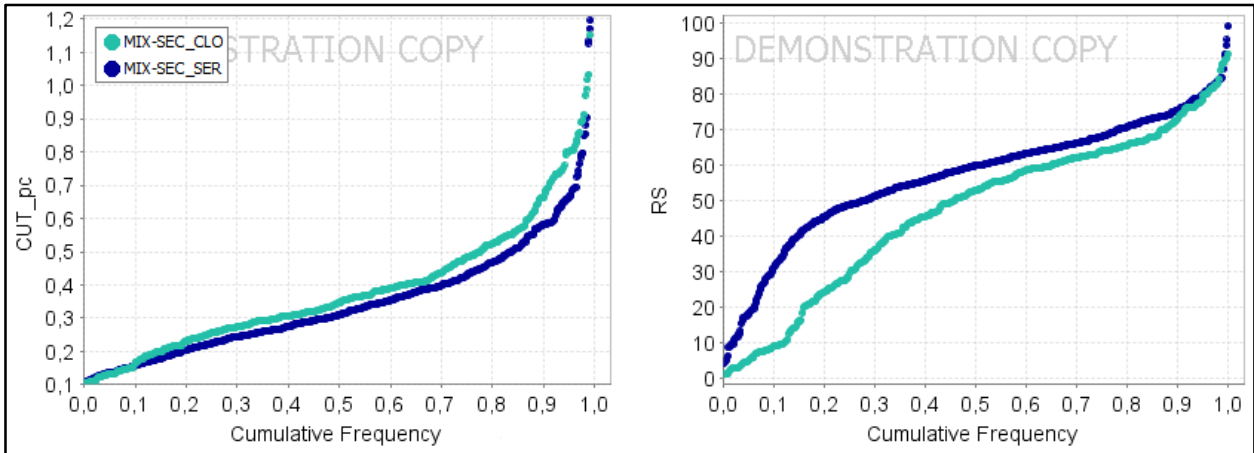


Figura 7.33: Valores de cobre total y RS de la unidad MIX-SEC por mineral de alteración dominante.

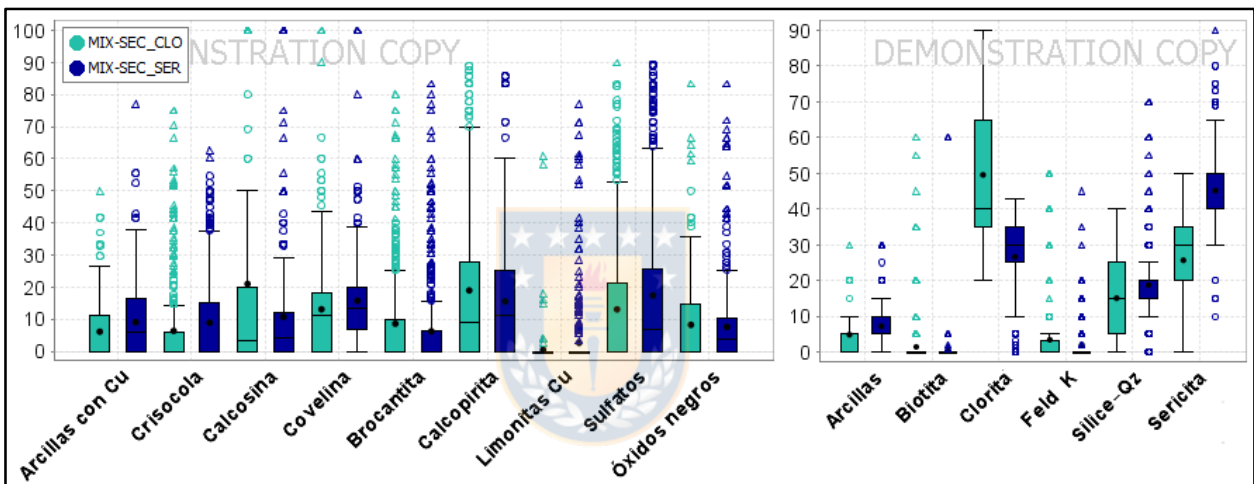


Figura 7.34: Menas y gangas de la unidad MIX por mineral de alteración dominante.

Para esta unidad resulta relevante establecer zonas según su sulfuro secundario dominante, por la ganancia que puede representar la calcosina en el proceso, al disolverse en condiciones ácidas en presencia de ión férrico, lo que en el caso de la covelina, ocurre mucho más lento por lo que para el proceso de Antucoya no marcaría una diferencia. Esta ganancia es una de las razones por la cual se separa la unidad MIX-SEC de la unidad MIX, por lo tanto, se debe caracterizar de la mejor forma posible las condiciones para la formación preferencial de cada uno de los sulfuros secundarios.

Al analizar por sector, no se observa un desarrollo preferencial de un sulfuro secundario u otro según las menas de mapeo, sin embargo, al graficar la distribución de los porcentajes de calcosina y covelina según las zonas CLO y SER en la Figura 7.35, se reconoce una leve predominancia de

calcosina en la zona CLO, y de covelina en la zona SER. Cabe destacar que estas zonas de alteración no se dan de forma preferencial en alguno de los sectores del yacimiento, Antucoya o Buey Muerto, sin embargo, para todas las unidades, se observa una predominancia de la zona CLO en la parte N, mientras que al S la zona SER es mayoritaria.

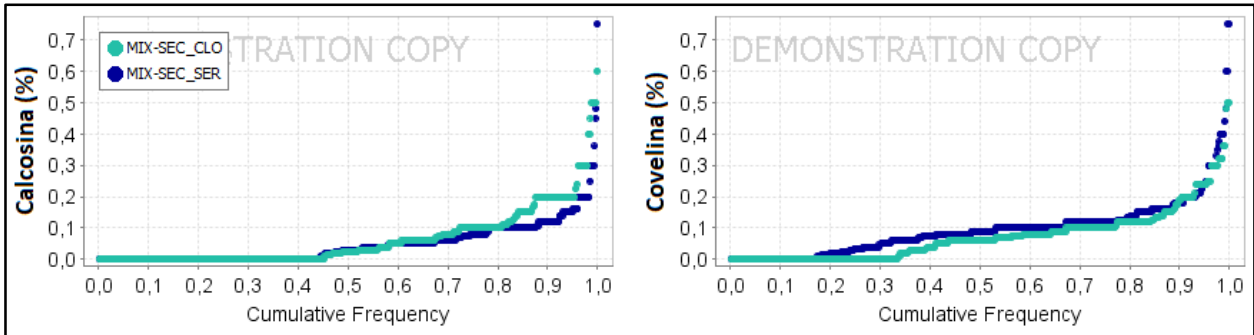


Figura 7.35: Distribución de los porcentajes de sulfuros secundarios por mineral de alteración dominante.

7.2.3.3. Unidad OXN-LIM (Óxidos negros y limonitas)

El 61% de los tramos codificados pertenecientes a esta unidad se encuentran en zonas SER y el 39% restante a zonas CLO, sin embargo, como puede observarse en la Figura 7.36, estas zonas no se asocian a diferencias en los valores químicos de cobre total ni solubilidad.

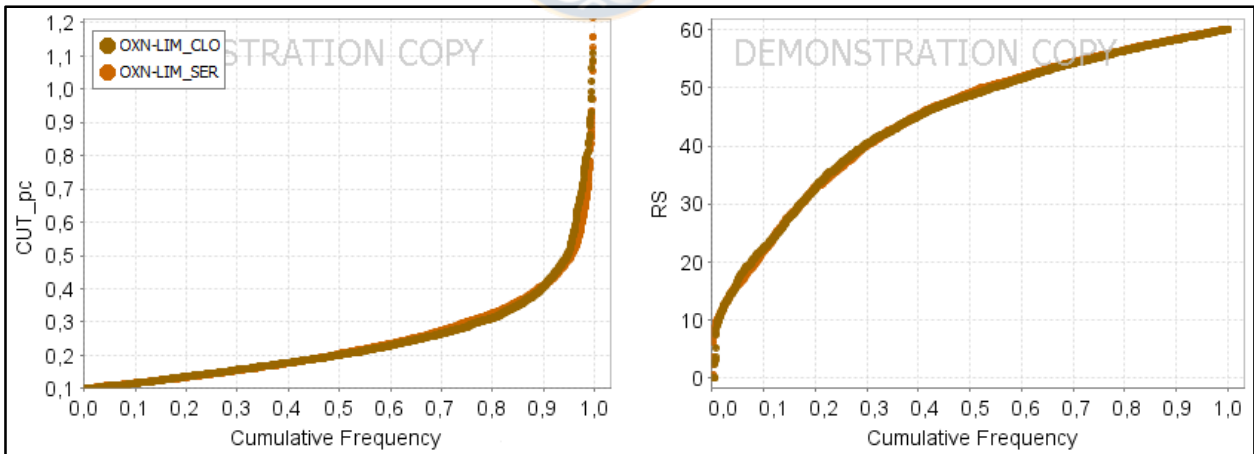


Figura 7.36: Valores de cobre total y RS de la unidad OXN-LIM por mineral de alteración dominante.

En cuanto a las mineralogías (Figura 7.37), se separa una zona rica en clorita, con bajos porcentajes de cuarzo y sericita, de otra rica en sericita, con alto porcentaje de sílice también, y bajo de clorita, las cuales se relacionan a diferencias en las menas ya observadas previamente, con mayores porcentajes de brocantita en la zona CLO, y contenido de óxidos negros más alto en la zona SER.

En este caso además se observan bajos contenidos de crisocola en algunos tramos de la zona SER.

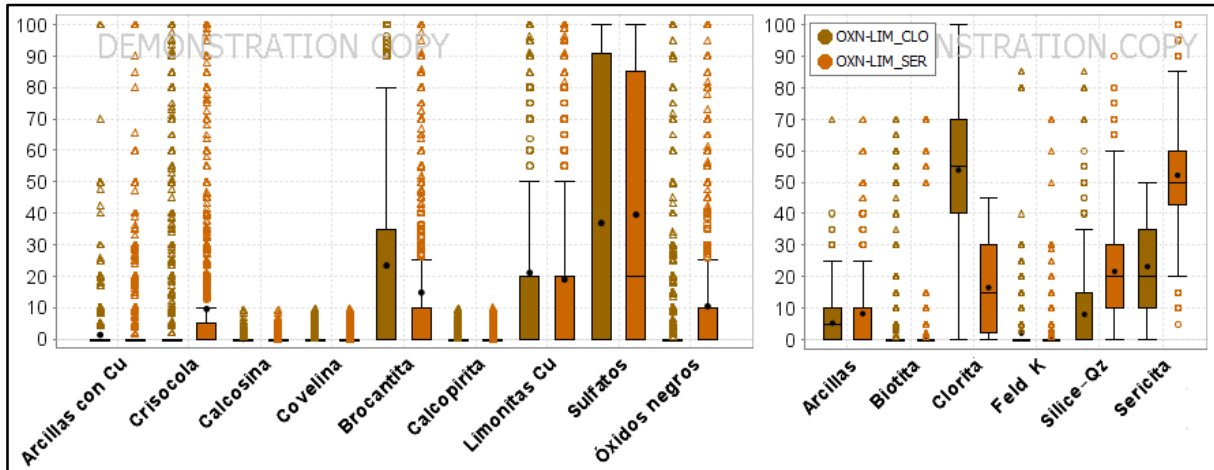


Figura 7.37: Menas y gangas de la unidad OXN-LIM por mineral de alteración dominante.

7.2.3.4. Unidad OXV (Oxidados verdes)

Esta unidad, al igual que las anteriores, está mayoritariamente asociada a zonas SER, con un 60% de los tramos, sin que el encontrarse en una zona u otra se relacione a diferencias importantes en los valores químicos, como puede observarse en la Figura 7.38. Las asociaciones de alteración definidas por la predominancia de clorita o sericita, también son iguales a las observadas previamente, y estas diferencias de alteración se reflejan en el contenido de mena por una mayor proporción de brocantita en la zona CLO, la que a su vez tiene contenidos más bajos de sulfatos, y levemente menores de crisocola (Figura 7.39), siendo consistente con las observaciones previas. Aun así, estas diferencias son leves por lo que en esta unidad diferencias en la alteración no marcan contraste en la asociación mineralógica.

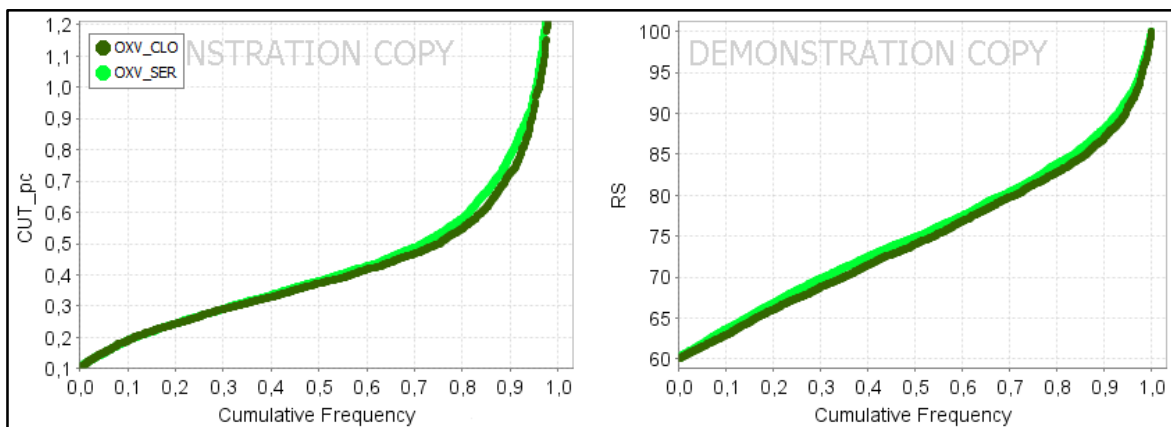


Figura 7.38: Valores de cobre total y RS de la unidad OXV por mineral de alteración dominante.

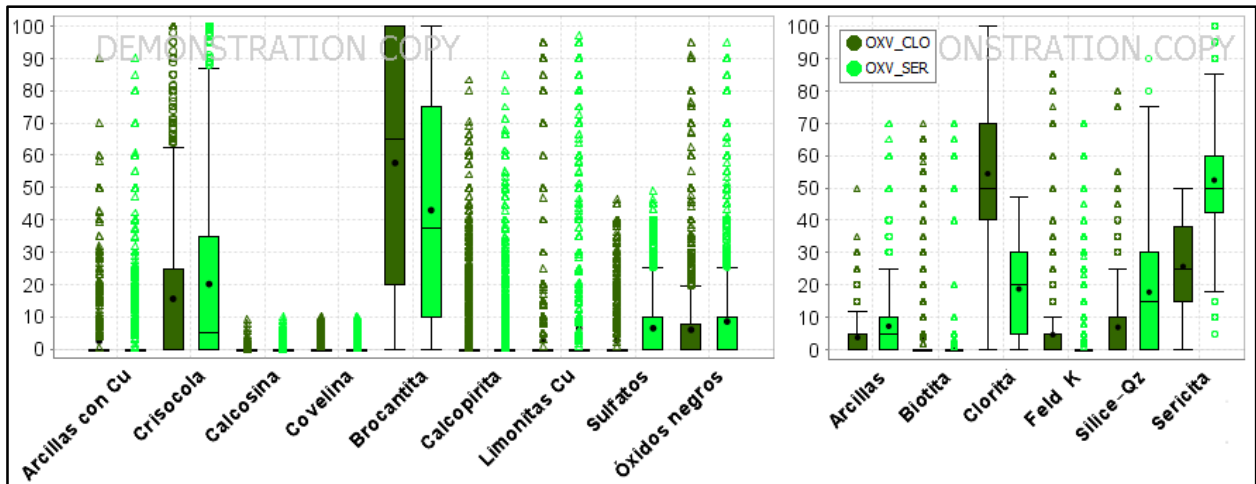


Figura 7.39: Menas y gangas de la unidad OXV por mineral de alteración dominante.

7.3. VALIDACIÓN DE UNIDADES

7.3.1. RESULTADOS DE SOLUBILIDAD

Las solubilidades de las unidades definidas frente a diferentes ataques químicos, entregan información que permite validar de cierta forma la coherencia de las asociaciones predominantes, en base al comportamiento general de la unidad, y los conocimientos teóricos de cómo se comporta cada mena bajo la acción de los diferentes agentes lixiviantes. Es por esto que se utilizan los resultados disponibles de muestras analizadas por extracción secuencial y parcial, asignando cada una de las muestras a una unidad, y posteriormente revisando los resultados globales.

Para asignar las muestras a una unidad, se consideró la unidad dominante, siempre que ésta tuviera una cobertura mayor al 50% del tramo, para aquellas muestras que se encontraban en zonas con unidades determinadas. Para muestras en donde no había determinación de unidades con suficiente cobertura en el tramo, lo que ocurre en escasos tramos por falta de información de mapeo y/o RS, se determinó la unidad en base criterios espaciales, considerando la geología y unidades de los sectores adyacentes tridimensionalmente, en combinación a los datos mineralógicos de mapeo o químicos cuando éstos existieran.

7.3.1.1. Extracción secuencial

De las 192 muestras disponibles, 66 pertenecen a la unidad SULF, 97 a OXV, 22 a OXN-LIM, 4 a MIX-SEC, 2 a MIX y la unidad PRI no se encuentra representada por ninguna muestra. Cabe

destacar que en base a la caracterización previa, se estima conveniente la división de la unidad MIX según el sector en que se encuentre (MIX_AN y MIX_BM), sin embargo, en este caso no hay muestras de la unidad pertenecientes al sector Buey Muerto, por lo que no es posible revisar sus resultados por separado. Para la unidad OXN-LIM, también se considera necesaria una separación por sector, lo que en este caso si es posible, con 8 muestras en el sector Antucoya (OXN-LIM_AN) y 14 en Buey Muerto (OXN-LIM_BM).

Los resultados de cobre total y solubilidad por unidad se muestran en la Figura 7.40. Se observa un fuerte aumento de la ley en la unidad OXV y valores altos también en la unidad MIX-SEC, siendo consistente con los resultados previos y lo esperable por mineralogía.

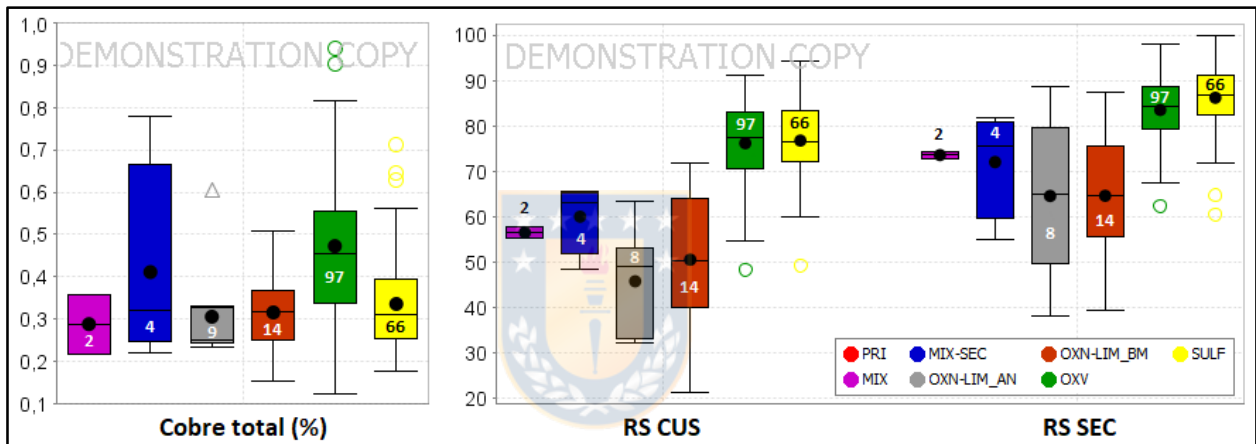


Figura 7.40: Resultados de solubilidad de muestras analizadas mediante extracción secuencial. Cobre total, razón de solubilidad en ácido sulfúrico (RS CUS) y razón de solubilidad total (RS SEC), es decir, la suma de las solubilidades de la etapa 1, en ácido sulfúrico, y la etapa 2, en NaCN.

En cuanto a las solubilidades, las unidades SULF y OXV tienen una RS en ácido sulfúrico (RS CUS) considerablemente mayor a las demás unidades, que presentan valores bajos en el caso de las unidades OXN-LIM Antucoya y Buey Muerto e intermedio para las unidades mixtas. Al comparar con los valores de RS total (RS SEC), es decir, el cobre soluble resultante de la etapa de disolución con ácido sulfúrico sumado al que se disuelve en la segunda etapa con NaCN, dividido por el cobre total, se observa un aumento en todas las unidades, destacando con un aumento significativo las unidades OXN-LIM de ambos sectores, con aumento en Antucoya mayor al de Buey Muerto, MIX y MIX-SEC. Esto implica en la etapa cianurada una disolución de menas no disueltas con ácido sulfúrico, lo que puede deberse a la presencia de minerales como bornita, calcosina y cuprita, insolubles en ácido sulfúrico, y con solubilidad de 70%, 90,2% y 85,5%

respectivamente en soluciones cianuradas (Marsden y House, 1992). De esta forma, en la unidad MIX el aumento de solubilidad en RS SEC podría estar dado por presencia de bornita, para MIX-SEC por bornita y/o calcosina, y en OXN-LIM por presencia de cuprita, lo que sería consistente con las asociaciones de mena que definen las respectivas unidades.

7.3.1.2. Extracción parcial

De las 632 muestras con análisis de extracción parcial, 248 pertenecen a la unidad SULF, 207 a OXV, 123 a OXN-LIM, 21 a MIX-SEC, 23 a MIX y 10 a la unidad PRI. Al igual que en el caso anterior, la unidad OXN-LIM se separa por sector, con 55 muestras en el sector Antucoya (OXN-LIM_AN) y 68 en Buey Muerto (OXN-LIM_BM). Cabe destacar que no todas las muestras tienen resultados para todos los análisis, sin embargo, como se están evaluando los resultados por unidad, se grafican todos los disponibles para cada caso en la Figura 7.41.

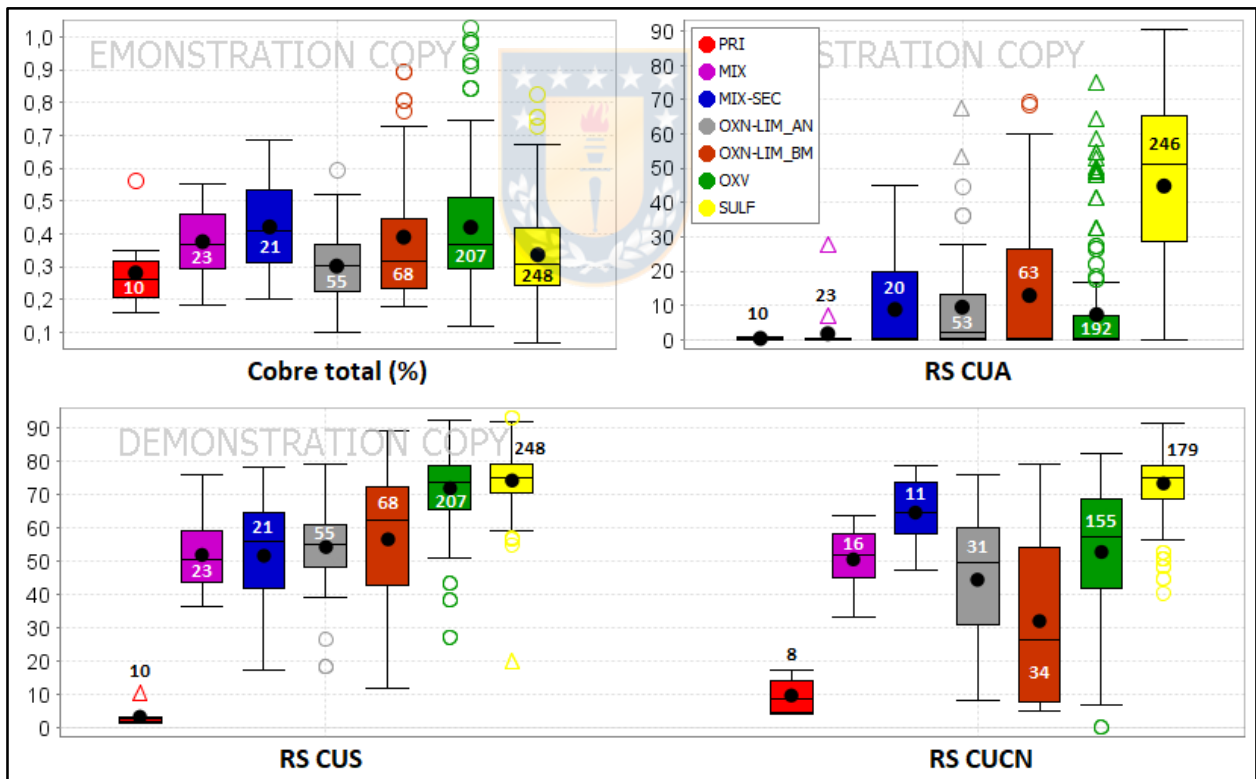


Figura 7.41: Resultados de solubilidad de muestras analizadas mediante extracción parcial. Cobre total, razón de solubilidad en agua (RS CUA), en ácido sulfúrico (RS CUS) y en NaCN (RS CUCN).

En los resultados de cobre total se identifican las unidades de mayor ley, OXV y MIX-SEC, sin embargo, a diferencia de los análisis anteriores, no se observa una diferencia tan notoria, mostrando

resultados por unidad similares a los observados con los análisis químicos de sondajes. Una importante diferencia de la unidad SULF se evidencia en los valores de RS en agua (RS CUA), con altos porcentajes al predominar en estos tramos los sulfatos de hierro con cobre, principalmente szomolnokita, que a diferencia de todas las otras menas del yacimiento, son muy solubles en agua. La existencia de valores altos en las unidades OXN-LIM, de ambos sectores, y MIX-SEC, indica que los sulfatos de hierro con cobre también se encuentran en estas unidades, tal como ha sido registrado por mapeo, aunque con una importancia menor. Los contenidos en la unidad OXV son bajos, y en las unidades PRI y MIX, no están presentes.

La RS en ácido sulfúrico (RS CUS), muestra mayores valores de solubilidad para las unidades OXV y SUF, al igual que en los resultados anteriores, pero para las unidades OXN-LIM, de ambos sectores, los valores de RS no son tan bajos como se observaba en los análisis secuenciales, marcando así una diferencia importante. La unidad PRI, no representada previamente, muestra una RS CUS muy baja, tal como se espera para las mineralogías de esta unidad, correspondientes a sulfuros primarios insolubles en ácido sulfúrico.

Al comparar los valores de RS CUS con la RS en NaCN (RS CUCN), la unidad SULF se mantiene, al igual que las unidades MIX y MIX-SEC, las cuales presentan un menor número de datos de RS CUCN que de RS CUS, lo que podría asociarse a pequeñas variaciones, pero los rangos de valores no cambian. La unidad PRI, aumenta sus valores de solubilidad en NaCN, lo que se explicaría por la presencia de bornita, insoluble en ácido sulfúrico pero soluble en NaCN. Por otra parte, las unidades OXN-LIM, de ambos sectores, y OXV, disminuyen sus valores en NaCN, indicando la presencia de crisocola, soluble en ácido sulfúrico y con una solubilidad mucho menor (11,8%) en soluciones cianuradas (Marsden y House, 1992).

7.3.2. MINERALOGÍA

7.3.2.1. TESCOAN

Para validar las unidades definidas, se grafica la mineralogía promedio por unidad de 170 muestras con mineralogía TESCOAN, de las cuales 75 pertenecen a la unidad SULF, 60 a OXV, 9 a OXN-LIM_AN, 12 a OXN-LIM_BM, 4 a MIX-SEC, 3 a MIX y 7 a PRI, mostrando los resultados en la Figura 7.42.

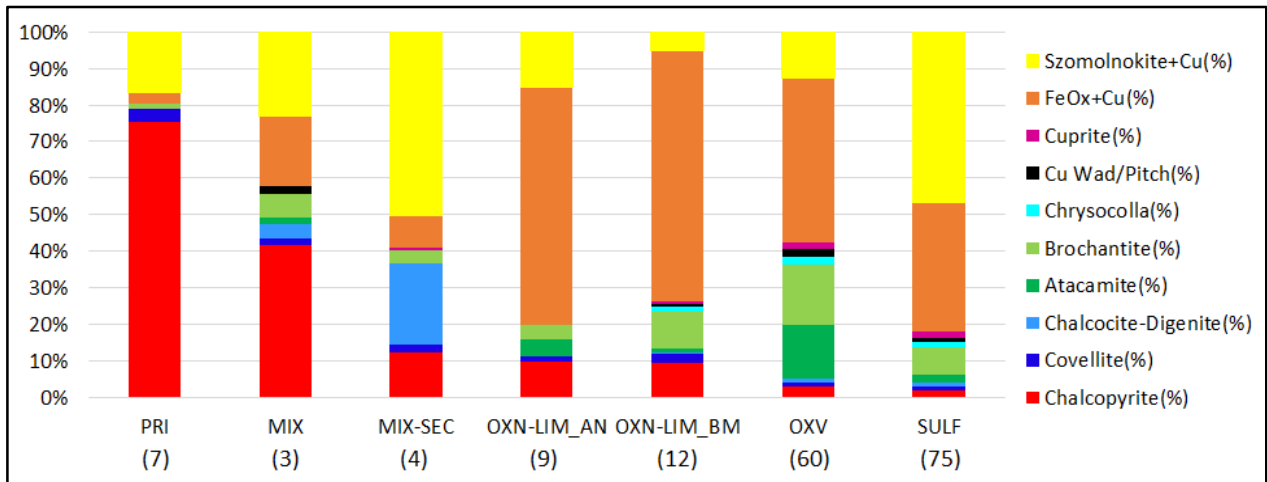


Figura 7.42: Mineralogía TESCOAN promedio por unidad. Entre paréntesis se indica número de muestras por unidad.

Como puede observarse, la mineralogía TESCOAN permite diferenciar bien las unidades guardando concordancia con las asociaciones que las caracterizan. La unidad PRI contiene un porcentaje relativo de calcopirita mayor al 70%, lo que si bien es menor al porcentaje que define la unidad ($\geq 90\%$ relativo de calcopirita en el mapeo), es bastante alto como para considerar aquellos tramos como zona primaria, y mucho más alto que los valores de las demás unidades, marcando una diferencia. La unidad MIX presenta porcentajes de sulfuros similares a los de óxidos, y teniendo calcopirita como sulfuro dominante, de tal manera que también es consistente con los criterios de definición de esta unidad. Para el caso de la unidad MIX-SEC, ésta contiene un 35% de sulfuros con respecto a 65% de óxidos, teniendo características similares a la unidad MIX, con mayor contenido de óxidos, pero cumple con la particularidad que la define, de tener sobre 10% de sulfuros secundarios, en este caso con un porcentaje mayor al 20%.

Las unidades OXN-LIM de ambos sectores contienen las asociaciones características de definición con un alto porcentaje relativo de limonitas con cobre, cercano a un 70%, aunque las diferencias por sectores son contrarias a lo observado en el mapeo, con mayor contenido relativo de OXV en Buey Muerto que en Antucoya, y szomolnokita con cobre más abundante en sector Antucoya. La unidad OXV también cumple con los criterios de definición, con porcentaje relativo de óxidos verdes mayor al de sulfatos, sin embargo, la proporción de óxidos verdes es más baja de lo esperado, lo que podría deberse al alto porcentaje de limonitas con cobre, mena que tiene una ley muy baja, por lo tanto de bajo impacto en la ley y RS que caracterizan a los tramos de esta unidad.

Finalmente, la unidad SULF se ajusta perfectamente a los criterios de definición, con contenido de

sulfatos de hierro con cobre mayor al de óxidos verdes, y porcentaje relativo de szomolnokita con cobre cercano al 50%.

7.3.2.2. NIR

Para evaluar que las zonas de alteración inferidas en base a los minerales de alteración presentes según el mapeo geológico corresponden realmente a lo determinado, se comparan las proporciones de minerales de alteración de mapeo, con los minerales de alteración determinados con NIR.

En la Figura 7.43, se muestra la mineralogía de alteración mapeada para cada unidad en porcentajes relativos, aquí se observa, tal como se mencionó en la caracterización previa, que las unidades PRI y MIX se asocian a la zona potásica, con altos porcentajes de clorita, además de biotita y feldespato (ausentes en todas las demás unidades), y bajo porcentaje de cuarzo-sericita y arcillas. Las unidades OXV y OXN-LIM por su parte, presentan rangos amplios de minerales de alteración desde clorítico a sericítico, indicando una zona de alteración sericítica-clorítica, y la unidad MIX-SEC con rangos más acotados pero también en esta zona, y finalmente, la unidad SULF, claramente restringida a una zona de alteración cuarzo-sericítica fuerte, con bajo porcentaje de clorita y alto de arcillas.

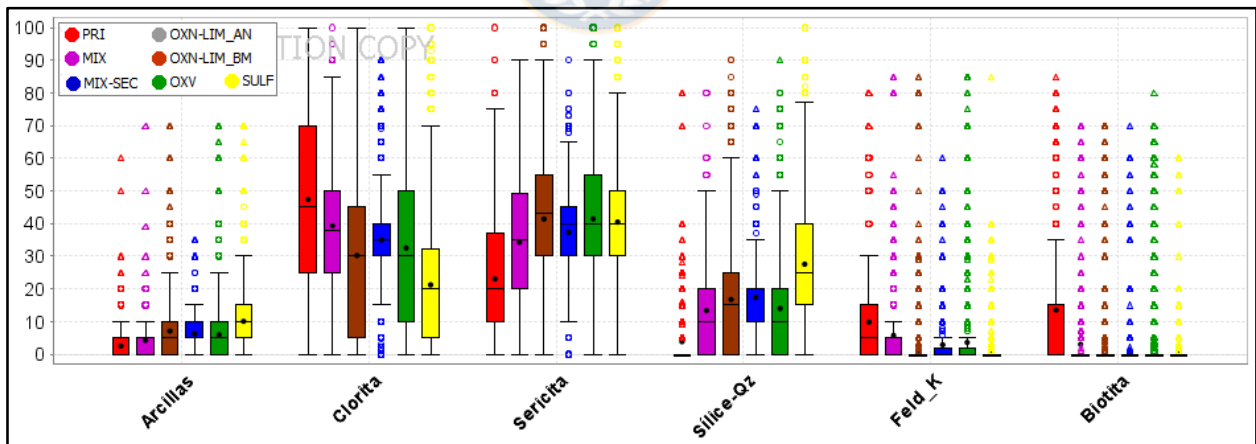


Figura 7.43: Mineralogía de alteración mapeada por unidad.

Al contrastar estos resultados con mineralogía NIR (Figura 7.44), se validan las observaciones previas, a excepción del comportamiento de arcillas, siendo predominante en unidad OXN-LIM, y no tan abundante en unidad SULF, a diferencia de los resultados de mapeo. Esto podría interpretarse como una identificación errónea de las arcillas en el mapeo, ya que las zonas de

sulfatos de hierro con cobre suelen presentar características de alteración muy intensa, con roca muy disgregada, lo que podría estar confundiendo con la presencia de arcillas, o bien, que parte de los mismos sulfatos de hierro estén siendo mapeados erróneamente como arcillas.

Otros minerales no registrados en mapeo, pero si mediante la determinación de minerales con NIR, corresponden a la calcita, szomolnokita y yeso, los cuales muestran también un comportamiento consistente con lo anterior. La calcita abunda en unidades con alteración potásica y se encuentra en porcentajes muy bajos en la unidad SULF de alteración cuarzo-sericítica fuerte, la szomolnokita total es muy abundante en la unidad SULF y no se encuentra en unidades PRI y MIX, asociadas a zonas potásicas, y el yeso, abunda también en la unidad SULF y en OXN-LIM_BM, que también presenta sulfatos como mena relevante, teniendo coherencia la presencia de yeso.

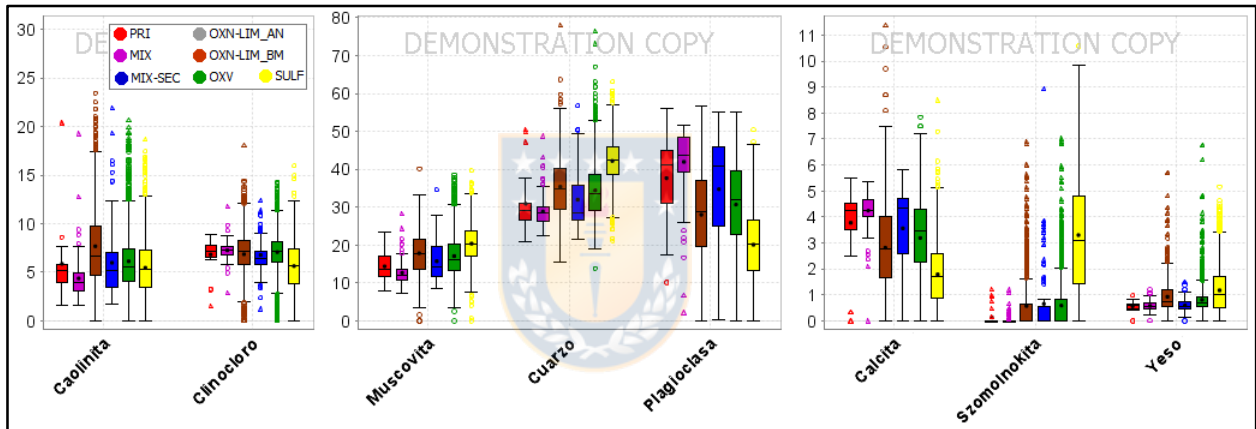


Figura 7.44: Mineralogía NIR por unidad.

7.4. RESPUESTA METALÚRGICA EN PRUEBAS ISO PH

Se analizan los resultados de extracción de cobre de 832 pruebas iso pH, de las cuales 639 fueron sometidas a prueba de lixiviación ácida a pH 1,5, y 193 a lixiviación ácida a pH 1,5 con adición de ión férrico a la solución lixivante. Cabe destacar que estas muestras corresponden a los mismos tramos con análisis de extracción parcial y secuencial, ya asignados a una unidad, y cuyos resultados de solubilidad fueron revisados anteriormente. En la Figura 7.45 se grafican los resultados de las pruebas de extracción por unidad.

Las unidades con mayor extracción en prueba iso pH 1,5 sin férrico (Figura 7.45A) corresponden a SULF y OXV, con valores mayores para SULF pero muy cercanos entre sí, seguidos de las

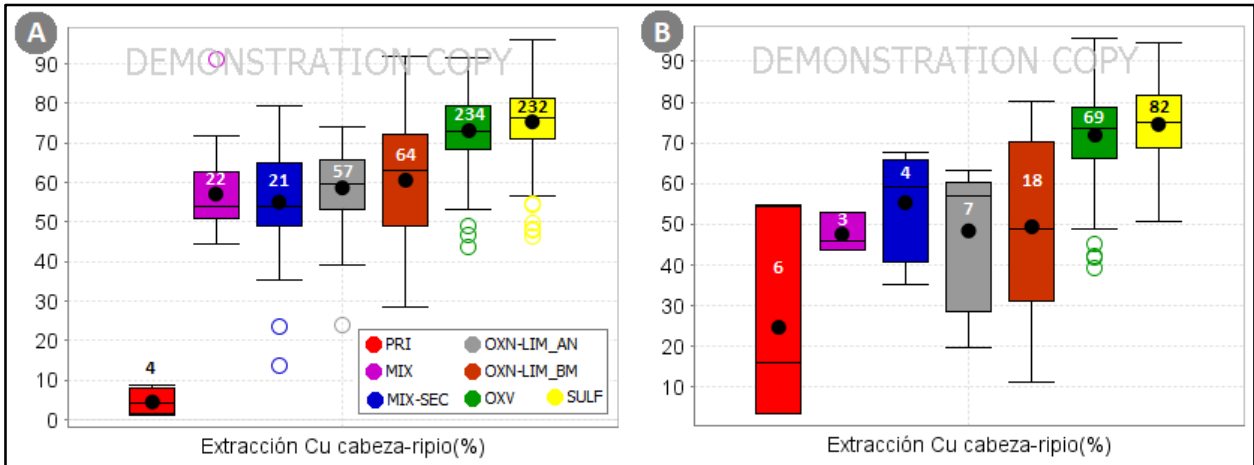


Figura 7.45: Resultados de pruebas de extracción de cobre. A. Pruebas iso pH 1,5 sin ión férrico; B. Pruebas iso pH 1,5 con ión férrico.

unidades OXN-LIM de ambos sectores (BM mayor extracción que AN) y las unidades mixtas (MIX y MIX-SEC) con valores un poco más bajos. La unidad PRI destaca por una extracción muy baja, separándose considerablemente de las demás unidades. Al revisar los resultados de extracción en prueba iso pH con ión férrico (Figura 7.45B), la mayoría de las unidades mantienen sus rangos, destacando un aumento de la extracción en algunas muestras de la unidad PRI, lo que indica la presencia de calcosina. La unidad MIX-SEC muestra un leve aumento también, aunque menor a lo esperado, y las unidades OXN-LIM, de ambos sectores, muestran disminución en la extracción de cobre. Cabe destacar que las muestras sometidas a pruebas iso pH sin férrico son diferentes a las analizadas con pruebas iso pH con férrico, sin embargo, se está evaluando el comportamiento por unidad. Es por esto que el número de muestras en cada caso varía.

Para observar de mejor forma el comportamiento de las unidades en las pruebas iso pH, se grafica la razón entre la extracción de cobre obtenida y la RS CUS de las muestras de extracción parcial, tomando este valor como una referencia del máximo porcentaje de cobre soluble que se puede esperar recuperar en la prueba de extracción. Los resultados se grafican en la Figura 7.46 para ambas pruebas (con y sin ión férrico), en donde destaca el rango de valores obtenidos, con la mayoría de los datos sobre 100%, es decir, que el cobre extraído en la prueba iso pH, en la mayoría de los casos supera al cobre soluble obtenido en los *test* de solubilidad.

El comportamiento de las unidades en las pruebas de extracción con respecto a su solubilidad es similar para todas (Figura 7.46A), es decir, que las unidades de mayor solubilidad, son también las

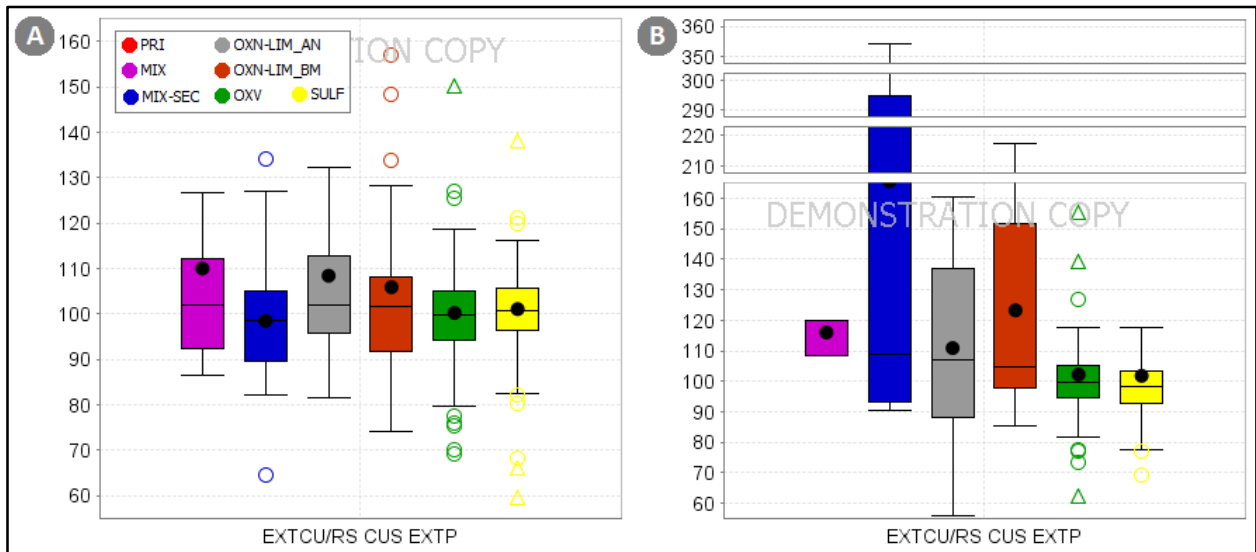


Figura 7.46: Razón entre extracción de cobre y RS en ácido sulfúrico. A. Pruebas iso pH 1,5 sin ión férrico; B. Pruebas iso pH 1,5 con ión férrico.

que tienen una mayor extracción de cobre, en este caso las unidades OXV y SULF, sin embargo, el porcentaje que recuperan con respecto a su RS, es equivalente al que recuperan las unidades de menor solubilidad, como OXN-LIM, MIX y MIX-SEC. Por lo tanto, se podría interpretar que para el yacimiento la RS en ácido sulfúrico es el principal control de la extracción de cobre.

Al comparar con los resultados de las pruebas iso pH con ión férrico (Figura 7.46B) se evidencia un fuerte aumento en los valores de extracción con respecto a RS CUS de la unidad MIX-SEC, indicando la presencia de abundante calcosina en esta unidad. Las unidades OXN-LIM_AN y OXN-LIM_BM también muestran aumento implicando la presencia de calcosina, aunque en menor abundancia, lo que podría indicar una confusión de sulfuros secundarios con óxidos negros de cobre en el mapeo.

Se debe mencionar que en la Figura 7.46, se omite la unidad PRI por tener valores de extracción de cobre/RS CUS demasiado altos como para poder ser visualizados en conjunto a las otras unidades. De 16 muestras pertenecientes a la unidad, 6 se omitieron por tener valores de extracción de cobre negativos, y los resultados de las 10 muestras restantes se grafican en la Figura 7.47. Se observan altos porcentajes de extracción con respecto a su RS, con valores aún más altos para la extracción en pruebas con férrico, lo que podría indicar presencia de calcopirita, sin embargo, esto podría estar asociado también a un error por las bajas leyes de estas muestras, que conllevan a valores aún más bajos de cobre soluble en ácido sulfúrico (todos bajo 0,1%) y baja RS (menores a

10%), por lo que al hacer la razón el error se multiplica.

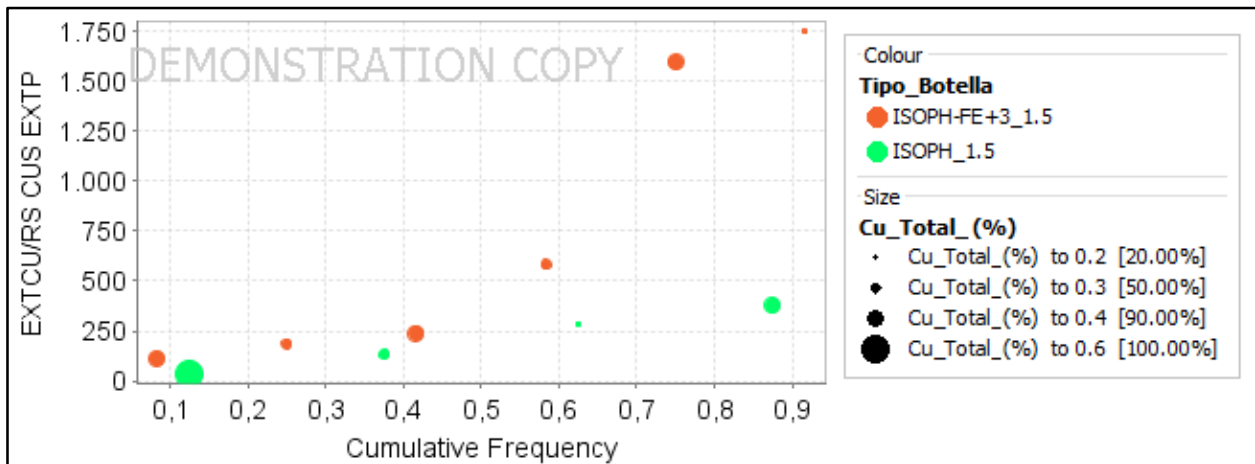


Figura 7.47: Razón de extracción de cobre / RS CUS de la unidad PRI. Valores separados por color según la prueba aplicada (iso pH 1,5 con o sin férrico) e indicando con el tamaño el contenido de cobre.



8. MODELAMIENTO DE UNIDADES

Para realizar el modelo geológico se trabaja con el *software* de modelamiento implícito Leapfrog Geo 5.0.1. El método de modelado implícito fue diseñado para crear modelos geológicos directamente de los datos de entrada, en lugar de digitalizar manualmente cada nodo de triangulación (Cowan y otros, 2003), de manera que puede ser manipulado y refinado, pero es esencialmente generado por algoritmos informáticos a partir de una combinación entre datos medidos e interpretación del usuario. En particular, el *software* utilizado permite que el geólogo defina la cronología de las superficies para determinar la relación de corte entre las unidades, los tipos de superficies a modelar de acuerdo al tipo de evento geológico que la controla, superficies y tendencias estructurales que definan direcciones de deformación, entre los aspectos más relevantes, permitiendo además, ajustes manuales a las superficies de contacto mediante corrección o ajuste de datos, o utilizando polilíneas.

La información utilizada para la construcción del modelo corresponde a la base de datos de sondajes ya codificada con las unidades correspondientes, utilizando el árbol de decisión explicado en los capítulos anteriores, pero sin aplicar el filtro que excluye los datos con cobre total menor a 0,1%, para no perder continuidad en el modelamiento de los cuerpos. Los datos que puedan presentar error en RS, y por ende asignación de unidad, derivado de la baja ley a causa de no aplicar este filtro, se revisarán manualmente dentro del mismo *software* al analizar las inconsistencias espaciales (explicado en detalle en la Sección 8.2).

Además de la información de unidades, se cuenta con las superficies modeladas de fallas identificadas en el Modelo Estructural del año 2018 de la empresa, los dominios estructurales utilizados en Antucoya para modelamiento, la topografía actual (septiembre de 2020) y original del área y los sólidos del modelo geológico 2019.

En las secciones siguientes, se describen secuencialmente las etapas de la elaboración del modelo tridimensional.

8.1. CONDICIONES DE BORDE

El primer paso para la construcción del modelo es definir los límites de éste. Para esto se ajusta una “caja” al área del yacimiento, que corresponde a la zona con información de sondajes,

resultando en un volumen definido por las coordenadas indicadas en la Tabla 8.1, cuyo límite superior corresponde a la superficie topográfica original. De igual forma se establece la resolución del modelo en 50 m, lo que se traduce en una resolución de 25 m para cada una de las superficies y sólidos generados.

Tabla 8.1: Coordenadas de los límites del modelo.
Sistema de coordenadas PSAD56.

Coordenada	Mínimo	Máximo
Este (m)	408.480	410.850
Norte (m)	7.495.880	7.498.000
Elevación (m s.n.m.)	792,6	1877,4

8.2. SUPERFICIES DE CONTACTO Y CRONOLOGÍA DE SUPERFICIES

Para comenzar a trazar las superficies de contacto entre unidades, se define como tipo de contacto a utilizar “intrusión” (dentro de las opciones del *software*), debido a que es el contacto que más se asemeja a la forma de los cuerpos mineralizados en la naturaleza y cómo éstos se relacionan entre sí. Las superficies se van construyendo de forma que se considera una unidad “interna”, y el contacto a trazar es entre dicha unidad y todas las demás, con la opción de ignorar unidades que no tengan influencia en la superficie de la unidad interna, como es el caso de las unidades más jóvenes que la unidad interna.

En la ventana de *Surface Chronology* dentro de Leapfrog, las superficies de contacto modeladas son ordenadas en orden cronológico, desde la más joven a la más antigua, lo que determina cómo el volumen dentro de la caja del modelo se divide en las unidades geológicas, es decir, como se cortan los contactos entre sí.

En este caso, al modelar unidades de mineralización utilizando como tipo de contacto “intrusión”, la temporalidad que se define en el *software* no siempre corresponde a la temporalidad real de formación de las unidades, sino que se ordenan pensando exclusivamente en el resultado, entendiendo cómo Leapfrog genera los sólidos.

En este caso, la temporalidad de superficies definida desde más joven a más antigua es la siguiente: ROCA FRESCA, PRI, MIX-SEC, MIX, SULF, OXV – OXN-LIM. La primera superficie es la de ROCA FRESCA, ya que es una unidad que corta a todas las demás unidades, por lo que el software lo entiende como una unidad más joven. Algo similar ocurre con la superficie PRI, ya que, si bien

corresponde a la unidad precursora de todas las demás, se debe modelar como si las cortara, de lo contrario, las unidades posteriores borrarían la existencia del cuerpo primario como se observa en el ejemplo de la Figura 8.1.

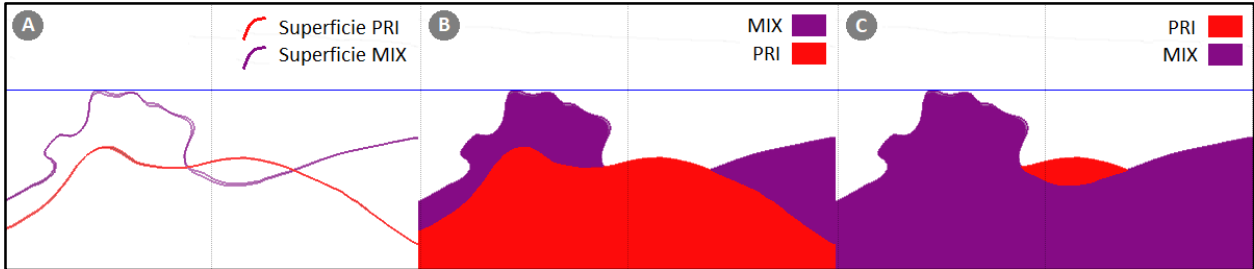


Figura 8.1: Resultado de modelamiento según temporalidad de intrusión definida. A. Superficies modeladas; B. Sólidos generados para PRI más joven que MIX; C. Sólidos generados para MIX más joven que PRI.

Una vez creadas las superficies, se debe revisar su coherencia y corregir las zonas en donde los contactos resulten con una forma que se aleja de la realidad, a causa de un error, o bien porque corresponden a cuerpos separados por una característica geológica identificable. Para esta revisión se utiliza la metodología que se resume en la Figura 8.2, en donde se comienza por identificar posibles controles estructurales que definan cuerpos separados de las superficies de base, que deben ser recodificados para ser modelados como una superficie aparte (aunque pertenezcan a la misma unidad). Algo similar se busca con el paso siguiente, en donde se revisan controles litológicos de cuerpos.

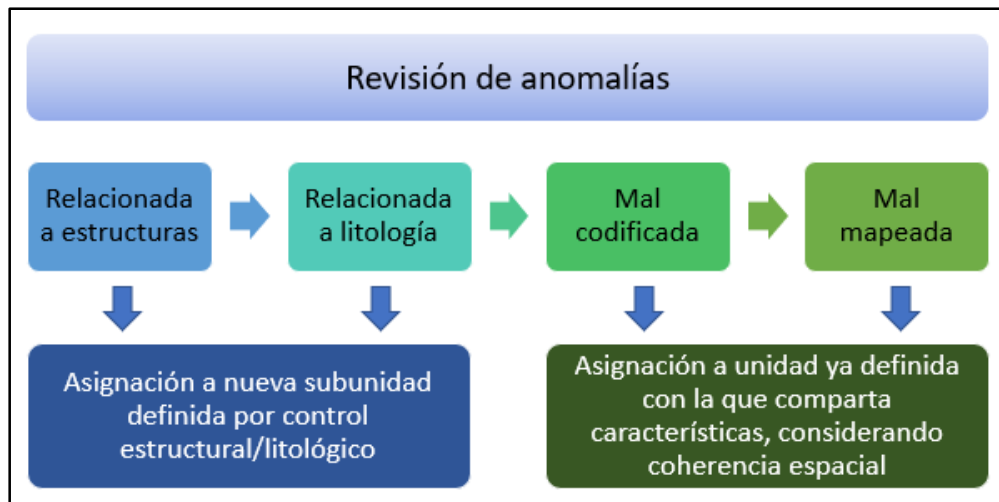


Figura 8.2: Metodología de revisión de anomalías espaciales.

Luego de verificar que las zonas anómalas identificadas no corresponden a cuerpos controlados

estructural o litológicamente, se comienzan a revisar los datos de los tramos que provocan la forma de aquella superficie, buscando identificar si existe algún error en la asignación de la unidad, ya sea por la codificación, o bien por un error de mapeo. Las zonas en donde la codificación no se ajusta a la unidad correspondiente, se dan esencialmente por corresponder a tramos “límite” entre una unidad y otra, en donde el criterio espacial y la consideración de unidades predominantes adyacentes es determinante para una correcta asignación, o bien por corresponder a datos con cobre total menor a 0,1, que pueden asociarse a altos errores de RS, causando una asignación errónea, y en donde se debe revisar la mineralogía mapeada y todos los datos adicionales que permitan definir la unidad correcta, incluyendo además el criterio espacial.

Para los tramos en donde no se verifique ninguna de las condiciones anteriores, y aun así sean responsables de zonas de contacto anómalas, se deberá considerar un posible error de mapeo, que se verificará principalmente por la consistencia entre datos químicos y mineralogía mapeada. Otro dato importante para tener en consideración es la revisión del número de tramos responsables en una zona de superficie anómala, ya que la presencia de muchos tramos involucrados apoya la idea de que se trate de un cuerpo independiente, mientras que el encontrar un único tramo anómalo sustenta la posibilidad de que se trate de un error de codificación o mapeo.

Teniendo todos estos aspectos en mente, se comienzan a modelar las superficies de contacto.

8.2.1. SUPERFICIE ROCA FRESCA

Las zonas en donde no hay información de sondajes, la extrapolación de la información posiblemente sobrestime la extensión de los cuerpos mineralizados, por lo que para evitar esto, se debe delimitar la zona que se considere mineralizada separándola de la roca fresca. Esto se logra modelando una superficie tipo intrusivo a partir de polilíneas trazadas manualmente, en donde la roca fresca corresponderá a la litología externa de la superficie, y la superficie interna serán todas las unidades a modelar. El aspecto de la superficie roca fresca se muestra en la Figura 8.3.

8.2.2. SUPERFICIE DE CONTACTO PRI

Esta superficie corresponde al contacto entre unidad PRI y todas las demás unidades, lo cual da como resultado una superficie subhorizontal, en donde se identifican varias zonas anómalas modeladas como esferas flotando en el espacio que pueden observarse en la Figura 8.4A.

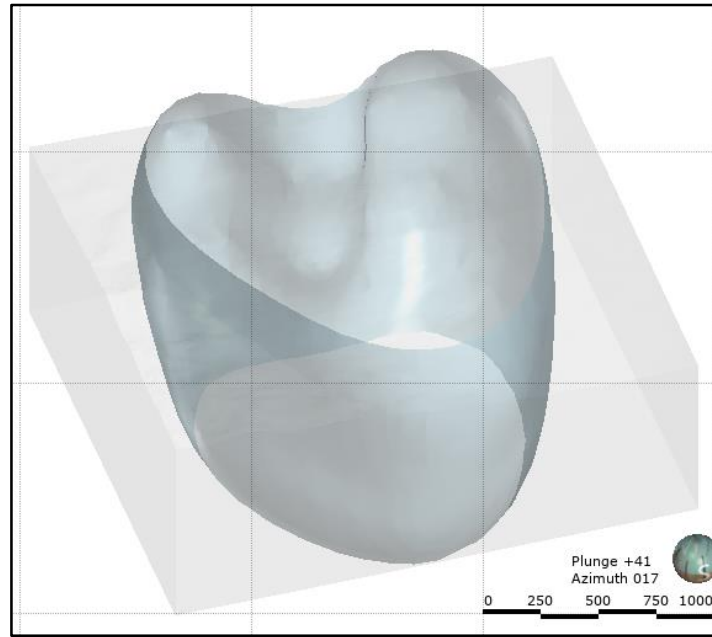


Figura 8.3: Superficie ROCA FRESCA.

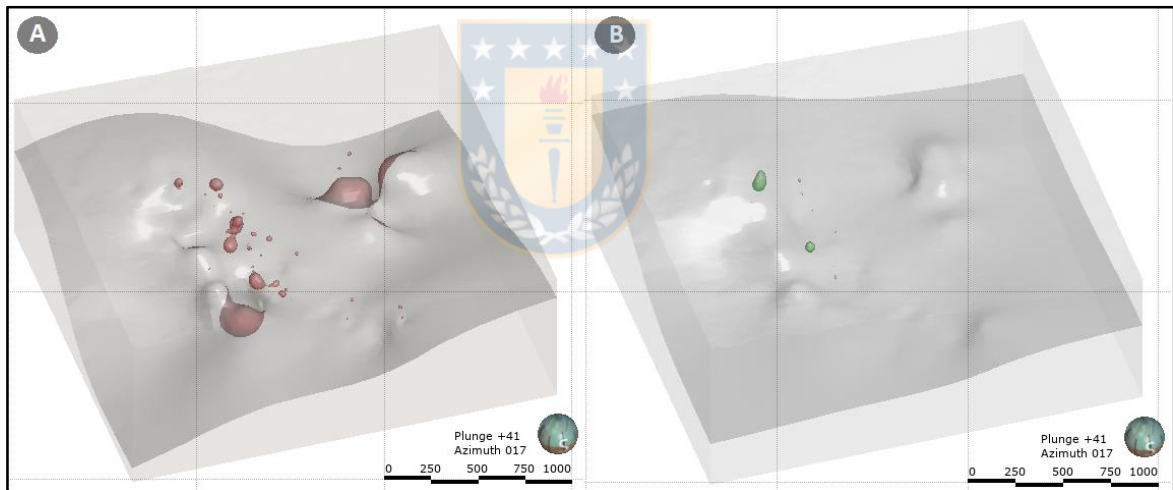


Figura 8.4: Superficie PRI. A. Superficie original; B. Superficie corregida. Cuerpos verdes corresponden a PRI_PT1 que serán omitidos en la generación de sólidos.

Realizando la revisión ya descrita, se encuentra que las anomalías de la zona E están asociadas a errores de codificación, por bajo contenido de cobre total, y de mapeo, al encontrar zonas puntuales con tramos con calcopirita aislados, a alturas no razonables para la presencia de este mineral, y no consistente con mineralogías adyacentes, razón por la cual son reasignados. Para el caso de las anomalías en la zona W, en muchas se repite la situación anterior, sin embargo, existen ciertos tramos asociados a la unidad litológica PT1, que corresponden a cuerpo tardíos filoneanos con orientación NW-SE, caracterizada por una baja ley (bajo 0,1% de cobre). Por esta razón, al

encontrar todas estas características en varios de los tramos responsables de anomalías, éstos son asignados a una nueva subunidad denominada PRI_PTI, sin embargo, esta subunidad será omitida en este modelo, debido a que dichos cuerpos tienen gran complejidad y ya se encuentran bien estudiados y delimitados en el modelo geológico, ya que corresponde a una unidad litológica más que mineral. Por lo demás, al ser posteriores, no afectan el modelamiento de los demás contactos entre unidades. La superficie PRI resultante luego de las correcciones se observa en la Figura 8.4B.

8.2.3. SUPERFICIE DE CONTACTO MIX-SEC

Esta superficie corresponde al contacto entre la unidad MIX-SEC y todas las demás unidades, pero ignorando la subunidad PRI_PTI que no será modelada, y la unidad PRI ya modelada.

En el sector BM esta superficie se encuentra de manera local como un contacto subhorizontal discontinuo sobre la unidad PRI, en donde hay solamente algunas zonas anómalas muy pequeñas ocasionadas por escasos tramos aislados con mapeo de sulfuros secundarios (Figura 8.5A). En la mayoría de los casos estos tramos tienen una solubilidad muy alta y un porcentaje relativo de sulfuros secundarios levemente mayor a 10% con un contenido muy alto de sulfatos de hierro con cobre y/o óxidos verdes, y se encuentran además rodeados por las unidades SULF y OXV, de manera que son recodificados de acuerdo a su óxido dominante.

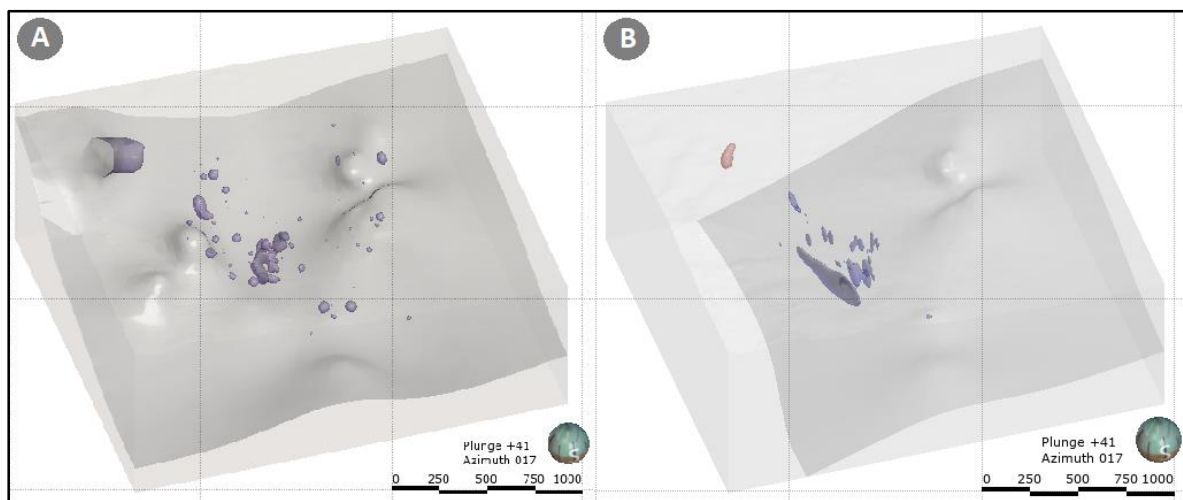


Figura 8.5: Superficie MIX-SEC. A. Superficie original; B. Superficie corregida. Cuerpo rojo corresponde a MIX-SEC_PTI que será omitido en la generación de sólidos.

En el sector AN, sin embargo, se identifica un mayor número de cuerpos anómalos muy irregulares y discontinuos (Figura 8.5A), pero con gran número de tramos involucrados, por lo que se evalúa

un control estructural para los cuerpos secundarios en esta zona, lo que se verifica al comparar con las estructuras del modelo estructural 2018. Las principales estructuras que controlan el enriquecimiento secundario corresponden a las fallas Espejo, Reflejo y Central 2, con el mayor número de cuerpos en la zona en donde las 3 estructuras convergen (Figura 8.6A y 8.6B). De esta forma se definen las nuevas subunidades MIX-SEC_ESP, MIX-SEC-REF y MIX-SEC_FC2 cada una con la tendencia de la falla que las controla, tendencia que se mantendrá independiente de la del dominio estructural en el que se encuentren. Otra estructura que controla la formación de cuerpos de sulfuros secundarios es la falla Contradiagonal, con un pequeño cuerpo en la zona norte del sector Antucoya, que corresponde a una falla conjugada de la falla Diagonal que delimita un dominio estructural del modelo (Figura 8.6C).

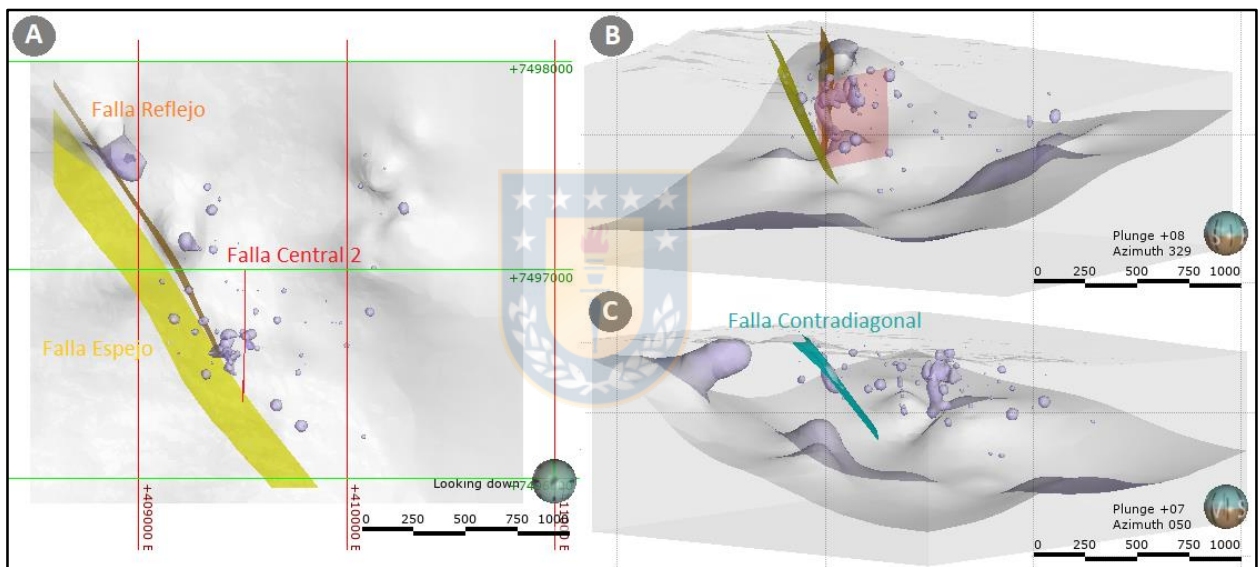


Figura 8.6: Cuerpos MIX-SEC asociados a rasgos estructurales. A. Vista en planta de cuerpos de MIX-SEC asociados a fallas Espejo, Reflejo y Central 2; B. Vista oblicua de A; C. Vista oblicua de cuerpos de MIX-SEC asociados a Falla Contradiagonal.

También es posible identificar tramos de la unidad MIX-SEC superficiales y de muy baja ley en la unidad litológica PTI, muchas veces asociados espacialmente a la subunidad PRI_PTI, pero al igual que con dicha subunidad, será omitido del modelamiento. De esta forma, la superficie recodificada queda como se muestra en la Figura 8.5B.

8.2.4. SUPERFICIE DE CONTACTO MIX

La superficie de la unidad MIX se traza como el contacto entre dicha unidad y todas las anteriores, a excepción de las unidades PRI y MIX-SEC ya modeladas, y de las subunidades PRI_PTI y MIX-

SEC_PTI, que no serán consideradas en este modelo.

Al igual que en el caso anterior se identifican zonas anómalas (Figura 8.7A), las cuales se asocian principalmente a errores derivados de la codificación para tramos que se encuentran cerca del límite de 60% de RS. Es decir, tramos con un valor levemente menor o mayor a 60% de RS, asignados a las unidades MIX y OXV o SULF respectivamente. Para el primer caso, al encontrarse estos tramos en zonas superficiales y rodeados de OXV o SULF, se recodifican según su mena soluble dominante, y para el segundo caso, que de igual forma corresponde a tramos rodeados de unidad MIX y que además tienen en muchas ocasiones porcentajes importantes de calcopirita mapeada, son recodificados a MIX.

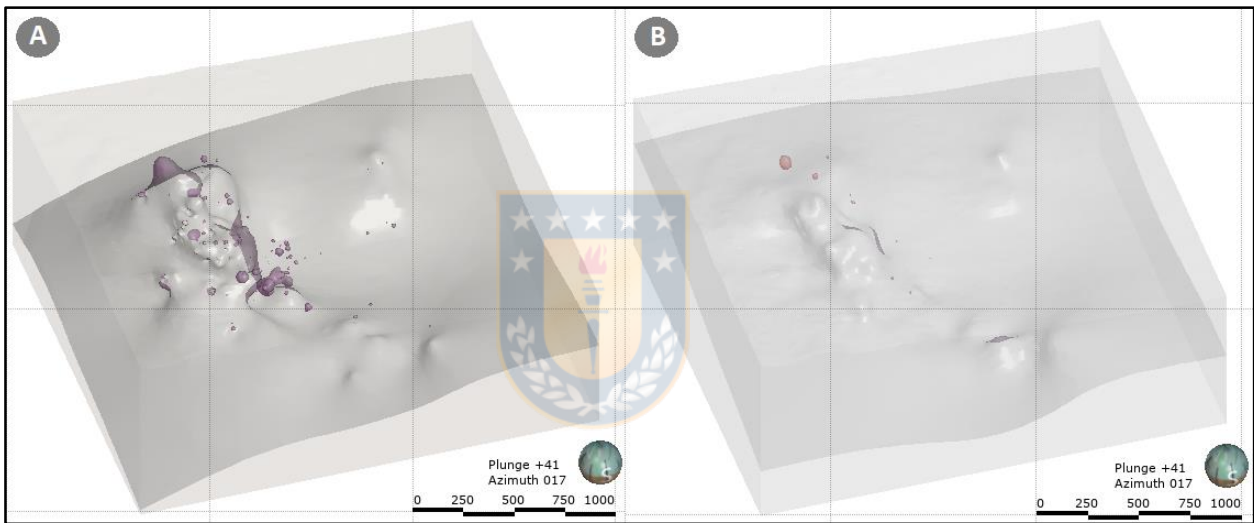


Figura 8.7: Superficie MIX. A. Superficie original; B. Superficie corregida. Cuerpo rojo corresponde a MIX_PTI que será omitido en la generación de sólidos.

Otra anomalía frecuente corresponde a tramos codificados como OXN-LIM en zonas profundas con solubilidad bajo 60%, rodeados de tramos de las unidades MIX y/o PRI, cuya mineralogía mapeada corresponde a un 100% de óxidos verdes, sin embargo, por la baja solubilidad esto es poco probable, y por la distribución espacial y unidades adyacentes, posiblemente la mena de baja solubilidad que causa esos valores de RS corresponda a calcopirita, por lo que son recodificados a MIX.

Cabe mencionar, que al igual que con la unidad anterior, se identifican escasos tramos asociados a la unidad litológica PTI, adyacentes a los tramos asignados a PRI_PTI y MIX-SEC_PTI, que son recodificados como MIX_PTI, pero que al igual que con dichas subunidades, son omitidos del

modelamiento. La superficie MIX resultante luego de las correcciones se observa en la Figura 8.7B.

8.2.5. SUPERFICIE DE CONTACTO SULF

Para el modelamiento de las superficies de contacto entre las últimas unidades, se agrupan las unidades OXV y OXN-LIM en la unidad OX_GROUP, y la superficie de la unidad SULF se modela como el contacto tipo intrusivo entre SULF y OX_GROUP, ignorando todas las unidades ya modeladas. De esta forma se genera una superficie que en su interior tiene la unidad SULF como la litología más joven que “corta” a las del lado externo en donde se encuentran las unidades OXV y OXN-LIM que serán separadas posteriormente (Figura 8.8A).

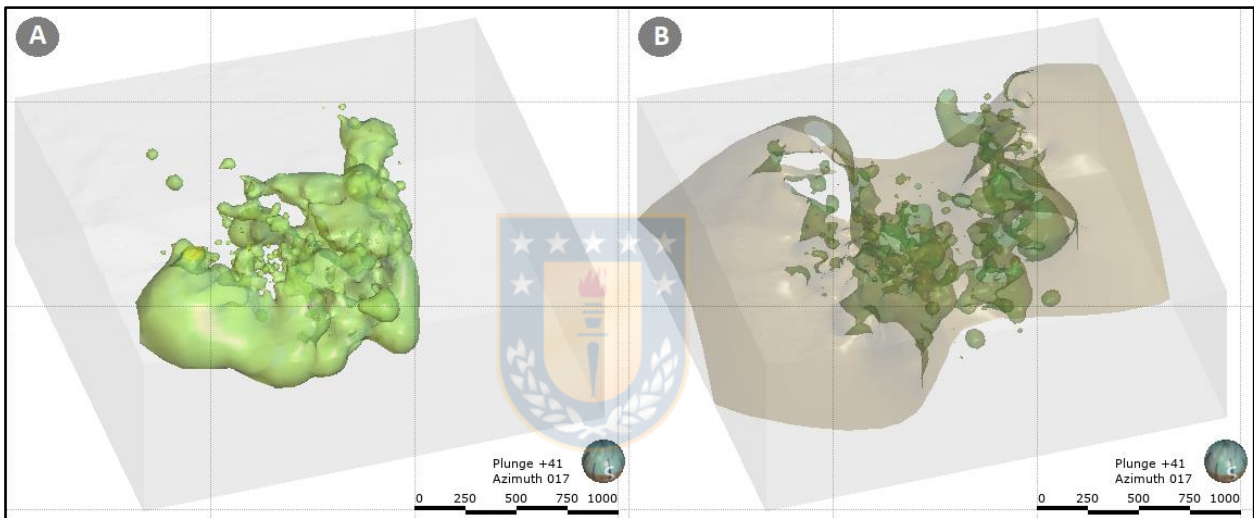


Figura 8.8: Superficies zona oxidada. A. Superficie de contacto SULF – OX_GROUP; B. Superficie de contacto OXV – OXN-LIM.

Los cuerpos de óxidos tienen una forma mucho más irregular que los cuerpos de sulfuros, por lo que es más difícil encontrar criterios suficientes para considerar una zona como anómala. Además, muchos tramos ya fueron recodificados por anomalías identificadas con la revisión de las superficies anteriores, por lo que en este caso no se realizan mayores modificaciones.

8.2.6. SUPERFICIE DE CONTACTO OXV - OXN-LIM

Finalmente, las superficies de las últimas unidades se trazan como el contacto entre ellas, OXV y OXN-LIM, e ignorando todas las demás unidades. OXV es la unidad interna de esta superficie, de manera que la unidad OXN-LIM quedará como unidad de fondo (Figura 8.8B).

8.3. ESTRUCTURAS Y DOMINIOS ESTRUCTURALES

Para la definición de dominios estructurales en Antucoya se considera la información proporcionada por el Modelo Estructural 2018 (Figura 8.9A), seleccionando las estructuras principales y mayores como límites de dominios. Las estructuras menores por su parte, se utilizan como apoyo en la definición del patrón estructural dentro de cada dominio, el cual se describe por un *dip*, un *dip azimuth* y un *pitch*, y cuantificando el grado de deformación según los tamaños relativos de los ejes del elipsoide de deformación, de forma que se favorecerá la continuidad en la dirección del eje mayor del elipsoide (dirección dada por el *pitch*), sobre los demás ejes, intermedio (en dirección perpendicular al *pitch* en el plano del *dip*) y mínimo (perpendicular a los otros dos ejes). Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 8.10.

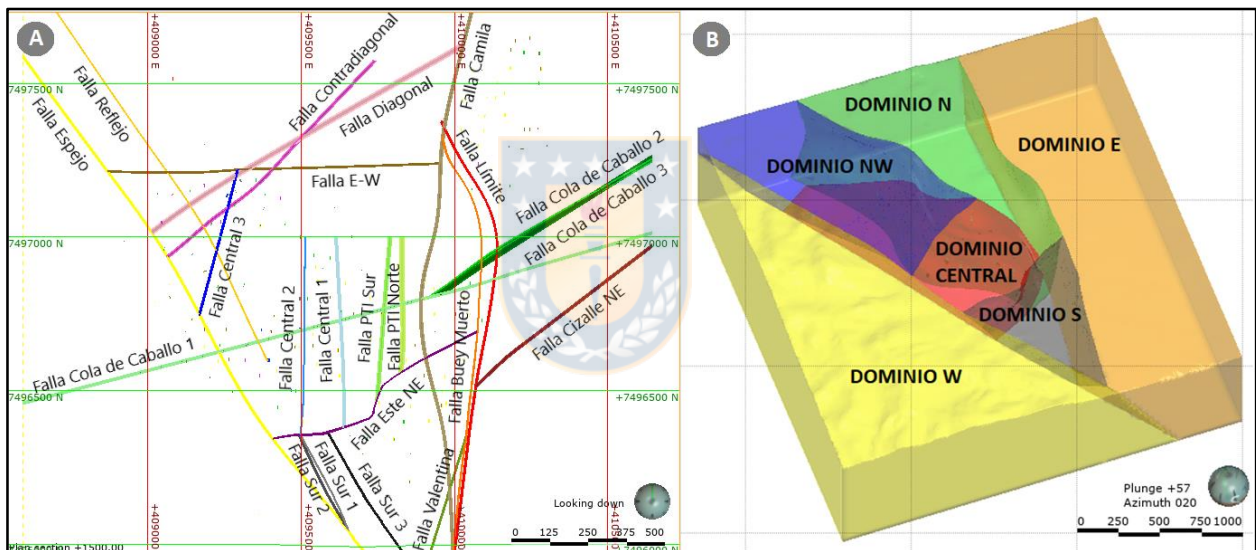


Figura 8.9: Estructuras y dominios estructurales del yacimiento. A. Fallas del Modelo Estructural 2018 a la cota 1500; B. Dominios estructurales de Antucoya.

En la Figura 8.9B se muestran los dominios a trabajar y se describen en las secciones siguientes, las características de cada uno de ellos. Cabe destacar que los sólidos de la unidad PRI y de la ROCA FRESCA se modelarán bajo condiciones isométricas (todos los ejes del elipsoide iguales a 1), porque son cuerpos continuos en todos los dominios, que no se ven afectados mayormente por las diferencias en las tendencias estructurales.

8.3.1. DOMINIO N

Está limitado al E por la falla Buey Muerto, al S por la falla Este NE y al W por un límite definido

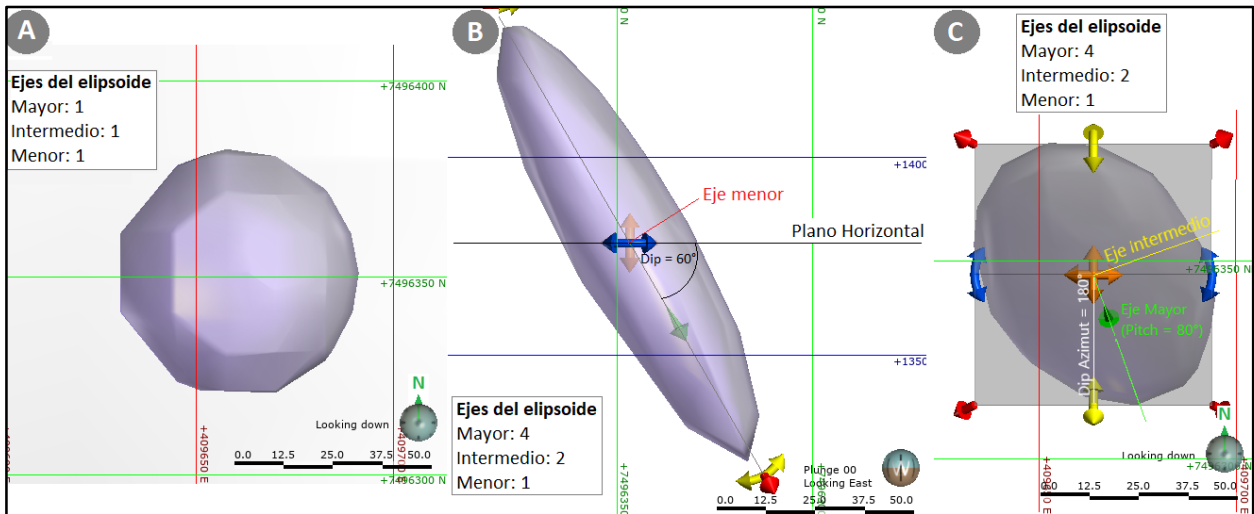


Figura 8.10: Deformación para un elipsoide de radios relativos 4-2-1. A. Esfera sin deformar; B. Vista de perfil del elipsoide deformado; C. Vista en planta del elipsoide deformado.

en base al contraste estructural entre el Dominio N y los dominios NW y Central, pero que no ha sido identificado con precisión en el yacimiento para modelar la falla asociada.

Este dominio contiene pocos tramos con información, los que se concentran en la parte sur del dominio, en donde la influencia de estructuras mayores con tendencias generales NNE-SSW, como las fallas Camila y Buey Muerto, dominan el patrón estructural de los cuerpos. Los parámetros exactos de tendencia son $85,3^\circ / 275,4^\circ / 95^\circ$ (*dip / dip azimuth / pitch*), con ejes del elipsoide (iguales en todos los dominios) 6 / 3 / 1 (mayor / intermedio / menor) para las superficies SULF y OXV - OXN-LIM y 2 / 2 / 1 para MIX y MIX-SEC. Los sólidos resultantes del modelamiento en este dominio se observan en la Figura 8.11.

8.3.2. DOMINIO E

Adyacente al anterior, limitado al W por la falla Buey Muerto, y al S, N y E por los límites de la caja de modelamiento. Al igual que en el dominio anterior, las tendencias estructurales están dadas por las estructuras mayores con tendencias NNE-SSW, en este caso principalmente por la falla Camila. Los parámetros exactos de tendencia son $54,6^\circ / 103,3^\circ / 95^\circ$ (*dip / dip azimuth / pitch*), con los cuales se generan los sólidos que se observan en la Figura 8.12.

8.3.3. DOMINIO S

Este dominio de forma triangular en planta, adyacente a los dos anteriores, está limitado al SW por

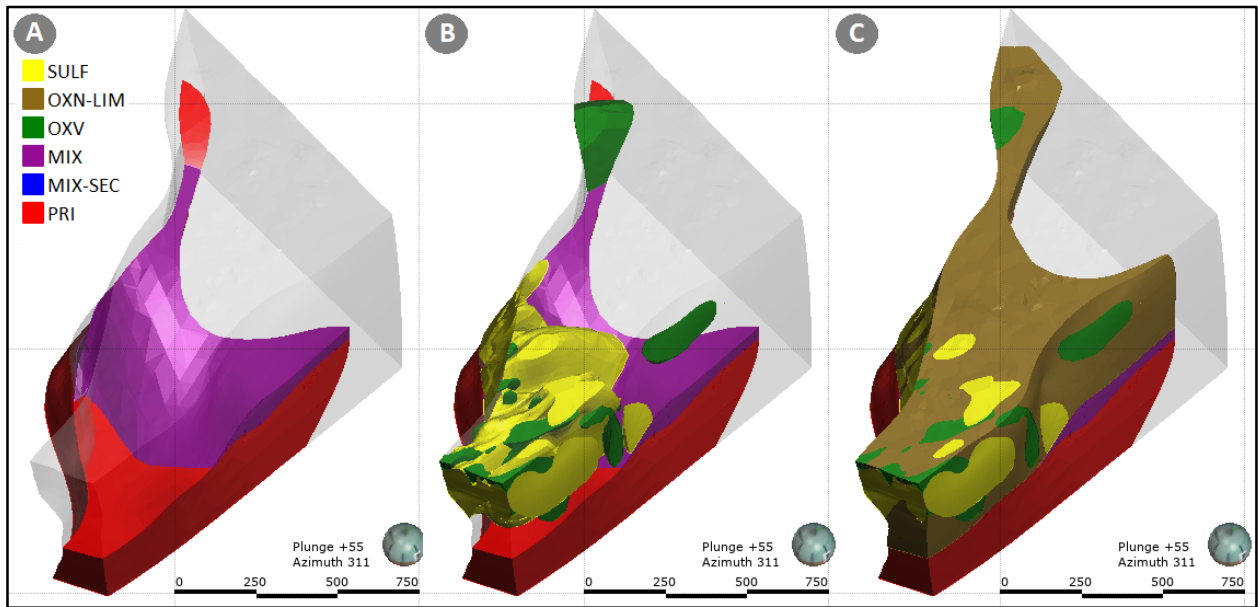


Figura 8.11: Sólidos unidades Dominio N. A. Unidades PRI y MIX; B. Unidades PRI, MIX, OXV y SULF; C. Unidades PRI, MIX, OXV, SULF y OXN-LIM.

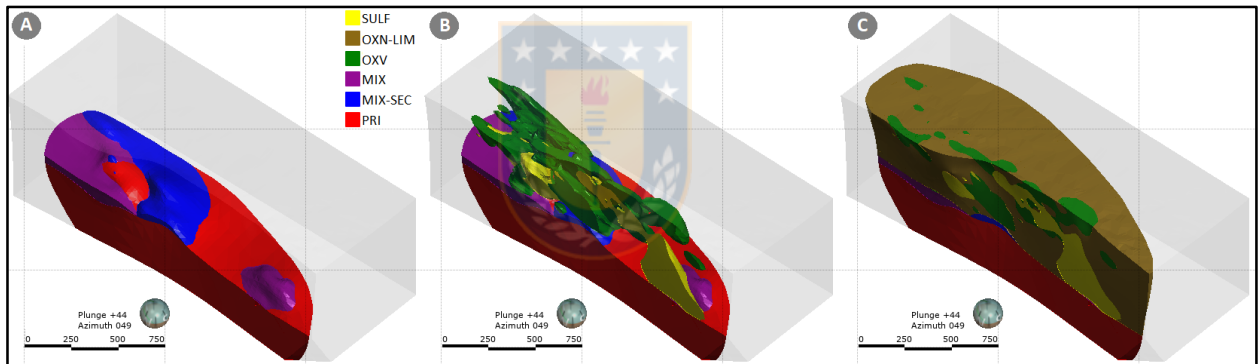


Figura 8.12: Sólidos unidades Dominio E. A. Unidades PRI y MIX; B. Unidades PRI, MIX, OXV y SULF; C. Unidades PRI, MIX, OXV, SULF y OXN-LIM.

la falla Espejo, al N por la falla Este NE y al E por la falla Buey Muerto. Las tendencias de este dominio son cercanas a las de los dominios anteriores, ya que la deformación se encuentra controlada por las mismas estructuras mayores, aunque guardando diferencias derivadas de la variación en la orientación de dichas fallas a lo largo de su extensión. Por lo demás, en este dominio existen otras estructuras menores que también influyen en la deformación final como la falla Valentina y la familia de fallas Sur. Los parámetros exactos de tendencia son $80^\circ / 278,5^\circ / 95^\circ$ (*dip / dip azimuth / pitch*), dando lugar a los sólidos que se muestran en la Figura 8.13.

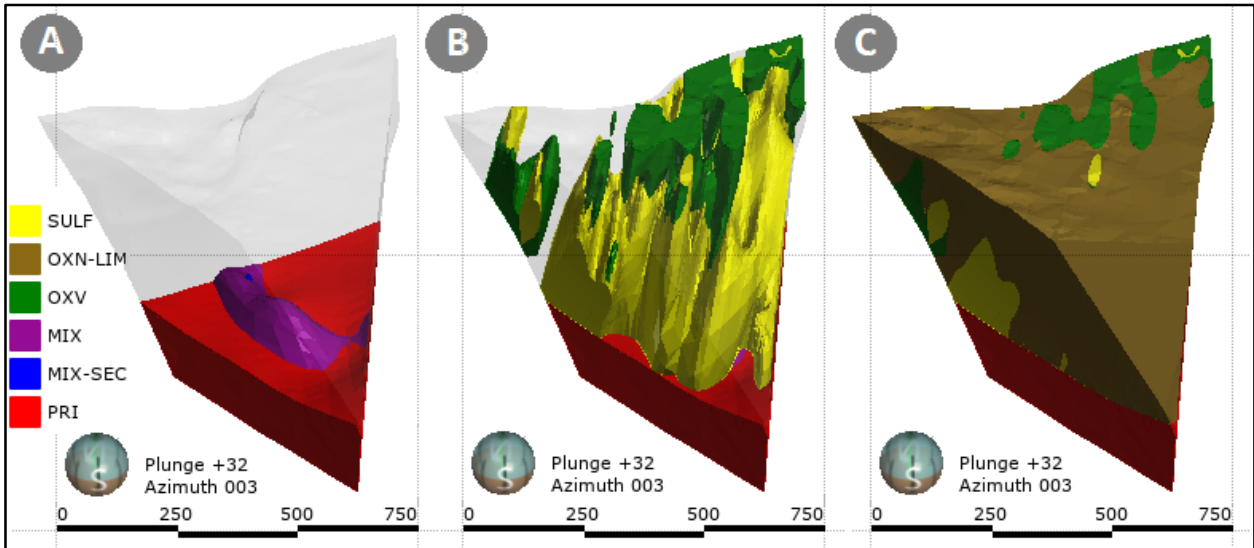


Figura 8.13: Sólidos unidades Dominio S. A. Unidades PRI y MIX; B. Unidades PRI, MIX, OXV y SULF; C. Unidades PRI, MIX, OXV, SULF y OXN-LIM.

8.3.4. DOMINIO W

Limitado al E por la falla Espejo, siendo adyacente al Dominio S, y en sus demás extremos por los límites de la caja de modelamiento. A diferencia de los dominios anteriores, las tendencias en este caso están dominadas por estructuras mayores de orientación NW-SE, adyacentes a las cuales se encuentran concentrados los tramos con información. De esta forma, la tendencia exacta queda descrita por los parámetros $67,6^\circ / 56,3^\circ / 95^\circ$ (*dip / dip azimuth / pitch*), con los cuales se generan los sólidos que se observan en la Figura 8.14.

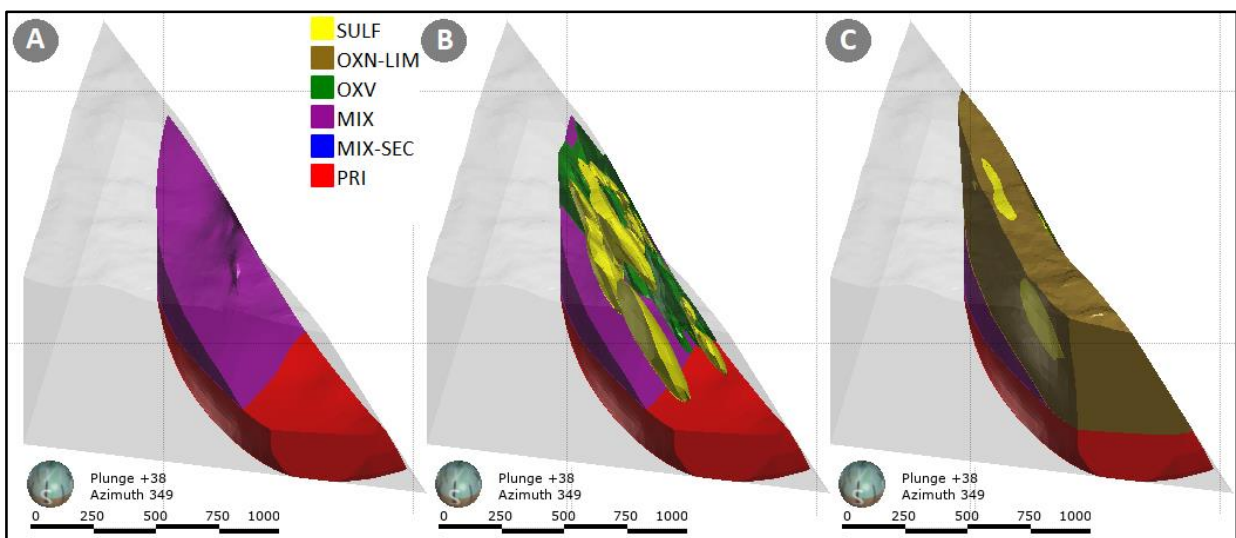


Figura 8.14: Sólidos unidades Dominio W. A. Unidades PRI y MIX; B. Unidades PRI, MIX, OXV y SULF; C. Unidades PRI, MIX, OXV, SULF y OXN-LIM.

8.3.5. DOMINIO NW

Dominio adyacente al anterior, limitado al W por la falla Espejo, al E por el límite inferido, sin una falla identificada ya mencionado previamente, y al S por la falla Diagonal, estructura de bajo manteo hacia el N. Al igual que en el dominio anterior, la influencia de estructuras mayores con tendencias generales NW-SE, como las fallas Espejo y Reflejo, dominan el patrón estructural de los cuerpos, y los parámetros que describen la tendencia exacta son coincidentes con los del Dominio W, dando lugar a los sólidos que se muestran en la Figura 8.15.

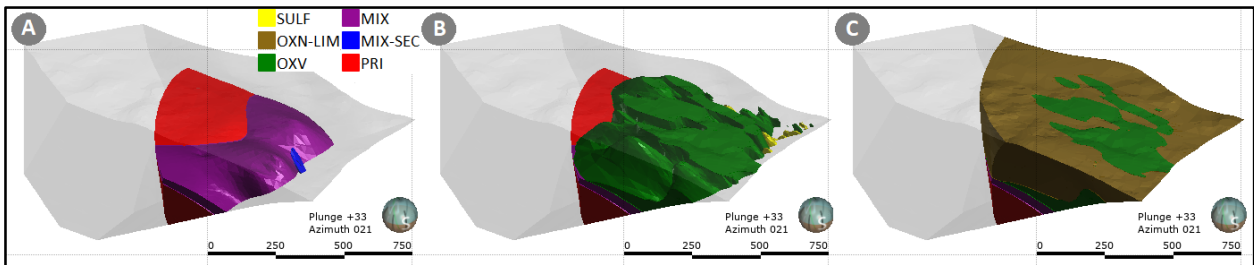


Figura 8.15: Sólidos unidades Dominio NW. A. Unidades PRI y MIX; B. Unidades PRI, MIX, OXV y SULF; C. Unidades PRI, MIX, OXV, SULF y OXN-LIM.

8.3.6. DOMINIO CENTRAL

Adyacente al dominio anterior, compartiendo con éste el contacto a través de la falla Diagonal que limita el Dominio Central al N. Su límite W está dado por la falla Espejo, límite S por la falla Este NE y al E está delimitado por la falla no identificada. Al igual que en el dominio anterior, las tendencias están marcadas por las fallas Espejo y Reflejo, compartiendo los parámetros de tendencia con los Dominios W y NW. Los sólidos resultantes del modelamiento en este dominio se observan en la Figura 8.16.

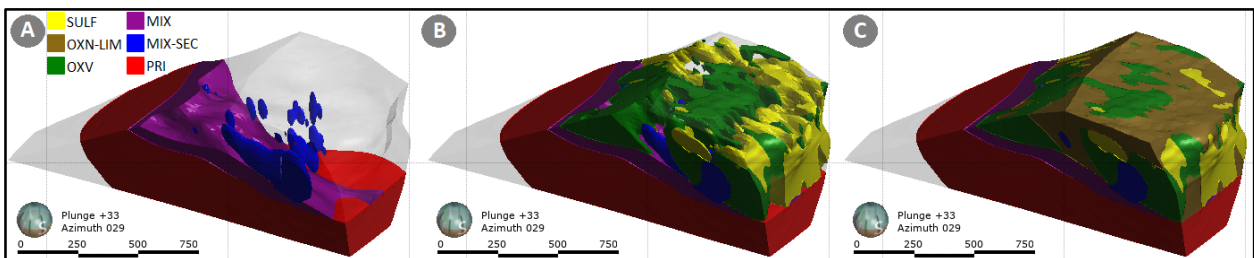


Figura 8.16: Sólidos unidades Dominio Central. A. Unidades PRI y MIX; B. Unidades PRI, MIX, OXV y SULF; C. Unidades PRI, MIX, OXV, SULF y OXN-LIM.

8.4. MODELO COMPLETO

Para obtener el modelo completo del yacimiento, se unen los modelos realizados para cada uno de los dominios y se ajusta manualmente, utilizando polilíneas para corregir los quiebres abruptos que pueden ocasionarse en los límites de algunos dominios, en particular cuando se modelan tendencias muy diferentes en dominios adyacentes.

De esta forma se obtienen los sólidos que se muestran en la Figura 8.17 para cada una de las unidades.

Visto en sección (Figura 8.18), se tiene en general un cuerpo primario subhorizontal en profundidad, sobre el cual se desarrolla una zona mixta con cuerpos locales de sulfuros secundarios, con diferente desarrollo en los sectores Antucoya y Buey Muerto, que a niveles más someros, como resultado de la alteración supérgena, presenta OXV en cuerpos subverticales, y OXN-LIM como unidad de fondo, sobre lo cual se desarrollan cuerpos de SULF, también subverticales, que cortan a las unidades anteriores.



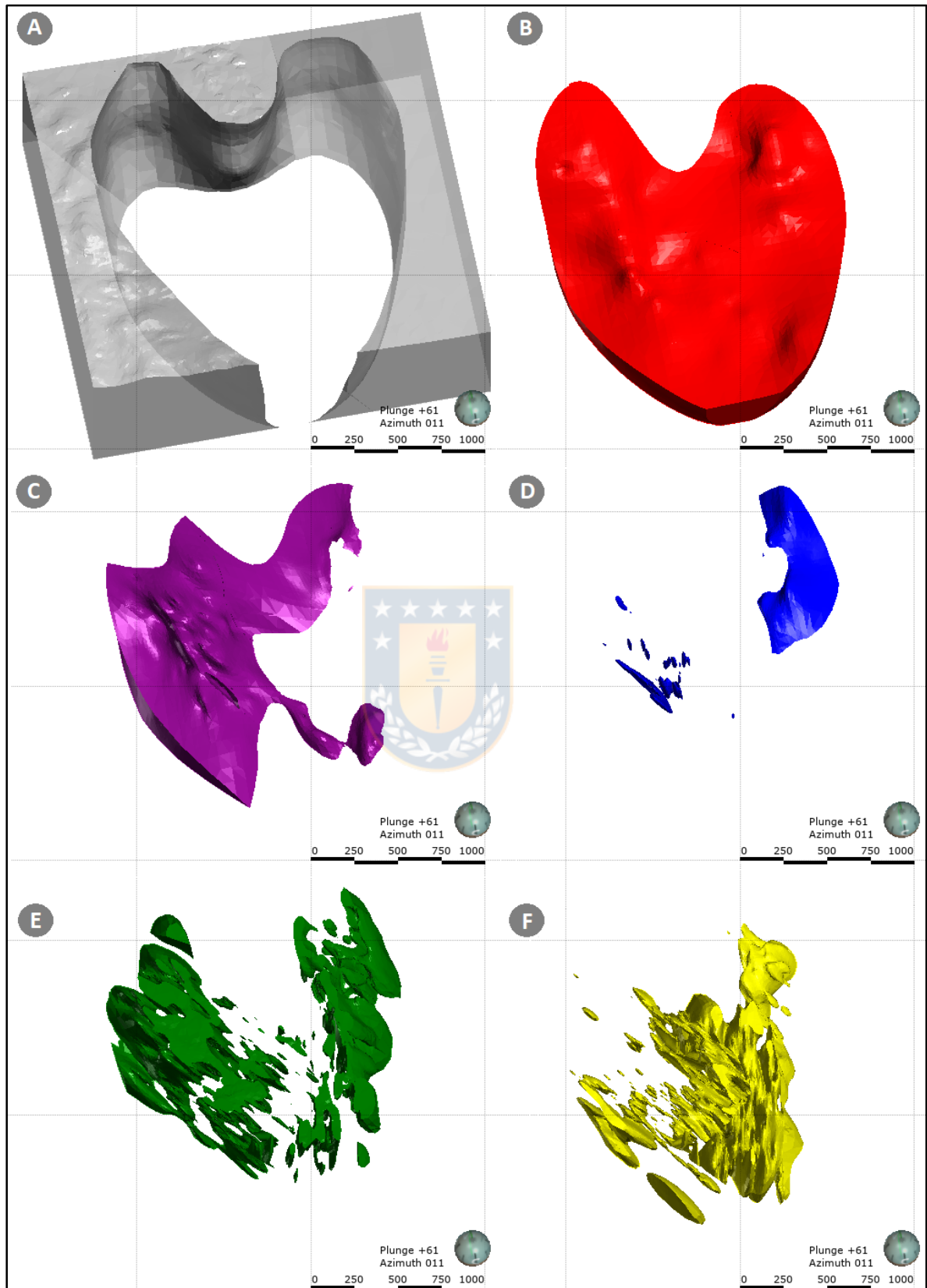


Figura 8.17: Sólidos unidades modelo completo. OXN-LIM como unidad de fondo. A. ROCA FRESCA; B. PRI; C. MIX; D. MIX-SEC; E. OXV; F. SULF.

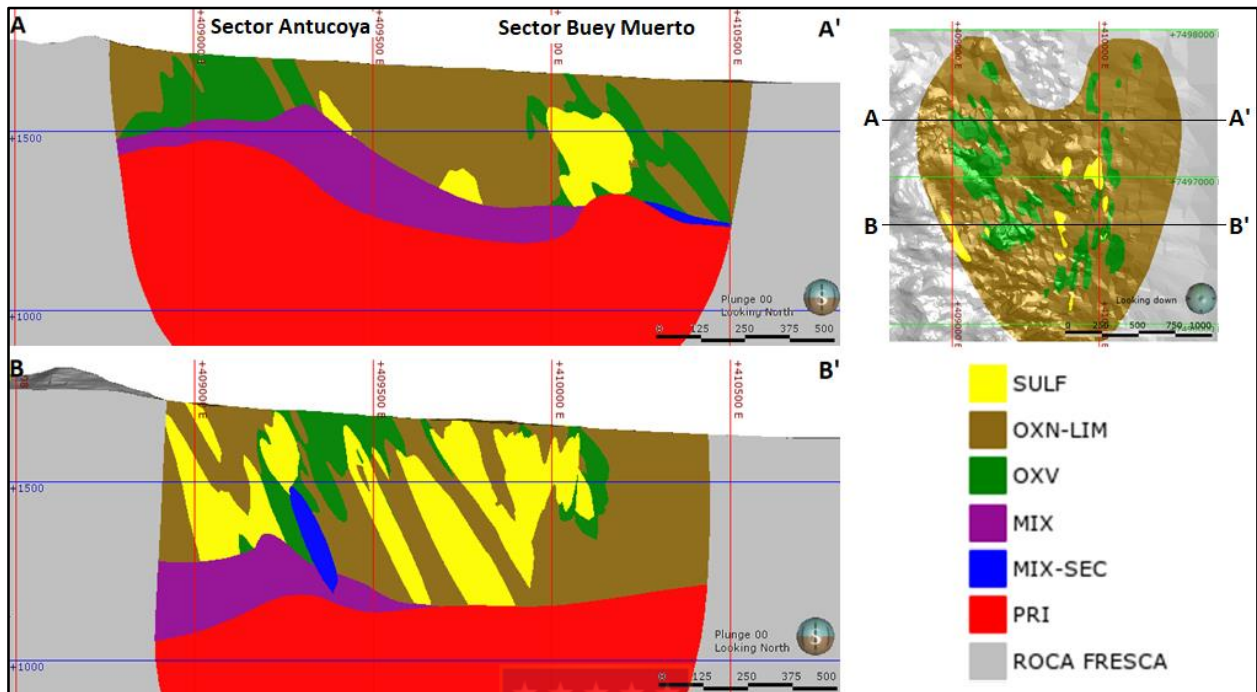


Figura 8.18: Secciones del yacimiento.



9. CONCLUSIONES

El yacimiento Antucoya es considerado de ley baja, lo que obliga a realizar una muy buena caracterización de las unidades y utilizar eficientemente toda la información geológica disponible para generar un modelo robusto y maximizar la recuperación de cobre. En este sentido, la información entregada por el mapeo geológico es la más difundida en el yacimiento y la única que presenta la continuidad necesaria para ser utilizada como base de un modelo implícito. Aun cuando se identificaron algunos errores asociados al mapeo, como la subestimación sistemática de las leyes de cobre, no se identificó que esto afectara mayormente a los porcentajes relativos de las menas, de manera que al trabajar con la proporción de minerales mapeados y al complementar esta información con los resultados de análisis químicos disponibles en tramos regulares y para la mayor parte de los metros mapeados, se obtienen buenos resultados en la caracterización de la mena presente.

La subestimación de las leyes en el mapeo tiene relación principalmente con el alto grado de alteración de la roca y las bajas leyes del yacimiento que dificultan la identificación y cuantificación de las menas de manera macroscópica, ya que se encuentran en la mayoría de los casos en muy baja cantidad. Por lo demás, existe dificultad para identificar algunas menas secundarias como los sulfatos de hierro con cobre y las limonitas con cobre, visualmente iguales a los correspondientes minerales sin cobre.

Esta dificultad en la identificación se extiende incluso a los métodos analíticos, debido a la gran complejidad mineralógica-composicional que pueden presentar los minerales oxidados, muchas veces sin estructura cristalina y/o fórmula estable. Por esta razón la caracterización mineralógica debe ser realizada mediante distintas técnicas y de esta manera complementar las distintas fuentes de información.

La metodología implícita utilizada resulta una gran herramienta, ya que al generar modelos directamente desde la base de datos, los errores e incoherencias se hacen evidentes en el software de modelamiento, y es posible realizar un ajuste manual de los datos, para lo cual es clave el criterio geológico aplicado y el conocimiento previo del yacimiento que se logra con el estudio de la información disponible. Esto permitió justificar en este caso, aspectos como las diferencias entre los cuerpos con enriquecimiento supérgeno en ambos sectores del yacimiento o el diferente grado

de desarrollo de las unidades MIX y SULF en ambas zonas, lo cual se visualiza mucho mejor al tener la visión global tridimensional que otorga un software de modelamiento.

Mediante el modelo generado se identificó que el mayor volumen en el yacimiento es ocupado por la unidad SULF, mientras que la unidad OXV son cuerpos más acotados que se encuentran principalmente en la zona norte. Esto es relevante desde el punto de vista operacional, ya que la extracción futura tendrá un gran contenido en sulfatos de hierro con cobre, los cuales presentan dificultades en el proceso, por lo que se debe buscar alternativas para minimizar los problemas que esta mineralogía pueda traer.



REFERENCIAS

- AGUIRRE, R.; CORNEJO, P.; GÁLVEZ, O.; MEDINA, A.; MPODOZIS, C.; MÜNCHMEYER, C.; PONCE, R.; RUBIO, X.; TRONCOSO, P.; VALENZUELA, D. Y VALIENTE, P. 2013. Proyecto Antucoya: Volumen III. Informe de geometalurgia. Informe Interno. 105 pp.
- ARELLANO, M. 2003. Distribución y control de la mineralización del pórfido cuprífero Antucoya, II Región, Chile. Tesis de Doctorado. Universidad Católica del Norte (Inédito): 81 pp.
- BASSO, M. 2004. Carta Baquedano, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N° 82: 26 pp.
- BAHLBURG, H. Y BREITKERUZ, C. 1991. Paleozoic evolution of active margin basins in the southwestern Central Andes (northwestern Argentina and northern Chile). *Journal of South American Science*. Vol. **4**, (3): 171-188.
- BOBENREITH, L. 1980. Geología de los cuadrángulos Cerro Desamparado y Cerro Soledad, Regiones de Tarapacá y Antofagasta. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 171 pp.
- BORIC, R.; DÍAZ, F. Y MAKSAEV, V. 1990. Geología y yacimientos metalíferos de la Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería. Bol. **40**. 246 pp.
- BREITKREUZ, C. Y BAHLBURG, H. 1985. Paleozoic flysch series in the Coastal Cordillera of Northern Chile. *Geologische Rundschau*. Vol. **74**, (3): 565-572.
- BUHELDT, M. Y TELLEZ, C. 1988. The Jurassic La Negra Formation in the area near Antofagasta, Northern Chile (Lithology, Petrography, Geochemistry). The Southern Central Andes. Bahlburg, H., Breitkreuz, C. Y Giese, P. (Editores). Springer Berlin Heidelberg: 261 pp. Berlín.
- CABALLERO, M. 2017. Optimización de las distancias de transporte mediante la ubicación y diseño de botaderos en minera Antucoya. Memoria para optar al título de Ingeniera Civil de Minas. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas (Inédito): 123 pp.

CAMUS, F. Y DILLES, J. 2001. A special issue devoted to Porphyry Copper Deposits of Northern Chile, Preface. *Economic Geology*. Vol. **96**, (2): 233-237.

CAMUS, F. 2003. Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. Vivallo S., Mpodozis, C., Portigliati, C. Y Lara, L. (Editores). Servicio Nacional de Geología y Minería: 267 pp. Santiago.

CHARRIER, R., PINTO, L. Y RODRÍGUEZ, M. P. 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. The geology of Chile (MORENO, T. & GIBBONS, W., EDITORES). The geological Society, 21-114.

COWAN, E.; BEATSON, R.; ROSS, H.; FRIGHT, W.; MCLENNAN, T.; EVANS, T.; CARR, J.; LANE, R.; BRIGHT, D.; GILLMAN, A.; OSHUST, P. y TITLEY, M. 2003. Practical implicit geological modelling. In Fifth International Mining Geology Conference. Australian Institute of Mining and Metallurgy: 17-19 pp. Bendigo.

COOKE, D.; HOLLINGS, P. Y WALSHE, J. 2005. Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonics Controls. *Economic Geology*. Vol. **100**, (5): 801-818.

DALLMEYER, R.; BROWN, M.; GROCCOTT, J.; TAYLOR G. Y TREOLAR, P. 1996. Mesozoic Magmatic Tectonics Events within the Andean Plate Boundary Zone, 26°-27°30'S, North Chile: Constraints from ⁴⁰Ar/³⁹Ar Mineral Ages. *The Journal of Geology*. Vol. **104**: 19-40.

DOMIC, E. 2001. Hidrometalurgia fundamentos, procesos y Aplicaciones. 1ª edición. Santiago.

FERRARIS, F. Y DI BIASE, F. 1978. Carta Geológica de Chile. N° 39, Hoja Antofagasta. Instituto de investigaciones geológicas.

GARCÍA, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. Simposium sobre geosinclinal andino N°3. 1962. 138 pp. Santiago.

GEOESTIMA. 2017. Modelo geometalúrgico Antucoya. Informe interno. 170 pp.

HARRINGTON, H. 1961. Geology of Parts of Antofagasta and Atacama Provinces, Northern Chile. *AAPG Bulletin*. Vol. **45**, (2): 169-197.

HERVÉ, M. 1987a. Movimiento sinistral en el Cretácico Inferior de la Zona de Falla de Atacama

al norte de Paposo (24°S), Chile. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **31**: 37-42.

HERVÉ, M. 1987b. Movimiento normal de la Falla Paposo, Zona de Falla de Atacama, en el Mioceno, Chile. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **31**: 31-36.

LAGOS, J.; PONCE, R.; VALIENTE, P. Y GIGLIO, S. 2015. Geology of the Antucoya Porphyry Copper Deposit: An Early Cretaceous System in the Coastal Cordillera, Antofagasta Region, Chile. Congreso Geológico Chileno N°14. Actas **2**: 365.

LOWEL, J. D. Y GILBERT, J. M. 1970. Lateral and vertical Alteration-Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits. *Economic Geology*, Vol. **65**: 373-408.

MAKSAEV, V. 1990. Metallogeny, geological evolution and thermochronology of the Chilean Andes between latitudes 21° and 26° south, and the origin of major porphyry copper deposits. Tesis de Doctorado. Dalhousie University (Inédito): 554 pp.

MAKSAEV, V. Y MARINOVIC, N. 1980. Cuadrángulos Cerro de la Mica, Quillagua, Cerro Posada y Oficina Prosperidad; Carta geológica de Chile. Instituto de investigaciones geológicas.

MAKSAEV, V.; MUNIZAGA, F.; FANNINF, M.; PALACIOS, C. Y TAPIA, J. 2006. SHRIMP U-Pb dating of the Antucoya porphyry copper deposit: new evidence for an Early Cretaceous porphyry-related metallogenic epoch in the Coastal Cordillera of northern Chile. *Mineralium Deposita*. Vol. 41: 637-644.

MARSDEN, J. Y HOUSE, I. 1992. The Chemistry of Gold Extraction. Ellis Horwood Series in Metals and Associated Materials. Nueva York. 597 pp.

MORTIMER, C., FARRAR, E. Y SARIC, N. 1974. K-Ar ages from tertiary lavas of the northernmost Chilean Andes. *Geologische Rundschau*. Vol. **63**: 484-490.

MPODOZIS, C. Y RAMOS, V. 1989. The Andes of Chile and Argentina. Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources (Ericksen, G.E; Carñas Pinochet, M.T. Y Reinemund, J.A. editores). Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series: 59-89. Texas.

MUÑOZ, M.; VENEGAS, R. Y TELLEZ, C. 1988. La Formación La Negra: Nuevos antecedentes estratigráficos en la Cordillera de la Costa de Antofagasta. Congreso Geológico Chileno N°5. Actas **1**: 283-311.

NARANJO, J. Y PUIG, A. 1984. Hoja Tal-Tal y Chañaral, Regiones de Antofagasta y Atacama, Carta geológica de Chile N°62 y 63. Servicio Nacional de Geología y Minería.

OLIVEROS, V. 2005. Les formations magmatiques jurassiques et minéralisation du nord Chili, origine, mise en place, altération, métamorphisme: étude géochronologique et géochimie. Tesis de Doctorado. Université de Nice-Sophia Antipolis (Inédito): 296 pp.

OLIVEROS, V.; MORATA, D. Y AGUIRRE, L. 2007. Jurassic to Early Cretaceous subductionrelated magmatism in the Coastal Cordillera of northern Chile (18°30'-24°S): geochemistry and petrogenesis. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **34**, (2): 209-232.

OLIVEROS, V.; TRISTÁ-AGUILERA, D.; FÉRAUD, G.; MORATA, D.; AGUIRRE, L.; KOJIMA, S. Y FERRARIS, F. 2008. Time relationship between volcanism-plutonism-alteration-mineralization in Cu-stratabound ore deposits from the Michilla district, northern Chile: a $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ geochronological approach. *Mineralium Deposita*. Vol. **43**: 61-78.

PERELLÓ, J.; MARTINI, R.; ARCOS, R. Y MUHR, R. 2003. Buey Muerto: porphyry copper mineralization in the Early Cretaceous arc of northern Chile. Congreso Geológico Chileno N°10. Actas **2**: 203.

PONCE, R.; VALIENTE, P.; VALENZUELA, D.; TRONCOSO, P.; AGUIRRE, R.; CORNEJO, P.; MEDINA, A; MPODOZIS, C. Y MÜCHMEYER, C. 2013. Proyecto Antucoya: Volumen I. Informe de Geología y QA/QC. Informe Interno. 123 pp.

ROGERS, G. 1985. A geochemical traverse across the North Chilean Andes. Tesis de Doctorado. Open University (Inédito): 333 pp.

ROGERS, G. Y HAWKESWORTH, C. 1989. A geochemical traverse across the North Chilean Andes: evidence for crust generation from the mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. **91**: 271-285.

RUBIO, X. 2012. Informe avance estudios mineralógicos Antucoya, para modelamiento geometalúrgico. Informe interno. 79 pp.

SCHEUBER, E. Y ANDRIESEN, P. 1990. The kinematic and geodynamic significance of the Atacama Fault Zone, northern Chile. *Journal of structural geology*. Vol. **12**, (2): 243-257.

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

SILLITOE, R. H. 1988. Epochs of intrusion-related copper mineralization in the Andes. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **1**, (1): 89-108.

WILLIAMS, M.; GILLIGAN, J. Y PREECE, R. (2000). Final Report on the Application of Partial Extraction Techniques to Determine Copper & Iron Sulphide Distribution Within the Escondida Norte Porphyry Copper Deposit. Escondida Norte, Mel & BHP Copper Growth & Technology.

