UNIVERSIDAD DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO DE VETILLAS EN ROSARIO, COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI S.C.M., REGIÓN DE TARAPACÁ, CHILE

Profesor guía: Dr. Karl Riveros Jensen

Tutor: Alejandro Sanhueza Passache

Josefa María De La Victoria Quiroga Gonzalez

Copiapó, Chile 2019

UNIVERSIDAD DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO DE VETILLAS EN ROSARIO, COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI S.C.M., REGIÓN DE TARAPACÁ, CHILE

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Geólogo

Profesor guía: Dr. Karl Riveros Jensen

Tutor: Alejandro Sanhueza Passache

Josefa María De La Victoria Quiroga Gonzalez

Copiapó, Chile 2019

Dedicado a mi querido abuelo

Eduardo Gonzalez Gómez

RESUMEN

El Distrito Minero Collahuasi, ubicado en la región de Tarapacá, el cual corresponde a un clúster de pórfidos, incluye los depósitos Quebrada Blanca, Ujina y Rosario, emplazados en la porción norte de la franja de pórfidos Eoceno-Oligoceno.

La investigación se centra en el estudio del sistema de vetillas hidrotermales desarrolladas en el yacimiento Rosario. Se consideran las vetillas tipo A, B, C, D y E, definidas en el depósito. Este presenta un amplio desarrollo de alteración hidrotermal asociada al ambiente porfídico y a un evento epitermal de alta sulfidización. Dichos eventos generaron un patrón de zonificación de vetillas y mineralización. Distintos autores afirman que más del 50% de la mineralización de pórfidos de cobre molibdeno está concentrada en vetillas hidrotermales, por lo cual es muy importante el estudio, modelamiento y entendimiento de estas estructuras mineralizadas en sistemas porfídicos.

El objetivo principal de esta investigación es generar el modelamiento geológico del sistema de vetillas ligadas al ambiente tipo pórfido, con tal de determinar su geometría y distribución. Además, definir características composicionales, cronología relativa, orientaciones presenciales y relaciones genéticas con las principales menas. Las metodologías utilizadas son mapeo geológico de sondajes y bancos, *pitshell* geológicos, análisis petrográficos y calcográficos, estadística básica y modelamiento mediante *software Leapfrog Geo*. La generación del modelo geológico de vetillas en Rosario permitió identificar sus orientaciones preferenciales y distribución espacial de vetillas tempranas, las cuales presentan un rumbo dominante NW con inclinación hacia el SW. Además, se establecieron correlaciones de vetillas con leyes químicas, litologías y alteración. Los estudios petrográficos y calcográficos permitieron definir los siguientes subtipos de vetillas: A1, A2, A3, B1, B2 y B3, además de establecer la cronología de emplazamiento, temporalidad de formación de vetillas y menas respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre María Soledad Gonzalez, por ser un ejemplo de fortaleza y superación, por creer en mí incondicionalmente, me faltarían años de vida para agradecer todo lo que has hecho por mí y mi hermano, todo tu esfuerzo para que siempre estuviésemos bien y lográramos llegar a ser profesionales.

A mi hermano Cosme, por ser simplemente como es y alegrar la vida con sus vivencias.
A mis abuelos, Maria Yolanda y Eduardo por siempre darme fuerzas y cuidarme.

A mi querida Ámbar por acompañarme en las noches de estudio.
A Ricardo, gracias por tu compañía, paciencia en momentos difíciles, por siempre estar apoyándome y creyendo en mí.

A mis amigas, con las cuales compartimos la misma pasión por la geología Karyme, Rosa, Kissy y Swanne, gracias por su amistad y apoyo incondicional, además gracias por las vivencias en terreno y en la vida diaria.

A mi profesor guía, Doctor Karl Riveros, por su apoyo en la realización de la memoria.
A los profesores del departamento de Geología por los conocimientos entregados en los años de carrera.

Por último, me gustaría agradecer a todas las personas que participaron en la realización de la memoria, a la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi S.C.M. por darme la oportunidad de poder desarrollar mi memoria de título en una compañía minera de clase mundial. A los geólogos de la Gerencia de Geología y Exploraciones, Alejandro Sanhueza, Diego Sanhueza y Reycardo Orbezo, por todo el apoyo, conocimientos entregados, buena onda y paciencia para ayudarme a desarrollar la memoria. A los colegas de la Muestrera geológica de Pozo Almonte, gracias por su ayuda y apoyo.

Índice

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN 15

1.1. Generalidades 15

1.2. Hipótesis 16

1.3. Problemática 16

1.4. Objetivo General 18

1.5. Objetivos Específicos 18

1.6. Área de estudio 18

1.7. Trabajos anteriores 19

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO 22

2.1. Marco Geotectónico 22

2.1.1. Paleozoico 22

2.1.2. Mesozoico 23

2.1.3. Cenozoico 23

2.2. Depósitos tipo pórfido cuprífero 24

2.2.1. Configuración tectónica 25

2.2.2. Escala del depósito 26

2.2.3. Alteración y mineralización 28

2.2.3.1. Alteración calco-sódica 30

2.2.3.2. Alteración potásica 30

2.2.3.3. Alteración propilítica 31

2.2.3.4. Alteración clorita-sericítica 31

2.2.3.5. Alteración cuarzo-sericítica o Fílica 31

2.2.3.6. Alteración argílica intermedia y argílica avanzada 31

2.2.4. Vetillas hidrotermales 32

2.2.4.1. Vetillas tempranas 34

2.2.4.2. Vetillas intermedias 35

Capítulo 3: CONTEXTO GEOLÓGICO 38

3.1. Marco geológico distrital 39

3.1.1. Generalidades 39

3.1.2. Litología 40

3.1.2.2. Formación Quehuita 41
3.1.2.3. Formación Cerro Empexa 44
3.1.2.4. Rocas intrusivas 44
3.1.2.5. Ignimbrita Huasco 44
3.1.2.6. Ignimbrita Ujina 44
3.1.2.7. Ignimbrita Pastillos 44
3.1.2.8. Estratovolcanes 45
3.1.2.9. Depósitos no consolidados 45
3.1.3. Estructuras tectónicas 45
3.1.4. Geología económica 47
3.2. Marco geológico del Yacimiento Rosario 48
3.2.1. Generalidades 48
3.2.2. Litología 49
3.2.3. Estructuras 54
3.2.4. Alteración 55
3.2.4.1. Alteraciones tempranas 55
3.2.4.2. Alteraciones Tardías 56
3.2.5. Vetillas hidrotermales 57
3.2.6. Mineralización 61

Capítulo 4. METODOLOGÍA 63

4.1. Recopilación bibliográfica 63
4.2. Trabajo en terreno 66
4.2.1. Mapeo de sondajes 66
4.2.2. Toma de muestras 68
4.2.3. Mapeo de bancos 69
4.3. Trabajo de Gabinete 70
4.3.1. Confección de secciones transparentes y pulidas 70
4.3.2. Análisis mineralógico mediante microscópica óptica 70
4.3.3. Generación y homologación de base datos 71
4.3.4. Análisis estadístico 75
4.3.5. Confección de plantas y secciones 75
4.3.6. Confección de *pitshell* 76
4.3.7. Modelamiento con *Leapfrog Geo* 78

4.3.8. Interpretación de resultados 82

Capítulo 5. RESULTADOS 84

5.1. Petrografía 84

5.1.1. Mineralogía de vetillas en Rosario 84

5.1.1.1. Vetillas A 84

5.1.1.2. Vetillas B 88

5.1.1.3. Vetillas C 91

5.1.1.4. Vetillas D 94

5.1.1.5. Vetillas E 98

5.1.1.6. Alteración Propilítica 101

5.1.1.7. Skarn 102

5.1.1.8. Hornfels 103

5.1.2. Cronología y paragénesis mineral 103

5.2. Modelamiento geológico 108

5.2.1. Análisis de datos 108

5.2.2. Comparación estadística 109

5.2.2.1. Estadística Según Leyes Químicas 110

5.2.2.2. Estadística según distribución de datos 119

5.2.2.3. Estadística según alteración 119

5.2.2.4. Estadística según litología 124

5.2.2.5. Estadística según zona mineral 127

5.2.3. Plantas y secciones 130

5.2.4. Pitshell vetillas 133

5.2.5. Modelamiento de vetillas en Rosario 134

5.2.5.1. Configuración de la base de datos de vetillas 134

5.2.5.2. Limitaciones del modelo 137

5.2.5.3. Modelo geológico de vetillas 138

5.2.5.4. Interpretación en perfiles 141

Capítulo 6. DISCUSIÓN 151

Capítulo 7. CONCLUSIONES 155

REFERENCIAS 157

Índice de Figuras

Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos del área de estudio. Extraído de Muñoz (2009). ... 19
Figura 2.1: Se ilustra la relación espacial entre stocks porfídicos, plutón subyacente, rocas volcánicas suprayacente y el *lithocap*. Tomado de Sillitoe (2010). ... 26
Figura 2.2: Patrón de zonación ideal de la alteración en un sistema pórfido cuprífero, el cual no ha sufrido una sobre imposición. Modificado de Sillitoe (2010). ... 28
Figura 2.3: Modelo esquemático del patrón de zonación de las alteraciones presentes en un sitema pórfido cuprifero que ha sufrido *telescoping*. El modelo se encuentra basado en una distribución litológica en particular, por lo que el tamaño y distribución de estas alteraciones suele variar de un depósito a otro. Modificado de Sillitoe (2010). ... 28
Figura 2.4: Representación gráfica de las secuencias de alteración- mineralización, para un sistema tipo pórfido, donde se relaciona la profundidad y la temporalidad de los eventos, este gráfico no toma encuentra una posible superposición. Modificado de Sillitoe (2010). ... 30
Figura 2.5: Esquematización de las partes de una vetilla, elaboración propia. ... 33
Figura 2.6: Esquemática secuencia temporal de entrecruzamiento de vetilla en un depósito pórfido Cu-Mo. Para el caso a) se tiene un inicio de vetillas EB, cortadas luego por vetillas tipo A, que son cortadas por tipo B y tardíamente se presentan el tipo D. Modificado de Sillitoe (2010). ... 38
Figura 3.1: Mapa de bloques tectónicos principales separados por las fallas Domeyko y Loa. Están ilustradas las unidades geológicas principales en el distrito y los yacimientos Quebrada Blanca (QB), Rosario (R) y Ujina (U) Modificado de Muñoz, (2009). ... 42
Figura 3.2: Columna estratigráfica Regional Distrito Collahuasi (izquierda) y yacimiento Rosario (derecha). Se puede apreciar la relación entre las distintas formaciones, en el sector Rosario se destaca la intrusión de los pórfidos Collahuasi y Rosario. Modificado de Masterman (2003). ... 43
Figura 3.3: Mapa del distrito Collahuasi, donde resaltan los sistemas estructurales principales Falla Domeyko, Loa y los sistemas conjugados NE-SW y NW-SE. Modificado de Masterman (2003). ... 46
Figura 3.4: Mapa del distrito Collahuasi, donde resaltan los sistemas estructurales principales Falla Oeste y Loa, los principales yacimientos Quebrada Blanca (QB), Rosario (R) y Ujina (U). Modificado de Masterman (2003). ... 48

Figura 3.5: Perfil esquemático de litología en Rosario, en sección 20 NW. Elaboración propia. 51
Figura 3.6: Fotos de litologías en yacimiento Rosario; A) Andesita; B) Ocoíta; C) Toba cristalina; D) Dacita; E) Toba lítica; F) Conglomerado (USED); G) Arenisca Calcárea (USED); H) Pórfido Collahuasi; H) Pórfido Rosario; J) Diorita; K) Pórfido diorítico; I) Brecha de polvo de roca y M) Brecha hidrotermal con matriz de turmalina. Extraído de procedimiento CMDIC, (2015). 53
Figura 3.7: Resumen de las estructuras principales relacionadas con el Rajo Rosario, extraído de Sobarzo (2010). 54
Figura 3.8: Perfil de alteraciones en yacimiento Rosario, en la sección N° 20NW. Elaboración propia. 56
Figura 3.9: Distribución de las zonas minerales en el yacimiento Rosario, Perfil sección NWN°20. Elaboración propia. 62
Figura 4.1: Distribución de sondajes elegidos en base a secciones tipo. Elaboración Propia. 65
Figura 4.2: Formato de mapeo para sondajes centrado en vetillas. Elaboración propia. 65
Figura 4.3: Estimación visual de mapeo volumétrico de vetillas para sondajes diamantino. Extraído de CMDIC (2014). 67
Figura 4.4: Distribución de sondajes elegidos para realizar análisis Qa/Qc, con base en el criterio de mapeo. Elaboración Propia. 68
Figura 4.5: Distribución de muestras de sondajes tomadas para realizar cortes transparentes y pulidos con base en los sondajes elegidos para revisión. Los colores ilustran el tipo de vetilla predominante en la muestra, según la nomenclatura de clasificación utilizada en el yacimiento Rosario. Elaboración propia. 69
Figura 4.6: Gráficos obtenidos del *software Statistica* donde ilustran la distribución de los datos históricos, según el rango de abundancia v/s el mapeo volumétrico, donde se reconocen tres rangos poblacionales para realizar la homologación. Elaboración propia. 73
Figura 4.7: Gráfica de coincidencias de mapeo referente a vetillas. Elaboración propia. 73
Figura 4.8: Procedimiento para realizar *"Interval selection*". A: Creación de la nueva tabla, B: selección de tramo designado en base a leyenda de porcentaje volumétrico. C: cambio de asignación del tramo. Elaboración propia. 74

Figura 4.9: Representación visual desde planta de la base de datos final, donde los colores representan el origen del dato. JQ: Sondajes revisados en esta tesis; GB: Datos históricos con mapeo volumétrico; S: Datos obtenidos mediante *"Interval Selection"*. Elaboración propia.75
Figura 4.10: A la izquierda: distribución de las secciones tipo con orientación NW. A la derecha: imágenes de la creación de secciones tipo a mano alzada. Elaboración propia. 76
Figura 4.11: Distribución de los puntos de control tomados en la actividad de mapeo de bancos, el color tal como se muestra en la leyenda ilustra las fases visitadas. Elaboración propia. 77
Figura 4.12: Pasos para generar un volumen que limitará el modelamiento de sólidos de vetillas. Elaboración propia. 79
Figura 4.13: Procedimiento para proyección de polilíneas desde pitshell de vetillas, donde: A) visualización de sondajes filtro mapeo (JQ y GB), B) la baja densidad de datos provoca utilizar datos con mapeo tipo S, C) visualización de sondajes con parámetro indicadores, como guía de modelamiento, d) Para ayudar en la proyección de polilíneas se visualizaron sólidos de litología, alteración y zona mineral de mediano plazo. e) se cargan los mismos sólidos para largo plazo y según corresponda se proyectan las polilíneas de cada vetilla, elaboración propia. 81
Figura 4.14: Procedimiento de creación de modelamiento geológico. A) Definición de límites del modelamiento. B) Generación de nueva intrusión en base a sondajes, C) Definición de parámetros de sólidos. D) Integración de polilíneas para mejorar resolución y E) Sólido generado, elaboración propia. 82
Figura 4.15: Sondajes auxiliares para mejorar la resolución de sólidos generados (Elaboración propia). 82
Figura 5.1: A) Muestra DM-204_DDH102_144,4, vetillas tipo A1 finas y discontinuas, también se observan vetillas tipo A2 en dacita. B) Fotomicrografía muestra DM-204 en Nicoles cruzados, 20x, vetilla A2 (en rojo) compuesta de cuarzo secundario (Qz), feldespato K (FK) y opacos (Op). C) Fotomicrografía muestra DM-204 en Nicoles p., 100x, mineralización compuesta de calcopirita (Cp) reemplazando en caries a pirita (Py). Elaboración propia..... 85
Figura 5.2: A) Muestra DM-217_DER146_955,8, PCO con vetillas tipo A3 de calcopirita-bornita. B) Muestra DM-211_DER137_337, con *stockwork* de vetillas A3, con calcopirita-bornita. C) Fotomicrografía de muestra DM-211 en nicoles c. 20x, de zona de vetillas tipo A3 con Op opacos, Qz cuarzo secundario, Mf masa fundamental, Plg plagioclasa, FK Feldespato pótasico. D) Fotomicrografía de muestra DM-211 en nicoles p., 100x mineralogía de vetillas

de calcopirita (Cp) con reemplazo en caries de bornita (Bo). E) Fotomicrografía de muestra DM-211 en Luz Reflejada en nicoles p., 200x, se observa bornita (Bo) en exsolución con calcosina primaria (Cc). Elaboración propia..... 86
Figura 5.3: Vetillas tipo A observadas en roca pórfido Rosario con alteración potásica de fondo. Elaboración propia. 87
Figura 5.4: Sondaje C161_335,1 Vetilla tipo B1 con molibdenita en paredes de vetilla, en PCO. B) Vetilla B3 con cuarzo euhedral y molibdenita en sutura, reutilizada por tipo D con precipitación de pirita, en dacita. C) Vetilla tipo B2 bandeada con molibdenita depositada en bandas a medida que evoluciona el fluido. D) Fotomicrografía Nicoles c., 20 x Muestra DM-215_DDHR151_986,45 a la izquierda vetilla con cuarzo secundario (Qz) y opacos (Op) cortando a fenocristales pseudomorfos de plagioclasa con reemplazo de sericita (Ser) y la masa fundamental sericitizada (Mf+Ser). E) Fotomicrografía muestra DM-215 Nicoles p.100x. mineralización en vetilla de calcopirita (Cp) con reemplazo en anillo de molibdenita. Nicoles Paralelos 100x. Elaboración propia. 90
Figura 5.5: Vetilla tipo B con reutilización de vetilla. Elaboración propia. 91
Figura 5.6: A) Muestra DM-206-_DDHR 173_523 conjunto de vetillas (A2) de hasta 0,5 mm compuestas de cuarzo secundario se muestran de manera sinuosa, discontinuas, y paralelas a vetilla (B1) de hasta 2,0 mm compuesta de cuarzo secundario y mineralizada con Mo>Cp; de manera sinuosa, discontinua, cortadas por vetilla (C) de sutura de hasta 1,2 mm compuesta de Cp, de forma sinuosa, discontinua, exhibiendo un halo de alteración de illita. B) Muestra de mano Fase 9 Banco 4075, con vetilla tipo C, con conservación de halos en PRO. C) Muestra DM-202_C288_217,5 vetillas tipo C compuestas de sutura de Py-Cp, con presencia menor de cuarzo secundario y exhibiendo un halo de alteración sericítica. D) Sondaje DDH515_256,4 m observan vetillas tipo C con desarrollo de halo y vetillas tipo D de pirita que las interceptan. Elaboración propia. 93
Figura 5.7: Vetillas tipo C con desarrollo de halo y mineralización Cp-Bo, Elaboración propia. 94
Figura 5.8: A) Fotomicrografía muestra DM-206_DDHR173_523,75 Se observa vetilla C (en rojo) compuesta de cuarzo secundario (Qz) y opacos (Op) cortando otros minerales, en masa fundamental con reemplazo de sericita Nicoles c. 20x.B) fotomicrografía muestra DM-202_C288_217,5 contacto entre vetilla B (en azul) cortada y desplazada por vetilla C (en rojo) Nicoles c .20x. Elaboración propia. 95

Figura 5.9: A) Fotomicrografía muestra DM-202 Se observa mineralización en vetilla C; de pirita (Py) con reemplazo de calcopirita (Cp) en caries, Nicoles p., 100x. B) Fotomicrografía muestra DM-216_DDHR151_1005,4 vetilla A (en azul) compuesta de cuarzo secundario y opacos (Op) cortada por vetilla C (en rojo) compuesta de cuarzo secundario de grano mayor (Qz) y opacos (Op); ambas cortando a masa fundamental con reemplazo de sericita (Mf+Ser), Nicoles c., 20x. C) Fotomicrografía muestra DM-216 vetilla C, de pirita (Py) con reemplazo de calcopirita (Cp) en anillo, a su vez, ésta con reemplazo en caries de bornita (Bo), 200x. D) Fotomicrografía muestra DM-216 de bornita (Bo) en exsolución con calcosina (Cc) 100x. Elaboración propia. 96

Figura 5.10: A) muestra de sondaje DDH102_144.5 m con vetilla tipo D que corta a sistemáticamente a vetilla tipo B1. B) Muestra de mano en F9 banco 4.100 vetillas tipo D con grueso desarrollo de halo de alteración y sutura de pirita en PCO. C) Sondaje DDHR173_300m. muestra de vetilla tipo D de pirita cortando en forma tangencial a vetilla tipo C, sinuosa discontinua y con Cp-Bo. D) Sondaje DDH260 tramo 266.5 m vetilla tipo D reutilizando a vetilla B3, asociado a alteración QS se genera halo de alteración. Estas vetillas a su vez están cortando a finas vetillas tipo A2. Elaboración propia. 97

Figura 5.11: A) Fotografía de muestra DM-195_C049_392,42, con distinta generación de vetillas. B) Fotomicrografía muestra DM-195_C049_392,42, se observa vetilla tipo D; compuesta de sutura de opacos (Op) y halo de sericita fina con opacos (Ser+Op), Nicoles c. 20x. C). Fotomicrografía muestra DM-195_C049 Se observa mineralización diseminada de pirita (Py) con reemplazo en anillo de calcopirita (Cp), Nicoles p. 100x. Elaboración propia. 98

Figura 5.12: Izquierda, vetillas tipo D con pirita y halo de sericita, a la derecha *stockwork* de vetillas tipo D con pirita, cuarzo y sericita. Elaboración propia. 99

Figura 5.13: A) Muestra de sondaje DDH146 con vetilla tipo E con un alto contenido de sulfuros como bornita, calcopirita y pirita, se encuentran sobreimpuestas a las demás vetillas. B) Muestra de mano DM-219_DDHR146_1122,95, con vetilla tipo E. C) Fotomicrografía muestra dm-219 se observa vetilla E compuesta de cuarzo secundario prismático (Qz) y opacos (Op)en sutura, con halo de sericita (Ser), nicoles c. 20x. D) Fotomicrografía a 100x de muestra DM-219, mineralización en vetilla de calcopirita (Cp) con reemplazo en caries de bornita (Bo). E) Fotomicrografía muestra DM-219 a 100x., de bornita primaria (Bo) con exsolución de calcosina primaria (Cc). F) Muestra DM-205_DDH102_310, con vetilla E de hasta 10,0 mm

compuesta de cuarzo secundario y mineralizada con cp>>mo>>esf; la cual se observa de manera lineal, continua y sin exhibir halo de alteración. G) Fotomicrografía muestra DM_205 20x, vetilla tipo D (en azul) compuesta de cuarzo secundario y opacos (Qz+Op), a su vez, cortada por vetilla E (en rojo) de cuarzo secundario (Qz) y opacos (Op). H) Fotomicrografía muestra DM_205, 100x, compuesta de calcopirita (Cp) con reemplazo de esfalerita (esf) en caries. Elaboración propia. 100
Figura 5.14: Vetilla tipo D sinuosa con Calcosina y presenta relación de corte con vetillas de cuarzo más tempranas. Elaboración propia. 101
Figura 5.15: Vetillas tipo Otras asociado a alteración propilitica en roca andesita. Elaboración propia. 102
Figura 5.16: A) Fotomicrografía muestra DM-202 a 20x, mineralización en vetilla A3; de pirita (Py) con reemplazo de calcopirita (Cp) en anillo. B) Fotomicrografía muestra DM-195 a 100x, mineralización diseminada de calcopirita (Cp) con reemplazo en caries de bornita (Bo), en vetilla A3. C) Fotomicrografía muestra DM-211 a 100 x. Se observa mineralización en vetillas A3 de bornita (Bo) en exsolución con calcosina primaria (Cc). D) Fotomicrografía muestra DM-197 a 100 x, mineralización en vetilla B1 de pirita (Py) con reemplazo en anillo de calcopirita (Cp), con reemplazo en caries de molibdenita (Mo). E) Fotomicrografía muestra DM-203 a 100x, vetilla A, compuesta de pirita con reemplazo en caries de calcopirita (Py+Cp); cortada transversalmente por mineralización en vetilla B3, compuesta de calcopirita (Cp) con reemplazo en caries de molibdenita (Mo). F) Fotomicrografía muestra DM-195 a 200x mineralización en vetilla tipo C de pirita (Py) con reemplazo de calcopirita (Cp) en anillo, a su vez, ésta con reemplazo en caries de bornita (Bo). Elaboración propia..... 106
Figura 5.17: A) Fotomicrografía muestra DM-208 a 100x, de mineralización en vetilla tipo C de pirita (Py) con reemplazo de calcopirita (Cp) en anillo, a su vez, ésta con reemplazo en caries de bornita (Bo).B) Fotomicrografía muestra DM-213 a 100x, compuesta de pirita (Py), con reemplazo en caries de calcopirita (Cp); ambas reemplazadas en caries por bornita (Bo) en vetilla C. C) Fotomicrografía muestra DM-195, a 100x. Se observa mineralización en vetilla C de pirita (Py) con reemplazo en caries y debilidades de bornita en exsolución con calcosina primaria (Bo+Cc); presencia local de calcopirita (Cp). D) Fotomicrografía muestra DM-201 a 100x, se observa mineralización en vetilla E de pirita (Py), con reemplazo en anillo de calcopirita (Cp); ésta, a su vez, reemplazada por esfalerita (Esf) en caries, minerales de asociación tardía. Elaboración propia. 107

Figura 5.18: Gráfica de leyes medias de Cobre para vetillas dominantes. Elaboración propia. 111
Figura 5.19: Gráfica de Cobre con vetillas subordinadas. Elaboración propia. 112
Figura 5.20: Gráfica de leyes de Molibdeno con vetilla dominante. Elaboración propia. ... 113
Figura 5.21: Gráfica de leyes de molibdeno en vetilla subordinada. Elaboración propia. 114
Figura 5.22: Gráfica de leyes de Fierro con vetilla dominante. Elaboración propia. 115
Figura 5.23: Gráfica de leyes de Fierro con vetilla subordinada. Elaboración propia. 115
Figura 5.24: Gráfica de leyes de Arsénico en vetillas dominantes. Elaboración propia. 116
Figura 5.25: Gráfica leyes de Arsénico en vetilla subordinada. Elaboración propia. 117
Figura 5.26: Gráfica leyes de Oro, a la izquierda en vetilla dominante y a la derecha en vetilla subordinada. Elaboración propia..... 118
Figura 5.27: Gráfica leyes de Plata, a la izquierda en vetilla dominante y a la derecha en vetilla subordinada. Elaboración propia..... 118
Figura 5.28: Gráfico circular de distribución de tipos de vetillas. Elaboración propia. 119
Figura 5.29: Gráfico circular de tipos de alteración versus vetilla dominante. Elaboración propia. 121
Figura 5.30: Gráfico de barras de la distribución en porcentaje de tipo de vetilla dominante versus alteración. Elaboración propia. 122
Figura 5.31: Gráfica circular de vetillas subordinadas con alteraciones. Elaboración propia. 123
Figura 5.32: Gráfica de barras de alteración con vetilla subordinada. Elaboración propia. . 124
Figura 5.33: Gráfico circular de vetilla dominante con litología. Elaboración propia..... 125
Figura 5.34: Gráfica de barras de litología con vetilla dominante. Elaboración propia..... 126
Figura 5.35: Gráfico circular de vetillas subordinadas con litología. Elaboración propia. ... 126
Figura 5.36: Gráfica de barras litología versus vetillas subordinadas. Elaboración propia. . 127
Figura 5.37: Gráfica de barras de tipo de alteración con vetilla dominante. Elaboración propia. 128
Figura 5.38:Gráfica de zona mineral con vetillas subordinadas. Elaboración propia. 129
Figura 5.39: Secciones tipo, representando tipo de vetilla dominante. Elaboración propia. 131
Figura 5.40: Representación gráfica de plantas seleccionadas en base a vetillas dominantes. Elaboración Propia. 133

Figura 5.41: A la izquierda se observa el *pitshell* de vetillas representado solo por las tipo A, B, C, D y E. La imagen de la derecha incorpora las zonas con alteraciones no relacionadas a vetillas como es Skarn, Hornfels, Propilítica y UNK. Elaboración propia. 134
Figura 5.42: Vista de planta de sólidos de vetillas modelados y fallas principales que condicionan el emplazamiento de los pórfidos. Elaboración propia. 140
Figura 5.43: Perfil 13NW, sección con sondajes con vetilla dominante y sólidos generados por modelamiento. Elaboración propia. 142
Figura 5.44: Perfil 13NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento y sólidos litológicos PCO pórfido Collahuasi y PRO pórfido Rosario. Elaboración propia. 142
Figura 5.45: Perfil 15NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento. Elaboración propia. 143
Figura 5.46: Perfil 15NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento, y iso leyes de Cu a leyes > 1.1%, >1.2% y >1.5%. Se identifica una clara correlación entre el sólido de vetillas tipo C y iso leyes de cobre. Elaboración propia. 144
Figura 5.47: Perfil 15 NW, comparación visual entre sólidos de vetillas y envolventes de Mo, se destaca contorno de sólido de vetillas tipo B. Elaboración propia. 145
Figura 5.48: Perfil 20NW, sección con sondajes con vetilla dominante y sólidos generados por modelamiento. Elaboración propia. 146
Figura 5.49: Perfil 20NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento de vetillas y sólidos litológicos de PRO y PCO, para comprender mejor se marca contorno sólido vetillas tipo C y de pórfidos. Elaboración propia. 146
Figura 5.50: Perfil 20NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento y iso leyes de Cu. Elaboración propia. 147
Figura 5.51: Perfil 20NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento de vetillas y envolventes de molibdeno, para una mejor visualización se destaca contorno de cuerpo vetillas tipo B. Elaboración propia. 147
Figura 5.52: Perfil 24NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento de vetillas. Elaboración propia. 148
Figura 5.53: Perfil 29NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento. Elaboración propia. 149

Figura 6.1: Resumen de orientaciones de vetillas en Rosario, mediante representación estereográfica, diagrama de rosas y planos de orientación de vetillas. Recopilación de los datos de Masterman y otros (2005) y Lee (1994) contrastado con los datos obtenidos por Ireland (2010). Modificado de Ireland (2010)..... 153

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Clasificación de vetillas hidrotermales, según las etapas. Modificado de procedimiento de mapeo geológico CMDIC (2015)..... 61
Tabla 4.1: Sondajes Analizados..... 65
Tabla 4.2: Tramos de sondajes para análisis Qa/Qc. 68
Tabla 4.3: Confianza asignada a los datos según distancia al dato original..... 74
Tabla 4.4: Metros de sondajes ignorados..... 79
Tabla 4.5: Abreviaciones utilizadas..... 83
Tabla 5.1: Cronología de vetillas. 108
Tabla 5.2: Formato Tabla Collar..... 135
Tabla 5.3: Formato Tabla Survey. 135
Tabla 5.4: Formato Tabla parámetro vetillas. 136
Tabla 5.5: Formato Tabla parámetros geológicos..... 136
Tabla 5.6: Formato Tabla parámetros Geotécnicos. 137
Tabla 5.7: Volúmenes y áreas de sólidos de vetillas dominantes. 141

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

La siguiente memoria se desarrolló en Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi S.C.M. (CMDIC), donde el producto principal de exportación es el concentrado de cobre, mientras que el molibdeno es el subproducto más importante. Los yacimientos principales de la zona Rosario y Ujina, los que corresponden a pórfidos de Cu-Mo.

El área de estudio correspondió al yacimiento tipo pórfido Cu-Mo denominado Rosario, localizado en el Distrito Collahuasi, región de Tarapacá. El depósito cuenta con un amplio desarrollo de alteración hidrotermal y superposición de eventos (*telescoping*). Estas características intrínsecas a la génesis del yacimiento generan incertidumbre en la distribución espacial de las distintas alteraciones, es por esta razón que la caracterización y modelamiento 3D de las vetillas en Rosario, puede ayudar a mejorar la definición de los dominios geológicos con los cuales se modela la alteración hidrotermal en el yacimiento.

El objetivo principal de esta tesis es generar un modelo en 3D de las vetillas mediante el uso de *software* de modelamiento *Leapfrog Geo* para determinar zonificación y distribución. Los objetivos específicos se centran en establecer la relación de temporalidad de las vetillas y la secuencia de precipitación de las principales menas. Las metodologías que se aplicaron para la investigación se centraron en: revisión bibliográfica del distrito para determinar antecedentes teóricos, identificación en la base de datos histórica los sondajes a estudiar, análisis de base de datos históricos de estudios de microscopía óptica, mapeo de sondajes, mapeo de bancos y análisis de muestras por microscopía óptica. A partir de la información obtenida se realizó una integración e interpretación de los datos con el fin de generar el modelamiento de las vetillas en 3D mediante *Leapfrog Geo*.

1.2. Hipótesis

En este estudio se hipotetiza que en el yacimiento Rosario se desarrollan dos ambientes geológicos: tipo pórfido y epitermal de alta sulfidización, en cada uno de ellos los sistemas de vetillas presentan zonificaciones características. El pórfido Rosario (34 Ma.) sería el responsable del desarrollo de la fase hidrotermal, por ende, las vetillas asociadas presentan relaciones cronológicas y espaciales estrechamente relacionadas a este cuerpo porfídico.

Debido a la relación genética de las vetillas con otros parámetros como *RQD*, litología, alteración, leyes y zona mineral, el análisis de la distribución de vetillas será crucial para poder predecir estos aspectos en las diferentes zonas del yacimiento. Además, se espera la ocurrencia de las clásicas vetillas tipo EB, A, B y D descritas previamente por Gustafson y Hunt (1975), vetillas tipo C definidas por Dilles y Einaudi (1992) y finalmente, vetillas tipo E descritas por Masterman y otros (2005).

1.3. Problemática

La alteración hidrotermal se define como la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas debido a un cambio en las condiciones ambientales, debido a la presencia de fluidos hidrotermales que interactúan con la roca mediante permeabilidad primaria y secundaria, esta última ligada al desarrollo de vetillas en sistemas hidrotermales. El área de estudio se centra en el yacimiento tipo Pórfido de Cu-Mo denominado Rosario, ubicado en la región de Tarapacá. El depósito presenta un marcado control estructural local dado por las fallas Rosario, Pique y Última con rumbo NW y manteos entre 30-40° al SW. Dichas estructuras controlan tanto el emplazamiento del pórfido, mineralización, distribución y superposición de alteración hidrotermal. Estas características intrínsecas del depósito generan incertidumbre en el modelamiento de las alteraciones, por lo que mediante la caracterización y modelamiento 3D del sistema

de vetillas, se generó una base de datos con los patrones de distribución y zonificación espacial para favorecer el proceso de modelamiento de las alteraciones asociadas.

Como es conocido en el modelo clásico de pórfidos cupríferos descrito por Sillitoe (2010), las alteraciones hidrotermales siguen patrones típicos de zonificación, paragénesis minerales y vetillas altamente distintivas, estas últimas caracterizadas por una secuencia temporal típica.

La presencia de sistemas estructurales, sumado al emplazamiento de múltiples pulsos magmáticos provoca una extrema superposición de eventos hidrotermales en estos yacimientos, ya que las estructuras desplazan y favorecen el ascenso de fluidos hidrotermales a zonas someras generando *telescoping.*

Gustafson y Hunt (1975) proporcionan una visión más dinámica de un sistema de tipo pórfido cuprífero, en comparación al modelo estático de Lowell y Gilbert (1970), al separar tres etapas en el desarrollo de los procesos de alteración-mineralización del yacimiento Salvador. Gustafson y Hunt (*op. cit.*) son los primeros en describir el sistema de vetillas asociadas a las distintas etapas de alteración hidrotermal. Por lo que el análisis sistemático de las vetillas presentes en las distintas etapas del sistema porfídico es muy importante para poder comprender el desarrollo de las distintas etapas de alteración hidrotermal.

Para el modelamiento se genera una nueva base de datos de vetillas centrándose en los tipos EB, A, B, C, D y E.

Los alcances esperados de la investigación apuntan a aumentar el conocimiento geológico, distribución y zonación del sistema de vetillas asociada a la alteración que afecta al yacimiento Rosario.

1.4. Objetivo General

- Modelar la geometría y distribución de las vetillas en el yacimiento Rosario mediante *software Leapfrog Geo*.

1.5. Objetivos Específicos

- Definir los tipos y subtipos de vetillas presentes en el yacimiento mediante las asociaciones minerales que las componen.
- Establecer la cronología relativa de emplazamiento de vetillas y depositación de menas.
- Determinar la orientación preferencial de las vetillas en el yacimiento.
- Definir las zonas ricas en molibdeno mediante la distribución de vetillas B.

1.6. Área de estudio

El distrito Collahuasi está localizado en el altiplano de la Región de Tarapacá, Chile, en las coordenadas 20°58’ S y 68°43’ W, abarca un área de 1200 km^2, aproximadamente a unos 170 km al Sureste de la ciudad de Iquique. Se localiza geográficamente en la cordillera de Domeyko a elevaciones que varían entre los 4.200 y 4.900 ms.n.m. El área de estudio se enfoca en el yacimiento Rosario, ubicado entre las coordenadas 7.681.250 N / 530.000 E y 7.680.250 N / 531.250 E (Figura 1.1).

Desde la ciudad de Iquique, se accede a faena Collahuasi por la ruta 16, se toma el empalme con la ruta 5 norte, en dirección sur por cerca de 7 km, hasta llegar de Pozo Almonte, donde se sigue la ruta A–65 por aproximadamente 14 km hasta el cruce con la ruta A–687, se recorren 174 km hasta llegar a la garita de Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

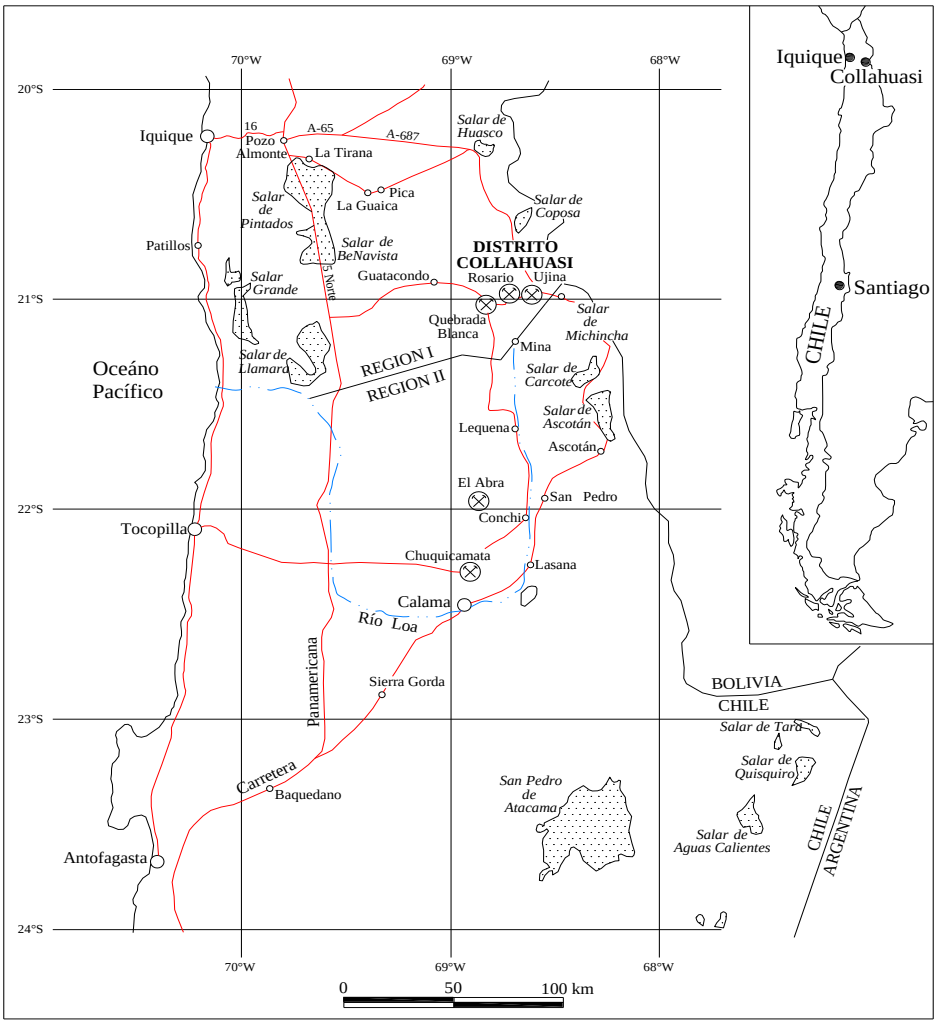

Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos del área de estudio. Extraído de Muñoz (2009).

1.7. Trabajos anteriores

Vergara (1978) realizó el levantamiento geológico del “Cuadrángulo Ujina” escala 1:50.000, de la Carta Geológica de Chile. Se describieron rocas estratificadas volcánicas, depositadas entre el Cretácico inferior y Cenozoico.

Münchmeyer y otros (1984), definieron unidades estratigráficas informales y los principales prospectos, además realizaron dataciones radiométricas y recopilación de antecedentes estructurales del distrito.

Vergara y Thomas (1984), publicaron la “Hoja Cochalgua” escala 1:250.000, de la Carta Geológica de Chile. En ella se redefinió la edad y litología de la Formación Collahuasi, definida anteriormente por Vergara (1978).

Lee (1994) estudió la evolución del depósito Rosario y el sistema asociado de vetas del distrito de Collahuasi, analizando las orientaciones de los sistemas de vetillas principales medidos en laboreos subterráneos antiguos.

Dick y otros (1994), describieron el emplazamiento geológico y estructural del sistema de vetas Cu-Ag-(As) de Rosario, además de la mineralogía, paragénesis y geoquímica de las vetas y su relación con la mineralización diseminada en el distrito Collahuasi.

Munizaga (1995), presentó como informe interno a la compañía “Edades ^{40}Ar-^{39}Ar, distrito Minero Collahuasi”. Estudió los stocks porfídicos Rosario, Ujina, Inca, Inés y Collahuasi, con el fin de mejorar la geocronología de los eventos intrusivos de los yacimientos Ujina y Rosario.

Bisso y otros (1998), caracterizaron la geología de los depósitos Rosario y Ujina, presentan modelos de formación para cada uno, destacando los factores que regularon el desarrollo de cada yacimiento.

Masterman (2003), estudió la evolución estructural y geoquímica del sistema magmático-hidrotermal presente en el yacimiento Rosario. Para esto, se analizó la arquitectura del basamento y marco tectónico, determinando la evolución petrogenética del magmatismo dentro del distrito, y estableciendo un modelo de mineralización para el depósito.

Masterman y otros (2004), realizaron un estudio geocronológico mediante $^{40}Ar/^{39}Ar$ y Re-Os, de los depósitos porfídicos de Rosario y Ujina y su relación con el sistema de vetas de Cu-Ag de Rosario.

Masterman y otros (2005), efectuaron un estudio del emplazamiento estructural y geoquímico de los fluidos, mediante inclusiones fluidas, del pórfido de Cu-Mo Rosario y del sistema epitermal asociado de vetas de Cu-Ag-Au.

Munizaga y otros (2008), realizaron consideraciones acerca del magmatismo Paleozoico tardío – Triásico temprano en el área de Collahuasi. Estos autores indicaron el ambiente tectónico en el cual se habrían depositado las rocas volcánicas de la Formación Collahuasi.

Muñoz (2009), estudió la caracterización petrográfica de las diferentes unidades presentes en Rosario Oeste, definió el estilo del depósito y la ocurrencia de la mineralización asociada, además estableció la relación entre la geología de Rosario Oeste con la que ha sido reconocida en trabajos anteriores para el sector SW del rajo Rosario.

Oyarzún (2010), realizó una caracterización estructural del yacimiento Rosario Oeste y su control sobre la mineralización de Cu-Ag-(Au) y As.

Baker y otros (2010) estudiaron la variación de los isotopos de Talio en la Formación Collahuasi, concluyendo que los cambios en la concentración están gobernados principalmente por reacciones hidrotermales que destruyen las fases ricas en K y Rb.

Avalos (2019), estudió la petrografía de las inclusiones fluidas en el yacimiento Rosario, para determinar parámetros para la exploración, con esta investigación determinó que existen al menos dos pulsos mineralizadores en el yacimiento.

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Marco Geotectónico

La orogénesis andina se remonta al Jurásico, evidenciada por la migración progresiva del arco magmático hacia el este, con un desplazamiento total de 300 km desde la costa hasta su posición actual. Generando que la mayoría de los depósitos minerales chilenos se agrupen en franjas metalogenéticas de dirección N-S entre los 42-32 Ma (Camus, 2003).

Según Ramos (2009), el margen continental chileno se formó en etapas, la evolución va desde períodos con subducción activa y acreción de terrenos en el Paleozoico medio y superior, a un margen de subducción tipo Mariana en el Mesozoico, para luego evolucionar a tipo Chileno en el Cretácico superior, causado por la apertura del océano Atlántico y se mantiene este régimen hasta la actualidad.

2.1.1. Paleozoico

Ramos (2010) afirmó que en el súper continente Gondwana, se han interpretado múltiples acreciones de terrenos en el margen oeste donde se encuentra Chile, como es el caso de Arequipa en el Proterozoico superior, que se instaura como margen pasivo durante el Cámbrico al Ordovícico inferior, en el Ordovícico superior al Silúrico, se activó la subducción formando un prisma de acreción, seguido por el choque del *terrane* Chilenia en el Devónico medio a superior.

El modelo propuesto por Charrier y otros (2007) indica que, en el Pérmico se reactivó la subducción bajo los *terranes* antes mencionados, formando un arco magmático Permo-Triásico con cuenca de trasarco asociada. Estos depósitos forman parte del basamento cristalino en la actual cordillera Domeyko.

2.1.2. Mesozoico

Se establece un régimen extensional en el Triásico 245 a 208 Ma. (Masterman, 2003) dando paso a la formación de *Rift* continentales en las suturas de los *terranes*. En el Jurásico medio a Cretácico inferior la convergencia oblicua provoca un régimen transtensional. El magmatismo continental se emplaza en la cordillera de la Costa generando la Formación La Negra, con una extensa cuenca de trasarco asociada como la cuenca ensiálica de Tarapacá (Charrier y otros, 2007). La fase Araucana (compresiva) genera un ambiente de transtensión, basculando a las unidades y formando cuencas volcano-tectónicas que son rellenadas por sedimentos clásticos de la erosión del trasarco (Charrier y otros, 2007). El arco magmático migró hacia el este en el Cretácico, luego de un cambio en el ángulo de subducción a tipo Chilena, iniciándose la fase peruana que produce inversión tectónica de la cuenca de trasarco alzando la zona de la cuenca Tarapacá y transformándola en un elemento positivo del relieve protocordillera de Domeyko (Ramos, 2010).

2.1.3. Cenozoico

Según Charrier y otros (2007) la sedimentación continental y el volcanismo menor asociados con el arco del Cretácico continuaron en el norte de Chile hasta el Eoceno temprano. El magmatismo se desplaza hacia el este desde el arco del Cretácico hasta debajo de la cordillera de Domeyko. Asociado a la fase deformativa Incaica, generando el plegamiento de los depósitos de antepaís. Coincide con un máximo en la tasa de convergencia asociada a una considerable reducción de la oblicuidad de convergencia a los 45 Ma (Charrier y otros, 2007).

Las cuencas de trasarco son invertidas (protocordillera de Domeyko) en un segundo pulso tectónico fase Incaica que produce el alzamiento final. Durante el Cenozoico, el sistema de Fallas Domeyko es reactivada como una estructura transcurrente y se

emplazaron los yacimientos de pórfidos de cobre más grandes del mundo (Camus, 2003). El volcanismo cesó hacia finales del Eoceno, con un hiato volcánico, hasta la erupción de ignimbritas del Mioceno (Mpodozis y Ramos, 2008). El cese del vulcanismo andino central entre ~ 50 Ma. y 27 Ma., se atribuye a la subducción de una sección de losa plana bajo el sur de Perú y el norte de Chile. La intrusión de magmas félsicos a intermedios asociados con la mineralización pórfidos de Cu del Eoceno superior – Oligoceno, ocurrió durante el hiato volcánico (Ramos, 2010). El frente volcánico del Mioceno se ensanchó hacia el oeste a través del Altiplano boliviano hasta la posición actual del arco volcánico (Camus, 2003).

2.2. Depósitos tipo pórfido cuprífero

Los depósitos tipo pórfido cuprífero se caracterizan por generar grandes volúmenes de roca influenciada por la alteración hidrotermal que puede abarcar volúmenes de roca entre 10 a 100 km^3, donde las zonas más profundas pueden contener depósitos tipo pórfido de Cu ± Mo ± Au de tamaño variable. El grado de mineralización típico de la zona hipógena varía en promedio de 0.5 a 1.5 % de Cu, <0.01 a 0.04 % de Mo, y 0.0 a 1.5 g/t de Au, donde la mineralización se encuentra de forma diseminada, en vetillas hidrotermales y brechas relacionadas a intrusiones porfídicas graníticas (Sillitoe, 2010; Singer y otros, 2002). Por lo general, estos depósitos se forman en márgenes de placas convergentes y vienen acompañados de varios pulsos magmáticos. Los yacimientos tipo pórfido tienen un origen magmático-hidrotermal, suelen encontrarse relacionados a yacimientos locales como skarn y epitermales de alta o baja sulfidización (Sillitoe, 2010).

En Chile, están asociados a los ciclos Gondwánico y Andino, pero los más importantes se encuentran relacionados al último ciclo mencionado, en la franja metalogenética del Oligoceno-Eoceno, ubicados temporalmente luego de la fase Incaica. Las principales menas de cobre hipógenas son calcopirita, bornita, calcosina, enargita y digenita,

mientras que en las supérgenas se identifican calcosina, covelina, crisocola, malaquita, azurita y cobre nativo (Sillitoe, 2010; Singer y otros, 2002).

2.2.1. Configuración tectónica

Como se menciona con anterioridad, los depósitos tipo pórfido se relacionan a arcos magmáticos y cinturones orogénicos, el ambiente tectónico, tiene un rol importante en el emplazamiento de los yacimientos tipo pórfidos. Las condiciones que favorecen su formación son condiciones de compresión a escala regional y con convergencia oblicua.

El ambiente fuertemente extensional, caracterizado por magmatismo basáltico-riolita de composición bimodal, carecen de sistemas significativos de Cu pórfido. El régimen de estrés depende, entre otros factores, del tipo de *rollback* y el grado de oblicuidad del vector de convergencia de la placa (Sillitoe, 2010; Coocke y otros, 2005; Tosdal y Richards, 2001; Camus, 2003).

Según Sillitoe (2010) “Existe una relación empírica prominente entre los entornos ampliamente contraccionales, marcados por el engrosamiento de la corteza, el levantamiento de la superficie y la exhumación rápida, y los depósitos de Cu del pórfido hipógeno de alto grado” (p.6). Lo anteriormente mencionado promueve la formación de cámaras magmáticas y ascensos de fundidos a partir de éstas, favoreciendo la existencia de fluidos multifásicos con temperaturas y composiciones propicias para formar depósitos tipo pórfido (Sillitoe, 2010; Avalos, 2019).

Los cuerpos con características tipo pórfido se forman entre 0 a 10 km de profundidad desde la paleosuperficie, siendo usual hallarlos entre 1 y 6 km de profundidad con una forma-extensión pseudo-cilíndrica (Figura 2.1) (Sillitoe, 2010; Avalos, 2019).

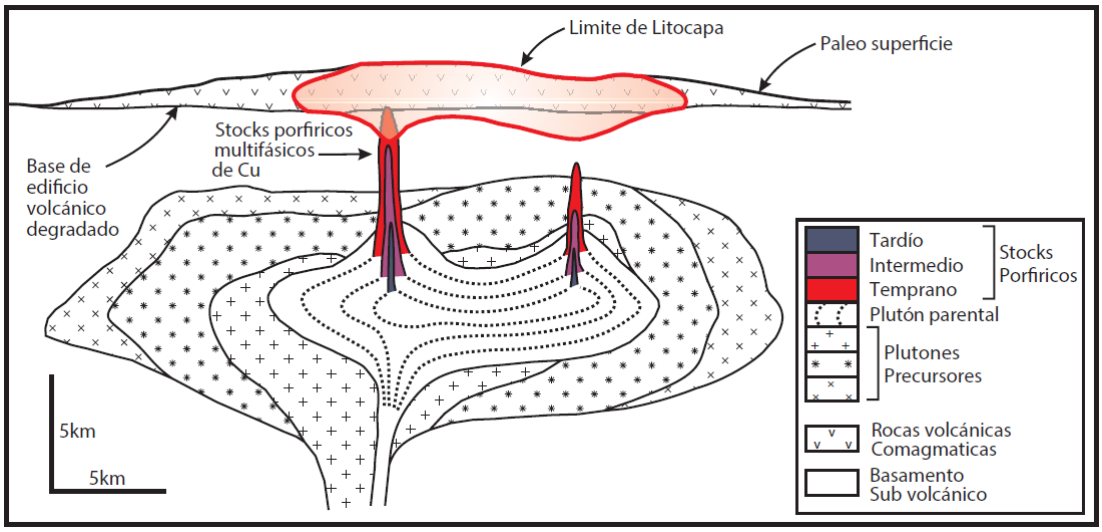

Figura 2.1: Se ilustra la relación espacial entre stocks porfídicos, plutón subyacente, rocas volcánicas suprayacente y el *lithocap*. Tomado de Sillitoe (2010).

2.2.2. Escala del depósito

La mineralización de interés en un depósito tipo pórfido cuprífero se concentra en la parte central y profunda del cuerpo (Figura 2.1), la geometría descrita por Sillitoe (2010), es un modelo ideal donde la intrusión tiene una forma vertical y pseudo cilíndrica, pero esto puede variar según la geometría de la intrusión, roca de caja, estructuras, diques, fallas y eventos posteriores.

Sillitoe (2010) afirma “La forma de cualquier pórfido de Cu puede sufrir una modificación significativa como resultado del emplazamiento de volúmenes de roca tardíos y post minerales” (p.15). Esto puede provocar tanto un aumento de mineralización por eventos posteriores ricos en metales, un truncamiento de la mineralización debido a una intrusión tardía pobre en metales o un desplazamiento del cuerpo principal por una falla post mineral, en general las condiciones a las cuales es sometido el pórfido inicial dependen de factores geológicos locales. Es común observar sobreimposición de eventos de alteración como mineralización denominado proceso

de *telescoping*, la cual produce cambios fisicoquímicos en los minerales hidrotermales previamente formados Sillitoe (2010).

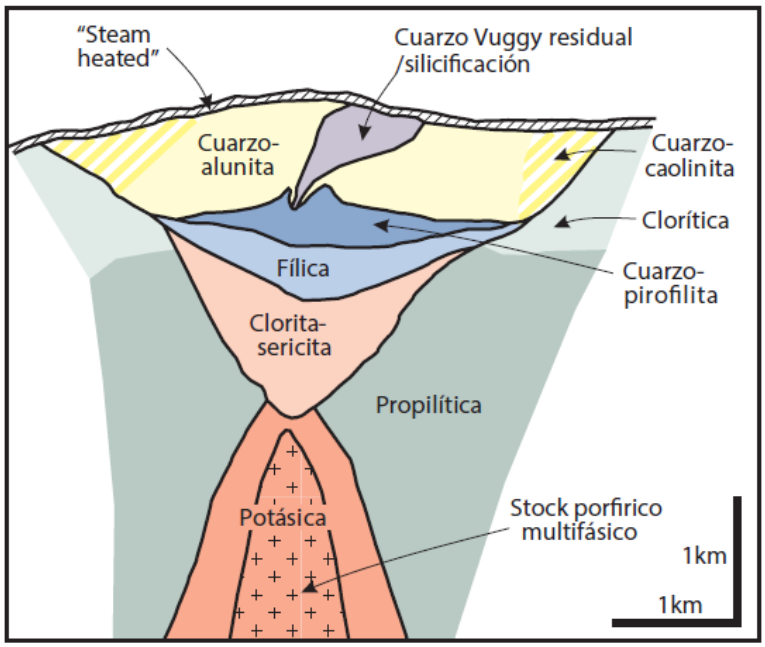

Figura 2.2: Patrón de zonación ideal de la alteración en un sistema pórfido cuprífero, el cual no ha sufrido una sobre imposición. Modificado de Sillitoe (2010).

En las Figuras 2.2 tomada de Sillitoe (2010) se puede observar el modelo clásico de alteración sin superposición de eventos, mientras que en la Figura 2.3 se observa una superposición de eventos con un aumento en las zonas de interacción de las alteraciones, el grado de alteración dependerá de las condiciones fisicoquímicas de la roca.

2.2.3. Alteración y mineralización

Según Singer y otros (2002) el volumen de roca afectado por la alteración hidrotermal puede alcanzar un promedio de 9 km^2, mientras que el área con sulfuros alcanza en

promedio 7.4 km^2, es decir, que grandes volúmenes de roca resultan afectados. Sillitoe (2010), define nuevos modelos de alteración de las Figuras 2.2 y 2.3, en comparación

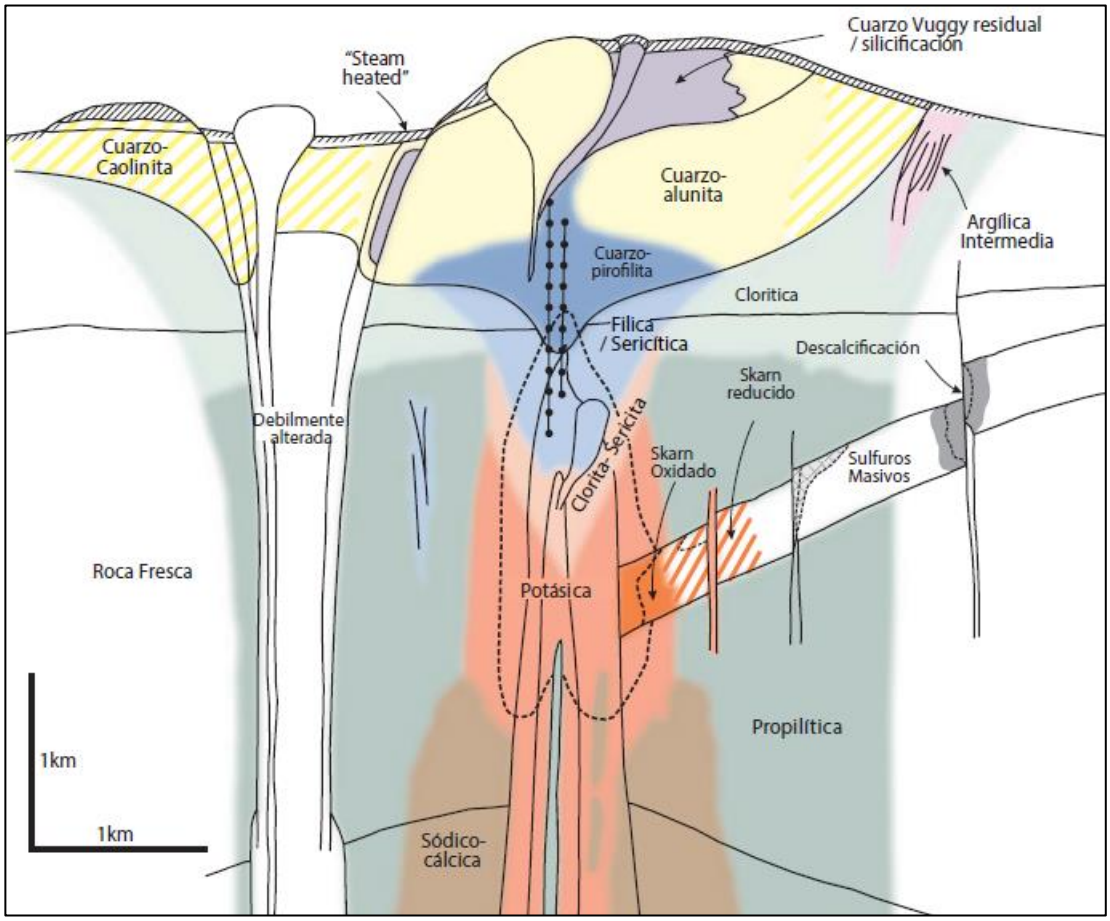

Figura 2.3: Modelo esquemático del patrón de zonación de las alteraciones presentes en un sitema pórfido cuprifero que ha sufrido *telescoping*. El modelo se encuentra basado en una distribución litológica en particular, por lo que el tamaño y distribución de estas alteraciones suele variar de un depósito a otro. Modificado de Sillitoe (2010).

con el modelo de Lowell y Gilbert (1970), donde identifica una clara zonación vertical de las alteraciones, las cuales se vuelven más jóvenes a techo, también se puede relacionar esto a la evolución de la mineralización. Los fluidos hidrotermales circulan debido a la porosidad y permeabilidad de la roca, esta última se puede separar en

primaria, dada por las características de la roca y secundaria, favorecida por las discontinuidades y fracturas de la roca.
En su paso se generan distintas alteraciones hidrotermales en la zona de interacción con las rocas de caja, el grado de alteración depende las características del fluido y la roca según factores fisicoquímicos tales como su composición, pH y su temperatura (Sillitoe, 2010).

Lowell y Gilbert (1970) realizaron una clasificación de los tipos de alteración hidrotermal, modificada posteriormente para relacionarlas con los tipos de vetillas propuestos por Gustafson y Hunt (1975).

La alteración potásica se caracteriza por la formación de feldespato potásico, biotita y menas como calcopirita y bornita, va seguida de una alteración de clorita-sericita con calcopirita-pirita-bornita, posteriormente de una alteración sericítica caracterizada por cuarzo, sericita y pirita, terminando en una alteración tardía argílica, donde el fluido tiene un grado de acidez mayor provocando la formación de arcillas principalmente, como se observa en la Figura 2.4. Como se comenta, posteriormente la secuencia puede ser modificada por eventos de *telescoping* (Sillitoe, 2010).

A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de las alteraciones descritas anteriormente, basadas en Sillitoe (2010) y Singer y otros (2002). La Figura 2.3 ilustra la disposición espacial de éstas.

2.2.3.1. Alteración calco-sódica
Usualmente ubicada la porción más profunda del cuerpo, aunque es posible encontrar desarrollos a lo largo de los flancos del sistema porfídico. Caracterizada por una alteración alcalina que genera un enriquecimiento de Na y/o Ca en los minerales, usualmente las plagioclasas se enriquecen en Na mientras que las micas potásicas se enriquecen en Ca-Mg-Fe. Los minerales característicos son plagioclasas sódicas,

actinolita, clorita, epidota, titanita, piroxenos cálcicos y se observan vetillas tipo M (Sillitoe, 2010; Singer y otros 2002).

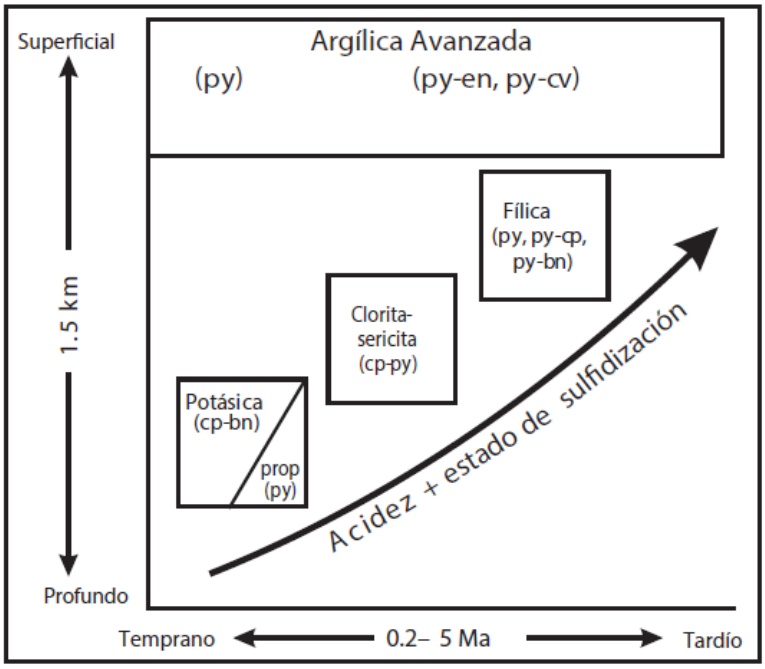

Figura 2.4: Representación gráfica de las secuencias de alteración- mineralización, para un sistema tipo pórfido, donde se relaciona la profundidad y la temporalidad de los eventos, este gráfico no toma encuentra una posible superposición. Modificado de Sillitoe (2010).

2.2.3.2. Alteración potásica

Se identifica en la zona central y profunda del sistema, asociado a mineralización de sulfuros de altas temperaturas. Caracterizadas por la presencia de stock de vetillas ricas en cuarzo tipo A, B y transicionales AB. Presenta feldespato potásico o biotita dependiendo de la composición de la roca caja. Los minerales característicos son feldespato potásico y/o biotita predominante, además se observa bornita, calcopirita, pirita, magnetita y actinolita (Sillitoe, 2010; Singer y otros 2002).

2.2.3.3. Alteración propilítica

Ubicada en la parte periférica del sistema bajo el *lithocap* (zona de alteración argílica avanzada). La roca se caracteriza por la presencia de minerales hidratados y no precisa de tipo de vetilla. Los minerales característicos: clorita, epidota, albita, carbonatos, junto con actinolita, hematita y pirita (Sillitoe, 2010; Singer y otros 2002).

2.2.3.4. Alteración clorita-sericítica

Este tipo de alteración cuenta con poca información, pero comúnmente se desarrolla en la parte superior de la zona central del sistema porfídico, caracterizada por vetillas tipo C con clorita-sericita y presencia de sulfuros como calcopirita, bornita y pirita. Los minerales característicos son clorita, sericita-illita y hematita tanto especular como martirizada (Sillitoe, 2010; Singer y otros 2002).

2.2.3.5. Alteración cuarzo-sericítica o fílica

Se ubica en la porción superior del pórfido cuprífero, caracterizada con vetillas de cuarzo-sericita y es posible encontrarla con stock de vetillas tipo D. Puede ser muy pervasiva logrando abarcar hasta $1km^3$ de roca, generando un reemplazo masivo en las rocas por minerales micáceos, principalmente, sericita. En ocasiones genera una posible zona de interés cuprífera, si las condiciones químicas favorecen la removilización de parte del cobre de las zonas potásicas y clorita-sericita, el cual precipita en las caras de los cristales de pirita generando la mineralización en forma de patinas. Los minerales característicos son cuarzo y sericita, con o sin hematita especular, pirita y/o calcopirita (Sillitoe, 2010; Singer y otros 2002).

2.2.3.6. Alteración argílica intermedia y argílica avanzada

Este tipo de alteración se caracteriza por remover los cationes alcalinos, y según la temperatura y grado de hidrólisis - lixiviación que sufra la roca, desarrolla una alteración argílica intermedia o argílica avanzada. La primera suele darse a temperaturas más bajas, pero con pH altos, caracterizándose por la presencia caolinita,

esmectita, incluso puede presentar pirita, mientras que la argílica avanzada ocurre a mayor temperatura y a iguales o menor pH y puede llegar a una lixiviación intensa de la roca dejando solo cuarzo residual o *"Vuggy",* eventualmente si no es el caso puede hallarse alunita, jarosita, kaolinita, pirofilita, dickita (Sillitoe, 2010; Singer y otros 2002).

2.2.4. Vetillas hidrotermales

Según las descripciones de Gustafson y Hunt (1975), una vetilla se puede definir como una estructura planar formada en una zona de micro debilidad cortical, la cual es rellena en general por minerales hidrotermales.

Los elementos que caracterizan a la vetilla son su traza, relleno, sutura, interface y halo (ver Figura 2.5). Éstos se definen a continuación:

Material de relleno

Conjunto de minerales que sellan la estructura. Éste define el espesor y la resistencia relativa de la vetilla. El espesor puede variar de menos de 1 mm a mayores de 20 mm.

Sutura

Parte del relleno, generalmente de minerales más blandos que el resto de la vetilla. Corresponde a una heterogeneidad orientada dentro de la vetilla y no todas las vetillas la poseen.

Interface

Corresponde a la zona de contacto entre el relleno y la roca caja, ya sea fresca o alterada.

Halo de alteración

Zona de la roca caja próxima al relleno, la cual ha sido alterada debido a cambios químicos durante de la acción de los fluidos hidrotermales que generaron a la vetilla. Su potencia puede variar a lo largo de la vetilla. Según su geometría pueden ser simples y dobles o complejos.

Traza de la vetilla

Superficie imaginaria que pasa por el centro de la vetilla, la cual puede ser recta o sinuosa.

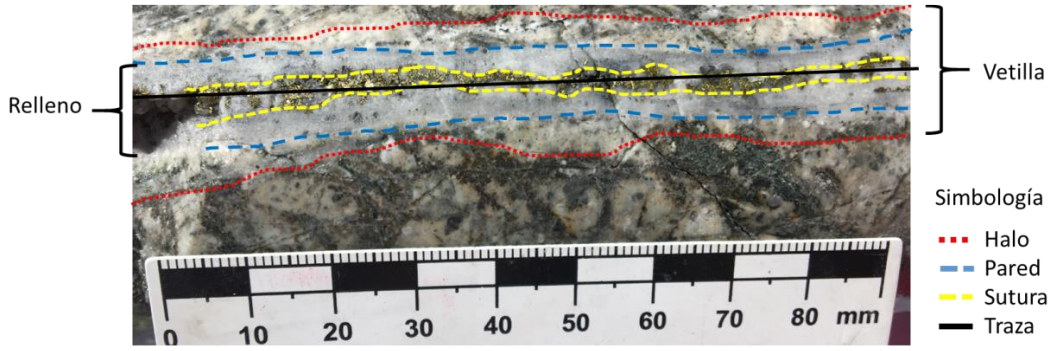

Figura 2.5: Esquematización de las partes de una vetilla, elaboración propia.

En los yacimientos tipo pórfido, es común encontrar múltiples tipos de vetillas y observar relaciones de corte entre ellas.

Gustafson y Hunt (1975) observaron que, en los yacimientos tipo pórfido, es común encontrar múltiples tipos de vetillas y relaciones de corte entre ellas. Los autores antes mencionados estudiaron el depósito El Salvador en Chile, logrando definir una nomenclatura para los tipos de vetillas observadas, según su temporalidad definiendo vetillas tipo A, B y D, las que son asociadas a alteraciones tempranas e intermedias. A este estudio pionero, se le suman otros, con el fin de favorecer el entendimiento de los tipos de vetillas y sus relaciones en la formación de los pórfidos cupríferos, por

ejemplo: Dilles y Einaudi (1992) establecieron las vetillas tipo C, Gustafson y Quiroga (1995) las vetillas tipo EB y C, Arancibia y Clark (1996) las vetillas tipo M, Masterman (2005) las vetillas tipo E.

Los estudios anteriormente mencionados coinciden en que de manera general las vetillas se pueden dividir en tres grupos según temporalidad: temprano, intermedio y tardío.

2.2.4.1. Vetillas tempranas

Según Gustafson y Hunt (1975), alrededor del 75% del cobre emplazado en el pórfido estudiado se generaría en las etapas tempranas durante el proceso de la alteración potásica en conjunto a una mineralización de sulfuros. Los autores consideran que las familias de vetillas tempranas de cuarzo presentes usualmente entre las intersecciones de diferentes intrusivos porfídicos son las clasificadas como tipo A, caracterizadas por grosor que varía entre 1 a 25 mm, discontinuas por encontrarse cortadas por todas las demás vetillas. A medida que estas se van desarrollando varían en forma y continuidad.

Las vetillas A tempranas no tienen orientación clara, son discontinuas y segmentadas aparentemente emplazadas después de que las rocas sufrieran fracturamiento frágil, mientras que las tardías presentan paredes paralelas, continuas y orientadas sistemáticamente a las fracturas preexistentes, incluso pueden presentar simetría interna en la cristalización de feldespato potásico (Gustafson y Hunt, 1975).

En el caso de vetillas tipo A tempranas el halo de alteración es débil, pero este es más notorio en vetillas A tardías emplazadas sobre roca fresca sin alteración sílica-potásica. La mineralogía principal es feldespato potásico, albita, cuarzo y sulfuros calcopirita y bornita (Gustafson y Hunt, 1975).

Gustafson y Quiroga (1995), en el yacimiento El Salvador Chile, definen un nuevo tipo de vetillas tempranas denominadas Tipo EB, las cuales son más jóvenes que las vetillas A, antes descritas. Son descritas como vetillas oscuras, sinuosas, con o sin halo y

discontinuas. La mineralogía principal es feldespato potásico, biotita, albita, sericita, con o sin cuarzo, magnetita y sulfuros calcopirita y bornita.

Arancibia y Clark (1996) establecieron en su investigación el desarrollo de hidrólisis rica en Fe previa al desarrollo inicial de la alteración sílica-potásica que caracteriza el emplazamiento de las vetillas tipo A. La hidrólisis favorece el desarrollo de vetillas caracterizadas principalmente por cuarzo, magnetita, anfíbol rico en calcio y plagioclasas en distintas proporciones, y que varían en continuidad, regularidad, rugosidad en el transcurso de esta etapa previa. Estos conjuntos de vetillas se han definido como tipo M, y se desarrollarían primero que las vetillas tipo A, pero coetáneas a las EB.

Mineralógicamente las vetillas tipo A son de asociación de cuarzo granular con feldespato pertítico, anhidrita y con calcopirita y bornita diseminada (Gustafson y Hunt, 1975).

2.2.4.2. Vetillas intermedias

Gustafson y Hunt (1975) consideran que el proceso intermedio del desarrollo de un pórfido se conforma al desarrollarse una alta sulfuración y bajo un fuerte ambiente hidrolítico caracterizado por el emplazamiento de vetillas de cuarzo, abundante molibdenita y turmalina.

Estas vetillas se han clasificado como tipo B, las que presentan una estructura planar, continuas y con paredes paralelas variando de 5 a 50 mm de espesor y es usual que tengan forma interna bandeada. Se caracterizan por presentar molibdenita en la sutura y granos gruesos de cuarzo, no se observa feldespato potásico y con posible presencia de minerales de alteración hidrolítica en su interior o en los halos pocos desarrollados.

Se observan en relación de corte a vetillas A, además es posible observar que este tipo de vetillas presentan una zona de debilidad y pueden ser reutilizadas por fluidos

asociados alteraciones más jóvenes, como es el caso de sulfuros como calcopirita y bornita asociado a vetillas tipo C o pirita asociado a vetillas tipo D, donde las alteraciones posteriores son consideradas como un agente responsable en el desarrollo del halo de alteración que estas vetillas tipo B puedan presentar. Estos débiles halos de alteración ocasionalmente son tenues e irregulares (Gustafson y Hunt, 1975).

Dilles y Einaudi (1992) durante su estudio encontraron vetillas diferentes al tipo A y B, antes descritas, distintas incluso a las vetillas resultantes del entrecruzamiento entre A y B, además estas vetillas mineralógicamente distintas eran cortadas por vetillas tardías tipo D. Esto generó que se establecieran como vetillas intermedias posterior a las vetillas tipo B, denominándolas tipo C.

Estas vetillas tipo C se caracterizan por poseer una combinación de minerales de calcopirita, pirita o bornita, cuarzo, epidota y clorita, frecuentemente cortadas por vetillas tipo D provenientes de la alteración sericítica. Se ha considerado que el contenido de cobre de las vetillas C provienen de la remoción de cobre de las vetillas tipo A y B, pues los minerales internos y las rocas no presentan lixiviación, quedando como única fuente las alteraciones o vetillas previas, este tipo de vetillas también son descritas por Gustafson y Quiroga en 1995.

2.2.4.3. Vetillas tardías

Según Gustafson y Hunt (1975) el evento tardío está caracterizado por una mineralización abundante en pirita y una alteración hidrolítica fuerte que destruye el feldespato potásico y la biotita. Esto produce principalmente vetillas de cuarzo-pirita, vetillas de pirita con halos de alteración sericítica, o pirita diseminada en zonas con alto grado de sericitización.

Las vetillas tipo D cortan todas las vetillas previas, también se presentan en la mayoría de las rocas, pueden ser de un ancho menor a un milímetro hasta más de 20 centímetros,

son continuas y están orientadas sistemáticamente con respecto a las fracturas. Contienen elevadas proporciones de pirita y en menor cantidad calcopirita, bornita, enargita, tenantita, esfalerita y galena, usualmente con muy poco cuarzo. Es habitual encontrar simples halos de alteración sericítica o sericita-clorita en las vetillas tipo D pequeñas (Gustafson y Hunt, 1975).

Masterman y otros (2005), estudiaron el desarrollo de las vetillas tardías en Collahuasi y definieron el tipo E como sulfuros polimetálicos masivos que cortan todas las otras vetillas excepto el tipo D. Estas poseen espesores entre 5 mm a 100 mm concentradas cerca de fracturas o fallas.

En el estudio de Masterman y otros (2005), definen un subtipo de vetillas tipo E, asociadas al ambiente epitermal de alta sulfidización, denominadas vetillas tipo TES, las que están caracterizadas por la presencia de tenantita y enargita producto principalmente de reemplazar la pirita, bornita, calcopirita y calcosina de vetillas tipo E.

Las vetillas tipo E, pueden presentar microfracturas que cortan bornita y calcopirita. Un entrecruzamiento esquemático esperable como característica temporal se puede apreciar en la Figura 2.6 (Masterman y otros, 2005).

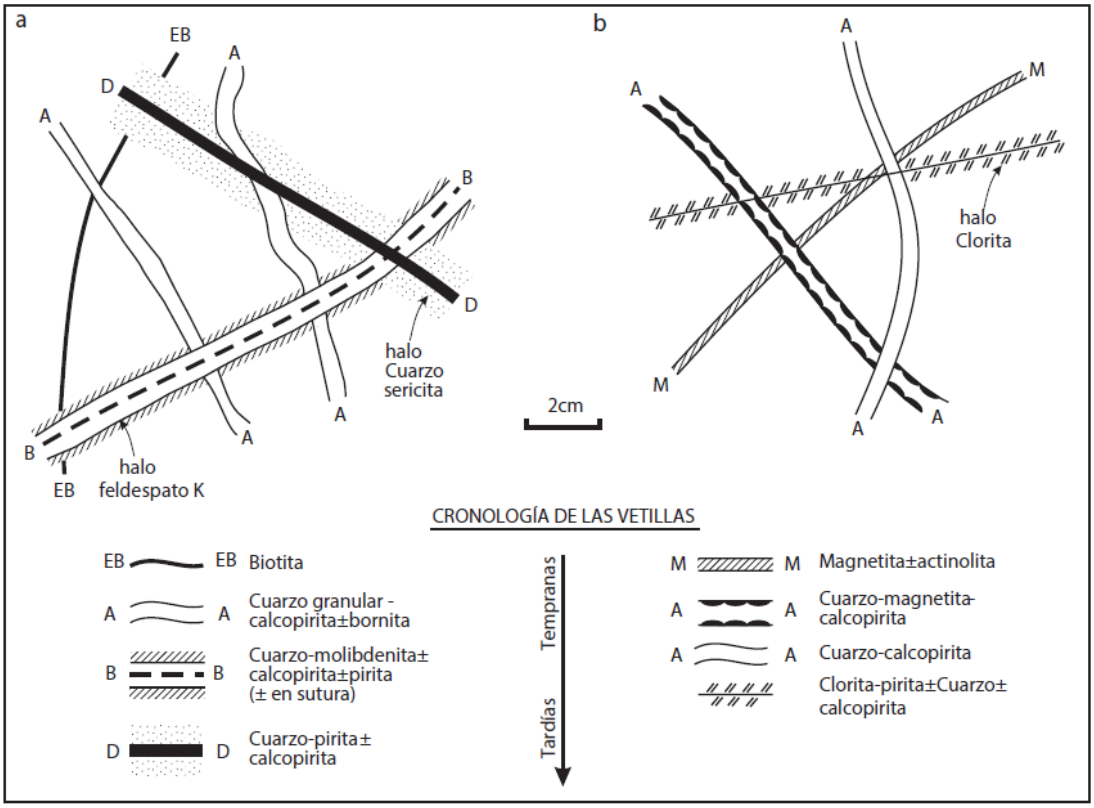

Figura 2.6: Esquemática secuencia temporal de entrecruzamiento de vetilla en un depósito pórfido Cu-Mo. Para el caso a) se tiene un inicio de vetillas EB, cortadas luego por vetillas tipo A, que son cortadas por tipo B y tardíamente se presentan el tipo D. Modificado de Sillitoe (2010).

Capítulo 3: CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1. Marco geológico distrital

3.1.1. Generalidades

El distrito Collahuasi está localizado en el altiplano de la Región de Tarapacá, Chile, con un área de 1200 km². Se define como un clúster de pórfidos ubicados al extremo norte de la franja del Eoceno-Oligoceno, contiene tres pórfidos de cobre-molibdeno, los depósitos "Quebrada Blanca", "Ujina" y "Rosario", este último asociado a evento epitermal de alta sulfuración con vetas de cobre-plata, "Poderosa", "Moctezuma" y "La Grande", al NW del depósito Rosario se encuentra un yacimiento tipo exótico de cobre denominado "Huinquintipa" hospedado en gravas (Camus, 2003). Según Bisso y otros (1998), se pueden distinguir tres principales dominios estratigráficos asociados a sistemas estructurales de escala regional dirección N-S, correspondiente al sistema de la Falla de Domeyko ramal Oeste y sistema de Fallas El Loa, constituyen los límites de un horst con rocas paleozoicas, flanqueado por rocas mesozoicas y cenozoicas (Figura 3.1).

Según Bisso y otros (1998), las unidades geológicas presentes en este distrito se pueden agrupar en tres grandes bloques tectónicos:

Bloque Occidental

Se caracteriza por presentar una sección plegada de rocas sedimentarias marinas jurásicas (Fm. Quehuita), además, se ha descrito la Formación Cerro Empexa (Cretácico superior–Paleoceno) y conglomerados rojos de la Formación Tolar (Cretácico superior). Estas unidades presentan intrusiones de varios stocks con composición de monzodioritas y granodioritas con posible edad Eoceno superior–Oligoceno.

Bloque Central

Tiene como basamento plutones graníticos paleozoicos, los cuales se encuentran intruyendo a una secuencia volcano-sedimentaria denominada Fm Collahuasi (Paleozoico superior). Posteriormente las rocas sufren la intrusión de pórfidos mineralizados del Oligoceno, los cuales dan origen a los depósitos pertenecientes al distrito.

Bloque Oriental

Se encuentra al este del sistema de Falla El Loa y se caracteriza por la presencia de cubiertas ignimbríticas y depósitos volcanoclásticos del Neógeno a Cuaternario.

3.1.2. Litología

Las descripciones litológicas se basan en la "Hoja Cochalgua" escala 1:250.000, de la Carta Geológica de Chile, realizada por Vergara y Thomas (1984).

3.1.2.1. Formación Collahuasi

Vergara (1978) fue el primero en definir esta unidad, la cual se compone de rocas andesitas, dacitas, riolitas, tobas e intrusivos menores, en el rango de edades Permo-Triásico, con un espesor aproximado de 4 km, representados en columna estratigráfica en la Figura 3.2. Las rocas volcánicas se depositan en ambiente continental y se componen de dos o más flujos (Bisso y otros, 1998). Su distribución limita al norte con la Ignimbrita Huasco (Masterman, 2003), al oeste con el Sistema de Falla Domeyko y por el sur se extiende hasta Chuquicamata (Bisso y otros 1998). Se diferencian dos eventos magmáticos principales uno en el Pérmico inferior (~296 Ma) y otro en el Triásico medio (Anisiano ~242 Ma) (AURUM, 2009). Münchmeyer y otros (1984), dividen esta Formación en tres unidades informales, las cuales corresponden a:

Unidad La Grande: secuencia compuesta por rocas riolíticas, dacíticas y andesíticas con intercalaciones de areniscas y brechas sedimentarias, presenta una potencia de

3.000 m y aflora en el sector sur del distrito. Esta unidad sufrió una intrusión de un batolito granodiorítico de edades Permo-Triásico, a esta unidad la sobreyacen las unidades Condor y Capella en el sector de Rosario. Dataciones de K/Ar en hornblenda le otorgan una edad mínima Permo-Triásica.

Unidad Capella: La secuencia se encuentra sobre la Unidad La Grande y en probable contacto discordante con ella, está formada por coladas riolíticas alternadas con lentes y horizontes de areniscas y calizas de potencia mínima de 1.700 m, sobreyace en discordancia angular a la unidad La Grande. Aflora en el sector NW del distrito Collahuasi en las cercanías de la localidad Capella y se le asigna una edad Triásico - Jurásico.

Unidad Cóndor: se compone de rocas de composición riolíticas con un horizonte basal de areniscas y calizas de potencia mínima de 1.050 m, aflora en la serranía que separa Rosario de la localidad de Ujina. Respecto a su posición estratigráfica, es similar a la de la Unidad Capella. El horizonte sedimentario basal es reconocible hasta la cercanía del yacimiento Rosario, donde se desarrollan cuerpos mineralizados de tipo *skarn*. La unidad Cóndor se encuentra, en aparente discordancia angular, sobre distintos niveles estratigráficos de la unidad La Grande.

3.1.2.2. Formación Quehuita

Corresponde a una secuencia marino-continental formada por un miembro inferior de fangolitas, calizas y limolitas marinas, y un miembro superior de calizas, areniscas calcáreas, areniscas y conglomerados. Las calizas del miembro inferior contienen fósiles de edad Jurásica (Vergara y Thomas, 1984). Estratigráficamente, sobreyace en discordancia angular y erosiva a la Formación Collahuasi e infrayace de igual manera a la Formación Cerro Empexa. El ambiente de deposición corresponde a una cuenca extensional de tras arco formada durante el desarrollo del arco Jurásico (Masterman, 2003).

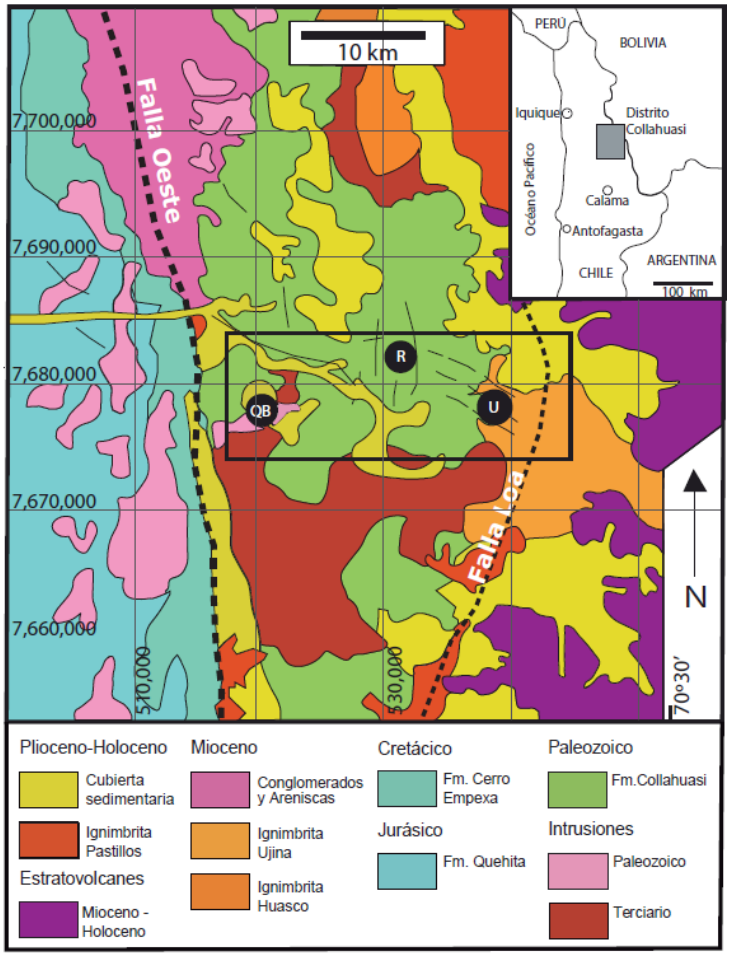

Figura 3.1: Mapa de bloques tectónicos principales separados por las fallas Domeyko y Loa. Están ilustradas las unidades geológicas principales en el distrito y los yacimientos Quebrada Blanca (QB), Rosario (R) y Ujina (U) Modificado de Muñoz, (2009).

3.1.2.3. Formación Cerro Empexa

Corresponde a una secuencia elongada de orientación norte–sur de lavas andesíticas y traquíticas, brechas volcánicas, tobas e intercalaciones de areniscas rojas y conglomerados, dispuestas en discordancia angular erosiva a las rocas de la Formación Quehuita. Vergara y Thomas (1984), separan esta unidad en dos miembros, uno inferior volcano–sedimentario, y uno superior de carácter volcánico. Stocks graníticos, datados en 95 Ma, han instruido a esta formación, por lo cual Vergara y Thomas (1984) le han asignado una edad Cretácico superior (Campaniano).

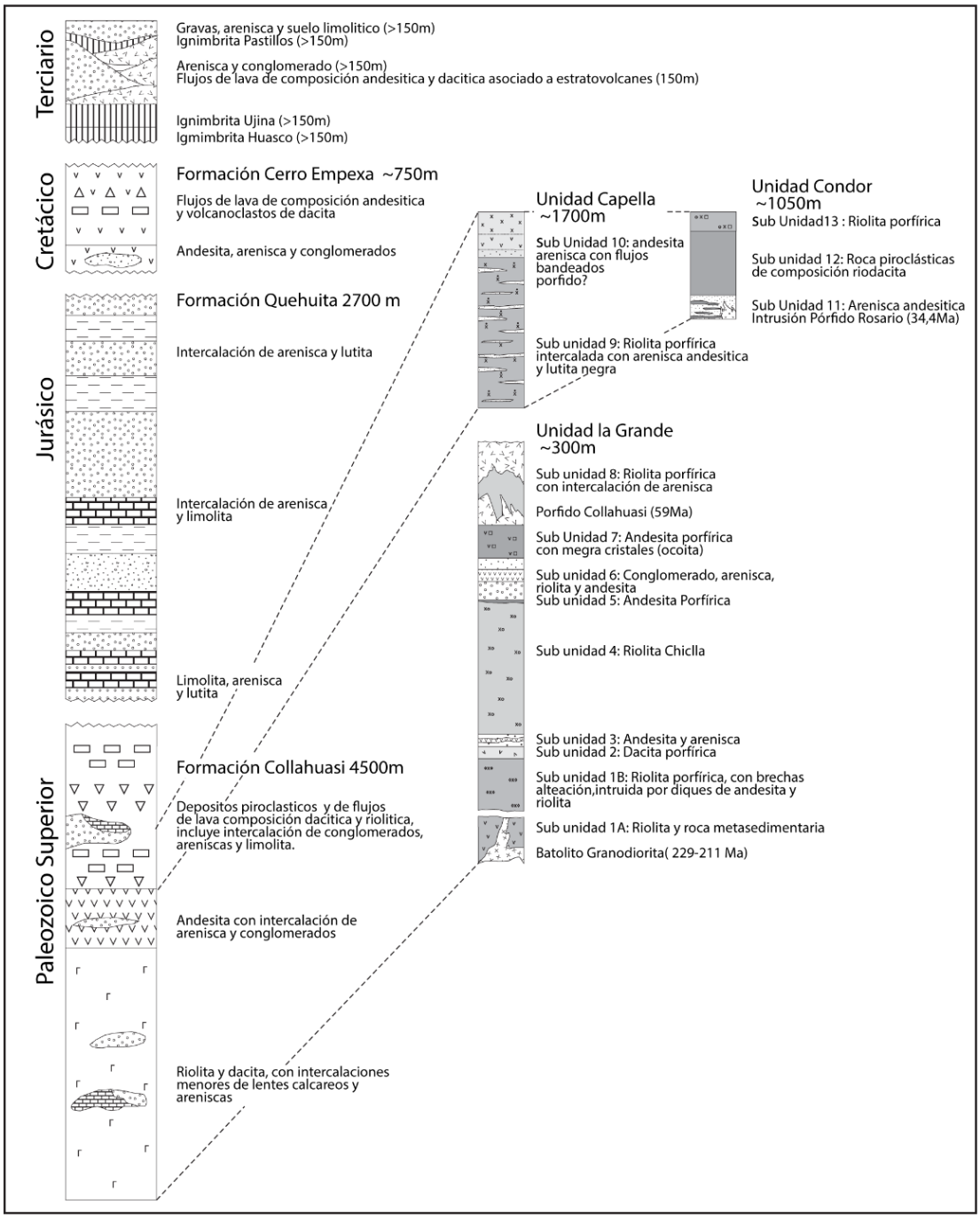

Figura 3.2: Columna estratigráfica Regional Distrito Collahuasi (izquierda) y yacimiento Rosario (derecha). Se puede apreciar la relación entre las distintas formaciones, en el sector Rosario se destaca la intrusión de los pórfidos Collahuasi y Rosario. Modificado de Masterman (2003).

3.1.2.4. Rocas intrusivas

La composición de los cuerpos intrusivos presentes en el área varía su composición desde dioritas, monzonitas, granodioritas a granitos. Münchmeyer y otros (1984) definen tres periodos de emplazamiento, el primero ocurrido durante el Pérmico-Triásico corresponden a granitos y granodioritas restringidos a la Formación Collahuasi asociados al pórfido de nombre homónimo.

El segundo representado por dioritas cuarcíferas y granodioritas del Cretácico superior-Paleógeno inferior que instruyen a las formaciones Cerro Empexa, Quehuita y Collahuasi. Según Münchmeyer y otros (1984), de forma más tardía se emplazan intrusiones cuarzo - monzoníticas en la Formación Collahuasi durante el período Eoceno superior - Oligoceno inferior, este último evento se relaciona a la génesis de los pórfidos cupríferos de Rosario y Ujina.

3.1.2.5. Ignimbrita Huasco

Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso del Mioceno inferior-Medio. Se compone de tobas con un sector basal de vitrófiros negros, una parte media de tobas riolíticas compactas y soldadas, además tiene un nivel superior de color gris parcialmente soldado. Las dataciones indican una edad Mioceno Medio que fluctúa entre 14,4 ± 0,4 y 17,1 ± 0,8 Ma (Vergara y Thomas, 1984).

3.1.2.6. Ignimbrita Ujina

Vergara y Thomas (1984) la definen como una secuencia de tobas soldadas con lentes de material piroclástico, distinguiéndose ocasionalmente estructuras de flujo. Dataciones K-Ar determinan una edad Mioceno superior (9,3 ± 0,4 Ma).

3.1.2.7. Ignimbrita Pastillos

Corresponde a una secuencia de ignimbritas y depósitos cineríticos, subdividida en un miembro inferior de tobas parcialmente soldadas y depósitos laháricos, y un miembro

superior de tobas cineríticas no soldadas. La edad asignada por Vergara y Thomas (1984) es Pleistoceno medio.

3.1.2.8. Estratovolcanes

Estratovolcanes, domos y flujos de lava de composición andesítica y dacítica de edad Mioceno superior a reciente. Se presentan con distinto grado de conservación, los más antiguos con conos fuertemente erodados. Sin embargo, la gran mayoría se caracteriza por tener conos relativamente bien preservados y sus cráteres moderadamente erosionados (Vergara y Thomas, 1984).

3.1.2.9. Depósitos no consolidados

Representan las unidades más recientes del área entre las que se encuentran una serie de depósitos salinos, aluviales, de arenas eólicas, cineríticos con costras salinas y depósitos aluviales de ceniza y lapilli (Vergara y Thomas, 1984).

3.1.3. Estructuras tectónicas

Las principales estructuras presentes en el distrito están definidas por sistemas de fallas del Cenozoico de orientaciones NNW-SSE, NE-SW, NW-SE y N-S (Figura 3.3) (Münchmeyer y otros ,1984). Dentro de las fallas NNW-SSE la principal es el Sistema de falla Domeyko, en su ramal denominado Falla Oeste y la Falla El Loa.

Los sistemas conjugados NE-SW y NW-SE están presentes en los yacimientos Rosario y Ujina, para los que se han reconocido movimientos de rumbo sinestrales como dirección predominante de movimiento con un máximo desplazamiento estimado entre 1 y 1,5 km (Münchmeyer y otros, 1984).

Estos desplazamientos estarían asociados a la actividad intrusiva Paleógena y a la formación de los pórfidos cupríferos de Quebrada Blanca, Rosario y Ujina (Bisso y otros, 1998).

Por su parte, un tercer sistema estructural en el distrito lo constituye un marcado set de estructuras NW, llamado informalmente sistema Collahuasi, que es interpretado como fallamiento antiguo y profundo (Sanhueza y otros, 2006).

La cinemática del arreglo estructural descrito es muy compleja, con movimientos pre, *syn* y *post*–mineralización. Los depósitos de Capella y Quebrada Blanca aparecen asociados a estructuras subsidiarias de la falla Oeste; el yacimiento Ujina se relaciona espacialmente a estructuras secundarias del sistema falla El Loa y el depósito Rosario se localiza en una zona de traspaso estructural entre ambos sistemas (CMDIC, 2014).

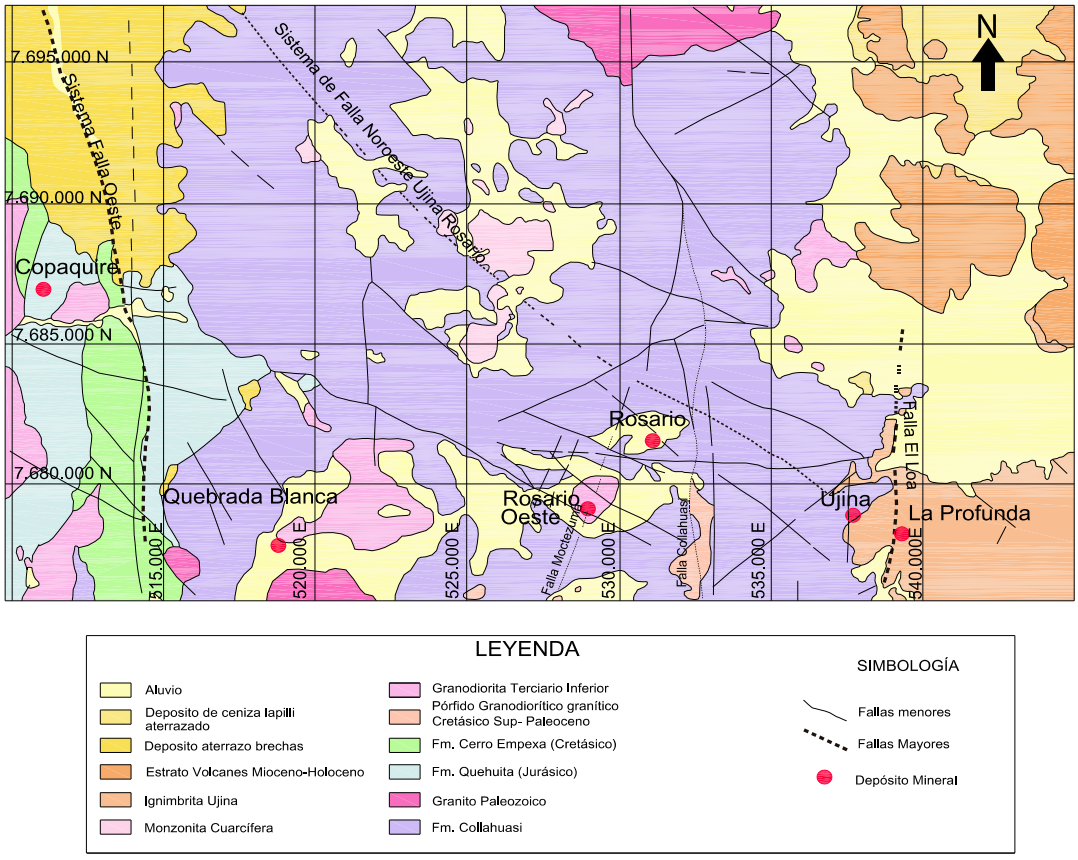

Figura 3.3: Mapa del distrito Collahuasi, donde resaltan los sistemas estructurales principales Falla Domeyko, Loa y los sistemas conjugados NE-SW y NW-SE. Modificado de Masterman (2003).

3.1.4. Geología económica

El Distrito Collahuasi contiene importantes recursos minerales, donde se pueden separar en metálicos con mineralización de cobre, molibdeno, oro y plata, por último, en no metálicos donde destacan principalmente el azufre y depósitos salinos (Sobarzo, 2010).

Según Camus (2003) la principal fuente de mineralización son los sistemas de pórfidos Cu-Mo, caracterizados en los sistemas hidrotermales de Rosario, Ujina, Quebrada Blanca y Copaquire (Figura 3.4). El elemento con mayor importancia económica es el cobre y en menor proporción molibdeno y plata, la mineralización del cobre está distribuida a lo largo de fracturas tipo veta-falla, en vetillas y diseminado.

Las principales menas son calcopirita, bornita, molibdenita, localmente, tenantita y enargita, las menas supérgenas son calcosina y covelina (Camus, 2003).

Las edades de los principales eventos de mineralización en los principales 35.2 ± 0.3 Ma en Ujina, 35 ± 0.4 Ma en Quebrada Blanca y 34.4 ± 0.3 Ma en Rosario, con base en datos $40_{Ar}/39_{Ar}$ (Masterman y otros, 2004).

El distrito, cuenta además cuenta con depósitos tipo epitermal de alta sulfidización asociado sistema de vetas Cu-Au-Ag y mineralización exótica de cobre cementando gravas en los remanentes de paleocanales del Neógeno asociado al sistema Rosario (Masterman, 2003).

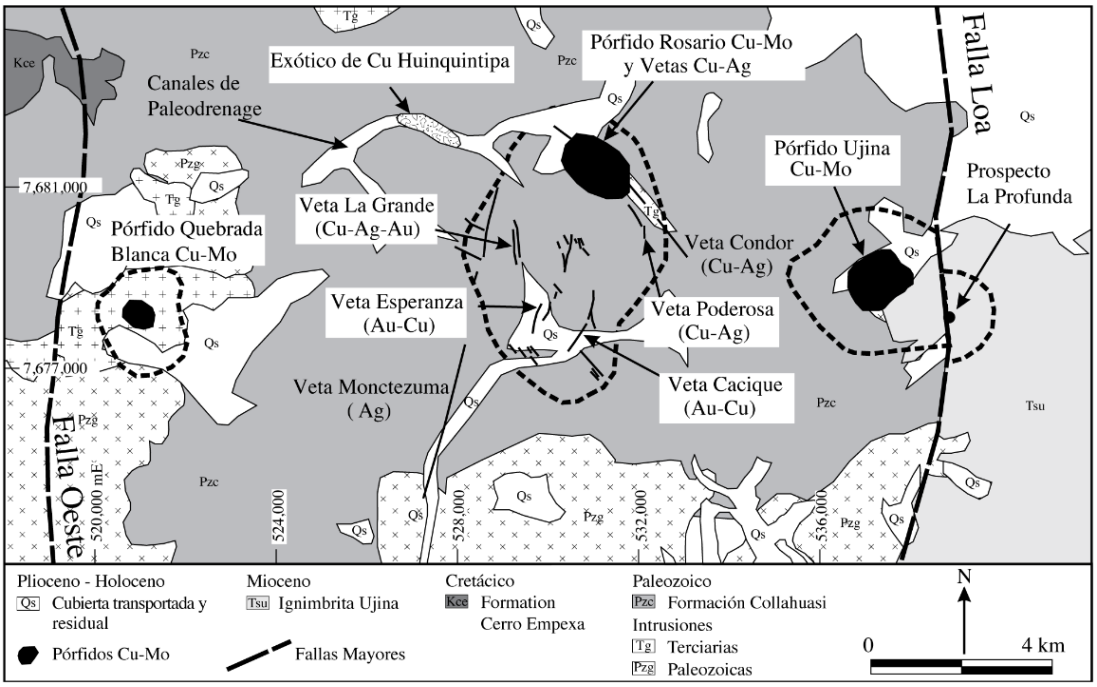

Figura 3.4: Mapa del distrito Collahuasi, donde resaltan los sistemas estructurales principales Falla Oeste y Loa, los principales yacimientos Quebrada Blanca (QB), Rosario (R) y Ujina (U). Modificado de Masterman (2003).

3.2. Marco geológico del Yacimiento Rosario

3.2.1. Generalidades

Rosario es un pórfido de Cu-Mo, perteneciente la franja de yacimientos de clase mundial del Eoceno superior-Oligoceno del norte grande de Chile, donde se ubican entre otros Chuquicamata, Escondida y Salvador (Sillitoe, 2010).

La roca huésped está compuesta de una secuencia de rocas volcánicas ácidas y andesitas, con intercalaciones de rocas sedimentarias, pertenecientes a la Formación Collahuasi de edad Pérmico -Triásico. Esta secuencia, previa al emplazamiento del pórfido Rosario, fue intruida por un pulso porfídico denominado Collahuasi, que corresponde a una granodiorita de edad triásica (Masterman, 2003).

El Pórfido Rosario está descrito como una monzonita cuarcífera, es el último evento de intrusión en el distrito con edad aproximada de 33 Ma, cuyo emplazamiento está asociado a las estructuras en el área. Este sistema muestra movimientos normales y dextrales (Camus, 2003).

La mineralización primaria, el recurso más importante del yacimiento, presenta una zonación, donde hacia los bordes se forma un halo de baja ley con alta concentración de pirita y baja calcopirita, incrementando la cantidad de calcopirita hacia el centro lo que se suma a la aparición de núcleos de bornita con digenita, incrementado las leyes de cobre (Masterman, 2003).

El molibdeno está asociado a la zona primaria, ubicado principalmente al centro del yacimiento ligado a vetillas tipo B. Sobreimpuesto a los sistemas de desarrollo temprano se desarrolla un sistema de vetas tardías de alta ley de cobre asociado también a las altas leyes de arsénico del tipo alta sulfidización (Camus, 2003).

El Sistema de Fallas Rosario también controla un evento supérgeno que provoca la lixiviación de la parte superior del depósito y generó zonas de enriquecimiento secundario. A su vez, los cuerpos de óxidos y mixtos tienen un bajo desarrollo, con pequeños cuerpos que aparecen a profundidades someras, respecto a la superficie actual (Masterman, 2003; Camus, 2003; Sobarzo, 2010; Aurum, 2009).

3.2.2. Litología

Para Rosario se han definido 8 unidades litológicas informales (Figura 3.5), agrupadas por relaciones genéticas y distribución espacial en el yacimiento, las definiciones son extraídas del informe de procedimiento de mapeo geológico CMDIC (2015).

Andesita (AND)

Agrupa a rocas volcánicas de composición andesítica y/o basáltica. Presenta en distintas variedades texturales que van desde rocas porfídicas gruesas (ocoítas), amigdaloidales (rellenas con clorita), afaníticas y contiene unidades que pueden estar brechizadas. La mineralogía se caracteriza por presentar piroxeno como máfico, olivino subordinado y fenocristales de plagioclasa. Los máficos están alterados a epidota, clorita y calcita, ver Figura 3.6.

Dacita (DAC)

Rocas volcánicas de composición dacítica a riolítica, incluye dacitas, riodacitas, riolitas, eventualmente con textura fluidal o levemente brechosa. Corresponde a una roca ígnea volcánica, compuesta de cristales de feldespato y cuarzo, de textura microcristalina o porfídica constituida por fenocristales de feldespato, plagioclasas (principalmente sódica: oligoclasa, andesina) y ojos de cuarzo, generalmente corroídos en sus bordes, inmersos en una masa fundamental felsofídica y afanítica, ver Figura 3.6.

Toba (TOB)

De composición dacíticas a riolíticas, se identifican tobas del tipo lítica, vítrea y cristalina, en algunos afloramientos se observa mayor contenido de sílice generando tobas soldadas. Se caracterizan por de ojos de cuarzo con “embahiamiento”, presencia de vidrio y fragmentación de los cristales tanto de cuarzo como plagioclasa, ver Figura 3.6.

Unidad Sedimentaria (USED)

Esta unidad agrupa a rocas sedimentarias volcanogénicas (SV) y carbonatadas (SC). Las “SV” se observan gradadas y grano soportadas, con abundantes líticos y/o cristales de plagioclasa. Los clastos pueden ser redondeados a subangulosos, desde 1mm < 2 cm; las más comunes son conglomerados, brechas, areniscas gradadas e intercalaciones

de lutitas. Las “SC” son masivas con dominios laminados menores. Pueden presentar hasta 30 % de Qz fino y arcilla como accesorio. En contacto con el pórfido Rosario pueden generar hornfels o skarn con granate, diópsido, actinolita, epidota, clorita y magnetita, ver Figura 3.6.

Pórfido Collahuasi (PCO)

Pórfido de composición granítica con textura de grano grueso, con masa fundamental < 40%, pero localmente puede encontrarse fanerítico. Los fenocristales están compuestos por plagioclasa, feldespato potásico, biotita y cuarzo. Este último se presenta generalmente como “ojos” de hasta 1 cm. de diámetro y en proporción superior a 20%.

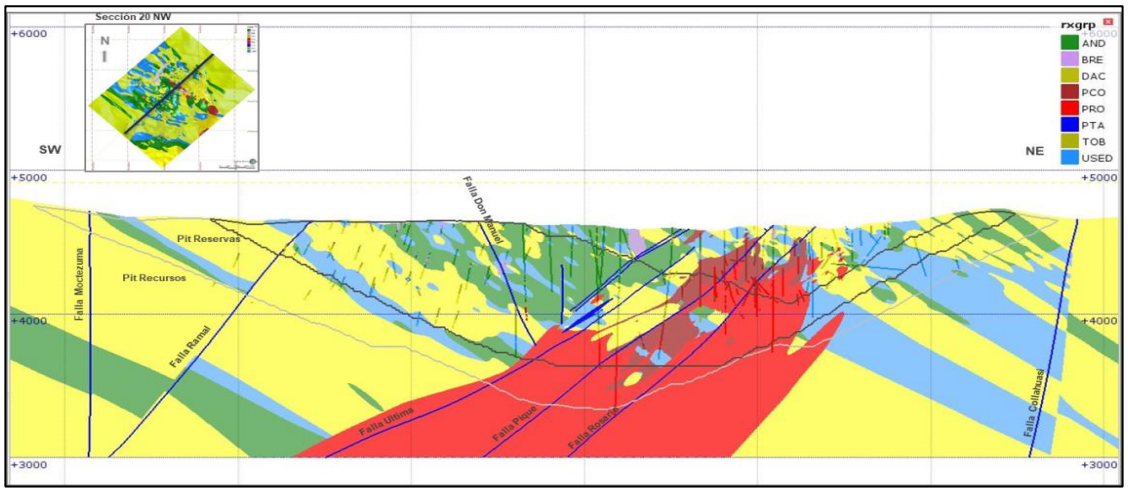

Figura 3.5: Perfil esquemático de litología en Rosario, en sección 20 NW. Elaboración propia.

El pórfido Collahuasi tiene más cuarzo que el Pórfido Rosario, los máficos se caracterizan por un crecimiento intersticial entre los otros minerales. Presenta mineralización de sulfuros hipógenos en menor grado calcopirita, bornita y pirita, ver Figura 3.6

Pórfido Rosario (PRO)

Pórfido de composición granodiorítica de grano medio a fino. Los fenocristales predominantes son plagioclasa y cuarzo, el cual se presenta como "ojos" en proporción menor a 15% y de tamaño menor a 0.5 cm. Los máficos primarios corresponden a biotita y hornblenda, caracterizados por su cristalización en forma tabular o hexagonal. La masa fundamental, a diferencia del Pórfido Collahuasi, es mayor a 50%. Alberga la mineralización hipógena calcopirita- bornita, ver Figura 3.6.

Diorita y pórfido diorítico (DIO)

Presenta textura hipidiomórfica inequigranular con cristales de plagioclasa fuertemente alterados y cristales anhedrales de cuarzo intersticiales entre las plagioclasas ver Figura 3.6. La textura puede variar de fanerítica a porfídica. Usualmente forman diques o pequeños stocks.

Brechas Hidrotermales (BRH)

Brechas con cemento de origen hidrotermal (turmalina, cuarzo, calcopirita, pirita, especularita), los fragmentos son angulosos a sub redondeados, monomícticos a polimícticos y la matriz puede contener polvo de roca o formar oquedades, presenta mineralización de sulfuros. Brechas de polvo de roca han sido reconocidas también tipo "pebbles dikes" en el rajo de la mina Rosario ver Figura 3.6. No presentan mineralización.

Brecha Ígnea (BRI)

Limitada en el contacto del Pórfido Rosario con la roca de caja, como brecha con fragmentos de rocas de origen intrusivo, generalmente pórfidos, en una matriz ígnea (cuarzo, feldespato, biotita).

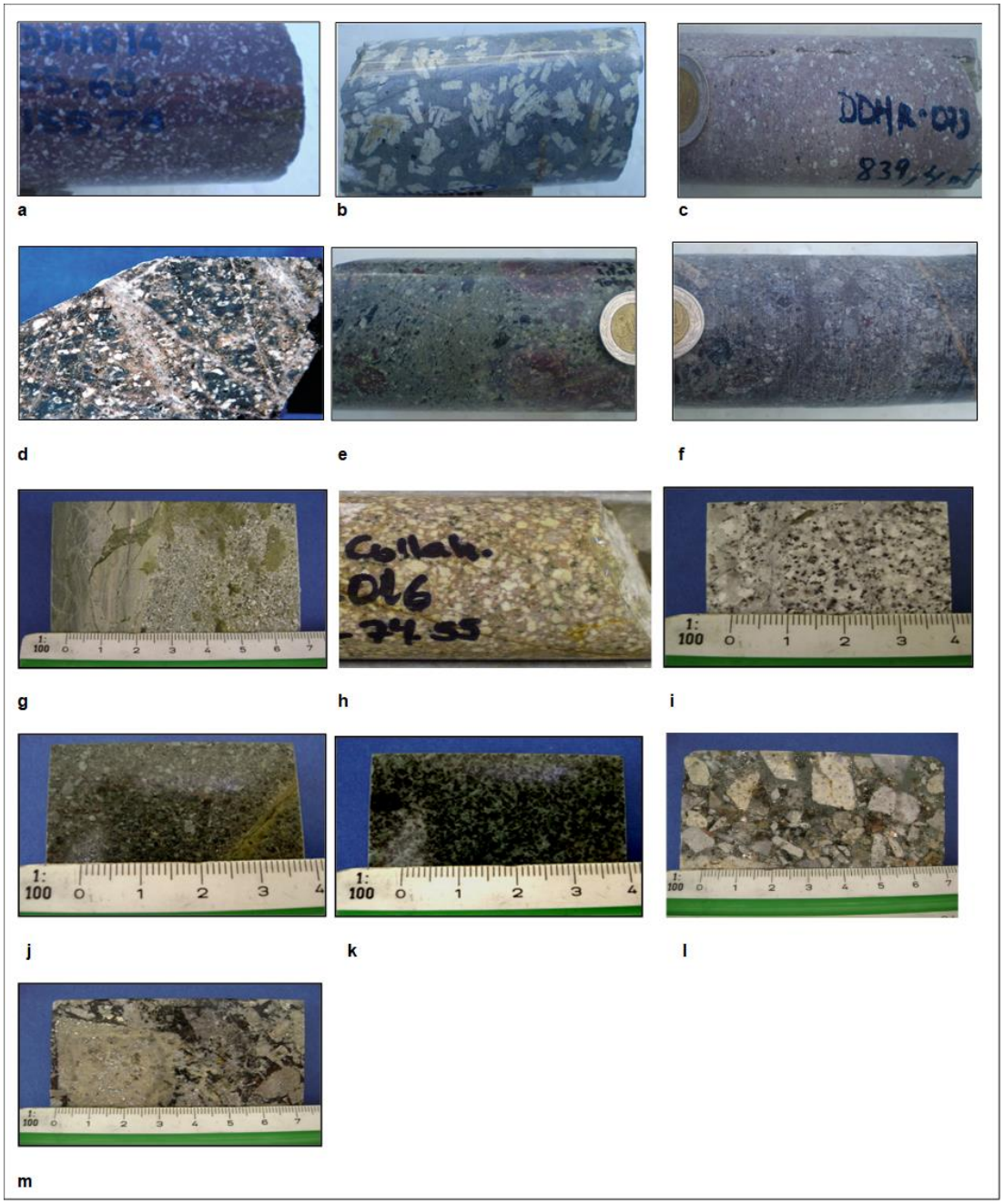

Figura 3.6: Fotos de litologías en yacimiento Rosario; A) Andesita; B) Ocoíta; C) Toba cristalina; D) Dacita; E) Toba lítica; F) Conglomerado (USED); G) Arenisca Calcárea (USED); H) Pórfido Collahuasi; H) Pórfido Rosario; J) Diorita; K) Pórfido diorítico; I) Brecha de polvo de roca y M) Brecha hidrotermal con matriz de turmalina. Extraído de procedimiento CMDIC, (2015).

3.2.3. Estructuras

El yacimiento presenta un complejo sistema de estructuras donde destacan las fallas Monctezuma, Collahuasi, Chepa, Ramal y las vetas fallas Última, Rosario y Pique, las cuales presentan un índice de desplazamiento mayor, constituyen un rasgo estructural relevante en el yacimiento (CMDIC, 2014).

Dada por las características estructurales particulares existentes al interior de esta zona en cuanto a orientación, frecuencia, mineralización y geometría de las estructuras asociadas a ésta, como se aprecia en la Figura 3.7 (CMDIC, 2014).

La Falla Última representa el límite estructural del modelo de Rosario (ambiente pórfido) y Rosario Oeste, caracterizándose este último por un sistema epitermal de alta sulfidización controlado principalmente por estructuras NNW y NS. Por otro lado, al NW de las estructuras, si bien existe una superposición de un evento epitermal, el ambiente dominante es característico de un pórfido cuprífero (CMDIC, 2014).

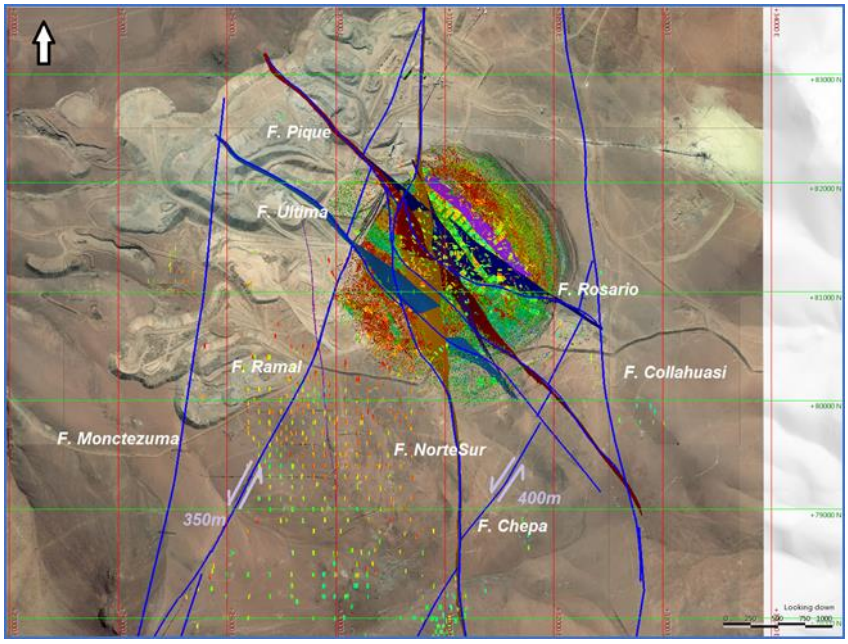

Figura 3.7: Resumen de las estructuras principales relacionadas con el Rajo Rosario, extraído de Sobarzo (2010).

3.2.4. Alteración

3.2.4.1. Alteraciones tempranas

Comprende las alteraciones potásicas, propilítica y clorita-sericita, que en ocasiones son obliteradas debido a la sobreimposición de las alteraciones tardías pervasivas (Figura 3.8) (Masterman, 2003; CMDIC, 2014).

Alteración potásica (K)

Se desarrolla a altas temperaturas, en las etapas tempranas de alteración (fase tardimagmática), ocupando la zona central de la alteración relacionada al emplazamiento del pórfido. Bisso y otros (1998), diferenciaron dos tipos de alteración potásica: feldespática (K) y biotítica (B).

La alteración feldespática (K), se caracteriza por abundancia de feldespato potásico y sílice, con biotita en menor medida, ver Figura 3.8. La alteración biotítica (B) se ubica de manera adyacente a la alteración feldespática y es caracterizada por la presencia de una cantidad considerable de biotita, genéticamente relacionada a reacciones de metasomatismo potásico.

Alteración propilítica (P)

Se genera a una temperatura menor que la alteración potásica. Se disponen de manera marginal a las zonas de alteración potásica (Figura 3.8), e implica un bajo grado de hidrólisis en los minerales de las rocas a las que afecta, con bajo grado de metasomatismo catiónico o lixiviación de álcalis. Es característica para esta alteración la asociación de los minerales clorita-epidota (que le dan una coloración verdosa a la roca) y, en algunas ocasiones, la presencia de albita, calcita y pirita, por incorporación de agua, bicarbonato o azufre al sistema (Masterman, 2003).

Alteración clorita-sericita (CS)

Es la alteración primaria más tardía y menos extendida, restringiéndose casi en su totalidad a la interface entre las alteraciones potásica (biotítica) y propilítica (Figura 3.8). Se caracteriza por la asociación sericita (como mineral principal) y clorita en menor proporción. Podría interpretarse como una etapa de argilización de mediana temperatura (Masterman, 2003).

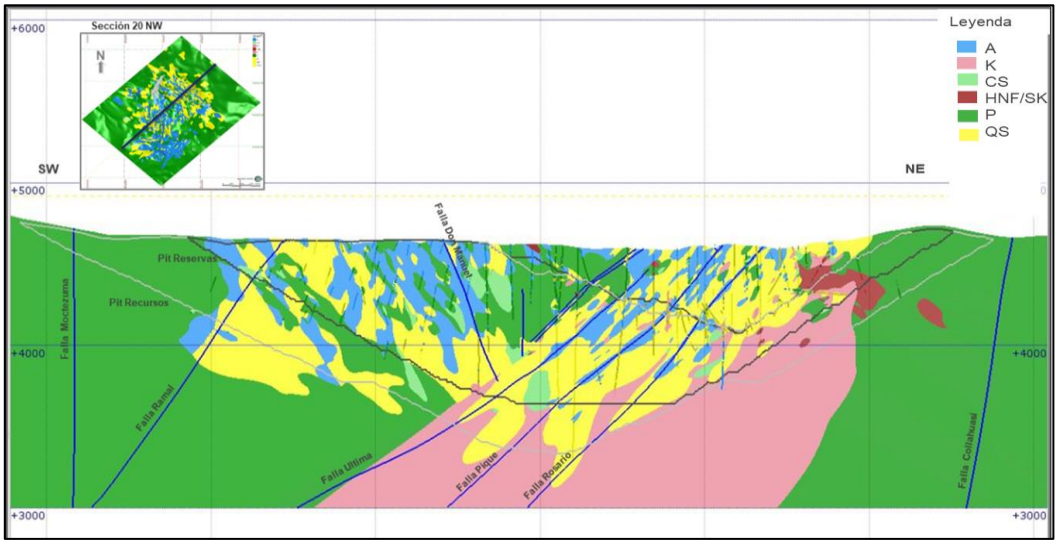

Figura 3.8: Perfil de alteraciones en yacimiento Rosario, en la sección N° 20NW. Elaboración propia.

3.2.4.2. Alteraciones Tardías

Agrupa alteraciones relacionadas al evento hidrotermal principal y las relacionadas a procesos supérgenos. Se caracterizan por tener un mayor control estructural y destrucción de las texturas previas de litología y alteración (Sillitoe, 2010).

Alteración fílica o cuarzo - sericita (QS)

Corresponde a un tipo de alteración caracterizada por una transformación de los feldespatos (plagioclasa y feldespato alcalino) a sericita (o illita) y cuarzo secundario,

en mayor o menor proporción, debido a una hidrólisis moderada. Los minerales antes mencionados, son acompañados estrictamente por mineralización de pirita. Su control es estructural, afectando principalmente el sector delimitado por las fallas Rosario por el noreste (CMDIC,2014).

Alteración argílica (A)

Agrupa por un lado a los sistemas de vetas Cu-As de alta sulfidización y es característica la presencia de caolinita, dickita, pirofilita, cuarzo y alunita, representativos del resultado de una hidrólisis extrema que destruye los aluminosilicatos en un pH ácido. Evidencia un grado intermedio de hidrólisis, mayor a la alteración propilítica (Masterman, 2003).

También concentra a las de carácter supérgeno, originándose posiblemente por la interacción de fluidos meteóricos infiltrados a través de estructuras preexistentes, generándose una lixiviación importante del Ca, Na y Mg presente en las rocas, afectando principalmente a las plagioclasas, generándose caolinita y arcillas del grupo de la esmectita, como la montmorillonita, esta alteración se superpone a la anterior sobre el nivel límite que alcanzan las rocas lixiviadas (Masterman, 2003).

3.2.5. Vetillas hidrotermales

Las vetillas en el yacimiento se clasifican según el trabajo realizado por Gubstafson y Hunt (1975), además Masterman (2003) describe nuevas vetillas en Rosario.

Los tipos de vetillas se pueden clasificar según la etapa del sistema hidrotermal; tardimagmática, tardimagmática transicional, hidrotermal temprana, hidrotermal principal e hidrotermal tardía (Sillitoe, 2010).

Etapa tardimagmática

Las estructuras asignadas a esta etapa forman parte de las zonas de alteración potásica. Se estima que su emplazamiento se produjo en un ambiente semi-dúctil, evidenciado por su forma sinuosa, mediante un proceso de metasomatismo potásico a temperaturas probables entre 800ºC y 600ºC.

Según las descripciones de Gubstafson y Hunt (1975), Gubstafson y Quiroga (1995), Masterman (2003) y Sillitoe (2010) se han identificado cinco tipos de vetillas EB, EBT, EDM, A y M, ver Tabla 3.1.

Etapa tardimagmática transicional

Corresponde a un ambiente frágil, evidenciado por la generación de planos rectos continuos donde se emplazan las vetillas. Ocurre a temperaturas del orden de ± 400º C. Se asume que rellenan fracturas producidas por pérdida de volumen en un sistema que se enfría (Sillitoe, 2010). Forman parte del evento principal de depositación de molibdeno, principalmente existe un desarrollo de vetillas tipo B, ver Tabla 3.1.

Etapa hidrotermal temprana

También llamada etapa sericítica temprana, con aporte clorítico y con una asociación de alteración sericita-clorita- illita. Se asume un ambiente frágil, con temperaturas entre 400ºC a 300ºC (Sillitoe, 2010). La presencia de sericita hidrotermal obliterando textura y cloritización de las biotitas estaría marcando procesos de alteración retrógrados con hidrólisis, con vetillas tipo C (Dilles y Einaudi,1992), ver Tabla 3.1.

Etapa hidrotermal principal

Se forman en condiciones de roca frágil a temperaturas <300º C, siendo la hidrólisis el proceso principal de transformación mineralógica, formando vetillas tipo D, obliterando la textura de la roca de caja. Este evento se superpone cortando o reutilizando vetillas anteriores (Sillitoe, 2010).

Etapa hidrotermal tardía

También llamada etapa de vetas tardías corresponde a vetas de sulfuros masivos (calcopirita, bornita, digenita, pirita, enargita,), asociadas a minerales de alteración de alta sulfidización (Masterman, 2003).

Relacionadas a una fuerte hidrólisis con valores anómalos de arsénico y en menor medida plomo y zinc (enargita-tenantita, galena, esfalerita). Los minerales de alteración que pueden formarse son caolinita, pirofilita, dickita, alunita, sericita, illita y cuarzo, los que pueden ser parte, tanto de los halos de las vetas como de la alteración de la roca de caja fuera de ellas. Tal asociación es producida en el evento de alteración argílico avanzado, con un aparente control estructural (Masterman, 2003).

3.2.6. Mineralización

Según Masterman (2003) y CMDIC (2014), en el yacimiento se pueden diferenciar 6 zonas minerales principales o "*minzone"* (Figura 3.9). Cada una de estas zonas, cuenta con características geológicas altamente distintivas.

Zona lixiviada (LIX): Corresponde a la zona superior del depósito, y se localiza entre la superficie y el techo de sulfuros. Se caracteriza por la presencia de óxidos de fierro o limonitas derivadas de la oxidación y lixiviación de pirita y sulfuros de cobre.

Zona de óxidos (OXI): Se refiere a sectores con mineralización de óxidos verdes y negros compuestos principalmente por *crisocola* y "*copper wad"*, respectivamente. Se ubica sobre el techo de sulfuros y bajo la zona lixiviada.

Zona mixta (MIX): Se refiere a sectores con mineralización de óxidos y sulfuros simultáneamente. Se ubica entre el cuerpo de lixiviado y el techo de sulfuros. En su

gran mayoría son cuerpos por sobre las zonas de los sulfuros secundarios y asociadas a los óxidos, con formas subhorizontales.

Tienen una distribución similar a los óxidos, es decir al noreste del sistema falla Rosario y del depósito.

Zona secundaria (SEC): Corresponde a zonas con presencia de sulfuros de cobre de origen supérgeno con presencia principalmente de calcosina. Estas zonas se desarrollan como cuencas de enriquecimiento controladas por estructuras del sistema de falla Rosario, se observan en zona más profundas en la parte suroeste del yacimiento.

Zona primaria (PRI): Esta zona agrupa rocas que no están afectadas por los procesos supérgenos. Este gran cuerpo se ubica en la parte central del depósito y caracteriza las zonas más profundas.

La zona mineral de primario presenta una forma general de campana, ensanchándose en profundidad, y limitado al este por la Falla Última y Norte Sur. Las menas características son de origen hipógeno, tales como calcopirita, bornita y digenita.

Se distribuye espacialmente al noreste del depósito y del sistema de falla Rosario, estos cuerpos de óxidos están asociados estrechamente a los cuerpos de mixtos y tienen por lo general una forma subhorizontal.

Zona primaria pirítica (PRIPY): Esta zona no se encuentra afectada por procesos secundarios, y representa las partes más distales del sistema pórfido, también llamado halo externo, donde el sulfuro predominante es la pirita, con presencia en trazas de calcopirita.

Tabla 3.1:Clasificación de vetillas hidrotermales, según las etapas. Modificado de procedimiento de mapeo geológico, CMDIC (2015).

	Tipo de Vetilla	Forma	Potencia	Relleno	Halo	Mineralización Asociada	Ocurrencia Mineral	Observac-iones
TARDI MAGMÁTI CA. Alteración K, metasomatismo potásico, T entre 800 y 600°C. Ambiente semidúctil	EB	Sinuosa, irregular	Fina(<10mm)	biotita, cuarzo	Con o sin halo biotítico	Bornita (digenita), calcopirita	Halo	
	EBT	Textura granular, sinuosa	Anchas (>10mm) granos de 2 a 5 mm	Cuarzo, feldespato potásico (anhidrita)	Fino halo de biotita,<feldespato potásico, cuarzo, sericita	Calcopirita, bornita.	halo y/o relleno	mineralización entre granos de cuarzo.
	EDM	Cúmulos discontinuos	-	Biotita, sericita	-	Bornita (digenita), calcopirita	Cúmulos	Raras en el depósito
	A	Sinuosas, discontinuas, textura granular.	Milimétricas	Cuarzo sacaroidal, feldespato potásico (anhidrita)	Feldespato potásico o albita	Escasa bornita, calcopirita	Relleno	
	M	-	-	Magnetita y/o especularita	Albita, clorita, epidota	(pirita) y/o (calcopirita)	Relleno	Probable evento temprano del propilítico
TARDIMAGMÁTICA TRANSICI ONAL. Evento principal de molibdeno, T°~ 400°C, ambiente frágil.	B	Planar (recta), continua, bandeada, sutura central	Milimétricas a centimétricas	Cuarzo crustiforme, típicamente magnetita	Generalmente en halo o albita feldespato potásico mm	Calcopirita y <pirita y/o bornita. Molibdenita	Paredes y parte central	El cuarzo crece desde las paredes hacia el centro sutura /espacio, a veces reutilizado por otras vetillas hidrotermales
HI DROTERMAL TEMPRANA Alteración SGV , T° entre 400 y 300°C. Ambiente frágil.	C	sutura discontinua, halo irregular	Milimétricas a centimétricas	Cuarzo, anhidrita subordinada, sericita verde, biotita, clorita y sulfuros. Puede ser sólo sulfuros.	Extenso y penetrativo (>10mm), gris verde. De forma irregulares y subparalelos al relleno.	Calcopirita-pirita o calcopirita-bornita (digenita), rara molibdenita- magnetita - bornita-calcopirita	Relleno y fuerte diseminac-ión en el halo	Similar a EB, pero corta vetillas EB, A y B. biotita y clorita estables
HIDROTERMAL PRINCIPAL alteración QS T <300 °C, Ambiente frágil	D	Planar y muy continuas	Milimétricas a centimétricas (hasta decimétricas)	Sulfuros y cuarzo subordinado	Cuarzo-sericita bien desarrollado (caolín)	Pirita/pirita-calcopirita/pirita-bornita. Domina pirita, aunque existe un evento QS rico en calcopirita	Relleno	Corta o se superpone eventos anteriores. Zonación del halo desde el centro hacia a fuera (sericita, caolín, clorita, esmectita)
HIDROTERMAL TARDÍO Ambiente de alta sulfidización	E	-	-	Cuarzo y carbonatos de fierro	-	Pirita dominante sobre calcopirita, galena, esfalerita, enargita, tennantita, tetraedrita.	Relleno	Similar a D

Su distribución espacial es hacia las zonas laterales del depósito, como representando la roca de caja del cuerpo primario

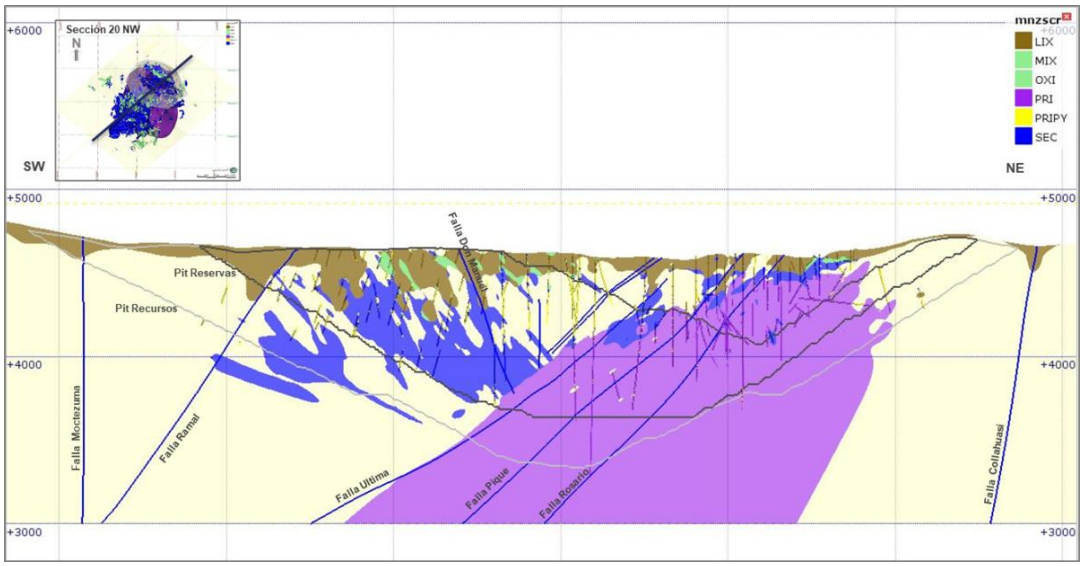

Figura 3.9: Distribución de las zonas minerales en el yacimiento Rosario, Perfil sección NWN°20. Elaboración propia.

Capítulo 4. METODOLOGÍA

Las metodologías utilizadas para abordar esta investigación consisten en un trabajo divido en cuatro etapas correspondientes: Recopilación bibliográfica, trabajo en terreno, trabajo laboratorio y trabajo de gabinete. A continuación, se describen las actividades desarrolladas en cada una de las etapas.

4.1. Recopilación bibliográfica

4.1.1. Revisión bibliográfica y base de datos histórica de sondajes

Comprendió la recopilación bibliográfica de trabajos realizados en el Distrito Collahuasi y el área de estudio la cual incluye publicaciones, tesis, reportes de la compañía, mapas, mapeos de sondajes, entre otros. Además, se recopilaron publicaciones científicas relacionadas al marco teórico de yacimientos tipo Pórfido de Cu-Mo, sistemas de alteración hidrotermal, descripción de vetillas, texturas de minerales de mena, entre otros. Se analizó la base de datos de sondajes histórica en búsqueda de información referente a mapeo de vetillas, identificando los siguientes criterios de mapeo; intensidad relativa de vetillas (I), conteo de vetillas (U), conteo por metro de vetillas (M) y volumen de vetillas (%).

El yacimiento Rosario se encuentra dividido en 35 secciones tipo, con azimut de 315°, numeradas desde el 1 al 35 en dirección norte, se denominan N°NW, además se encuentran separadas cada 70 m. Con base en dichas secciones se establecieron las secciones de trabajo que corresponden a 13NW, 20NW y 29NW. Se seleccionan al menos tres sondajes representativos en cada sección, para realizar un mapeo volumétrico de vetillas con la finalidad de identificar parámetros de unificación de datos provenientes de anteriores formatos de mapeos históricos. Fueron seleccionados solo sondajes de tipo diamantino, debido a que la estimación volumétrica de vetillas es

más certera. Debido a que la cantidad de sondajes con collar ubicado en las secciones tipo es limitado, para aumentar los metros a evaluar se seleccionan sondajes que tienen su collar en una sección contigua. Con base en los criterios antes mencionados, se seleccionaron 13 sondajes distribuidos en las secciones tipo y contiguas, ilustrados en la Figura 4.1. El total de metros de sondajes abarco 6,778.36 m.

Se determinó, desde el análisis de la base de datos, que las vetillas EB, A, B, C, D y E, serán consideradas para este estudio, ya que cuentan con datos históricos, suficientes para poder ser utilizados en el modelamiento, para realizar la clasificación de vetillas hidrotermales se realiza con base en clasificación de Gustafson y Hunt (1975) para vetillas A, B y D, para el tipo C se analizan las características definidas por Dilles y Einaudi (1992) y E descritas por Masterman y otros (2005).

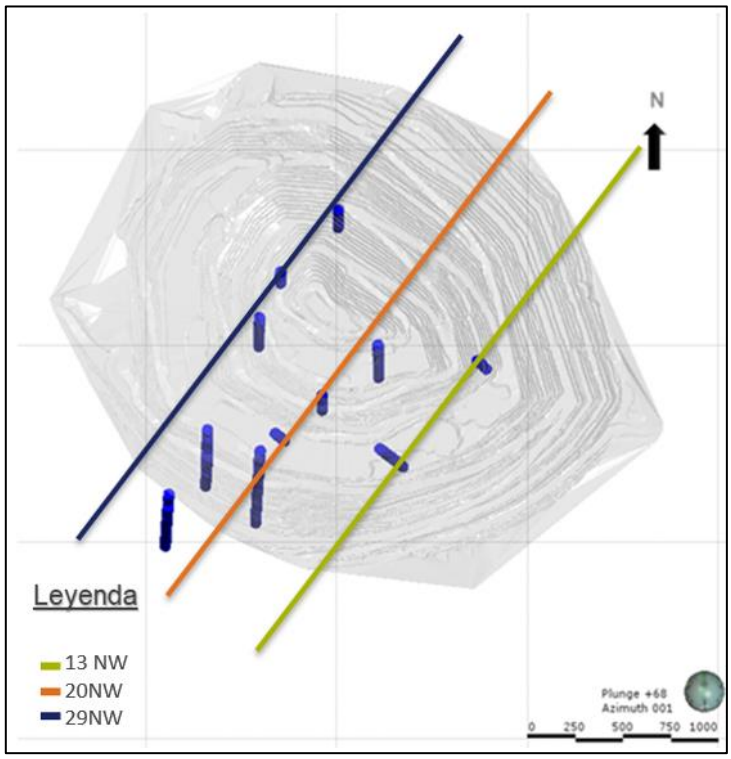

Figura 4.1: Distribución de sondajes elegidos en base a secciones tipo. Elaboración Propia.

Tabla 4.1: Sondajes Analizados.

Hole Id	Sección	Desde	Hasta	Metros Mapeados
C049	20	174	934.35	760.35
C161	29	24.19	601.4	577.21
C167	28	340	492	152
C177	20	27.5	620	592.5
C288	20	154	614	70
DDH102	29	0	332	332
DDHR075	20	266	451.75	185.75
DDHR146	24	288	1299	1011
DDHR151	20	262.5	1316	1053.5
DDHR173	14	378	831.25	453.25
DDHR223	22	278	1041.4	763.4
DER121	13	0	439.4	439.4
DER137	28	12	400	388
				6778.36

Con el análisis de la base de datos histórica se determinó el formato de revisión de los sondajes, el cual se centró en observar las vetillas siguiendo el formato definido en la Figura 4.2.

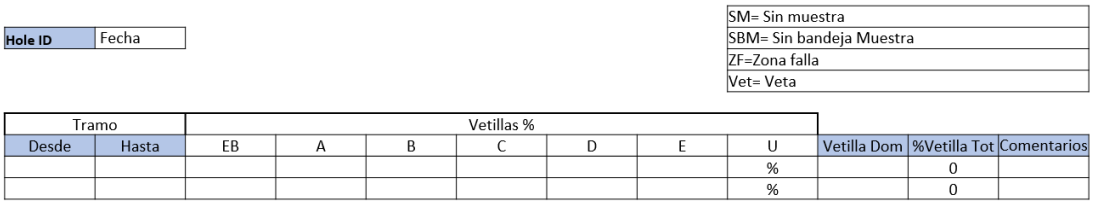

Figura 4.2: Formato de mapeo para sondajes centrado en vetillas. Elaboración propia.

4.1.2 Análisis datos de microscópica óptica histórica.

La base de datos de microscopía óptica histórica para el yacimiento Rosario constaba de muestras provenientes de distintos sectores del rajo, donde los estudios se enfocaron en determinar litología, mineralogía y tipos de alteración de áreas críticas. Los estudios petrográficos y calcográficos cuentan con informes, pero al analizar no se encuentran estudios centrados en la caracterización de vetillas hidrotermales, por lo que se descartan los datos históricos de microscopía óptica.

4.2. Trabajo en terreno

4.2.1. Mapeo de sondajes

Se realizó un mapeo detallado con enfoque en las vetillas en 13 sondajes (Tabla 4.1), los cuales se encuentran distribuidos como se observa en la Figura 4.1. Se mapeó un total de 6,778.36 m de sondaje a escala 1:100.

El foco del mapeo fue recopilar información referente a morfología, halo, relleno y temporalidad relativa de las vetillas, también se consideraron campos como litología, alteración y zona mineral. Se trabajó paralelamente con las leyes químicas de cobre, arsénico y molibdeno. Las leyes de arsénico permitieron reconocer vetas de alta sulfidización tipo E.

Los sondajes se seleccionaron con base en la ubicación en las secciones tipo, además, estos ya contaban con datos de mapeo geológico históricos de vetillas para realizar posteriormente la homologación. Para realizar el mapeo de sondajes se utilizó el Procedimiento de Mapeo Geológico vigente en CMDIC el cual incluye litología, alteración, estructuras y tipos de vetillas descritas en el yacimiento.

Para la estimación visual del porcentaje de volumen de vetillas presente en un tramo determinado del sondaje, se utilizó la Figura 4.3 como guía, donde se considera tanto el halo y relleno de las vetillas para la determinación del volumen de roca afectado por estas.

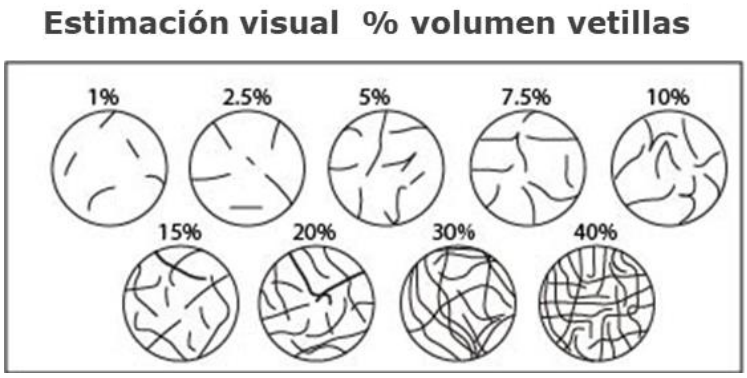

Figura 4.3: Estimación visual de mapeo volumétrico de vetillas para sondajes diamantino. Extraído de CMDIC (2014).

Como medida de control de calidad de los datos, todos los tramos fueron revisados y validados por el Geólogo Senior líder de la muestrera geológica.

Para el caso de los sondajes históricos con formato de mapeo tipo volumétrico de vetillas, se realizó un control de Qa/Qc para verificar unificación de criterios. La base de datos total representó 9,695.86 m. Se realizó una revisión del 7% de la base de datos equivalentes a 745 m. Los sondajes fueron elegidos de forma aleatoria y se detallan en la Tabla 4.2 y su ubicación espacial se observa en la Figura 4.4.

4.2.2. Toma de muestras

A medida que fueron mapeados los sondajes, se efectuó la toma de muestras de tramos de sondajes con vetillas representativas, presentes en las distintas unidades y alteraciones, además se incluyeron muestras provenientes de otros sondajes para aumentar la población de datos, la distribución de las muestras se puede observar en la Figura 4.5.

Tabla 4.2: Tramos de sondajes para análisis Qa/Qc.

Hole Id	Sección	Desde	Hasta	Metros Qa/Qc
DER115	7	520	570	50
DDH515	15	0	216	216
DDH534	14	11	85	74
DDHR238	12	766	1.082	316
DDH260	24	160	200	40
DDH260	24	208	230	22
DDH260	24	263	290	27
				745

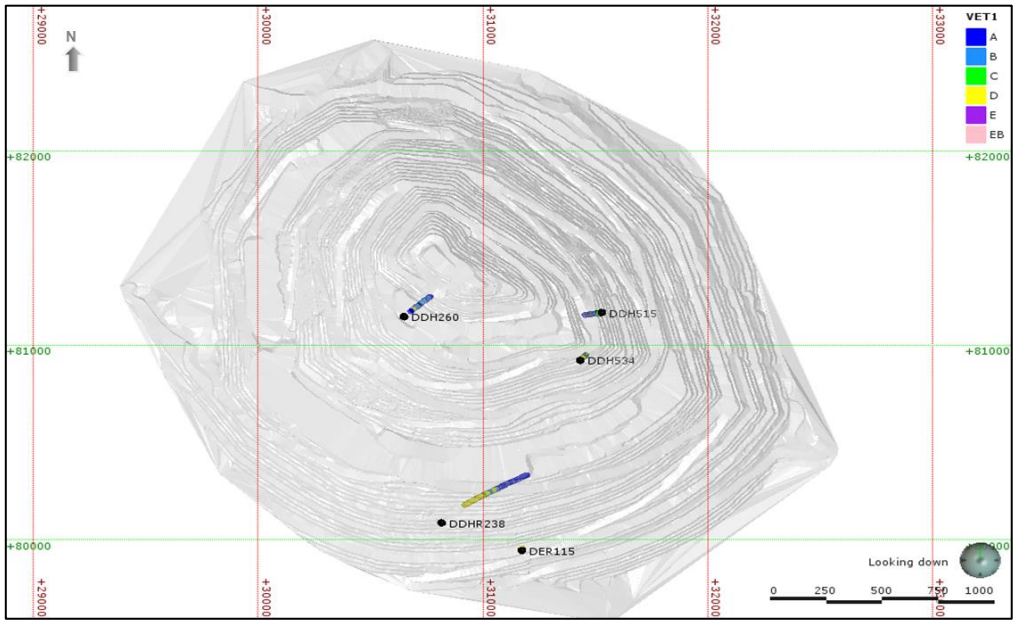

Figura 4.4: Distribución de sondajes elegidos para realizar análisis Qa/Qc, con base en el criterio de mapeo. Elaboración Propia.

Los estudios petrográficos mediante cortes transparentes (CT) y pulidos (CP) se centraron en la mineralogía de las vetillas, y en determinar la temporalidad relativa de eventos.

Las secciones se confeccionaron a partir de 25 muestras de tamaño mínimo de 10cm x 10cm, con una previa descripción macroscópica de aspectos geológicos, considerando la caracterización y clasificación litológica (interna de la empresa), tipo e intensidad de alteración dominante y subordinada, cantidad de sulfuros totales, ocurrencia, caracterización de todas las vetillas presentes y su temporalidad.

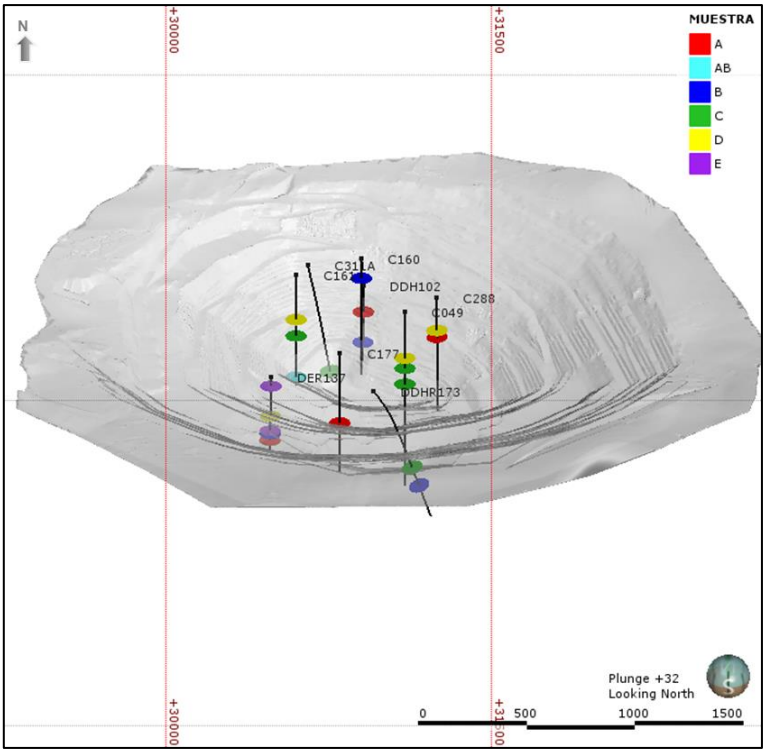

Figura 4.5: Distribución de muestras de sondajes tomadas para realizar cortes transparentes y pulidos con base en los sondajes elegidos para revisión. Los colores ilustran el tipo de vetilla predominante en la muestra, según la nomenclatura de clasificación utilizada en el yacimiento Rosario. Elaboración propia.

4.2.3. Mapeo de bancos

La metodología consistió en observar características geológicas en las paredes del rajo Rosario, con la finalidad identificar relaciones entre vetillas hidrotermales y asociaciones geológicas, además determinar orientaciones preferenciales. Para esta

actividad se utilizaron herramientas geológicas básicas y GPS, para la toma de puntos. La zona para realizar el mapeo de bancos estuvo determinada según la disponibilidad operacional.

En terreno se observaron las características de las rocas y se determinaron puntos de control, a cada uno se le asignó un tipo de vetilla dominante y subordinada. Los datos se digitalizaron posteriormente en el *software Leapfrog Geo* para generar un *pitshell* de vetillas dominantes, para utilizar en el proceso de modelamiento. Debido a la falta de datos en zonas periféricas del yacimiento se utilizaron otros *pitshell* para la proyección de los cuerpos delimitados en terreno. Para el caso de la alteración propilítica, zonas de skarn y hornfels, se tomaron como referencia sólidos ya modelados.

4.3. Trabajo de Gabinete

4.3.1. Confección de secciones transparentes y pulidas

Se realizó la toma de 25 muestras de testigos. A las muestras se les realizó una descripción macroscópica con énfasis en vetillas hidrotermales. Los análisis de petrografía y calcografía fueron realizados en el laboratorio GabGeo Ltda., mediante la confección de cortes transparentes (CT) y pulidos (CP).

4.3.2. Análisis mineralógico mediante microscópica óptica

El estudio petrográfico y calcográfico de las 25 secciones delgadas y pulidas, realizado en el laboratorio de GabGeo Ltda., donde se analizaron las micro texturas con la guía bibliográfica de Craig y Vaughan (1981), Mackenzie y Guilford (1997) y Raith y otros (2012). Para complementar las descripciones realizadas por GabGeo, las muestras seleccionadas fueron revisadas en el Laboratorio de Microscopía Óptica de la

Universidad de Atacama. El estudio tuvo énfasis en la observación de texturas presentadas por los minerales de mena y ganga en las vetillas.

Para determinar subtipos de vetillas, es decir tipos especiales, estos deben contar con diferencias texturales y de composición a nivel macroscópico y/o microscópico, además deben ser representativas en la cantidad de observaciones realizadas.

La descripción de los CT y CP, basado en las relaciones de las vetillas hidrotermales tuvo la finalidad de poder determinar los minerales que conforman tanto el relleno, sutura y halos, como también las relaciones de corte para determinar temporalidad de eventos.

4.3.3. Generación y homologación de base datos

Luego de la selección y *loggeo* geológico de los sondajes seleccionados se realizó la generación de datos incorporando parámetros como litología, alteración, zona mineral, RQD, leyes, vetillas entre otros, se generó la base de datos “Ros_geo_vet”. Con el fin de aumentar la cantidad de información para realizar el modelamiento geológico, se generó un proceso de homologación de los datos históricos de vetillas en abundancia (débil, moderada y fuerte) a rangos de volumen, este análisis se realizó mediante la base de datos “Ros_geo_vet” y la histórica “Ros_geo_hist” mediante el *software Leapfrog Mining*.

Con la herramienta *“Merge”,* la cual permitió unir distintas bases de datos en tramos de sondajes compositados, además se utilizó el *software Statistica* para realizar el análisis estadístico de los datos. Mediante funciones de probabilidad se determinaron rangos para cada tipo de abundancia histórica.

Primero se generó una base de datos que contiene solo sondajes con tipo de mapeo volumétrico. La base de datos final está representada por 75 sondajes en un archivo denominado “Ros_geo_BDV” con 13,548.85 m bajo la topografía con fecha 01/05/18.

Mediante 24 sondajes, los cuales cuentan con datos en ambos formatos, se realizaron comparaciones según si el tipo de vetilla principal es coincidente en el parámetro “abundancia”, realizando gráfica tipo normal *P-Plot* para definir los rangos volumétricos asignados a cada abundancia ilustrado en la Figura 4.6. Según la estadística se determinó, que no existe una correlación clara de los datos, por esto no se puede realizar una homologación directa entre los datos de vetillas volumétrico y de abundancia (moderada, débil y fuerte).

Como se observa en la Figura 4.6, para los distintos tipos de abundancia no existe una población o rango claro para realizar la homologación, debido a diferencias en el criterio de mapeo. Pero se logró definir tres poblaciones de datos en cada abundancia, los cuales se utilizaron como referencia de datos de intensidad de vetillas con datos volumétricos.

Debido a que no se logró realizar una conversión por rangos de forma directa, se modifica la metodología, se realizan nuevos estudios estadísticos para ver la correlación de mapeos (Figura 4.7), para poder evaluar correlación de datos.
En la Figura 4.7 se ilustra el porcentaje de coincidencia entre mapeos, donde Tv1_BDH se refiere a vetilla dominante o vetilla 1, así consecutivo a vetillas subordinadas. Se observó claramente que las vetillas tipo A, B y D tienen un porcentaje alto de coincidencia entre mapeos, versus al tipo C y E.

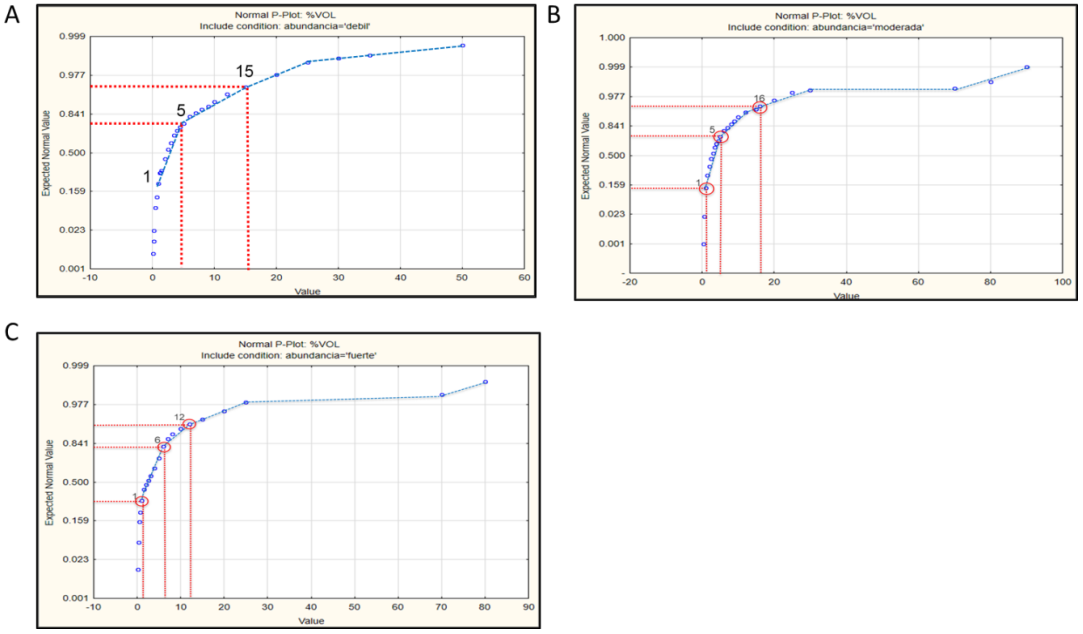

Figura 4.6: Gráficos obtenidos del *software Statistica* donde ilustran la distribución de los datos históricos, según el rango de abundancia v/s el mapeo volumétrico, donde se reconocen tres rangos poblacionales para realizar la homologación. Elaboración propia.

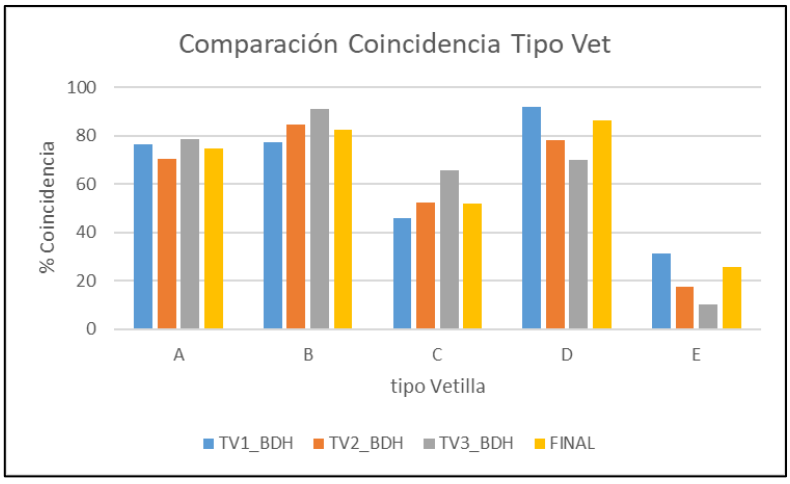

Figura 4.7: Gráfica de coincidencias de mapeo referente a vetillas. Elaboración propia.

Mediante *software Leapfrog Geo* y la herramienta "*Interval Selection",* se realizó una selección manual del tipo de vetilla y abundancia (Figura 4.8), a su vez se le asignó un

grado de confianza al dato nuevo según la distancia a este (Ver Tabla 4.3). Se utilizaron los datos “Ros_geo_BDV” y “Ros_geo_BDH” donde se creó una nueva columna con el dato de vetilla y abundancia, donde se le asignó el valor del sondaje cercano y se asignó una confianza según la distancia del tramo al dato.

Con el proceso anterior se generaron dos bases de datos finales, una con información de la geología y vetillas equivalente a 43,562.229 m de datos, obtenidos de sondajes bajo la topografía con fecha del 01/05/2018, denominada “Ros_ass_geo_vetillas”, y la otra denominada “Ros_ass_geo_vetillas_pp”, que solo incluyó los datos referentes a vetillas.

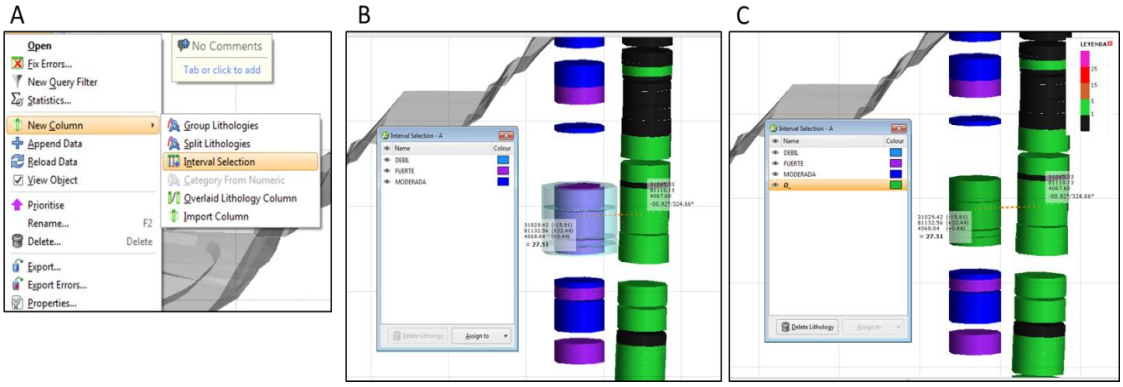

Figura 4.8: Procedimiento para realizar *“Interval selection*”. A: Creación de la nueva tabla, B: selección de tramo designado en base a leyenda de porcentaje volumétrico. C: cambio de asignación del tramo. Elaboración propia.

Tabla 4.3: Confianza asignada a los datos según distancia al dato original.

Distancia (m)	**Confianza del dato**
0≤D≤70	Alta
70<D≤150	Moderada
150<D≤250	Baja

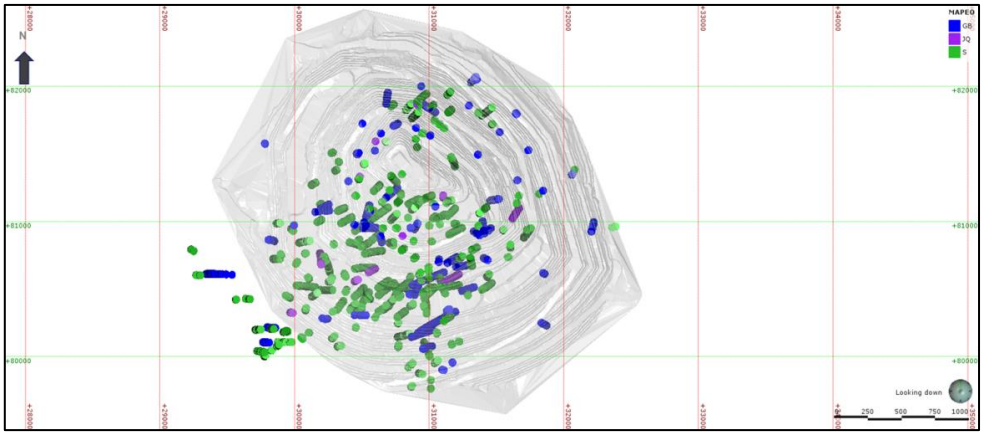

Figura 4.9: Representación visual desde planta de la base de datos final, donde los colores representan el origen del dato. JQ: Sondajes revisados en esta tesis; GB: Datos históricos con mapeo volumétrico; S: Datos obtenidos mediante *"Interval Selection"*. Elaboración propia.

4.3.4. Análisis estadísticos

La base de datos generada con anterioridad "Ros_ass_geo_vetillas", se utilizó para la generación de análisis estadísticos mediante el *software Statistica*, generando gráficas *Mean plot*, comparando leyes de elementos de interés versus vetillas.

Mediante gráficas de *Excel* de tipo barras y circular se comparó el parámetro tipo de vetillas con alteración, litología y mineralización, para encontrar tendencias de los datos y comprobar la homologación.

4.3.5. Confección de plantas y secciones

Las plantas y secciones geológicas son herramientas útiles para ver la distribución de los datos. Estas permitieron crear guías para el modelamiento en 3D y ayudan a comprender el comportamiento de la distribución de vetillas en profundidad. Se utilizaron los sondajes homologados con la variable tipo de vetilla principal o

predominante, pertenecientes a las secciones tipo con orientación NW 13, 15, 20, 24 y 29, como se observa en la Figura 4.10.

Para la confección de las secciones se utilizó una escala 1:100, realizando dos pasos, el primero fue crear las secciones sin utilizar los datos estructurales para ver tendencias naturales de los datos y luego replicar las secciones utilizando estructuras. Lo mismo se realizó con las plantas, las cuales fueron realizadas en las cotas 4,150 ; 4,105 ; 4,000 y 3,850 ms.n.m.

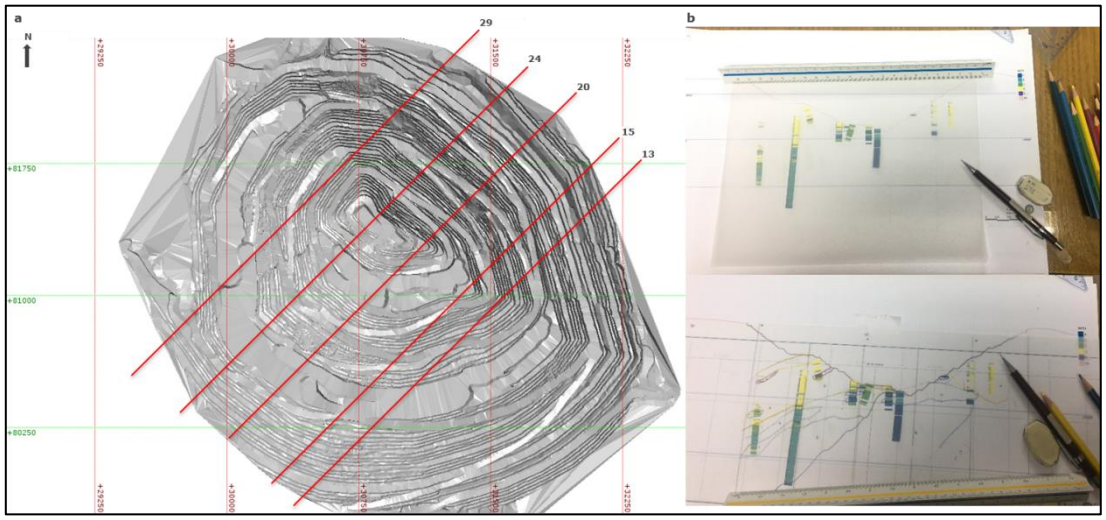

Figura 4.10: A la izquierda: distribución de las secciones tipo con orientación NW. A la derecha: imágenes de la creación de secciones tipo a mano alzada. Elaboración propia.

4.3.6. Confección de *pitshell*

Un *pitshell* es la representación de la geología en la "cascara" o parte superficial de un yacimiento con método de explotación cielo abierto. Obtenido mediante el mapeo de los bancos de extracción. El modelo de *pitshell* abarca una profundidad de 30 m, es decir, dos bancos de producción.

En la actualidad, el yacimiento Rosario cuenta con cuatro fases de extracción activas fase N° 8, 9, 10 y 11. Se realizó visitas en terreno para realizar mapeo de bancos, como se observa en la Figura 4.11. El énfasis del mapeo se centró en las vetillas, asociaciones geológicas que existen entre éstas y características geológicas de la roca. Se analizó un total de 2.986,86 m de las paredes del yacimiento.

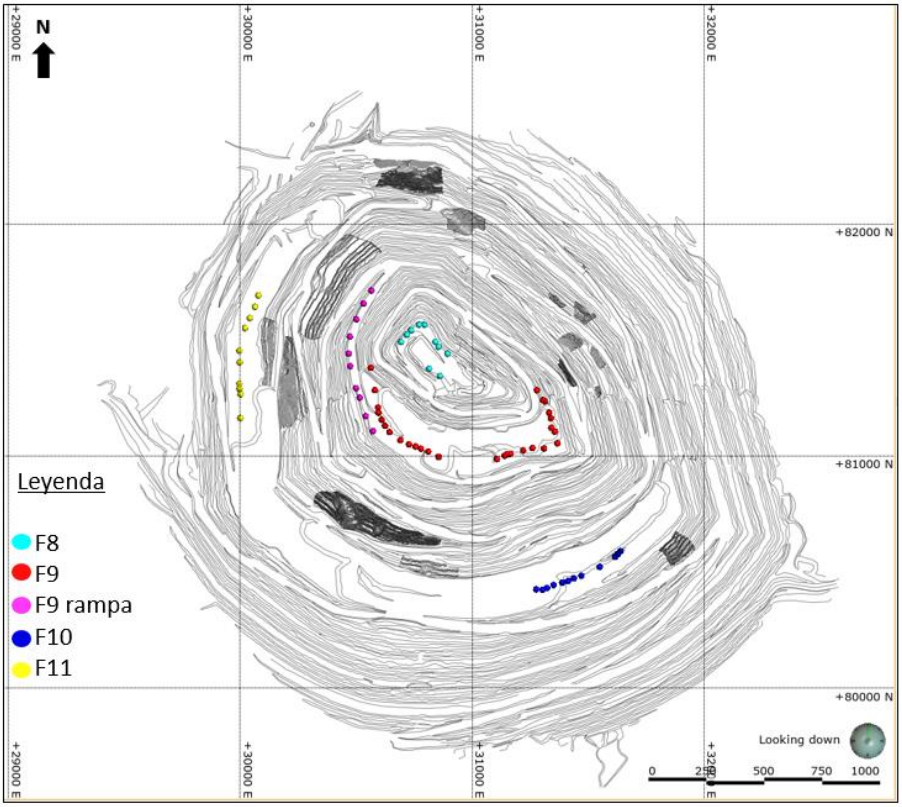

Figura 4.11: Distribución de los puntos de control tomados en la actividad de mapeo de bancos, el color tal como se muestra en la leyenda ilustra las fases visitadas. Elaboración propia.

Para la creación del *pitshell* se digitalizó mediante *Leapfrog Geo* los puntos de control y se generaron las polilíneas de las zonas interpretadas en terreno. Se consideró las observaciones para cada tipo de vetilla. Las zonas del yacimiento que no pudieron ser visitadas, se utilizaron los *pitshell* de alteración, litología y zona mineral.

4.3.7. Modelamiento con *Leapfrog Geo*

Consistió en el modelamiento mediante el *software Leapfrog Geo*, en el cual se trabajó con la base de datos homologada de sondajes del proyecto "Ros_ass_geo_vetillas_pp". El proceso de modelamiento se realizó con base en dominios geológicos, definidos mediante diferencias en la distribución de las vetillas. Los datos obtenidos en mapeo de banco fueron utilizados para generar un nexo entre los sondajes y la superficie. Como apoyo se digitalizaron como polilíneas las secciones y plantas modeladas con la vetilla principal para dar tendencias al modelo.

En el proceso de modelamiento se utilizó como herramienta auxiliar el *software Leapfrog Mining* y *Vulcan*. Con el fin de dar soporte geológico al modelo, se realizó una separación de las zonas con predominancia de cierta vetilla, separando de las áreas con alteración tipo propilítica, skarn y hornfels.

Por aspectos operativos del modelamiento, se consideraron las rocas metamórficas tipo skarn y hornfels como un tipo de alteración, en Collahuasi.

Debido a la densidad de datos, solo se modelaron las vetillas tipo A, B, C, D y E. En el caso del tipo EB, estas presentaron una densidad baja de datos y el tipo "Otras" representaron un grupo heterogéneo de datos, en consecuencia, ambas categorías quedaron fuera del modelamiento.

Se inició el modelamiento con la definición de un volumen, para fijar los límites de las unidades modeladas más adelante.

La Figura 4.12 ilustra este paso, donde se utilizó como referencia la topografía del 01/05/18, a la que se le generó un "*Numeric model"* para proyectar la superficie en 1,000 m de profundidad, esto similar al límite de los modelos de largo plazo.

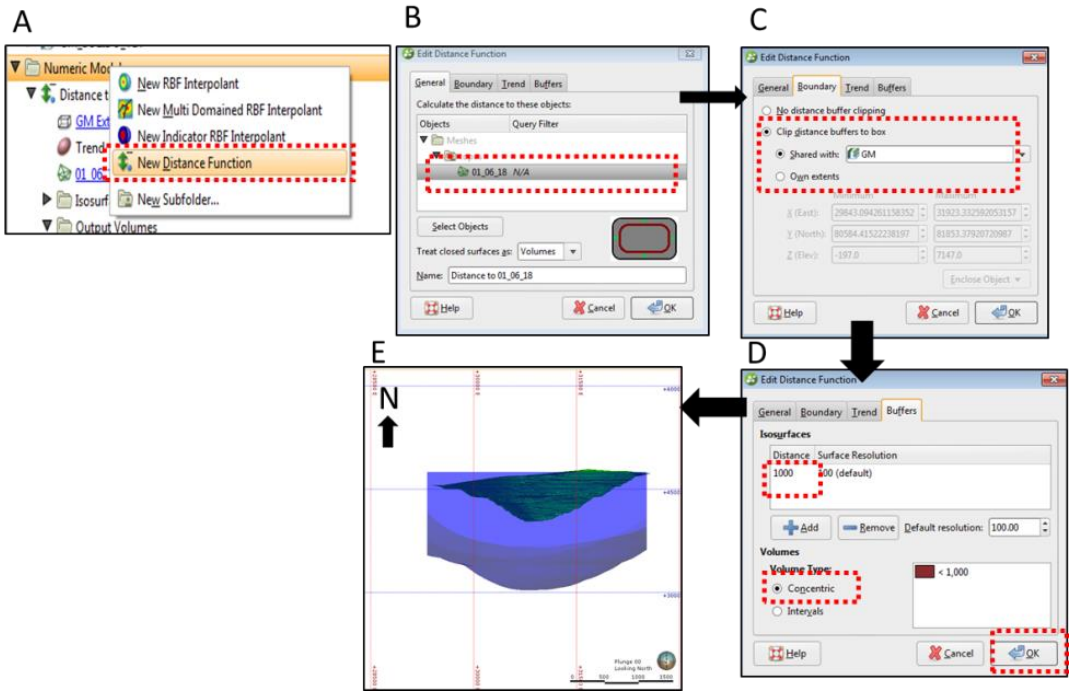

Figura 4.12: Pasos para generar un volumen que limitará el modelamiento de sólidos de vetillas. Elaboración propia.

El modelamiento se realizó con la utilización de polilíneas, las cuales fueron dibujadas mediante *Leapfrog Geo*, en visualización en secciones y son útiles para dar tendencia a los sólidos generados.

En la base de datos los tramos menores a 10 m fueron ignorados del modelamiento, ya que por configuración del *software* se generan volúmenes muy pequeños, la Tabla 4.4 contiene los "Hole ID" y metros ignorados en el modelamiento.

Tabla 4.4: Metros de sondajes ignorados.

Hole ID	Metros totales
DER29	7.6
DDHR247	9.3
DDHR153	2
DDH249	26
DDH086	5

Al visualizar los datos de sondajes, se realizaron filtros según columna Mapeo que tiene los datos JQ, GB y S; JQ significa que el mapeo fue realizado por la autora, GB Geoblast (Empresa contratista de servicios geológicos en CMDIC) y S datos obtenidos mediante "*Selection"*. Se realizó el filtro para visualizar datos con mapeo JQ y GB (Figura 4.13 A). Si se contaron con pocos datos se quitó el filtro para visualizarlos todos. Debido a que el yacimiento no cuenta con una malla regular y no todos los sondajes contienen la variable de vetillas se utilizan indicadores.

Del estudio estadístico se obtuvo indicadores o *scripts*, para cada tipo de vetilla en base a rangos de leyes de Cu, Mo, Fe, As, Au y Ag. Los indicadores se generaron en una tabla *Excel* y ayudaron a rellenar zonas sin datos.

Si el tramo cumple con las características de cierta vetilla, al indicador se le asigna valor 1, si no valor 0 (Figura 4.13-C). Se visualizaron sólidos de parámetros geológicos para el mediano plazo y largo plazo para poder definir la tendencia o extensión de la polilínea de modelamiento de cada vetilla (Figura 4.13 E).

En la Figura 4.14 se visualizan los parámetros para la generación del modelo geológico, donde los límites del modelamiento según los collares de los sondajes con la variable vetillas. se generó cada sólido de vetilla como "*New intrusion"* con datos de sondajes y luego se afinó mediante polilíneas.

Al finalizar el modelamiento se revisó mediante secciones, los sólidos generados en caso de tener zonas con espacios o vacías, como se observa en la Figura 4.15 en la izquierda, se generó una base de datos de sondajes auxiliares con la misma variable del sólido, para mejorar su resolución y disminuir espacios vacíos (Figura 4.15 a la derecha).

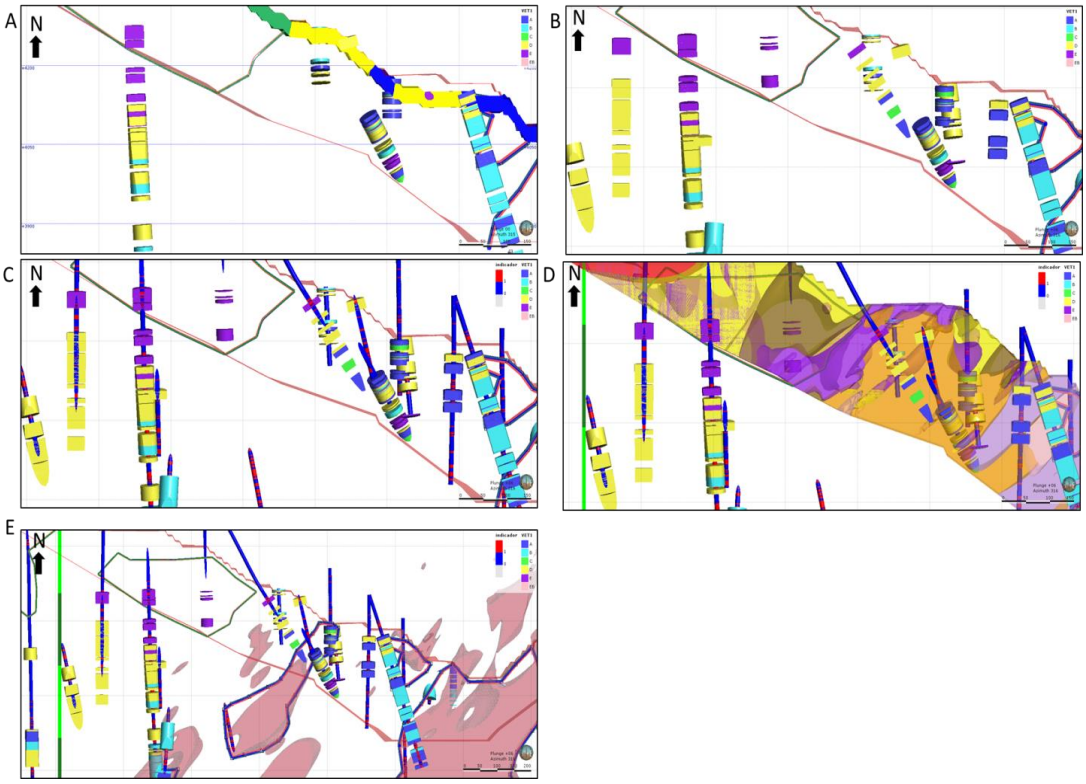

Figura 4.13: Procedimiento para proyección de polilíneas desde pitshell de vetillas, donde: A) visualización de sondajes filtro mapeo (JQ y GB), B) la baja densidad de datos provoca utilizar datos con mapeo tipo S, C) visualización de sondajes con parámetro indicadores, como guía de modelamiento, d) Para ayudar en la proyección de polilíneas se visualizaron sólidos de litología, alteración y zona mineral de mediano plazo. e) se cargan los mismos sólidos para largo plazo y según corresponda se proyectan las polilíneas de cada vetilla, elaboración propia.

4.3.8. Interpretación de resultados

Correspondió a la parte final del presente trabajo, consistió en la interpretación y análisis de la información recopilada a lo largo de las diferentes etapas mencionadas anteriormente, indicando el proceso de homologación de la base de datos histórica, la generación del modelo preliminar, caracterización de vetillas y conclusiones. Para la escritura del texto se utilizó las abreviaciones mencionadas en la Tabla 4.5, las cuales representan, tipos litológicos, alteraciones y minerales.

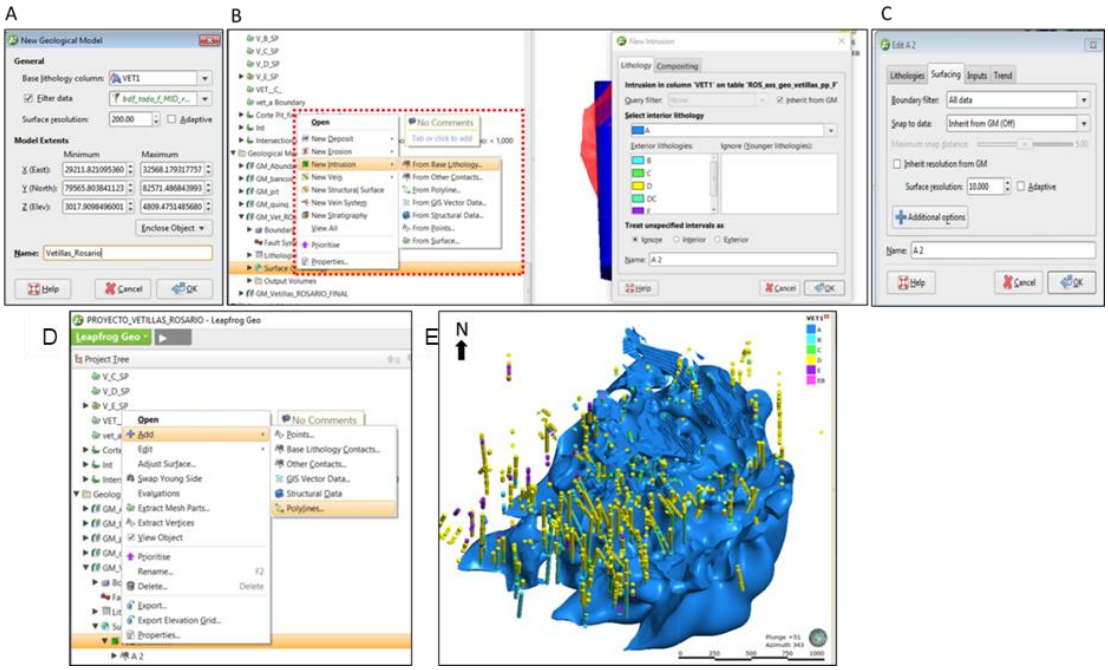

Figura 4.14: Procedimiento de creación de modelamiento geológico. A) Definición de límites del modelamiento. B) Generación de nueva intrusión en base a sondajes, C) Definición de parámetros de sólidos. D) Integración de polilíneas para mejorar resolución y E) Sólido generado, elaboración propia.

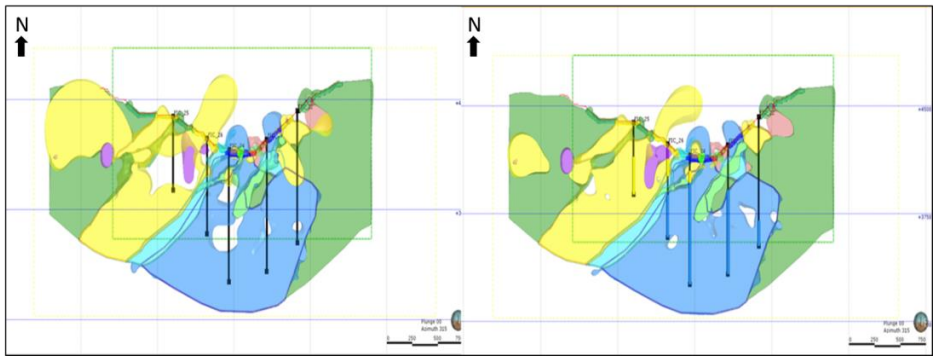

Figura 4.15: Sondajes auxiliares para mejorar la resolución de sólidos generados (Elaboración propia).

Tabla 4.5: Abreviaciones utilizadas.

Abreviaciones	
PRO	Pórfido Rosario
PCO	Pórfido Collahuasi
DAC	Dacita
TOB	Toba
USED	Unidad sedimentaria
AND	Andesita
LIX	Zona mineral de Lixiviado
OXI	Zona mineral de Oxidos
MIX	Zona mineral de Mixto
PRI	Zona mineral de Primario
PRIPY	Zona mineral de Primario piritico
A	Alteración Argílica Avanzada
AA	Alteración Argílica
P	Alteración Propilitica
K	Alteración Potasica
B	Alteración Potasica de Biotita
CS	Alteración Clorita Sericita
SGV	Alteración Sericita Gris verde
QS	Alteración Filica o Cuarzo sericita
SQS	Alteración Selectiva Cuarzo sericita
SK	Alteración Skarn
HNF	Alteración Hornfeld
Py	Pirita
Cpy /Cp	Calcopirita
Bo	Bornita
Mo	Molibdenita
CC	Calcosina
En	Enargita
Esf	Esfalerita
Qz	Cuarzo
Ser	Sericita
Bt	Biotita
Alu	Alunita
Feld K	Feldespato potasico
Ill	Illita
Clo	Clorita
Al	Albita
Sm	Smectita

Capítulo 5. RESULTADOS

5.1. Petrografía

5.1.1. Mineralogía de vetillas en Rosario

Se enviaron 25 muestras de 10 cm cada una pertenecientes a sondajes del área Rosario (ambiente tipo pórfido). El análisis petrográfico y calcográfico se realizó en el laboratorio GabGeo Ltda., cuyas muestras fueron reanalizadas en el Laboratorio de Microscopía Óptica de la Universidad de Atacama.

Con las observaciones en terreno y los análisis microscópicos, se caracterizó en forma detallada cada tipo de vetilla, de acuerdo con la clasificación de vetillas de Gustafson y Hunt (1975) para tipo A, B y D, las C según Dilles y Einaudi (1992) y E descritas por Masterman y otros (2005). Se captura de cada vetilla los espesores, minerales que componen el halo, relleno, forma y volumen en base a roca total.
A continuación, se presentan las principales características que fueron observadas para las vetillas modeladas.

5.1.1.1. Vetillas A

Las vetillas tipo A, en el yacimiento Rosario, se caracterizan por ser discontinuas e irregulares, sin simetría interna, pueden presentar halos de feldespato potásico y albita. El relleno está compuesto por cuarzo de color gris pálido con “textura sacaroidal” en muestra de mano. Bajo el microscopio se observó la típica textura de cuarzo secundario de forma anhedral, la albita se distinguió por color blanquecino, las menas principales son calcopirita y bornita. Es común encontrarlas formando arreglos de vetillas poli direccionales o *stockworks*.

Tal como sostiene Masterman (2003) y Ireland (2010), se logró identificar tres generaciones de vetillas tipo A.

A1: Vetillas discontinuas, irregulares, sinuosas y finas, compuestas por biotita, cuarzo y calcopirita, el grado de mineralización es bajo. Este tipo de vetilla son escasas, se han observado en rocas de caja, como dacita, pero no en el pórfido Rosario (PRO) (Figura 5.1).

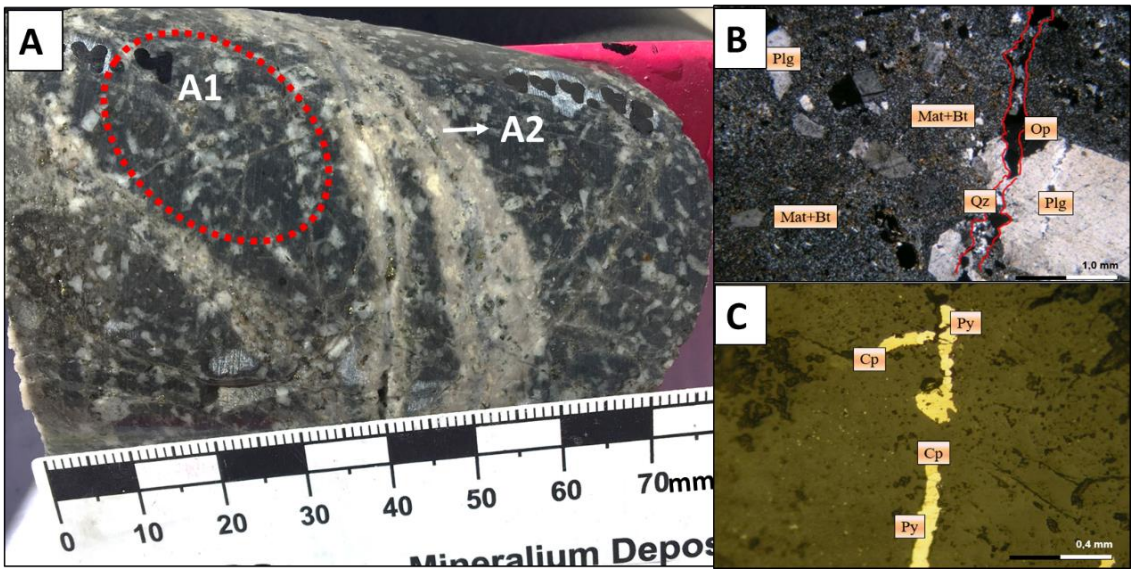

Figura 5.1: A) Muestra DM-204_DDH102_144,4, vetillas tipo A1 finas y discontinuas, también se observan vetillas tipo A2 en dacita. B) Fotomicrografía muestra DM-204 en Nicoles cruzados, 20x, vetilla A2 (en rojo) compuesta de cuarzo secundario (Qz), feldespato K (FK) y opacos (Op). C) Fotomicrografía muestra DM-204 en Nicoles p., 100x, mineralización compuesta de calcopirita (Cp) reemplazando en caries a pirita (Py). Elaboración propia.

A2: Vetillas discontinuas, con paredes irregulares y sinuosas, con grosor mayor a 35 mm, pueden presentar o no halos, compuestas por cuarzo, albita, biotita, pirita y calcopirita, el grado de mineralización es medio. Este tipo de vetilla se desarrolló en rocas aledañas a la intrusión, pero no en PRO (Figura 5.1).

A3: vetillas discontinuas, con paredes irregulares a regulares, sinuosas, con grosor <50mm pueden presentar o no halos, compuestas por cuarzo granular, albita, feldespato, calcopirita y bornita, el grado de mineralización es alto. Este tipo de vetilla se desarrolló principalmente en PRO y rocas contiguas (Figura 5.2).

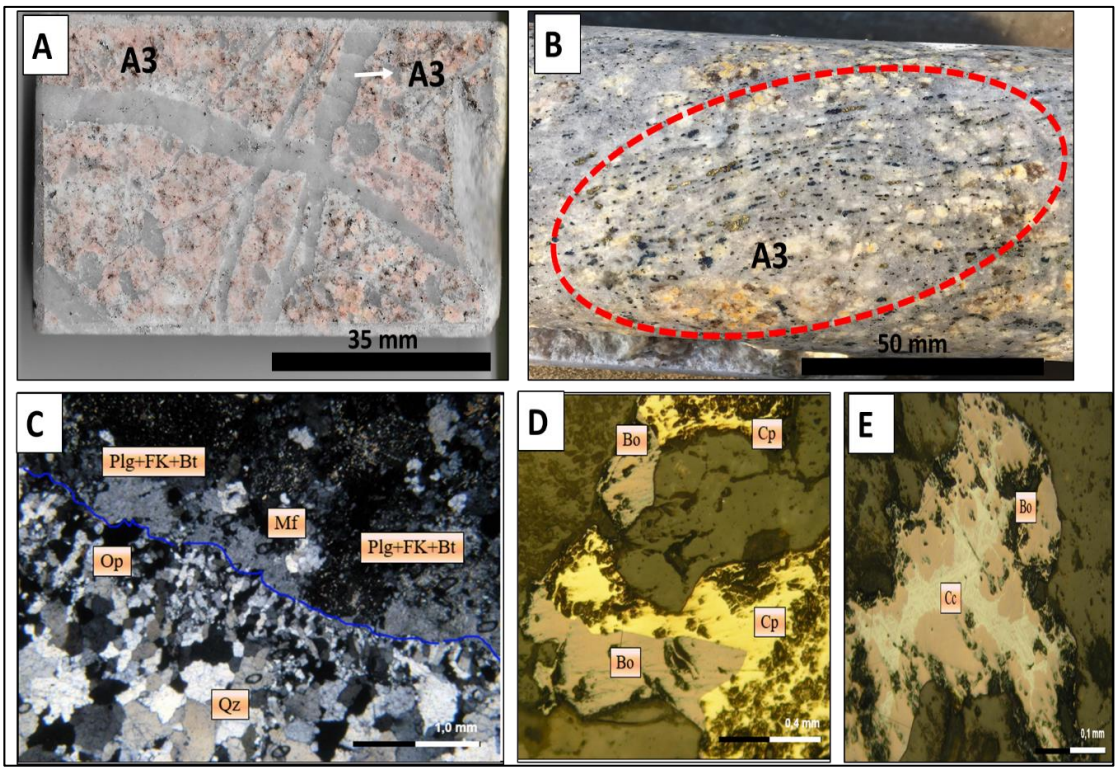

Figura 5.2: A) Muestra DM-217_DER146_955,8, PCO con vetillas tipo A3 de calcopirita-bornita. B) Muestra DM-211_DER137_337, con *stockwork* de vetillas A3, con calcopirita-bornita. C) Fotomicrografía de muestra DM-211 en nicoles c. 20x, de zona de vetillas tipo A3 con Op opacos, Qz cuarzo secundario, Mf masa fundamental, Plg plagioclasa, FK Feldespato pótasico. D) Fotomicrografía de muestra DM-211 en nicoles p., 100x mineralogía de vetillas de calcopirita (Cp) con reemplazo en caries de bornita (Bo). E) Fotomicrografía de muestra DM-211 en Luz Reflejada en nicoles p., 200x, se observa bornita (Bo) en exsolución con calcosina primaria (Cc). Elaboración propia.

En terreno, las vetillas tipo A se identificaron como dominantes en fase 8, asociadas a tobas cristalinas con alteración potásica y mineralización calcopirita-bornita,

calcopirita-pirita y bornita-pirita, con un volumen de vetillas A con un promedio del 6% en la roca. Se observó que este tipo de vetillas tienen paredes sinuosas, con relleno de cuarzo, sulfuros y feldespatos, no se logró identificar halos de alteración (Figura 5.3).

Además, se observó cómo vetilla dominante en zonas aisladas en toba y alteración SGV selectiva en halos y alteración potásica de fondo, además en áreas con USED y alteración biotitita (B). En el sector Sur de la fase 8 se distinguieron tanto en pórfido Rosario y Collahuasi con alteración potásica y biotita, con mineralización primaria de calcopirita-pirita, tipo A2.

Las vetillas tipo A, se identificaron asociadas a vetillas subordinadas tipo B, C y D en zonas cercanas a las estructuras. Debido a las asociaciones antes descritas el sólido de vetillas tipo A se pudo extender en la parte inferior del yacimiento siguiendo los cuerpos de TOB, USED, PCO y PRO definido en el *pitshell* litológico.

Figura 5.3: Vetillas tipo A observadas en roca pórfido Rosario con alteración potásica de fondo. Elaboración propia.

5.1.1.2. Vetillas B

Las vetillas de cuarzo tipo B se definen como vetillas transicionales de cuarzo con molibdeno. Este tipo de vetillas controlan la mayor parte del molibdeno en el depósito. Se asume que rellenan fracturas producidas por pérdida de volumen en un sistema que se enfría (transición frágil-dúctil).

Tienen bordes rectos, con espesores de 10 mm hasta 150 mm, pueden desarrollar o no sutura central de molibdenita. El relleno de las vetillas es cuarzo de color gris, subhedral a euhedral, el molibdeno puede estar depositado tanto en las paredes como en la parte central de la vetilla, entre bandas de cuarzo o en la sutura central. Además, se pueden encontrar trazas de pirita (Py) y calcopirita (Cp).

Por lo general no se observó un claro desarrollo de halos de alteración. Este tipo de vetillas se ha identificado en litologías PRO, PCO y zonas proximales a la intrusión en rocas de caja tipo TOB, DAC y USED. En muestras de mano se pudieron determinar al menos tres tipos de vetillas tipo B, con claras diferencias texturales.

B1: Vetillas transicionales entre los tipos A y B, es decir, son vetillas continuas, sinuosas y con paredes regulares, que albergan molibdeno en las paredes o diseminado en el relleno. El cuarzo tiene textura granular o “sacaroidal” (Figura 5.4) y se ha observado trazas de calcopirita, pirita y bornita.

B2: Vetilla del tipo bandeada, con paredes rectas e irregulares. Los grosores de este tipo de vetilla son variables, desde 2 cm hasta mayores a 20 cm, debido a que tienen una zona de debilidad que pudo ser utilizada por vetillas más tardías como lo son el tipo D y E.

La coloración oscura de las bandas se debe a un alto contenido de inclusiones fluidas ricas en vapor (Avalos, 2019) (Figura 5.4). Se emplazaron en zonas donde las fracturas

tienen suficiente espacio para el paso de fluidos hidrotermales de forma libre, donde la precipitación de los minerales representa la evolución del fluido.

B3: Corresponden a las clásicas vetillas tipo B descritas, con paredes rectas, continuas y simétricas, representativas de un sistema con comportamiento transicional a frágil, con potencias entre 20 mm a 60 mm. Tal como los otros tipos de vetillas B, es común la ausencia de halos de alteración, pero en fotomicrografías se distinguieron finos halos de sericita en las zonas aledañas a la vetilla, además se observó que pueden tener en menor cantidad calcopirita, pirita y bornita.

Es común encontrar a vetillas B3 con sutura de pirita. Este tipo de vetillas pudieron ser reutilizadas por vetillas más jóvenes tipo D y E, y tener el desarrollo de halos de alteración característicos de ese tipo de estructuras (Figura 5.4).

En terreno, sector de fase 8 se observó áreas limitadas donde predominan las vetillas tipo B en tobas con alteración SGV y K, con mineralización calcopirita-bornita. En fase 9 están asociadas a USED con alteración biotítica y mineralización calcopirita-pirita, al este de fase 9 se distinguieron en PCO y PRO con alteración biotítica, potásica y filica, con un volumen promedio del 10% de vetilla respecto a roca total.

En muestras de mano se logró identificar los tres tipos de vetillas tipo B, tipo B1 vetillas sinuosas que tienen solo molibdeno sin cuarzo, tipo B2 de forma bandeadas con molibdeno y cuarzo masivo “lechoso” depositado en franjas y B3 vetillas rectas con cuarzo prismático y molibdeno en sutura o en paredes de la vetilla, el cual puede o no presentar cristalización (Figura 5.5).

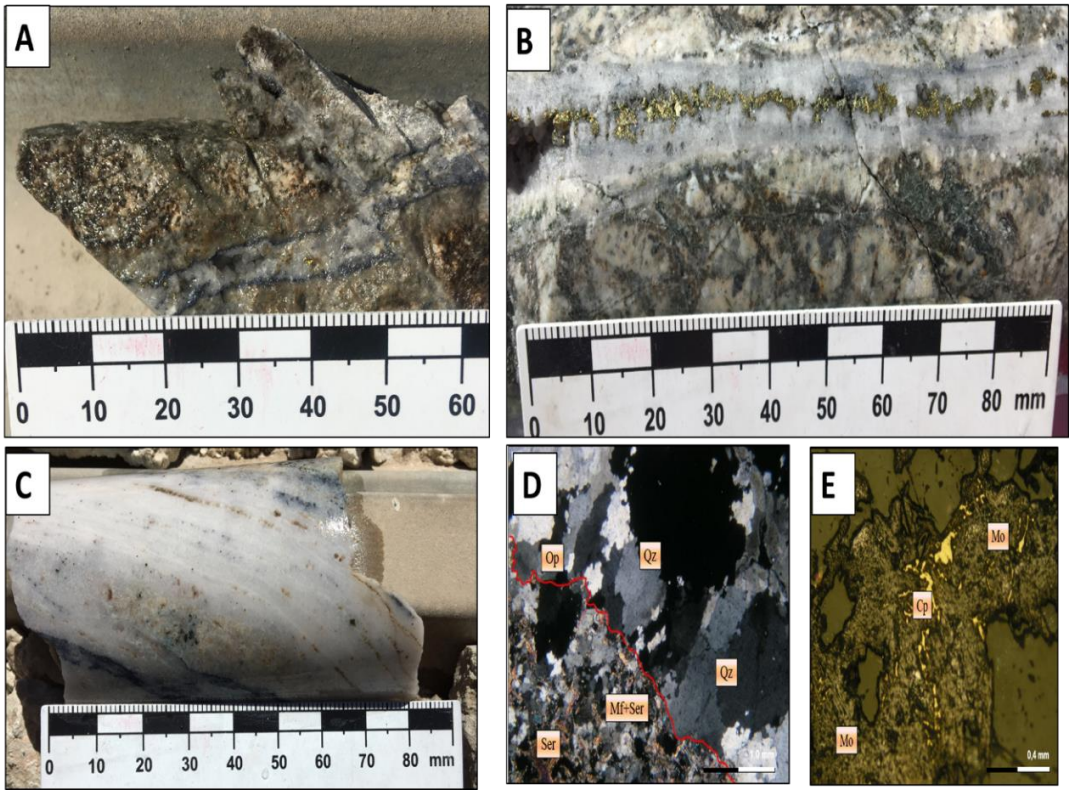

Figura 5.4: Sondaje C161_335,1 Vetilla tipo B1 con molibdenita en paredes de vetilla, en PCO. B) Vetilla B3 con cuarzo euhedral y molibdenita en sutura, reutilizada por tipo D con precipitación de pirita, en dacita. C) Vetilla tipo B2 bandeada con molibdenita depositada en bandas a medida que evoluciona el fluido. D) Fotomicrografía Nicoles c., 20 x Muestra DM-215_DDHR151_986,45 a la izquierda vetilla con cuarzo secundario (Qz) y opacos (Op) cortando a fenocristales pseudomorfos de plagioclasa con reemplazo de sericita (Ser) y la masa fundamental sericitizada (Mf+Ser). E) Fotomicrografía muestra DM-215 Nicoles p.100x. mineralización en vetilla de calcopirita (Cp) con reemplazo en anillo de molibdenita. Nicoles Paralelos 100x. Elaboración propia.

Las vetillas B se observaron en conjunto con vetillas subordinadas tipo D, por reutilización y tipo A y C asociado a etapas tempranas del sistema hidrotermal.

El cuerpo de vetillas tipo B mapeado se pudo extender por la relación de alteración litológica, en el caso de la fase 9 oeste se extendió en relación con el desarrollo de

alteración temprana en rocas USED, DAC y TOB, abarcando una zona aledaña de PCO con alteración K y zonas con alteración QS, donde las vetillas B son reutilizadas por el tipo D.

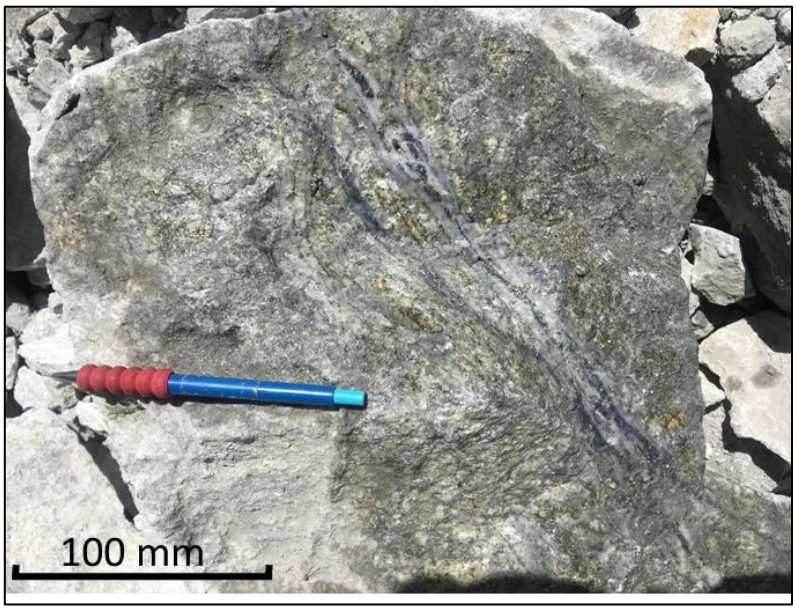

Figura 5.5: Vetilla tipo B con reutilización de vetilla. Elaboración propia.

5.1.1.3. Vetillas C

Estas estructuras reflejan un evento de alteración intermedio o transicional entre la alteración potásica y fílica, relacionadas genéticamente con alteración a sericita gris verde SGV.

Este tipo de vetillas son rectas, con sutura fina y discontinua, desarrollan grandes halos de alteración de tonalidades claras a oscuras, compuestas por sericita, clorita, illita. Además, tienen diseminación de sulfuros de calcopirita ± bornita ± pirita. El relleno de las vetillas está compuesto por cuarzo subhedral, illita. Los sulfuros que acompañan a estas vetillas dependen de la zona donde se emplazaron, desarrollando asociaciones de calcopirita-pirita o calcopirita-bornita-digenita.

Por definición al ser una alteración formada a alta temperatura, la SGV pudo formar andalucita. Esta característica solo se observa en la muestra DM-195_C049_392,42, pero no se consideró una característica distintiva en Rosario. En muestras de mano se identificó que este tipo de vetillas, por relaciones de corte tienen una temporalidad posterior que las antes descritas (A y B). Las vetillas con calcopirita y bornita tienen un grado de mineralización alto, donde las menas se concentran tanto en la sutura como diseminadas en el halo, como se observa en la Figura 5.6 y Figura 5.7.

Se logró observar una sobre imposición del evento QS con vetillas tipo D, que cortan a las C y destruyó el halo de alteración, solo quedando como evidencia la sutura fina y discontinua con diseminación en forma de halo (Figura 5.6 y Figura 5.7).

Este tipo de vetillas son abundantes en pórfido Rosario y Collahuasi, localmente se han identificado en tobas, se debe destacar que luego que Masterman (2005) definiera este tipo de vetillas en el yacimiento, se comenzó a diferenciar de mejor manera el tipo C de las D, ya que en mapeos históricos han sido mal definidas.

Son predominantes en fase 9 al oeste en el pórfido Collahuasi y Rosario con alteración predominante SGV y K, en zonas marginales a la estructura Rosario y Pique, donde la alteración QS está sobreimpuesta a la SGV en halos.

La mineralización es calcopirita-bornita y bornita- pirita (Figura 5.36), las vetillas tipo C tienen un volumen cercano al 7% con sus halos característicos.
La distribución de ese tipo de vetillas se extendió según la litología de los pórfidos con alteración SGV en *pitshell* y por datos de sondajes cercanos.

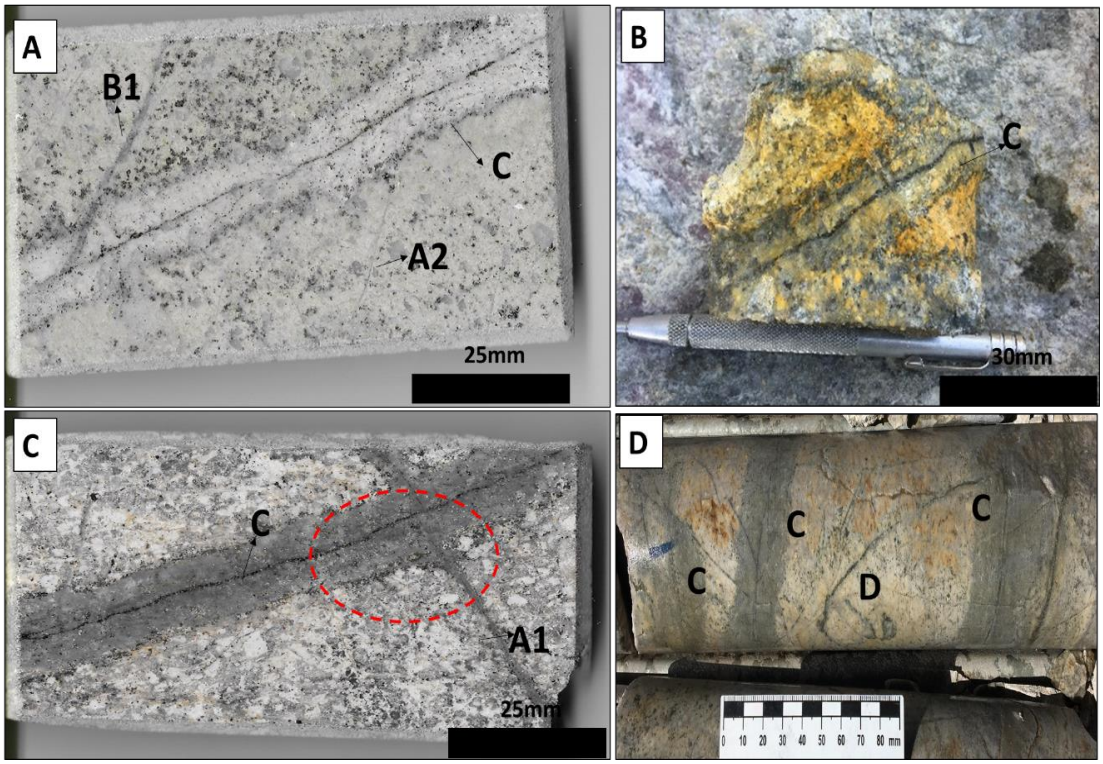

Figura 5.6: A) Muestra DM-206_DDHR173_523 conjunto de vetillas (A2) de hasta 0,5 mm compuestas de cuarzo secundario se muestran de manera sinuosa, discontinuas, y paralelas a vetilla (B1) de hasta 2,0 mm compuesta de cuarzo secundario y mineralizada con Mo>Cp; de manera sinuosa, discontinua, cortadas por vetilla (C) de sutura de hasta 1,2 mm compuesta de Cp, de forma sinuosa, discontinua, exhibiendo un halo de alteración de illita. B) Muestra de mano Fase 9 Banco 4075, con vetilla tipo C, con conservación de halos en PRO. C) Muestra DM-202_C288_217,5 vetillas tipo C compuestas de sutura de Py-Cp, con presencia menor de cuarzo secundario y exhibiendo un halo de alteración sericítica. D) Sondaje DDH515_256,4 m observan vetillas tipo C con desarrollo de halo y vetillas tipo D de pirita que las interceptan. Elaboración propia.

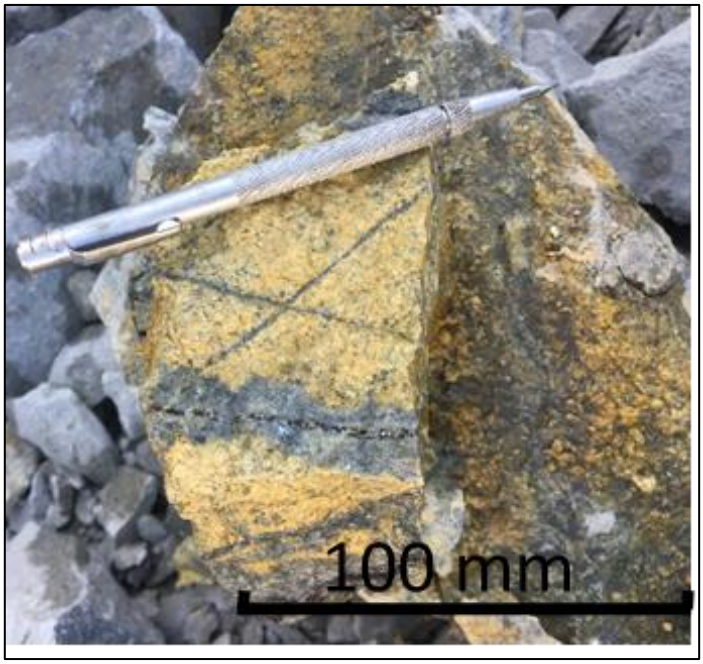

Figura 5.7: Vetillas tipo C con desarrollo de halo y mineralización Cp-Bo, Elaboración propia.

5.1.1.4. Vetillas D

Vetillas asociadas a alteración fílica o QS, relacionadas con el evento hidrotermal principal, se forman en condiciones de roca frágil a temperaturas <300º C, siendo la hidrólisis el proceso principal de transformación mineralógica, obliterando la textura de la roca de caja. Este evento se superpone cortando o reutilizando vetillas anteriores. Las vetillas tipo D son milimétricas a centimétricas (algunas alcanzan potencias decimétricas), planares muy continuas, constituidas principalmente por relleno de sulfuros (pirita ± calcopirita) y cuarzo subordinado, con un halo de alteración cuarzo-sericita bien desarrollado color blanquecino por presencia de sericita y /o caolín (Figura 5.8 y Figura 5.9). Es característico que el halo destruyera de forma parcial a total la textura de la roca hospedante. En los halos se observó zonación del centro hacia la periferia, de sericita-caolinita-clorita-esmectita. Ese tipo de vetillas fueron formadas por el evento de alteración fílica (Figura 5.8).

En zonas aisladas del yacimiento mediante sondajes se logró identificar un enriquecimiento o inyección de fluidos ricos en cobre, lo que generó en profundidad que la calcopirita se encuentra reemplazando en anillo a la pirita, como se observa en la Figura 5.9, Figura 5.10, Figura 5.11 y Figura 5.12

En zonas más someras debido a acción supérgena también se observó un enriquecimiento, caracterizado por depositar calcosina en forma de pátinas sobre la pirita hipógena. Estas vetillas se lograron observar desde fase 9 hasta fases superiores. Se caracterizaron por presentar pirita, cuarzo y sericita en sus halos, en zonas profundas están asociadas con calcopirita y en las zonas más someras con calcosina. Se encuentran relacionadas genéticamente a la alteración fílica o Qs predominante (Figura 5.10) y zonas con alteración argílica sobreimpuesta.

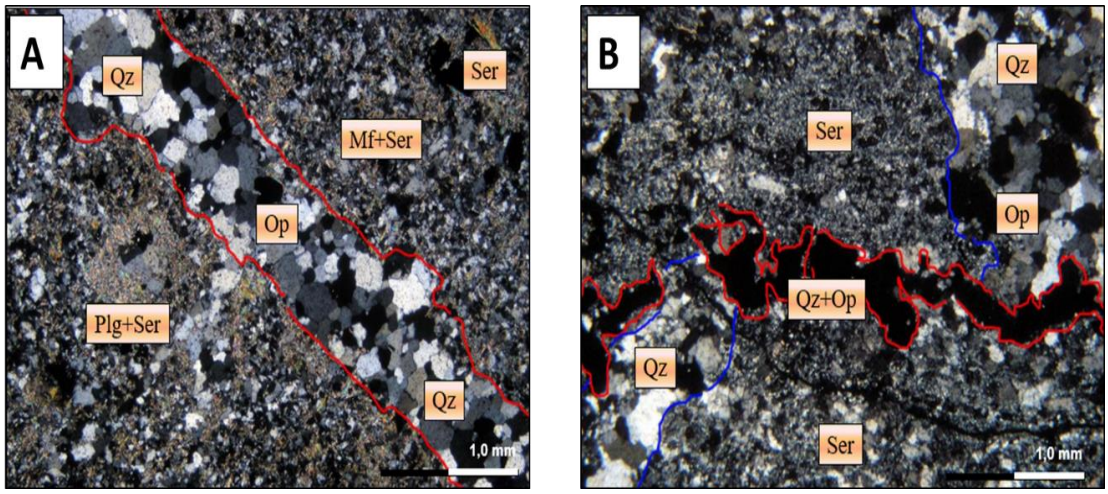

Figura 5.8: A) Fotomicrografía muestra DM-206_DDHR173_523,75 Se observa vetilla C (en rojo) compuesta de cuarzo secundario (Qz) y opacos (Op) cortando otros minerales, en masa fundamental con reemplazo de sericita Nicoles c. 20x.B) fotomicrografía muestra DM-202_C288_217,5 contacto entre vetilla B (en azul) cortada y desplazada por vetilla C (en rojo) Nicoles c .20x. Elaboración propia.

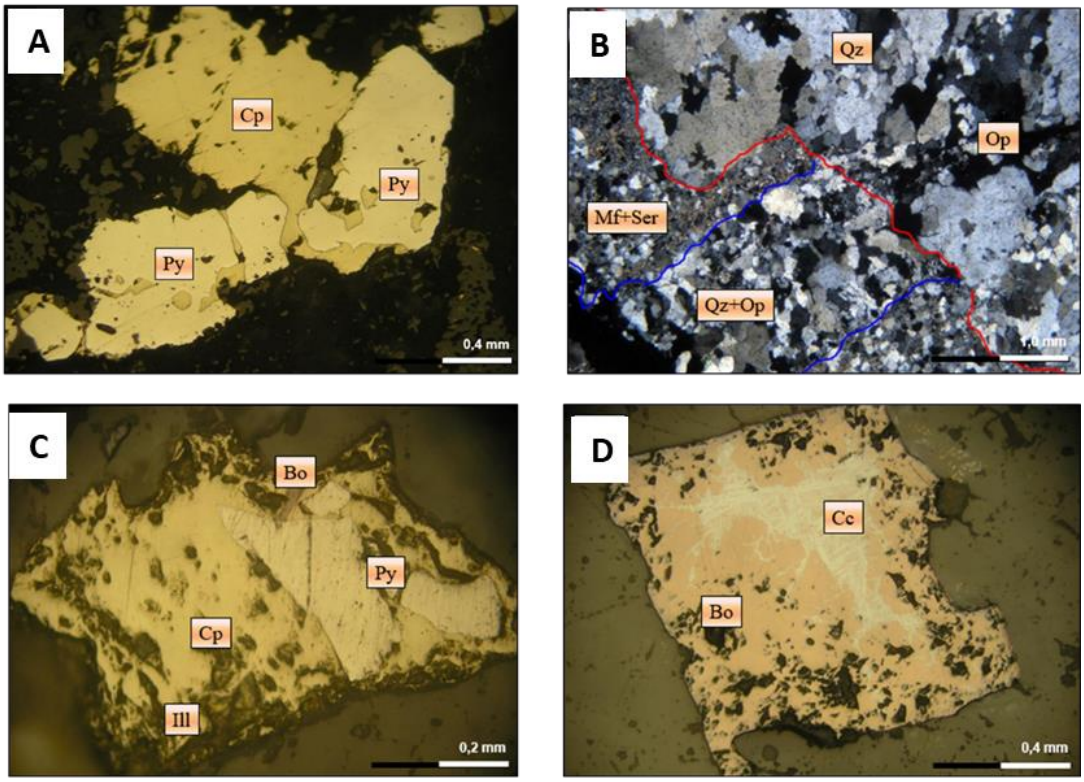

Figura 5.9: A) Fotomicrografía muestra DM-202 Se observa mineralización en vetilla C; de pirita (Py) con reemplazo de calcopirita (Cp) en caries, Nicoles p., 100x. B) Fotomicrografía muestra DM-216_DDHR151_1005,4 vetilla A (en azul) compuesta de cuarzo secundario y opacos (Op) cortada por vetilla C (en rojo) compuesta de cuarzo secundario de grano mayor (Qz) y opacos (Op); ambas cortando a masa fundamental con reemplazo de sericita (Mf+Ser), Nicoles c., 20x. C) Fotomicrografía muestra DM-216 vetilla C, de pirita (Py) con reemplazo de calcopirita (Cp) en anillo, a su vez, ésta con reemplazo en caries de bornita (Bo), 200x. D) Fotomicrografía muestra DM-216 de bornita (Bo) en exsolución con calcosina (Cc) 100x. Elaboración propia.

En el yacimiento Rosario se han distinguido principalmente en zonas de estructuras, se intuyó que este tipo de vetillas y alteración asociada tiene un componente netamente estructural.

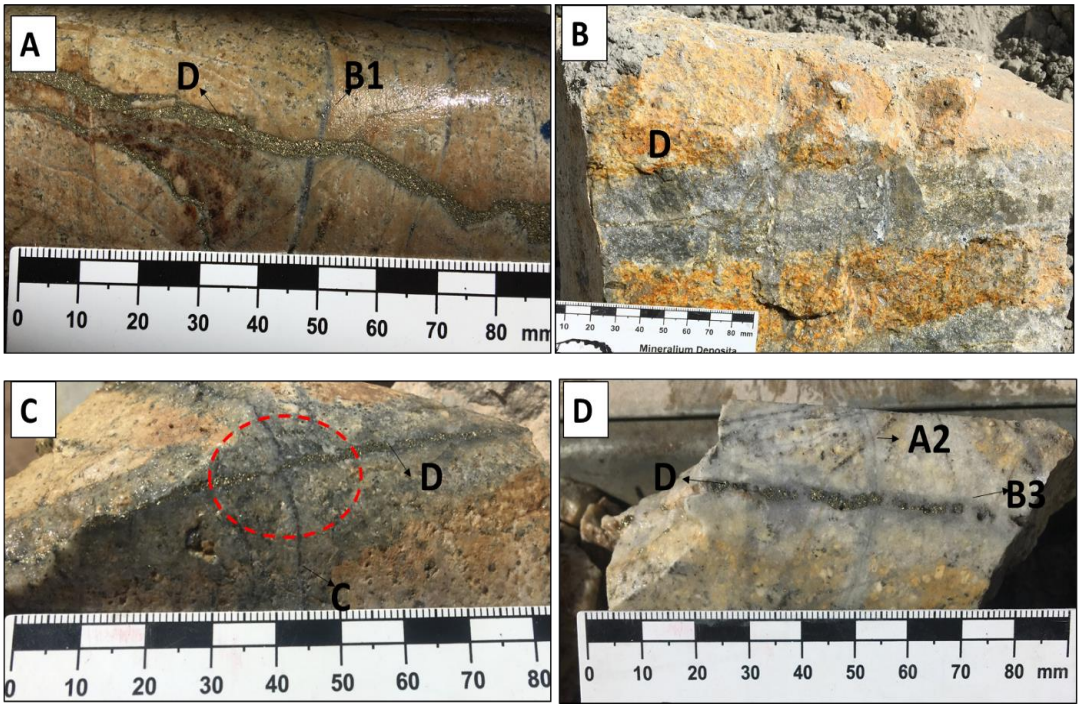

Figura 5.10: A) muestra de sondaje DDH102_144.5 m con vetilla tipo D que corta a sistemáticamente a vetilla tipo B1. B) Muestra de mano en F9 banco 4.100 vetillas tipo D con grueso desarrollo de halo de alteración y sutura de pirita en PCO. C) Sondaje DDHR173_300m. muestra de vetilla tipo D de pirita cortando en forma tangencial a vetilla tipo C, sinuosa discontinua y con Cp-Bo. D) Sondaje DDH260 tramo 266.5 m vetilla tipo D reutilizando a vetilla B3, asociado a alteración QS se genera halo de alteración. Estas vetillas a su vez están cortando a finas vetillas tipo A2. Elaboración propia.

Este tipo de vetillas tiene relación de corte con las vetillas anteriores y se encontró entre un 5 a 12% de volumen de roca total. Su abundancia se centró en zonas cercanas a las estructuras principales Rosario, Pique y Última.

La zona de predominancia se pudo extender en las zonas cercanas a las estructuras y siguiendo el *pitshell* de alteración en zonas con QS.

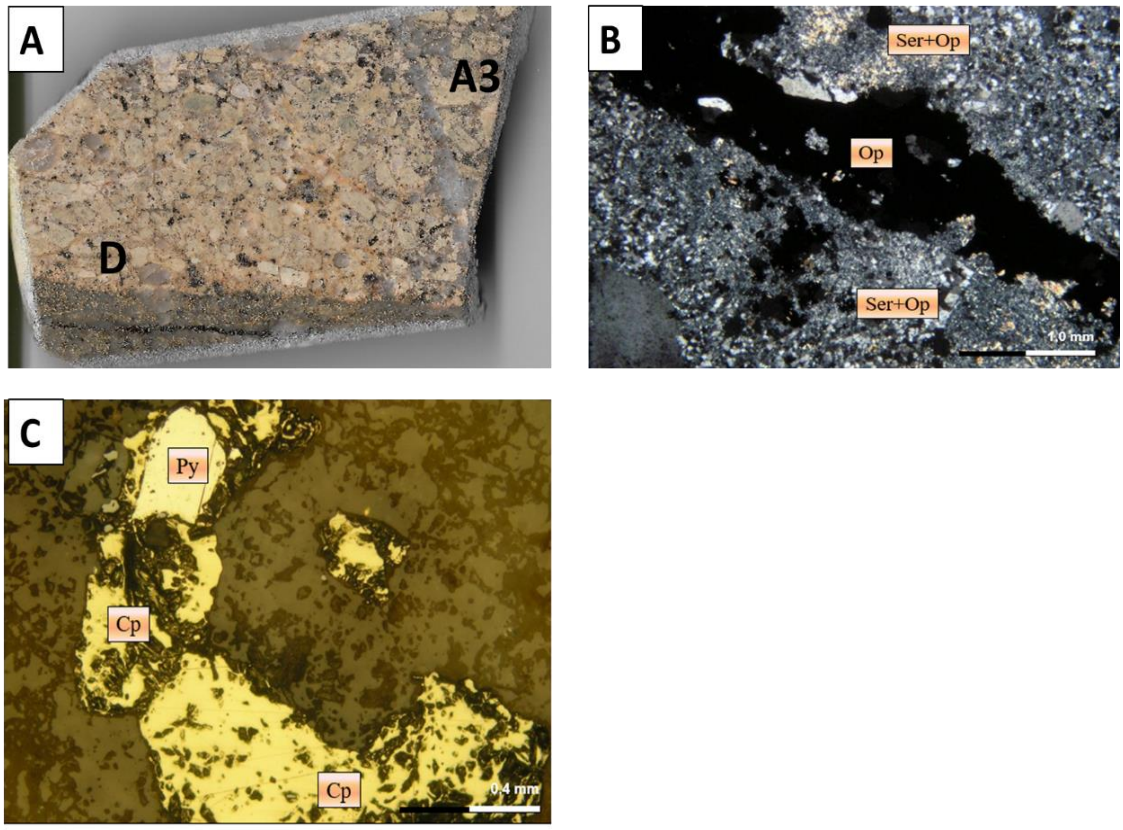

Figura 5.11: A) Fotografía de muestra DM-195_C049_392,42, con distinta generación de vetillas. B) Fotomicrografía muestra DM-195_C049_392,42, se observa vetilla tipo D; compuesta de sutura de opacos (Op) y halo de sericita fina con opacos (Ser+Op), Nicoles c. 20x. C). Fotomicrografía muestra DM-195_C049 Se observa mineralización diseminada de pirita (Py) con reemplazo en anillo de calcopirita (Cp), Nicoles p. 100x. Elaboración propia.

5.1.1.5. Vetillas E

Este tipo de vetillas se desarrollan en la etapa hidrotermal tardía, se caracteriza por vetas y vetillas de sulfuros masivos (calcopirita, bornita, digenita, pirita, enargita,), asociadas a minerales de alteración de alta sulfidización (Figura 5.13).

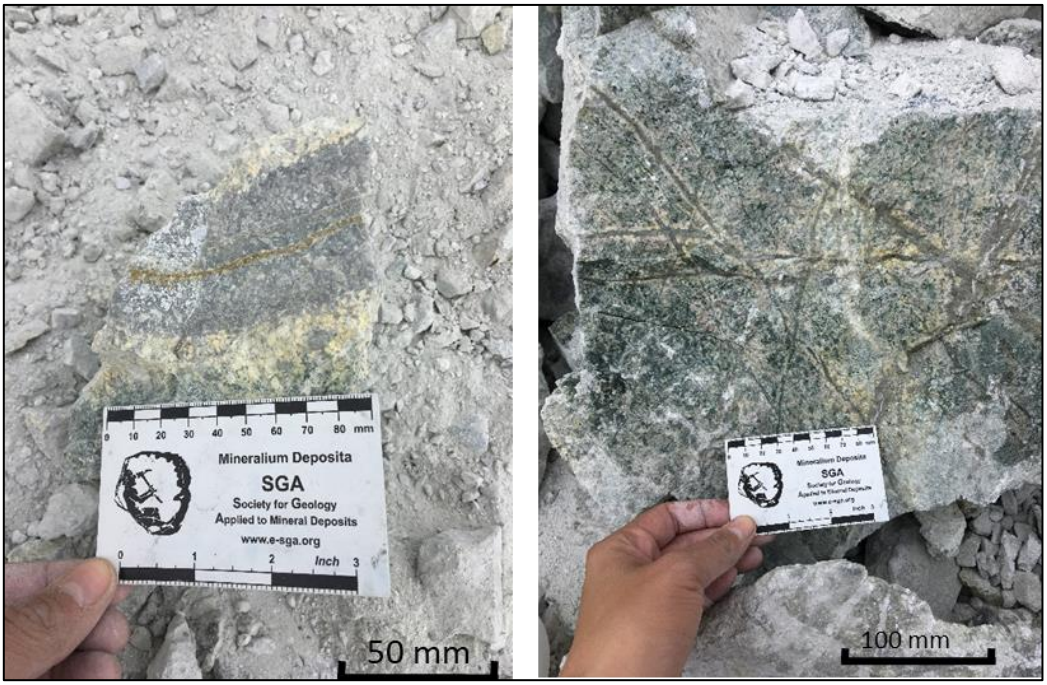

Figura 5.12: Izquierda, vetillas tipo D con pirita y halo de sericita, a la derecha *stockwork* de vetillas tipo D con pirita, cuarzo y sericita. Elaboración propia.

Tienen valores anómalos de As y en menor medida Pb-Zn, lo que favoreció el desarrollo de enargita, tenantita, galena y esfalerita.

Los minerales de alteración asociados son caolinita, pirofilita, dickita, alunita, sericita, illita y cuarzo. Tal asociación fue producida en el evento de alteración argílico avanzado, con un aparente control estructural.

Las vetillas E son similares a las vetillas D, se observaron rectas y continuas, Con relleno de sulfuros, pirita dominante sobre calcopirita y minerales de baja temperatura tales como galena, esfalerita, sulfosales de Cu y Fe (enargita, tenantita-tetraedrita) y cuarzo euhedral o prismático, en la Figura 5.13 se pueden observar las características antes mencionadas. La alteración predominante es argílica y argílica avanzada con asociaciones de pirofilita, caolinita, dickita con o sin alunita.

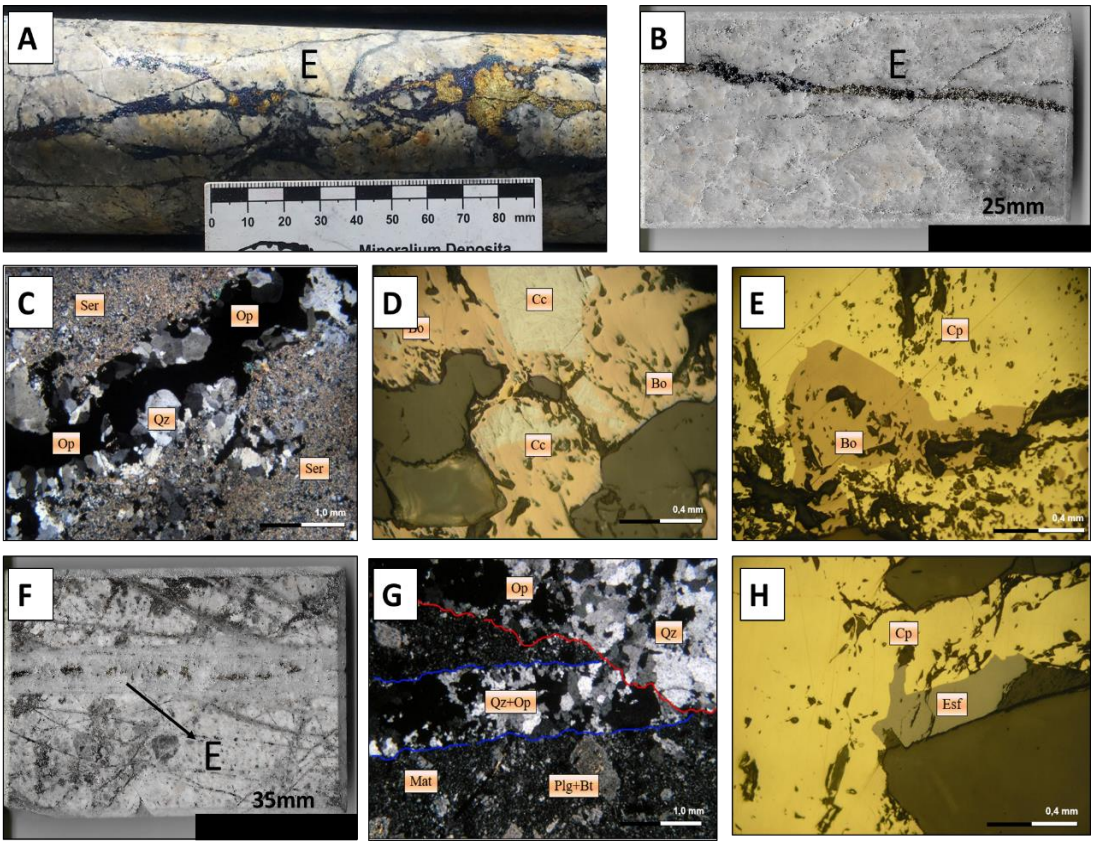

Figura 5.13: A) Muestra de sondaje DDH146 con vetilla tipo E con un alto contenido de sulfuros como bornita, calcopirita y pirita, se encuentran sobreimpuestas a las demás vetillas. B) Muestra de mano DM-219_DDHR146_1122,95, con vetilla tipo E. C) Fotomicrografía muestra dm-219 se observa vetilla E compuesta de cuarzo secundario prismático (Qz) y opacos (Op)en sutura, con halo de sericita (Ser), nicoles c. 20x. D) Fotomicrografía a 100x de muestra DM-219, mineralización en vetilla de calcopirita (Cp) con reemplazo en caries de bornita (Bo). E) Fotomicrografía muestra DM-219 a 100x., de bornita primaria (Bo) con exsolución de calcosina primaria (Cc). F) Muestra DM-205_DDH102_310, con vetilla E de hasta 10,0 mm compuesta de cuarzo secundario y mineralizada con Cp>>Mo>>Esf; la cual se observa de manera lineal, continua y sin exhibir halo de alteración. G) Fotomicrografía muestra DM_205 20x, vetilla tipo D (en azul) compuesta de cuarzo secundario y opacos (Qz+Op), a su vez, cortada por vetilla E (en rojo) de cuarzo secundario (Qz) y opacos (Op). H) Fotomicrografía muestra DM_205, 100x, compuesta de calcopirita (Cp) con reemplazo de esfalerita (Esf) en caries. Elaboración propia.

Se observó que, en zonas aledañas a estructuras principales, la composición mineralógica es pirita- bornita-calcopirita en las zonas más profundas y en áreas someras por pirita-bornita- calcosina y pirita- calcosina-enargita.

Los minerales antes mencionados están asociados a un evento posterior, son relacionados a la zona con alteración argílica espacialmente localizadas en las estructuras principales, donde se encontraron cortando a vetillas más tempranas (Figura 5.14). Los sólidos pueden extenderse según la orientación de las estructuras con alteración argílica y leyes de As.

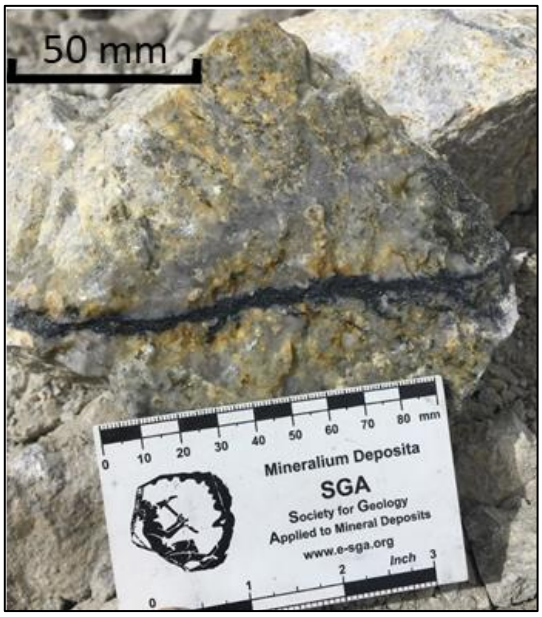

Figura 5.14: Vetilla tipo D sinuosa con Calcosina y presenta relación de corte con vetillas de cuarzo más tempranas. Elaboración propia.

5.1.1.6. Alteración Propilítica

Zona con alteración del tipo propilítica con vetillas, que fueron descritas en mapeos históricos como “Otras”, pueden presentar pirita, calcopirita, magnetita, clorita y epidota (Figura 5.15).

Este tipo de vetillas están asociadas al entorno de un ambiente tipo, debido a la falta de información histórica respecto a las vetillas tipo “Otras”, se excluyó esta unidad.

En mapeo de bancos en fase 10 y 11 se identificó zonas con dichas características, se relacionó su distribución en las zonas mapeadas como fondo propilítico en el *pitshell* de alteración.

Figura 5.15: Vetillas tipo Otras asociado a alteración propilítica en roca andesita. Elaboración propia.

5.1.1.7. Skarn

El ambiente de formación se relaciona por un metamorfismo de contacto debido a una intrusión en contacto con rocas ricas en carbonatos, esta interacción genera minerales como granates, clorita, epidota y mineralización magnetita, pirita y calcopirita. Esta unidad se excluyó del mapeo de vetillas hidrotermales, ya que representan un ambiente distinto.

5.1.1.8. Hornfels

Esta unidad tiene un origen similar a la descrita con anterioridad, es decir, se formó por la interacción de un cuerpo ígneo con rocas de grano fino como lutitas, areniscas, las cuales los minerales producen un bandeamiento característico. Se han observado vetillas de magnetita y pirita. Esta unidad se excluyó del mapeo de vetillas.

5.1.2. Cronología y paragénesis mineral

Mediante calcografía, se pudo identificar las principales texturas que presentan las menas en las muestras estudiadas y definir cronología de depositación.

Para las vetillas tipo A, se lograron identificar al menos tres generaciones, con diferencias composicionales y texturales claras, para vetillas tipo B, también se diferenciaron tres generaciones, la separación fue influenciada por la morfología de las vetillas. En el caso de las vetillas tipo C, no se observó relaciones claras para poder segregar en subtipos, se espera que al aumentar el conocimiento y entendimiento de este tipo de microestructuras se pueda realizar una separación.

En el caso de las D y E no se logró identificar subtipos, ya que en observaciones de terreno siempre presentaban las mismas características morfológicas y composicionales.

La mayoría de las muestras presentó más de un evento de alteración y en algunas se puede evaluar su temporalidad en forma relativa. Los eventos de alteración corresponden a potásico de biotita, potásico, sericita gris verde, alteración fílica y argílica.

En vetillas tempranas tipo A (Figura 5.16 A, B, C), la mineralogía primaria está dominada por pirita, calcopirita y bornita, encontrando asociaciones de calcopirita-pirita y calcopirita bornita.

La textura de reemplazo ya sea en caries, anillo o por fracturas observado en estas vetillas, representa cambios composicionales en el fluido, es decir, aumento o disminución de los elementos que lo conforman. Esto provocó que el mineral huésped sea sometido a cambios que generaron precipitación de un nuevo mineral a expensas del original.

En las muestras de la Figura 5.16, se observó que la calcopirita se encuentra en textura de reemplazo con la pirita lo que significó un aumento en la saturación de Cu en el fluido o una baja en la concentración de Fe, no se logró identificar muestras con ambos elementos presentando bordes mutuos.

En la Figura 5.16 B, se aprecia la mineralogía de vetillas tipo A3 compuesta por calcopirita y bornita, la cual tiene textura de reemplazo, lo que indicó que su formación fue posterior, a su vez la bornita tiene textura de exsolución de calcosina (Figura 5.16 C), este tipo de textura representó fenómenos de desmezcla por difusión al estado sólido a partir de una única fase inicial.

Se producen entre dos minerales que presentan estructuras cristalinas parecidas, y que tienen miscibilidad total a una misma temperatura. En al menos dos muestras se observó bornita con bordes mutuos de calcopirita evidenciando una coprecipitación.

En la Figura 5.16 D y E, se identificó que el molibdeno cristaliza posterior a la asociación calcopirita-pirita, y puede desarrollarse a expensas de la calcopirita, de igual modo se observó en vetillas tipo B3, cristalización de molibdeno, pero no asociado a mineralización de cobre primaria.

En la Figura 5.16 E, se observó relaciones de corte entre menas, donde es claro que el molibdeno es posterior a evento calcopirita-pirita, esta situación representa a una vetilla B3 posterior a una A3.

La mineralización asociada a vetillas tipo C, donde se observó una relación textural similar al tipo A donde la pirita tiene reemplazo en anillo, con relictos de pirita en calcopirita, además se observó un reemplazo leve de bornita a pirita en caries (Figura 5.16 F).

Siguiendo la misma tendencia la Figura 5.17 A y B, se visualizó la mineralogía de vetillas tipo C ricas en calcopirita-bornita y pirita en menor grado, las texturas evidencian que, en la secuencia antes descrita, primero se formó la pirita, la cual tiene reemplazos en caries y anillo por calcopirita y a su vez ambas menas son reemplazadas por caries con bornita hipógena posterior.

En la Figura 5.17 C, se observó que la pirita tiene reemplazo de bornita por penetración guiada en fracturas y por caries, la bornita su vez tiene exsolución de calcosina hipógena.

En este estudio se tiene solo dos ejemplares que presentaron vetillas tipo E, en la Figura 5.17 D, se observó que el relleno de la vetilla está compuesto por pirita con reemplazo en anillo de calcopirita y esta última presenta textura de reemplazo en caries de esfalerita.

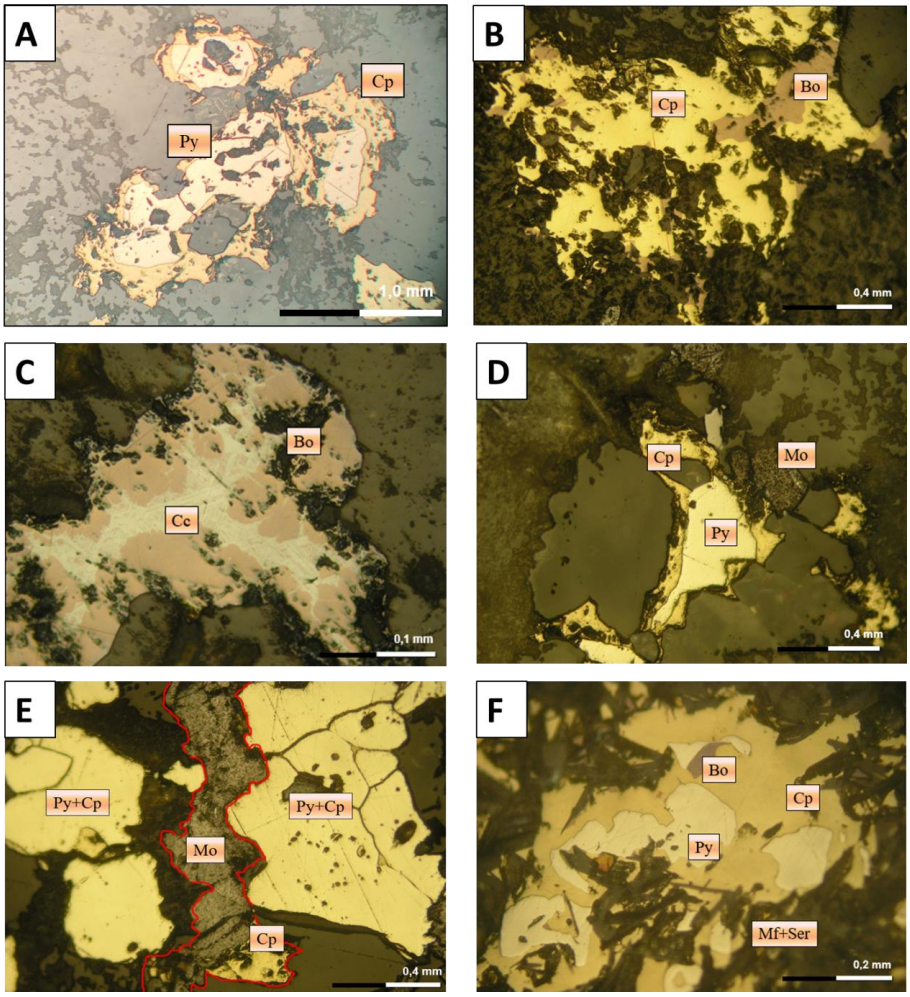

Figura 5.16: A) Fotomicrografía muestra DM-202 a 20x, mineralización en vetilla A3; de pirita (Py) con reemplazo de calcopirita (Cp) en anillo. B) Fotomicrografía muestra DM-195 a 100x, mineralización diseminada de calcopirita (Cp) con reemplazo en caries de bornita (Bo), en vetilla A3. C) Fotomicrografía muestra DM-211 a 100 x. Se observa mineralización en vetillas A3 de bornita (Bo) en exsolución con calcosina primaria (Cc). D) Fotomicrografía muestra DM-197 a 100 x, mineralización en vetilla B1 de pirita (Py) con reemplazo en anillo de calcopirita (Cp), con reemplazo en caries de molibdenita (Mo). E) Fotomicrografía muestra DM-203 a 100x, vetilla A, compuesta de pirita con reemplazo en caries de calcopirita (Py+Cp); cortada transversalmente por mineralización en vetilla B3, compuesta de calcopirita (Cp) con reemplazo en caries de molibdenita (Mo). F) Fotomicrografía muestra DM-195 a 200x mineralización en vetilla tipo C de pirita (Py) con reemplazo de calcopirita (Cp) en anillo, a su vez, ésta con reemplazo en caries de bornita (Bo). Elaboración propia.

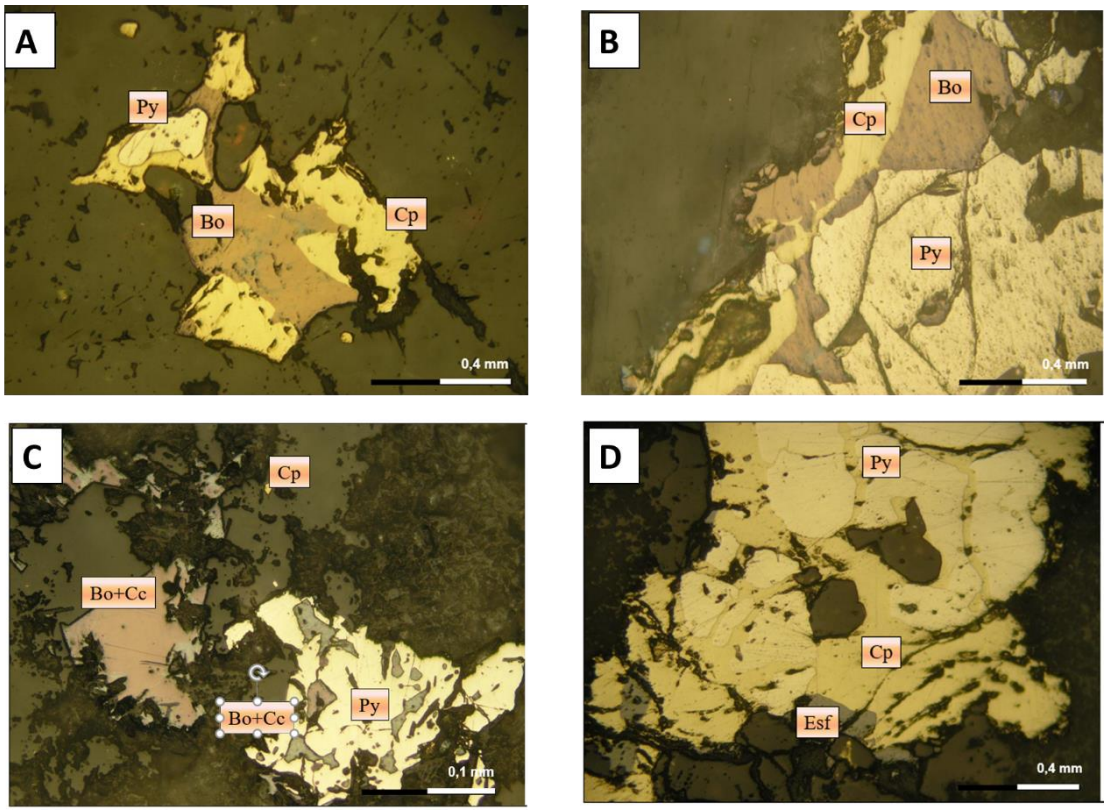

Figura 5.17: A) Fotomicrografía muestra DM-208 a 100x, de mineralización en vetilla tipo C de pirita (Py) con reemplazo de calcopirita (Cp) en anillo, a su vez, ésta con reemplazo en caries de bornita (Bo).B) Fotomicrografía muestra DM-213 a 100x, compuesta de pirita (Py), con reemplazo en caries de calcopirita (Cp); ambas reemplazadas en caries por bornita (Bo) en vetilla C. C) Fotomicrografía muestra DM-195, a 100x. Se observa mineralización en vetilla C de pirita (Py) con reemplazo en caries y debilidades de bornita en exsolución con calcosina primaria (Bo+Cc); presencia local de calcopirita (Cp). D) Fotomicrografía muestra DM-201 a 100x, se observa mineralización en vetilla E de pirita (Py), con reemplazo en anillo de calcopirita (Cp); ésta, a su vez, reemplazada por esfalerita (Esf) en caries, minerales de asociación tardía. Elaboración propia.

Según lo observado en sondajes, muestras de mano, relaciones de corte entre vetillas, microscopía óptica y las conclusiones de Masterman y otros (2005) e Ireland (2010), la cronología de emplazamiento de vetillas y menas para el yacimiento Rosario se resumen en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Cronología de vetillas.

Cronología	Vetilla	Sulfuros	Ganga	Alteración
Tempranas	A1	Py- Cpy	Qz- Bt-Al	K-B
	A2-A3	Cpy-Bo	Qz- Bt-Al- Feld K	K
	B1	Mo-Cpy	Qz-Al- Feld K- Ill	K
	B2	Mo- Py	Qz-Al- Feld K- Ill	K
	B3- C	Mo-Cpy-Bo	Qz-Al- Ser- Ill- Clo	K-SGV
	C	Cpy-Bo -Py	Qz-Al- Ser- Ill- Clo	SGV
	D	Py- Cpy	Qz-Ser	QS
Tardías	E	Py- Cpy- Bo- CC-En-Esf	Qz-Ca-Alu-Sm	A-AA

5.2. Modelamiento geológico

5.2.1. Análisis de datos

Luego de la homologación, descrita en el capítulo de metodología, se generó una base de datos inicial, la cual contiene información respecto a vetillas denominada “Ros_ass_geo_vetillas_pp”, que incluyó las bases de datos originales de vetillas denominadas BDH (histórica), BDV (volumen) y dos columnas extras, la primera con la vetilla dominante (Vet1) y con vetilla subordinada (Vet2). Está compuesta por 250 sondajes diamantinos equivalentes a 43562.229 m, además se añadió información geológica de la tabla “Ros_ass_geo”.

- Ros_ass_geo_vetillas_pp: Tabla que incluyó los datos de vetillas de las cuales se consideran el tipo EB, A, B, C, D y E. Comprende la unión de dos bases de datos para el parámetro de vetillas, como se explicó antes.
- Ros_ass_geo: La tabla que agrupo todas las variables geológicas como litología, alteración, zona mineral y leyes químicas de los principales elementos de interés.

Con la unión de las bases de datos antes mencionadas, se generó la tabla Ros_assgeo_vet, en base a la cual se realizaron análisis estadísticos.

5.2.2. Comparación estadística

En base a la tabla “Ros_ass_geo_vetillas_pp”, que contiene una unión de parámetros de vetillas, geología y leyes químicas, se realizó un estudio mediante el *software Statistica*, con tal de identificar tendencias de los datos, mediante gráficos de barra, gráficos tipo pie o circular y “*Mean Plot”*.

La columna Vet1 o vetilla dominante, almacena el nombre de la vetilla predominante en el tramo (A, B, C, D, E o EB) en base a datos de la homologación de vetillas. Esta columna ayudó a determinar áreas donde domina un tipo determinado de vetilla la cual tiene asociado características tanto de leyes, minerales accesorios, menas y alteración determinada.

La columna Vet2 o vetilla subordinada incluyó los datos de la segunda vetilla que predomina en el tramo, esto permitió generar asociaciones de vetillas y alteración. Debido a la extensa actividad hidrotermal que desarrollan los sistemas pórfidos en su evolución, es común encontrar zonas con sobre imposición de alteraciones tempranas con tardías, dicha afirmación se puede
identificar de forma clara con las relaciones de corte que fueron observadas en las vetillas.

5.2.2.1 Estadística Según Leyes Químicas

Cobre

Según la gráfica de la Figura 5.18, donde el eje “Y” representa las leyes medias de cobre y el eje “X” el tipo de vetilla dominante, se identificó que las vetillas tipo C están asociadas a las leyes de cobre más elevadas alcanzando un promedio de 1.13%.

Este tipo de vetillas está asociada principalmente a la alteración tipo SGV, la cual tiene asociación mineral que varía entre calcopirita-bornita y calcopirita-pirita. Leyes de cobre entre 0.9% a 1%, fueron relacionadas a vetillas tipo B, las que pudieron o no presentar trazas de calcopirita y bornita, además estas vetillas al ser transicionales pueden estar asociadas a vetillas tipo A y C subordinadas.

En el caso de vetillas tipo A presentan leyes medias superiores al 0.8% asociados a sulfuros primarios como lo es la calcopirita- bornita y digenita, las vetillas tipo EB se desarrollan con anterioridad a las antes mencionadas con mineralogía primaria, pero la cantidad de datos es baja, por lo cual se descartaron del modelamiento y estudios estadísticos por baja representatividad.

Para las vetillas tipo E en el yacimiento Rosario se observó una zonación de sulfuros según la posición espacial, es decir, en la zona alta de las estructuras tipo veta–falla se pudo observar asociación pirita-calcopirita-enargita-bornita-calcosina y en zonas más someras pirita- calcopirita-bornita y pirita-bornita, por lo general predomina la pirita sobre los demás sulfuros. La distribución está acotada a las estructuras, presentado leyes medias de 0.8% Cu.

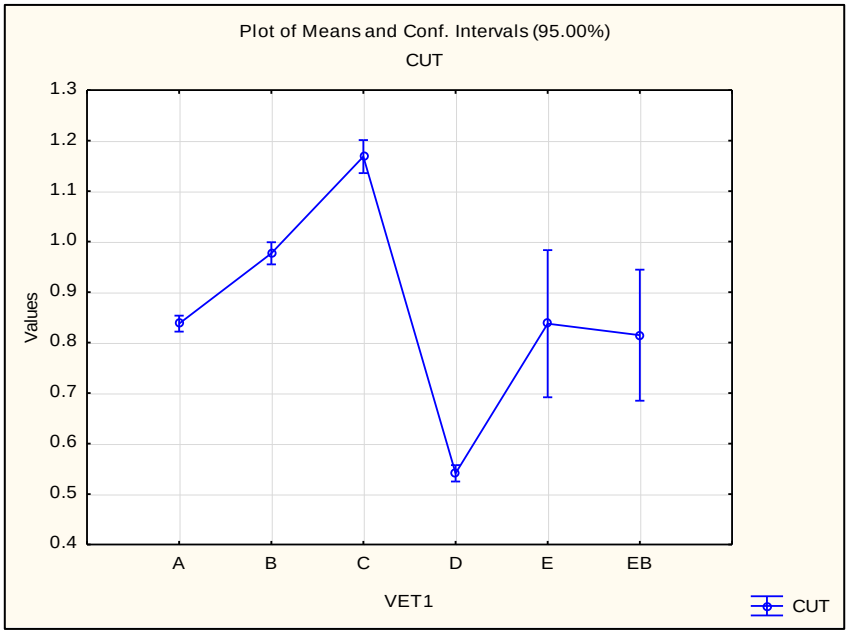

Figura 5.18: Gráfica de leyes medias de Cobre para vetillas dominantes. Elaboración propia.

Las vetillas tipo D, representaron las leyes más bajas de cobre, con relación a las demás vetillas ya que su composición, como se propuso, se basa en cuarzo, sericita, pirita y en forma de trazas puede presentar calcopirita o calcosina, o encontrarse reutilizando vetillas más tempranas, tienen leyes promedio de 0.55%.

Para las vetillas subordinadas, como se muestra en la Figura 5.19 la asociación con vetillas tipo C presentó las leyes más altas probablemente relacionadas a zonas con asociaciones de vetillas A-C, B-C o D-C, donde la mineralogía de estas vetillas aportó las leyes. Luego siguen las vetillas tipo D relacionadas a asociación A-D, C-D o E-D, con leyes menores a 1% de Cu. Las vetillas A presentaron leyes promedio del 0.9% con posibles asociaciones C-A, B-A y D-A. Finalmente las vetillas tipo B desarrollaron asociaciones con leyes de 0.8% Cu asociado a vetillas tempranas tipo A y C.

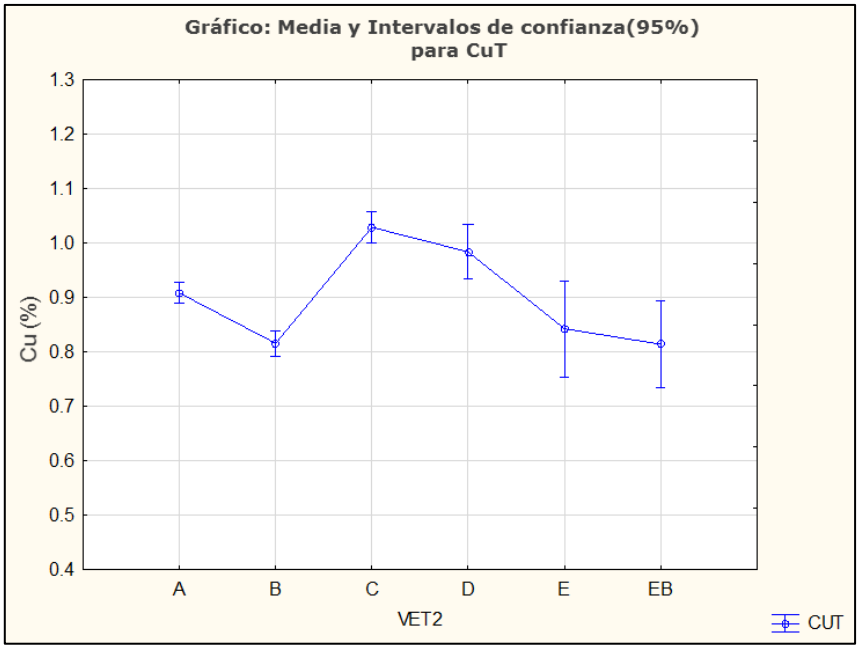

Figura 5.19: Gráfica de Cobre con vetillas subordinadas. Elaboración propia.

Molibdeno

El Molibdeno se observó en el yacimiento en forma molibdenita. Este mineral es la mena de las vetillas tipo B y como traza a vetillas tipo A3. La distribución del Molibdeno se centró en el ambiente tipo pórfido, con leyes rentables sobre los 200 ppm. La molibdenita se desarrolló rellenando suturas, en los bordes de vetillas y de forma bandeada en el relleno.

Según la gráfica de la Figura 5.20 los valores promedios de Mo coincidieron con los tramos donde predominan las vetillas tipo B con leyes de 450 ppm, seguido por vetillas tipo C, relacionadas a un estadio posterior al evento de B. Cabe destacar que las leyes de molibdeno presentaron una clara relación con vetillas tempranas y transicionales.

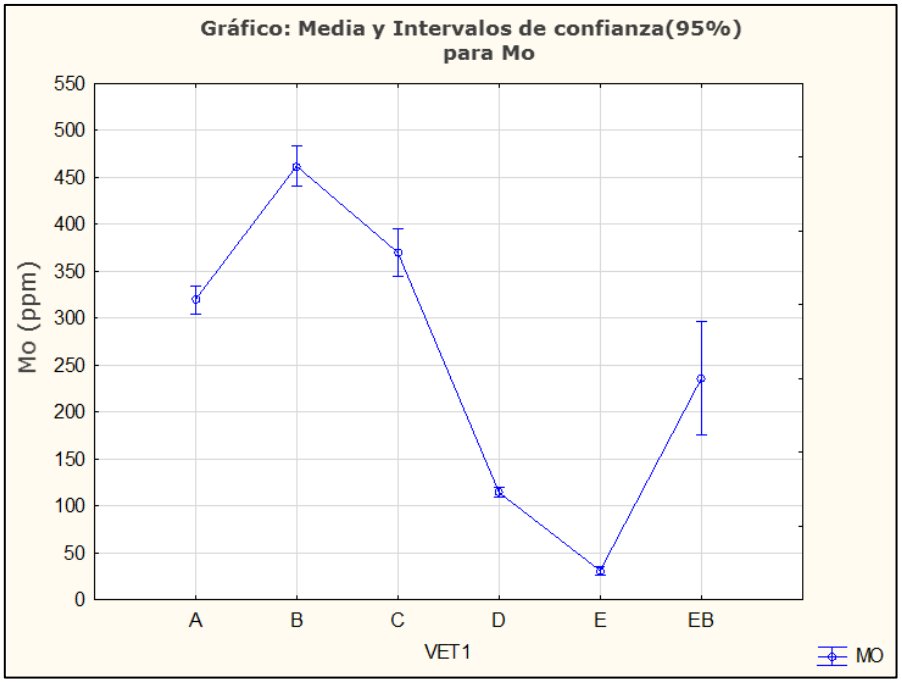

Figura 5.20: Gráfica de leyes de Molibdeno con vetilla dominante. Elaboración propia.

Para vetillas subordinadas (Figura 5. 21) los valores promedios coincidieron con los tramos donde predominan las vetillas tipo C con leyes de 450 ppm de Mo, probablemente asociadas a vetillas dominantes tipo B, por sobre imposición de eventos. Con 350 ppm de Mo, las vetillas tipo A asociadas posiblemente agrupación B-A, algo similar ocurre para datos de D, la relación de vetillas B con D, está dada por sobre imposición.

En sondajes y muestras de mano se observó que este tipo de vetilla reutiliza las zonas de debilidad de vetillas tipo B, con depositación en sutura de pirita con desarrollo de halos de sericita.

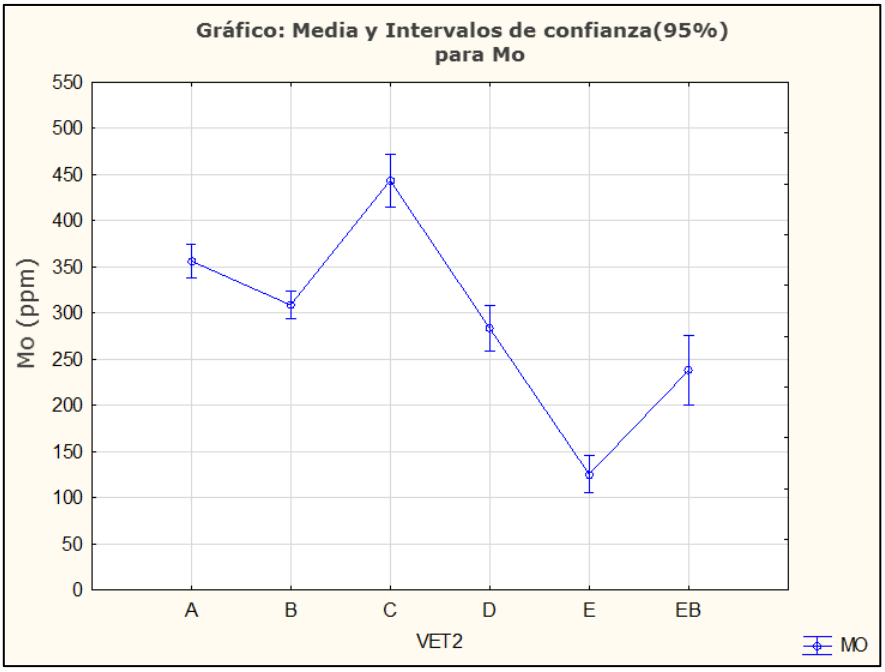

Figura 5.21: Gráfica de leyes de molibdeno en vetilla subordinada. Elaboración propia.

Fierro

De la Figura 5.22 se pudo concluir que los valores más elevados de este elemento se concentran en vetillas tipo E, como se mencionó con anterioridad estas concentran sulfuros masivos ricos en Cu-Fe, seguidos por las vetillas tipo EB las que tienen halos de biotita y mineralización de magnetita y calcopirita.

En las vetillas tipo D, el porcentaje promedio es 4% de Fe, asociado a la formación de pirita, las vetillas tempranas A, B y C representan valores bajo el 2% de concentración del elemento.

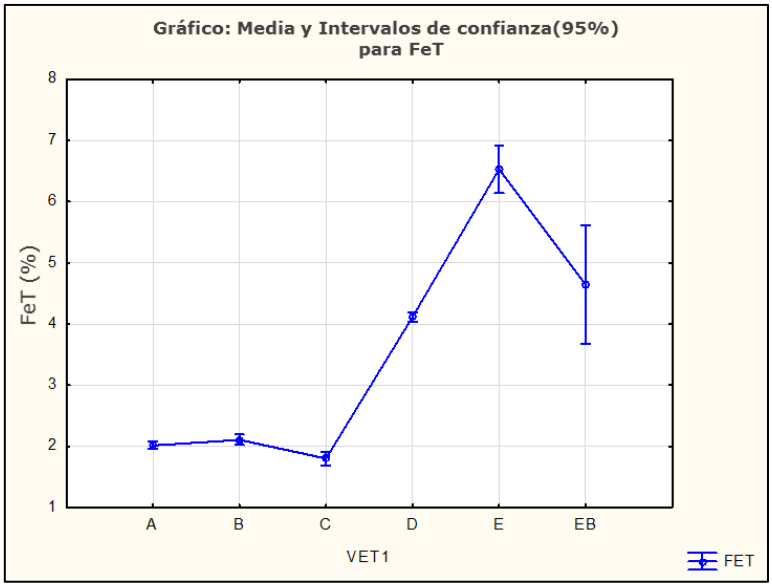

Figura 5.22: Gráfica de leyes de Fierro con vetilla dominante. Elaboración propia.

Para Vet2, se cumplió lo descrito para vetillas dominantes, pero se observó un claro aumento en el porcentaje de Fe para vetillas B, esto asociado a una reutilización de estas por vetillas tipo D las cuales aprovecharon la zona de fracturas (Figura 5.23).

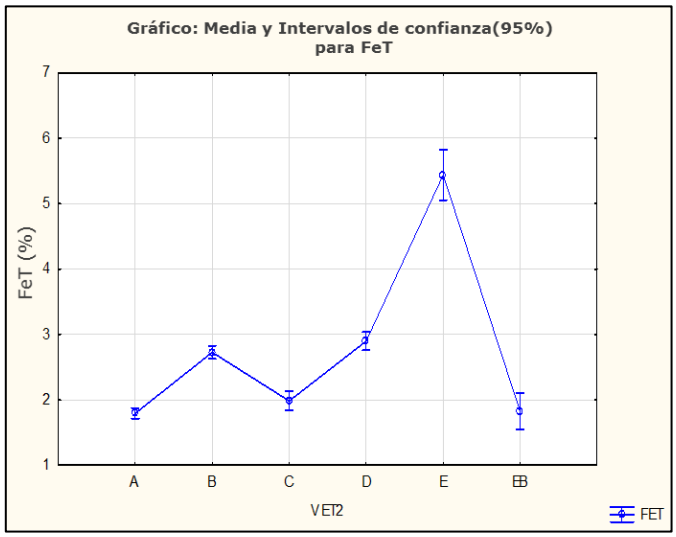

Figura 5.23: Gráfica de leyes de Fierro con vetilla subordinada. Elaboración propia.

Arsénico

El Arsénico, en el yacimiento Rosario es un elemento asociado a un ambiente del tipo epitermal de alta sulfidación, presente en las vetas fallas que cortan al sistema tipo pórfido en Rosario. Los minerales que tienen As en su composición son la enargita y tenantita, asociadas a vetas y vetillas tipo E.

Este elemento se considera penalizador para la venta de concentrado de Cu, por esto los valores que generan problemas son sobre los 100 ppm.

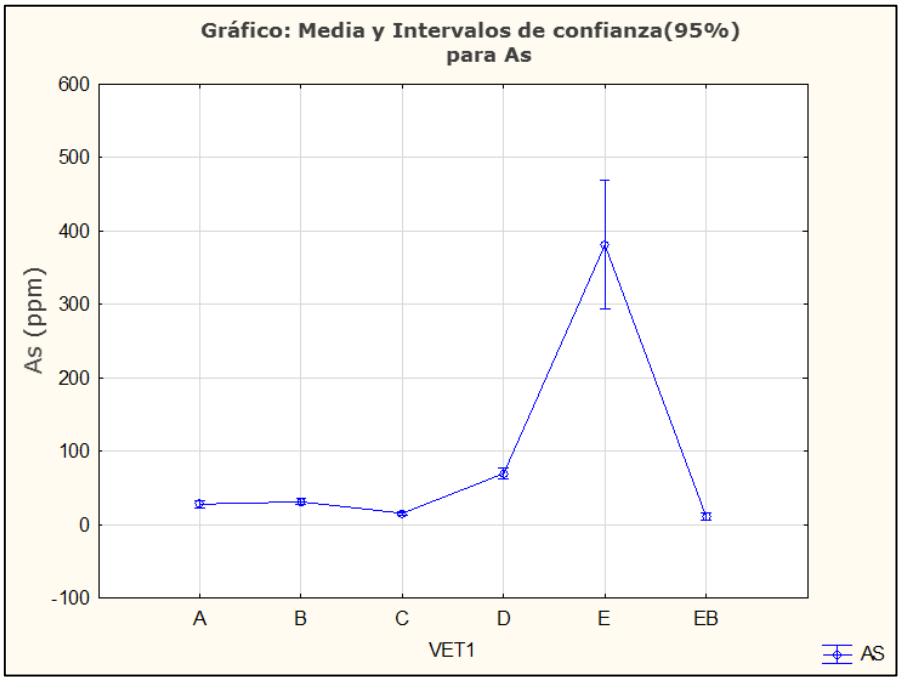

Figura 5.24: Gráfica de leyes de Arsénico en vetillas dominantes. Elaboración propia.

Según la Figura 5.24 las vetillas tipo E presentaron valores medios de As de 300 ppm, debido al desarrollo de enargita, las demás vetillas presentaron valores bajos los 100 ppm.

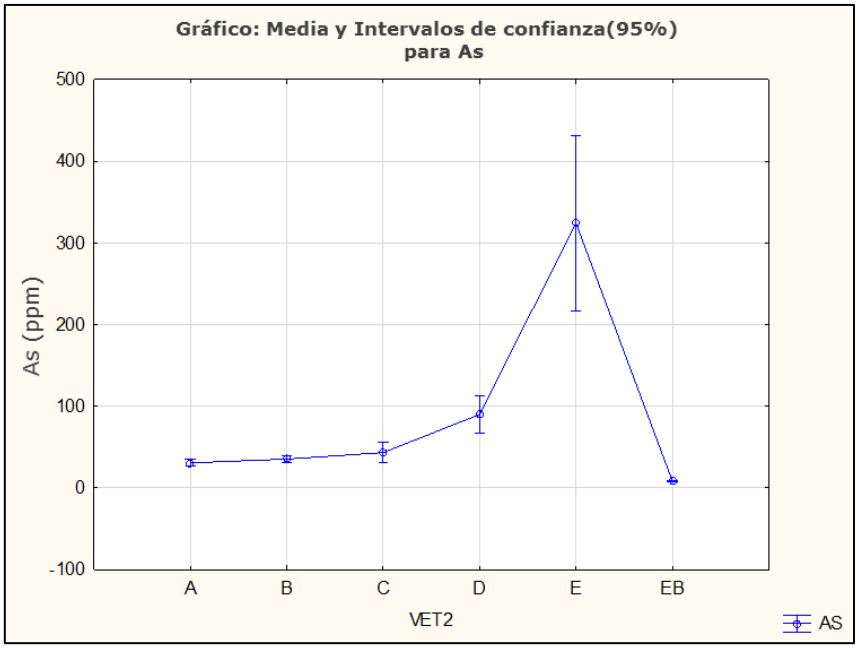

Figura 5.25: Gráfica leyes de Arsénico en vetilla subordinada. Elaboración propia.

La gráfica muestra un comportamiento similar al observado para las Vet1, donde el As predomina en vetillas tipo E (Figura 5.25), por lo visto en sondajes y en terreno se puede concluir que las asociaciones de vetillas tipo E-D o viceversa son las más observadas.

Oro

En los yacimientos tipo pórfido ocurre precipitación de oro asociada a sulfuros primarios, su concentración es baja por lo general de 0.02 a 4 gr/ton, son equivalentes a rangos de 20 a 4000 ppb.

Según la Figura 5.26 los valores de oro más altos equivalentes a 0.08gr/ton se concentraron en las vetillas tipo C, además son las que presentaron mayor concentración de leyes de Cu primario asociado a calcopirita-bornita. En el caso de vetillas subordinadas se ratifica que el tipo C están ligadas con leyes rentables de oro.

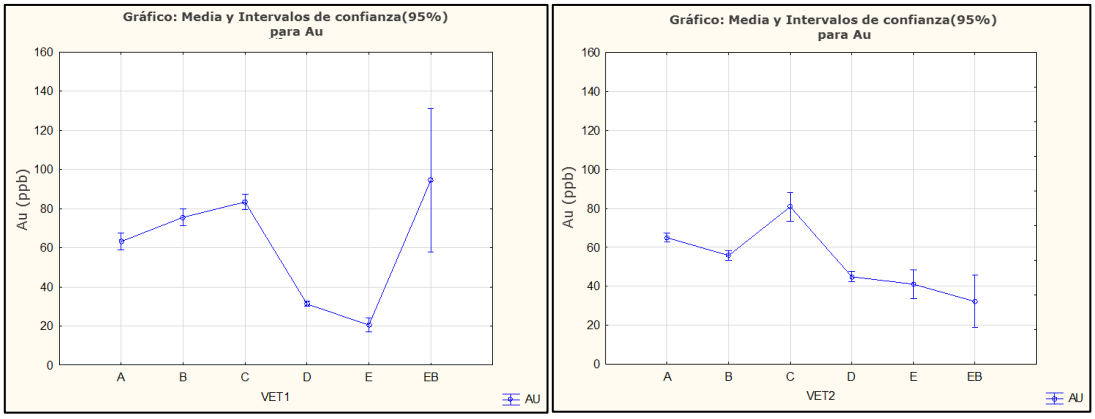

Figura 5.26: Gráfica leyes de Oro, a la izquierda en vetilla dominante y a la derecha en vetilla subordinada. Elaboración propia.

Plata

La plata en los sistemas hidrotermales se transporta como complejos sulfurados, al igual que el oro, por ende, las precipitaciones de estos elementos están ligados, los cuales pueden depositarse en zonas de sulfuros hipógenos en leyes bajas.

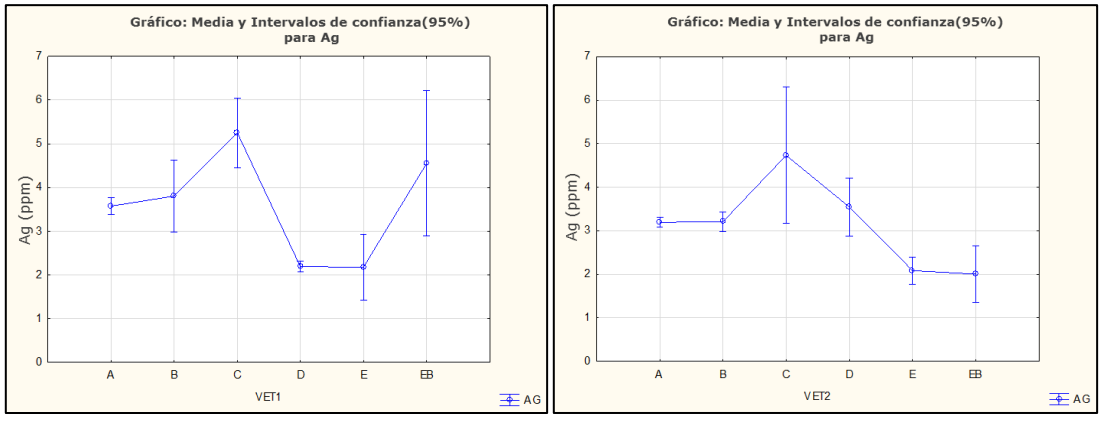

Figura 5.27: Gráfica leyes de Plata, a la izquierda en vetilla dominante y a la derecha en vetilla subordinada. Elaboración propia.

En la gráfica de la Figura 5.26 y 5.27, se logró identificar que la plata tiene el mismo comportamiento que el Au, es decir, las concentraciones medias más altas se

observaron en las vetillas tipo C, para Vet1 y Vet2, pero cabe destacar que la desviación estándar es elevada para este elemento.

5.2.2.2 Estadística según distribución de datos

De la Figura 5.28, se debe considerar que para las vetillas principales se tenía un universo de 13.576 datos, en el caso de las subordinadas 7.534 datos.

Considerando el análisis las vetillas más abundantes en el yacimiento Rosario son el tipo D y A del tipo dominantes o Vet1, en el caso de subordinadas (Vet2) son las A y B. Las distribuciones de las vetillas están relacionadas tanto por la litología, alteración y zona mineral.

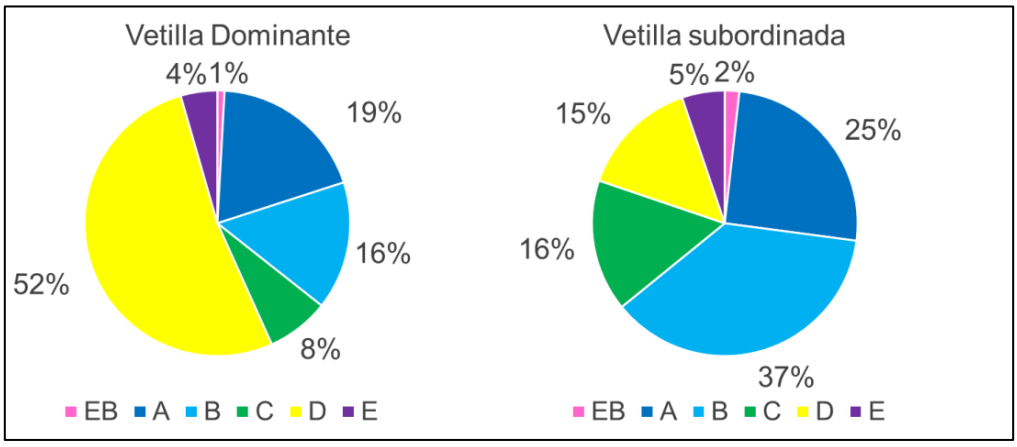

Figura 5.28: Gráfico circular de distribución de tipos de vetillas. Elaboración propia.

5.2.2.3. Estadística según alteración

En el yacimiento Rosario se han definido distintas alteraciones las cuales están descritas en detalle en el Capítulo 3. A continuación, se describen las abreviaciones de las alteraciones de la Figuras 5.28 y 5.29.

Las alteraciones tipo hornfels (HNF) y skarn (SK), al pertenecer a un ambiente distinto no se consideraron para el modelo a pesar de que pueden presentar un % volumétrico bajo de vetillas hidrotermales. La alteración de base propilítica (P) asociada a un halo de la alteración potásica, incluye vetillas catalogadas como “otras”.

Las alteraciones hidrotermales tempranas son fondo potásico (FK), o potásico de biotítica (B), potásica (K) relacionadas a vetillas tipo A y B. La alteración clorita sericita (CS) también llamada sericita gris verde (SGV) asociada a vetillas tipo C, fílica o cuarzo sericita (QS) la que se clasifica en un ambiente hidrotermal principal asociado a vetillas tipo D, una variación de esta alteración es selectiva cuarzo sericita (SQS), finalmente la alteración argílica (A) compuesta por un conjunto de arcillas y desarrollada en las últimas etapas del sistema tiene relacionado a vetillas tipo E. En el registro historio se ha descrito una alteración llamada Vetas (VET) se relaciona al sistema de vetas fallas que cortan el sistema tipo pórfido, finalmente se menciona una unidad de nominada (S) que indica presencia de sericita.

Al analizar el gráfico de la Figura 5.29 se logró determinar que para las vetillas principales tipo A, las alteraciones que predominan con B y K, lo cual fue concordante con el ambiente de formación. En el caso de las vetillas tipo B se desarrollaron tanto en zonas con alteración QS, debido a que las vetillas tipo D aprovecharon los puntos de fragilidad de las B y las reutilizaron, en zonas con CS o SGV, y por último en áreas con alteración temprana K y B.

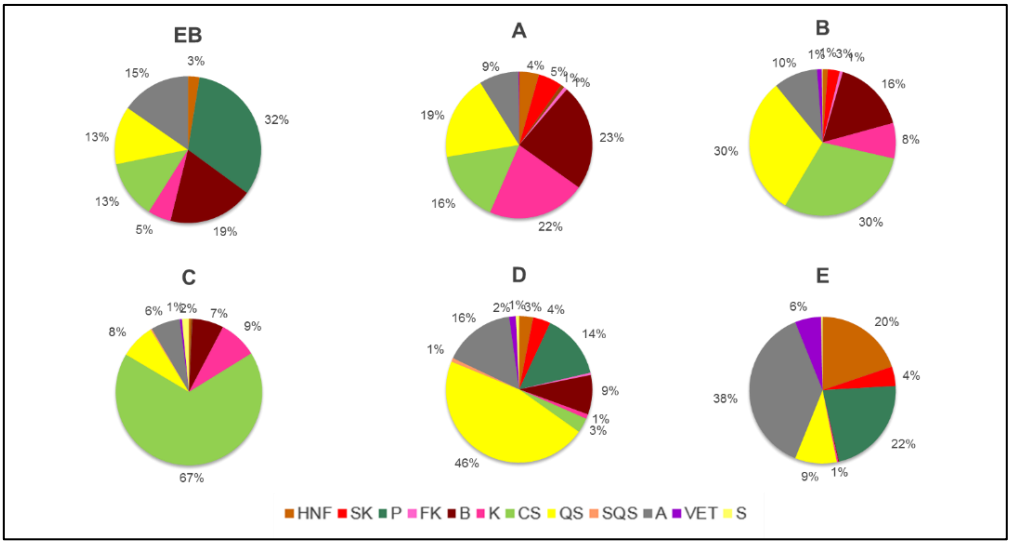

Figura 5.29: Gráfico circular de tipos de alteración versus vetilla dominante. Elaboración propia.

Las vetillas tipo C se distribuyeron principalmente en zonas con alteración CS o SGV y K.

La CS o SGV se consideró como una alteración de sericita de alta temperatura formada en un ambiente transicional entre la alteración K y QS. En el caso de las vetillas D se encontraron en zonas con alteración QS y A de forma principal, pero pueden estar sobre impuestas a otro tipo de alteraciones más tempranas, asociada a zonas de estructuras, como se logró ver en el caso de las E donde predominan en zonas con alteración argílica.

El gráfico de la Figura 5.30, muestra el tipo de vetilla en cada alteración, se evidencio que en zonas con K y B predominan las vetillas tipo A, B y C tempranas, en zonas CS las vetillas tipo C y B. Con respecto a otras alteraciones más tardías predominaron las vetillas tipo D y E.

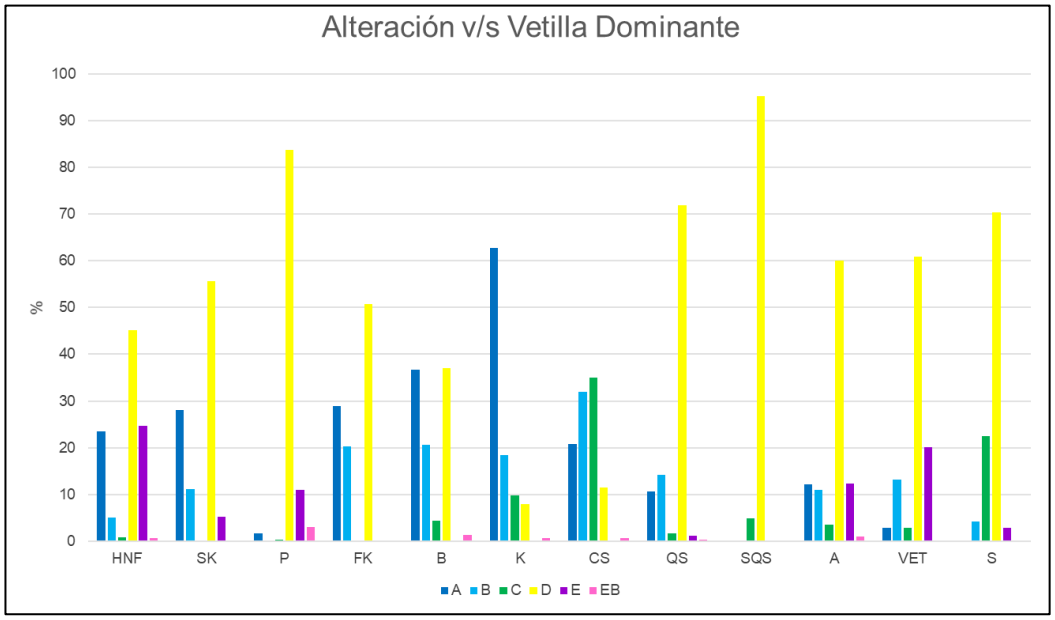

Figura 5.30: Gráfico de barras de la distribución en porcentaje de tipo de vetilla dominante versus alteración. Elaboración propia.

Para vetillas subordinadas, al analizar la Figura 5.31, se ve claramente que todos los tipos de vetillas están asociados a alteración QS, como se observó en el gráfico de la Figura 5.28.

Las vetillas más abundantes e identificadas en el yacimiento son el tipo D, se pudo proponer que este tipo de vetilla está asociada a un evento más tardío, en zonas locales del yacimiento se observaron sobre impuesta a la mayoría de las altercaciones más tempranas.

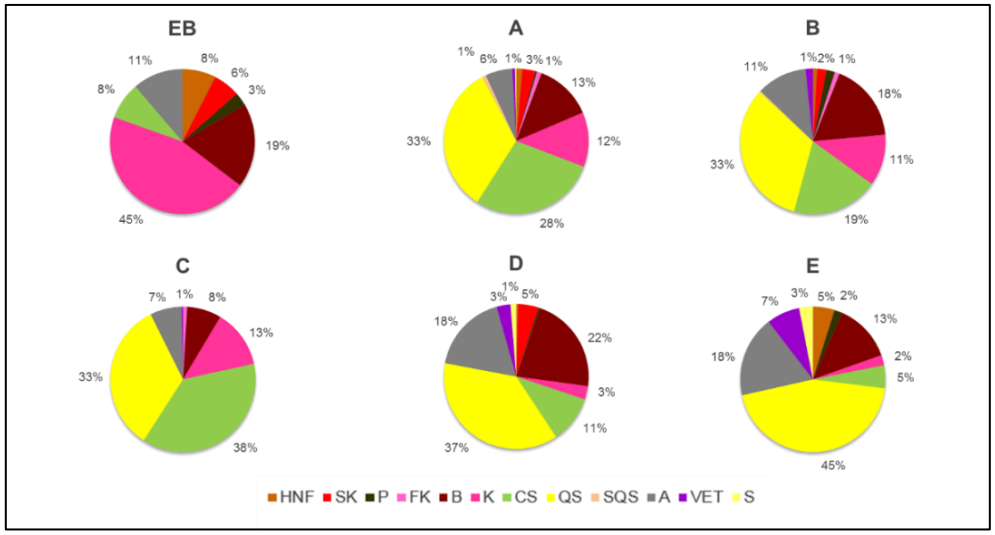

Figura 5.31: Gráfica circular de vetillas subordinadas con alteraciones. Elaboración propia.

De la Figura 5.32 las vetillas tipo B predominaron, estas se lograron identificar en casi todas las alteraciones como en FK, B, K, CS y QS. Debido a que las B son asociadas un ambiente transicional frágil-dúctil su presencia en alteraciones como CS, QS, A y VET se debe a la sobre imposición de eventos y a la facilidad que ha tenido este tipo de vetillas para ser reutilizada. Las vetillas tipo A, presentaron una distribución similar a las B, debido a la sobreimposición de eventos.

La mayoría de las vetillas se han identificado en zonas con alteración QS dominante, lo que implicó la confirmación de la sobreimposición antes mencionada, la cual puede ser pervasiva o selectiva, es decir, la alteración pudo estar acotada a halos de alteración de vetillas D. Las vetillas C se caracterizaron por alteración CS o SGV, tal como se esperó por modelo teórico.

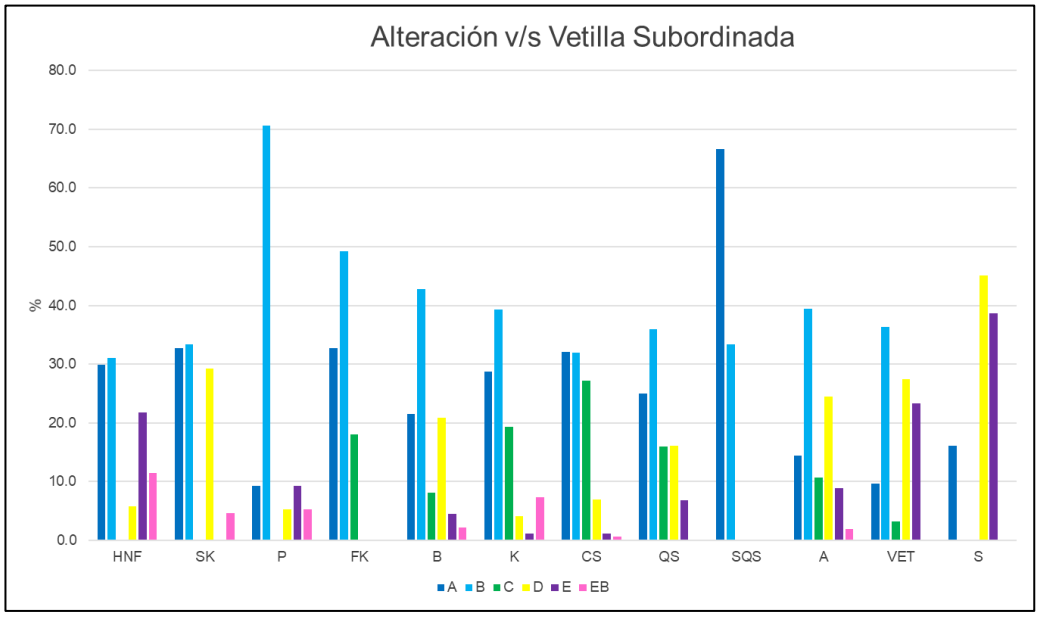

Figura 5.32: Gráfica de barras de alteración con vetilla subordinada. Elaboración propia.

5.2.2.4. Estadística según litología

Las litologías definidas en el yacimiento Rosario, expuestas en el Capítulo 3, tienen una clara relación con cierto tipo de vetillas. Cabe destacar que por definición el pórfido Rosario (PRO), fue el responsable de la mineralización hipógena del yacimiento, por ende, las vetillas tempranas tipo A, B, C deben concentrarse en este tipo de litología. El Pórfido Collahuasi se consideró roca de caja, por sus características composicionales. EL PCO pudo ser alterado por los fluidos hidrotermales y albergar mineralización en menor grado.

Tal como se muestra en la Figura 5.33, las vetillas A y B se encontraron albergadas en PRO, mientras que el tipo C mayoritariamente están en PCO y PRO, lo cual indicó que este tipo de vetilla, al ser más tardías aprovechan el grado de alteración de PCO para desarrollarse. Las vetillas tipo D están distribuidas en todos los tipos de rocas, al igual que el tipo E.

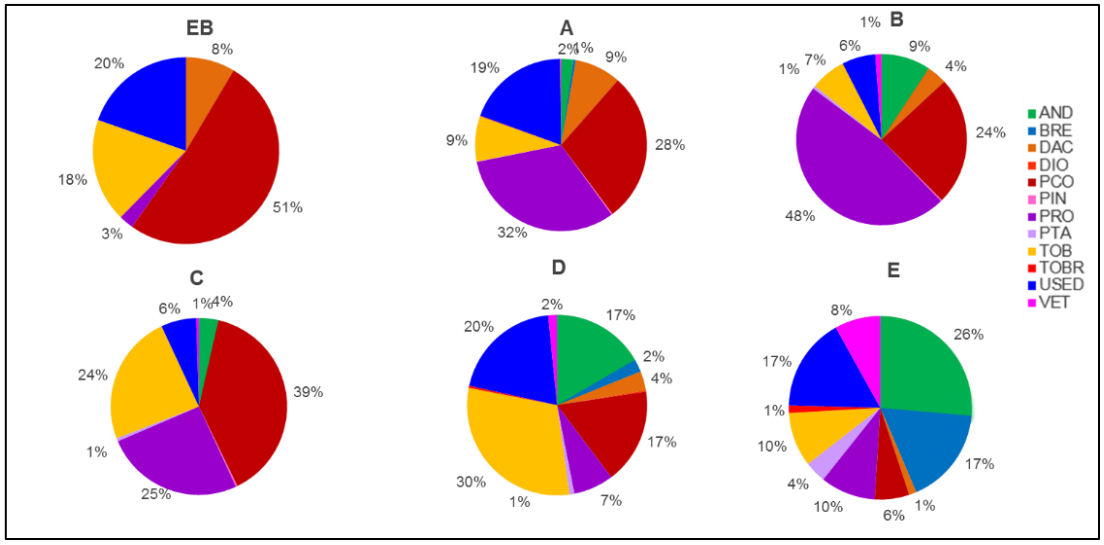

Figura 5.33: Gráfico circular de vetilla dominante con litología. Elaboración propia.

En la Figura 5.33, se analizó que en los pórfidos PRO y PCO predominan vetillas tempranas, y tipo D sobreimpuestas, en el caso de PIN, pórfido indiferenciado, el cual se ha definido que pertenece a una intrusión más joven de PRO, solo contiene vetillas tipo A, B y C, lo que se suma clara evidencia que este tipo litológico no fue afectado por sobre imposición y puede evidenciar el segundo pulso mineralizador observado en muestras de mano, y definido mediante estudio de inclusiones fluidas por Ávalos (2019).

Para las vetillas subordinadas (Figura 5.35), se observó un patrón muy similar, es decir, para vetillas tempranas, a excepción de las tardías tipo D, con una clara predominancia en PCO y PRO, como se ha mencionado antes por sobre imposición y generando asociaciones de vetillas tipo A-D, B-D y C-D.

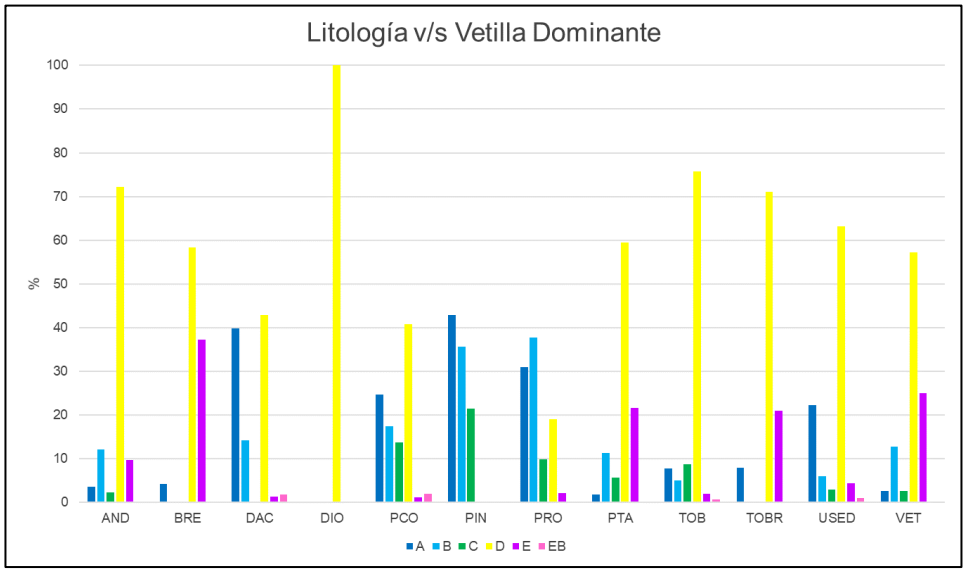

Figura 5.34: Gráfica de barras de litología con vetilla dominante. Elaboración propia.

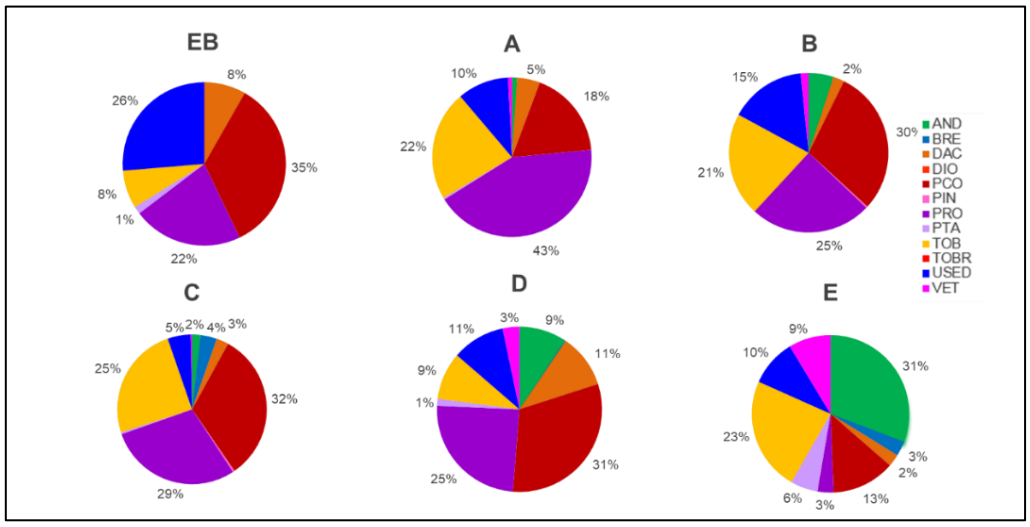

Figura 5.35: Gráfico circular de vetillas subordinadas con litología. Elaboración propia.

En la Figura 5.36, se observó la misma tendencia antes descrita, en el caso de las rocas de caja como la USED, las vetillas subordinadas tipo B y A, tienen un papel relevante, esto debido que PRO limita en la zona noreste con la USED y al sur oeste con TOB (tobas) y dacitas (DAC).

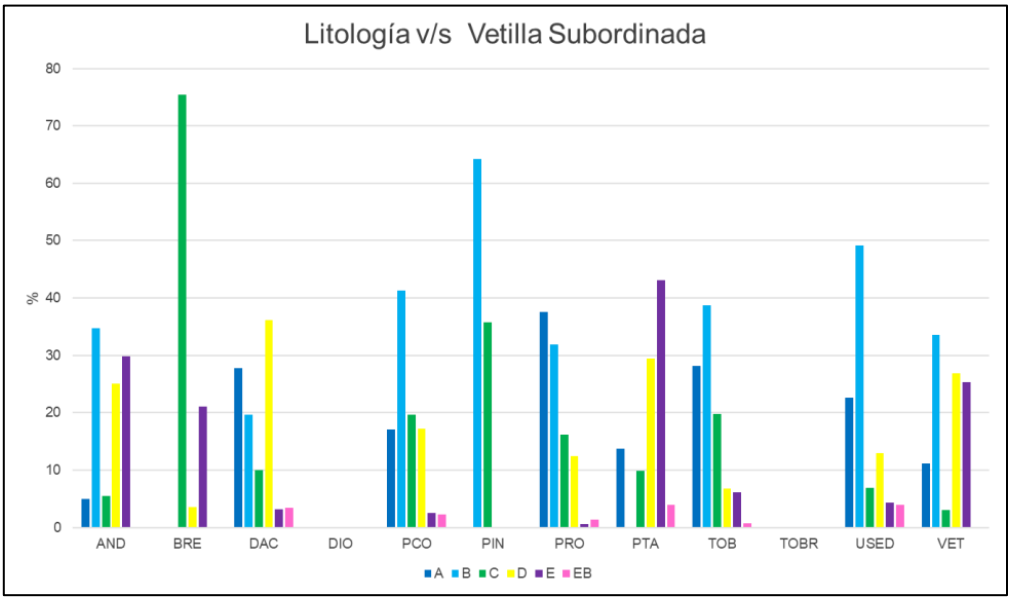

Figura 5.36: Gráfica de barras litología versus vetillas subordinadas. Elaboración propia.

5.2.2.5. Estadística según zona mineral

Las zonas minerales definidas para el yacimiento Rosario están definidas en detalle en el Capítulo 3, pero de forma general, LIX es lixiviado correspondiente a la zona superior del yacimiento, en la cual es difícil distinguir vetillas por el grado de alteración, pero el tipo D son las más abundantes.

En el caso de MIX o mixto predominan el tipo D, PRI o primario es la zona mineral del yacimiento con las mejores leyes asociadas al ambiente tipo pórfido, caracterizado por asociaciones calcopirita- bornita, calcopirita-pirita y pirita bornita, donde predominaron las vetillas tipo A, B y C, asociadas a dichas mineralizaciones (Figura 5.37).

PRIPY corresponde a primario pirítico, halo de pirita definido en los modelos clásicos de pórfidos cupríferos donde las vetillas tipo D son dominantes, seguidas de las E.

Lo mismo ocurre en SEC o secundario, donde la principal mena es calcosina en pátinas. SI corresponde a zonas sin información de zona mineral y VET a vetas, que tal como se observa en la Figura 5.34 predominan el tipo D.

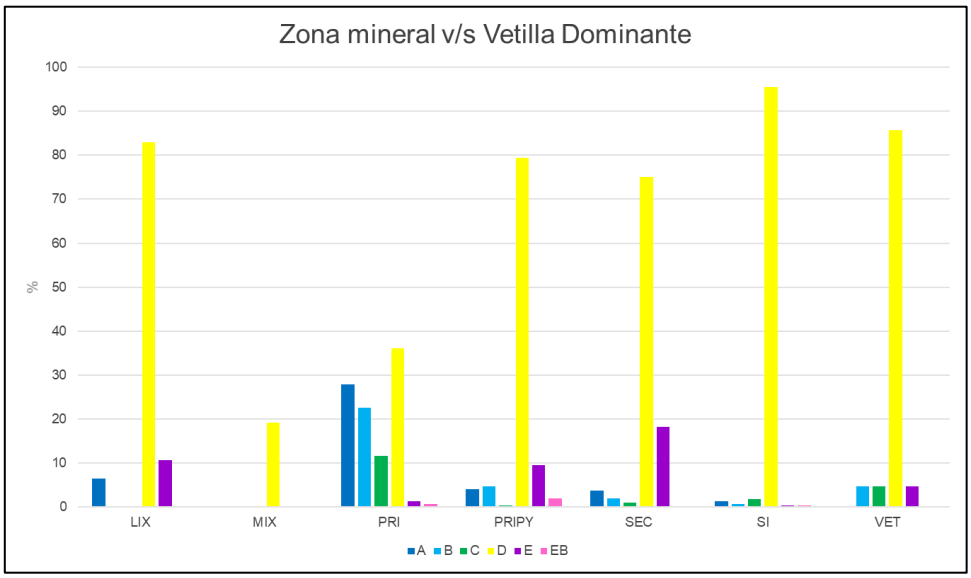

Figura 5.37: Gráfica de barras de tipo de alteración con vetilla dominante. Elaboración propia.

Para vetillas subordinadas, como se observa en la Figura 5.38, las vetillas tipo B subordinadas son las más abundantes las que al ser un evento transicional y se concentraron en PRI, PRIPY y VET (Figura 5.37).

Las relaciones entre vetillas y elementos de interés, favoreció la relación de importancia que estas tienen en el aporte de leyes en un yacimiento tipo pórfido cuprífero.

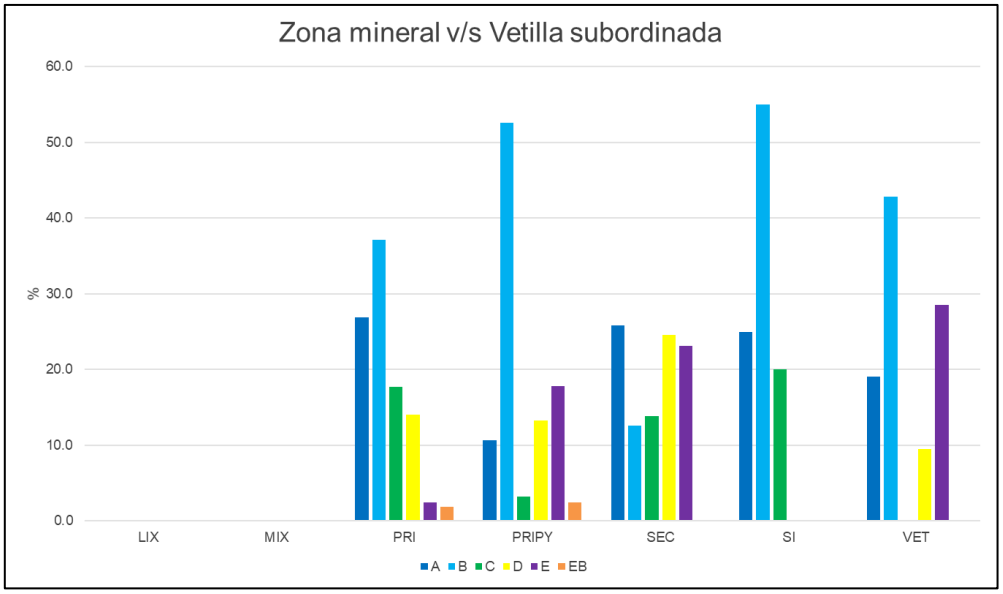

Figura 5.38:Gráfica de zona mineral con vetillas subordinadas. Elaboración propia.

Además, se lograron identificar parámetros para la generación de indicadores utilizados para modelar zonas sin datos de vetillas.

IF 0.5 < Cu <0.83 AND As<100 AND 20<Au<63 Vet1 is A

IF 0.83 < Cu <1 AND Mo>300 AND As<100 Vet1 is B

IF 0.9 < Cu <1.2 AND 150<Mo<355 AND As<100 AND Au>80 ppb Vet1 is C

IF 0.3<Cu < 0.6 AND 0< Mo <150 AND As<100 AND Au< 20 Vet1 is D.

IF Fe > 4 AND As>200 Vet1 is E.

5.2.3. Plantas y secciones

Las secciones o perfiles se encuentran distribuidos en el yacimiento Rosario, tal como se observa en la Figura 4.9. Para la elaboración de estos, se utilizó la base de datos de sondajes que solo contenía la vetilla dominante en el tramo, además se utiliza como apoyo los sólidos de estructuras principales, litología, alteración y zona mineral.

En la Figura 5.39 se visualizan los perfiles diseñados en secciones tipo 13NW, 15NW, 20NW, 24NW y 29NW. De los perfiles se pudo observar que las vetillas tipo A, están ubicadas en la parte central del pórfido y se extienden hacia profundidad, siguiendo la forma de emplazamiento del pórfido Rosario.

Las vetillas tipo B están distribuidas en forma de halo elongado en el contorno de la parte superior del sólido de vetillas A, dejando en evidencia una zona transicional desde un ambiente dúctil a uno más frágil.

Las vetillas tipo C que se lograron identificar en las secciones 15NW, 20NW y 24NW, debido a que en estas aflora el pórfido Rosario. Como se estableció con anterioridad el emplazamiento del pórfido mineralizador, denominado Rosario está influenciado por el sistema de fallas principales de orientación NE-SW.

En zonas de contacto con el pórfido caja Collahuasi se observó la dominancia de las vetillas tipo C, asociadas a alteración tipo sericita gris verde, restringida a zonas de interacción entre pórfidos y guiada con las estructuras principales.

En el caso de las vetillas tipo D, se encontraron concentradas principalmente en la zona periférica superior o como halo del pórfido, pero se logró observar extensión hacia zonas profundidad en áreas influenciadas por estructuras mayores, donde están sobreimpuestas a las vetillas primarias o tempranas.

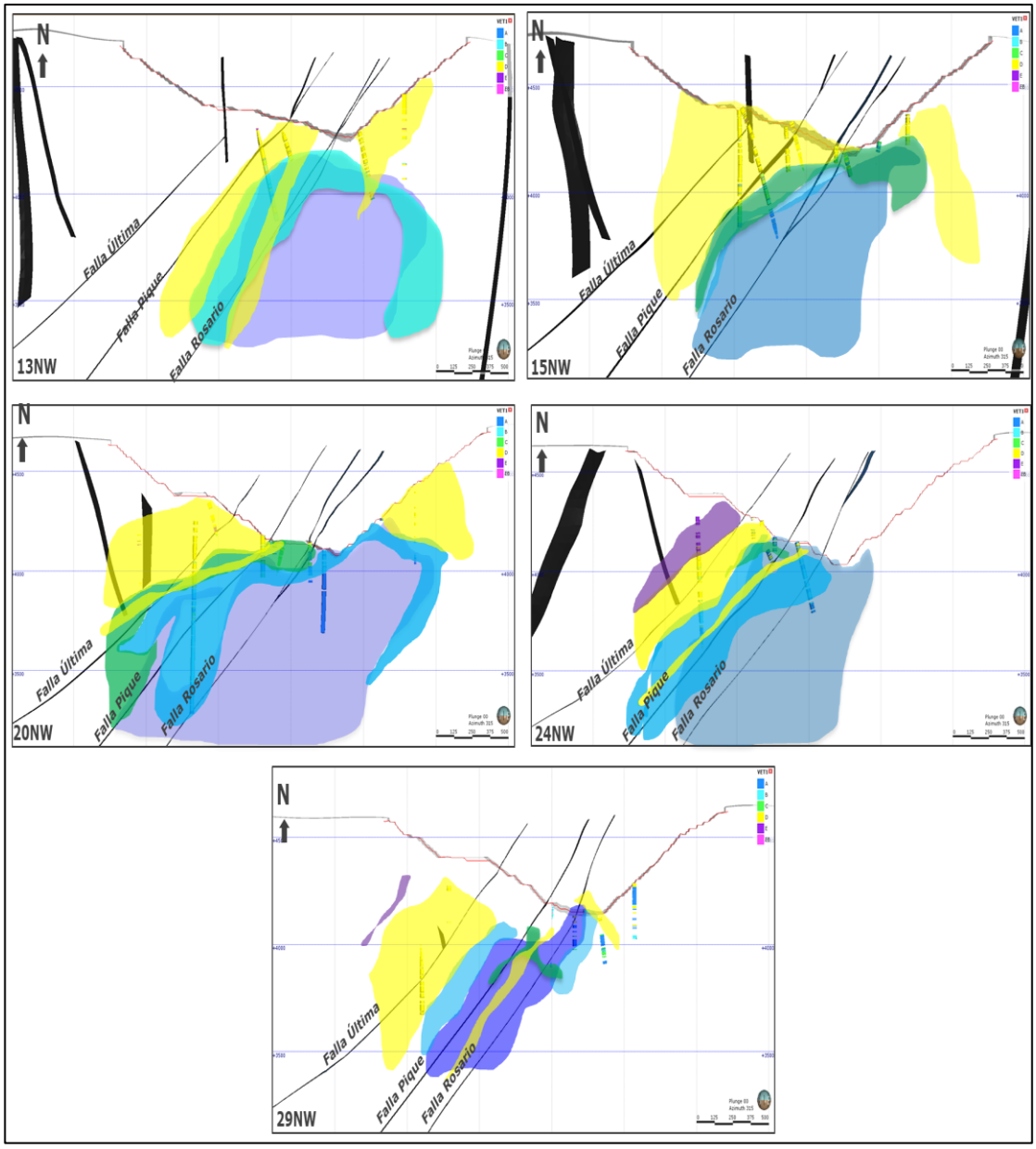

Figura 5.39: Secciones tipo, representando tipo de vetilla dominante. Elaboración propia.

En el caso de las plantas fueron interpretados los datos de vetillas dominantes, para las plantas en cota 4.150, 4.105, 4.000 y 3.850 ms.n.m, con la finalidad de ver cómo se comportan las vetillas en profundidad, se utilizó la misma base de datos anterior. La Figura 5.40 ilustra la ubicación de las plantas y cada una de ellas en base a vetilla dominante.

Para la planta 4.150, no se logró evidenciar una tendencia clara de la distribución de las vetillas, en la cota 4.105 se identificó que las vetillas tipo B dominan en la porción central de pórfido, el tipo C en la zona de interacción entre estructuras que limitan el pórfido y el tipo D, con una clara tendencia estructural NW-SE.

La misma tendencia se identificó en la planta 4.000, a diferencia de la planta anterior, las vetillas tipo A se observan dominando la porción NE de la sección con una orientación casi NS.

A medida que se profundizan las secciones, se observó una clara tendencia de los cuerpos modelados con vetillas tempranas aumenten su volumen, para vetillas tipo D se observó solo tramos aislados en zona de Falla Pique.

5.2.4. Pitshell vetillas

El énfasis del mapeo se centró en las vetillas y asociación geológica que existen entre estas y las características geológicas de la roca. Se analizó un total de 2.986,86 m de paredes del yacimiento. En la Figura 5.41 se ilustra el resultado obtenido en la creación del *pitshell* de vetillas, que toma en cuenta las observaciones realizadas en terreno, que permitieron incorporar más datos y evitar los espacios sin información.

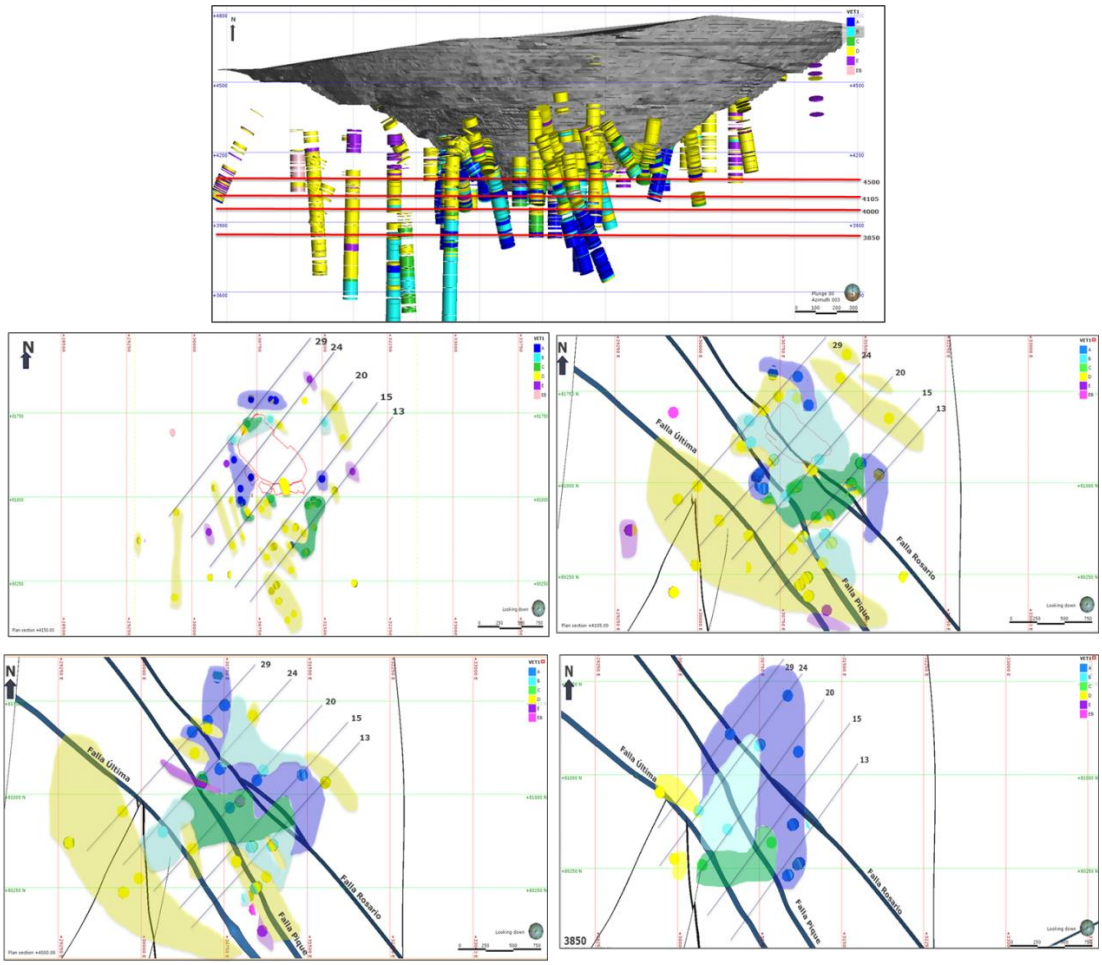

Figura 5.40: Representación gráfica de plantas seleccionadas en base a vetillas dominantes. Elaboración Propia.

Finalmente se modelo los sólidos de vetillas tipo A, B, C, D y E, como se mencionó anteriormente alteraciones tipo skarn, propilítica y hornfels no fueron considerada en el mapeo de vetillas, pero si modeladas en el *pitshell*, las zonas de color gris en la Figura 5.41 representan áreas denominadas “UNK” o *Unknow*, es decir, áreas donde no se cuenta con información de mapeo de bancos, datos de sondajes y relaciones geológicas que permitan definir el tipo de vetilla dominante.

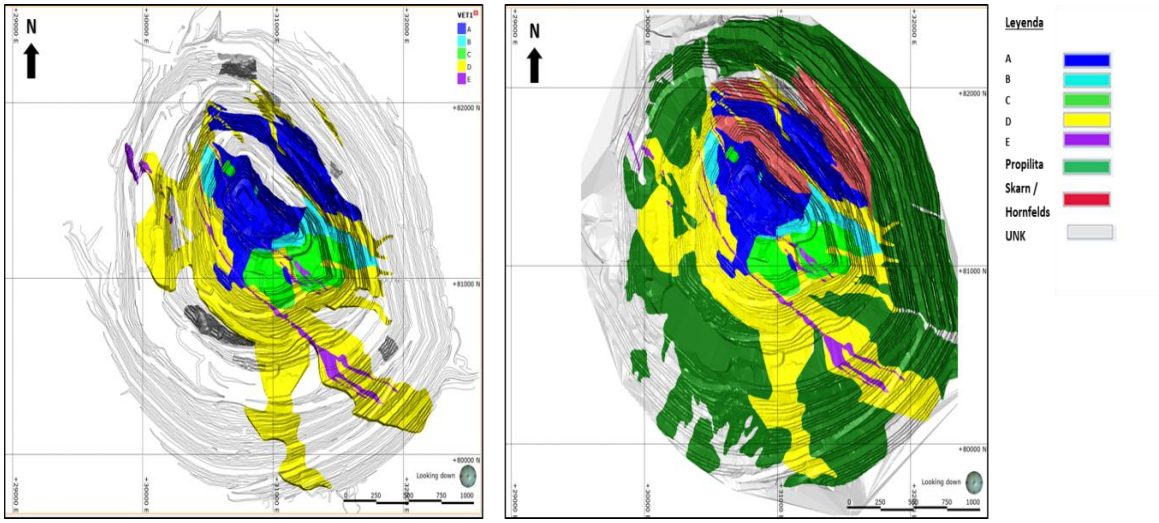

Figura 5.41: A la izquierda se observa el *pitshell* de vetillas representado solo por el tipo A, B, C, D y E. La imagen de la derecha incorpora las zonas con alteraciones no relacionadas a vetillas como es Skarn, Hornfels, Propilítica y UNK. Elaboración propia.

5.2.5. Modelamiento de vetillas en Rosario

5.2.5.1. Configuración de la base de datos de vetillas

Para el modelamiento geológico de vetillas se generó una base de datos en *Excel*, la cual para ser evaluada en el *software Leapfrog Geo* necesitó tener el siguiente formato:

Collar: Tabla con base de datos que contiene la información espacial del collar (Tabla 5.2), donde "*Hole ID"* es el nombre del sondaje, "*East"* (Este), *"North"* (Norte) y Cota representan las coordenadas X, Y, Z y *"Depth"* que es el largo total del sondaje.

Survey: Tabla 5.3 contiene parámetros de dirección del sondaje. "*Hole ID"*, *"Depth"* (profundidad), "*Dip"* (ángulo de inclinación respecto a plano horizontal) y *"Azimuth"* (ángulo horizontal desde el Norte Real).

Tabla 5.2: Formato Tabla Collar.

Hole ID	EAST X	North Y	Cota Z	Depth
A001	31099.71	81497.22	4590.75	210
A002	31101.86	81665.29	4613.11	170
A003	31002.43	81692.87	4609.38	220
A004	30900.77	81793.56	4600.13	250
A005	30801.18	81843.37	4592.83	250
A006	30801.81	81692.79	4596.98	206

Tabla 5.3: Formato Tabla Survey.

Hole ID	Depth	Dip	Azimut
A001	0	90	0
A002	0	90	0
A003	0	90	0
A004	0	90	0

Ros_ass_geo_vetillas_pp: Tabla 5.4 que incluyó los datos de vetillas de las cuales se consideran el tipo EB, A, B, C, D y E. Esta base de datos se creó luego de la homologación descrita en el capítulo de metodología donde los campos que inician con BDH_, contienen datos históricos de abundancia y datos nuevos añadidos posterior a la homologación de rangos.

Los campos Vet1 (vetilla dominante), Vet2 (vetilla subordinada), AGR (agrupación de tipos de vetilla), Mapeo (referente a quien realizo el mapeo), confiabilidad (grado de confianza del dato), los campos que inician con BDV_ (EB, A, B, C, D, E), son los datos del % volumen de cada vetilla mapeada en un determinado tramo versus roca total y por último Tot_%VET (indica el porcentaje total de vetillas en el tramo).

Tabla 5.4: Formato Tabla parámetro vetillas.

Hole ID	From	To	BDH_A	BDH_B	BDH_C	BDH_D	BDH_E	BDH_EB	VET1	VET2	AGR	MAPEO	CONFIABILIDAD
DDH517	74	74.5	DEBIL		DEBIL	DEBIL		DEBIL	C	A	C-A	GB	
DDH517	74.5	76	DEBIL		DEBIL	DEBIL		DEBIL	C	A	C-A	GB	
DDH517	76	76.8	DEBIL		DEBIL	DEBIL		DEBIL	C	A	C-A	GB	

Hole ID	From	To	BDV_A	BDV_B	BDV_C	BDV_D	BDV_E	BDV_EB	Tot_%VET
DDH517	74	74.5	1		3	1		1	6
DDH517	74.5	76	1		3	1		1	6
DDH517	76	76.8	1		3	1		1	6

Ros_ass_Geo: Base de datos que contenía los parámetros geológicos de los sondajes seleccionados para el modelamiento geológico (Tabla 5.5), este incluye los campos *"Hole ID"*, *"From"* (desde), *"To"* (Hasta), CuT (Ley cobre total en %), CuS (Ley cobre soluble en %), Mo (leyes de molibdeno en ppm), FeT (Leyes de fierro total en %), As (Leyes de Arsénico en ppm), Au(leyes de oro en ppb), Ag (leyes de plata en ppm), *"MNZ"* (zona mineral), *"LITO"* (litología del tramo) y *"ALT"* (alteración en el tramo).

Tabla 5.5: Formato Tabla parámetros geológicos.

Hole ID	From	To	CuT	CuS	Mo	FeT	As	Au	Ag	MNZ	LITO	ALT
AR2040	94	96	0.113	0.027	1	4.79	11	11	0.5	PRIPY	AND	PROP
AR2040	96	98	0.147	0.026	1	5.68	16	12	0.5	PRIPY	AND	PROP
AR2040	98	100	0.226	0.024	34	4.54	8	15	1.1	PRIPY	AND	PROP

Ros_ass_Geotec: Tabla 5.6 que contiene parámetros geotécnicos de los sondajes seleccionados para el modelamiento geológico incluye "*Hole ID*", *"From"*, *"To"*, "*RQD*" (siglas "*Rock Quality Designation"*, recuperación de roca), *"FF"* (frecuencia de fracturas) y *"Jc" ("Join condition"*, o condición de las discontinuidades).

Tabla 5.6: Formato Tabla parámetros Geotécnicos.

Hole ID	From	To	RQD_COD	FF_COD	JC_COD
DDH459	290.35	292	8	8	0
DDH459	292	292.15	8	8	0
DDH459	292.15	293.7	13	10	20
DDH459	293.7	294	13	8	0
DDH459	294	294.8	13	8	0
DDH459	294.8	295.65	13	8	0
DDH459	295.65	296	13	10	12

Además de las tablas ya descritas, se utilizó sondajes auxiliares, sólidos de Litología, Alteración, Zona mineral, envolventes de Cu, Mo, As, Fallas principales, Fallas F1, topografía de 01_05_18 y sólidos de *pitshell* de vetas, incluyendo las polilíneas de *pitshell* de vetillas, plantas, secciones diseñados para el modelo conceptual y polilíneas auxiliares, puntos de referencia tomados en terreno y pozos de tronadura con fecha 01/05/18.

Con toda la información recopilada se dio paso al modelamiento geológico con el *software Leapfrog Geo*.

5.2.5.2. Limitaciones del modelo

Las principales limitaciones del modelo se debieron a una baja densidad de datos, provocando zonas donde los sólidos modelados tienen una confiabilidad media, dada por interpolación de datos cercanos.

Debido a la naturaleza de las distintas bases de datos históricas de vetillas, mencionado en el capítulo de metodología, no fue posible hacer una homologación directa, lo que condiciono con la densidad de datos.

Las áreas del yacimiento que fueron modeladas con alteración propilítica, skarn y hornfels, no cuentan con la suficiente cantidad de datos de vetillas para modelar, por lo cual estas zonas solo son modeladas en base a datos de sondajes y *pitshell* de alteraciones.

Existe en la base de datos históricos un tipo de vetillas denominado como “Otras”, que agrupa una cantidad de datos heterogéneos no modelables, por lo general asociado a zonas con alteración propilítica y argílica, también incluye información de vetillas descritas en el ambiente tipo skarn y hornfels, los que, debido a su génesis distinta a los pórfidos, corresponden a vetillas no relacionadas con el estudio, por lo cual se ignoraron del modelamiento.

Solo se modelaron datos bajo la topografía con fecha de 01/05/18, como límite inferior se utilizó el sólido de largo plazo.

Los sondajes con tramos de vetillas menores a 10 m, fueron ignorados mediante herramientas de *Leapfrog Geo* para facilitar el modelamiento.

5.2.5.3. Modelo geológico de vetillas

Se genera un proyecto en el *software Leapfrog Geo* versión 4.2, denominado “Proyecto_vetillas_Rosario”, se utilizó toda la base de datos antes mencionada y se procedió a modelar.

Luego del análisis de la información de la tabla “Ros_geo_vetillas_pp”, se decidió realizar un modelamiento en base a parámetros categóricos, es decir, se modelo la ocurrencia de la vetilla dominante (Vet1).

El modelo geológico de vetillas generó 8 sólidos, los cuales corresponden a vetillas tipo A, B, C, D, E, alteración o halo propilítico, alteración skarn/hornfels y *unknow*. El último sólido incluyo zonas sin datos para realizar el modelamiento, a medida que aumente la cantidad de datos de sondajes los volúmenes generados podrán ajustarse de mejor forma a la realidad.

La Figura 5.42 ilustra una vista de planta de las vetillas modeladas donde se pudo identificar que el tipo A, se encuentran en las partes profundas del yacimiento mayoritariamente en zonas donde aflora el pórfido Rosario y Collahuasi, en la pared norte en rocas tipo TOB cristalinas y USED con una clara tendencia de buzamiento del cuerpo al SW. Las vetillas tipo B dominantes tienen una tendencia similar, se encuentran rodeando a las A en forma casi anular.

Las vetillas tipo C, en cambio se localizan en afloramientos de pórfidos, aledañas a ambos flancos de las fallas principales Rosario y Pique, no observándose al SW de la Falla Pique. Debido a las altas leyes de cobre que presentan, este tipo de vetillas es muy importante para ayudar a definir la tendencia se envolventes de calcopirita y bornita.

Para las vetillas tipo D se observó una tendencia más estructural, con desarrollo de grandes halos de alteración, con afloramientos de gran volumen en zonas altas del sistema. Probablemente por medio de las estructuras los fluidos lograron sobre imponer el evento QS a zonas de temporalidad más jóvenes y profundas. Este tipo de vetillas se encuentra presente en la mayoría de las rocas descritas en Rosario.

Las vetillas tipo E, como se ilustró en el presente documento son las más tardías del sistema asociadas a un ambiente epitermal de alta sulfuración, con valores anómalos de AS y leyes sobre el 0.5 % de Cu, asociadas a sulfuros masivos. Tienen un comportamiento netamente estructural en el yacimiento Rosario, esto se puede evidenciar con sondajes, *pitshell* de estructuras y pozos de tronadura.

En el yacimiento Rosario para el modelamiento se consideró las rocas metamórficas skarn y hornfels, como un tipo de alteración. Están hospedada en la pared norte, coincidente con litología de rocas sedimentarias (USED) correspondientes a la Formación Collahuasi, unidad La Grande y Capella.

La alteración propilítica, según los modelos clásicos de pórfidos cupríferos, se formó luego de la alteración potásica como un halo de baja temperatura, en forma de anillo a la intrusión, dicha característica se puede observar en el sólido generado, estando desarrollada en zonas periféricas.

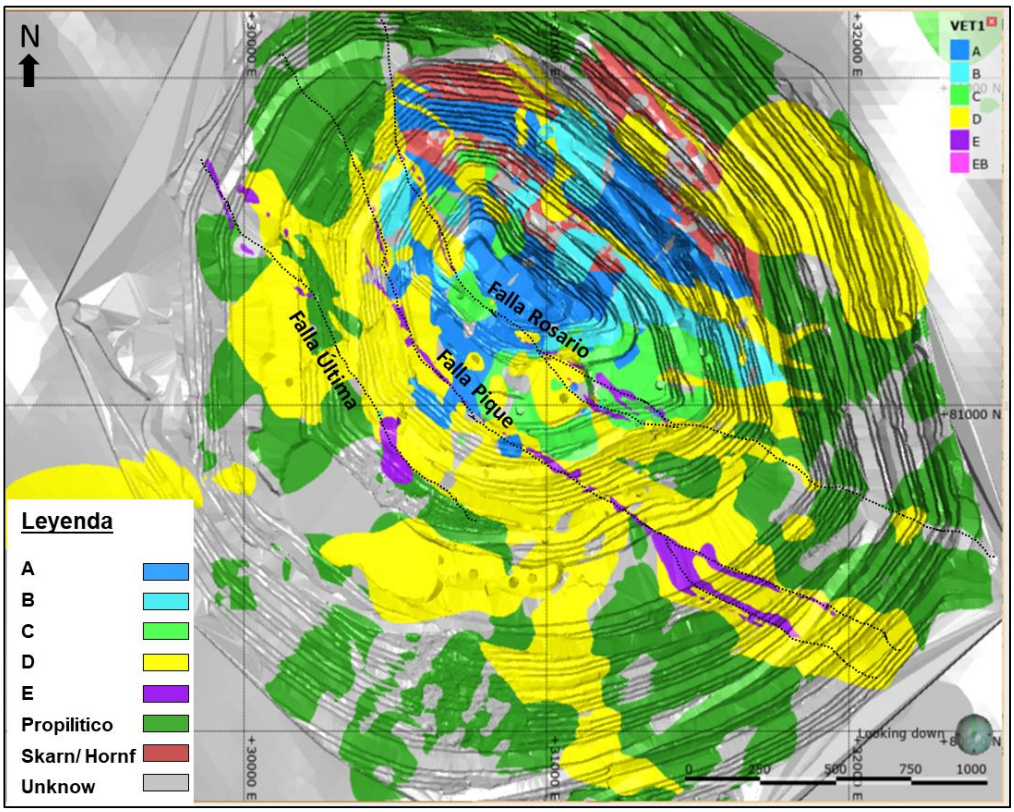

Figura 5.42: Vista de planta de sólidos de vetillas modelados y fallas principales que condicionan el emplazamiento de los pórfidos. Elaboración propia.

Los sólidos de vetillas generados tienen los volúmenes ilustrados en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Volúmenes y áreas de sólidos de vetillas dominantes.

Sólido	Volumen	Área
A	1,432,200,000	14,457,000
B	692,550,000	13,779,000
C	107,580,000	4,455,800
D	1,865,900,000	26,205,000
E	77,459,000	2,765,800

5.2.5.4. Interpretación en perfiles

Como resultado del modelamiento geológicos de vetillas mediante *software Leapfrog Geo* se obtuvieron ocho sólidos, diseñados a partir de información de sondajes, indicadores, *pitshell* de vetillas, polilíneas, sondajes auxiliares, sólidos geológicos, entre otros.

El yacimiento Rosario como se ha mencionado con anterioridad, se divide en 35 secciones con azimut 315° separadas cada 70 m, para el siguiente análisis fueron revisadas las secciones 12NW, 15NW, 20NW, 24NW y 29NW.

De la Figura 5.43 y Figura 5.44, que representa la sección o perfil 13NW, se pudo concluir que las vetillas A, B y C, tienen una geometría similar, asociada a la intrusión de PCO y PRO, el tipo D presentan una distribución masiva en el flanco SW, donde está ubicado el límite entre los ambientes geológicos tipo Pórfido cuprífero y epitermal de alta sulfuración está dado por la falla Última.

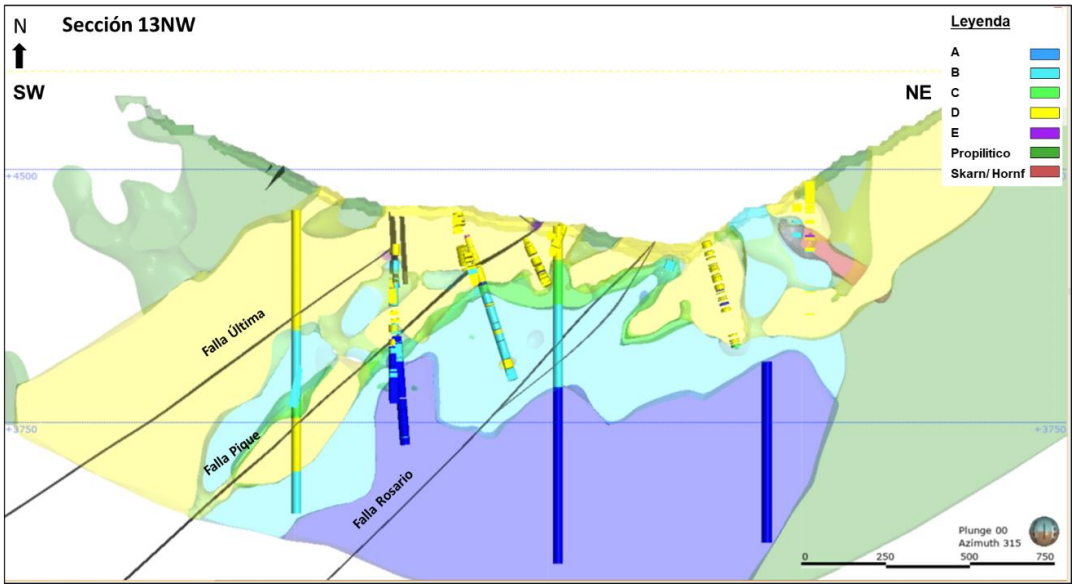

Figura 5.43: Perfil 13NW, sección con sondajes con vetilla dominante y sólidos generados por modelamiento. Elaboración propia.

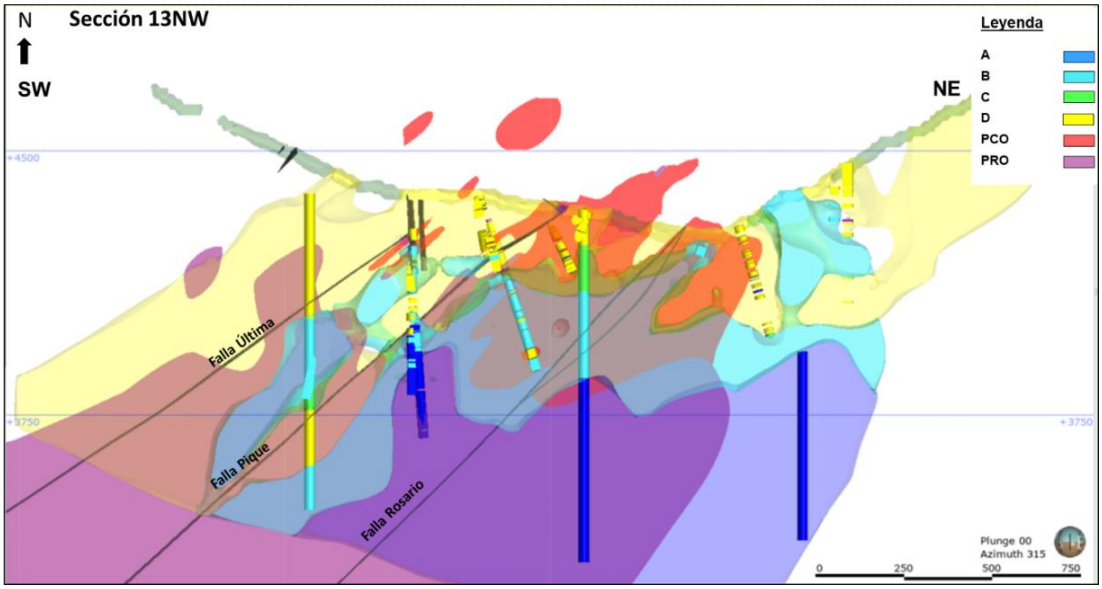

Figura 5.44: Perfil 13NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento y sólidos litológicos PCO pórfido Collahuasi y PRO pórfido Rosario. Elaboración propia.

Al avanzar en las secciones al NW, a 140 m de la sección antes analizada, se identificó un aumento en el volumen del sólido de vetillas tipo C (Figura 5.45), lo que genera la impresión visual de rodear al sólido de vetillas tipo B. Ademas se observó una distribución preferente entre los flancos de la falla Rosario y Pique.

En la Figura 5.46, se agregó sólidos de isoleyes de cobre, donde cada uno engloban zonas con leyes Cu> 1.1%, Cu>1.2% y Cu> 1.5%, que concidieron en su trayectoria con el sólido modelado para vetillas tipo C.

La Figura 5.47 se visualizan los sólidos de vetillas con las envolventes de molibdeno con los rangos 250<Mo<500 ppm y 500<Mo<1000 ppm, los que fueron construidos en base a iso leyes de dicho elemento.

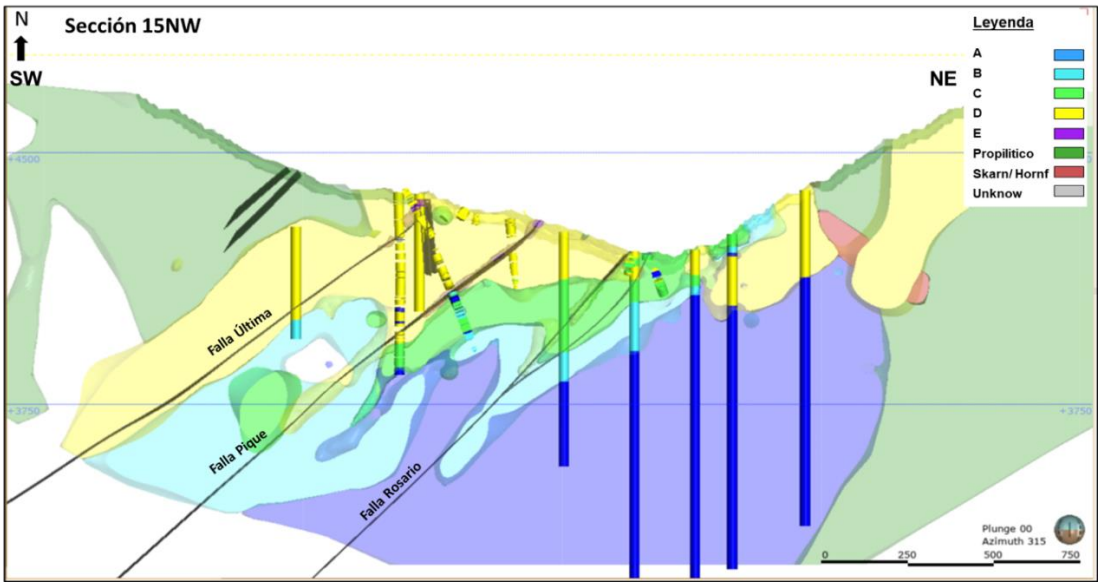

Figura 5.45: Perfil 15NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento. Elaboración propia.

El sólido modelado de vetillas tipo B tiene buena correlación con isoleyes de molibdeno en el flanco SW con rangos entre 250 a 500 ppm y en el centro del yacimiento con leyes altas de Mo de 1.000 ppm, esta observación es concordante con la estadistica ya realizada, donde la ley promedio para vetillas tipo B dominante es 450 ppm.

En la sección antes descrita las vetillas tipo D hacia el SW presentaron un claro componente estructural en zona de falla Última.

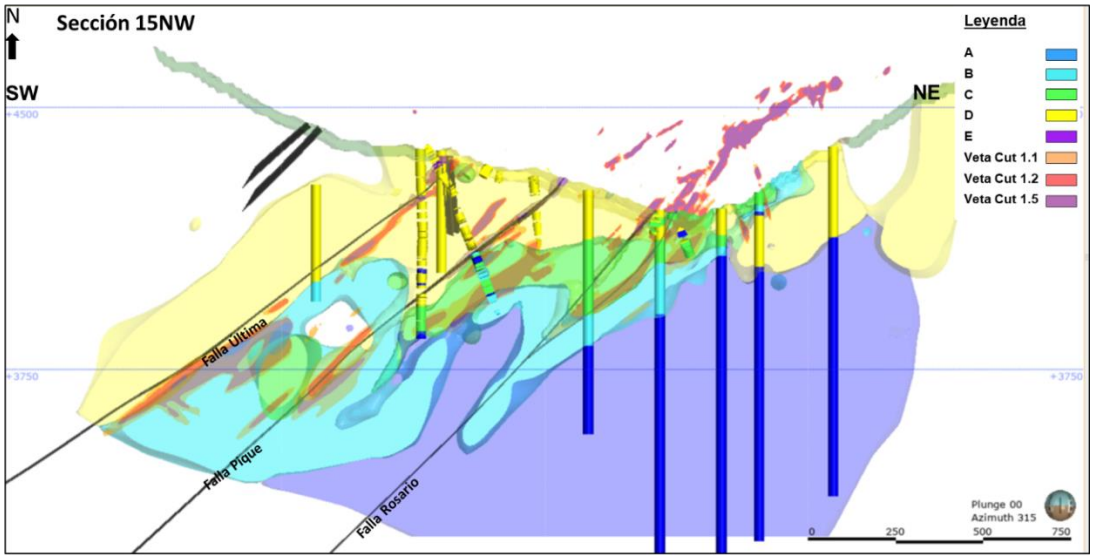

Figura 5.46: Perfil 15NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento, y iso leyes de Cu a leyes > 1.1%, >1.2% y >1.5%. Se identifica una clara correlación entre el sólido de vetillas tipo C y iso leyes de cobre. Elaboración propia.

El perfil 20NW cruza por el centro del yacimiento, este perfil es el más estudiado, ya que abarca todas las rocas identificadas en Rosario (Figura 5.48). Para las vetillas tipo A se observó, que mantienen la misma tendencia observada en secciones anteriores, lo mismo ocurrió con las B, en el caso de las C al igual que en la sección 15NW se observó un aumento en el tamaño del sólido en zona de falla Rosario y con escasos afloramientos en sector SW en contacto con falla la Última.

Como se observa en la Figura 5.49, en esa zona se modelo el contacto de PRO y rocas de caja. Al igual que en la sección anterior las iso leyes de cobre tienen una buena correlación con sólido de vetillas tipo C (Figura 5.50).

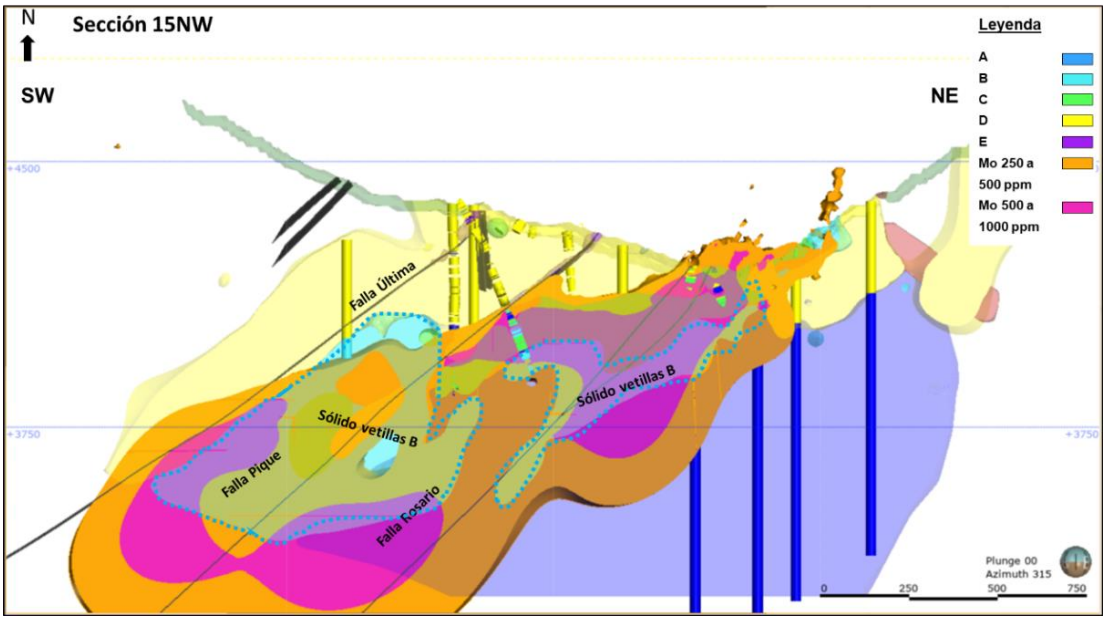

Figura 5.47: Perfil 15 NW, comparación visual entre sólidos de vetillas y envolventes de Mo, se destaca contorno de sólido de vetillas tipo B. Elaboración propia.

Se analizó el comportamiento del sólido de vetillas tipo B en la sección 20NW, donde PRO tiene una proyección mayor en profundidad, al visualizar iso leyes de molibdeno (Figura 5.51). Al igual que en la Figura (5.47), ambos sólidos son coincidentes, pero a diferencia de lo antes observado en este perfil las vetillas tipo B coinciden con iso leyes del 500-1.000 ppm de Mo en profundidad.

Para vetillas tipo D dominantes, en zonas entre fallas Pique y Última, se observó escasos afloramiento en pared NE en rocas tipo USED.

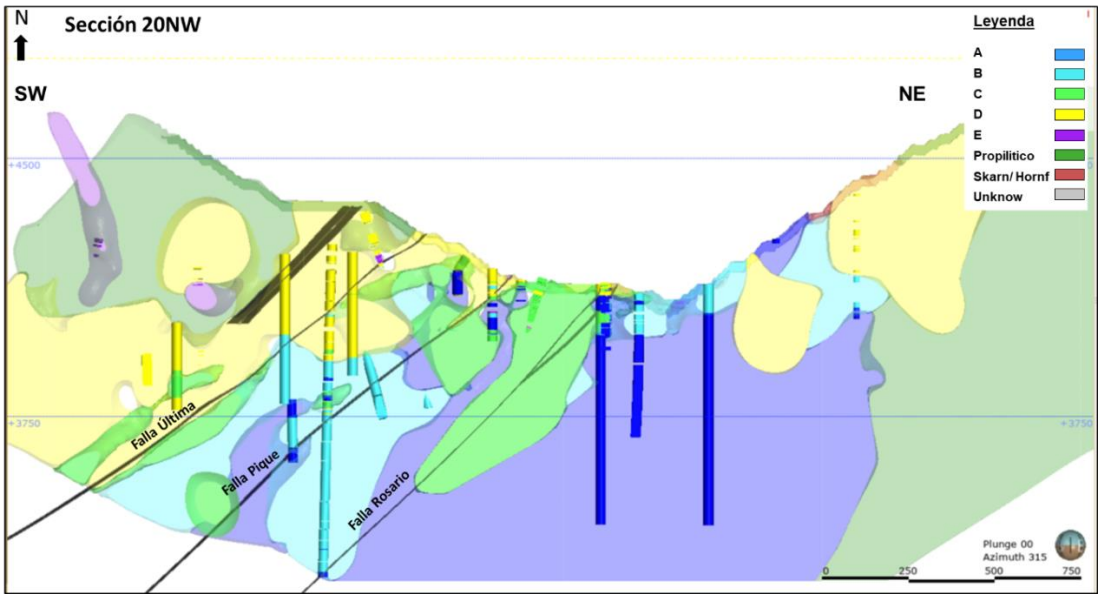

Figura 5.48: Perfil 20NW, sección con sondajes con vetilla dominante y sólidos generados por modelamiento. Elaboración propia.

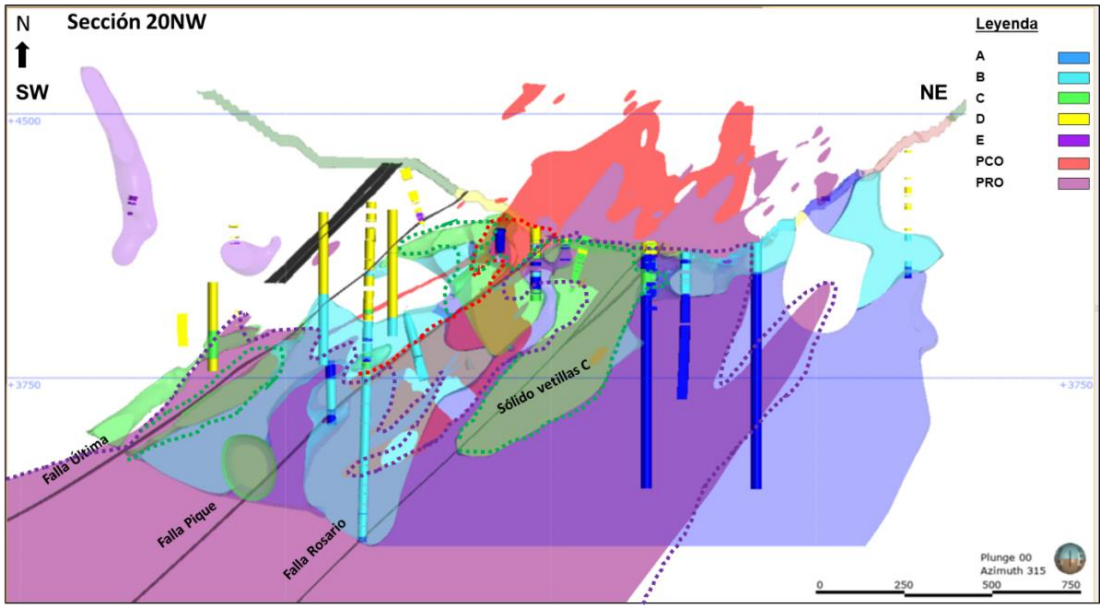

Figura 5.49: Perfil 20NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento de vetillas y sólidos litológicos de PRO y PCO, para comprender mejor se marca contorno sólido vetillas tipo C y de pórfidos. Elaboración propia.

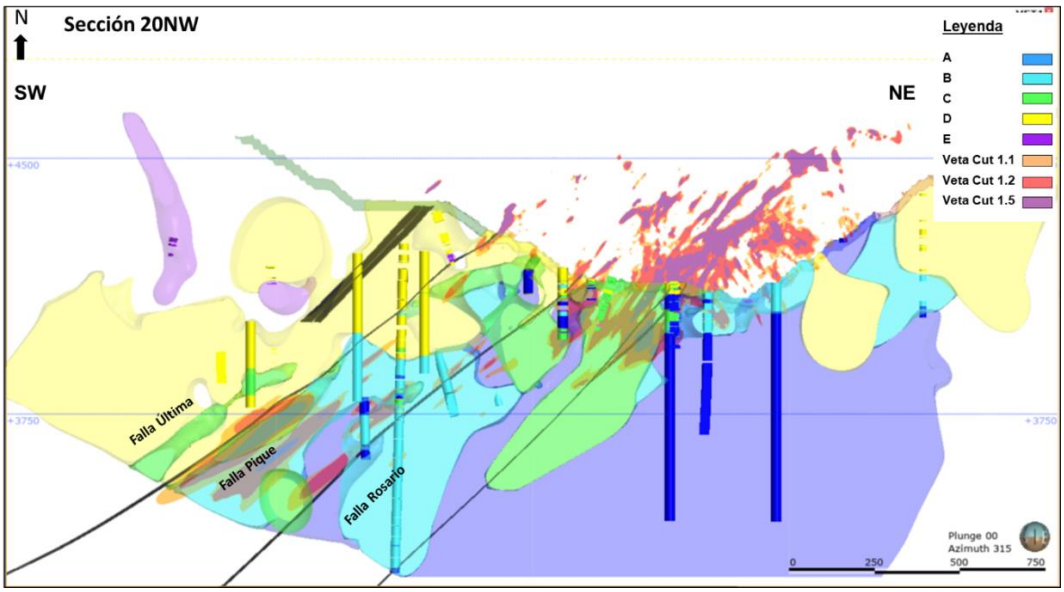

Figura 5.50: Perfil 20NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento y iso leyes de Cu. Elaboración propia.

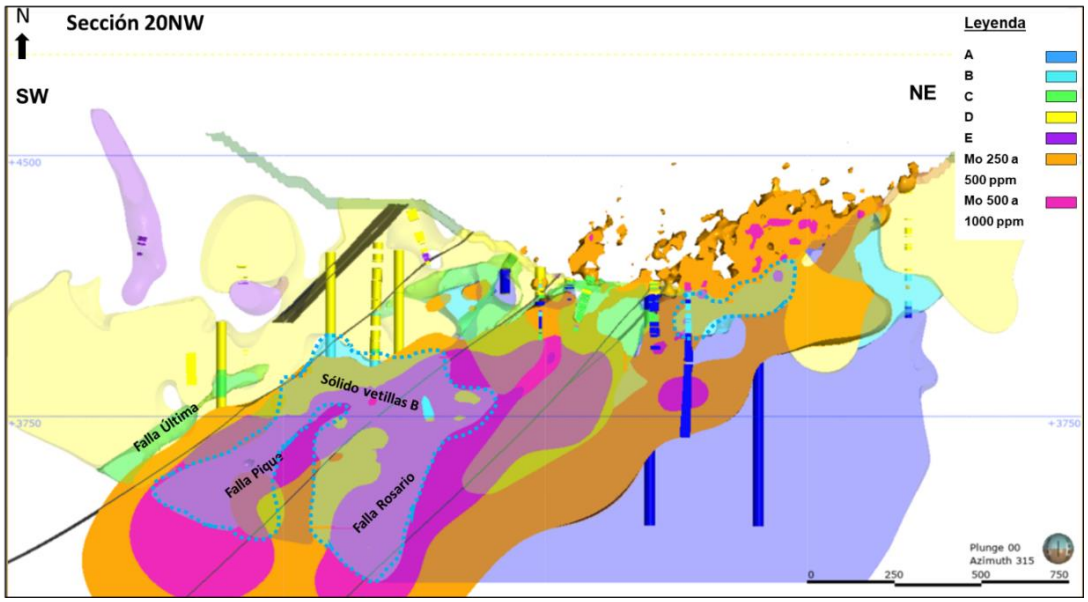

Figura 5.51: Perfil 20NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento de vetillas y envolventes de molibdeno, para una mejor visualización se destaca contorno de cuerpo vetillas tipo B. Elaboración propia.

La sección 24NW, tiene una densidad baja de sondajes al NE, lo que género una menor resolución de la delimitación de los sólidos, en cambio en el flanco SW (Figura 5.52), el cuerpo de vetillas tipo B, C y D fueron modelados con facilidad, se observó una distribución similar que en secciones anteriores.

Las vetillas tipo E en el margen superior izquierdo, asociada al ambiente tipo epitermal presentaron una orientación contraria a las fallas principales, asociadas a estructuras tipo rosario Oeste con orientación NS, inclinadas al NE.

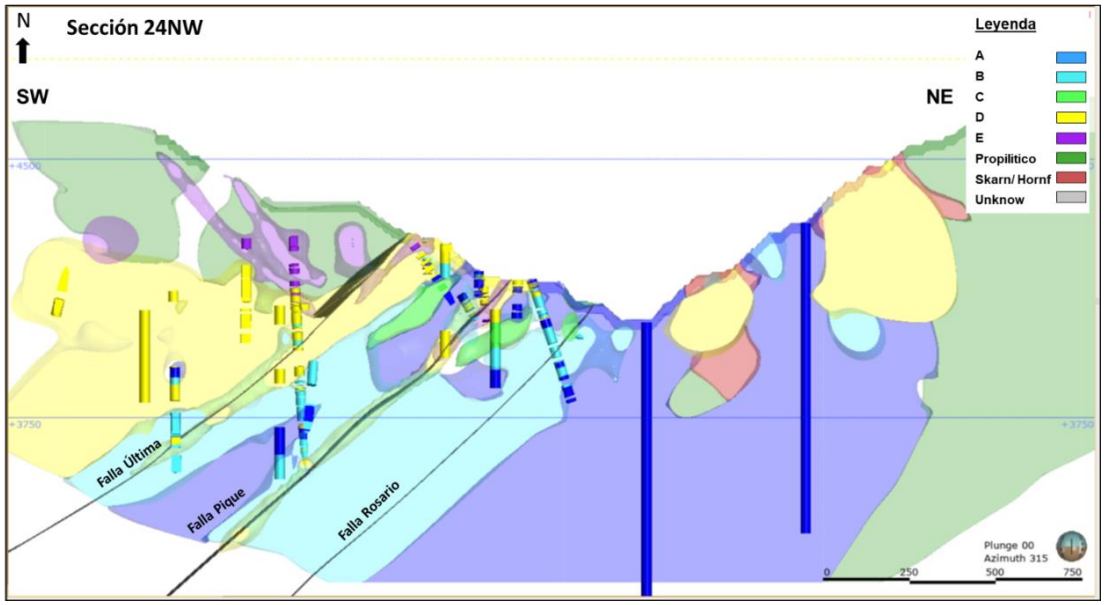

Figura 5.52: Perfil 24NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento de vetillas. Elaboración propia.

La sección 29 NW de la Figura 5.53, ilustra que la distribución de vetillas tipo A, se acotaron solo al NE de la Falla Rosario, esto debido que en dicha zona el cuerpo de PRO disminuye su tamaño, las demás vetillas presentaron los mismos comportamientos observados en otras secciones.

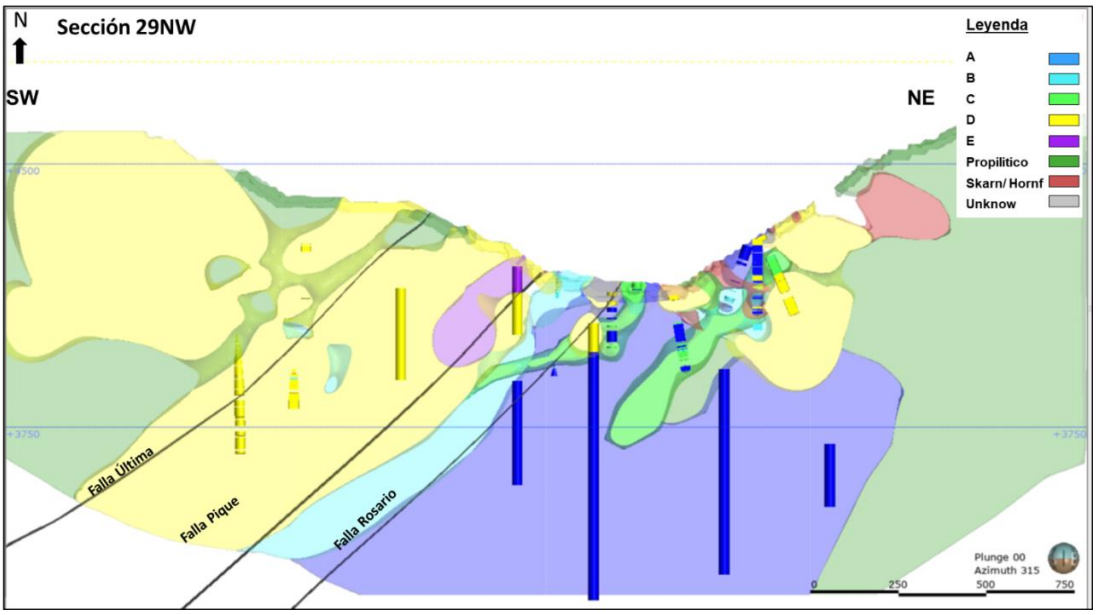

Figura 5.53: Perfil 29NW, sección con sondajes con vetilla dominante, sólidos generados por modelamiento. Elaboración propia.

Para el tipo C, en los perfiles y sondajes se observó una baja cantidad de datos para el modelamiento, lo que provocó una proyección acotada de los cuerpos de este tipo de vetilla por datos de sondajes. Por análisis visual y estadístico, el tipo C coincidió en zonas del yacimiento con altas leyes de cobre, concordante en zonas entre las Fallas Rosario y Pique y en litologías de PCO y PRO.

Las vetillas tipo C tienen una buena correlación con los sólidos de iso leyes de Cu a 1.1%, 1.2% y 1.5%, representados en las Figura 5.46 y 5.50, lo que resulto concordante con los estudios estadísticos realizados.

Las vetillas tipo D, se observaron en zonas periféricas a la intrusión del pórfido, teniendo un mejor desarrollo en el flanco SW, que en el NE. En profundidad se diferencian por estar acotadas a la zona de influencia de las estructuras mayores Rosario Pique y Última, en general presentaron una distribución heterogénea en el

yacimiento, ya que se pueden encontrar en todo tipo de rocas y en relaciones de corte con la mayoría de las vetillas hidrotermales identificadas.

En vetillas tardías tipo E, tal como se comentó para los tipos C, la densidad de datos fue baja, debido principalmente por una mala identificación al momento de mapear los sondajes históricos, ya que vetillas con características tipo E, fueron registradas en el parámetro “Otras”, el cual como se comentó, agrupa datos heterogéneos no modelables.

Con los datos, se logra definir que este tipo de vetillas tiene una geometría netamente estructural, en el ambiente tipo pórfido ligara a fallas principales con rumbo NW-SE, y en zona de yacimiento Rosario Oeste de ambiente epitermal de alta sulfuración limitadas a estructuras rumbo N-S casi verticales.

Debido a lineamientos de seguridad las personas no pueden acercarse a menos de 6 m de la “*pata”* o base del banco, por lo cual cuando se visitó el rajo resulto imposible tomar datos directos de la orientación estructural de cada tipo de vetilla y donde la proyección de planos resulta imposible, ya que como se ha propuesto las vetillas tienen potencias milimétricas a centimétricas.

Capítulo 6. DISCUSIÓN

Según los resultados obtenidos de esta investigación, las vetillas que fueron estudiadas y modeladas corresponden al tipo A, B, C, D y E.

Estudios anteriores Masterman (2003) y Ireland (2010) describieron estos tipos de vetillas y subtipos en base a características mineralógicas y texturales, lo cual coincidió con los resultados de esta investigación, definiendo los subtipos A1, A2 y A3.

Los mismos autores al describir vetillas tipo B, definieron distintas morfologías en la cristalización del cuarzo, pero no diferentes eventos. En este estudio se lograron definir tres generaciones de vetillas tipo B, dadas por B1, B2 y B3, con diferencias cronológicas observada por relaciones de corte entre vetillas.

Para las vetillas transicionales y tardías C, D y E, los resultados fueron consistentes con los autores, a excepción de las vetillas tipo TES definidas por Masterman y otros (2005), ya que por falta de datos no fueron analizadas en este estudio.

Mediante los estudios petrográficos se determinó la cronología relativa de vetillas y mineralización, donde la temporalidad sigue una tendencia clásica para un sistema tipo pórfido cuprífero (Sillitoe, 2010).

En observaciones en terreno para vetillas tempranas tipo A, B y C, se observó mediante estudios calcográficos que la mineralización primaria es calcopirita y pirita, donde gradualmente se identificó un enriquecimiento hipógeno de los fluidos en cobre, lo que favoreció la posterior precipitación de bornita en calcopirita y pirita preexistentes.
Los autores Masterman (2003), Masterman y otros (2005) y Avalos (2019), mediante estudios de inclusiones fluidas, propusieron la existencia de un segundo pórfido mineralizador más joven que Rosario, donde los fluidos hidrotermales ascendieron

mediante una estructura profunda entre el yacimiento Rosario y la Grande. Dichos fluidos provocaron un enriquecimiento en cobre, desarrollo de vetillas tipo E y alteraciones sobre impuestas asociadas a un ambiente epitermal de alta sulfuración.

Debido a que el estudio de vetillas realizado, conto con una densidad baja de sondajes analizados, no se logró encontrar pruebas claras para afirmar lo expuesto por los autores antes mencionados.

La medición de la orientación de las vetillas en Rosario, en terreno resultó imposible por aspectos operacionales, pero los resultados del modelamiento geológico de vetillas en 3D, evidencio tendencias generales para cada tipo de vetilla. Los tipos A, B y C tienen un rumbo NW-SE con inclinación al SW al igual que el pórfido Rosario.

Las vetillas tipo D en profundidad están acotadas a halos de estructuras mayores, mientras que en la zona más superficial se observan en forma de halo del pórfido, con mayor desarrollo al W. Por otra parte, las vetillas E tienen un dominio netamente estructural.

Estudios previos, como los de Lee (1994), Masterman (2003), Masterman y otros (2005) y Ireland (2010), lograron recopilar datos estructurales sobre las tendencias generales de las vetillas, además estudiaron la evolución tectónica sufrida en el yacimiento Rosario entre el Paleozoico hasta la actualidad.

Estos autores concluyeron que, por cambios en los esfuerzos regionales, las fallas principales Rosario y Pique sufrieron múltiples eventos de inversión tectónica que desplazaron los pórfidos, lo que provoco diferencias de orientación en las vetillas.

En la Figura 6.1 extraída de Ireland (2010), quien compiló datos estructurales relacionados a vetillas se comparan edades de emplazamiento del pórfido Rosario y el ambiente epitermal de la Grande y vectores de estrés regionales.

Se logró determinar que a pesar de que la vetilla tiene múltiples planos de orientación, el rumbo NW-SE con inclinación al SW es el dominante para las vetillas tipo A, B, C y D, asociadas al ambiente Rosario.

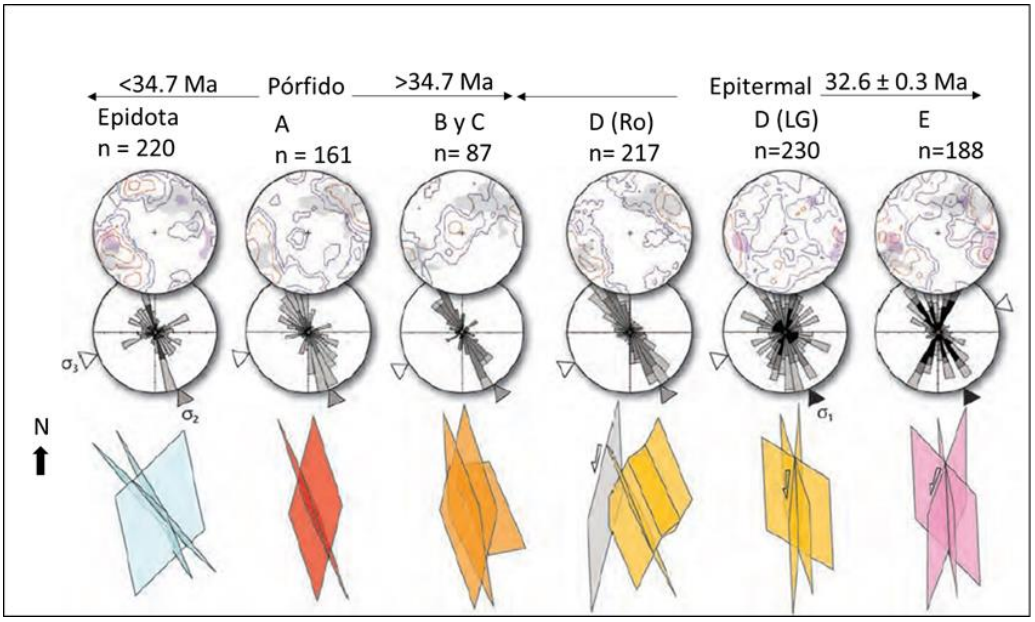

Figura 6.1: Resumen de orientaciones de vetillas en Rosario, mediante representación estereográfica, diagrama de rosas y planos de orientación de vetillas. Recopilación de los datos de Masterman y otros (2005) y Lee (1994) contrastado con los datos obtenidos por Ireland (2010). Modificado de Ireland (2010).

Esto coincidió con las orientaciones generales obtenidas en el modelamiento, además se evidencia que las vetillas tipo E tienen orientación NE y NW con inclinación casi vertical. Para estas últimas se contó con pocos datos, por lo cual no es posible determinar una tendencia mediante modelamiento geológico.

Los sólidos de vetillas tipo B son coincidentes con iso leyes de molibdeno sobre los 250 ppm, por lo cual pueden ser utilizados como apoyo en el modelamiento de este elemento, para de esta forma mejorar la precisión de su estimación.

Este trabajo representa la primera investigación destinada a utilizar el modelamiento de vetillas como un indicador interpretativo de las alteraciones hidrotermales en el yacimiento. Para aumentar la precisión del modelo de vetillas, es necesaria una constante actualización de la base de datos de vetillas con mapeo volumétrico.

Capítulo 7. CONCLUSIONES

Según los resultados del estudio de vetillas hidrotermales en el yacimiento Rosario, se pudo confirmar la ocurrencia de los clásicos tipos de vetillas descritas en pórfidos cupríferos, tales como los tipos A, B, C, D y E.

Por análisis petrográficos, calcográficos, observaciones macroscópicas y relaciones de corte se lograron definir para vetillas tempranas, los subtipos A1, A2, A3, B1, B2, B3, las cuales fueron útiles para definir de manera más detallada la evolución genética del emplazamiento del pórfido mineralizador.

Se pudo concluir que, mediante el análisis estadístico, las vetillas estudiadas mostraron una buena relación con los parámetros de litología, alteración y zona mineral esperados, por sus características de formación y composicionales.

Las relaciones entre vetillas y elementos de interés, favorece la relación de importancia que tiene, este aspecto geológico en el aporte de leyes en un yacimiento tipo pórfido cuprífero.

El modelamiento geológico de vetillas con *software Leapfrog Geo*, permitió determinar la distribución de las vetillas en el yacimiento, donde en profundidad existe un dominio de las vetillas tempranas y transicionales tipo A, B, y C.

Donde las vetillas tempranas tipo A presentaron la misma orientación que el emplazamiento del pórfido mineralizador, es decir, NW, tipo B están bordeando a las A en zona transicional, en cambio las C están en zonas aledañas a las estructuras y contactos entre pórfidos. Las vetillas tipo D se concentraron en zonas aledañas a estructuras principales y en forma de halo de la intrusión. Las vetillas tipo E en zonas más someras están asociadas a estructuras principales.

En Collahuasi se debe aumentar la cantidad de datos de mapeo volumétrico de vetillas para poder afinar el modelo en el futuro y tener mejores referencias para la construcción de los sólidos. Esto debido a que los datos históricos, se encuentran en un formato distinto al actual y no permiten la homologación directa.

En un futuro se deberá realizar un modelamiento en base a parámetros numéricos o volumétricos, para poder cuantificar la real influencia de las vetillas en la mineralización y alteración de Rosario, lo que permitirá generar estimación en modelo de bloques.

Se propone mejorar la resolución de las mediciones de pozos con *Televiewer* en sondajes, esta técnica ya es utilizada en Collahuasi para observar la orientación de estructuras mayores, pero al mejorar la resolución puede aplicarse a vetillas y obtener datos reales de orientación.

En el caso de vetillas tipo C como se comentó en esta tesis están relacionadas a leyes altas de cobre, se recomienda aumentar los estudios para genéticos y mineralógicos relacionados con este tipo de vetilla, con tal de comprender de forma más detallada su génesis y mineralogía en el yacimiento Rosario.

REFERENCIAS

Arancibia, O., y Clark, A. (1996). Early magnetite-amphibole-plagioclase alteration-mineralization in the Island copper porphyry copper-gold-molybdenum deposit, British Columbia. Economic Geology, 91(2), pp.402-438.

Aurum. (2009). Estudio Geologico-Metalogenico Distrito Collahuasi, Informe Final etapa II. Levantamiento Geológico y Metalogénesis, a escala 1:50.000 y 1:25.000 (Inédito). Santiago, Chile, pp. 475.

Avalos, N. (2019). Documento sobre inclusiones fluidas V: exploración para depósitos pórfido cuprífero basada en petrografía de inclusiones fluidas en el distrito minero Collahuasi, Chile. Tesis para optar al grado Geólogo, Universidad de Chile. Santiago, Chile, pp. 178.

Baker, R., Rehkämpera M., Ihlenfeldd C., Oatesd C. y Coggona R. (2010). Thallium isotope variations in an ore-bearing continental igneous setting: Collahuasi Formation, northern Chile. Geochimica et Cosmochimica Acta Volume 74, Issue 15, pp. 4405-4416.

Bisso, C. B., Duran, M., y Gonzales, A. (1998). Geology of the Ujina and Rosario copper porphyry deposits, Collahuasi district, Chile, in Porter, M.T, ed., Porphyry and hydrothermal copper and gold deposits: A global perspective, Conference proceedings, Perth, Australia, pp. 217-232.

Camus, F. (2003). Geología de los Sistemas Porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería., Santiago. Chile, pp. 267.

Charrier, R., Pinto, L. y Rodríguez, M. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. The Geology of Chile (Geological Society Special Publication): pp. 21-114.

CMDIC, (2014). Modelo de Recursos Minerales 2014. Informe Inédito. Iquique, Chile, pp. 76.

CMDIC, (2015). Procedimiento Mapeo de Sondajes Sector Rosario Collahuasi. Informe Inédito. Iquique, Chile, pp. 27.

Craig, J. y Vaughan, D. (1981) Ore Microscopy and Ore Petrography, John Wiley and Sons, New York, pp. 25.

Cooke, D., Hollings, P., y Walshe, J. (2005). Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls. Economic geology, 100(5); pp. 801-818.

Dick, L., Chavez, W., Gonzales, A., & Bisso, C. (1994). Geologic setting and mineralogy of the Cu–Ag-(As) Rosario vein system, Collahuasi district, Chile. Society of Economic Geologists Newsletter, 19, pp. 6-11.

Dilles, J., y Einaudi, M. (1992). Wall-rock alteration and hydrothermal flow paths about the Ann-Mason porphyry copper deposit, Nevada; a 6-km vertical reconstruction. Economic Geology, 87(8): pp. 1963-2001.

Gustafson, L. y Hunt, J. (1975). The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. Economic Geology, 70(5): pp. 857-912.

Gustafson, L. y Quiroga, J. (1995). Patterns of mineralization and alteration below the porphyry copper orebody at El Salvador, Chile. Economic Geology, Vol 90, pp. 2-16.

Ireland, T. (2010). Geological Framework of the Mineral Deposits of the Collahuasi district, Region de Tarapacá. Tesis para optar a grado de Doctor. Tasmania, Australia, University of Tasmania: pp. 440.

Lowell, J. y Guilbert, J. (1970). Lateral and Vertical Alteration-Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits. Economic Geology, 65(4): pp. 373 - 408.

Lee, A. (1994). Evolution of the Rosario copper-molybdenum porphyry deposit and associated copper-silver vein system, Collahuasi district, I Region, northern Chile: Inedita MA. Thesis, Kingston, Ontario, Canada, Queens University, pp.75.

Mackenzie, W. y Guilford, C. (1997). Atlas de Petrografía: Minerales formadores de roca en lamina delgada. España, Barcelona: Masson S.A.

Masterman, G. (2003). Structural and geochemical evolution of the Rosario Cu-Mo porphyry deposit and related Cu-Ag veins, Collahuasi district, northern Chile: Unpublished Ph.D. thesis, Tasmania, Australia, University of Tasmania: pp. 253.

Masterman, G., Cooke D., Berry R., Clark A., Archibald, D., Mathur, R.; Walshe, J. y Durán, M. (2004). 40Ar/39Ar and Re-Os Geochronology of Porphyry Copper-Molybdenum Deposits and Related Copper-Silver Veins in the Collahuasi District, Northern Chile. Economic Geology 99: pp. 673–690.

Masterman, G. Cooke, D., Berry, R., Walshe, J., Lee, A., y Clark, A. (2005). Fluid chemistry, structural setting, and emplacement history of the Rosario Cu-Mo porphyry and Cu-Ag-Au epithermal veins, Collahuasi district, northern Chile. Economic Geology, 100(5): pp. 835-862.

Mpodozis, C. y Ramos, V. (2008). Tectónica Jurásica en Argentina y Chile: Extensión, subducción oblicua, rifting, deriva y colisiones?. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63 (4): pp. 481-497.

Münchmeyer, C., Hunt, J. y Ware, H. (1984). Geología del distrito de Collahuasi y del pórfido cuprífero Rosario: Informe interno de la compañía, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, Santiago, Chile, pp. 84.

Munizaga, F. (1995). Edades 40Ar-39Ar, Distrito Minero Collahuasi. Reporte interno, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. pp 100.

Muñoz, C. (2009). Caracterización petrográfica y petrológica de Rosario Oeste y su relación con la mineralización, Distrito Minero Doña Inés de Collahuasi, Primera región, Chile. Tesis para optar al grado de Geólogo, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile, pp.118.

Oyarzún, G. (2010). Caracterización estructural del yacimiento Rosario Oeste, distrito Collahuasi, I Region de Tarapacá, Chile: memoria, Concepción, Chile, Universidad de Concepción, pp. 148.

Raith, M. Raase, P. y Reinhardt, J. (2012). Guía para la microscopía de minerales en lámina delgada. Rheinbach, Alemania. pp. 134.

Ramos, V. (2009). Anatomy and global context of the Andes: Main geologic features and the Andean orogenic cycle. The Geological Society of America, Memoir 204: pp. 31-65.

Ramos, V. (2010). The tectonic regime along the Andes: Present-day and Mesozoic regimes. Geological Journal. N° 45: pp. 2–25.

Richards, J. (2003). Tectono-Magmatic Precursors for Porphyry Cu-(Mo-Au) Deposit Formation. Economic Geology, 98: pp.1515 - 1533.

Sanhueza, A., Alarcón, B., Giglio, S. (2006). Proyecto Rosario Oeste. Informe Campaña Exploraciones Fase II: 2005 – 2006. Informe Gerencia de Exploraciones, CMDIC, (Inédito), pp. 100.

Sillitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems. Economic Geology, Vol 105: pp. 3 - 41.

Singer, D. A., Berger, V. I., y Moring, B. C. (2002). Porphyry copper deposits of the world: Database, maps, and preliminary analysis. US Department of the Interior, US Geological Survey. Report 02-268, pp.62.

Sobarzo A. (2010). Geología y distribución de Au y Ag en Rosario Oeste, Distrito Collahuasi. Tesis para optar al grado de Geólogo, Universidad de Concepción. Concepción Chile, pp. 121.

Tosdal, R. y Richards, J. (2001). Magmatic and Structural Controls on the Development of Porphyry Cu + Mo + Au Deposits. Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, V. 14: pp.157-181.

Vergara, H. (1978). Carta Geológica de Chile N°33, Escala 1:50.000. Cuadrángulo Ujina. Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. 80 pp.

Vergara, H. y Thomas, A. (1984). Hoja Nº 59 Collacagua, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Carta Geológica de Chile, 1:250.000, pp. 79.