



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**CARACTERIZACIÓN E INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA
GEOTÉCNICA DE VARIABLES GEOTÉCNICAS EN AMBIENTE
GEOLÓGICO DE ALTA VARIABILIDAD EN ROSARIO OESTE,
COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI S.C.M.,
REGIÓN DE TARAPACÁ, CHILE**

Profesor guía: Sr. Francisco Tapia Guerra

Tutor: Mariano Riveros Ibarra

Matías Benjamín Sandoval Iriarte

Copiapó, Chile 2023



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**CARACTERIZACIÓN E INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA
GEOTÉCNICA DE VARIABLES GEOTÉCNICAS EN AMBIENTE
GEOLÓGICO DE ALTA VARIABILIDAD EN ROSARIO OESTE,
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: Sr. Francisco Tapia Guerra

Tutor: Mariano Riveros Ibarra

Matías Benjamín Sandoval Iriarte

Copiapó, Chile 2023

Dedicado a mis queridos abuelos

Ernesto Iriarte Tapia y

Virginia Moyano Moyano.

RESUMEN

El distrito minero Collahuasi se ubica en la comuna de Pica, región de Tarapacá, y forma parte de los grandes depósitos cupríferos asociados al sistema de fallas de Domeyko, que incluye a los depósitos Quebrada Blanca, Ujina y Rosario, emplazados en el extremo norte de la franja metalogénica del periodo Eoceno-Oligoceno.

El rajo Rosario está dividido en dos dominios geológicos diferentes y coexistentes, hacia el NE se reconoce uno con características de tipo pórfido cuprífero, mientras que al SW un ambiente epitermal de alta sulfidización sobreimpuesto al estilo de mineralización del pórfido. La coexistencia de dos ambientes geológicos en el rajo, cuya expansión se está produciendo hacia el sur, implica variabilidades en el ambiente geológico y estructural, lo que conlleva a variaciones en sus parámetros geológicos-geotécnicos. Por ello, el presente trabajo se enfoca en estudiar de forma cualitativa-cuantitativa la variabilidad de variables geológicas-geotécnicas que definen unidades geológicas-geotécnicas en un ambiente geológico de alta variabilidad, a través de secciones representativas, identificando su comportamiento espacial, cambios de tendencias de promedios de poblaciones de valores y sus controles geológicos-estructurales que influyen en su variabilidad, como también, identificar sectores con una fuerte condición estructural. Las metodologías empleadas correspondieron a generación de gráficos de deriva espacial mediante el software de programación estadístico RStudio, pitshell geológicos y modelamiento de base de datos a través del Software Leapfrog Geo. El estudio permitió identificar las poblaciones de valores con mayor frecuencia de fracturas, menor GSI, RQD y JC, que afectan la calidad de la roca en las unidades geológicas geotécnicas, y reconocer relaciones proporcionales entre las diferentes variables geotécnicas de interés. Además, se identificaron 6 zonas asociadas a macizo rocoso de menor calidad con alto grado de fracturamiento, que presentaron coherencia con la información estructural levantada, afectando a toda extensión de unidad geológica geotécnica posicionada en dicha zona, evidenciando un macizo rocoso de menor calidad, siendo aquellas zonas elaboradas y representadas en un modelo. Se reconoció a nivel general que el ambiente epitermal de alta sulfidización constituye un macizo rocoso de menor calidad respecto al ambiente con características de tipo pórfido cuprífero.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi familia que siempre me ha dado su apoyo, a mi madre Eliana Iriarte Moyano, mi padre Héctor Sandoval Prieto y mi hermano Anibal Sandoval Iriarte. Me han brindado todo lo necesario para lograr las metas propuestas, no solamente asociado al desarrollo profesional.

A mis amigos de universidad con los que he pasado gratas vivencias durante mi etapa universitaria. Como también, mis otros amigos, que siempre están presentes.

A mi profesor guía Francisco Tapia por sus consejos y apoyo durante el desarrollo de la memoria. Al Dr. Diego Nascimento, por haberse dado el tiempo de enseñarme, apoyarme en la utilización del programa de estadística RStudio y responder cualquier inquietud presente.

A las personas que participaron en la realización de esta memoria, a la compañía minera Doña Inés de Collahuasi S.C.M. por darme la oportunidad de desarrollar la memoria de título profesional. A los geólogos de la Superintendencia Geotecnia Rajos y Botaderos. A Mariano Riveros por haberme permitido realizar la memoria, Gloria Guzmán y Javiera Delgado, por el apoyo brindado.

A Emily Estay por estar siempre presente, darme consejos y acompañarme en este proceso.

Índice

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	1
Generalidades.....	1
Planteamiento del problema.....	2
Hipótesis	2
Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo General.....	3
1.4.2 Objetivos específicos.....	3
Área de estudio.....	4
1.1 Estudios previos.....	6
Capítulo 2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Alteración hidrotermal.....	8
2.2 Pórfidos cupríferos	11
2.2.1 Características generales, configuración tectónica, génesis y evolución	11
2.3 Yacimientos epitermales con énfasis en tipo de alta sulfuración.....	13
2.3.1 Concepto y generalidades de los depósitos epitermales.....	13
2.3.2 Terminología y características de epitermal de alta sulfuración.....	15
2.3.3 Controles dominantes, estilo de mineralización y secuencia de vetas.....	17
2.4 Propiedades geotécnicas de los macizos rocosos	19
2.4.1 Parámetros geotécnicos.....	20
2.4.1.1 Condición de discontinuidades (JC).....	21
2.4.1.2 Espaciamiento de las discontinuidades.....	23
2.4.1.3 Frecuencia de fracturas (FF).....	23
2.5 Clasificaciones geotécnicas.....	24
2.5.1 Rock quality designation (RQD).....	24
2.5.2 Índice GSI (geological strength index).....	26
Capítulo 3. MARCO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO	29
3.1 Marco geológico distrital	29
3.1.1 Generalidades	29
3.1.2 Rocas estratificadas.....	31
3.1.2.1 Formación Collahuasi.....	32

3.1.2.2 Formación Quehuita	33
3.1.2.3 Formación Cerro Empexa.....	34
3.1.2.4 Ignimbrita Huasco.....	35
3.1.2.5 Ignimbrita Ujina.....	35
3.1.2.6 Depósitos Aterrazados.....	35
3.1.2.7 Estratovolcanes.....	35
3.1.2.8 Ignimbrita Pastillos.....	36
3.1.2.9 Depósitos no consolidados.....	36
3.1.3 Rocas intrusivas.....	36
3.1.4 Estructuras tectónicas.....	40
3.1.5 Geología económica.....	41
3.2 Marco geológico de Rosario Oeste	42
3.2.1 Generalidades	42
3.2.2 Rocas Estratificadas.....	43
3.2.2.1 Unidad de Tobas.....	43
3.2.2.2 Unidad Andesítica.....	43
3.2.2.3 Unidad Sedimentaria.....	44
3.2.3 Rocas intrusivas.....	44
3.2.4 Estructuras.....	46
3.2.5 Alteración.....	50
3.2.5.1 Alteración propilítica.....	51
3.2.5.2 Alteración cuarzo-sericita (Q-S).....	51
3.2.5.3 Alteración Argílica.....	51
3.2.6 Mineralización	53
3.2.6.1 Zona estéril.....	53
3.2.6.2 Zona lixiviada.....	54
3.2.6.3 Zona de óxidos.....	54
3.2.6.4 Zona mixta.....	54
3.2.6.5 Zona de sulfuros secundarios.....	54
3.2.6.6 Zona primaria pirítica.....	55
3.2.6.7 Zona pirítica.....	55

3.3 Unidades geológicas geotécnicas (UGT) del yacimiento.....	56
3.3.1 Unidad Geológica Geotécnica Rocas Lixiviadas (RLX).....	58
3.3.2 Unidad Geológica Geotécnica Rocas con Alteración Argílica Intensa (ARGI)	58
3.3.3 Unidad Geológica Geotécnica Rocas con Alteración Argílica Moderada (ARGM).....	59
3.3.4 Unidad Geológica Geotécnica Andesita Cuarzo Sericítica (ANQS).....	59
3.3.5 Unidad Geológica Geotécnica Andesita Propilítica Potásica (ANPK).....	60
3.3.6 Unidad Geológica Geotécnica Sedimentaria Cuarzo Sericítica (USQS).....	60
3.3.7 Unidad Geológica Geotécnica Sedimentaria Propilítica Potásica (USPK).....	61
3.3.8 Unidad Geológica Geotécnica Rocas Ácidas Cuarzo Sericita (RAQS).....	62
3.3.9 Unidad Geológica Geotécnica Rocas Ácidas Propilítica Potásica (RAPK).....	63
3.3.10 Unidad Geológica Geotécnica Tobas Rojas Propilítica Potásica/ Fresca (RAPK+).....	63
3.3.11 Unidad Geológica Geotécnica Pórfido Cuarzo Sericítico (PQS).....	64
3.3.12 Unidad Geológica Geotécnica Pórfido Propilítico Potásico (PPK).....	64
3.3.13 Unidad Geológica Geotécnica Gravas (GRV).....	66
Capítulo 4. METODOLOGÍA.....	66
4.1 Etapa de gabinete 1.....	66
4.1.1 Recopilación bibliográfica.....	66
4.1.2 Verificación y validación de la base de datos histórica de sondajes y datos estructurales.....	67
4.2 Trabajo en terreno.....	70
4.2.1 Reconocimiento de sondajes.....	70
4.3 Trabajo de Gabinete.....	73
4.3.1 Selección de secciones representativas.....	73
4.3.2 Confección de secciones.....	75
4.3.3 Análisis estadístico de datos de variables geotécnicas de interés.....	75
Capítulo 5. RESULTADOS	78
5.1 Secciones representativas.....	78
5.1.1 Sección 28NW	80
5.1.2 Sección 20NW.....	81

5.1.3 Sección 17NW	82
5.2 Gráficos de deriva espacial en secciones representativas	83
5.2.1 Sección 28NW.....	83
5.2.1.1 Unidades geológicas geotécnicas respecto a la variable GSI.....	83
5.2.1.2 Unidades geológicas geotécnicas respecto a la variable FF.....	88
5.2.1.3 Unidades geológicas geotécnicas respecto a la variable RQD.....	93
5.2.1.4 Unidades geológicas geotécnicas respecto a la variable Joint condition (JC).....	98
5.2.2 Sección 20NW y 17NW.....	103
Capítulo 6. DISCUSIÓN.....	105
Capítulo 7. CONCLUSIÓN.....	111
Capítulo 8. REFERENCIAS.....	113
Capítulo 9. ANEXOS.....	121

Índice de Figuras

Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos del área de estudio. Extraído de Muñoz (2009).....	5
Figura 2.1: Esquema de asociaciones mineralógicas de alteraciones hidrotermales relacionadas a la formación depósitos minerales epitermales, geotermales y porfídicos, según el pH y variación de temperatura. Extraído de Corbett y Leach (1998).....	10
Figura 2.2. Evolución de la formación de un depósito tipo pórfido de Cu. Extraído de Sillitoe (2010).....	12
Figura 2.3: Alteraciones hidrotermales características de modelo de pórfidos cupríferos. Tomado de Sillitoe (2010).....	13
Figura 2.4: Sección esquemática de depósitos de alta sulfidización, mostrando sus conjuntos de alteración hidrotermal y mineralización característica, como también zonas de menas. Note que la intrusión porfídica, la alteración potásica y mineralización de calcopirita, son inferidos a profundidades mayor o igual a 2 km en depósito epitermal de alta sulfidización. Extraído de Dilles (2020).....	16
Figura 2.5: Diagrama de correlación entre temperatura y fugacidad de azufre para los estados de sulfuración de los fluidos hidrotermales en el ámbito de depósito metalíferos en pórfidos y epitermales, según los campos de estabilidad de minerales claves. Las líneas punteadas indican áreas de estabilidad de los sulfuros ricos en As y fases minerales ricos en plata. Extraído de Camprubí y Albison (2006).....	17
Figura 2.6: Tipos de controles dominantes que condicionan la forma o estilo de mineralización presentes en el depósito, correspondiente a litológico, estructural e hidrotermal. Extraído de Sillitoe (1993).....	18
Figura 2.7: Esquema que ilustra la definición de un macizo rocoso y roca intacta. Notar que la escala a utilizar tiene gran influencia con respecto al concepto. Extraído de Egaña (2008).....	20
Figura 2.8: Principales características de las discontinuidades. Extraído de Egaña (2008).....	22

Figura 2.9: Esquema representativo de 3 sets o familias de estructuras en un afloramiento de roca, con sus respectivos espaciamentos reales (s) y aparentes (d). Tomado de Espinoza (2018).....	23
Figura 2.10: Ejemplo para cálculo de RQD en un largo total de sondaje de 200 cm. Extraído de Egaña (2008).....	25
Figura 2.11: Estimación del índice de resistencia geológica (GSI) a partir de los parámetros de condición de discontinuidades y blocosidad. Tomada de Espinoza (2018).....	28
Figura 3.1: Mapa geológico del distrito Collahuasi, con sus tres principales bloques tectónicos; Occidental, central y oriental, limitados por las fallas de escala regional Oeste y El Loa. Tomado de Vergara y Thomas (1984).....	30
Figura 3.2: Mapa geológico del distrito Collahuasi, con los depósitos porfídicos de Cobre Quebrada Blanca, Rosario y Ujina, ilustrando extensión de mineralización de cobre en contornos de líneas negras discontinuas y su sistema de vetas representativas en líneas continuas delgadas. Extraído de Baker (2020).....	31
Figura 3.3: Mapa geológico simplificado del distrito Collahuasi, destacando los yacimientos porfídicos Quebrada Blanca, Ujina y Rosario. Están ilustradas las unidades geológicas principales. Tomado de Masterman (2003).....	38
Figura 3.4: Columna estratigráfica regional del distrito Collahuasi (sector izquierdo). Münchmeyer y otros (1984), subdividieron la Formación Collahuasi en tres sub unidades basado en sus características de facies sedimentarias y volcánicas. Extraído de Masterman (2003) y Quiroga (2019).....	39
Figura 3.5: Esquema estructural regional del distrito Collahuasi, donde resaltan los sistemas estructurales conjugados NW-SE, denominados informalmente “Sistema Collahuasi” y las fallas regionales Oeste y El Loa. Tomado de Sanhueza y otros (2006).....	41
Figura 3.6: Mapa litológico en vista de planta del rajo Rosario. En Rosario Oeste se observan las tres unidades informales definidas, Unidad de Tobas, Sedimentaria y Andesítica. Extraído de Garay (2021).....	45

Figura 3.7: Perfil litológico del rajo Rosario, delimitando en línea negra el pit actual. El ambiente de Rosario Oeste presenta las Unidades de Tobas, Andesitas y Sedimentarias. Extraído de Garay (2021).....	46
Figura 3.8: Muestra un esquema estructural del proceso de deformación- reactivación ocurrido en el sector. A) La ilustración muestra la condición de esfuerzos para el periodo Oligoceno Temprano. B) Representa la reactivación de la Orientación NW y comportamiento dextral. Extraído de Masterman y otros (2005).....	47
Figura 3.9: Vista en planta de las principales estructuras presentes en Rosario y Rosario Oeste. Se observan las orientaciones NW-SE características de las estructuras mayores Rosario, Pique y Última, en el yacimiento Rosario. Extraído de Pérez (2023).....	49
Figura 3.10: Trazas de estructuras principales en Rosario Oeste en vista de planta. Extraído de (Sobarzo, 2010).....	50
Figura 3.11: Mapa de alteración en rajo Rosario, vista de planta, con zonificación de ambientes, delimitado por línea blanca segmentada. Rosario Oeste presenta predominio de alteración propilítica y argílica, y menor magnitud Cuarzo sericita. Extraído de Gonzales (2019).....	52
Figura 3.12: Sección representativa de unidades de alteración del rajo Rosario, con líneas discontinuas negras, que delimitan los ambientes. Rosario Oeste ilustra las alteraciones propilítica y argílica, variando esta última en intensidades. Extraído de Gonzales (2019).....	53
Figura 3.13: Mapa de zonas minerales del rajo Rosario, en vista de planta. Rosario Oeste presenta zonas de mineralización estéril, lixiviadas, oxidadas, mixtas, sulfuros secundarios, primarios piríticos y piríticos. Extraído de Garay (2021).....	55
Figura 3.14: Sección representativa de unidades de mineralización del rajo Rosario, con líneas continuas indicando el pit actual. En el sector SW se observan las zonas minerales asociadas al yacimiento Rosario Oeste. Extraído de Garay (2021).....	56
Figura 3.15: Unidades geológicas geotécnicas en mina Rosario. Representación de unidades en vista de planta, considerando la extensión topográfica del modelo. Línea negra corresponde a límite geotécnico. Fuente elaboración propia.....	57
Figura 3.16: Distribución espacial de unidades geológicas geotécnicas presentes en Rosario. (1) Rocas Lixiviadas, (2) Rocas con Alteración Argílica Intensa, (3) Rocas con	

Alteración Argílica Moderada, (4) Andesita Cuarzo Sericítica, (5) Andesita Propilítica Potásica, (6) Unidad Sedimentaria Cuarzo Sericítica. Línea negra indica límite geotécnico referencial entre ambientes geológicos. Fuente elaboración propia.....	61
Figura 3.17: Distribución espacial de unidades geológicas geotécnicas en Rosario. (7) Unidad Sedimentaria Propilítica Potásica, (8) Rocas Ácidas Cuarzo Sericítica, (9) Rocas Ácidas Propilítica Potásica, (10) Tobas Rojas Propilítica Potásica/ Fresca, (11) Pórfido Cuarzo Sericita, (12) Pórfido Propilítico Potásico. Línea negra indica límite referencial entre ambientes geológicos.....	65
Figura 3.18: Distribución espacial de unidad geológica geotécnica Gravas (GRV). Línea negra indica límite geotécnico referencial entre ambientes geológicos. Fuente elaboración propia.....	66
Figura 4.1: Ilustración de errores asociados a duplicados en la tabla survey. La parte izquierda representa los errores agrupados por sondajes, donde cada uno indica la cantidad de filas problemáticas entre paréntesis. Las dos tablas de la parte derecha muestran el holeid DDH534 con sus respectivas filas duplicadas. Fuente elaboración propia.....	68
Figura 4.2: Advertencias identificadas en tabla survey. La parte izquierda, muestra la señal warnings agrupados por sondajes, correspondiendo a la de tipo “posible duplicado”. Las tablas derechas, representan los sondajes analizados. Notar que las coordenadas espaciales como profundidad son iguales y que los valores tanto de dip como azimut no varían más de 1°. Fuente elaboración propia.....	69
Figura 4.3: Secciones representativas, cortando la topografía de la extensión del modelo, en vista de planta. Fuente elaboración propia.....	74
Figura 4.4: Ilustración espacial de las clases generadas y definidas en la sección 28NW (trayectoria N45°E), con su respectiva distribución estructural. Fuente elaboración propia.....	76
Figura 5.1: Distribución espacial de la variable frecuencia de fracturas (FF) en sección 28NW, modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización (sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras.	80
Figura 5.2: Distribución espacial de la variable frecuencia de fracturas (FF) en sección 20NW, modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización	

(sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras.....	81
Figura 5.3: Distribución espacial de la variable frecuencia de fracturas (FF) en sección 17NW, modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización (sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras.....	82
Figura 5.4: Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio de clases, representando el comportamiento de la variable GSI en el eje z (cotas), por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.....	83
Figura 5.5: Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio entre clases, representando el comportamiento de la variable GSI en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.....	84
Figura 5.6: Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio entre clases, representando el comportamiento de la variable FF en el eje z, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.....	88
Figura 5.7: Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio entre clases, representando el comportamiento de la variable FF en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.....	89
Figura 5.8: Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio entre clases, representando el comportamiento de la variable RQD en el eje z, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales...	93
Figura 5.9: Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio entre clases, representando el comportamiento de la variable RQD en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.....	94
Figura 5.10. Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio entre clases, representando el comportamiento de la variable joint condition (JC) en el eje	

z, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.....98

Figura 5.11. Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio entre clases, representando el comportamiento de la variable joint condition (JC) en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.....99

Figura 6.1: Representación de zonas de fuerte condición estructural en las UGT caracterizadas, con el levantamiento de las proyecciones estructurales y zonas con formas concéntricas que indican FF en la categoría extremadamente fracturados. Sección 28NW (imagen superior), 20NW (central) y 17NW (inferior).....106

Figura 6.2: Modelo de clases, producto de la unión de clases numéricas homólogas entre secciones, indicando con formas concéntricas, las zonas con variable de frecuencias de fracturas asociada a la categoría extremadamente fracturado, afectando gran parte de las unidades geológicas geotécnicas presentes en dichas clases. Línea negra discontinua, señala una trayectoria recomendada para hallar posiblemente un macizo de menor calidad entre áreas de secciones, mediante la intersección de las clases de interés.....109

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Resumen de las características principales de los tipos de depósitos epitermales, asociadas a estilos de mineralización, tipos de alteración, minerales ganga, abundancia de sulfuros, indicador de estados de sulfuración, asignatura típica de metal. Extraído de Sillitoe (2015).....	15
Tabla 2.2: Calificación en base a FF/m. Modificado de Espinoza (2018).....	24
Tabla 2.3: Relación entre RQD y calidad de la roca.....	25
Tabla 2.4: Relación entre calidad de macizo rocoso y rango de valores del GSI.....	27
Tabla 3.1: Caracterización de dominios estructurales de los yacimientos Rosario y Rosario Oeste. Extraído de Oyarzún, 2010.....	47
Tabla 4.1: Código para mapeo geológico de litología.....	71
Tabla 4.2: Ítem relacionado al tipo de alteración.....	72
Tabla 4.3: Ítems de mineralización con su respectiva codificación y mineralización.....	72
Tabla 5.1: Características principales reconocidas en los dominios suroeste y noreste....	79
Tabla 5.2: Sección 28NW, indica promedios de variables geotécnicas GSI, FF y RQD, en sus respectivas trayectorias, con sus correspondientes clases de UGT. Celda roja, señala promedios de valores asociados a macizos rocoso de menor calidad. Celda gris, ilustra promedios no representativos. Valores entre paréntesis corresponden a promedios de dominios y UGT.....	104

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1.Generalidades

El distrito minero Collahuasi se ubica en la comuna de Pica, región de Tarapacá, y forma parte de los grandes depósitos cupríferos asociados al sistema de fallas de Domeyko, que forma una franja de orientación N-S emplazada durante el periodo Eoceno – Oligoceno. El distrito se encuentra en el extremo norte de la franja metalogénica e incluye a los depósitos Rosario, Ujina y Quebrada Blanca.

El rajo Rosario está dividido en dos dominios geológicos diferentes y coexistentes, hacia el NE se reconoce un ambiente asociado al pórfido cuprífero, mientras que al SW se reconoce un ambiente epitermal sobreimpuesto al estilo de mineralización del pórfido. La investigación se centra con mayor énfasis en el yacimiento Rosario Oeste, cuya fracción de área de estudio contempla la parte SW del rajo Rosario, que está asociado a un sistema de vetas epitermales de alta sulfidización, a diferencia de Rosario que corresponde a un depósito tipo pórfido cuprífero.

La coexistencia de dos ambientes geológicos en el rajo, cuya expansión se está produciendo hacia el sur, implica variabilidades en el ambiente geológico y estructural, lo que conlleva a variaciones en sus parámetros geotécnicos. Por lo tanto, existe una necesidad de realizar una caracterización geológica-geotécnica que contribuya al entendimiento de las variabilidades en el área de estudio, como también, un análisis que permita identificar el comportamiento espacial de poblaciones de valores asociadas a las variables geotécnicas de interés presentes en cada unidad geológica geotécnica definida. Una mejor comprensión podría permitir identificar condiciones geológicas que puedan representar un potencial de inestabilidad en Rosario Oeste, que no habían sido consideradas previamente. Esto contribuirá a la prevención de posibilidades de ocurrencia de eventos negativos que impacte a las personas, equipos, medio ambiente o el negocio minero. Además, permitirá definir sectores estratégicos, orientaciones y secuencias más favorables para el minado en el yacimiento. La realización de este trabajo consideró el uso de

información geológico-geotécnica proveniente del mapeo de sondajes geológicos – geotécnicos, que contempló 29.525 m de sondajes.

1.2. Planteamiento del problema

El yacimiento Rosario de compañía minera Doña Inés de Collahuasi es parte de un clúster de pórfidos de Cu-Mo de la franja metalogénica del Eoceno-Oligoceno. Rosario presenta un amplio desarrollo de alteración hidrotermal asociada al ambiente porfídico; hacia el suroeste se reconoce la sobreimposición de un evento tipo epitermal de alta sulfidización, lo que genera una alta variabilidad en el ambiente geológico, que se ve reflejado en las propiedades geológicas-geotécnicas del macizo rocoso, considerando además, que la expansión del rajo se está produciendo hacia el suroeste, es decir, Rosario Oeste, que desde el punto de vista de la producción esta geología es diferente, por tal motivo, existe una necesidad de realizar una caracterización e interpretación geológica-geotécnica que contribuirá al entendimiento del comportamiento de las variabilidades del ambiente geológico, incluyendo un análisis del comportamiento espacial de las poblaciones de valores asociadas a las variables geotécnicas presentes en cada unidad geológica geotécnica definida, identificando aquellas medias de poblaciones que marcan mayores cambios de tendencias, relacionados al reconocimiento de zonas de menor calidad de macizo rocoso, es decir, para poder identificar zonas de alto grado de fracturamiento y menor calidad de macizo rocoso que podrían generar complicaciones en la etapa de producción.

1.3. Hipótesis

El reconocimiento geológico de un ambiente hidrotermal porfídico, que hacia el sur se sobreimpone un ambiente con rasgos o manifestaciones de tipo epitermal de alta sulfidización, sumado a los fuertes patrones estructurales que presenta el yacimiento, son los principales responsables de generar una alta variabilidad en la resistencia y calidad del macizo rocoso. Por ende, se espera que las variables de estudio presenten medias más bajas de GSI, joint condition y RQD en las poblaciones asociadas al dominio SW con

respecto al NE para cada unidad geológica geotécnica; caso contrario para la variable frecuencia de fracturas, en el cual se espera un aumento con respecto a los promedios de poblaciones de valores, debido al reconocimiento de un profuso fracturamiento secundario en dicho ambiente, por consiguiente, se presume un mayor grado de fracturamiento y menor calidad de macizo rocoso en las unidades geológicas geotécnicas asociadas al ambiente con características de tipo epitermal de alta sulfidización. Además, el estudio permitirá tener una mayor predictibilidad de sectores con potencial de alto grado de fracturamiento y menor calidad de macizo rocoso durante la producción.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Determinar un modelo geotécnico preliminar que permita identificar y predecir zonas con condiciones geológicas-geotécnicas asociados a alto grado de fracturamiento y menor calidad de macizo rocoso, en un ambiente geológico de alta variabilidad.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Establecer una relación cualitativa zonal entre los sectores de variables geotécnicas frecuencia de fracturas (FF), joint condition (JC), rock quality designation (RQD) y GSI, asociados a alto grado de fracturamiento o menor calidad de macizo rocoso, con respecto a las unidades litológicas, de alteración, zona mineral y estructural.
- Determinar el comportamiento espacial y estadístico de las poblaciones de valores de frecuencia de fracturas (FF), joint condition (JC), RQD y GSI, en cada unidad geológica geotécnica asociada a las secciones representativas.
- Definir zonas con condiciones geológicas, geotécnicas y estructurales con potencial de generar condiciones de alto grado de fracturamiento y menor calidad de macizo rocoso, tanto en las secciones representativas de estudio, como entre sí.

1.5 Área de estudio

El distrito Collahuasi se ubica en la comuna de Pica, provincia de Iquique, región de Tarapacá, Chile, entre las coordenadas UTM 19K 7682065S – 7679297S y 529335 – 531875E, abarcando un área de 1200 km². Geográficamente, se localiza en el flanco oriental de la cordillera Domeyko, a elevaciones que varían entre los 4200 y 4900 ms.n.m., cercano al límite de la frontera entre Chile y Bolivia (Figura 1.1). El área de estudio se enfoca en el yacimiento Rosario Oeste, ubicado entre las coordenadas 7.681.250N – 7.680.250N y 530.000E – 531.250E.

El acceso a las instalaciones desde la ciudad de Iquique se realiza incorporándose a la autopista Humberstone (ruta 16) en dirección este. Luego de 50 km aproximadamente, se debe ingresar a la Panamericana norte (ruta 5 norte) en dirección sur. Después de 3 km, se debe girar a la izquierda con dirección a la ruta A-687 hasta encontrarse con una rotonda, donde se debe tomar la salida en dirección a la ruta A-65. Mantenerse a la derecha en esta ruta para después continuar por la ruta A-651. Finalmente, esta ruta continúa con el nombre de A-687, la cual conectará con las instalaciones.

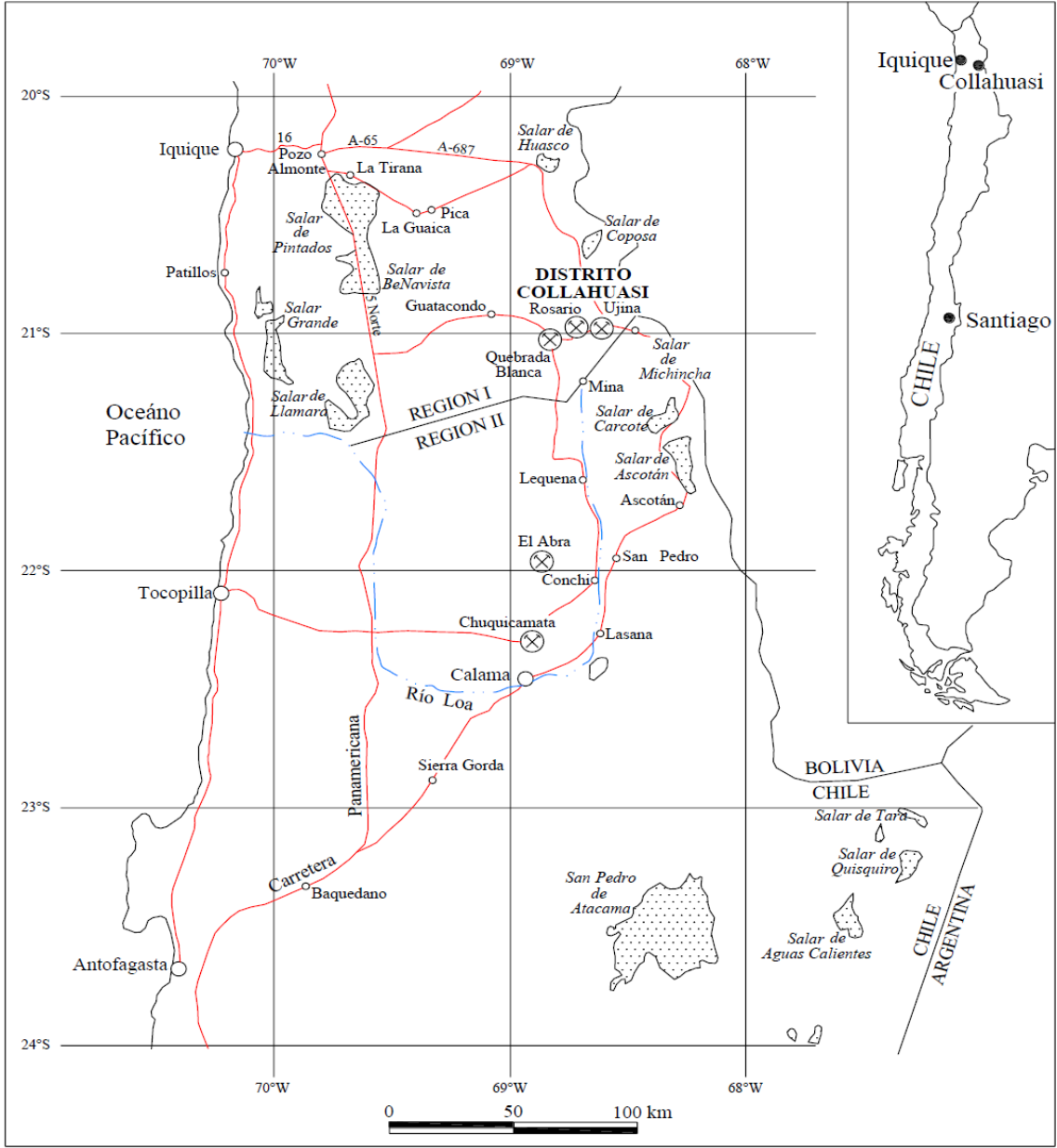


Figura 1.1. Mapa de ubicación y accesos del área de estudio. Extraído de Muñoz (2009).

1.5. Estudios previos

Vergara (1978), efectuó el levantamiento geológico del cuadrángulo Ujina escala 1:50.000, de la Carta Geológica de Chile. Se realizó una descripción de 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.

Clark y otros (1998), realizaron datación de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en minerales hidrotermales de eventos de alteración tempranos y tardíos, perteneciente al depósito porfídico de cobre Rosario, mediante análisis de microsonda electrónica. El estudio proporcionó una base para el desarrollo de nuevos enfoques analíticos para la datación de mineralización en pórfidos cupríferos.

Masterman y otros (2004), presentaron nuevos datos geocronológicos obtenidos mediante dataciones analíticas de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y Re-Os de los depósitos Rosario y Ujina. Los datos les permitieron restringir la edad de la actividad hidrotermal en comparación a aquellos obtenidos de estudios previos. Este trabajo condujo el primer estudio geocronológico detallado en Rosario y evaluó una relación temporal entre vetas epitermales tardías de alta sulfidización y mineralización porfídica.

Oyarzún (2010), elaboró una caracterización del sistema estructural que controla la mineralización en el yacimiento Rosario Oeste, definiendo dominios estructurales que den cuenta de las principales variaciones geológicas y de mineralización. Además, describe la relación estructural entre Rosario Oeste y Rosario. Determinó relaciones compatibles entre las 3 familias principales de fallas y el sistema de Riedel teórico. Reconoció bloques pertenecientes al ambiente epitermal de alta sulfidización somero y profundo, asociados a dominios estructurales definidos.

Sobarzo (2010), realizó una caracterización de la geología y distribución del Au-Ag en Rosario Oeste, examinando anomalías geoquímicas estudio sus relaciones, definiendo el modo de ocurrencia, junto a los mecanismos de control. Determinó que la zona definida

como “La Grande” presenta mayores concentraciones de metales preciosos y que representa la porción más somera de una columna epitermal.

Ávalos (2018), efectuó un estudio y análisis de inclusiones fluidas en torno al pórfido Rosario, caracterizando eventos de ebullición y separación de fases. Con la respectiva información, se generó un modelo que permitió visualizar a través de secciones la distribución espacial de las inclusiones. Determinó que existen al menos dos pulsos mineralizadores.

Quiroga (2019), estudió el sistema de vetillas hidrotermales desarrolladas en el yacimiento Rosario, caracterizándolas para posteriormente elaborar el modelamiento geológico del sistema ligado al ambiente porfídico, determinando su geometría, distribución, definiendo características composicionales, cronología relativa y relaciones genéticas con las principales menas.

Vivanco (2020), definió nueve estilos de mineralización para la molibdenita. A partir de agrupación de parámetros geológicos y geoquímicos, tales como, litología, alteración, zona mineral, estructuras, ocurrencia de molibdenita, porcentajes de Cu, Au, Mo y Ag, definió y modeló unidades geológicas de molibdeno en Rosario.

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Alteración hidrotermal

La alteración hidrotermal es el resultado de la transformación de la mineralogía original de la roca en una nueva asociación de minerales secundarios, más estables bajo las condiciones hidrotermales de temperatura, presión y sobre todo de composición de fluidos (Berrios, 2020). Se debe a la interacción de la roca de caja con fluidos de diversos orígenes tales como meteórico, magmático o metamórfico, que están a mayor temperatura que el gradiente geotermal regional, y cuyo proceso altera químicamente los constituyentes minerales de las rocas encajantes, que por su tendencia a reequilibrarse en las nuevas condiciones forman conjuntos de nuevos minerales (García, 2021). Según Camus (2003) la distribución de la alteración está en función de los controles estructurales, litología, evolución magmática, permeabilidad, disponibilidad y distribución espacial de los fluidos ricos en metales, volátiles, sean estos oxidados o reducidos.

Las alteraciones hidrotermales se pueden clasificar respecto a las asociaciones de minerales de alteración presentes en las rocas, debido a que una asociación de minerales de alteración refleja las condiciones de temperatura, presión, composición química del fluido hidrotermal, mineralogía de la roca original y el tiempo requerido para lograr un equilibrio termodinámico entre la roca y el fluido (Corbett y Leach, 1998). Algunas de estas alteraciones mencionadas por el autor corresponden a (Figura 2.1):

Alteración argílica avanzada: este tipo de alteración representa un ataque hidrolítico extremo de las rocas, que incluso rompe los enlaces del aluminio en los silicatos originando sulfato y óxido de aluminio. En casos extremos la roca puede ser transformada en una masa de sílice oquerosa residual, cuya denominación general es “vuggy sílica”. En particular, son recurrentes las asociaciones de minerales de los grupos de la alunita y caolinita, como también, cuarzo residual.

Alteración argílica (intermedia): está constituida de altas cantidades de caolinita, montmorillonita o esmectita, que aparecen reemplazando principalmente a las

plagioclasas, pudiendo haber presencia de sericita junto a las arcillas. Representa un grado más alto de hidrólisis y mayor temperatura respecto a la propilítica.

Alteración propilítica: se caracteriza por la presencia de epidota y clorita, que comúnmente se presenta en este tipo de alteración minerales como albita, calcita y pirita. Representa un grado bajo de hidrólisis de los minerales de las rocas, por lo que su posición en zonas de alteración es comúnmente de carácter marginal. Incluye fases minerales formadas en condiciones de pH neutro a alcalino y temperaturas relativamente bajas que pueden ser menores a 200°C y en determinados casos alcanzar hasta los 280°C a 300°C.

Alteración fílica: también denominada cuarzo-sericita, contempla fases minerales formadas en condiciones de pH similares a la alteración argílica, es decir, medianamente ácidas, pero con temperaturas más altas. Ocurre cuando los feldespatos (plagioclasas y feldespato potásico) son transformados a sericita.

Alteración potásica: corresponde a la alteración de las plagioclasas y minerales máficos a feldespato potásico y/o biotita secundaria. Representa un intercambio catiónico con la adición de K a la roca. Este tipo de alteración ocurre en condiciones de pH neutro o alcalino a altas temperaturas (principalmente en el rango 350° a 550°C). Se presenta en zonas alteradas ligadas al emplazamiento de cuerpos intrusivos.

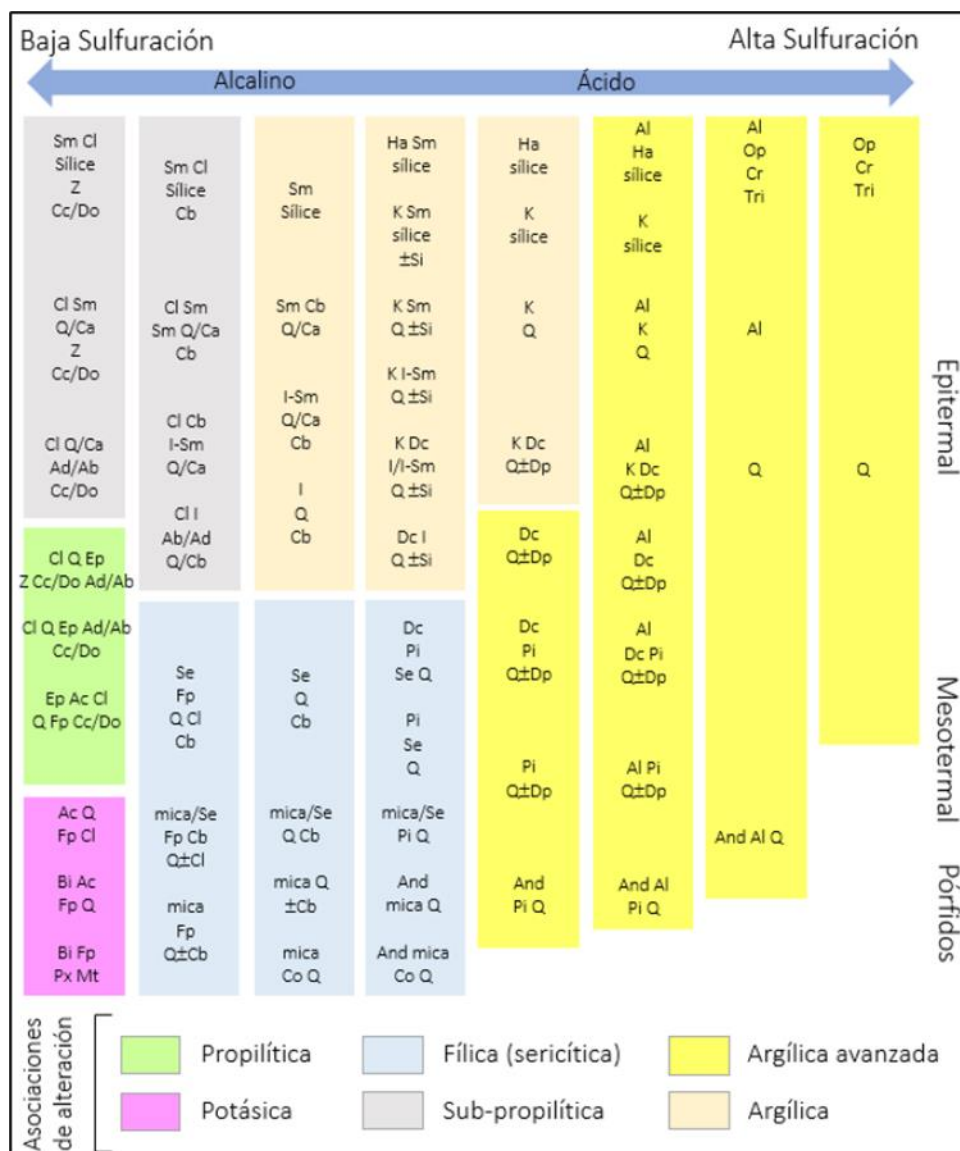


Figura 2.1: Esquema de asociaciones mineralógicas de alteraciones hidrotermales relacionadas a la formación depósitos minerales epitermales, mesotermale y porfídicos, según el pH y variación de temperatura. Abreviaciones: Ab=albita, Ac=actinolita, Ad=adularia, Al=alunita, And=andalucita, Bi=biotita, Ca=calcedonia, Cb=Carbonatos (de Ca, Mg, Mn y/o Fe), Cc=calcita, Cl=clorita, Co=corindón, Cr=cristobalita, Dc=dickita, Di=diáspora, Do=dolomita, Ep=epidota, Fp=feldespatos potásicos, Ha=halloysita, I=illita o illita-esmectita, K=caolinita, Mt=magnetita, Op=ópalo o sílice opalina, Pi=pirofilita, Px=clinopiroxenos, Q=cuarzo, Se=sericita, Si=siderita, Sm=esmectita o esmectita-illita, Tri=tridimita, Z=zeolitas (de menor a mayor temperatura: natrolita, chabizita, mordenita, heulandita, laumontita, wairakita). Extraído de Corbett y Leach, 1998; Camprubí et al., 2003; Hermosillo, 2017.

2.2 Pórfidos cupríferos

2.2.1 Características generales, configuración tectónica, génesis y evolución.

Estos sistemas son definidos como grandes volúmenes (10 a $> 100 \text{ Km}^3$) de rocas alteradas hidrotermalmente y mineralizadas con sulfuros primarios de cobre y hierro, centrados en stocks o enjambres de diques porfídicos intermedios a félsicos (Sillitoe, 2010). Estos depósitos magmático-hidrotermales deben su nombre a la textura porfírica de diques e intrusiones, comúnmente asociados espacial y genéticamente a la mineralización del depósito (Seedorff y otros, 2005). Según John (2010), se forman entre 1 a 6 km de profundidad, evidenciando procesos de tectonismo, erosión y enterramiento. Genéticamente están vinculados con el emplazamiento y cristalización de magmas hidratados de composición intermedias (granodiorítica), a lo largo de márgenes de placa convergentes, en zonas de subducción activa (Richards, 2003). La mineralización suele ocurrir de manera diseminada, en vetillas, stockwork, en rocas alteradas hidrotermalmente (Lowell y Guilbert, 1970; Seedorff y otros, 2005). Los depósitos en secciones verticales muestran una forma tabular o de embudo, cuya mineralización tiende a mostrar patrones diferenciales, con respecto a la ley de cobre (Sillitoe, 2010).

En etapas tempranas de la formación de depósitos pórfidos cupríferos, el contenido de H_2O incrementa en la masa fundida a medida que cristalizan las fases anhidras, provocando que el fundido se sature y una fase acuosa monofásica (flechas rojas, Figura 2.2) de alta temperatura se exsuelva (Sillitoe, 2010). Posteriormente, la descompresión y el enfriamiento del fluido monofásico, generan su separación, resultando en la producción de una fase líquida de alta salinidad (salmuera), en equilibrio con una fase de vapor de baja densidad, siendo catalogados como fluidos bifásicos (Figura 2.2.), correspondiendo al principal responsable de la mineralización en la zona potásica, en parte debido a la rápida disminución en la solubilidad de metales (por descompresión) transportados por la fase de vapor del fluido bifásico (Williams-Jones y otros, 2002). A medida que el fluido bifásico asciende, ocurre una separación de la fase de vapor con respecto a la fase líquida hipersalina dada su baja densidad (flecha amarilla oscura), hasta llegar a la superficie (Hedenquist y otros, 1998). Cabe destacar que la condensación del SO_2 y HCl , es

responsable en parte de la formación de lithocaps argílicos. Además, el agua meteórica (principalmente) calentada desarrolla la zona propilítica, por reacciones de hidratación a temperaturas moderadas (Meyer y Henley, 1967).

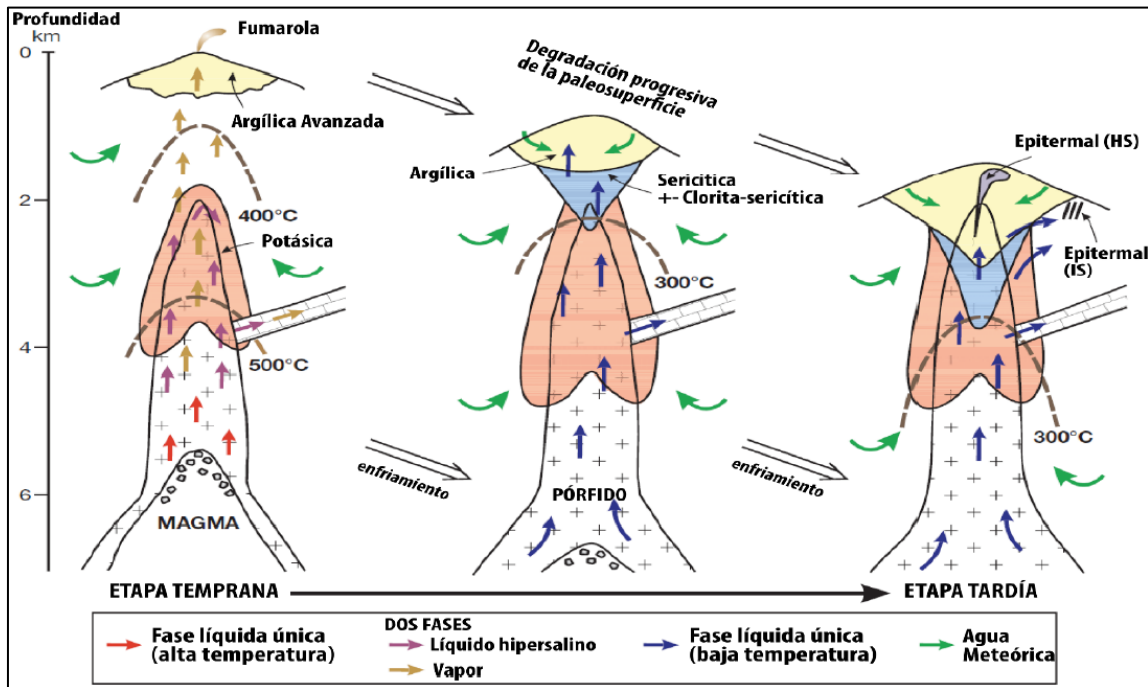


Figura 2.2. Evolución de la formación de un depósito tipo pórfido de Cu. Extraído de Sillitoe (2010).

A medida que la cristalización del magma avanza en la evolución, todo el sistema se enfría progresivamente, como también, la paleosuperficie se va erosionando. Bajo condiciones de menor temperatura (250-350°C) no se produce la separación de la fase monofásica, dando como resultado un fluido monofásico de baja a moderada salinidad (flechas azules), que asciende a través de estructuras preexistentes y conlleva al desarrollo de zonas sericíticas. El fluido puede evolucionar a un estado de sulfuración mayor, que conduce a una mineralización de alta sulfuración (Sillitoe, 2010).

Además, el modelo teórico de los pórfidos de Cu presenta zonaciones de alteraciones hidrotermales a gran escala (Figura 2.3), que considera aquellas mencionadas anteriormente en el capítulo de alteraciones, correspondientes a calco-sódica, potásica, clorítica-sericitica, sericitica, argílica avanzada y propilítica.

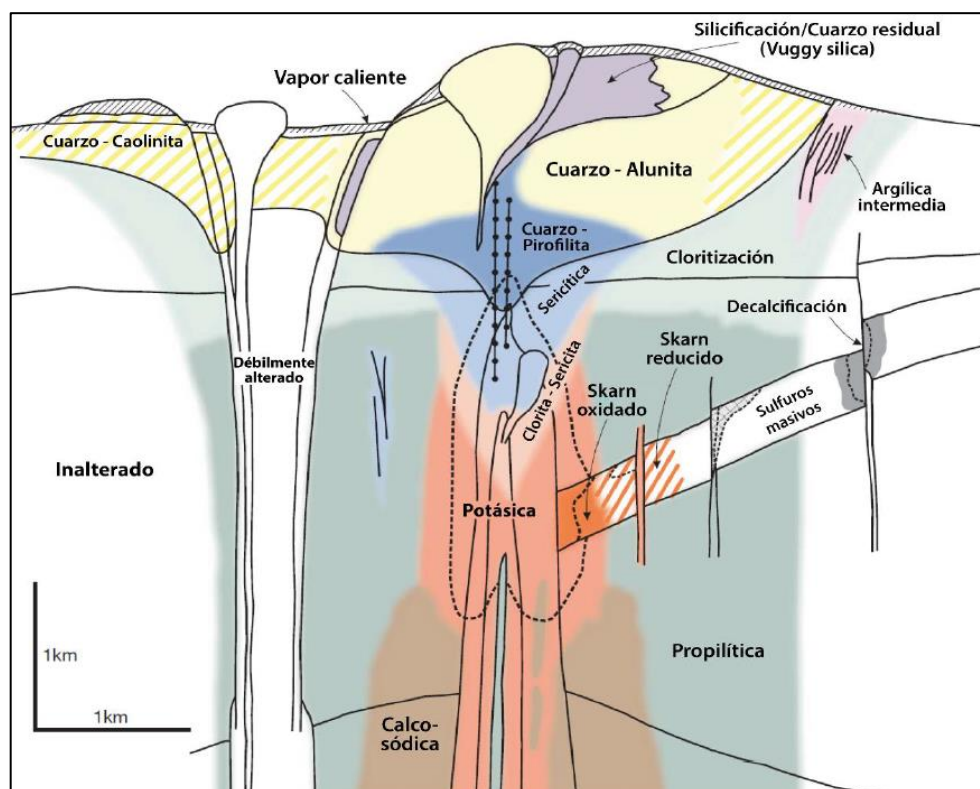


Figura 2.3. Alteraciones hidrotermales características de modelo de pórfidos cupríferos. Tomado de Sillitoe (2010).

Destacar que los pórfidos cupríferos representan la mayor fuente de Cu a nivel mundial, como también, fuentes de molibdeno, oro y plata (Hammarstrong et al., 2019).

2.3 Yacimientos epitermales con énfasis en tipo de alta sulfuración

2.3.1 Concepto y generalidades de los depósitos epitermales

El ambiente epitermal se reconoce a escasa profundidad en referencia a la superficie terrestre y define la parte superior de los sistemas hidrotermales naturales (Camprubí y Albison, 2006). Dilles (2020) considera que las condiciones de formación para la mayoría de los depósitos epitermales comprenden temperaturas que oscilan entre 100°C a 300°C, con profundidades de 1 o 2 km bajo el nivel freático. White y otros. (1995) mencionan que gran parte de los epitermales conocidos están situados alrededor del margen Circum-Pacífico, asociado al termalismo tardío de los sistemas volcánicos operantes en dicho

margen. En la mayoría de los casos, estos depósitos están relacionados de forma espacial y temporal con vulcanismo subaéreo, de carácter ácido a intermedio, y a sus cuerpos subvolcánicos asociados, pudiendo el basamento ser de cualquier tipo (Camprubí y Albison, 2006). Un gran número están asociados a estructuras de origen volcánico, en especial calderas y complejos andesíticos (Steven y otros, 1990). Rowland y Simmons (2012) mencionan que gran parte de los depósitos epitermales están relacionados a sistemas hidrotermales, que se forman en respuesta a la desgasificación del magma en cristalización en profundidad y la mezcla variable de volátiles magmáticos con aguas meteóricas.

Las diferencias en las características químicas de los fluidos mineralizantes responsables de la deposición mineral dentro del ambiente epitermal, es un criterio en base al cual se definen dos estilos contrastados de sistemas hidrotermales ubicados en dicho ambiente (Reyes, 1991). En un extremo se encuentra un conjunto de fluidos profundos reducidos, con un pH cercano a la neutralidad, mientras que, en el lado opuesto están los sistemas volcánicos-hidrotermales en situación proximal a aberturas volcánicas por las que se canaliza la descarga de vapores a la superficie. La principal manifestación en superficie de estos sistemas son fumarolas de alta temperatura, y sus condensados constituidos por aguas extremadamente ácidas. Estos fluidos de carácter ácido y oxidados, se encuentran evidentemente en desequilibrio con las rocas encajonantes (Giggenbach, 1992). El fuerte control estructural que existe sobre la canalización de estos fluidos es un factor determinante en su naturaleza altamente reactiva, y en el hecho que estos sistemas estén dominados por fluidos (Giggenbach, 1992). Estos dos tipos de sistemas presentan características muy distintivas entre ellos, no obstante, ambos pueden coexistir uno al lado del otro (Hedenquist y otros, 2000).

Los depósitos epitermales suelen subdividirse en alta sulfuración (HS), baja sulfuración (LS) e intermedia sulfuración (IS), en función de sus características mineralógicas (Hedenquist et al., 2000; Sillitoe y Hedenquist, 2003). En la tabla 2.1 se ilustra un resumen con las características de los tipos de depósitos epitermales.

Epithermal type	High-sulfidation (HS)	Intermediate-sulfidation (IS)	Low-sulfidation (LS)
Main mineralization styles	Steep and shallowly inclined replacement bodies, hydrothermal breccias	Veins, stockworks	Veins, stockworks, disseminated bodies
Main proximal alteration types	Silicification, vuggy residual quartz, quartz-alunite	Silicification, quartz-sericite/illite	Silicification, quartz-adularia-illite
Main gangue minerals	Quartz, alunite, barite	Quartz, calcite, manganese carbonates, rhodonite, adularia	Quartz, chalcedony, adularia
Sulfide abundance	High (10–80 vol.%)	Moderate (5–30 vol.%)	Low (1–5 vol.%)
Sulfidation-state indicators	Enargite/luzonite/famatinite	Tetrahedrite, chalcopyrite, low-Fe sphalerite	Pyrrhotite, arsenopyrite, high-Fe sphalerite
Typical metal signature	Au-Ag-Cu ± Bi ± Te	Ag-Au-Zn-Pb-Mn ± Cu	Au ± Ag ± Se ± Mo

Tabla 2.1. Resumen de las características principales de los tipos de depósitos epitermales, asociadas a estilos de mineralización, tipos de alteración, minerales ganga, abundancia de sulfuros, indicador de estados de sulfuración, asignatura típica de metal. Extraído de Sillitoe (2015).

2.3.2 Terminología y características de epitermal de alta sulfuración.

En este trabajo nos centramos en el depósito epitermal de alta sulfuración, que está presente en la parte SW del rajo Rosario. En la literatura se distingue entre dos principales tipos de epitermales: ácidos y alcalinos (Sillitoe, 1977). El primer tipo de depósito es el también llamado enargita-oro, alunita-caolinita, ácido-sulfato, o alta sulfuración (high-sulfidation epithermal; Tabla 2.1, Figura 2.4). El término enargita-oro (Ashley, 1982), fue definido en base a los dos minerales metálicos considerados como más característicos de esta tipología. El término ácido-sulfato fue propuesto por Hayba y otros (1985) y Heald y otros (1987), en función de la mineralogía y tipos de alteración presentes en el depósito. Berger y Henley (1989) presentaron el término caolinita-alunite en vez de ácido-sulfato, con el fin de dar mayor relevancia a los minerales de alteración característicos de esta tipología. La denominación alta sulfuración fue propuesta por Hedenquist (1987) en base al estado de oxidación-reducción del azufre en los fluidos de sistemas geotérmicos actuales. Este tipo se origina a partir de fluidos de carácter oxidado y ácido (azufre en estado de oxidación +6 o +4, es decir, “alta sulfuración”, en forma de SO_4^{2-} o SO_2) típica de fuentes termales ácidas próximas a volcanes. Esta terminología se emplea para designar al estado de sulfuración de las asociaciones de sulfuros (Camprubí y Albison, 2006). Bonham (1986,1988) por su parte propuso los términos sulfuro alto y sulfuro bajo, aludiendo la cantidad total de sulfuros en el depósito.

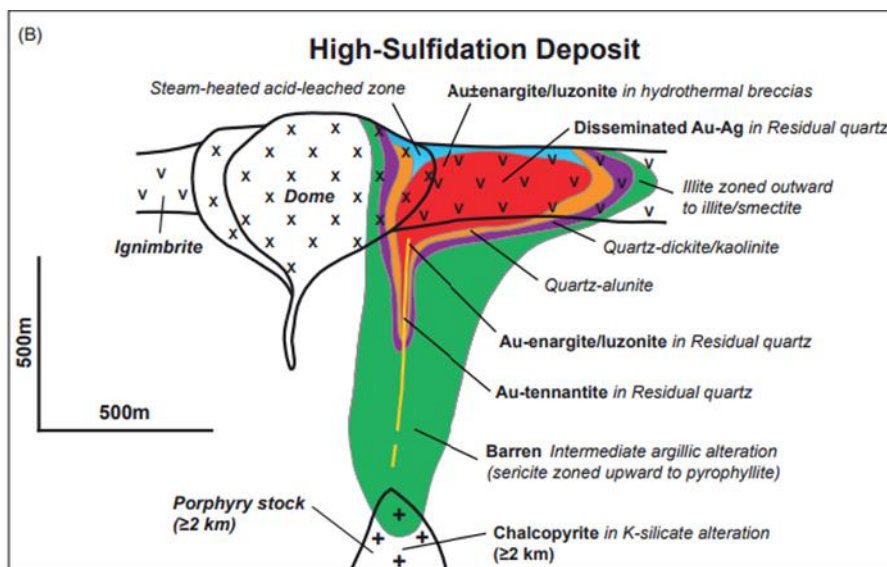


Figura 2.4: Sección esquemática de depósitos de alta sulfidación, mostrando sus conjuntos de alteración hidrotermal y mineralización característica, como también zonas de menas. Note que la intrusión porfídica, la alteración potásica y mineralización de calcopyrita, son inferidos a profundidades mayor o igual a 2 km en depósito epitermal de alta sulfidación. Extraído de Dilles (2020).

El estado de sulfuración corresponde a los valores relativos de potencial químico del S del fluido hidrotermal, representado por las asociaciones de sulfuros en los depósitos. El término “estado de sulfuración” se emplea en el sentido otorgado por Barton (1970), de manera análoga al estado de oxidación, estableciéndose un marco de referencia para el estado de sulfuración en función de la temperatura y la fugacidad de S_2 gas (Einaudi y otros, 2003). Este último autor señala que los límites entre estado de sulfuración muy baja, baja, intermedia, alta y muy alta, vienen determinados por los campos de estabilidad de diversas especies de sulfuros (Figura 2.5). Einaudi (2003) menciona que pueden producirse transiciones entre un estado de sulfuración a otro, cuando ocurre el paso de los depósitos desde pórfidos al de epitermales, e inclusive durante la formación de un solo depósito epitermal, debido a la disminución de temperatura, ebullición, interacción agua-roca, etc.

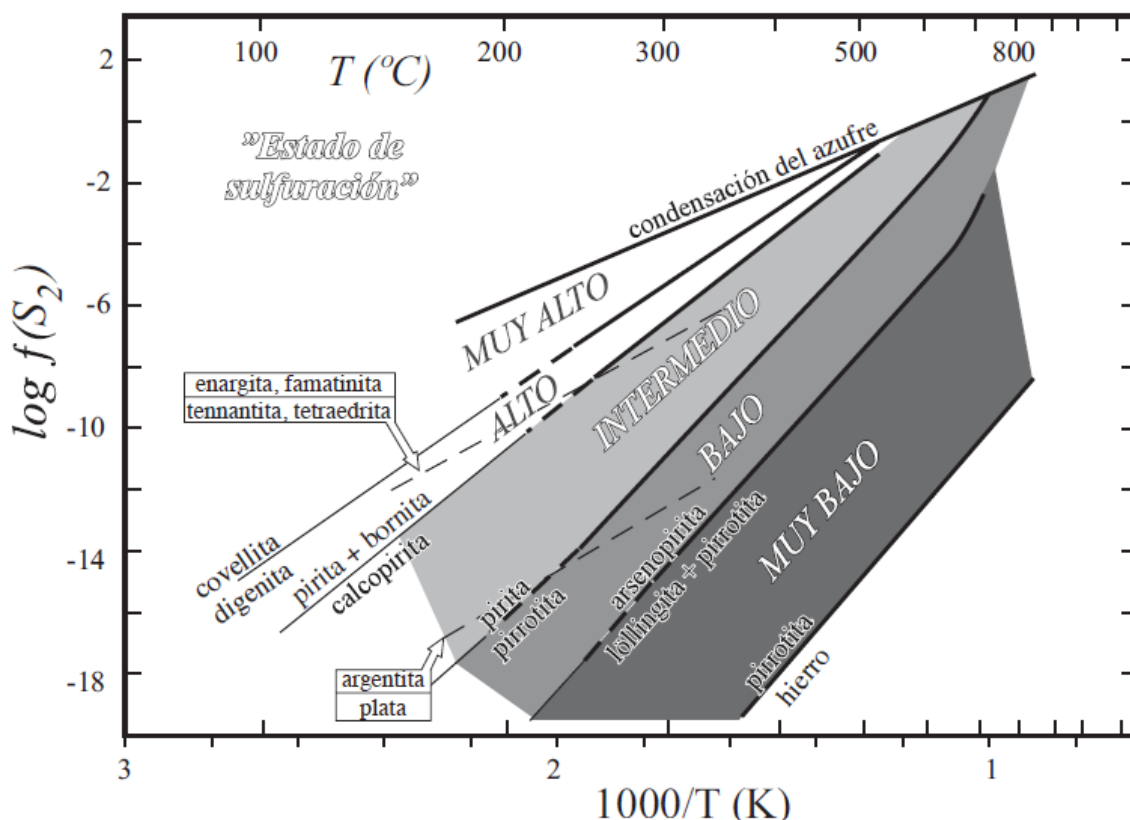


Figura 2.5. Diagrama de correlación entre temperatura y fugacidad de azufre para los estados de sulfuración de los fluidos hidrotermales en el ámbito de depósito metalíferos en pórfidos y epitermales, según los campos de estabilidad de minerales claves. Las líneas punteadas indican áreas de estabilidad de los sulfuros ricos en As y fases minerales ricos en plata. Extraído de Camprubí y Albison (2006).

2.3.3 Controles dominantes, estilo de mineralización y secuencia de vetas.

Los depósitos epitermales presentan una amplia gama de formas, que incluye diseminado de gran tonelaje, vetas, stockwork y brechas, resultados de la variación del control dominante en su formación. Estos controles son descritos como: estructural, litológico e hidrotermal (Sillitoe, 1993; Figura 2.6).

- Estructural: considera vetas masivas o individualizadas relleno de fallas, enjambre de vetas y vetas de bajo ángulo asociadas a fallas anulares.
- Litológico: diseminaciones bajo acuitardos en ignimbritas o rocas sedimentarias clásticas, con reemplazamientos ligados a contrastes de permeabilidad o reactividad en el

caso de rocas huésped calcáreas y disseminaciones en brechas de diatrema. Contempla las unidades de roca con gran permeabilidad primaria.

- Hidrotermal: incluye brechas hidrotermales, brechas freáticas, alteración de sílice porosa residual (vuggy silica), formado por lixiviaciones ácidas y disolución en rocas reactivas (Dilles y otros, 2020).

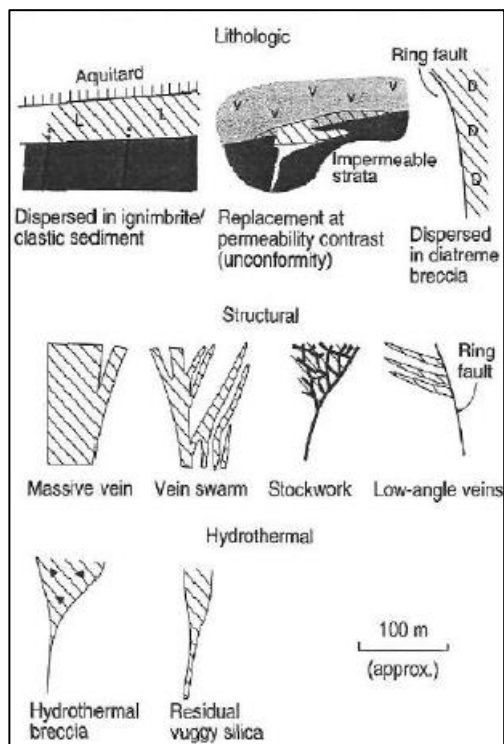


Figura 2.6: Tipos de controles dominantes que condicionan la forma o estilo de mineralización presentes en el depósito, correspondiente a litológico, estructural e hidrotermal. Extraído de Sillitoe (1993).

Las vetas epitermales están dominadas por el control estructural, que influye en el estilo de mineralización. Vetas marcan fallas y otras estructuras abiertas, a través de las cual circulaban fluidos hidrotermales, precipitando sus fases, que comúnmente corresponden a cuarzo u otras de minerales silicatados y carbonatados, representando las mayores zonas de flujo ascendente en sistemas hidrotermales (Rowland y Simmons, 2012).

En depósitos epitermales de alta sulfidización, la alteración temprana ácida es seguida por mineralización de Au-Ag \pm Cu. La alteración ácida es resultado de la condensación de SO₂ y HCl, que da paso a la formación de pH muy bajo <1. La interacción de aquellos fluidos con las rocas adyacentes conduce a una intensa lixiviación ácida, que causa las alteraciones de sílice porosa residual (vuggy silica), cuarzo-alunita y cuarzo-pirofilita o

caolinita/dickita, que son característicos de este tipo de depósitos (Figura 2.4). Fluidos tardíos precipitan oro o electrum o sulfuros de Cu y Cu-As en estado de intermedia a alta sulfuración, en espacios creados por lixiviación ácida e hidrofracturamiento (Jannas y otros, 1990).

Existe un importante control de este tipo de depósitos por parte de fallas de escala regional en zonas de intensa fracturación tensional (Mitchell y Balce, 1990; Nesbitt, 1990; Staude, 1993; Ponce y Glen, 2002; Nieto-Samaniego y otros, 2005). Dichas fallas determinan la localización de los depósitos y actúan como guía para el emplazamiento de la fuente de calor magmática necesaria para la subsiguiente actividad hidrotermal (Hedenquist, 1986; Fournier, 1987), que controla la duración de dicha actividad. Pero, aunque las fallas de orden mayor ejercen un control directo sobre el emplazamiento de la mineralización, se ha observado que esta suele disponerse de forma preferencial en fallas subsidiarias (White y Hedenquist, 1990).

2.4 Propiedades geotécnicas de los macizos rocosos

La ingeniería geotécnica o geotecnia es según Vega (2018) una rama de ingeniería civil relacionada con el estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas y comportamiento desde un punto de vista ingenieril de los materiales de la Tierra, mientras que, la geomecánica estudia las características mecánicas de los materiales geológicos. En ella se sintetizan la mecánica de suelos, de rocas, hidráulica subterránea y parte de la de la sismología, siendo estas últimas ciencias experimentales (Vega, 2018).

El macizo rocoso corresponde al conjunto de matriz rocosa (roca intacta) y discontinuidades; a diferencia de roca intacta o matriz rocosa, que es el material exclusivamente ubicado entre discontinuidades (Egaña, 2008; Figura 2.7). El macizo presenta carácter heterogéneo, comportamiento discontinuo y normalmente anisótropo, consecuencia de la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad (Rodríguez, 2007).

Para lograr un entendimiento de su comportamiento es necesario conocer sus propiedades constituyentes, por medio de parámetros que pueden ser o no requeridos en los sistemas de clasificación (Egaña, 2008).

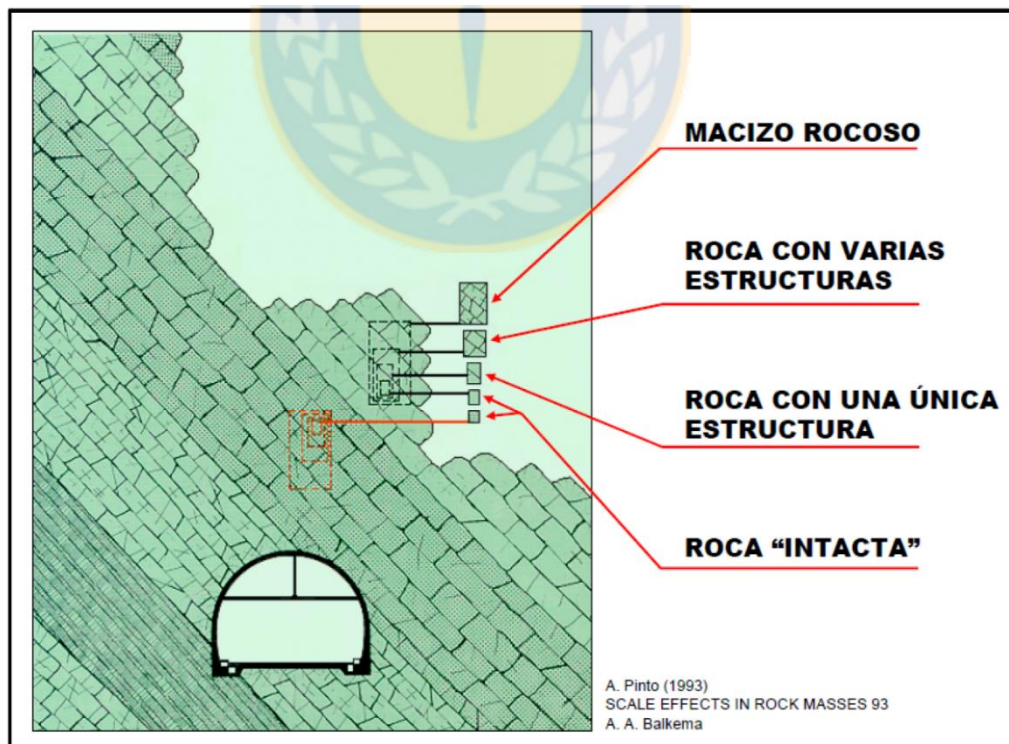


Figura 2.7: Esquema que ilustra la definición de un macizo rocoso y roca intacta. Notar que la escala a utilizar tiene gran influencia con respecto al concepto. Extraído de Egaña (2008).

2.4.1 Parámetros geotécnicos

En la descripción de macizo rocoso se toman datos cualitativos y si es posible cuantitativos, por ende, los métodos de caracterización tienden normalmente a obtener valores numéricos. En este sentido, existen tablas donde se establecen clases (escaladas con valores de referencia y criterios) que permiten cuantificar dichas características y obtener parámetros. Dichos parámetros son necesarios en la clasificación de los macizos (Rodríguez, 2007). A continuación, se describirán algunos parámetros fundamentales para la elaboración del estudio.

2.4.1.1 Condición de discontinuidades (JC)

Las discontinuidades se definen como cualquiera de los planos de origen mecánico o sedimentario que separa los bloques de matriz rocosa de un macizo, con una resistencia a la tracción nula o muy baja (Vega, 2018). Según Montan (2016), corresponde a cualquier rasgo que hace que la estructura de la roca sea discontinua. Asimismo, debido a los procesos geológicos que han afectado al macizo en el tiempo, conlleva generalmente a heterogeneidades y propiedades variables. Dependiendo de las discontinuidades o planos estructurales que presente el cuerpo rocoso, influirá en su comportamiento frente a esfuerzos. Existen varios tipos de discontinuidades que pueden estar o no presentes en la roca, tales como fallas, planos de estratificación y exfoliación, diaclasas y vetillas.

El parámetro condición de discontinuidades considera la persistencia, apertura, rugosidad, relleno y alteración de las paredes de las discontinuidades.

- Persistencia o continuidad: es el largo de la traza de las discontinuidades observadas en un afloramiento. Da cuenta del tamaño de la discontinuidad y puede medirse en la dirección del rumbo o en la dirección del buzamiento (Vega, 2018).
- Rugosidad: es una medida de aspereza de la discontinuidad, y da cuenta de la ondulación (gran escala) y de la rugosidad (pequeña escala). La ondulación afecta la dirección inicial del desplazamiento, mientras que la rugosidad está relacionada con la resistencia al corte (cizalle) de la discontinuidad. Una mayor rugosidad aumenta la resistencia al cizalle de una discontinuidad (Egaña, 2018).
- Apertura: es la distancia perpendicular entre paredes de roca adyacentes de una discontinuidad cuando no existe relleno. El espacio intermedio es ocupado por aire o agua (Montan, 2016).
- Relleno: se refiere al material que está entre las paredes de una discontinuidad, ya sea fragmentos de roca molida o minerales como arcilla, calcita, cuarzo, etc. Es fundamental para comprender la cohesión del macizo rocoso y la resistencia al

cizalle. Las propiedades más relevantes son su mineralización, granulometría, competencia (resistencia al corte), permeabilidad y espesor (Espinoza, 2018).

- Alteración: corresponde al grado de alteración o meteorización que presentan las paredes de las discontinuidades (Araya, 2010).

La ilustración 2.8 muestra algunas de las propiedades señaladas anteriormente, como también, la orientación y el espaciamiento.

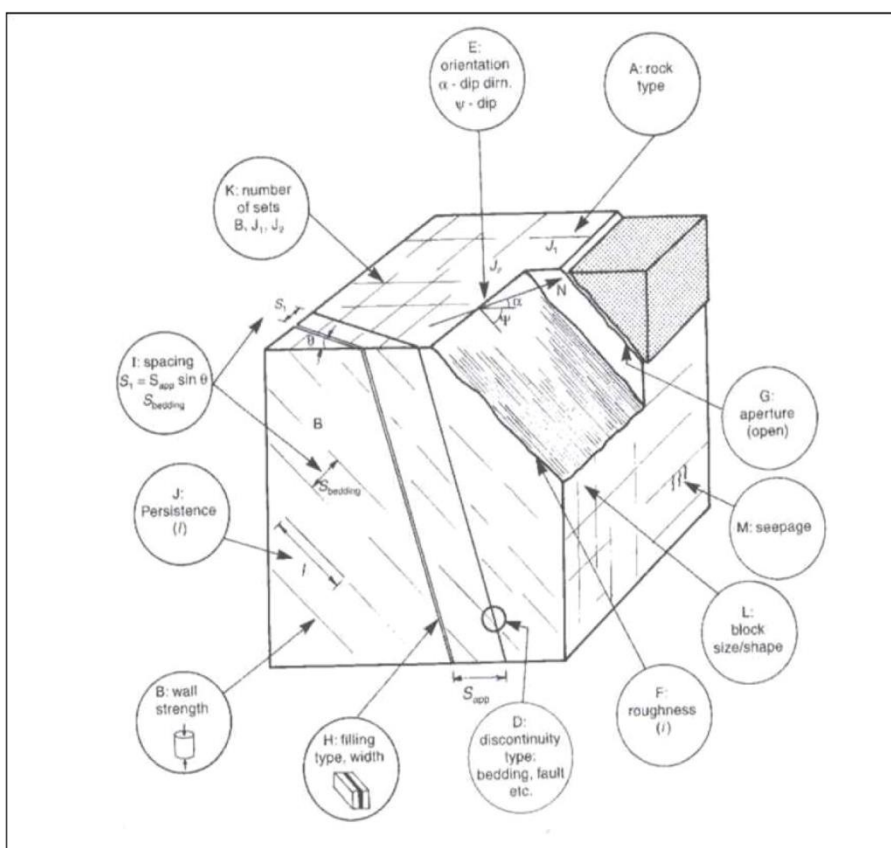


Figura 2.8: Principales características de las discontinuidades. Extraído de Egaña (2008).

- Orientación: es la geometría de la orientación en el espacio y comúnmente es descrita por su buzamiento (dip) y la dirección de buzamiento (dip direction). El primero corresponde al ángulo formado entre la horizontal imaginaria y la línea de máxima pendiente del plano geológico, mientras que el segundo es el ángulo entre la dirección del norte magnético y la proyección horizontal de la línea de máxima pendiente (Egaña, 2008).

2.4.1.2 Espaciamiento de las discontinuidades

Corresponde a la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes. En general, es posible definir un rango de valores para este factor y se suele estimar el valor promedio como el representativo del área de estudio. Si los espaciamentos son pequeños, la resistencia del macizo rocoso disminuye. Es importante destacar que, a menos que la medición se realice en la dirección normal al set considerado se obtendrá un espaciamiento aparente d , mayor que el espaciamiento real S (Espinoza, 2018, Figura 2.9).

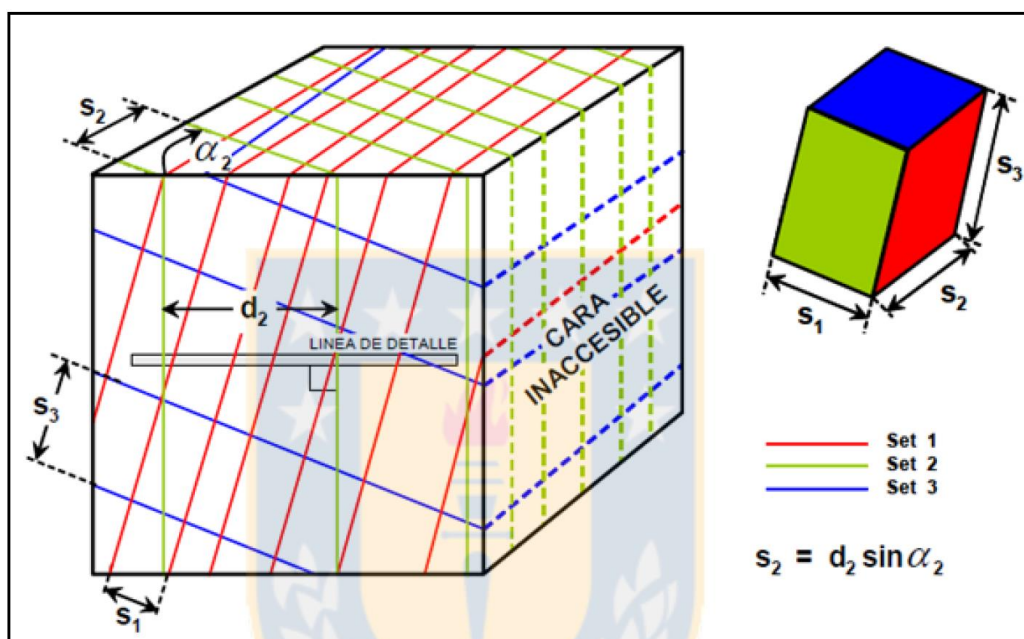


Figura 2.9: Esquema representativo de 3 sets o familias de estructuras en un afloramiento de roca, con sus respectivos espaciamientos reales (s) y aparentes (d). Tomado de Espinoza (2018).

2.4.1.3 Frecuencia de fracturas (FF)

La frecuencia de fracturas (FF) corresponde a la cantidad de fracturas por unidad de largo que se mide en un testigo, siendo lo más común representarla por metro. A pesar de su nombre, no solo toma en cuenta fracturas, sino cualquier discontinuidad (Egaña, 2008). En los testigos se pueden observar discontinuidades de diversos sets estructurales, cada uno de los cuales tiene una geometría, rumbo y manteo diferente, por lo que la FF dependerá entonces de la dirección que tenga el sondaje (Vega, 2018).

De acuerdo al grado de fracturamiento que presente el macizo rocoso, se puede clasificar utilizando la tabla 2.2.

Calificación	FF (fracturas/m)
Muy Masivo	< 3
Masivo	$3 \leq FF < 7$
Fracturado	$7 \leq FF < 11$
Muy Fracturado	$11 \leq FF < 15$
Extremadamente Fracturado	$FF \geq 15$

Tabla 2.2: Calificación en base a FF/m. Modificado de Espinoza (2018).

2.5 Clasificaciones geotécnicas

Desde comienzo de los años 70 se ha extendido el uso de sistemas de calificación y clasificación para macizos rocosos (Pérez, 2023). Las clasificaciones geotécnicas tienen como finalidad poder caracterizar un determinado macizo rocoso con respecto a una serie de parámetros, asignándole un valor para cada uno de estos, permitiendo representar su calidad en forma numérica (Araya, 2010).

Para efectos de este estudio se toman en consideración el sistema de clasificación rock quality designation (RQD) de Bieniawski (1989) y el índice de resistencia geológica (GSI) de Hoek y Brown (1997).

2.5.1 Rock quality designation (RQD)

Fue desarrollado por Deere y otros (1967), como una herramienta para estimar cuantitativamente la calidad del macizo rocoso a partir de testigos de sondajes, y se define como el porcentaje de trozos intactos mayores a 10 cm en el largo total del sondaje. González (2002), menciona que la medida del RQD se debe realizar en cada maniobra del sondeo o en cada cambio litológico, siendo recomendable que la longitud de la maniobra no exceda de 1,5 m y la medida de la longitud del testigo se realiza sobre el eje central del mismo. La figura 2.10 muestra un ejemplo de cálculo para una longitud total de 200 cm de sondaje.

Deere (1967) propone una relación entre el valor de RQD y la calidad de la roca para ingeniería, que es resumida en la siguiente tabla.

RQD	Calidad de la roca
< 25%	Muy mala
25 - 50 %	Mala
50 - 75 %	Regular
75 - 90 %	Buena
90 - 100 %	Muy Buena

Tabla 2.3: Relación entre RQD y calidad de la roca.

También es posible estimar el RQD a partir de la frecuencia de fracturas (FF), utilizando la siguiente relación (Priest y Hudson, 1976):

$$RQD = 100e^{-0.1FF} (0.1FF + 1)$$

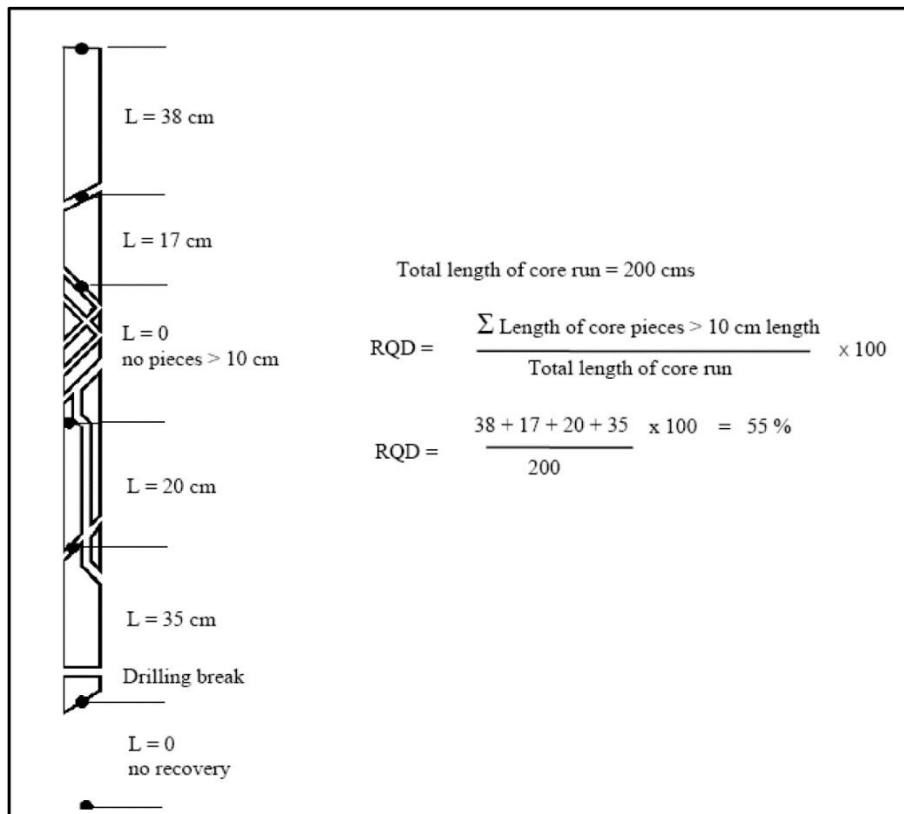


Figura 2.10: Ejemplo para cálculo de RQD en un largo total de sondaje de 200 cm. Extraído de Egaña (2008).

Para valores de FF entre 6 y 16, se puede reemplazar la ecuación anterior por la siguiente:

$$\text{RQD} = -3.68 \text{ FF} + 110.4$$

Cuando no hay testigos disponibles, el RQD se puede estimar en base al número de discontinuidades por unidad de volumen:

$$\text{RQD} = 115 - 3.3 J_v$$

Donde J_v = número de discontinuidades por m^3 .

2.5.2 Índice GSI (geological strength index)

La resistencia de un macizo rocoso fracturado dependerá tanto de las propiedades de roca intacta, como de la libertad de deslizar y rotar de los diferentes trozos de roca intacta bajo diferentes condiciones de esfuerzo. Esta libertad es controlada por la forma geométrica de los trozos de roca intacta, como también, las condiciones de las superficies de las discontinuidades (Hoek y Brown, 1997).

Hoek (1994) incorpora y desarrolla un índice geológico de resistencia, abreviado como GSI (geological strength index), que corresponde a un sistema que evalúa la calidad del macizo bajo distintas condiciones geológicas. Este índice de calidad geotécnica se determina mediante observaciones en terreno, en base a dos parámetros que definen la resistencia y la deformabilidad de los macizos rocosos.

- RMS (Rock Mass Strength), es la estructura del macizo rocoso, definido en términos de su blocosidad y grado de trabazón.
- JC (Joint condition), es la condición de las estructuras (discontinuidades) presentes en el macizo rocoso.

La evaluación del GSI se hace por comparación de lo observado en terreno con una cartilla de condiciones típicas (Figura 2.11) y se recomienda definir rangos de valores en vez de uno específico. Este índice varía de 0 a 100 y se reconocen 5 clases de macizos rocosos basadas en su calidad (Tabla 2.4).

Calidad del Macizo	Clase	Valor de GSI
Muy mala	V	0 a 20
Mala	IV	20 a 40
Regula	III	40 a 60
Buena	II	60 a 80
Muy Buena	I	80 a 100

Tabla 2.4: Relación entre calidad de macizo rocoso y rango de valores del GSI.

Diederichs (2013) menciona que es posible determinar el GSI de forma cuantitativa, mediante las variables de frecuencia de fracturas (FF), condición de discontinuidades (JC) y rock quality designation (RQD).

$$GSI = 2 \cdot JC + \frac{RQD}{5} + 23 \cdot FF^{-0.4}$$

Este cálculo es utilizado para obtener el GSI en rajo Rosario.

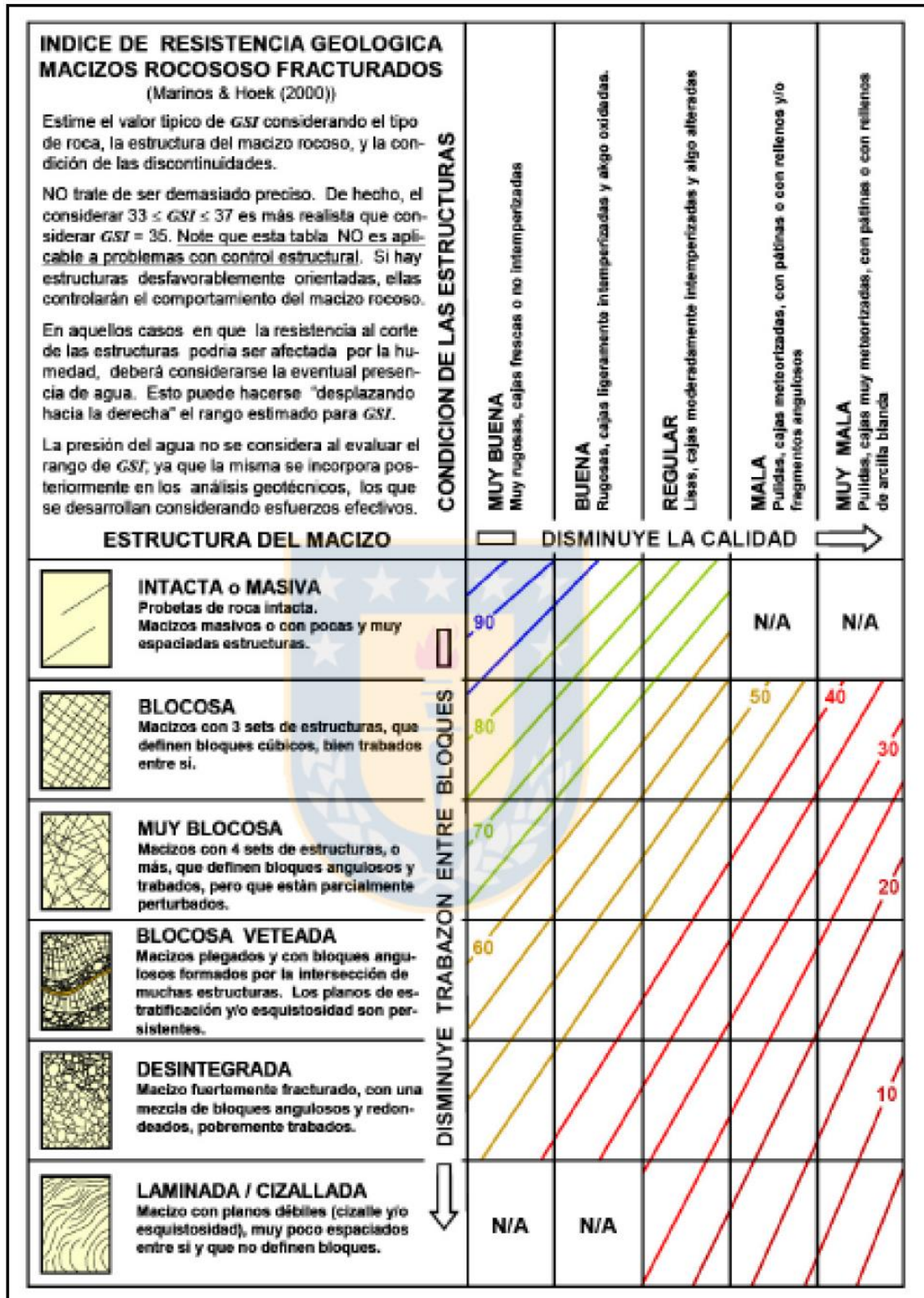


Figura 2.11: Estimación del índice de resistencia geológica (GSI) a partir de los parámetros de condición de discontinuidades y blocosidad. Tomada de Espinoza (2018).

Capítulo 3. MARCO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO

3.1. Marco geológico distrital

3.1.1 Generalidades

El distrito minero Collahuasi está localizado en la comuna de Pica, región de Tarapacá, Chile. Geográficamente se encuentra en el flanco oriental de la cordillera Domeyko entre los 4200 y 4900 ms.n.m. (Sobarzo, 2010). Catalogado como un clúster de pórfidos ubicados en el extremo norte de la franja metalogénica del Eoceno medio-Oligoceno temprano, que contiene tres pórfidos de cobre-molibdeno, correspondientes a los depósitos Quebrada Blanca, Ujina y Rosario, hacia el sur de este último se asocia un evento epitermal de alta sulfuración, que incluye al sistema de vetas La grande, Poderosa, Monctezuma, Cóndor, Esperanza y Cacique (Baker y otros, 2020; Figura 3.2). Al noroeste de Rosario se encuentra el depósito exótico de cobre Huiniquintipa hospedado en gravas, mientras que hacia el SE de Ujina se localiza el prospecto tipo porfídico de cobre La Profunda (Djouka-Fonkwe y otros, 2012). Según Bisso y otros (1998), el distrito comprende tres principales dominios estratigráficos, limitados por sistemas estructurales de escala regional con dirección norte-sur, correspondiente al Sistema de Fallas de Domeyko, con su ramal Oeste por el sector occidental, y el Sistema de Falla El Loa por el lado oriental, que constituyen los límites de un horst con rocas paleozoicas, flanqueado por rocas mesozoicas y cenozoicas. Los autores autor agrupan las unidades del distrito en tres bloques tectónicos, clasificándolos en bloque occidental, central y oriental (Figura 3.1).

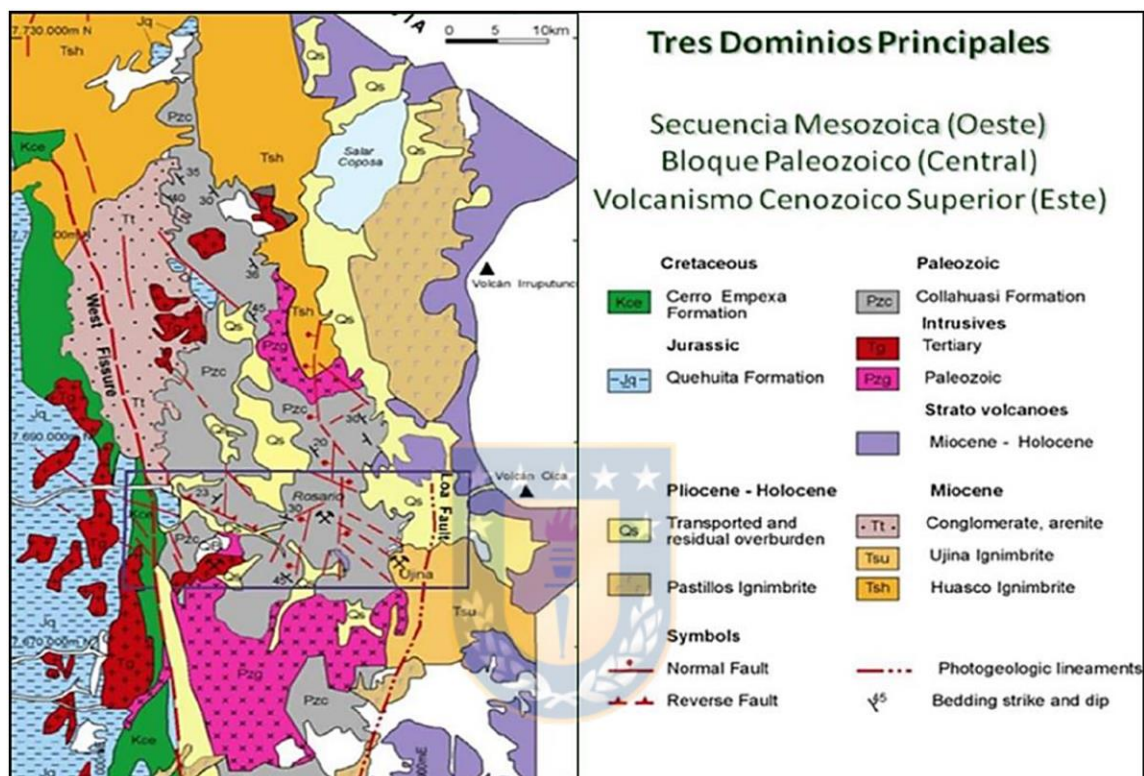


Figura 3.1: Mapa geológico del distrito Collahuasi, con sus tres principales bloques tectónicos; occidental, central y oriental, limitados por las fallas de escala regional Oeste y El Loa. Tomado de Vergara y Thomas (1984).

El bloque occidental está conformado por secuencias jurásicas y cretácicas, correspondiente a las formaciones Quehuita y Cerro Empexa, caracterizando a la primera por presentar un plegamiento en rocas sedimentarias marinas jurásicas. El bloque central tiene basamento paleozoico asociado a granitos que intruyen a la secuencia volcano-sedimentaria denominada Formación Collahuasi. Posteriormente, secuencias de pórfidos mineralizados del Oligoceno intruyen dando formación a los depósitos del distrito. El bloque Oriental ubicado al este de la falla El Loa, se caracteriza por extensas cubiertas de ignimbritas y presencia de depósitos volcanoclásticos del Neógeno a Cuaternario.

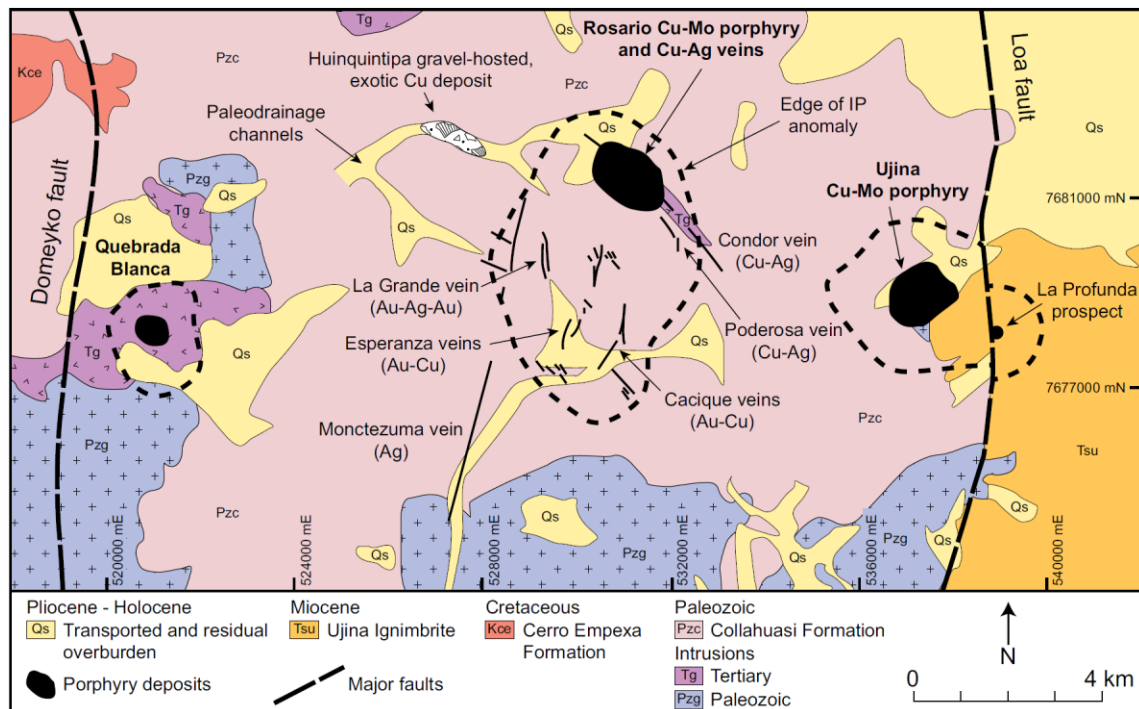


Figura 3.2: Mapa geológico del distrito Collahuasi, con los depósitos porfídicos de cobre Quebrada Blanca, Rosario y Ujina, ilustrando extensión de mineralización de cobre en contornos de líneas negras discontinuas y su sistema de vetas representativas en líneas continuas delgadas. Extraído de Baker (2020).

3.1.2 Rocas estratificadas

La secuencia estratigráfica del distrito Collahuasi está compuesta principalmente de rocas volcano-sedimentarias de composición andesítica a riolítica. Estas han sido divididas en unidades litoestratigráficas formales e informales que abarcan desde el Paleozoico superior hasta la actualidad (Figura 3.3).

Las descripciones litológicas están basadas en la “Hoja Collacagua” escala 1:250.00 de la carta geológica de Chile, realizada por Vergara y Thomas (1984). Además, los trabajos de Münchmeyer y otros (1984), Bisso y otros (1998), Tomlinson y otros (2001), Masterman (2003) y Aurum (2009) complementan la información.

3.1.2.1 Formación Collahuasi

La formación fue definida por Vergara (1978), corresponde a una unidad volcano-sedimentaria de aproximadamente 4 km de espesor, constituida por andesitas, dacitas, riolitas, tobas e intrusivos menores. Las rocas volcánicas están compuestas de dos o más ciclos de flujos andesíticos a riolíticos con intercalaciones sedimentarias depositadas en un ambiente continental (Bisso y otros, 1998). Se diferencian dos eventos magmáticos principales, uno aconteció durante el Pérmico inferior, a los 296 Ma aproximadamente y otro en el Triásico medio, a los 242 Ma aproximadamente (Aurum, 2009).

Los límites que controlan la extensión y distribución de la Formación Collahuasi corresponden al Sistema de Fallas de Domeyko por el oeste, hacia el este el límite no está expuesto, pero es probablemente la falla El Loa (Bisso y otros, 1998), la parte norte no está muy bien definida y se presume que subyace a la ignimbrita Huasco, considerándola su límite (Vergara y Thomas, 1984), por el sur se extiende hasta Chuquicamata, pero está ausente más allá de Calama (Masterman, 2003). Münchmeyer y otros (1984), dividen esta formación en tres unidades informales (Figura 3.4), las cuales corresponden a:

- Unidad La Grande: secuencia de al menos 3,000 metros de espesor que aflora al sur del distrito. Se compone de rocas riolíticas, dacíticas y andesíticas con intercalaciones de areniscas y brechas sedimentarias. Esta Unidad se encuentra intruida por un batolito granodiorítico de edades Permo-Triásico, y es sobreyacida discordantemente por las unidades Cóndor y Capella en el sector Rosario. Al noroeste de quebrada blanca se encuentra cubierta en discordancia por calizas y areniscas de la Formación Chacarillas de edad Jurásico, como también, unidades volcanoclásticas del Eoceno. Dataciones de K/Ar en hornblenda le otorgan una edad mínima Permo-Triásico.
- Unidad Capella: secuencia compuesta por coladas riolíticas alternadas con lentes y horizontes de areniscas y calizas. Tiene una potencia mínima de 1700 metros, sobreyace en discordancia angular a la unidad La Grande. Aflora en el sector

noroeste del distrito en las cercanías de la localidad de Capella y se le asigna una edad Triásico-Jurásico.

- Unidad Cóndor: corresponde a rocas de composición riolíticas que incluyen en su parte basal un horizonte de areniscas y calizas. Tiene una potencia mínima de 1050 m. Aflora en la serranía que separa Rosario de la localidad de Ujina. La Unidad Cóndor tiene una posición estratigráfica similar a la de Unidad Capella, los eventos sedimentarios descritos son semejantes para ambas, pero se ha preferido diferenciarlas debido a su continuidad distrital y a las características distintivas que presentan sus riolitas.

3.1.2.2 Formación Quehuita

Definida como una secuencia marino-continental que sobreyace en discordancia angular y erosiva a la Formación Collahuasi e infrayace de igual forma a la Formación Cerro Empexa. Se compone de dos miembros, el miembro inferior constituido de fangolitas, calizas y limonitas marinas, y un miembro superior de calizas, areniscas calcáreas, areniscas y conglomerados. Las calizas del miembro inferior contienen asociaciones fósiles que indican una edad Jurásico (Vergara y Thomas, 1984). El ambiente de deposición corresponde a una cuenca extensional de trasarco formada durante el desarrollo del arco Jurásico en el norte de Chile; estratos de crecimiento en ambos miembros indican que la deposición ocurrió en un ambiente inicialmente marino profundo que gradualmente paso a un ambiente marino somero producto de un evento regresivo (Masterman, 2003).

Tomlinson y otros (2001) describe las unidades litológicas de los miembros de la siguiente manera:

- Miembro Inferior: compuesto por rocas sedimentarias bien estratificadas con variaciones en capas de 0,1 a 2 m de potencia, abundantes fósiles, con predominancia de rocas calcáreas y lutitas. Presenta una unidad clástica basal de conglomerados y areniscas, de tonalidad amarilla o rojiza, cuyo espesor varía entre 4 a 50 metros. Su potencia total, oscila entre los 800 y 1200 m.

- Miembro Superior: secuencia estratigráfica de areniscas y limonitas de color rojo oscuro, con intercalaciones de limonitas verdes y areniscas cuarcíferas pardas. Es posible reconocer en algunos sectores estratificación cruzada, laminación, ondulitas, grietas de desecación, restos vegetales fósiles, y niveles arenosos en la parte superior con huellas de pisadas de dinosaurios. El miembro tiene una potencia de 1300 metros aproximadamente.

3.1.2.3 Formación Cerra Empexa

Corresponde a una secuencia elongada de andesitas, dacitas y brechas volcánicas, con intercalaciones de areniscas rojas y conglomerados (Vergara y Thomas, 1984). La formación yace en discordancia angular erosiva a las rocas de la Formación Quehuita e infrayace con la misma relación a la ignimbrita Huasco y a gravas del Mioceno medio-superior (Tomlinson y otros, 2001). La Formación Cerro Empexa se habría depositado en un ambiente continental volcano-sedimentario similar al arco actual de la cordillera de los Andes (Masterman, 2003). Vergara y Thomas (1984) separan en dos miembros la formación, uno inferior volcano-sedimentario y un miembro superior de carácter volcánico. Dataciones en tobas riolíticas y en lavas andesíticas, mediante el método de K/Ar definen la edad de la Formación Cerro Empexa como Cretácico Superior, de manera más precisa al piso Campaniano (Aurum, 2009).

- Miembro Inferior: Aflora predominantemente al norte de Cerro Empexa y al sur de la quebrada Rosario. Su máxima potencia corresponde a una secuencia de 1300 m, constituida por conglomerados, areniscas, fangolitas y brechas.
- Miembro Superior: Corresponde a una secuencia de aproximadamente 1400 m de rocas volcánicas, conformada por brechas, tobas líticas, brechas tobáceas y andesitas porfídicas.

3.1.2.4 Ignimbrita Huasco

Secuencias piroclásticas de dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso del Mioceno inferior-medio. Se compone por tobas total o parcialmente soldadas, una parte media de tobas riolíticas compactas muy soldadas, y un nivel superior de color gris claro, medianamente soldado. Las dataciones de K-Ar en biotitas indican una edad asociada al Mioceno medio, que fluctúa entre $14,4 \pm 0,4$ y $17,1 \pm 0,8$ Ma (Vergara y Thomas, 1984).

3.1.2.5 Ignimbrita Ujina

Corresponde a un depósito ignimbrítico constituido por tobas soldadas que incluyen esporádicamente lentes de material piroclástico, distinguiéndose ocasionalmente estructuras de flujo (Vergara, 1978). Dataciones K-Ar en biotitas determinan una edad Mioceno superior de $9,3 \pm 0,4$ Ma (Vergara y Thomas, 1984).

3.1.2.6 Depósitos aterrazados

Están conformados por depósitos de gravas y arenas polimícticas, y en menor medida tobas dacíticas. En sectores cercanos a zonas de alteración hidrotermal, un gran porcentaje de sus constituyentes son rocas alteradas y mineralizadas con sulfuros, en tanto la matriz aparece cementada, principalmente por silicatos de cobre, conformando depósitos de minerales exóticos. Sobreyacen a las unidades del Mioceno e infrayacen a depósitos clásticos no consolidados del Holoceno (Vergara y Thomas, 1984).

3.1.2.7 Estratovolcanes

Están representados por estratovolcanes, domos y flujos lávicos de composición andesítica y dacítica, de edad Mioceno superior al Holoceno (Vergara, 1978). Se presentan con distinto grado de conservación, donde los más antiguos poseen conos fuertemente erodados y núcleos expuestos. Sin embargo, la mayoría se caracteriza por tener conos relativamente bien preservados y sus cráteres moderadamente erosionados (Vergara y

Thomas, 1984). Las unidades de andesita y dacitas constituyentes de estas rocas se encuentran en volúmenes relativamente equivalentes. Algunos centros asignados al Mioceno superior-Plioceno, están cubiertos por depósitos ignimbríticos más recientes (Vergara y Thomas, 1984).

3.1.2.8 Ignimbrita Pastillos

Corresponde a una secuencia de ignimbritas y depósitos cineríticos, divididos en dos miembros, uno inferior constituido por un nivel de tobas parcialmente soldadas y depósitos laháricos, y un miembro superior compuesto en gran parte por tobas cineríticas no soldadas. En la cuenca del Salar Coposa hay incluidos en la unidad superior, niveles de arcillolitas, limos y diatomitas (Vergara y Thomas, 1984). La edad asignada por Vergara (1978) es Pleistoceno medio, de igual forma que la datación realizada en diatomitas por Stoertz y Ericksen (1974).

3.1.2.9 Depósitos no consolidados

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

3.1.3 Rocas intrusivas

Los cuerpos intrusivos presentes en el área varían en composición desde dioritas, monzonitas, granodioritas a granitos (Münchmeyer y otros, 1984; Figura 3.3). En el distrito se diferencian tres periodos de emplazamiento de intrusivos, 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 definido por dioritas cuarcíferas y granodioritas del Cretácico Superior-Paleógeno inferior, que intruyen a las formaciones Cerro Empexa, Quehuita y Collahuasi (Münchmeyer y otros, 1984; Vergara y Thomas, 1984). Finalmente, se emplazan intrusiones cuarzo –

monzoníticas en la Formación Collahuasi durante el periodo Eoceno superior – Oligoceno inferior, este último evento se relaciona a la génesis de los pórfidos cupríferos de Rosario y Ujina (Münchmeyer y otros, 1984).

Datos más recientes de U-Pb en circón, aportados por Makshev y otros (2009) revelan edades de cristalización de 35 a 36 Ma para los pórfidos de los depósitos Rosario – Rosario Oeste y Ujina, mientras que para Quebrada Blanca se inició un poco antes a los 37 Ma, pero las edades U-Pb en circón para los pórfidos tardíos de Quebrada Blanca son contemporáneas a los depósitos Rosario y Ujina, por lo tanto, se identifican al menos dos eventos de intrusión de pórfido para estos yacimientos. En Rosario y Rosario Oeste se identifica una sobreimposición hidrotermal de alta sulfuración, que según datos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ se produjo a los 33 Ma (Masterman y otros, 2004), pero no hay rocas intrusivas de esta edad expuestas dentro de estos yacimientos.

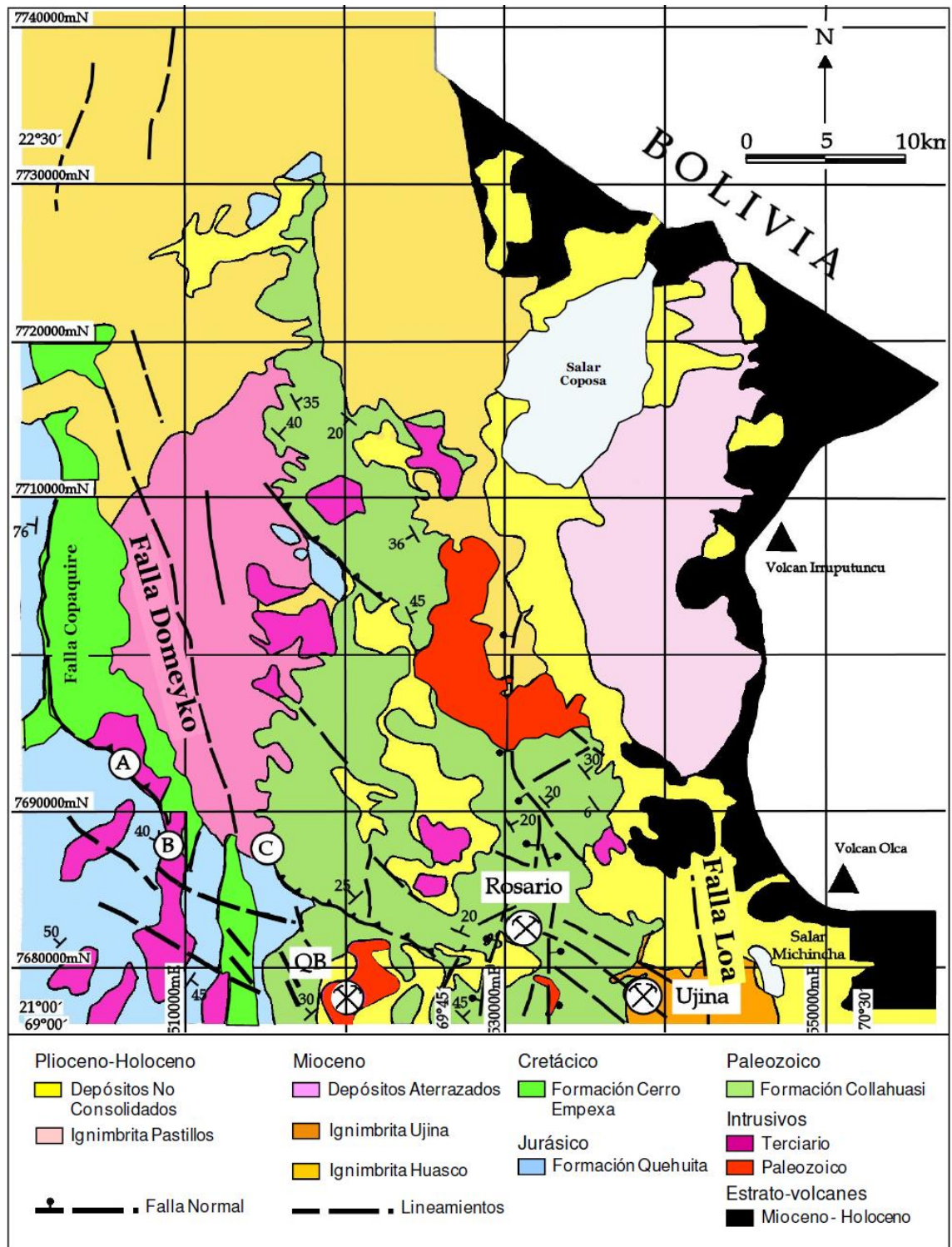


Figura 3.3: Mapa geológico simplificado del distrito Collahuasi, destacando los yacimientos porfíricos Quebrada Blanca, Ujina y Rosario. Están ilustradas las unidades geológicas principales. Tomado de Masterman (2003).

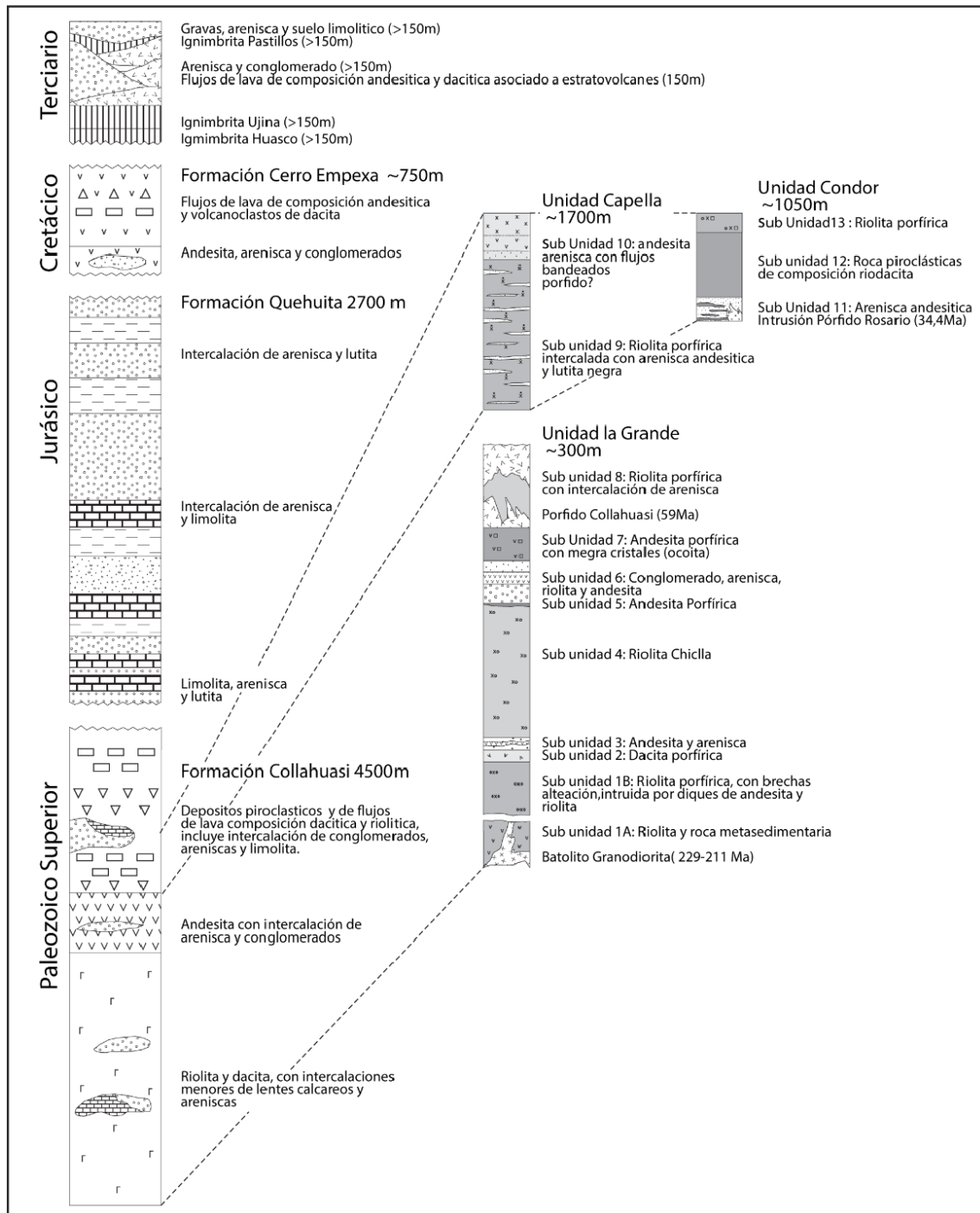


Figura 3.4: Columna estratigráfica regional del distrito Collahuasi (sector izquierdo). Münchmeyer y otros (1984), subdividieron la Formación Collahuasi en tres subunidades basado en sus características de facies sedimentarias y volcánicas. Extraído de Masterman (2003) y Quiroga (2019).

3.1.4 Estructuras tectónicas

El distrito Collahuasi está localizado dentro de un bloque estructural que constituye un horst alzado en el Terciario superior. Este bloque tiene 30 km de elongación en dirección norte – sur, y 40 km de ancho (Bisso y otros, 1998). La dinámica estructural del distrito está dominada por sistemas de fallas del Cenozoico de orientaciones NNW-SSE, NE-SW, NW-SE y N-S (Münchmeyer y otros, 1984). Dentro de las fallas NNW-SSE, las más relevantes son las fallas regionales Oeste y El Loa, siendo la primera una ramificación del sistema de fallas Domeyko. La falla Oeste limita el flanco occidente del distrito, separando los sedimentos del Jurásico marino y continental yacentes en su flanco oeste, de los depósitos volcánicos y batolitos graníticos de edad Permo-Triásico presentes en su flanco este. La falla El Loa forma el borde este del horst y a su vez representa el borde oeste de un graben, el cual esta contiene con depósitos volcanoclásticos e ignimbritas de edad Mioceno a Cuaternario (Bisso y otros, 1998).

Los sistemas conjugados NE-SW y NW-SE (llamado este último informalmente como “Sistema Collahuasi”; Figura 3.5), están presentes en los yacimientos Rosario y Ujina, para los que se han reconocido movimientos de rumbo sinestrales como dirección predominante del 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).

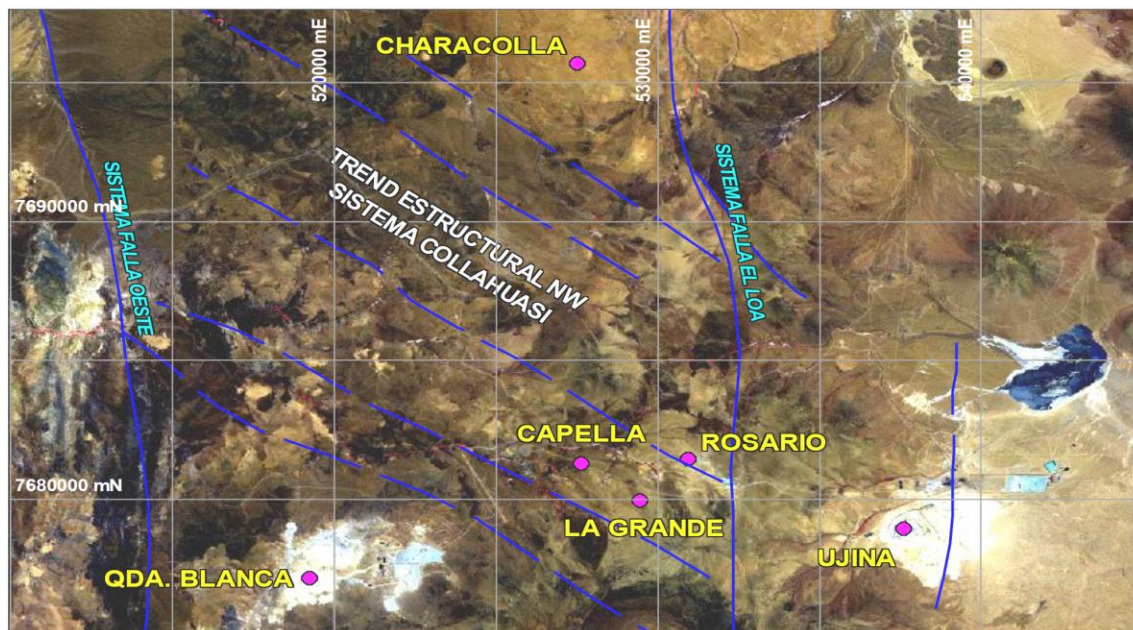


Figura 3.5: Esquema estructural regional del distrito Collahuasi, donde resaltan los sistemas estructurales conjugados NW-SE, denominados informalmente “Sistema Collahuasi” y las fallas regionales Oeste y El Loa. Tomado de Sanhueza y otros (2006).

3.1.5 Geología económica

El distrito Collahuasi alberga importantes recursos minerales, tanto metálicos como no metálicos. Los primeros presentan mineralización de cobre, molibdeno, oro y plata, en cambio, los recursos no metálicos están constituidos principalmente por depósitos de azufre y salares (Oyarzún, 2010).

Según Camus (2002) el distrito pertenece a la franja metalogénica que contiene la mayor concentración de cobre del mundo. Los principales centros de mineralización del distrito son los sistemas de pórfidos de Cu-Mo, caracterizado en los sistemas hidrotermales de Rosario, Ujina, Quebrada Blanca y Copaquire. El recurso con mayor importancia económica es el cobre, y en menor proporción molibdeno y plata, la mineralización del cobre está distribuida a través de fracturas tipo veta-falla, en vetillas y diseminado (Quiroga, 2019). Las principales menas son calcopirita, bornita, molibdenita, de manera local tenantita y enargita, mientras que las menas supérgenas son calcosina y covelina (Camus, 2003).

Además, el distrito cuenta con depósitos tipo epitermal de alta sulfidización asociado a 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).

3.2. Marco geológico de Rosario Oeste

3.2.1 Generalidades

El rajo Rosario comprende dos ambientes geológicos, asociados al pórfido de Cu-Mo y un sistema de vetas epitermales de alta sulfidización, sobreimpuesto al estilo de mineralización del pórfido cuprífero (González, 2019). Estos ambientes geológicos diferentes y coexistentes están separados por las fallas principales del depósito, correspondiendo el dominio SW a un depósito epitermal de alta sulfidización, definido como Rosario Oeste y el NE a un pórfido cuprífero (Orbezo, 2019).

Se ha descrito una relación espacial y genética entre ambos yacimientos, asociado a un sistema magmático e hidrotermal, emplazado en rocas volcano-sedimentarias de la Formación Collahuasi y en menor proporción en intrusivos de edad paleozoica. La secuencia de rocas volcánicas y volcanoclásticas se dispone como una secuencia homoclinal de actitud N30W/35-50NE (González, 2019).

Según Sobarzo (2010), existen claras diferencias geológicas entre ambos dominios, como el carácter epitermal de alta sulfuración de Rosario Oeste controlado por estructuras N-S, NNW-SSE, NNE-SSW subverticales, mientras que Rosario corresponde a un pórfido de Cu-Mo-(Ag) con un control estructural NW/30-40SW. Respecto a la mineralización, en Rosario Oeste más del 90% es de carácter supérgeno alojado en falla-vetas de alta sulfidización, emplazadas en rocas volcano-sedimentarias, mientras que en Rosario el 95% es de origen hipógeno asociado a intrusivos Eoceno-Oligoceno.

3.2.2 Rocas Estratificadas

Las rocas estratificadas de Rosario Oeste pertenecen al miembro La Grande de la Formación Collahuasi, de edad Paleozoico superior. La secuencia en la base está representada por unidades de composición ácida (dacitas, riolitas), que son sobreyacida por rocas volcánicas andesíticas intercaladas con niveles sedimentarios de origen volcanogénico. A partir de esto, se han definido de manera local tres unidades informales; Unidad de Tobas, Unidad Andesítica y la Unidad Sedimentaria Clástica (Figuras 3.6 y 3.7). Estas se disponen como una secuencia homoclinal de actitud N30W/35-50NE (Sanhueza y otros, 2006).

3.2.2.1 Unidad de Tobas

Son rocas piroclásticas de composición dacíticas a riolíticas, presentando fragmentos de cristales, líticos y vidrio. Según la clasificación textural pueden ser clasificadas en tobas vítreas, cristalinas y líticas. En algunos sectores presentan mayor contenido de sílice generando tobas soldadas (González, 2019). Cornejo (2005) menciona que en cortes transparentes se describen rasgos de ojos de cuarzo parcialmente absorbidos, shards quebrantados y pómez aplastadas (Sanhueza y otros, 2006).

3.2.2.2 Unidad Andesítica

Se compone de andesitas, andesitas basálticas, brechas andesíticas, ocoitas y escasos sills andesíticos y microdioríticos. Las andesitas exhiben típicamente textura porfídica, pudiendo ser afaníticas, y en algunos casos amigdaloidales. Microscópicamente se identifican fenocristales relictos de piroxenos, y olivino, en una matriz compuesta de plagioclasa, piroxeno, magnetita y localmente apatito (Cornejo, 2005). Es común encontrar niveles de andesitas parcialmente brechizadas o intercalaciones más potentes de brechas andesíticas. Generalmente, pueden presentar digitaciones de areniscas o brechas sedimentarias (Oyarzún, 2010). Estas rocas se distribuyen principalmente en el sector centro y norte del área (Sanhueza y otros, 2006).

3.2.2.3 Unidad Sedimentaria

Presenta intercalaciones de potencia variable y está formada por rocas clásticas de distinto origen, como también, distintos tamaños. Corresponden mayoritariamente a brechas sedimentarias y brechas conglomerádicas con clastos de rocas andesíticas y escasamente dacíticas. La matriz está constituida por fragmentos de andesita, minerales arcillosos, cloritas y esmectitas.

En menor proporción, ocurren areniscas de tipo feldespáticas, con matriz principalmente clorítica y arcillosa, que pueden contener mayor proporción de fragmentos de dacitas o cuarzo, aunque siempre subordinados a los de composición andesítica. Areniscas finas y limolitas ocurren como digitaciones sedimentarias menores a 1 m (Sanhueza y otros, 2006). Las rocas clásticas se encuentran intercaladas principalmente en la unidad andesítica, con mayor abundancia hacia el extremo norte del proyecto (Sobarzo, 2010).

3.2.3 Rocas Intrusivas

La ocurrencia de rocas intrusivas se limita a cuerpos menores y de manera local se encuentran pórfidos de composición granodiorítica a granítica, cuya relación con los pórfidos Collahuasi y Rosario no se ha definido claramente (Oyarzún, 2010). Además, en sondajes es posibles reconocer diques y pequeños stocks de composición diorítica de grano fino. Los cuerpos intrusivos reconocidos indican que el sistema vetiforme de Rosario Oeste podría representar la expresión superficial de mineralización tipo pórfido en profundidad (Masterman, 2003).

Según Sobarzo (2010) se reconocen dos tipos de rocas porfídicas en Rosario Oeste:

- Pórfido de grano grueso: composición granodiorítica a granítica, que se puede considerar equivalente al Pórfido Collahuasi. Típicamente es de grano grueso con masa fundamental fanerítica, sin embargo, pueden ocurrir variaciones texturales. Los fenocristales predominantes corresponden a Feldespato-K, plagioclasa y cuarzo, y los máficos presentes son biotitas y hornblenda.

- Pórfido de grano fino: composición granodiorítica, de grano medio a fino, correlacionable al Pórfido Rosario. Los Fenocristales predominantes son plagioclasa y cuarzo, con máficos correspondientes a biotita y hornblenda.

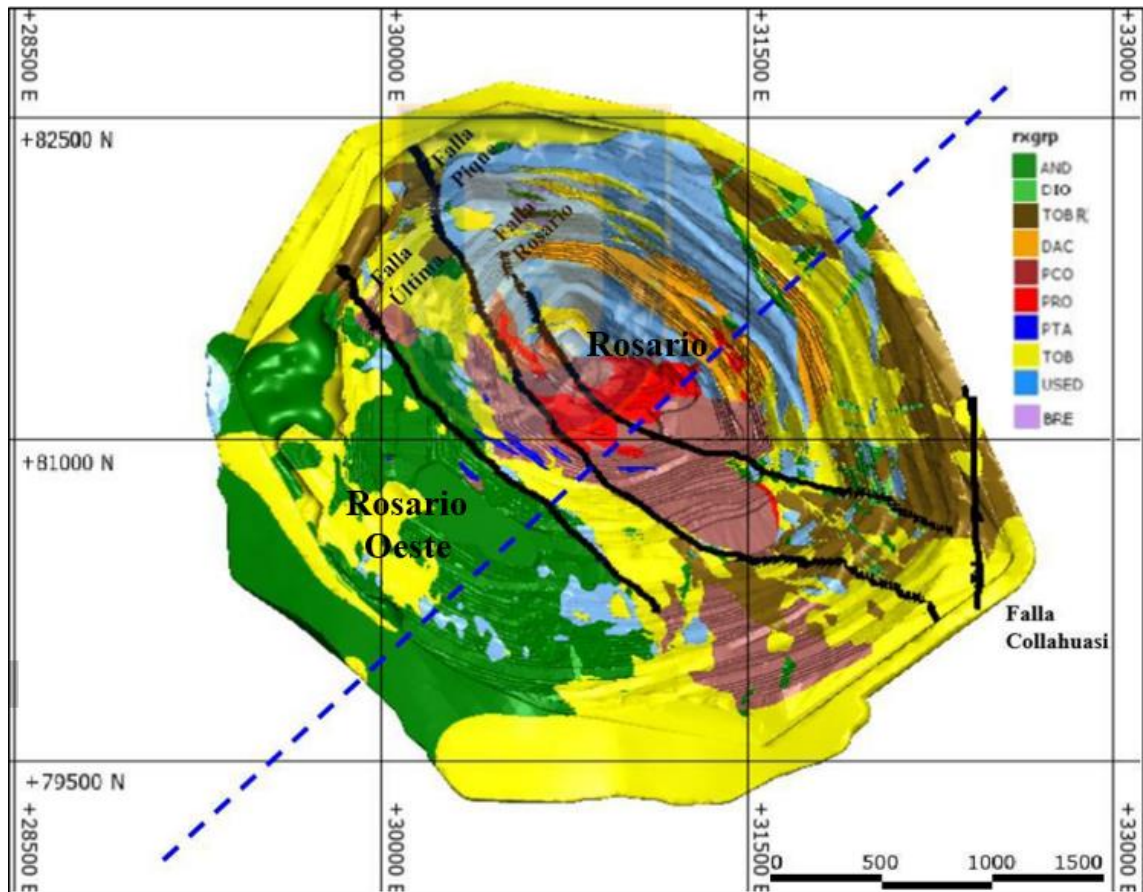


Figura 3.6: Mapa litológico en vista de planta del rajo Rosario. En Rosario Oeste se observan las tres unidades informales definidas, Unidad de Tobas, Sedimentaria y Andesítica. Extraído de Garay (2021).

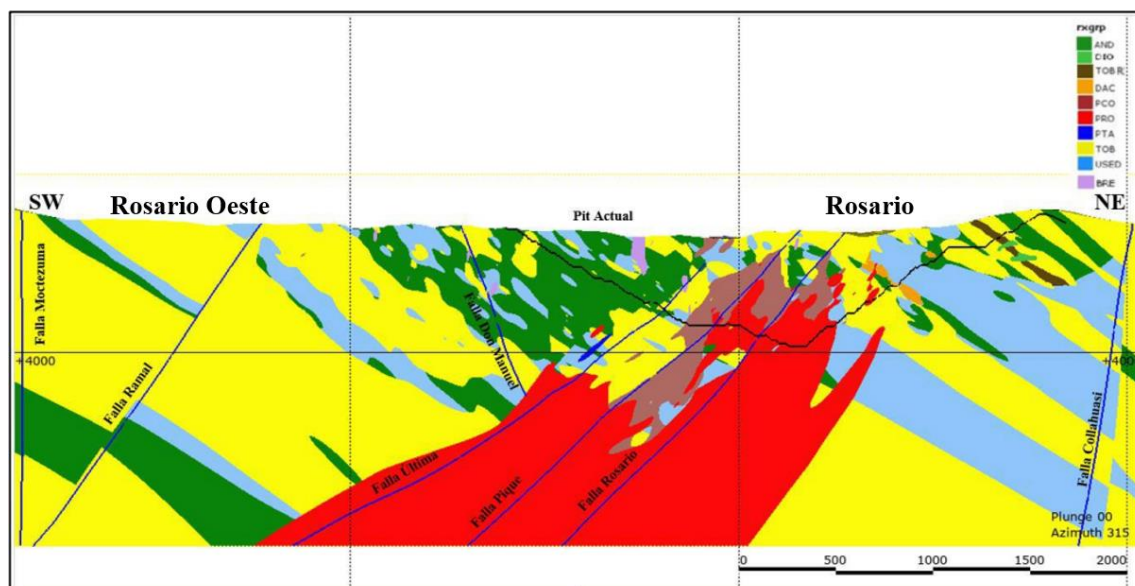


Figura 3.7: Perfil litológico del rajo Rosario, delimitando en línea negra el pit actual. El ambiente de Rosario Oeste presenta las Unidades de Tobas, Andesitas y Sedimentarias. Extraído de Garay (2021).

3.2.4 Estructuras

En el rajo Rosario han sido reconocido dos etapas de deformación asociadas al emplazamiento del pórfido Rosario. La primera ocurrió durante el periodo Oligoceno temprano, entre los 28 a 34 Ma, caracterizado por la ocurrencia de fallamientos sinestrales con componentes normales. La segunda etapa corresponde a una reactivación dextral postmineralización, con movimientos de zonas de cizalle de orientación NW, que afectaron a las con dirección N-S, generando desplazamientos (Masterman y otros, 2005; Figura 3.8).

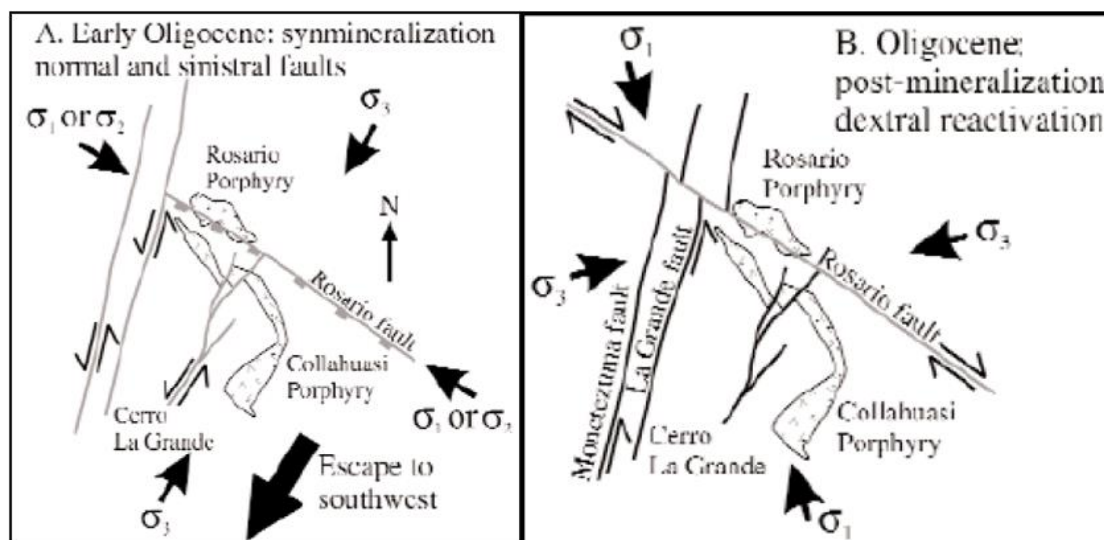


Figura 3.8: Muestra un esquema estructural del proceso de deformación- reactivación ocurrido en el sector. A) La ilustración muestra la condición de esfuerzos para el periodo Oligoceno Temprano. B) Representa la reactivación de la Orientación NW y comportamiento dextral. Extraído de Masterman y otros (2005).

Según Oyarzún (2010), los rasgos estructurales identificados en Rosario Oeste son difíciles de reconocer y difieren de los observados en el yacimiento Rosario, donde domina el sistema de Falla Rosario, correspondiente a un set de fallas normales reactivadas dextralmente, de rumbo NW con manteos entre 30° a 40° al SW (Figura 3.9). Lo anterior sugiere que se trata de dominios estructurales distintos (Sanhueza y otros, 2006), como se observa en el siguiente cuadro comparativo (Tabla 3.1)

Dominio Estructural Rosario Oeste	Dominio Estructural Rosario
Fallas verticales de rumbo NNW-SSE, NW-SE y NNE-SSW	Fallas normales NW-SE de bajo ángulo
Asociadas a deformación transtensional	Asociadas a zona de acortamiento
Débil alzamiento-exhumación	Fuerte alzamiento-exhumación
Profuso fracturamiento secundario	Zonas de fracturamiento delgadas y de bajo ángulo
Favorable para enriquecimiento secundario	Enriquecimiento restringido a fallas
Mineralización primaria profunda	Mineralización primaria somera o aflorando

Tabla 3.1: Caracterización de dominios estructurales de los yacimientos Rosario y Rosario Oeste. Extraído de Oyarzún (2010).

Las estructuras presentes en Rosario Oeste están clasificadas en base a su rumbo y magnitud, diferenciándose 3 tipos de fallas, mayores, intermedias y menores, siendo las primeras de carácter distrital, las segundas tienen continuidad mayor a 90 m y las otras inferiores (González, 2019). Las fallas expuestas en superficie se agrupan en tres familias principales de orientaciones NE-SW, N-S y NNW-SSE a NW-SE (Sobarzo, 2010; Figura 3.10).

- Estructuras NE-SW: pertenecen las vetas “Moctezuma”, “La Grande” y “Anita”, representando los lineamientos mayores en el yacimiento con una actitud general $N20^{\circ}-35^{\circ}E$ y manteos subverticales. Estas estructuras tienen continuidad fuera de los límites del yacimiento y forman parte de una serie de fallas relacionadas a la mineralización en Rosario Oeste (Oyarzún, 2010).
- Estructuras N-S: representadas por las vetas Don Manuel y Esperanza, con actitud N-S ($\pm 5^{\circ}$) y manteos subverticales. Se posicionan en el sector centro-sur y extremo este del yacimiento (Sobarzo, 2010).
- Estructuras NNW-SSE a NW-SE: este grupo tiene una mayor frecuencia en el yacimiento, presentando rumbos generales $N20W$ y $N40W$, con manteos variando desde 60° a 85° al este. La estructura de mayor envergadura es la falla-veta Forastera de Rumbo $N35^{\circ}W$ (Oyarzún, 2010).

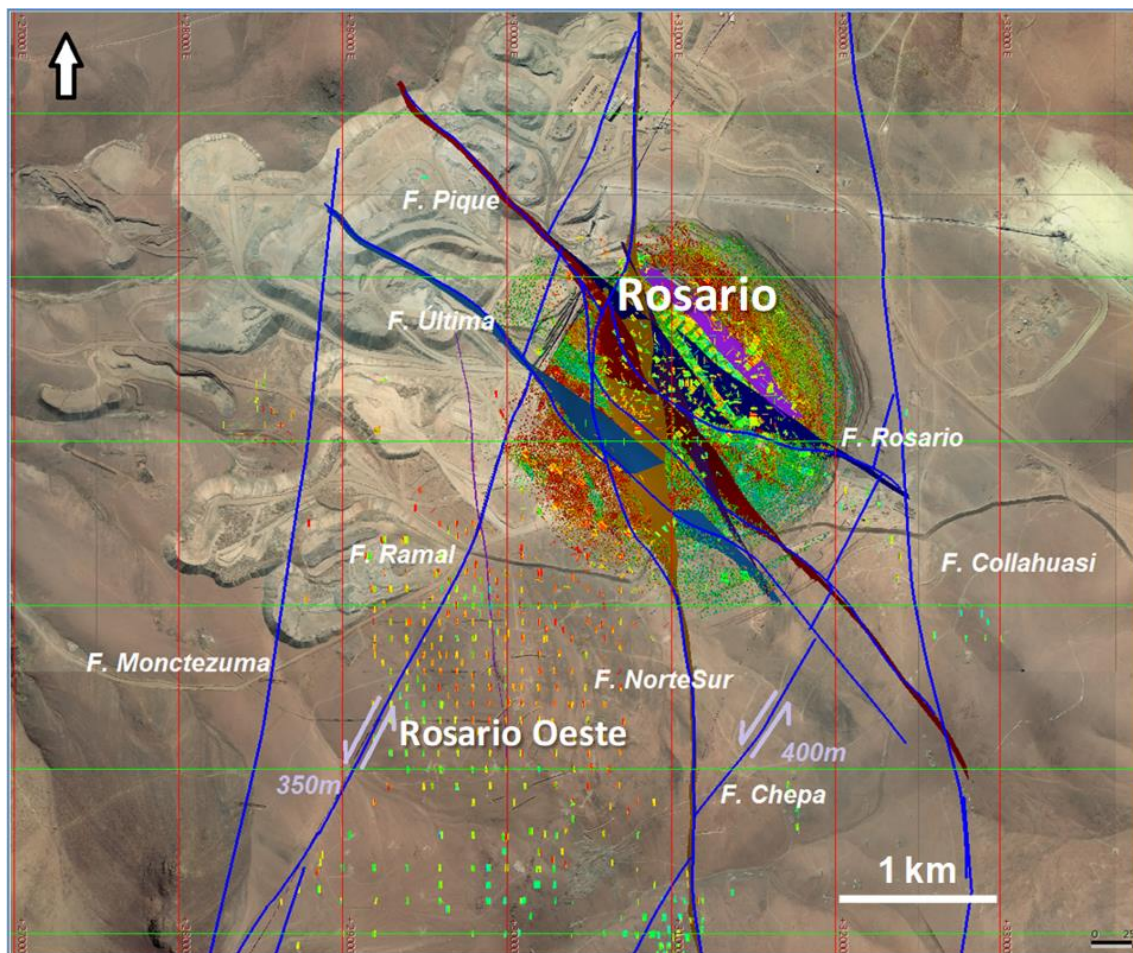


Figura 3.9: Vista en planta de las principales estructuras presentes en Rosario y Rosario Oeste. Se observan las orientaciones NW-SE características de las estructuras mayores Rosario, Pique y Última, en el yacimiento Rosario. Extraído de Pérez (2023).

En base a lo expuesto, se considera que el patrón geométrico del yacimiento está controlado por fallas maestras de rumbo NE-SW que definen dos bloques, uno occidental limitado por las fallas Moctezuma hacia el oeste y La Grande al oriente, mientras que el bloque oriental está limitado con las fallas La Grande al occidente y Anita al este. Los sistemas N-S, NNW-SSE y NW-SE se consideran fallas subsidiarias a las NE-SW (Oyarzún, 2010, Figura 3.10)

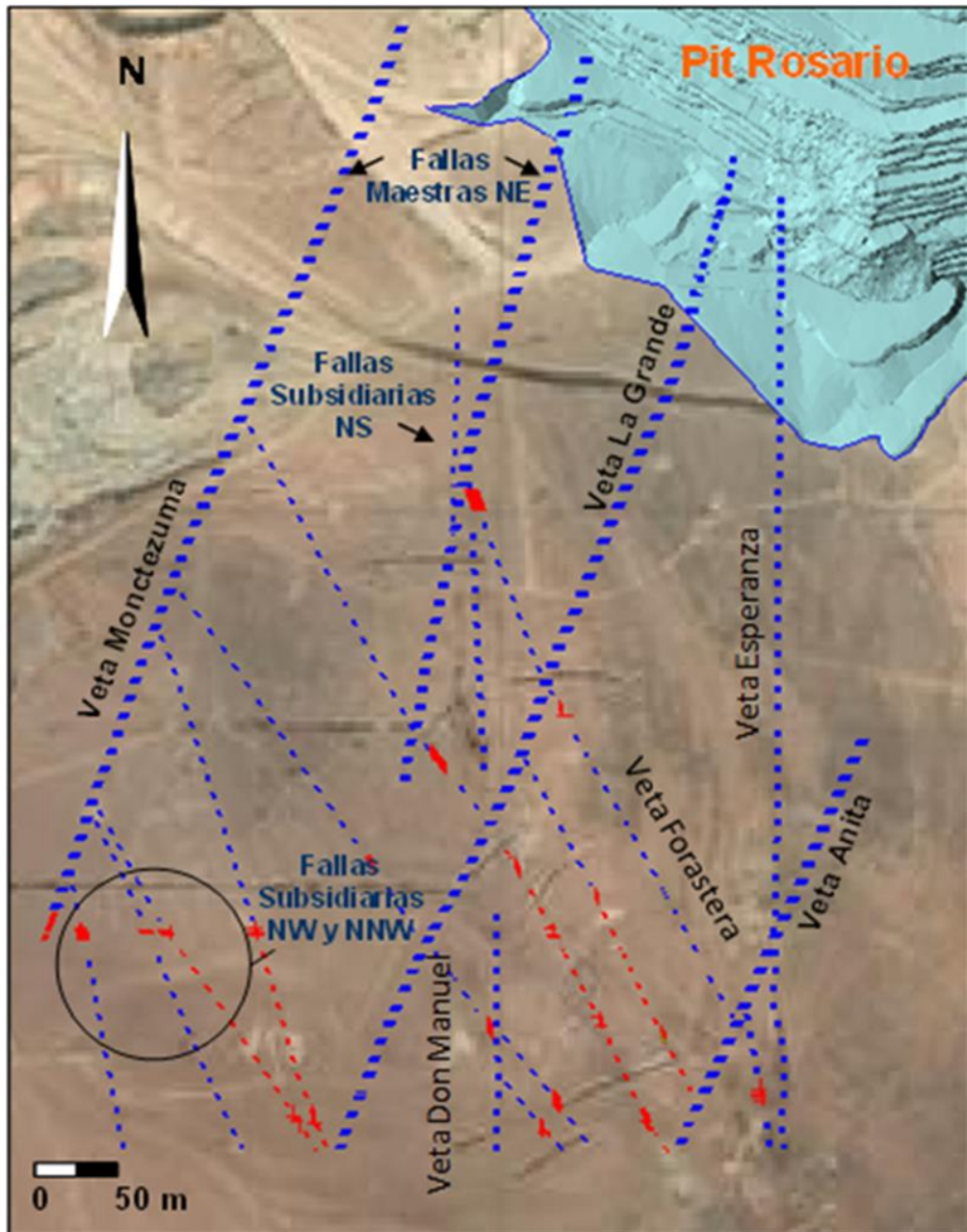


Figura 3.10: Trazas de estructuras principales en Rosario Oeste en vista de planta. Extraído de Sobarzo (2010).

3.2.5 Alteración

En Rosario Oeste se reconoce distintos tipos de alteraciones, que varían en magnitud e intensidad, estas corresponden predominantemente a la alteración propilítica y argílica,

presentado esta última subdivisión en débil, modera e intensa; la alteración cuarzo-sericita está presente como halos (Orbezo, 2019; Figuras 3.11 y 3.12).

3.2.5.1 Alteración Propilítica

Es característica la asociación de los minerales de clorita y epidota, en ocasiones la presencia de albita, calcita y pirita (González, 2019). Oyarzún (2010) menciona que su origen no se ha definido claramente, esta es anterior a la argilización y podría estar relacionada al sistema hidrotermal asociado al yacimiento, o a un sistema porfídico, ya sea el sistema Rosario o un cuerpo en profundidad aún no reconocido.

La alteración propilítica ocurre en gran parte de las rocas del entorno, aunque con distintas intensidades, afectando principalmente a la Unidad Andesítica. En dacitas de la periferia del depósito ocurre como propilitización de minerales ferromagnesianos y como vetillas de clorita-epidota. A nivel general esta alteración podría considerarse como *background* en todo el depósito, al que se le sobreimpone la alteración argílica. Al interior del depósito, son observables bloques con alteración propilítica que no han sido afectados por la argilización, especialmente asociados a zonas con escaso fallamiento o fracturamiento (Sanhueza y otros, 2006).

3.2.5.2 Alteración cuarzo-sericita (Q-S)

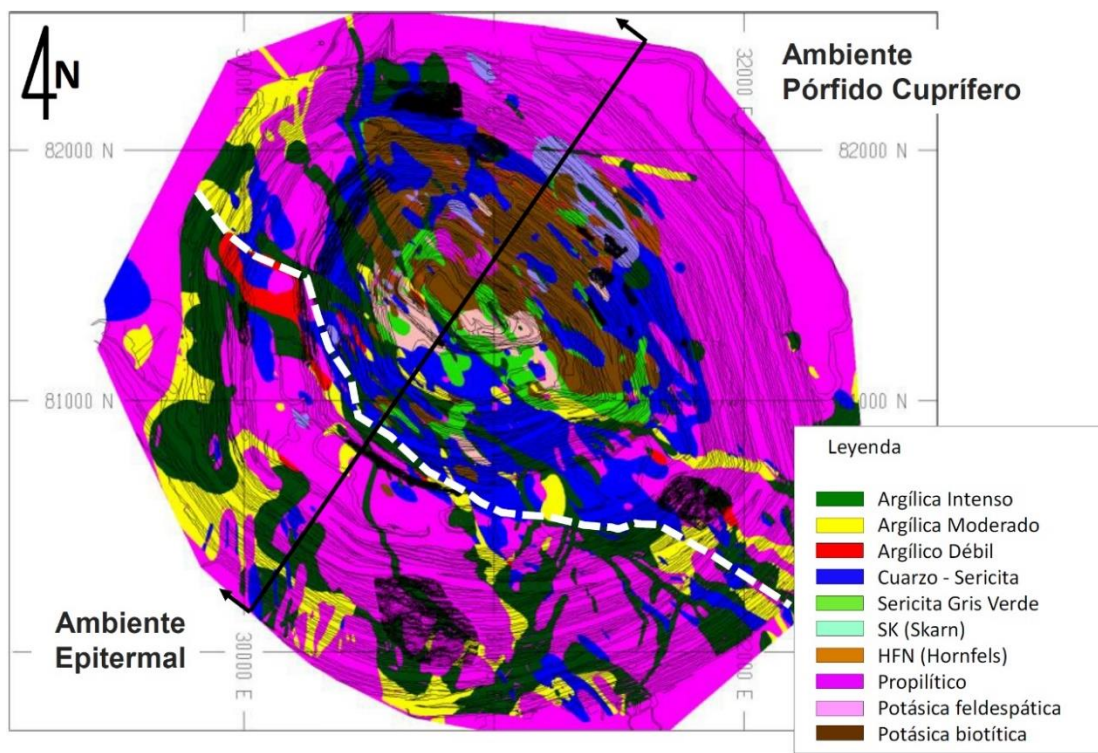
Corresponde a un tipo de alteración caracterizada por una transformación de los feldespatos (plagioclasas y feldespatos alcalinos) a sericita (o illita) y cuarzo secundario, en mayor o menor proporción, debido a una hidrólisis moderada. Los minerales mencionados, son acompañados estrictamente por mineralización de pirita. Su control es estructural, afectando principalmente al sector delimitado por la falla Rosario por el noreste (CMDIC, 2014).

3.2.5.3 Alteración Argílica

Esta alteración se sobrepone a la alteración propilítica y constituye el rasgo más característico del depósito, controlada fuertemente por el fallamiento, tanto en ocurrencia como en intensidad. Se caracteriza por la presencia de caolinita, dickita, pirofilita, cuarzo y alunita, evidenciando el resultado de una hidrólisis extrema y constituyendo el evento más tardío (Oyarzún, 2010).

González (2019) señala que las alteraciones tardías afectan el comportamiento mecánico del macizo rocoso, disminuyendo su resistencia a medida que aumenta la intensidad de alteración. Por ende, la alteración argílica se ha subdividido en grados, desde avanzada, intermedia y débil.

- Argílica avanzada: la textura original de la roca ha sido obliterada y se hace difícil identificar la roca de caja a escala macroscópica.
- Argílica moderada: deja parte de la textura original de la roca reconocible a escala macroscópica.
- Argílica débil: es de menor grado que las anteriores, facilitando la distinción de la textura original de la roca.



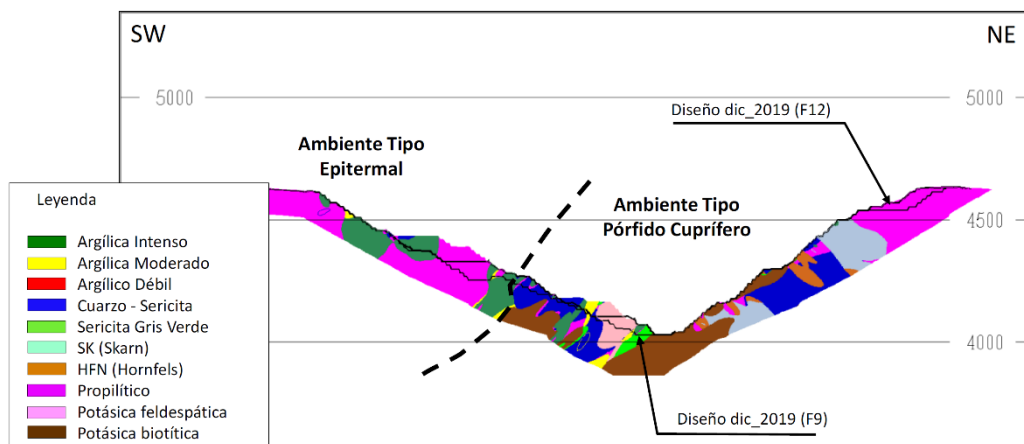


Figura 3.11. Mapa de alteración en rajo Rosario, vista de planta, con zonificación de ambientes, delimitado por línea blanca segmentada. Rosario Oeste presenta predominio de alteración propilítica y argílica, y menor magnitud cuarzo sericita. Extraído de González (2019).

Figura 3.12. Sección representativa de unidades de alteración del rajo Rosario, con líneas discontinuas negras, que delimitan los ambientes. Rosario Oeste ilustra las alteraciones propilítica y argílica, variando esta última en intensidades. Extraído de González (2019).

3.2.6 Mineralización

La mineralización de Cu en el yacimiento se encuentra asociado a un sistema de vetas de alta sulfidización con altas leyes de cobre y amplias zonas de enriquecimiento secundario, producto de la lixiviación de las zonas exhumadas por sistemas estructurales (Orbezo, 2019). Además, mineralización diseminada de menor ley, que en el pasado fueron explotados por sus contenidos de cobre y oro (Masterman, 2003). Un rasgo característico en el interior del depósito, es la ocurrencia de vetillas y vetas masivas de sulfuros, que son responsables de los mayores aportes de Cu. Cabe destacar que no se han reconocido sistemas porfídicos tipo Rosario en la zona (Sanhueza y otros, 2006).

3.2.6.1 Zona estéril

Zona ubicada en algunos sectores superficiales y distales del rajo. Corresponden a sectores sin valor económico o leyes de cobre total despreciables (González, 2019).

3.2.6.2 Zona lixiviada

Corresponde a la parte superficial del depósito y se caracteriza por la presencia continua de limonitas o óxidos de hierro, derivadas de la oxidación y lixiviación de la pirita y sulfuros de cobre (Mella, 2022). Es posible encontrar trazas de otras especies minerales oxidadas y/o sulfuradas con cobre, donde las leyes con cobre total en esta zona son menores o iguales a 0,2% CuT (González, 2019).

3.2.6.3 Zona de óxidos

Corresponde a zonas con mineralización de óxidos de cobres compuestos principalmente por crisocola, atacamita, copper wad. Se ubica sobre el techo de sulfuros y bajo la zona lixiviada, presentando leyes mayores a 0,2 % de cobre total (González, 2019).

3.2.6.4 Zona mixta

Se refiere a sectores con mineralización de óxidos de cobre y sulfuros de enriquecimiento secundario, ocurriendo de manera simultánea, posicionándose 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 (Quiroga, 2019).

3.2.6.5 Zona de sulfuros secundarios

Zona con presencia de sulfuros de cobre de origen supérgeno, con presencia de calcosina principalmente y/o covelina (González, 2019). Estas zonas se desarrollan como cuencas de enriquecimiento controladas por estructuras del sistema de fallas Rosario, observándose en las zonas más profundas del dominio SW (Quiroga, 2019).

3.2.6.6 Zona primaria pirítica: Esta zona no se encuentra afectada por procesos secundarios, y representa las partes más distales del sistema porfídico, también llamado halo externo, donde el sulfuro predominante es la pirita, con presencia en trazas de calcopirita (Mella, 2022). González (2019) menciona que la zona presenta alteración cuarzo-sericita, lo que marca la diferencia de la zona pirítica.

3.2.6.7 Zona pirítica: La zona presenta pirita en cantidad superiores al 90 por ciento del total de sulfuros, del mismo modo que la zona primaria pirítica. Se diferencia de esta última debido a la ocurrencia de alteración propilítica (González, 2019).

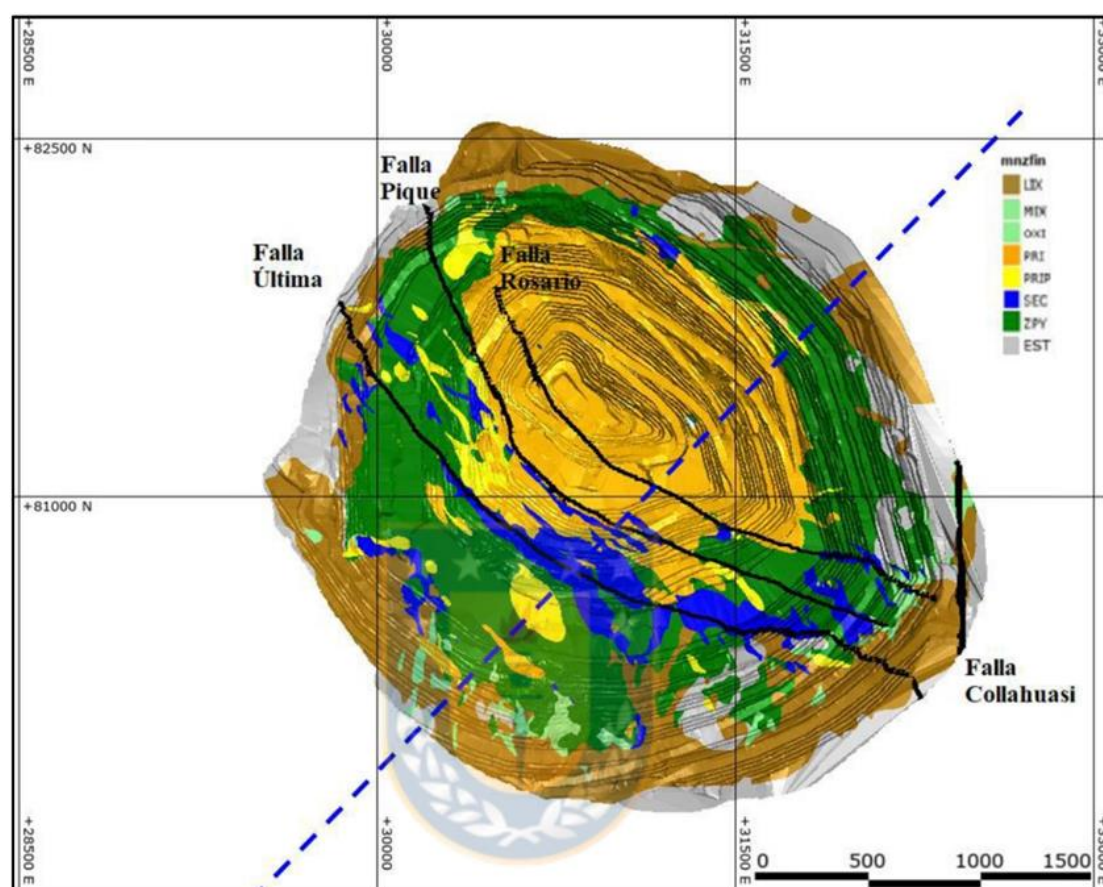


Figura 3.13. Mapa de zonas minerales del rajo Rosario, en vista de planta. Rosario Oeste presenta zonas de mineralización estéril, lixiviadas, oxidadas, mixtas, sulfuros secundarios, primarios piríticos y piríticos. Extraído de Garay (2021).

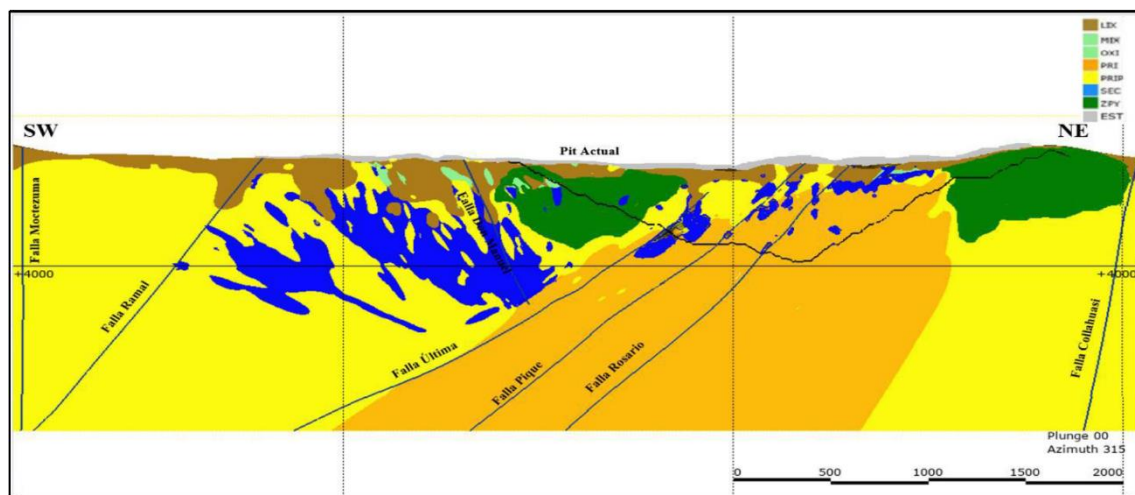


Figura 3.14. Sección representativa de unidades de mineralización del rajo Rosario, con líneas continuas indicando el pit actual. En el sector SW se observan las zonas minerales asociadas al yacimiento Rosario Oeste. Extraído de Garay (2021).

3.3 Unidades Geológicas Geotécnicas (UGT) del yacimiento

En rajo Rosario se han definido 13 unidades geológicas geotécnicas (Figura 3.15) a partir de la integración de información litológica, alteración y mineralización, cuya validación ha sido realizada mediante estimación de propiedades de roca intacta (Quispe, 2019). CMDIC (2021) menciona que el establecimiento de una unidad geotécnica está asociado a un comportamiento mecánico similar, donde el macizo rocoso tendrá un comportamiento característico (CMDIC, 2021).

A continuación, se describirán las unidades geológicas geotécnicas del rajo Rosario basado en el informe de González (2019), Quispe (2019), CMDIC (2021) y Pérez (2023):

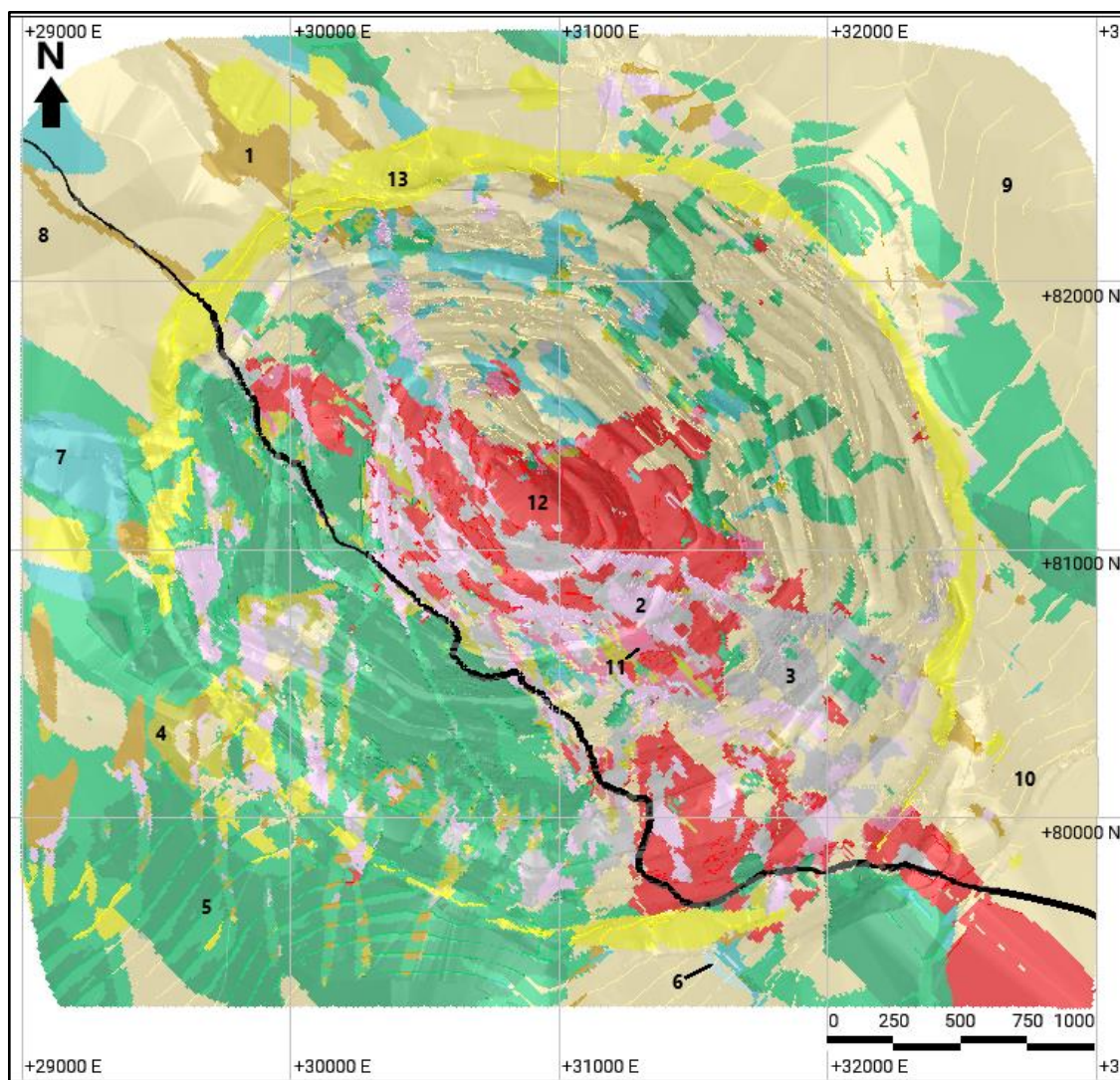


Figura 3.15. Unidades geológicas geotécnicas en mina Rosario. (1) Rocas Lixiviadas, (2) Rocas con Alteración Argílica Intensa, (3) Rocas con Alteración Argílica Moderada, (4) Andesita Cuarzo Sericítica, (5) Andesita Propilítica Potásica, (6) Unidad Sedimentaria Cuarzo Sericítica, (7) Unidad Sedimentaria Propilítica Potásica, (8) Rocas Ácidas Cuarzo Sericítica, (9) Rocas Ácidas Propilítica Potásica, (10) Tobas Rojas Propilítica Potásica/ Fresca, (11) Pórfido Cuarzo Sericita, (12) Pórfido Propilítico Potásico, (13) Gravas. Representación de unidades en vista de planta, considerando la extensión topográfica del modelo. Línea negra corresponde a límite geotécnico. Fuente elaboración propia.

3.3.1 Unidad Geológica Geotécnica Rocas Lixiviadas (RLX)

Corresponde a todas las litologías que, por efecto de la lixiviación, no es posible reconocer la roca original a escala macroscópica (Figuras 3.15 y 3.16). Se caracteriza por la presencia de cavidades producto del proceso de lixiviación. La alteración se observa tanto como una argilización con distintos grados de intensidad, como zonas caracterizadas por la presencia de sílice residual y Alunita, con muchas cavidades. Se ubica principalmente en los sectores altos asociados a estructuras o zonas fracturadas. En la zona mineral lixiviada se reconocen trazas de algunas especies sulfuradas de cobre.

El macizo rocoso se caracteriza por presentar un GSI cuya media es de 37%, con un mínimo y máximo de 20% y 52% respectivamente. De los parámetros de roca intacta, el de resistencia entregó una media de 35 Mpa (megapascal), un rango desde mínimo a máximo de 20 Mpa a 49 Mpa. Su promedio de RQD corresponde 62%, con una variación desde 17% a 94%, mientras que la frecuencia de fracturas dio 14, con una cantidad que oscila entre 8 a 19 como mínimo y máximo.

3.3.2 Unidad Geológica Geotécnica Rocas con Alteración Argílica Intensa (ARGI)

Agrupar a todas las litologías que por efecto de una alteración argílica intensa no es posible reconocer la textura original de la roca a escala macroscópica (Figuras 3.15 y 3.16). Se caracteriza por su alto grado de alteración y fracturamiento, encontrándose en muchos casos disgregada. Esta unidad se asocia principalmente a zonas de falla y tiene mayor expresión en la zona asociada al ambiente epitermal. También se incluyen en esta unidad aquellas rocas que, por el estado avanzado de la lixiviación se encuentran completamente destruidas u obliteradas.

El macizo rocoso en esta unidad entrega un valor de GSI promedio de 15%, cuyo rango de valores varía entre un 8% a 26%, entre el mínimo a máximo. Su parámetro de resistencia de roca intacta señala una variación de rango desde 11 Mpa a 26 Mpa, cuya media es 18 Mpa. Su RQD indica un promedio de 36%, oscilando entre 0% a 81%. La

variable frecuencia de fractura presenta una media de 14, cuya cantidad varía desde 7 a 20.

3.3.3 Unidad Geológica Geotécnica Rocas con Alteración Argílica Moderada (ARGM)

Reúne a todas las litologías que presentan alteración argílica, pero con un grado menor en comparación a la Unidad ARG1 (Figuras 3.15 y 3.16), siendo posible reconocer el tipo litológico en algunas partes de la roca. Caracterizada por la presencia de arcillas como caolinita, montmorillonita y pirofilita, como reemplazo de plagioclasa. Puede haber sericita acompañando a las arcillas. Este tipo de alteración se superpone a otros tipos de alteración con diferentes intensidades. No es posible identificar la alteración secundaria. El tipo de zona mineral predominante es primaria y primaria pirítica.

El macizo rocoso se caracteriza por presentar un rango de GSI entre 16% a 43%, con una media 31%. Su parámetro de resistencia de roca intacta da un promedio de 33 Mpa, con un rango entre 18 Mpa y 48 Mpa. El RQD entrega una media de 62%, que oscila entre 20% a 93%, mientras que la variable frecuencia de fracturas corresponde a una media de 14, con una cantidad variando entre 8 a 20.

3.3.4 Unidad Geológica Geotécnica Andesita Cuarzo Sericítica (ANQS)

Corresponde a las Andesitas con desarrollo de alteración cuarzo-sericita (Figuras 3.15 y 3.16), siendo posible reconocer una alteración secundaria. La alteración cuarzo sericita aparece reemplazando los cristales de plagioclasa y/o feldespato potásico en la masa fundamental, y también como un halo en las paredes de la roca a lo largo de las vetas. Predomina la zona mineral primaria y primaria pirítica. La zona secundaria o lixiviada se puede encontrar en las estructuras.

La unidad rocosa se caracteriza por presentar un rango de GSI entre 23% a 58%, con un promedio de 42%. Su parámetro de resistencia indica un promedio de 53 Mpa, con una variación desde un mínimo a máximo entre 35 Mpa a 71 Mpa. El RQD tiene una media de 71%, variando entre 21% y 98%, mientras que la frecuencia de fracturas corresponde a 17, cuya cantidad va desde 10 a 20.

3.3.5 Unidad Geológica Geotécnica Andesita Propilítica Potásica (ANPK)

Son las andesitas con presencia de alteración biotítica/ feldespato potásico y/o propilítica, siendo posible reconocer una alteración secundaria si la hay (Figura 3.15 y 3.16). La alteración propilítica consta de epidota, actinolita, clorita, calcita y magnetita, mientras que la potásica presenta biotita secundaria, que algunas veces es reemplazada por clorita. La zona mineral primaria y primaria pirítica son predominantes. La zona secundaria o lixiviada se puede encontrar en las estructuras.

El macizo rocoso asociado a esta unidad muestra una media de GSI de 41%, cuyo rango oscila entre 24% a 57%. El parámetro de resistencia de roca intacta indica un rango entre 82 Mpa hasta 145 Mpa, cuya media es de 113 Mpa. La media del RQD es de 74%, que va desde 39% a 98%, mientras que la frecuencia de fracturas varía entre 4 a 17, cuya media es de 11.

3.3.6 Unidad Geológica Geotécnica Sedimentaria Cuarzo Sericítica (USQS)

Esta unidad comprende sedimentos indiferenciados, sedimentos volcanoclásticos y sedimentos calcáreos. Generalmente se presentan en secuencias que se intercalan con dacitas y andesitas. Caracterizada por la presencia de cuarzo-sericita que aparecen reemplazando los cristales de plagioclasa y/o feldespato potásico en la masa fundamental, asimismo como un halo en las paredes de la roca a lo largo de las vetas (Figuras 3.15 y 3.16). Predomina la zona mineral primaria y primaria pirítica.

El macizo rocoso asociado a esta unidad señala un rango de GSI que varía entre 21% a 58%, cuya media es de 40%. Su parámetro de resistencia de roca intacta oscila entre 46 Mpa a 67 Mpa, con un promedio de 56 Mpa. La variable RQD indica una media de 72%, que va desde 28% a 98%. En el de la frecuencia de fracturas en una dirección de dada, su media es de 10, cuya cantidad oscila entre 4 a 18.

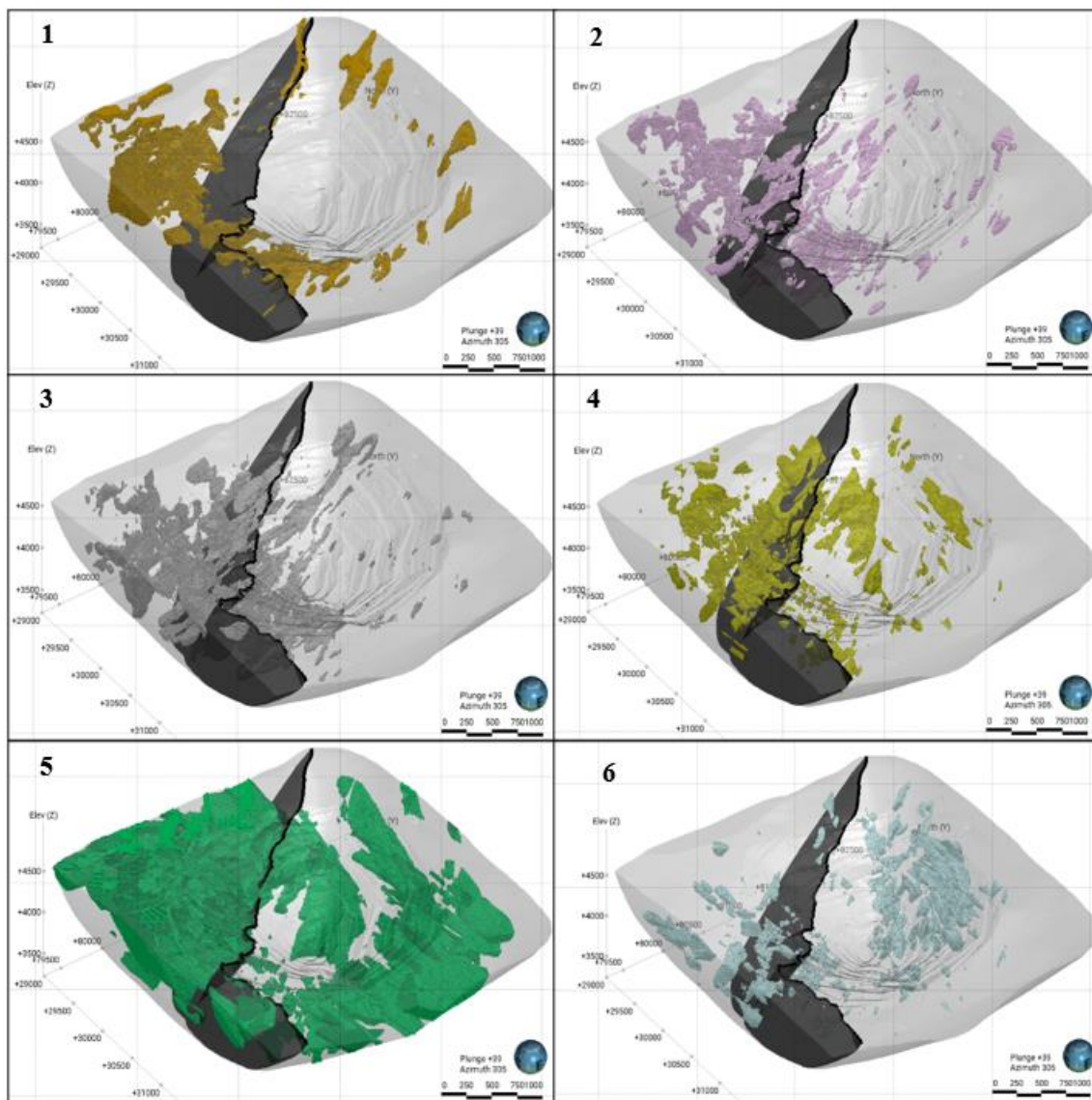


Figura 3.16. Distribución espacial de unidades geológicas geotécnicas presentes en Rosario. (1) Rocas Lixiviadas, (2) Rocas con Alteración Argílica Intensa, (3) Rocas con Alteración Argílica Moderada, (4) Andesita Cuarzo Sericítica, (5) Andesita Propilítica Potásica, (6) Unidad Sedimentaria Cuarzo Sericítica. Línea negra indica límite geotécnico referencial entre ambientes geológicos. Fuente elaboración propia.

3.3.7 Unidad Geológica Geotécnica Sedimentaria Propilítica Potásica (USPK)

Comprende sedimentos indiferenciados, sedimentos volcanoclásticos y sedimentos calcáreos. Generalmente se presentan en secuencias que se intercalan con dacitas y andesitas. Se reconoce presencia de alteración biotítica/ feldespato potásico y/o

propilítica, siendo posible hallar alteración secundaria. La alteración potásica está caracterizada por la presencia de biotita secundaria, que algunas veces es reemplazada por clorita, y por la presencia de feldespato potásico. En la alteración propilítica es característica la asociación de los minerales clorita, epidota, albita y calcita. Predomina la zona primaria y primaria pirítica, mientras que la secundaria o lixiviada se puede encontrar en las estructuras (Figuras 3.15 y 3.17).

La unidad rocosa se caracteriza por presentar un valor promedio de GSI de 45%, cuyo rango está entre 27% a 63%. Su parámetro de resistencia de roca intacta oscila entre 76 Mpa hasta 155 Mpa, con una media de 115 Mpa. La variable RQD arroja un valor promedio de 77%, que va desde 44% a 99%, mientras que la frecuencia de fracturas corresponde a un valor de 12, variando entre 4 a 19 como cantidad mínima y máxima.

3.3.8 Unidad Geológica Geotécnica Rocas Ácidas Cuarzo Sericita (RAQS)

Las rocas ácidas están representadas en su mayor porcentaje por tobas y dacitas, y en menor medida por pequeños cuerpos de rocas volcánicas indiferenciadas de composición riolítica. Caracterizada por la presencia de sericita - cuarzo que aparecen reemplazando los cristales de plagioclasa y/o feldespato potásico en la masa fundamental, y también como un halo en las paredes de la roca a lo largo de las vetas. Variaciones en los contenidos de cuarzo puede generar cambios en la resistencia de la roca. Predomina la zona primaria y primaria pirítica, mientras que la secundaria o lixiviada se puede encontrar en las estructuras (Figuras 3.15 y 3.17).

El macizo rocoso asociado a esta unidad indica un promedio de GSI de 43%, cuyo rango oscila entre 26% a 61%. Su parámetro de resistencia de roca intacta señala una media de 77 Mpa, con una variación desde mínima a máxima entre 49 Mpa a 105 Mpa. El RQD entrega un valor medio de 76%, que va desde 43% a 98%, mientras que la frecuencia de fracturas corresponde a 14, cuya cantidad varía entre 4 y 19.

3.3.9 Unidad Geológica Geotécnica Rocas Ácidas Propilítica Potásica (RAPK)

Las rocas ácidas están representadas en su mayor porcentaje por tobas y dacitas, y en menor medida por pequeños cuerpos de rocas volcánicas indiferenciadas de composición riolítica. Es posible reconocer la alteración biotítica /feldespato potásico y/o propilítica. La alteración potásica está caracterizada por la presencia de biotita secundaria, que algunas veces es reemplazada por clorita, y por la presencia de feldespato potásico. En la alteración propilítica es característica la asociación de los minerales clorita, epidota albita y calcita. Predomina la zona mineral primaria y primaria pirítica. La zona secundaria o lixiviada se puede encontrar en las estructuras (Figuras 3.15 y 3.17).

La unidad rocosa presenta un valor promedio de GSI correspondiente a 43%, con un rango entre 26% a 59%. El parámetro geomecánico de resistencia de roca intacta indica una media de 151 Mpa, cuya variación desde un mínimo a máximo es de 113 Mpa a 190 Mpa. La variable RQD entrega una media de 74%, oscilando entre un 34% a 98%, mientras que la frecuencia de fracturas en una dirección dada, presenta un promedio de 14, cuya cantidad varía entre 7 a 20.

3.3.10 Unidad Geológica Geotécnica Tobas Rojas Propilítica Potásica/ Fresca (RAPK+)

Corresponde a tobas rojas con desarrollo de alteración biotítica/potásica y/o propilítica. Al este en la parte superior de la secuencia volcanoclástica, se dispone una ignimbrita riolítica soldada débilmente, pómez de color marrón oscuro, denominada toba Roja (TBR). La presencia de alteración propilítica es débil debido al alto contenido de cuarzo presente en la roca. Localmente se observa roca fresca. Predomina la zona mineral primaria y primaria pirítica, mientras que la secundaria y lixiviada se puede encontrar en las estructuras (Figuras 3.15 y 3.17).

El macizo rocoso asociado a esta unidad presenta un GSI promedio de 39%, con un rango entre 24% a 52%. El parámetro de resistencia de roca intacta indica una media de 159 Mpa, cuyo rango abarca desde un mínimo hasta un máximo entre 87 Mpa a 231 Mpa. El RQD entrega un valor promedio de 67%, oscilando desde un 22% a 95%, mientras que la

variable frecuencia de fracturas en una dirección dada, presenta una media de 11, cuya cantidad varía desde 10 a 19.

3.3.11 Unidad Geológica Geotécnica Pórfido Cuarzo Sericita (PQS)

Comprende los pórfidos Rosario y Collahuasi, caracterizado por la presencia de alteración cuarzo sericita. El Pórfido Collahuasi es de composición granítica de grano grueso, con masa fundamental menor a un 25%, localmente puede ser fanerítico. El Pórfido Rosario señala una composición granodiorítica. La alteración propilítica es débil, debido al alto contenido en cuarzo presente en la roca. La alteración cuarzo – sericítica se observa reemplazando los cristales de feldespato en la masa fundamental, y también como un halo en las paredes de la roca a lo largo de las vetas. Predomina la zona mineral primaria y primaria pirítica, mientras que la secundaria o lixiviada se puede encontrar en las estructuras (Figuras 3.15 y 3.17).

El macizo rocoso asociado a esta unidad señala un promedio de GSI correspondiente a 45%, cuyo rango oscila entre 27% y 61%. El parámetro de resistencia de roca intacta indica una media de 77 Mpa, con un rango entre 57 Mpa hasta 97 Mpa. La variable RQS tiene una media de 79%, que va desde 44% a 99%, mientras que la frecuencia de fracturas presenta una media de 11, cuya cantidad varía entre 7 a 16.

3.3.12 Unidad Geológica Geotécnica Pórfido Propilítico Potásico (PPK)

Corresponde a los pórfidos Rosario y Collahuasi, caracterizados por la presencia de alteración propilítica – potásica (Figuras 3.15 y 3.17). El Pórfido Collahuasi es de composición granítica de grano grueso, con masa fundamental menor a un 25%, localmente puede ser fanerítico. El Pórfido Rosario señala una composición granodiorítica. La alteración potásica está caracterizada por la presencia de biotita secundaria, que algunas veces es reemplazada por clorita, y por la presencia de feldespato potásico. En la alteración propilítica es característica la asociación de los minerales clorita, epidota, albita y calcita. Predomina la zona mineral primaria y primaria pirítica, mientras que la secundaria o lixiviada se puede encontrar en las estructuras.

El macizo rocoso asociado a esta unidad presenta un GSI promedio de 48%, con un rango entre 31% a 65%. El parámetro de resistencia de roca intacta indica una media de 142 Mpa, con un valor mínimo de 105 Mpa, alcanzando un máximo de 179 Mpa. El RQD señala un valor promedio de 84%, que va desde 56% a un 100%. En el caso de la variable frecuencia de fracturas su media es de 11, cuya cantidad oscila entre 6 a 17.

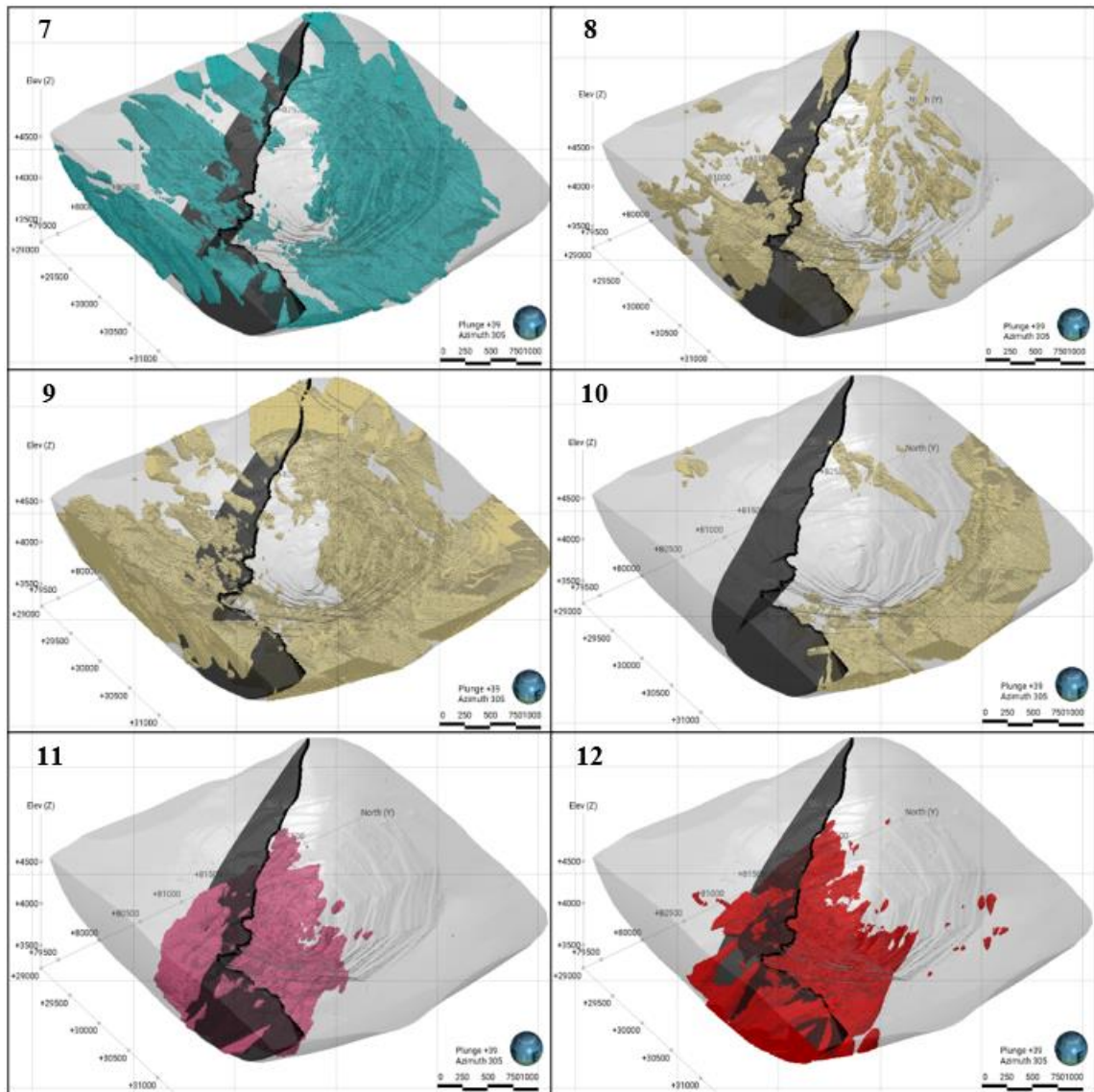


Figura 3.17. Distribución espacial de unidades geológicas geotécnicas en Rosario. (7) Unidad Sedimentaria Propilítica Potásica, (8) Rocas Ácidas Cuarzo Sericítica, (9) Rocas Ácidas Propilítica Potásica, (10) Tobas Rojas Propilítica Potásica/ Fresca, (11) Pórfido Cuarzo Sericita, (12) Pórfido Propilítico Potásico. Línea negra indica límite referencial entre ambientes geológicos.

3.3.13 Unidad Geológica Geotécnica Gravas (GRV)

Compete a gravas, paleo gravas o material de relleno superficial, no consolidado o débilmente consolidado presente en la parte alta del depósito (Figuras 3.15 y 3.18).

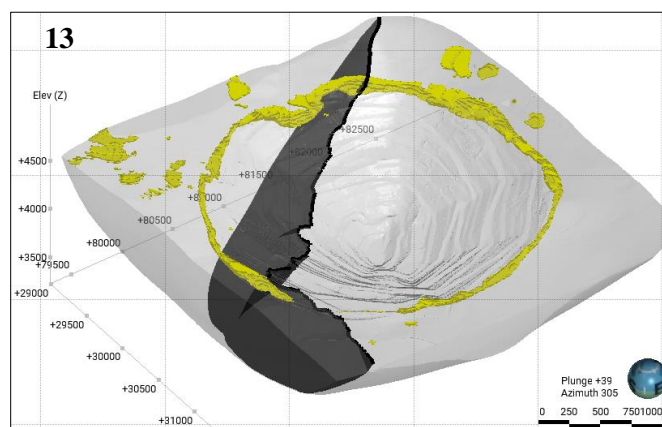


Figura 3.18. Distribución espacial de unidad geológica geotécnica Gravas (GRV). Línea negra indica límite geotécnico referencial entre ambientes geológicos. Fuente elaboración propia.

Capítulo 4. Metodología

4.1 Etapa de gabinete 1

4.1.1 Recopilación bibliográfica

En esta etapa se llevó a cabo la recopilación bibliográfica de trabajos efectuados en el distrito minero Collahuasi, con especial énfasis en el yacimiento de estudio, que incluyó una búsqueda y revisión de tesis, publicaciones, libros, presentaciones, reportes de la compañía, cartas geológicas y todo documento que proporcione información respecto al área. Además, en el marco teórico se buscaron publicaciones de índole científica relacionada a yacimientos tipos pórfidos cupríferos y epitermales de alta sulfidación, sobre su génesis, evolución, configuración tectónica, alteración, mineralización, y ocurrencias. De igual modo, se indagó respecto a parámetros geotécnicos, de rocas intactas y sistema de clasificación de parámetros geotécnicos usado para rajo Rosario.

4.1.2 Verificación y validación de la base de datos histórica de sondajes y datos estructurales

Se trabajó con la base de dato de sondajes del proyecto ROSBD151222 que incluyó registros geológicos relacionados a litología, alteración, zona mineral y estructuras. También, se incorporó la base de sondajes del proyecto ROSBD071222_GEOTEC_V3 que contempló información perteneciente a parámetros geotécnicos, cuyas variables seleccionadas para importación con sus respectivos códigos fueron, condición de discontinuidades (JC), rock quality designation (RQD) y frecuencia de fracturas (FF). El programa identificó al momento del levantamiento de información, errores y advertencias en la base de datos, que debían ser verificados y arreglados en caso de ser necesario para continuar con el modelamiento. Un error significa que Leapfrog ha detectado algo en la tabla que está en conflicto, de tal manera que le impide trazar los datos, por lo tanto, no mostrará sondajes, puntos o cualquier otro dato considerado como tal (Seequent, 2020). El proyecto que contenía la información de los parámetros geotécnicos, en la tabla de survey e intervalos presentaban la señal de error, los cuales fueron verificados y validados. Por ejemplo, la tabla survey mostró 11 sondajes con error, relacionados a valores de profundidad (depth) duplicados en las filas (Figura 4.1), lo que impidió que la información fuera visualizada en la vista de escena, por consiguiente, se decidió ignorar aquellas filas duplicadas para subsanar el problema.

Group errors by: Hole

Errors (319)

- DDH534 (16)
 - survey (16)
- DDH547 (1)
 - survey (1)
- DDH558 (17)
 - survey (17)
 - Duplicate Survey Depths (17)
- DDH598 (25)
 - survey (25)
 - Duplicate Survey Depths (25)
- DDH599 (18)
 - survey (18)
 - Duplicate Survey Depths (18)
- DDH600 (20)
- DER142 (60)
- DER157 (45)
- DER48 (52)
- DER75 (45)
- DER_MP-03 (20)

Current Error (in table survey) Showing holeid 'DDH534' only

Ignored	id	holeid	depth	dip	azimuth	srvtyp
<input type="checkbox"/>	13090	DDH534	0.0	74.29	41.41	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13091	DDH534	0.0	74.29	41.41	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13092	DDH534	10.0	74.49	41.5	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13093	DDH534	10.0	74.49	41.5	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13094	DDH534	20.0	74.69	41.58	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13095	DDH534	20.0	74.69	41.58	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13096	DDH534	30.0	74.71	41.46	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13097	DDH534	30.0	74.71	41.46	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13098	DDH534	40.0	74.72	41.35	GIROSCOPIO

Current Conflict (in table survey) Showing holeid 'DDH534' only

Ignored	id	holeid	depth	dip	azimuth	srvtyp
<input type="checkbox"/>	13090	DDH534	0.0	74.29	41.41	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13091	DDH534	0.0	74.29	41.41	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13092	DDH534	10.0	74.49	41.5	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13093	DDH534	10.0	74.49	41.5	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13094	DDH534	20.0	74.69	41.58	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13095	DDH534	20.0	74.69	41.58	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13096	DDH534	30.0	74.71	41.46	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13097	DDH534	30.0	74.71	41.46	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	13098	DDH534	40.0	74.72	41.35	GIROSCOPIO

Figura 4.1. Ilustración de errores asociados a duplicados en la tabla survey. La parte izquierda representa los errores agrupados por sondajes, donde cada uno indica la cantidad de filas problemáticas entre paréntesis. Las dos tablas de la parte derecha muestran el holeid DDH534 con sus respectivas filas duplicadas. Fuente elaboración propia.

Advertencia (warning) significa que Leapfrog ha detectado algo que parece cuestionable, no obstante, seguirá mostrando los objetos que poseen la señal (Seequent, 2020). Tanto las tablas de intervalos como survey exhibían dicha marca, así que, se analizaron y validaron cada uno de los casos por separados. Como ejemplo, la tabla survey mostró posibles sondajes duplicados (possible duplicate hole), que para este caso hizo referencia a dos sondajes con distinto nombre holeid, pero que ocupaban la misma posición espacial en un determinado intervalo (Figura 4.2). Esto ocurre cuando la distancia entre dos puntos de collar es menor a 0,1 unidades, con distancias de profundidades en el survey menor a 0,1 unidades, y tanto el ángulo para dip como azimuth, son menores o iguales a 1 grado entre sondajes (Seequent, 2020). A modo de solución se ignoró el sondaje DDHR541, dado que no aparece en la tabla de geotecnia, lo que implica que no hay información al

respecto. Las tablas de intervalos como survey exhibían la marca warning, así que, se analizaron y validaron cada uno de los casos por separados.

Group errors by: Hole ^ v Edit

Errors
No errors

Warnings (16)
AR2195 (1)
survey (1)
Wedges found (possible duplicate hole) (1)
row 1, conflicts row 46242

C-24 (1)
C-40 (1)
C-54 (1)
C-60 (1)
C-72 (1)
CG-10 (1)
CG-11 (1)
CG-13 (1)
CG-15 (1)
CG-24 (1)
CG-25 (1)
CRH-1 (1)
CRH-2 (1)

Current Error (in table survey) Showing holeid 'AR2195' only

Ignored	id	holeid	depth	dip	azimuth	srvtyp
<input type="checkbox"/>	1	AR2195	0.0	59.85	15.56	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	2	AR2195	10.0	59.73	15.87	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	3	AR2195	20.0	59.61	16.18	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	4	AR2195	30.0	59.49	16.5	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	5	AR2195	40.0	59.37	16.81	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	6	AR2195	50.0	59.25	17.12	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	7	AR2195	60.0	59.05	16.96	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	8	AR2195	70.0	58.84	16.81	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	9	AR2195	80.0	58.64	16.65	GIROSCOPIO

Current Conflict (in table survey) Showing holeid 'DDHR541' only

Ignored	id	holeid	depth	dip	azimuth	srvtyp
<input type="checkbox"/>	46242	DDHR541	0.0	60.26	15.18	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	46243	DDHR541	10.0	60.08	15.4	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	46244	DDHR541	20.0	59.9	15.63	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	46245	DDHR541	30.0	59.71	15.85	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	46246	DDHR541	40.0	59.53	16.08	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	46247	DDHR541	50.0	59.35	16.3	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	46248	DDHR541	60.0	59.08	16.25	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	46249	DDHR541	70.0	58.82	16.2	GIROSCOPIO
<input type="checkbox"/>	46250	DDHR541	80.0	58.55	16.16	GIROSCOPIO

Figura 4.2. Advertencias identificadas en tabla survey. La parte izquierda, muestra la señal warnings agrupados por sondajes, correspondiendo a la de tipo “posible duplicado”. Las tablas derechas, representan los sondajes analizados. Notar que las coordenadas espaciales como profundidad son iguales y que los valores tanto de dip, como azimuth no varían más de 1°. Fuente elaboración propia.

Cabe destacar que los valores identificados como inválidos, también fueron examinados y posteriormente validados. Los valores catalogados como no positivos, se omitieron para el caso de la variable geotécnica frecuencia de fracturas y RQD, ya que generalmente se incorpora el valor -99 para señalar que hay tramos sin información. En cambio, el valor 0 se mantuvo para el modelamiento.

Algunos datos estructurales de las fases 11, 12, 13, 14 y 15 presentaron errores asociados a duplicación de datos, siendo la fase 13 la que más errores de este tipo presentó. Entre las fallas principales, Rosario fue la única que presentó datos duplicados, sin embargo,

solamente fueron dos valores. Se decidió ignorar aquellas filas duplicadas para dar solución a la problemática y que los datos fueran representados en la vista de escena.

4.2 Trabajo en terreno

Esta etapa consistió en el reconocimiento y captura de la información en terreno referente a parámetros geológicos-geotécnicos. Se elaboró un reconocimiento de sondajes asociados al área de estudio en el rajo, con la finalidad de analizar y validar la información recopilada, para la confección de tres secciones representativas de modelamiento.

4.2.1 Reconocimiento de sondajes

Se efectuó un reconocimiento de sondajes según el estándar establecido por la empresa, que consiste en generar un registro a escala 1:100 de los diferentes parámetros geológicos y geotécnicos observados en el testigo. El soporte de registro de los parámetros se realizó en base a quiebres naturales, tal como contactos litológicos, cambios en las proporciones volumétricas de minerales de alteración, mineralización y condición estructural.

El propósito del chequeo fue recopilar información referente a litología, tipo de alteración dominante, zona mineral y condición de estructuras, que corresponden a parámetros que influyen en la definición de unidades geológicas-geotécnicas. Los parámetros geotécnicos considerados fueron la frecuencia de fracturas por metro de longitud, en una dirección dada (FF), rock quality designation (RQD) y joint condition (JC), considerados como variables relevantes para obtener el GSI propuesto en la fórmula de Diederichs (2013). Se utilizó un formato de cartilla con los criterios y codificaciones que se describen a continuación para parámetros geológicos.

- Litología

La revisión de unidades litológicas se basó en la codificación existente para la base de datos de AcQuire, que contemplan códigos históricos usados en la compañía, representados en la siguiente tabla:

Tabla 4.1. Código para mapeo geológico de litología.

LITOLOGIA				
Lito Histórica	Nombre	Abreviación	Código	Descripción
USED	Arenisca Fina	ARF	91	Unidad Sedimentaria
USED	Arenisca Media	ARM	92	
USED	Arenisca Gruesa	ARG	93	
USED	Limolita	LIM	94	
USED	Brecha Sedimentaria	BRS	95	
AND	Andesita	AND	80	Andesita
OCO	Ocoita	OCO	81	Ocoita
TOB	Toba Lítica	TOL	52	Toba
TOB	Toba Cristalina	TOC	53	
TOB	Toba Vítreo	TOV	54	
PCO	Pórfido Collahuasi	PCO	31	Pórfido Collahuasi
PRO	Pórfido Rosario	PRO	30	Pórfido Rosario
PDIO	Pórfido Diorítico	PDIO	34	Pórfido Diorítico
PUJ	Pórfido Ujina	PUJ	45	Pórfido Ujina
DAC	Dacita	DAC	51	Dacita
BRH	Brecha Hidrotermal	BRH	20	Brecha Hidrotermal
BRF	Brecha de Falla	BRF	21	Brecha de Falla
DIO	Diorita	DIO	25	Diorita
GRA	Gravas	GRA	5	Gravas
IGN	Ignimbrita	IGN	10	Ignimbrita
CIN	Ignimbrita Cinerítica	CIN	15	
PTAR	Pórfido Tardío	PTAR	33	Pórfido Tardío
RIO	Riolita	RIO	60	
BRV	Brecha Volcánica	BRV	22	Brecha Volcánica
PIND	Pórfido Indiferenciado	PIND	40	Pórfido indiferenciado
-99	Sin Información		-99	Sin Información

- Alteración

La superposición de eventos hidrotermales consideró un reconocimiento basado en proporciones de alteración y cambios en los quiebres que puedan corresponder al tipo de alteración o volumen predominante entre las existente. Su codificación se ilustra en la respectiva tabla.

Tabla 4.2: Ítem relacionado al tipo de alteración

ALTERACIÓN				
Alteración Histórica	Nombre	Abreviación	Código	Descripción
K	Potásica Feldespática	K	77	Potásica Feldespática
B	Potásica Biotítica	B	78	Potásica Biotítica
P	Propilítica	P	65	Propilítica
QS	Cuarzo Sericítica	QS	35	Cuarzo Sericítica
SGV	Sericita Gris Verde	SGV	50	Sericita Gris verde
C	Clorita	C	51	Clorita
A	Argílica	A	20	Argílica
AA	Argílico Avanzado	AA	21	Argílico Avanzado
SK	Skarn	SK	76	Skarn
F	Fresca	F	66	Fresca
HNF	Hornfels	HNF	79	Hornfels
-99	Sin Información		-99	Sin Información

- Mineralización

Representado por zonificaciones de mineralización, que corresponde a la asociación mineralógica de mena observada en un tramo, definida por la proporción de sulfuros de fierros y/o cobre, óxidos de cobre y hierro. Se considera en algunas zonas el contenido porcentual de Cu (CMDIC, 2021).

Tabla 4.3. Ítems de mineralización con su respectiva codificación y mineralización.

MINERALIZACIÓN			
SIGLA	Nombre	Abreviación	Código
LIXP	Lixiviado	Lixiviado Pervasivo	21
LIXVS	Lixiviado	Lixiviado Vuggy Silica	22
LIXE	Lixiviado	Lixiviado en Estructuras	23
PRI	Primario	Primario	80
SEC	Secundario	Secundario	50
PRIPY	Primario Pirítico	Primario Pirítico	100
OXI	Óxidos	Óxidos	30
MIX	Mixto	Mixto	40
ZPY	Zona Pirítica	Zona Pirítica	101
EST	Estéril	Estéril	10
-99	Sin información	Sin información	-99
CPY-BN	Primario Calcopirítico-Bornítico	Primario	81
PY-BN	Primario Pirítico-Bornítico	Primario	82

4.3 Trabajo de gabinete

4.3.1 Selección de secciones representativas

El yacimiento Rosario está dividido en 50 secciones tipo, numeradas desde el -6 al 43 en dirección noroeste, cuya abreviatura NW acompaña al número de cada sección. La distancia de separación entre secciones es de 70 m, con azimut de 315° y una distancia de influencia de 35 m por cada lado de sección, de manera que permite considerar a nivel general toda la información del rajo, sin que esta se repita o se solape. En base a dichas secciones, se seleccionaron 3 para la realización del trabajo, correspondiente a 17NW, 20NW y 28NW (Figura 4.3). Los criterios definidos para hallar las más representativas fueron:

- Abarcar la mayor amplitud posible hacia el sur: dado que la extensión de los modelos geológicos actuales que permiten definir unidades geológicas-geotécnicas, están limitados al modelo topográfico del año 2022, por lo que no contempla toda la extensión de información actual de sondajes hacia el sur. Por ende, se prioriza aquellas secciones que abarquen una mayor extensión hacia el dominio epitermal, para una mejor caracterización del ambiente.
- Cantidad considerable de sondajes: entre mayor sea la cantidad de sondajes representadas en la sección, más enriquecido estará el modelo y, por lo tanto, menor será el nivel de incertidumbre. Se prima aquellas secciones con mayor cantidad de sondajes en su espacio de influencia.
- Tener espacios amplios: preferentemente carentes de estructuras para definir estructuras, además de, caracterizar e interpretar condiciones estructurales mediante la relación de parámetros geológicos y geotécnicos.
- Mayor cantidad de intervalos de sondajes, cuyos datos se encuentren en sistemas de clasificación que indiquen una reducción en la calidad del macizo rocoso. Por ejemplo; valores de intervalos de frecuencia de fracturas en la categoría de macizo rocoso muy fracturado o extremadamente fracturados.

En base a los criterios expuestos anteriormente, las secciones numeradas desde -6 al 6 y 30 al 43, fueron descartadas, puesto que su extensión hacia el dominio SW se reduce. Aquellas que estén más cercanas a los extremos NW y SE, tendrán una extensión inferior en los límites del modelo, debido a que las secciones presentan una orientación diagonal, como también, la cantidad de sondajes se verá reducida. Las restantes por defecto van desde la enumeración 7 al 29, quedando seleccionadas las 3 que mejor se adaptaban al estándar de criterios (Figura 4.3).

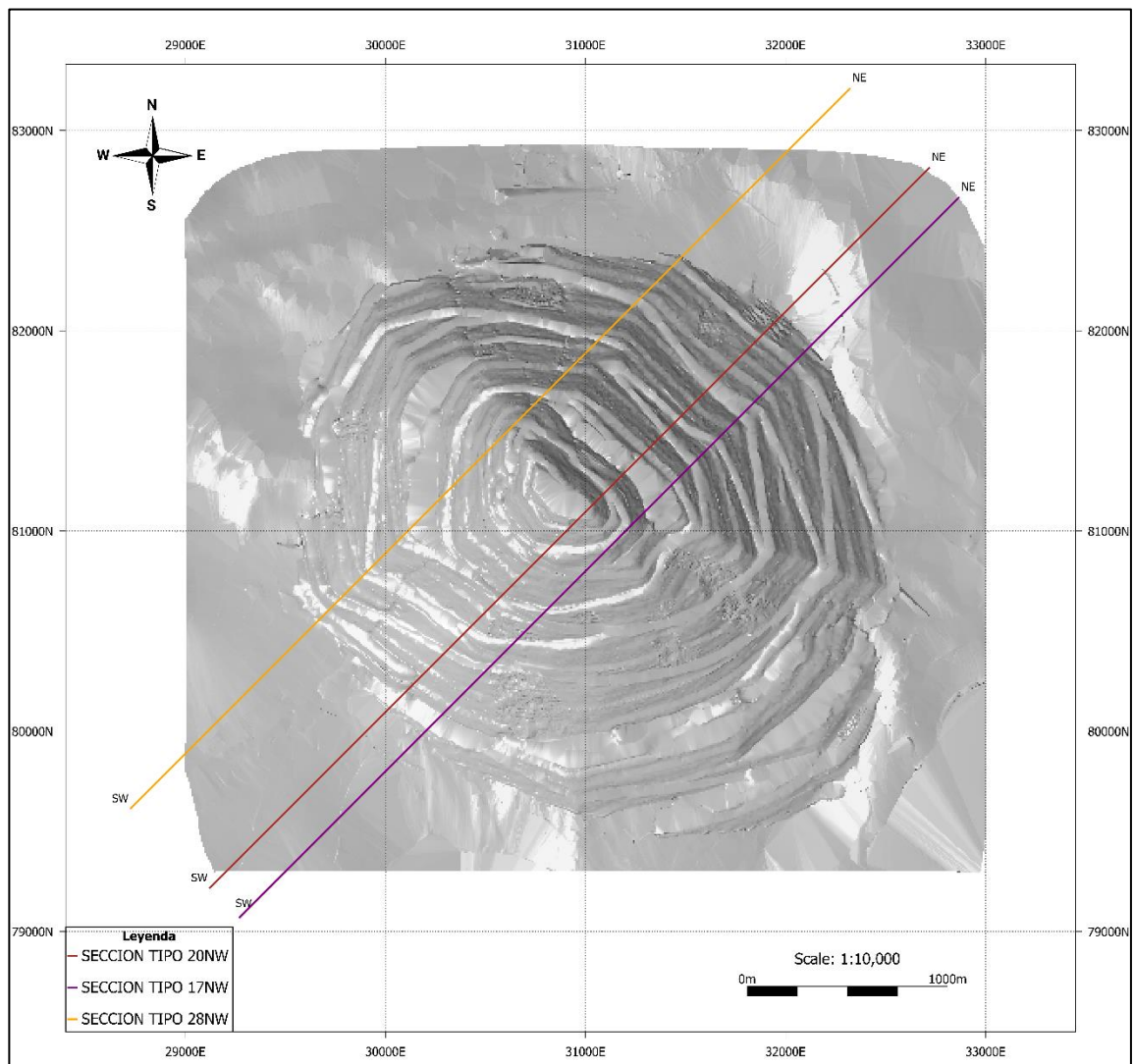


Figura 4.3: Secciones representativas, cortando la topografía de la extensión del modelo, en vista de planta. Fuente elaboración propia.

4.3.2 Confección de secciones

Una vez los datos obtenidos de la etapa de terreno fueron verificados, validados y las tres secciones fueron seleccionadas, se procedió a su confección. Las variables geológicas correspondieron a litología, alteración y zona mineral, que son las encargadas de definir las unidades geológicas-geotécnicas del rajo. Posteriormente, se incorporó las variables geotécnicas frecuencia de fracturas (FF), rock quality designation (RQD), índice de resistencia geológica (GSI) y condición de discontinuidades (JC), que son representadas a través de los sondajes de las secciones, ilustrando aquellos que están netamente en categorías que indican una calidad de macizo rocoso desde muy mala a mala, para poder representar dichas zonas. Además, se incorporó el levantamiento de las proyecciones estructurales. Todo el conjunto permite tener una representación cualitativa de las interacciones entre parámetros geotécnicos con litología, alteración, mineralización y estructuras. Con la finalidad de representar dicha variabilidad geológica-geotécnica, se ilustrará su distribución y magnitud espacial, indicando las principales características reconocidas en las secciones de interés asociadas a su respectivo ambiente, como el tipo de litología, alteración y mineralización predominante, condición estructural y ocurrencia de las variables geotécnicas.

En el apartado de resultados se representa la variable frecuencia de fracturas en los sondajes de las secciones representativas (Figuras 5.1, 5.2 y 5.3), donde las ilustraciones de las otras variables geotécnicas se encuentran en el apartado de anexos (Figuras 9.1 a 9.9).

4.3.3 Análisis estadístico de datos de variables geotécnicas de interés

Destacar lo mencionado anteriormente, que se trabaja con una base de datos de mapeo geotécnico compositada, que posee información más allá de los límites de los modelos geológicos ilustrados, pero para efectos de este estudio se considera aquellos sondajes que se posicionen dentro de las áreas de influencias de las secciones representativas. También, agregar que todos los intervalos de sondajes de las variables geotécnicas de interés poseen un código de unidad geológica geotécnica (UGT) que los representa, sin excepción.

Para la elaboración de los gráficos y el estudio del comportamiento de los promedios de poblaciones de valores en sus respectivas secciones, se generaron zonas equidistantes, numeradas del 1 al 10, definidas como “clases”, que se obtienen al determinar el rango (diferencia entre la coordenada mayor y menor) de las coordenadas asociadas a cada variable de estudio en particular, tanto en la trayectoria de cotas (eje z), como en la N45°E (Figura 4.4). El resultado obtenido es dividido en 10 partes iguales, dando como resultado las denominadas “clases”. Esto permite levantar la información de los sondajes asociados a su respectiva clase para cada sección representativa, posibilitando, además, estudiar el comportamiento espacial de los promedios de cada clase, con sus cambios de tendencias (Figura 4.4). En el apartado de anexos figuras 9.10 y 9.11 se ilustran las clases generadas en las secciones 17NW y 20NW.

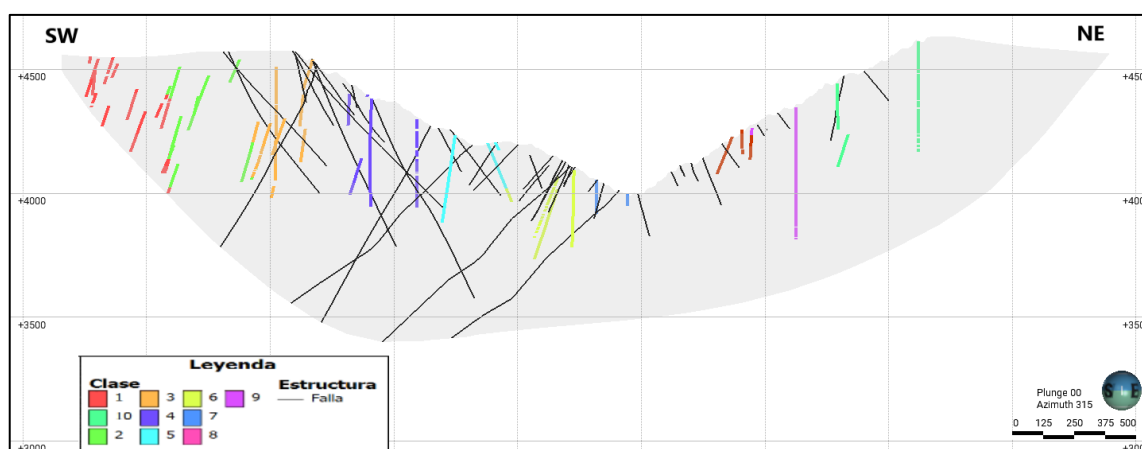


Figura 4.4. Ilustración espacial de las clases generadas y definidas en la sección 28NW (trayectoria N45°E), con su respectiva distribución estructural. Fuente elaboración propia.

Dado que las secciones presentan una trayectoria N45°E, las coordenadas tanto para el eje x (oeste – este) e y (norte – sur) son estudiadas en conjuntos, es decir, desde SW a NE (trayectoria N45°E). Cabe señalar que el desplazamiento desde el extremo SW comienza con la clase 1 y finaliza con la número 10 en el extremo NE (Figura 4.4), donde la amplitud que presenta cada clase corresponde a 339 m. En el eje z (cotas), el desplazamiento comienza con la clase 1 indicando la zona más profunda, hasta llegar a la zona más superficial representada por la numeración 10, con una amplitud de clases de 88 m

(Anexos, Figura 9.10). Asimismo, cada numeración de clase en los gráficos está posicionada en la parte central de su amplitud total.

Para el análisis estadístico de datos se emplearon gráficos de deriva espacial, cuya función permite representar el comportamiento espacial de un conjunto de datos, a través del sistema de coordenadas x, z e y. El estudio del comportamiento espacial de población de valores busca identificar en cada sección aquellos promedios de clases de variables geotécnicas, cuyo valor indique zonas con características categóricas asociada a macizo rocoso de menor calidad, es decir, que evidencien frecuencia de fracturas superior a 11 en cantidad (características de macizo muy fracturado a extremadamente fracturado), RQD entre 0% a 50% (calidad de roca muy mala a mala), joint condition entre 0 a 6 (asociada a macizo de muy mala calidad a mala) y GSI entre 0% a 40%. Del mismo modo, permite identificar en cada unidad geológica geotécnicas definida, sus respectivas porciones de volúmenes que presenten menor calidad de macizo rocoso entre las clases de cada sección de estudio, como también, elaborar predicciones de calidad de macizo en el área generada entre las secciones de trabajo.

Para la realización de predicciones de áreas con menor calidad de macizo entre secciones, en el software de modelamiento Leapfrog Geo las clases numéricas homólogas entre secciones fueron unidas, generando cuerpos equidistantes similares entre sí, con sus respectivas tonalidades características, ilustrando un desplazamiento desde SW a NE, con un ángulo menor a 45° hacia el noroeste en vista de planta, siendo representadas en un denominado “modelo de clases”. La finalidad es identificar uno o más cuerpos que presenten una trayectoria a nivel general de macizo rocoso de menor calidad, sin embargo, se debe cumplir que en el análisis de gráficos las clases numéricas iguales entre secciones correspondan a una de las zonas de menor calidad, por lo tanto, los promedios de poblaciones de valores de variables geotécnicas en dichas clases deben presentar características categóricas asociadas a alto grado de fracturamiento y macizo rocoso de menor calidad, en gran parte de los volúmenes de unidades geológicas geotécnicas posicionadas en dichas clases homólogas.

Capítulo 5. Resultados

5.1 Secciones representativas

En las secciones a nivel general se observa una zona central con forma de pseudo núcleo, cuyo sector inferior está constituido por una alteración biotítica y potásica, sobre estos y con abundante predominio en el centro suroeste (Figuras 5.2 y 5.3) como noreste (Figura 5.1), se ilustra la alteración sericita gris verde en tonalidad verde claro, mientras que de forma continua al suroeste, se aprecia la cuarzo-sericítica, que también se dispone tanto en el dominio NE como SW, con una menor abundancia en este último. Se reconocen tres grandes estructuras con manteos hacia el suroeste que atraviesan la parte central y centro suroeste, correspondientes a fallas Rosario, Pique y Última (Figuras 5.1 a 5.3), las cuales están rodeadas de alteración argílica. Cabe destacar que en este sector relativamente central se reconoce el Pórfido Rosario, instruyendo al Pórfido Collahuasi (Figuras 5.1 a 5.3; imagen superior), que a su vez, constituye la zona de asociación mineral calcopirita-bornita, pirita-bornita, envuelta y con mayor cabida hacia el noreste por la asociación pirita-calcopirita, que en conjunto corresponde a la catalogada zona primaria (Figuras 5.1 a 5.3)

Hacia el exterior del cuerpo con forma de pseudo núcleo, tanto en el dominio noreste como suroeste predomina la alteración propilítica. En la región noreste se contempla una secuencia de alteración “hornfels” y “skarn”. Además, se ilustra alternancia de unidad sedimentaria con toba, dacita y andesita, incluso un cuerpo menor diorítico (Figura 5.1).

En el sector superior del dominio NE, una franja de tobas rojas está en contacto con tobas y una porción de material de relleno (Figura 5.1 y 5.3), mientras que en el otro dominio dicha unidad de tobas rojas no es reconocible en las secciones. En el campo superior resalta la zona pirítica con una porción lixiviada en el piso alto del rajo, cuya lixiviación es mayor en el dominio SW, con abundante presencia de estructuras (Figura 5.2 y 5.3).

En la zona suroeste además de la vasta alteración propilítica, se caracteriza la amplitud de la alteración argílica, a diferencia del sector central que está asociado en gran medida a las tres fallas principales y que en el campo noreste no se observa a grandes rasgos. También, se reconocen sectores menores de alteración cuarzo-sericita. Alternancia de unidades sedimentarias y andesitas caracterizan la zona suroeste, con cuerpos menores de

toba en partes superiores y un gran volumen en el inferior. Predomina la zona pirítica, seguida de la secundaria, además, de un nivel superior de zona lixiviada con el reconocimiento de cuerpos menores de óxidos y mixtos, lo que señala un predominio de mineralización supérgena en comparación al dominio NE.

En el extremo superior hacia el suroeste llama la atención la gran concentración de sondajes con valores de frecuencia de fracturas altos, perteneciente a la categoría muy fracturados y extremadamente fracturados (Figuras 5.1 a 5.3), como también, una cuantiosa ocurrencia de RQD entre 0% a 50%, Joint condition de 0 a 6 y GSI entre 0% a 40%, que se reconocen principalmente en zonas de profuso fracturamiento, como también, algunos sectores sin fracturamiento hacia el extremo suroeste (Figura 9.1 a 9.9). Las ocurrencias de dichos valores de las variables geotécnicas en estudio tienden a concentrarse en las alternancias de unidades sedimentarias, andesíticas y tobas del dominio suroeste, preferentemente en los sectores superiores de las secciones, mientras que, en el dominio noreste se observa concentrado principalmente en las fallas de carácter distrital vinculadas a las unidades porfídicas.

A continuación, se ilustra una tabla con las principales características observadas en ambos dominios.

Dominio Rosario Oeste	Dominio Rosario
Estructuras subverticales de rumbo NNW-SSE, NW-SE y NNE-SSW.	Fallas de rumbo NW-SE de bajo ángulo
Predominio de mineralización supérgena	Predominio de mineralización hipógena
Profuso fracturamiento secundario	Fracturamiento asociado a fallas mayores
Abundante ocurrencia de mineralización tipo veta-falla	Ocurrencia de mineralización diseminada y vetiforme
Alteración argílica asociada a estructuras mayores, menores e intermedias.	Alteración argílica asociada principalmente a las estructuras de carácter distrital.
Predominio de alteración propilítica y argílica, con menor abundancia de tipo cuarzo - sericítica.	Alteración biotítica, potásica, sericita-gris verde, cuarzo-sericita, argílica.
Cuantiosa ocurrencia de frecuencia de fracturas de categoría 'muy fracturado' y 'extremadamente fracturado', asociado a zonas de profuso fracturamiento	Frecuencia de fracturas en la categoría 'muy fracturado' y 'extremadamente fracturado' asociado preferentemente a estructuras de carácter distrital.

Tabla 5.1: Características principales reconocidas en los dominios suroeste y noreste.

5.1.1 Sección 28NW

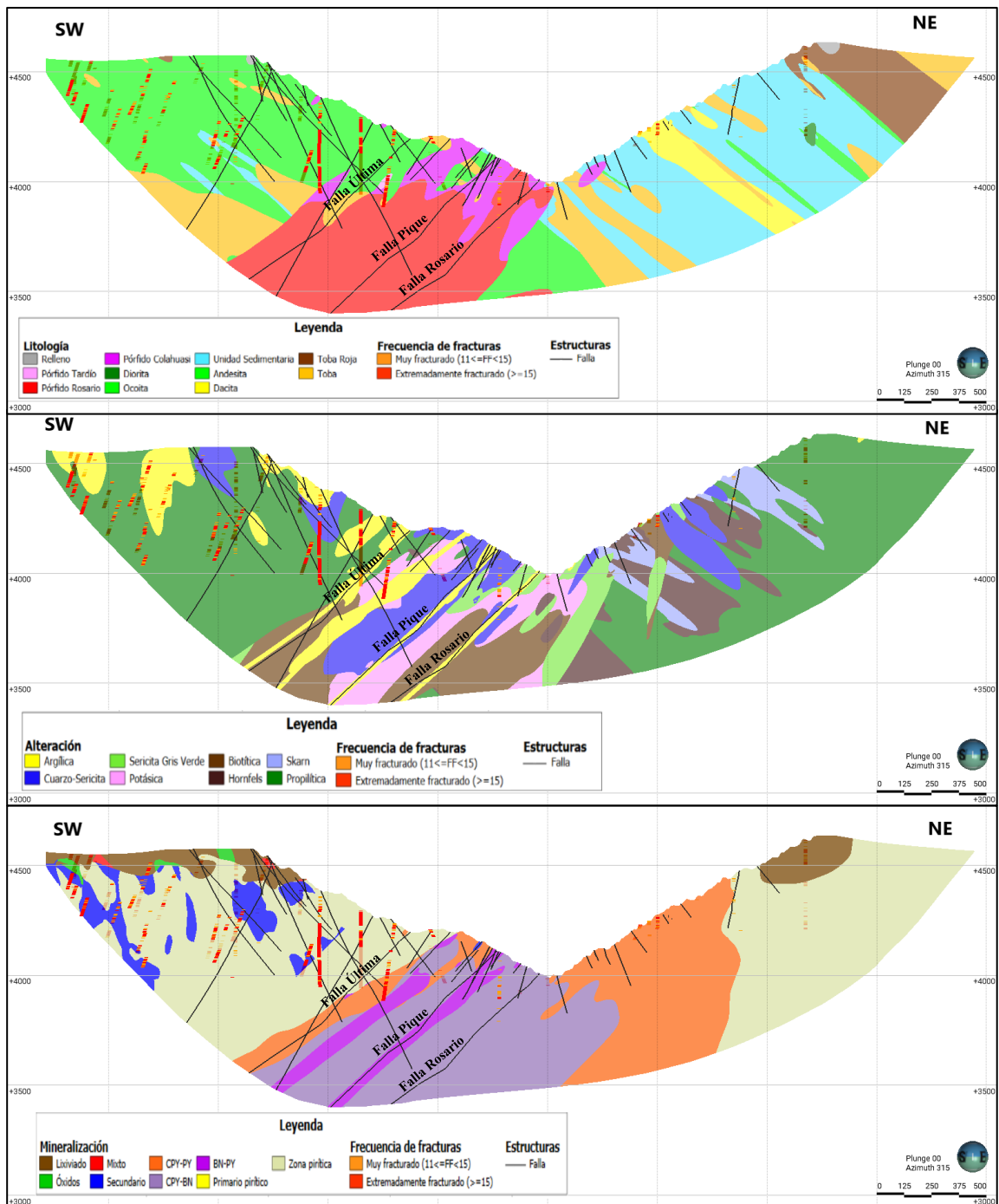


Figura 5.1: Distribución espacial de la variable frecuencia de fracturas (FF) en sección 28NW, modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización (sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras. Fuente elaboración propia.

5.1.2 Sección 20NW

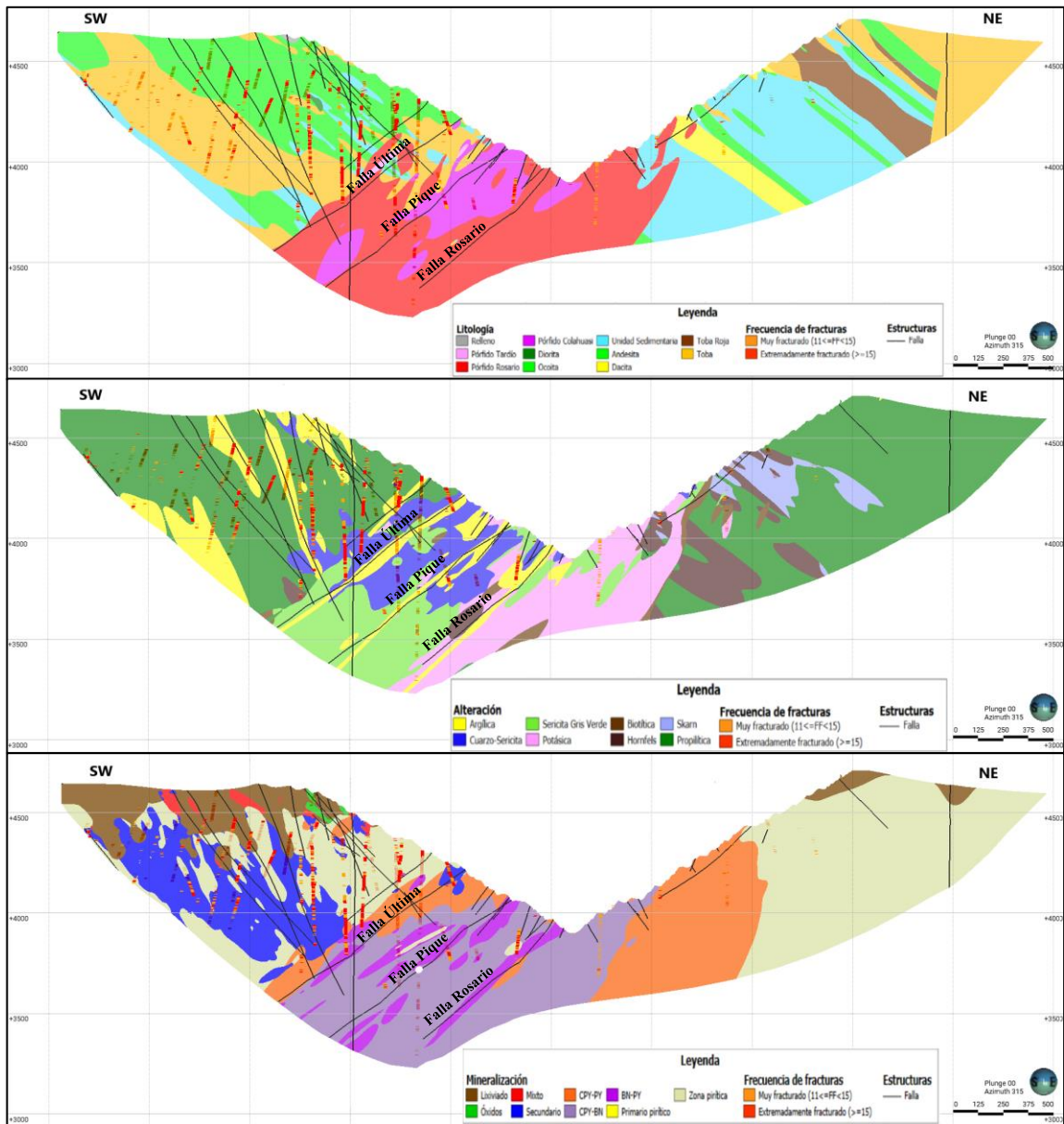


Figura 5.2: Distribución espacial de la variable frecuencia de fracturas (FF) en sección 20NW, modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización (sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras. Fuente elaboración propia.

5.1.3 Sección 17NW

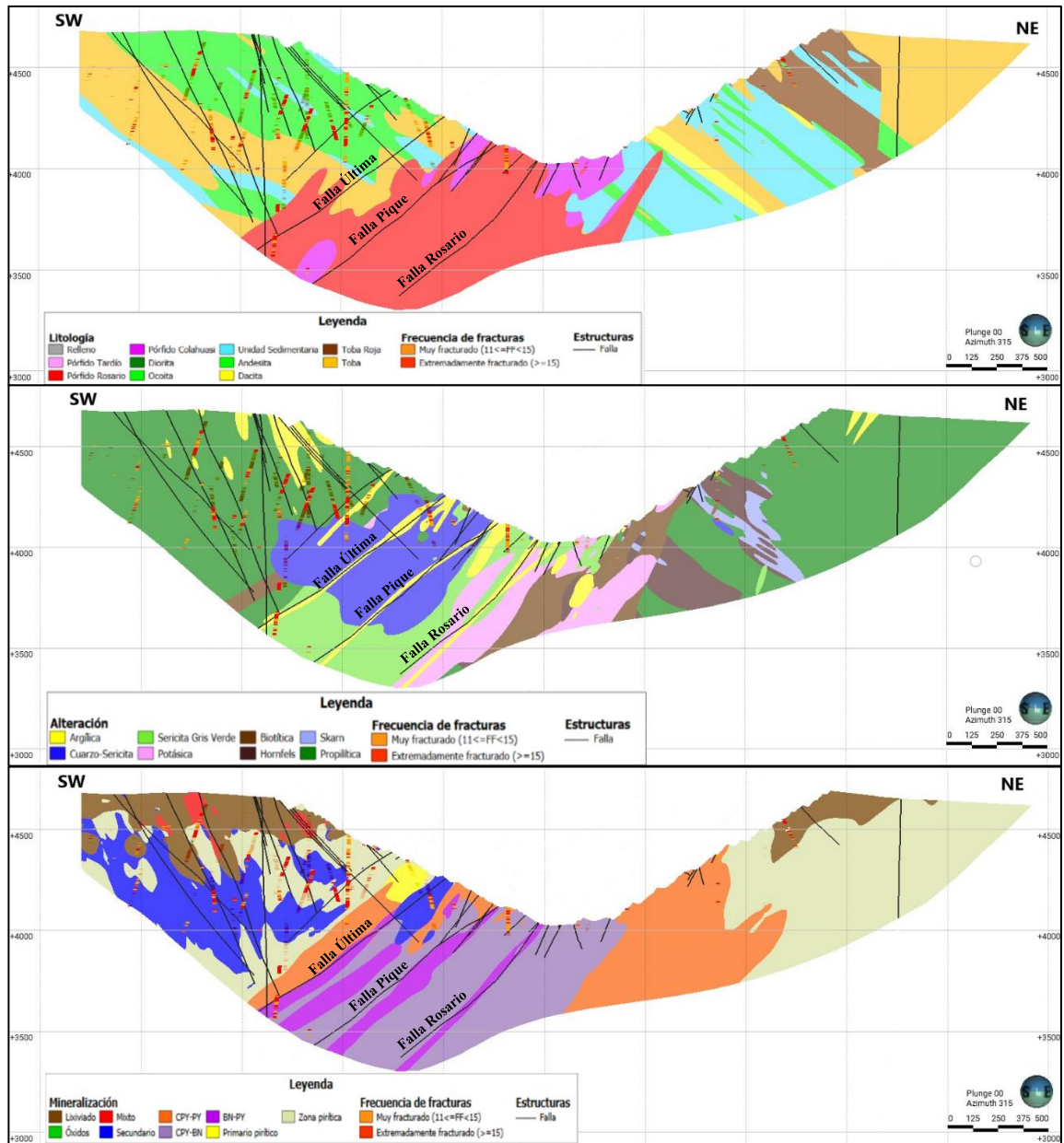


Figura 5.3: Distribución espacial de la variable frecuencia de fracturas (FF) en sección 17NW, modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización (sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras. Fuente elaboración propia.

5.2 Gráficos de deriva espacial en secciones representativas

A continuación, se analizará el comportamiento espacial de los promedios de poblaciones de valores de las variables geotécnicas GSI, RQD, FF y JC, en cada unidad geológica geotécnica definida, por sección representativa.

5.2.1 Sección 28NW

5.2.1.1 Unidades geológicas geotécnicas respecto a la variable GSI

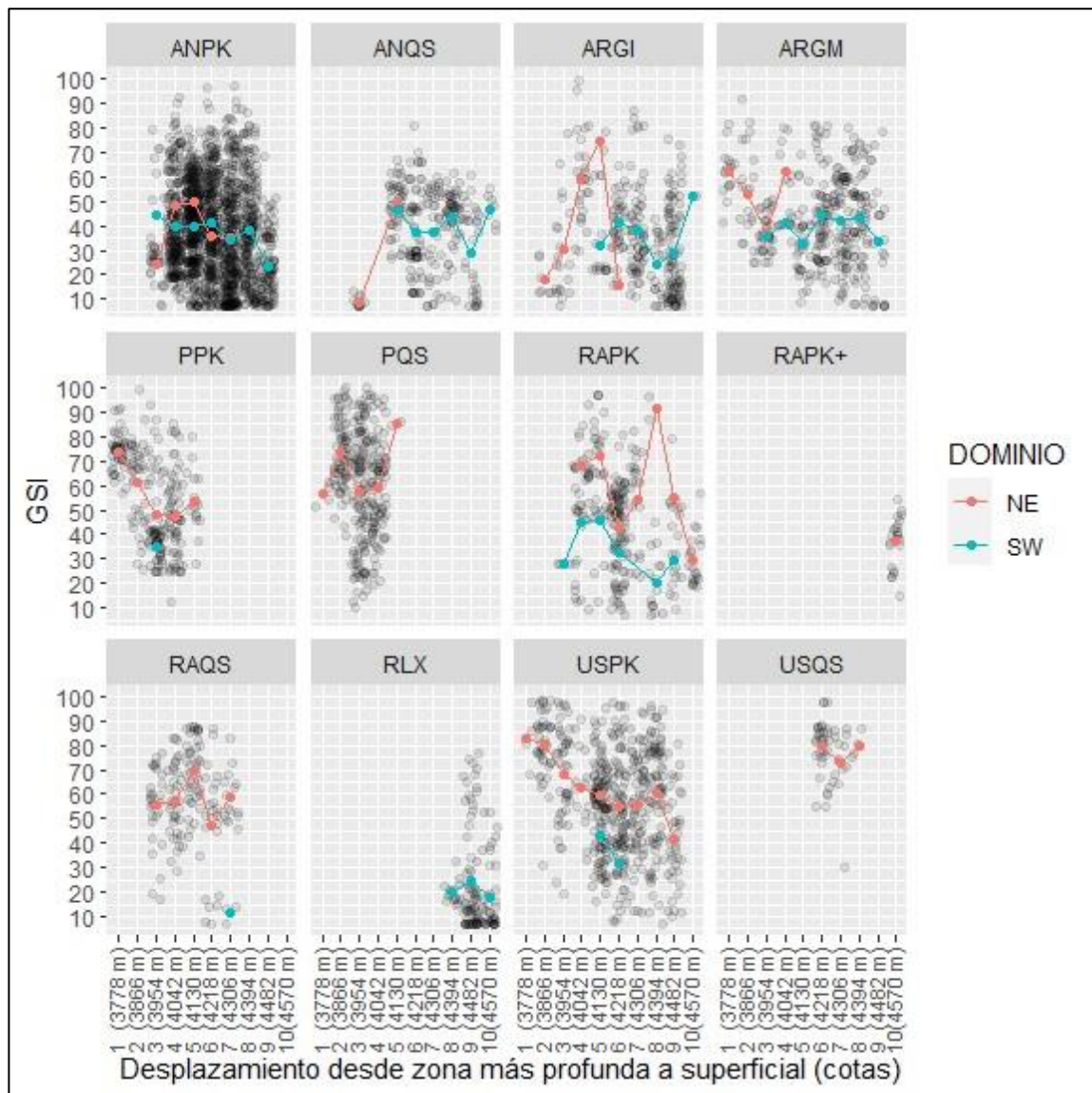


Figura 5.4: Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio de clases, representando el comportamiento de la variable GSI en el eje z (cotas), por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.

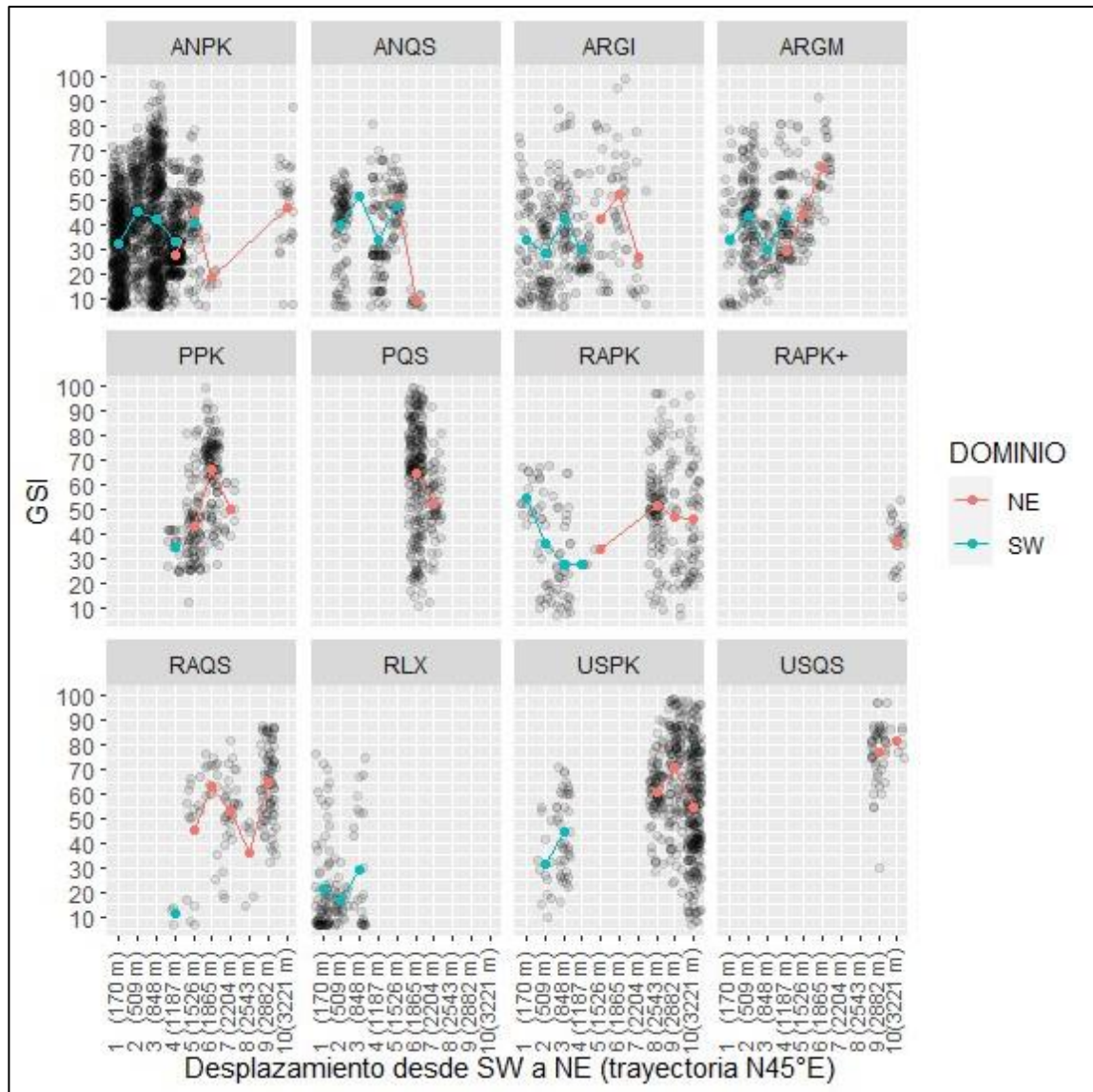


Figura 5.5: Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio entre clases, representando el comportamiento de la variable GSI en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.

- a) Unidad geológica geotécnica ANPK: registra dos promedios de poblaciones con valores de GSI menor al promedio general (39%), correspondiente ambos a un 24% en las cotas 3954m y 4482m, asociado el primero al dominio porfídico, mientras que el otro al epitermal. Los demás promedios indican valores similares a la media o no señalan una gran diferencia con la media general que pueda reducir en gran medida la calidad del macizo rocoso del mismo modo que los mencionados

anteriormente. En la trayectoria N45°E, las clases 1, 4 y 6 indican los promedios de GSI más bajos, correspondiente a 32%, 28% (clase 4, NE), 33% (clase 4, SW) y 18%. Este último valor es considerado no representativo debido a la baja de datos obtenidos, lo que podría indicar una condición muy localizada.

- b) Unidad geológica geotécnica ANQS: en el eje de coordenadas z se evidencia en la cota 3954 m (clase 3) un promedio de GSI de 9%, que representa el más bajo respecto a la media general de la unidad (36%). El resto de los promedios de clases no indica una gran diferencia respecto a dicho promedio general. En la trayectoria N45°E, la clase 4 y 6 ilustra promedios de poblaciones de 34% y 9%, que están bajo la media general de la unidad.
- c) Unidad geológica geotécnica ARG1: se observan 3 promedios de clases con mayor variación con respecto a la media general de la unidad en estudio (38%), aunque debido a la baja cantidad de valores, dos son considerados no representativos, por ende, se considera solamente el promedio de la cota 4394m (clase 8) asociado al ambiente epitermal, cuyo valor es 24%. Los demás promedios de clases no indican una gran diferencia respecto a la media general. En la trayectoria N45°E, las clases 1, 2, 4 y 7 indican promedios que están bajo la media general, que corresponden a 33%, 28%, 30% y 27%.
- d) Unidad geológica geotécnica ARGM: a nivel general no se observa un promedio de clase que tenga una gran diferencia con respecto a la media general (45%). Se reconoce un promedio peak de 62%, sin embargo, debido a su poca cantidad de datos es considerado como no representativo. Se evidencia promedio más bajos asociados al dominio epitermal. En la trayectoria N45°E, se identifican promedios de clases menor a la media general de la unidad, en las clases 1, 3 y 4, correspondiente a 33%, 30% y 29%. Sin embargo, debido a la poca cantidad de datos para el último promedio, se le consideró como no representativo.

- e) Unidad geológica geotécnica PPK: en el eje de coordenadas z se reconoce un promedio de clase con valor de 35%, que es menor a la media general (46%) y está asociado al ambiente epitermal. Los demás valores de promedios de clases son similares a la media general o no influyen en gran medida a la calidad del macizo rocoso como dicho valor mencionado. La trayectoria N45°E, indica un promedio de clases que está bajo la media general de la unidad, asociado al dominio SW y que a la vez es el menor de todos, correspondiente a un GSI de 35% (clase 4).
- f) Unidad geológica geotécnica PQS: registra valores asociados únicamente al ambiente porfídico. Presenta en la cota 4130 m (clase 5) un valor promedio de 85% que eleva el promedio general, sin embargo, debido a su baja cantidad de datos asociados es considerado como no representativo. A nivel general no se indica un promedio de clase anómalo que marque una gran diferencia con respecto a la media general de la unidad (62%). En la trayectoria N45°E, los promedios de clases no son muy diferentes a la media general de la unidad (62%) y se reconocen únicamente en el dominio NE.
- g) Unidad geológica geotécnica RAPK: registra tres promedios de clases menores cuyos valores señalan una mayor diferencia con respecto a la media general (42%), representadas en la cota 4394 m (clase 8), 4482 m (clase 9, SW), 4482m (clase 9, NE), siendo el primero de 22%, seguido de 28% y 29%. El resto de los promedios de clases son similares al general o no influyen de la misma manera al macizo rocoso con respecto a los tres mencionados anteriormente. En la trayectoria N45°E, se registran cuatro promedios de clases (2, 3, 4 y 5), correspondiente a valores de GSI 36%, 28%, 28% y 34%, siendo este último no representativo dado que hay un solo dato en dicha clase. Las clases mencionadas anteriormente indican un promedio menor a la media general de la unidad en estudio.
- h) Unidad geológica geotécnica RAPK+: en esta unidad los valores se reconocen en una sola cota (4570 m), atribuida a la clase 10, que pertenece al dominio NE, cuya media es de 37%. En la trayectoria N45°E ocurre la misma situación que en la

coordenada z, cabe destacar que la media de la clase 10 para este sistema de coordenadas es bastante similar a la entregada por Collahuasi, correspondiente a un 39%.

- i) Unidad geológica geotécnica RAQS: en el eje de las coordenadas z registra una anomalía negativa en el dominio SW, asociada a la cota 4306 m (clase 7), cuyo valor es 11%, pero debido a la baja cantidad de muestras, es considerada no representativa. Los demás valores son similares a la media general del dominio NE (59%) o no presentan un promedio que afecte en gran medida al promedio general, disminuyendo considerablemente su calidad. En la trayectoria N45°E, el dominio SW presenta una clase (4) cuyo valor es 11%, sin embargo, dada la poca cantidad de datos presente se considera no representativo, sucediendo lo mismo para la clase 8 del dominio NE. En la clase 5 se identifica un valor de 45%, que está bajo la media general para dominio NE.
- j) Unidad geológica geotécnica RLX: registra promedios de poblaciones de valores muy similares a la media general, que es 22%. Se reconocen datos asociados solamente al dominio epitermal en las cotas. En la trayectoria N45°E, se identifican promedios asociados únicamente al dominio SW, cuyos promedios de clases son muy similares al general.
- k) Unidad geológica geotécnica USPK: se reconocen los promedios más bajos de poblaciones de valores en el dominio SW. La cota 4218 m (clase 6) indica un valor de 32%, que es menor con respecto al promedio general (51%). El resto de los promedios son similares a la media general o no indican una media que ilustre una gran diferencia respecto a la global. En la trayectoria N45°E, las clases 2 y 3 señalan promedios bajo la media principal, correspondientes a 31% y 45%.
- l) Unidad geológica geotécnica USQS: en la coordenada del eje z se observan valores asociados únicamente al ambiente porfídico. La media general de los valores asociados a la unidad en estudio presenta un valor muy diferente a la entregada

por Collahuasi, por ende, se considera una media no representativa. Lo mismo ocurre en el eje de coordenadas x e y, reconociéndose una gran diferencia entre la media general de la sección (78%) con respecto a la obtenida por Collahuasi (42%).

5.2.1.2 Unidades geológicas geotécnicas respecto a la variable FF

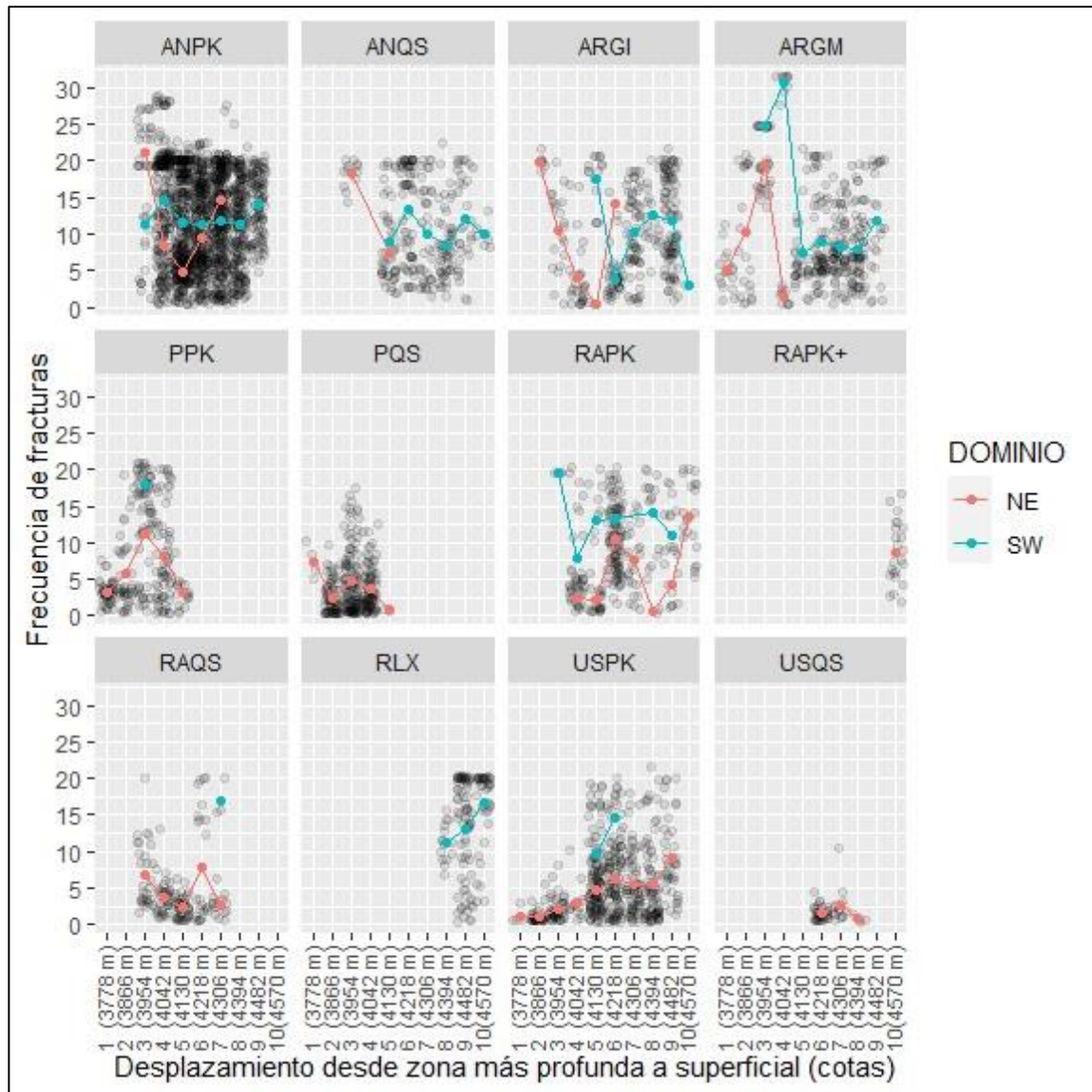


Figura 5.6: Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio entre clases, representando el comportamiento de la variable FF en el eje z, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.

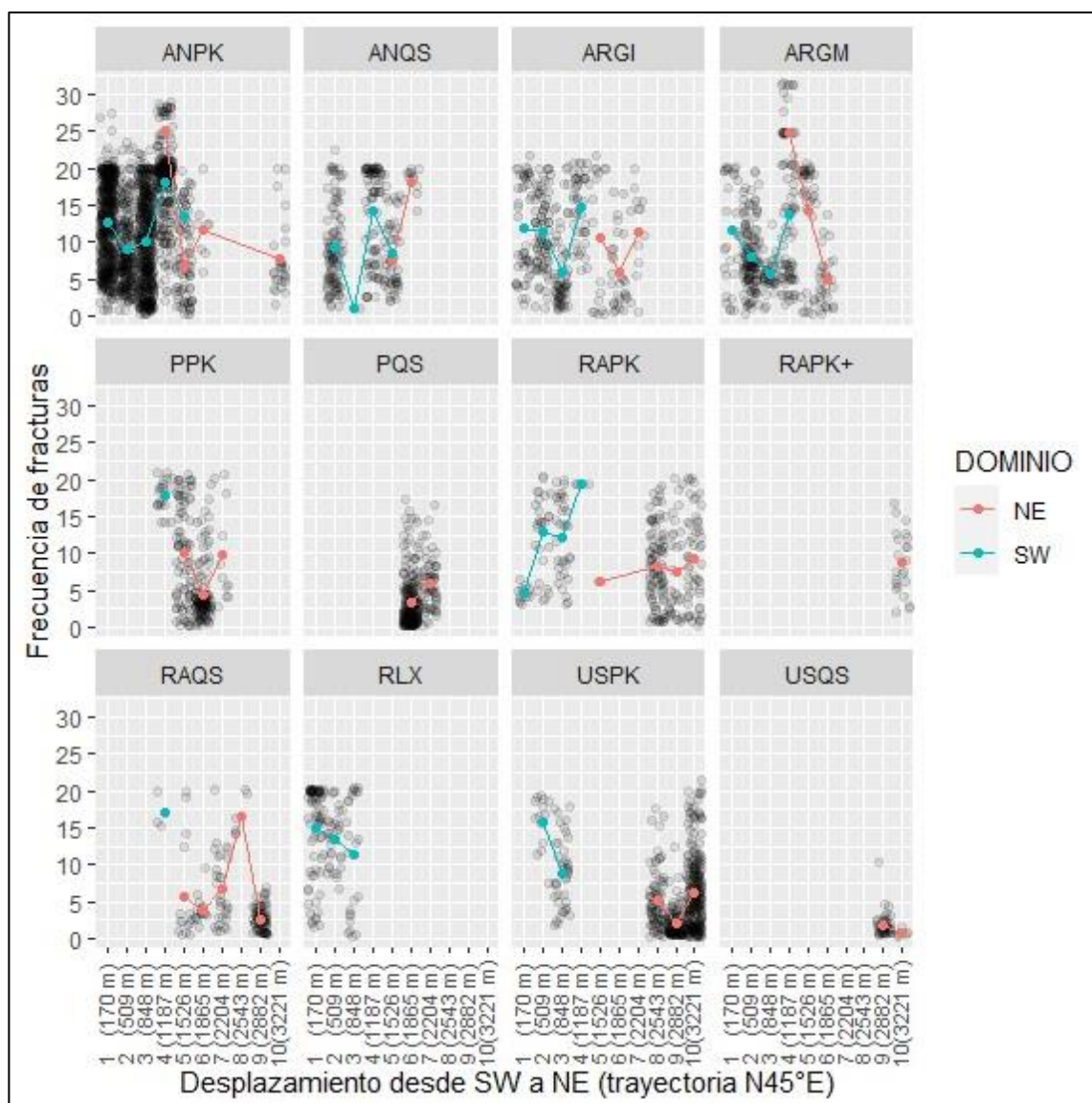


Figura 5.7: Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio entre clases, representando el comportamiento de la variable FF en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.

- a) Unidad geológica geotécnica ANPK: presenta a nivel general una media de 11 frecuencias de fracturas por metro (FF), siendo las cotas 3954 m (clase 3), 4042m (clase 4) y 4482 m (clase 9) promedios que superan la media general de la unidad, correspondiendo a 21, 15 y 14 respectivamente. En la trayectoria N45°E, se observan dos promedios de clases mayor a la media general, correspondiente a la

clase 4, tanto en su dominio NE (25 FF) y SW (18 FF). El resto de los valores no alcanzan promedios de clases igual a los mencionados anteriormente.

- b) Unidad geológica geotécnica ANQS: se observa en la cota 3954 m (clase 3) un promedio de 18 frecuencias de fracturas por metro, que supera al promedio general de la unidad correspondiente a 11 FF (frecuencias de fracturas por metro). En la trayectoria N45°E, se identifica en la clase 4 y 6 promedios de 14 FF y 18 FF. Los demás promedios de clases no alcanzan valores como los señalados anteriormente.
- c) Unidad geológica geotécnica ARG1: esta unidad presenta promedios de valores altos que no son representativos debido a la baja cantidad de datos (menor a 10), por ende, el promedio de 20 FF, 14FF asociado al dominio NE no son considerados, del mismo modo que el valor 0 FF Y 3 FF. En la cota 4130 m (clase 5) se observa un valor de 18 FF que supera el promedio general (9), mientras que las demás clases indican medias relativamente similares. En la trayectoria N45°E, la clase 4 indica el mayor promedio de FF, correspondiente a 15, asociado al dominio SW. Las demás poblaciones de valores no alcanzan FF medias como el mencionado anteriormente o son similares a la media general de la unidad.
- d) Unidad geológica geotécnica ARGM: se observan poblaciones de valores en el eje z con medias elevadas, alcanzando valores de 19FF, 25FF y 31 FF, sin embargo, las dos últimas presentan una baja cantidad de población con respecto a las otras, por lo que su media no es considerada representativa. Con respecto a la trayectoria N45°E, presenta tres promedios de clases mayor al resto, correspondientes a 25 FF (dominio NE, clase 4), 14 FF (dominio SW, clase 4) y 14 FF (clase 5). Sin embargo, debido a la baja cantidad de datos en la clase 4 (dominio NE), se considera no representativa. Los demás promedios son menores a los mencionados anteriormente.
- e) Unidad geológica geotécnica PPK: se reconoce un promedio de población de valores cuyo valor es 18 FF asociado al dominio SW, que sobrepasa a la media

general de la unidad en estudio (12 FF). Las demás poblaciones de valores se acercan a la media general, mientras que se observan medias con valores que no afectan a la calidad del macizo rocoso de la misma forma que los mencionados anteriormente. En la trayectoria N45°E se identifica en la clase 4 un promedio de clase equivalente a 18 FF, que sobrepasa a la media general.

- f) Unidad geológica geotécnica PQS: no hay valores relacionados al dominio SW. Se observa en la cota 3778 m (clase 1) un promedio mayor a la media general de la unidad (4 FF), sin embargo, debido a la baja cantidad de valores es considerado como no representativo. En la trayectoria N45°E, solamente se reconocen poblaciones asociadas al ambiente porfídico, cuyos promedios de clases son menores al obtenido por Collahuasi (11 FF), por ende, se considera que dichas clases solo representarían la media a nivel de sección.
- g) Unidad geológica geotécnica RAPK: registra en el eje de coordenadas z dos cotas representativas correspondiente a 4394 m (clase 8) y 4570 m (clase 10), con valores de 14 FF (frecuencia de fracturas por metro), relacionándose el primero al ambiente epitermal, mientras que el segundo al dominio NE. Se reconoce un promedio de población con un valor de 19 FF en la clase 3, sin embargo, debido a su baja cantidad de datos fue considerado no representativo. Los demás promedios de poblaciones son cercanos a la media general (10) o indican promedios que no afectan considerablemente a la calidad del macizo rocoso con respecto a los señalados. En la trayectoria N45°E, la clase 2, 3 y 4 señalan valores de 13 FF, 12 FF y 19 FF, siendo este último considerado como no representativo dada la poca cantidad de datos presentes. Los demás promedios de clases son inferiores a los señalados.
- h) Unidad geológica geotécnica RAPK+: se reconoce en el eje de coordenadas z solamente el ambiente porfídico, y presenta una única clase cuyo valor es de 9 FF (frecuencias de fracturas por metro). En la trayectoria N45°E está asociado al dominio NE, con una única clase cuya media es de 9 FF.

- i) Unidad geológica geotécnica RAQS: registra un promedio de población de 17 FF (clase 7) por sobre la media general de 11FF, pero debido a la baja cantidad de registros es considerada no representativa. Los demás promedios son similares a la media general o señalan promedios de clases que no disminuyen la calidad del macizo rocoso como el ya mencionado. En la trayectoria N45°E, la clase 4 y 8 indican promedios por sobre la media general, cuyos valores son 17 FF, pero debido a la poca cantidad de datos en las clases, son consideradas como no representativas.
- j) Unidad geológica geotécnica RLX: en el eje de coordenadas z se reconocen valores únicamente en el dominio SW, con un promedio de población de 17 FF en la cota 4570 m, que supera la media general (14 FF). En la trayectoria N45°E, los promedios de clases son muy similares respecto a la media general de 14 FF, por ende, no se reconoce una media que resalte con respecto al resto.
- k) Unidad geológica geotécnica USPK: indica un promedio de población en la cota 4218 m (clase 6) de 15 FF que es mayor a la media general (8 FF) y está asociado al ambiente epidermal. Los promedios de poblaciones en dicho ambiente son mayores al dominio NE. En la trayectoria N45°E, la clase 2 señala un promedio de 16 FF, que supera a la media general de la unidad estudiada. El resto de los promedios no afectan de la misma manera como el mencionado anteriormente.
- l) Unidad geológica geotécnica USQS: en el eje de coordenadas z se reconocen valores asociados únicamente al dominio porfídico. El promedio general de frecuencia de fracturas en este estudio para esta sección entregó un valor de 2 FF, que está muy por debajo de otros estudios, por ende, no se consideran representativas sus medias para el eje z. En la trayectoria N45°E los promedios de clases también indican valores muy bajos con respecto a la media dada por Collahuasi a nivel rajo (10 FF), por ende, el promedio general de esta sección no representa el promedio del rajo.

5.2.1.3 Unidades geológicas geotécnicas respecto a la variable RQD

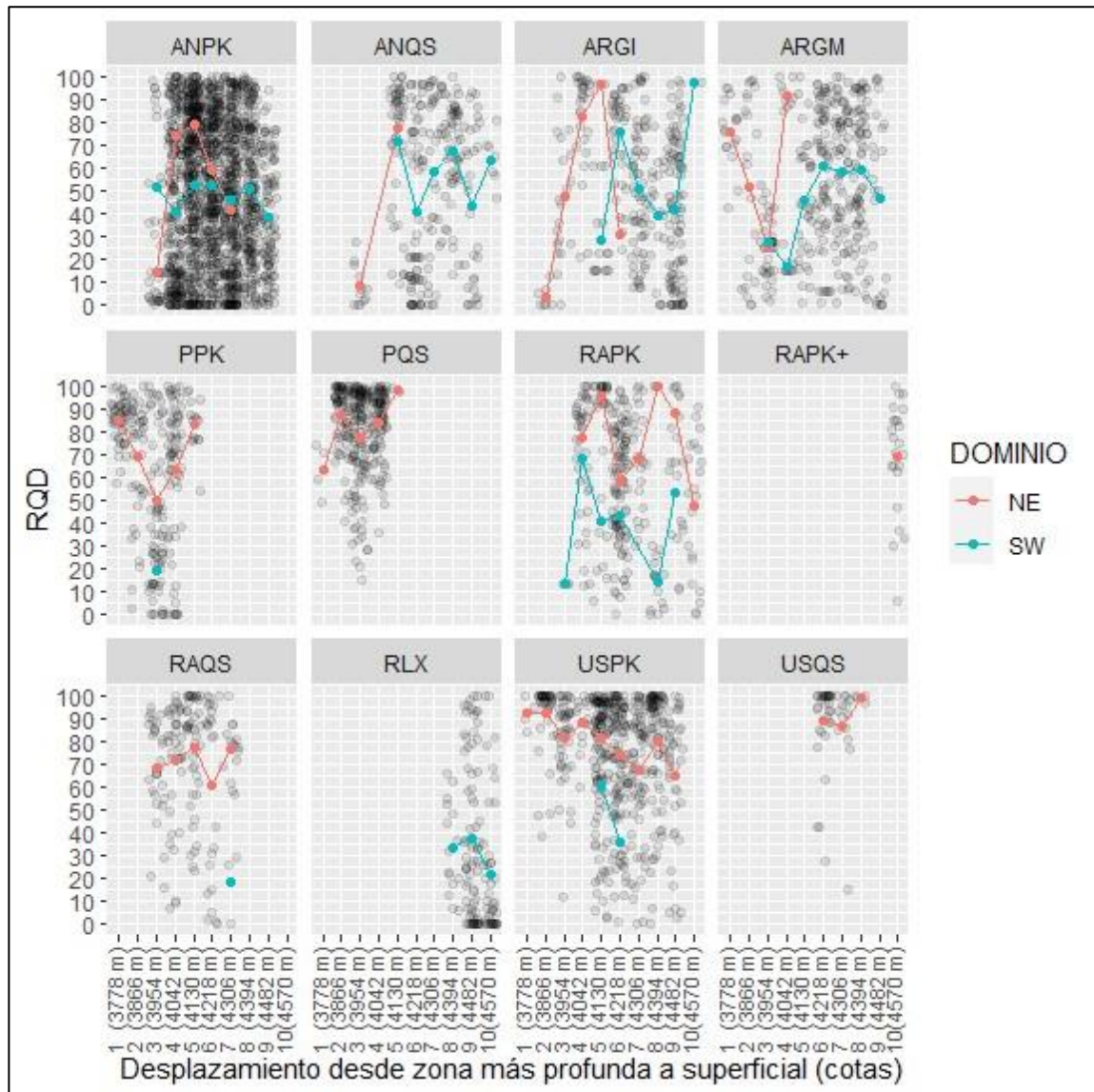


Figura 5.8: Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio entre clases, representando el comportamiento de la variable RQD en el eje z, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.

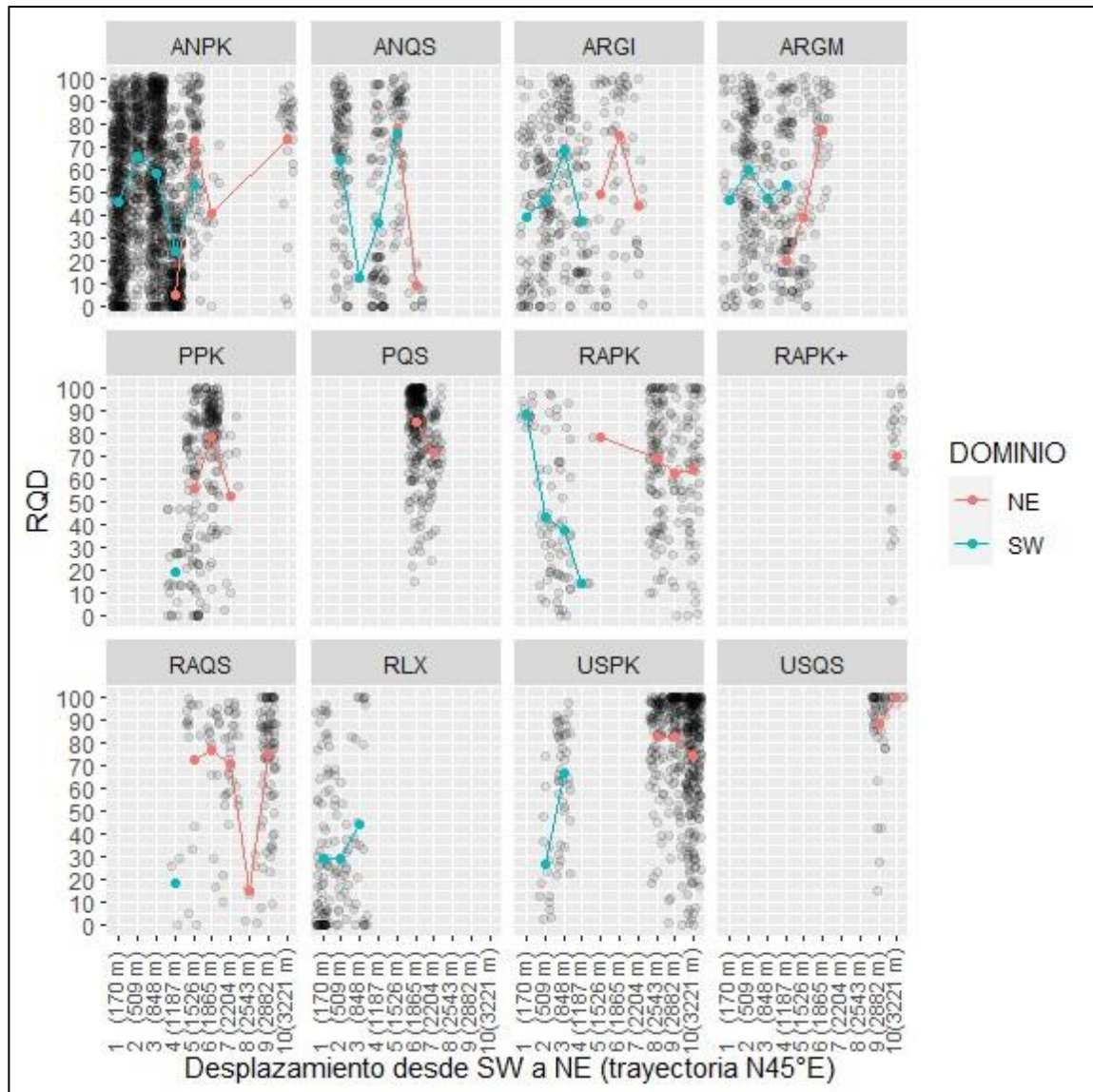


Figura 5.9: Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio entre clases, representando el comportamiento de la variable RQD en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.

- a) Unidad geológica geotécnica ANPK: registra un promedio de clase muy bajo de RQD, que se ubica en la cota 3954 m (clase 3) asociada el dominio NE, cuyo valor es 15%. En el SW se reconocen dos promedios de poblaciones menor a la media general (55%), que son 39% (clase 9) y 41% (clase 4). El resto de los valores son similares al promedio general o indican medias en sus clases que no afectan en gran medida a la calidad del macizo rocoso. En la trayectoria N45°E, las clases 4

y 6 señalan promedios que están bajo la media general, correspondientes a 5% (clase 4, dominio NE), 24% (clase, dominio SW) y 40%, siendo este último considerado como no representativo debido a la poca cantidad de datos presentes en la clase.

- b) Unidad geológica geotécnica ANQS: el eje de coordenadas z señala tres promedios de clases de poblaciones con valores de RQD bajo la media general (52%), correspondientes a 8% (clase 3), 42% (clase 6) y 44% (clase 9), estando el primero asociado al dominio NE, mientras que los otros al SW. Los demás valores son similares a la media general o no influyen de la misma manera a la calidad del macizo rocoso como los ya mencionados. En la trayectoria N45°E, las clases 3, 4 y 6, señalan valores bajo la media general, correspondientes a 12%, 37% y 8%, siendo el primer valor considerado como no representativo debido a la poca cantidad de datos presentes.
- c) Unidad geológica geotécnica ARG1: se reconocen cuatro promedios de clases altos y bajos, correspondiente a 4% (clase 2), 97% (clase 5, dominio NE), 31% (clase 6) y 98% (clase 10), que dada su baja cantidad de valores fueron considerados no representativos. Se identifica en la cota 4130 m (clase 5) un promedio de 29%, siendo menor al promedio general. El resto de las medias son similares a la global (55%) o no presenta una gran variación que pueda afectar de manera negativa a la calidad del macizo rocoso como el mencionado con anterioridad. En la trayectoria N45°E, las clases 1 y 4 identifican promedios de poblaciones menor a la media general, que corresponden a valores de RQD de 39% y 37%.
- d) Unidad geológica geotécnica ARGM: registra tres promedios de clases de valores bajos de RQD, correspondiente a 25%, 27% y 17%, siendo los dos últimos no representativos, ya que hay una reducida cantidad de datos que definen dichas medias. El resto de las medias son relativamente similares a la media general (53%) o señalan un promedio que no afecta de la misma manera como los mencionados anteriormente. En la trayectoria N45°E, la clase 4 y 5 indican valores

promedios de RQD de 20% y 38%, siendo el primero considerado como no representativo, debido a la poca cantidad de datos. Los promedios mencionados están bajo la media general de la unidad en estudio.

- e) Unidad geológica geotécnica PPK: en el eje de coordenadas z los promedios de clases indican un valor bajo en la cota 3954 m (clase 3), correspondiente a un RQD de 19% en el dominio SW. Los demás promedios de poblaciones son similares al general (44%) o no indican una media que afecte a la calidad del macizo rocoso de manera similar que la mencionada anteriormente. En la trayectoria N45°E, la clase 4 en el dominio SW indica un valor de RQD de 19%, que está bajo la media general de la unidad en estudio.
- f) Unidad geológica geotécnica PQS: registra valores relacionados únicamente al ambiente porfídico. El valor más alto y bajo de los promedios de clases son considerados no representativos debido a la baja cantidad de valores asociado a dichas clases. El resto de las medias de poblaciones de valores son similares al promedio general. En la trayectoria N45°E, los promedios de clases no presentan gran diferencia respecto a la media general (82%) de la unidad en estudio.
- g) Unidad geológica geotécnica RAPK: registra dos promedios de clases bajos en la cota 3954 m (clase 3) y 4394 m (clase 8), correspondiente a 14% y 17%, pero debido a la baja cantidad de valores en la clase 3, se le considera como no representativa. El resto de los valores son similares a la media general (56%) o no afectan de la misma manera a la calidad del macizo rocoso como los promedios anteriormente mencionados. En la trayectoria N45°E, las clases 2, 3 y 4 indican valores de RQD de 43%, 37% y 14%, que están bajo la media general de la unidad, sin embargo, el último promedio de clase es considerado no representativo debido a la baja cantidad de datos.
- h) Unidad geológica geotécnica RAPK+: se identifican valores asociados al ambiente porfídico, como también, está presente en una sola clase, cuya media (70%) es

similar a la obtenida por Collahuasi (67%). Debido a la falta de clases no es posible hacer un estudio de cambio de tendencias espaciales. En la trayectoria N45°E, de la misma manera que lo expuesto anteriormente se identifica una sola clase cuya media es similar al promedio general obtenido por la empresa.

- i) Unidad geológica geotécnica RAQS: se identifica una sola clase asociado al dominio SW, en la cota 4306 m (clase 7), correspondiente a un promedio 18%, sin embargo, debido a la baja cantidad de valores en dicha clase no se considera representativo. El resto de los promedios de clases son muy similares a la media general (71%). En la trayectoria N45°E, las clases 4 y 8 indican valores bajo la media general, correspondientes a 18% y 15%, sin embargo, debido a la poca cantidad de datos son considerados no representativos. El resto de los valores son similares a la media del dominio NE.
- j) Unidad geológica geotécnica RLX: se reconocen valores asociados únicamente al ambiente epitermal. El valor promedio de clases más bajo registrado se ubica en la cota 4570 m (clase 10), corresponde a 21%. El resto de las medias de clases son bastante similares a la media general (32%). En la trayectoria N45°E, los promedios de clases son bastante similares a la media general o no indican una media que resalte sobre las otras, afectando a la calidad del macizo rocoso de manera negativa.
- k) Unidad geológica geotécnica USPK: registra valores en ambos dominios, aunque el ambiente epitermal señala los menores promedios. La cota 4218 m (clase 6) presenta una media 36%, que es menor a la media general (67%). El resto de los valores promedios son similares al general o no evidencia valores parecidos al mencionado anteriormente, que podrían disminuir la calidad del macizo rocoso. En la trayectoria N45°E la clase 2 indica un promedio de 26%, que está por debajo de la media general. El resto de los valores no señalan una gran diferencia como el ya mencionado.

- 1) Unidad geológica geotécnica USQS: en el eje de coordenadas z se indican valores asociados únicamente al ambiente porfídico, con promedios de clases bastante similares entre sí con respecto a la media general (89%). En la trayectoria N45°E, se reconocen dos promedios de clases asociados de igual forma al dominio NE, cuya media de 99% en la clase 10 es considerada no representativa debido a la baja cantidad de datos en la clase.

5.2.1.4 Unidades geológicas geotécnicas respecto a la variable Joint condition (JC)

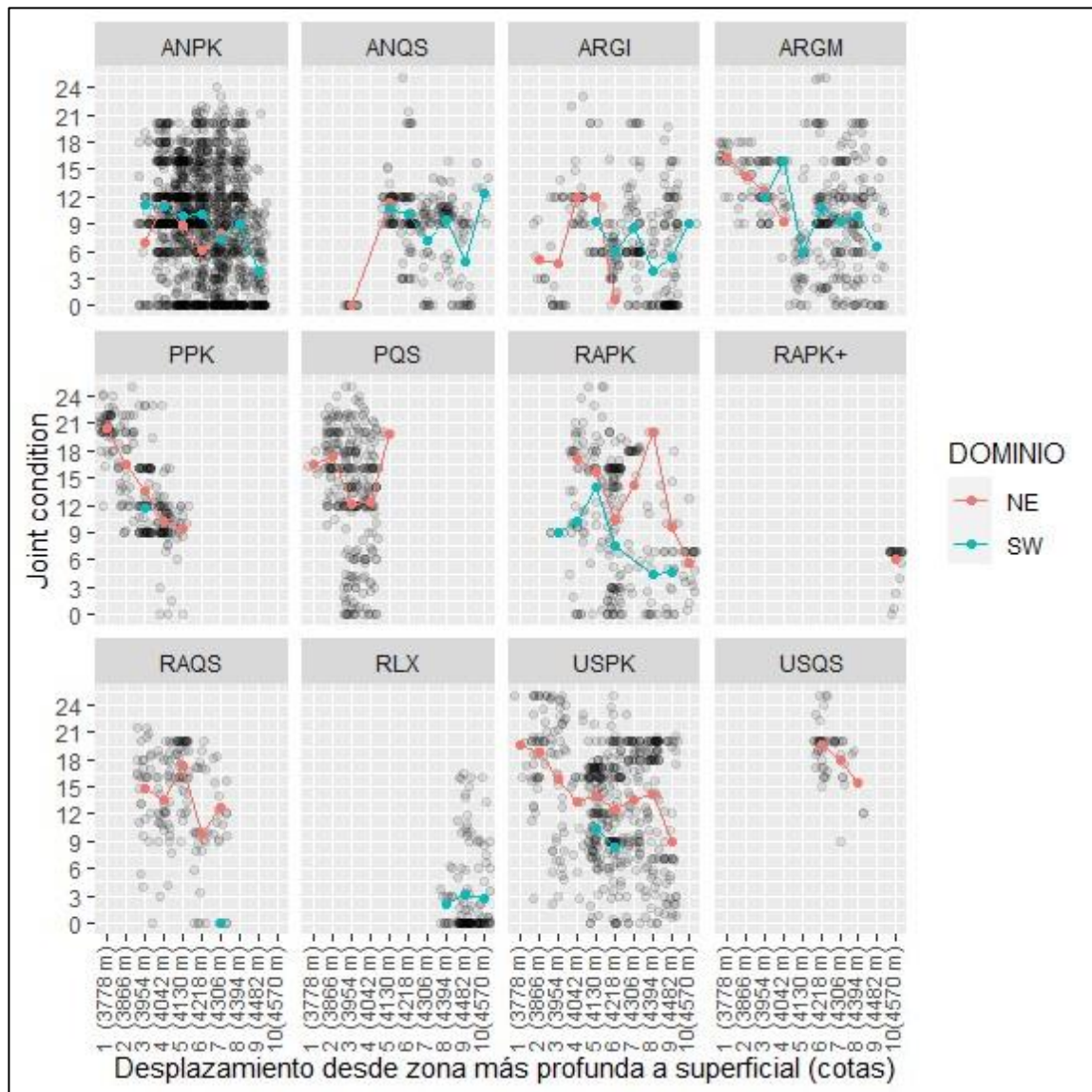


Figura 5.10: Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio entre clases, representando el comportamiento de la variable joint condition (JC) en el eje z, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.

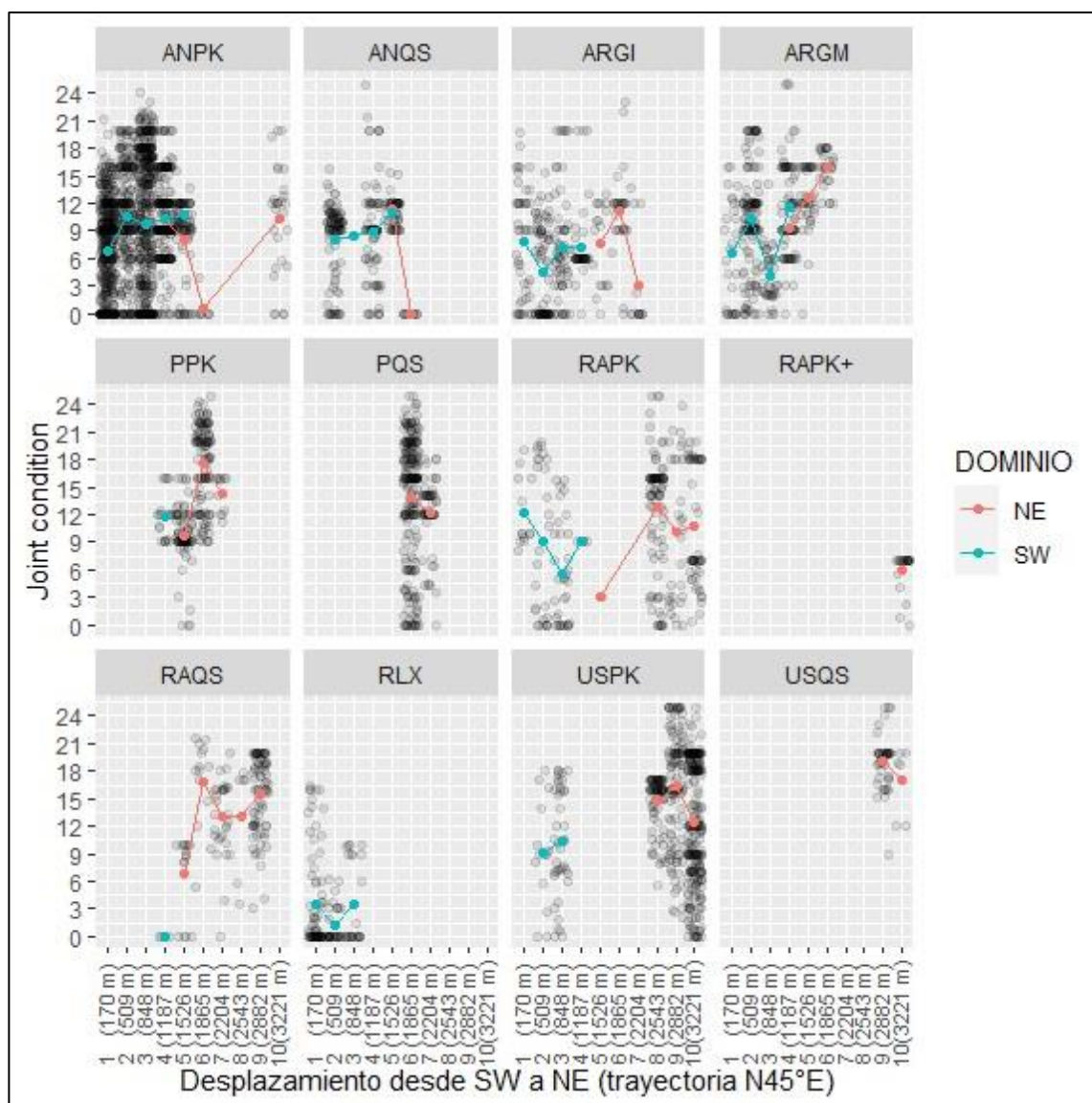


Figura 5.11. Gráfico de deriva espacial que indica los cambios de tendencias de promedio entre clases, representando el comportamiento de la variable joint condition (JC) en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.

- a) Unidad geológica geotécnica ANPK: en el eje de coordenadas z se observa en la cota 4482 m (clase 9), un valor de JC promedio de clase correspondiente a 4, que es menor en comparación a la media general de la unidad en estudio (9). El resto de los promedios no indican un valor como la ya mencionada, que afecte en la calidad del macizo rocoso o presenten valores muy similares a la media general. En la trayectoria N45°E, la clase 6 indica un promedio correspondiente a un joint

condition de 0, sin embargo, debido a la poca cantidad de datos se considera no representativo. Los demás promedios son relativamente similares a la media general de la unidad en estudio.

- b) Unidad geológica geotécnica ANQS: registra en las cotas 3954 m (clase 3) y 4482 m (clase 9) los valores de joint condition más bajos entre los promedios de cada clase, correspondiente a los valores 0 y 5. Los demás promedios de clases son similares a la media general de la unidad en estudio (8) o no alcanzan valores de media tan bajos como los mencionados anteriormente. En la trayectoria N45°E, la clase 6 señala un promedio 0, que corresponde al menor promedio de poblaciones presentes en la unidad de estudio. El resto de las medias son similares a la general.
- c) Unidad geológica geotécnica ARG1: se identifican dos promedios de clases con valores bajo la media general de la unidad (7), y que además son los menores, correspondiendo a 1 y 4, que se encuentran en la cota 4218 m (clase 6) y 4394 m (clase 8), sin embargo, dado que la cantidad de datos en la clase 6 es baja, se considera una media no representativa. El resto de los promedios de poblaciones son similares a la media general de la unidad o no indican valores iguales a los mencionados anteriormente. En la trayectoria N45°E, las clases 2 y 7 contemplan los promedios más bajos correspondientes a 4 y 3, que están por debajo de la media general. Los demás valores son relativamente similares.
- d) Unidad geológica geotécnica ARGM: se evidencian dos promedios de clases bajo la media general (11), asociados al dominio SW, ubicados en la cota 4130 m (clase 5) y 4482 m (clase 9), correspondiente a un valor de 6 y 7. El resto son similares a la media general de la unidad o sus respectivos promedios de clases no alcanzan valores como los dichos anteriormente. En la trayectoria N45°E, las clases 1 y 3 señalan los promedios bajos asociados al ambiente epitermal, correspondiente a 7 y 4, que están bajo la media general de la unidad en estudio.

- e) Unidad geológica geotécnica PPK: en el eje de coordenadas z se registran dos promedios de clases asociados al dominio NE, que están por debajo de la media general de la unidad, en la cota 4042 m (clase 4) y 4130 m (clase 5), correspondientes a valores 10 y 9. El resto de los promedios de clase contienen valores mayores a los mencionados anteriormente o son similares a la media general (13). En la trayectoria N45°E, se reconoce en la clase 5 asociado al dominio NE, el menor promedio de clases, correspondiente a 10.
- f) Unidad geológica geotécnica PQS: registra datos asociados únicamente al ambiente porfídico, donde dos promedios de clases están bajo la media general de la unidad (14), en las cotas 3954 m (clase 3) y 4086 m (clase 4), correspondientes al valor 12 en ambas clases. En la trayectoria N45°E, presenta promedios de clases similares a la media general y, además, están asociados al dominio NE.
- g) Unidad geológica geotécnica RAPK: se reconocen cuatro promedios de clases asociados a las cotas 4218 m (clase 6), 4393 m (clase 8), 4482 m (clase 9) y 4570 m (clase 10), correspondiente a valores 7, 5, 4 y 6, que están bajo la media general de la unidad (10). El resto de los promedios de clases indican valores mayores a los mencionados anteriormente. En la trayectoria N45°E, las clases 3 y 5 presentan los promedios más bajos, correspondiente a 6 y 3, sin embargo, dada la poca cantidad de datos en el último promedio, se considera no representativo. Los otros valores son similares a la media general (10).
- h) Unidad geológica geotécnica RAPK+: registra un solo promedio de clase asociado al ambiente porfídico, en la cota 4570 m (clase 10). Debido a que la unidad se reconoce en una sola clase, no es posible estudiar el comportamiento espacial del macizo para esta variable en la sección 28NW. En la trayectoria N45°E, se reconoce una sola clase, por ende, al igual que lo mencionado anteriormente no es posible estudiar su deriva espacial.

- i) Unidad geológica geotécnica RAQS: en el eje de coordenadas z la población de valores asociada al dominio SW es considerada no representativa, debido a su poca cantidad de datos. Se registra un promedio de clase en el dominio NE, en la cota 4218 m (clase 6), correspondiente a un valor de 10, que está por debajo la media general de la unidad (14). El resto de los promedios de clases no alcanzan valores como el mencionado anteriormente. En la trayectoria N45°E, la clase 4 contiene el promedio más bajo correspondiente a 0, sin embargo, debido a la poca cantidad de datos se le considera no representativo. Los demás promedios no indican valores similares al mencionado.

- j) Unidad geológica geotécnica RLX: se identifican promedios de poblaciones únicamente en el dominio SW, cuyas medias son muy similares entre sí, por ende, no se reconoce un promedio de clase en especial que esté disminuyendo en mayor medida la calidad del macizo rocoso. En la trayectoria N45°E, ocurre la misma situación, ya que los promedios de poblaciones de valores son similares entre sí.

- k) Unidad geológica geotécnica USPK: registra tres promedios de clases bajo la media general de la unidad en estudio, en la cota 4130 m (clase 5), 4218 m (clase 6) y 4482 m (clase 9), correspondiente a valores de 10, 8 y 9. El resto de los promedios son similares a la media general (12) o son mayores a los mencionados anteriormente. En la trayectoria N45°E, las clases 2 y 3 asociadas al dominio SW, presentan los promedios de clases más bajos, correspondiente a 9 y 10. El resto de los valores son mayores a los ya mencionados.

- l) Unidad geológica geotécnica USQS: se identifican promedios de poblaciones asociados al dominio NE, reconociéndose una media de clase en la cota 4394 m (clase 8), que está bajo la media general de la unidad (19), correspondiendo a un joint condition de 15, sin embargo, dado su poca cantidad de datos es considerado no representativo. El resto de promedios de poblaciones son similares a la media general. En la trayectoria N45°E, hay dos promedios de clases que son muy similares entre sí y se reconocen asociados al ambiente porfídico.

5.2.2 Sección 20 NW y 17NW

La sección 20NW y 17NW fueron analizadas y estudiadas de la misma manera que las variables descritas para la sección 28NW. Los resultados de los gráficos generados entregaron al menos dos clases por sección, cuyos valores promedios de las variables geotécnicas de interés experimentaban mayor variación con respecto a su media general, correspondiendo a la clase 3 y 5 en la sección 20 NW, mientras que la 17NW, señaló la clase 4 y 5. En el apartado de anexos a partir de las figuras 9.12 hasta 9.27 es posible observar la variabilidad de los promedios de clase para cada variable geotécnica en las diferentes unidades geológicas geotécnicas definidas (UGT).

A continuación, en la tabla 5.2 se ilustran los promedios de clases de las variables geotécnicas frecuencias de fracturas (FF), rock quality designation (RQD) e índice de resistencia geológica (GSI) de la sección 28NW, en cada unidad geológica geotécnica definida, tanto en su trayectoria N45°E, como de cotas, representando de forma cuantitativa lo ilustrado en los gráficos. Las celdas rojas indican promedios asociados a características categóricas de macizo rocoso de menor calidad, con respecto a la media general entregada por Collahuasi, mientras que, las grises señalan promedios de clases no representativos en su respectiva unidad geológica geotécnica definida, debido a la poca cantidad de datos presentes en la clase. Las tablas vinculadas a la sección 20NW y 17NW, se ubican en el apartado de anexos, figuras desde la 9.28 a 9.30, que además, incorporan la variable joint condition (JC) de cada sección representativa.

GSI											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)													
Desplazamiento desde zona más profunda a superficial (cotas)											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)													
UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ANPK (39)	SW (38)			43	39	40	41	34	39	24		ANPK (39)	SW (38)	32	45	42	33	41						
	NE (41)			24	48	49	37	35					NE (41)				28	45	18					47
ANQS (36)	SW (39)					46	38	37	43	29	47	ANQS (36)	SW (39)			40	52	34	48					
	NE (32)			9		50							NE (32)						50	9				
ARGI (38)	SW (33)					32	42	38	24	29	52	ARGI (38)	SW (33)	33	28	42	30					42	52	27
	NE (44)		18	30	59	75	16						NE (44)											
ARGM (45)	SW (41)			36	41	33	44	42	43	34		ARGM (45)	SW (41)	33	44	30	44							
	NE (50)	62	53	38	62								NE (50)				29	44	63					
PPK (46)	SW (35)					35						PPK (46)	SW (35)				35							
	NE (57)	74	62	48	47	53							NE (57)						43	66	50			
PQS (62)	SW											PQS (62)	SW											
	NE (62)	56	74	57	59	85							NE (62)							65	52			
RAPK (42)	SW (35)			28	46	46	33		22	28		RAPK (42)	SW (35)	55	36	28	28							
	NE (49)			68	72	43	55	92	55	29			NE (49)						34			52	47	46
RAPK+ (37)	SW										37	RAPK+ (37)	SW											37
	NE (37)												NE (37)											
RAQS (35)	SW (11)							11				RAQS (35)	SW (11)				11							
	NE (59)			55	57	70	47	59					NE (59)					45	63	53	36	65		
RLX (22)	SW (22)								20	24	18	RLX (22)	SW (22)	22	17	29								
	NE												NE											
USPK (51)	SW (41)					44	32					USPK (51)	SW (41)			31	45							
	NE (60)	83	81	68	62	60	55	56	61	42			NE (60)									61	71	54
USQS (78)	SW											USQS (78)	SW											
	NE (78)						79	73	80				NE (78)										77	82

FF											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)													
Desplazamiento desde zona más profunda a superficial (cotas)											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)													
UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ANPK (11)	SW (12)			12	15	12	11	12	11	14		ANPK (11)	SW (12)	13	9	10	18	13						
	NE (10)			21	8	5	9	15					NE (10)				25	7	12					8
ANQS (11)	SW (11)					9	13	10	8	12	10	ANQS (11)	SW (11)			9	1	14	8					
	NE (12)			18		8							NE (12)					8	18					
ARGI (9)	SW (11)					18	4	10	13	12	3	ARGI (9)	SW (11)	12	11	6	15					11	6	11
	NE (8)		20	11	4	0	14						NE (8)						11	6	11			
ARGM (11)	SW (10)			25	31	7	9	8	8	12		ARGM (11)	SW (10)	12	8	6	14							
	NE (12)	5	10	19	1								NE (12)				25	14	5					
PPK (12)	SW (18)					18						PPK (12)	SW (18)				18							
	NE (7)	3	6	11	8	3							NE (7)					10	4	10				
PQS (4)	SW											PQS (4)	SW											
	NE (4)	7	3	5	4	1							NE (4)						3	6				
RAPK (10)	SW (12)			19	8	13	13		14	11		RAPK (10)	SW (12)	5	13	12	19							
	NE (8)			2	2	10	8	1	4	14			NE (8)					6			8	8	9	
RAPK+ (9)	SW										9	RAPK+ (9)	SW											9
	NE (9)												NE (9)											
RAQS (11)	SW (17)							17				RAQS (11)	SW (17)				17							
	NE (4)			7	4	2	8	3					NE (4)					6	4	7	17	3		
RLX (14)	SW (14)								11	13	17	RLX (14)	SW (14)	15	14	11								
	NE												NE											
USPK (8)	SW (11)					10	15					USPK (8)	SW (11)			16	9							
	NE (5)	1	1	2	3	5	6	6	5	9			NE (5)								5	2	6	
USQS (2)	SW											USQS (2)	SW											
	NE (2)					2	3	1					NE (2)										2	1

RQD											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)													
Desplazamiento desde zona más profunda a superficial (cotas)											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)													
UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ANPK (55)	SW (49)			49	41	53	53	46	51	39		ANPK (55)	SW (49)	45	66	58	24	53						
	NE (62)			15	74	78	61	42					NE (62)				5	72	40					73
ANQS (52)	SW (56)					70	42	59	68	44	64	ANQS (52)	SW (56)			64	12	37	75					
	NE (48)			8		78							NE (48)						78	8				
ARGI (55)	SW (49)					29	76	51	40	42	98	ARGI (55)	SW (49)	39	46	68	37							
	NE (60)		4	48	83	97	31						NE (60)						49	75	44			
ARGM (53)	SW (55)			27	17	46	61	58	59	47		ARGM (53)	SW (55)	46	60	47	53							
	NE (52)	76	52	25	92								NE (52)				20	38	77					
PPK (44)	SW (19)					19						PPK (44)	SW (19)				19							
	NE (68)	85	69	50	63	84							NE (68)						55	78	52			
PQS (82)	SW											PQS (82)	SW											
	NE (82)	64	88	78	84	99							NE (82)							85	71			
RAPK (56)	SW (47)			14	71	41	44		17	53		RAPK (56)	SW (47)	88	43	37	14							
	NE (66)				78	96	59	68	100	88	47		NE (66)					78	69	62	64			
RAPK+ (70)	SW										70	RAPK+ (70)	SW											
	NE (70)												NE (70)											
RAQS (71)	SW (18)							18				RAQS (71)	SW (18)				18							
	NE (71)			68	72	77	61	77					NE (71)						72	76	71	15	75	
RLX (32)	SW (32)								34	37	21	RLX (32)	SW (32)	29	29	44								
	NE												NE											
USPK (67)	SW (56)					61	36					USPK (67)	SW (56)			26	66							
	NE (78)	92	92	81	89	81	75	68	80	65			NE (78)									82	82	

Capítulo 6. Discusiones

En el estudio de cotas de la sección 28NW, las unidades geológicas-geotécnicas (UGT) presentaron en su dominio suroeste a nivel general promedios de porcentajes de índice de resistencias geológicas (GSI) más bajos con respecto al noreste, caso similar aconteció con la variable RQD, correspondiendo a una relación relativamente proporcional entre ambas variables. Para el caso de la variable condición de discontinuidades (JC), esta presentó patrones de tendencias espacial ligeramente similares a la variable GSI en las respectivas unidades geológicas geotécnicas, debido a que el índice de resistencia de Hoek y Brown (1997) depende en parte del parámetro de condición de discontinuidades para su obtención. La frecuencia de fracturas (FF), indicó correlaciones inversamente proporcionales a las variables RQD y GSI. Dicha correlación concuerda con los formulismos de Priest y Hudson (1976) y Diederichs (2013), que contemplan en parte el parámetro FF para la obtención del RQD (por los primeros autores señalados) y GSI (por Diederichs).

Respecto al análisis desde el dominio SW a NE, es decir, trayectoria N45°E, se reconocieron dos clases (4 y 1) que mostraron una variación considerablemente con respecto de los promedios de las unidades geológicas geotécnicas. En la primera el 86% de las UGT asociadas a dicha clase (siete en total) evidencian los mayores promedios de frecuencia de fracturas, correspondientes a ANPK, ARGI, ARGM, PPK, RAPK y RAQS, salvo la unidad ANQS, que correspondería al segundo mayor, lo que indicó espacialmente una zona de fuerte condición estructural mayor al resto, quedando representado por los sistemas estructurales principalmente de rumbo NNW-SSE y NW-SE de dicha sección (Figura 6.1), que según Oyarzún (2010) menciona que son consideradas fallas subsidiarias, donde además, se reconoció la Falla Última (de carácter distrital). La segunda clase mencionada consideró cinco unidades geológicas-geotécnicas (ANPK, ARGI, ARGM, RAPK y RLX), que debido a su ubicación en el extremo suroeste contempló promedios asociados únicamente a dicho dominio, que experimentaron un aumento en sus promedios de poblaciones de valores, a excepción de la unidad Roca Ácida Propilítica Potásica (RAPK). Si bien hay un incremento de promedio, este es menor en comparación a la condición estructural de la zona 4. Cabe señalar que esta clase no contiene

proyecciones estructurales en la sección a diferencia de otras (Figura 6.1, imagen superior). Con respecto a las demás variables, estas presentan un comportamiento inversamente proporcional, sobre todo el GSI y RQD.

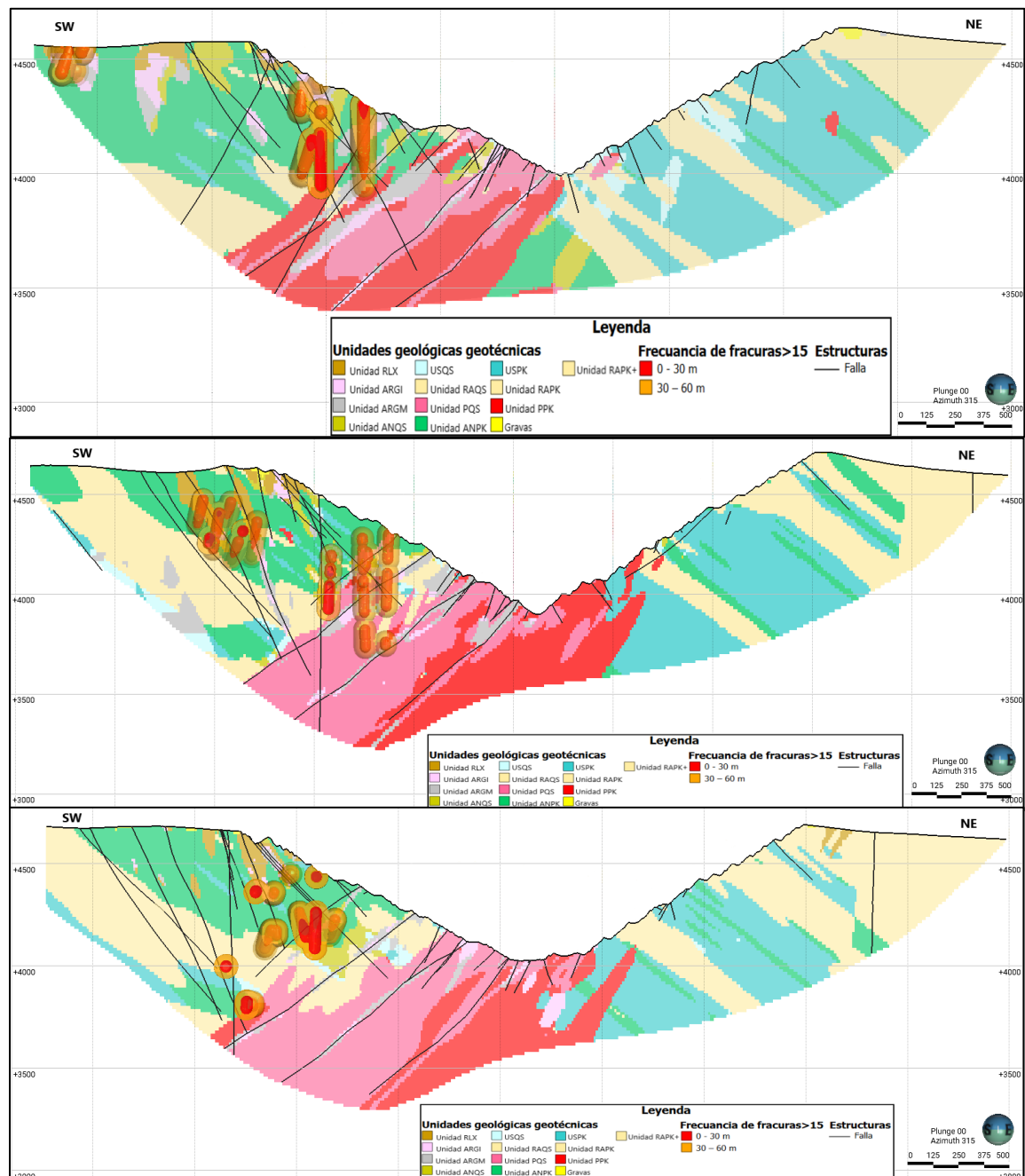


Figura 6.1: Representación de zonas de fuerte condición estructural en las UGT caracterizadas, con el levantamiento de las proyecciones estructurales y zonas con formas concéntricas que indican FF en la categoría extremadamente fracturados. Sección 28NW (imagen superior), 20NW (central) y 17NW (inferior).

En las cotas de la sección 20NW, se reconoció a nivel general que el dominio epitermal presentó promedios de poblaciones de valores con mayor frecuencia de fracturas con respecto al ambiente con características asociados al porfídico, a excepción de la Unidad Argílica Moderada. Dicha variable presenta un comportamiento inversamente proporcional a las otras analizadas, sobre todo con el RQD y GSI.

La sección analizada desde un desplazamiento SW a NE, con trayectoria N45°E señaló mayores promedios de frecuencia de fracturas en el dominio SW, con una diferenciación más resaltada en comparación al estudio de cotas. Se identificaron dos zonas que aumentan los valores medios de las unidades geológicas-geotécnicas ubicadas en dicho sector, correspondiendo a las clases 5 y 3. En la primera clase mencionada, de las diez UGT asociadas (unidades RLX y RAPK+, están ausentes en la clase), siete presentaron los promedios más altos de clase, salvo las unidades Andesita Propilítica Potásica (ANPK), Pórfido Propilítico Potásico (PPK) y Pórfidos Cuarzo Sericita (PQS), que correspondieron al segundo y tercer mayor promedio. Dicha zona presenta una fuerte condición estructural, asociados a la falla de característica distrital denominada Última y sistemas estructurales subsidiarios. En la clase 3, de las cinco unidades geológicas-geotécnicas asociadas, dos (ANPK y RLX) alcanzaron sus peak promedio de frecuencias de fracturas, mientras que la ANQS señaló el segundo mayor promedio, quedando las unidades ARGM y RAPK asociados a promedios de clases relativamente altos. Dicha variable presentó un relativo comportamiento inversamente proporcional a las demás, con mayor correlación al RQD y GSI.

La variabilidad de tendencias de cotas para la sección 17NW, presentó del mismo modo una mayor frecuencia de fracturas en el dominio SW. La variable frecuencia de fracturas señaló un comportamiento inversamente proporcional con las otras analizadas, con una mayor correlación en la variable RQD y GSI. Esto es debido a que el formulismo utilizado por Diederichs (2013) para obtener el GSI de forma cuantitativa, requiere en parte de la variable frecuencia de fracturas (FF) y rock quality designation (RQD).

El análisis desde un desplazamiento SW a NE, con trayectoria N45°E, para esta sección señaló a nivel general un mayor promedio de frecuencia de fracturas en las poblaciones de valores vinculados al ambiente epitermal, a excepción de la unidad PPK. Se identificaron dos zonas con aumentos en los promedios de clases, correspondiente a las

clases 4 y 5. Ambas asociadas a una fuerte condición estructural. Dicha variable (FF) presenta una relación inversamente proporcional a las demás, sobre todo a RQD y GSI. La relación tiene sentido, ya que entre más fracturas presente un macizo rocoso, su calidad será reducida, por lo tanto, el porcentaje de GSI y RQD disminuirá. Por lo cual, esto implica que el conjunto de variables de estudio esté representando la calidad de macizo y su grado de fracturamiento de forma cuantitativa.

Destacar que las 6 clases identificadas en las secciones representativas, desde un desplazamiento SW a NE con trayectoria N45°E, presentaron en sus unidades geológicas geotécnicas en general promedios de poblaciones de valores asociados a alto grado de fracturamiento, para la variable FF, mientras que, el GSI y RQD indicaron macizo rocoso de menor calidad. Las porciones superficiales de dichas clases identificadas, forman parte del dominio SW, por ende, concuerdan con el informe de CMDIC (2021), el cual menciona que en el área de carácter epitermal se reconocen zonas de intenso fracturamiento.

Se reconocieron 3 familias de fallas correspondientes a NE-SW, N-S y NNW-SSE a NW-SE, tal como lo menciona Oyarzún (2010). Dicho autor señala que los sistemas N-S, NNW-SSE a NW-SE se consideran fallas subsidiarias a las NE-SW. Basado en lo anterior, en el dominio SW se identificó una abundante presencia de fallas subsidiarias, principalmente en la sección 17NW y 20 NW.

En el caso del llamado modelo de clases, cuyos cuerpos generados provienen de la unión de clases numéricas homólogas entre secciones, en particular, no se identificó en el análisis de gráficos tres clases numéricas iguales entre secciones cuyos promedios de valores estén asociados a alto grado de fracturamiento y menor calidad de macizo rocoso, que afecten además, gran parte de sus unidades geológicas geotécnicas presentes, por ende, ninguno de estos cuerpos muestra una trayectoria de franja completa de macizo de menor calidad. Sin embargo, en el modelo se puede apreciar unas formas concéntricas alineadas acorde a su sección (Figura 6.2), que indican aquellas clases identificadas por sección que afectan gran parte de las UGT presentes, con frecuencias de fracturas mayor o igual a 15, es decir, en categoría extremadamente fracturado, cuya tonalidad roja parte desde el eje del sondaje vinculado a dichos valores hacia 30 metros de circunferencia, mientras que, la tonalidad naranja señala desde 30 m hasta 60 m hacia el exterior (Figura

6.1), señalando ambos de manera decreciente una posible zona de mayor efecto. Dichas aureolas se observan mayormente entre la franja de tonalidad morada (clase 4, sección 28NW y 17NW) y celeste (clase 5, sección 20NW y 17NW). Considerando lo anterior es posible afirmar lo siguiente:

- A) Entre las clases 5 de la sección 17NW y 20 NW siguiendo la trayectoria de la franja, existe la posibilidad de que en dicho sector (en la parte inferior del cuerpo de tonalidad celeste) presente una zona de macizo rocoso de menor calidad, debido a los altos promedios frecuencia de fracturas presentes entre clases.
- B) Un leve aumento en el ángulo que permitió definir las clases entre secciones, podría quizás generar un cuerpo completo que señale una trayectoria de zona de macizo rocoso de menor calidad con alto grado de fracturamiento, en la medida que la trayectoria del ángulo considere gran parte de la clase 4 sección 28NW, clase 5 secciones 20NW y 17NW (ver línea negra discontinua en Figura 6.2).

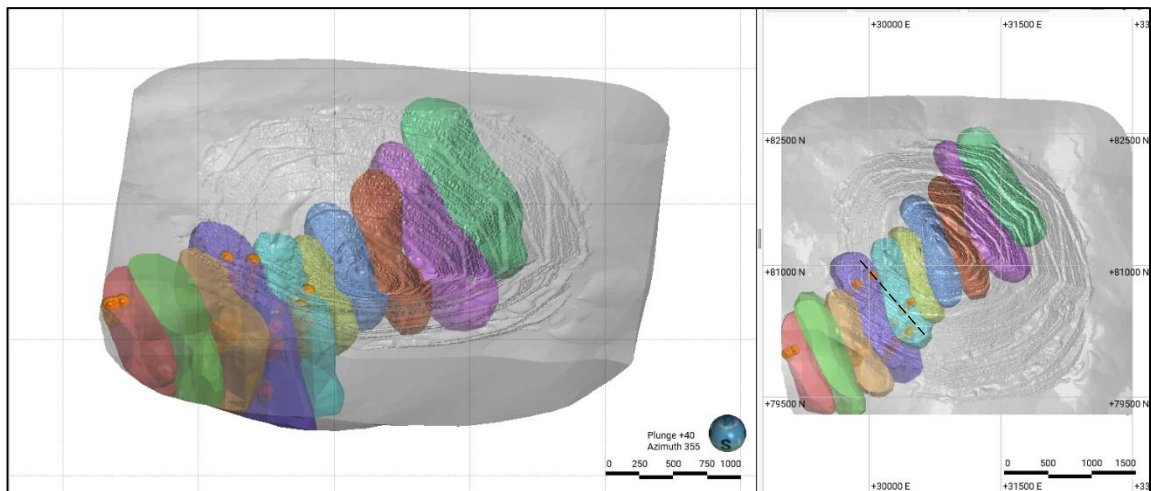


Figura 6.2: Modelo de clases, producto de la unión de clases numéricas homólogas entre secciones, indicando en formas concéntricas, las zonas con variable de frecuencias de fracturas asociada a la categoría extremadamente fracturado, afectando gran parte de las unidades geológicas geotécnicas presentes en dichas clases. Línea negra discontinua, señala una trayectoria recomendada para hallar posiblemente un macizo de menor calidad entre áreas de secciones, mediante la intersección de las clases de interés.

Con respecto a la metodología empleada, ésta permitió estudiar la variabilidad de las variables geológicas y geotécnicas, mediante secciones representativas que ilustraron de

forma cualitativa diferencias notorias entre ambos ambientes, como un predominio de mineralización supérgena en el dominio SW, con un profuso fracturamiento secundario y cuantiosa ocurrencia de frecuencias de fracturas de categoría “muy fracturado” y “extremadamente fracturado”, mientras que, el dominio NE mostró un predominio de mineralización hipógena, con fracturamiento asociado principalmente a estructuras de carácter distrital como la Falla Rosario, con alteraciones biotítica, potásica, sericita gris verde, cuarzo-sericita y argílica, que son típicas de los pórfidos cupríferos, estando esta última alteración mencionada ligada preferentemente a las fallas principales. Dichas diferencias entre dominios coinciden en general con las reconocidas por Sobarzo (2010), salvo que en este estudio, además, se reconoció una relación entre los sectores de las variables geotécnicas FF, RQD, JC y GSI, asociados a alto grado de fracturamiento y menor calidad de macizo rocoso, con respecto a zonas de fuerte condición estructural.

La implementación de gráficos de deriva espacial, permitieron identificar de forma adecuada las zonas con menor calidad de macizo rocoso y alto grado de fracturamiento, que afectaron a gran parte a las extensiones de unidades geológicas geotécnicas posicionadas en dichas clases de sección, ilustrando marcados cambios de tendencias de promedios de poblaciones de valores en algunas UGT (como las pertenecientes a la clase 4 de la sección 28NW). Cabe destacar que se dio mayor relevancia al desplazamiento N45°E debido a que, según lo mencionado en la literatura el cambio de ambiente ocurre desde NE a SW, y no en profundidad, sin embargo, el estudio de cotas confirmó que existe a nivel general una menor calidad en el dominio SW. Una debilidad de aplicar gráficos de deriva espacial en la metodología es la cantidad de gráficos que se podrían llegar a generar, ya que, si se debe estudiar una mayor cantidad de variables y unidades, con una gran cantidad de zonas, implicaría mayor requerimiento de tiempo de análisis, por lo que no es muy recomendable para investigaciones breves que requieran de gran análisis multivariados. Por otro lado, una de sus fortalezas es que permite estudiar cualquier sitio espacialmente, con las dimensiones que el investigador requiera, siempre y cuando se tengan datos cuantitativos. Asimismo, la metodología usada se puede aplicar a estudios de otras ramas de la Geología, como exploraciones mineras, identificando espacialmente en una dirección dada, las zonas cuyos promedios de poblaciones de valores evidencien las mayores leyes de elementos de interés.

Capítulo 7. Conclusiones

Se reconoció a nivel general en las tres secciones estudiadas un predominio de poblaciones de valores con mayor promedio de frecuencia de fracturas en el dominio SW, asociado al ambiente con características de tipo epitermal de alta sulfidización, en comparación al dominio NE vinculado a un depósito tipo pórfido cuprífero, constatando notables diferencias en las unidades Andesita Propilítica Potásica (ANPK) y la Sedimentaria Propilítica Potásica (USPK), que en caso del primer ambiente señalado, el grado de fracturamiento se encuentra en la categoría de macizo muy fracturado, alcanzando a nivel particular (sección 28NW) el grado de extremadamente fracturado, mientras que, en el ambiente porfídico corresponde a una categoría de tipo fracturado para ambas unidades geológicas geotécnicas. Además, presentó una mayor extensión de zonas de alta frecuencia de fracturas en el ambiente epitermal, constituyendo bandas de alto fracturamiento entorno a las fallas de carácter distrital y fallas intermedias (extensión mayor a 90 metros) principalmente.

Las variables geotécnicas de interés presentaron relaciones, que para el caso de la variable rock quality designation (RQD), índice de resistencia geológica (GSI), joint condition (JC) fueron directamente proporcionales, siendo esta última variable mencionada ligeramente proporcional. Para el caso de la frecuencia de fracturas, señaló una relación inversamente proporcional a las variables expuestas anteriormente, principalmente al RQD y GSI.

El estudio de las variabilidades de los promedios de las diferentes variables geotécnicas de interés permitió identificar en cada sección zonas donde el macizo rocoso presentó una menor calidad y alto grado de fracturamiento, afectando completamente o gran parte las unidades geológicas geotécnicas cuya extensión se posicionaba en dicha clase, como en la clase 4 de la sección 28NW.

En cada sección se identificaron dos zonas con alto grado de fracturamiento y menor calidad de macizo rocoso, asociados a una fuerte condición estructural. Sin embargo, clase 1 de la sección 28NW no presentó proyecciones estructurales que plasmase la información de variabilidades entregada en los gráficos. No obstante, indicó una zona con alto grado de fracturamiento, con valores de frecuencia de fracturas mayor a 15, que se atribuyó a una categoría de macizo extremadamente fracturado. Esta zona sería de interés para toma

de datos estructurales, estudios de calidad de macizo y predicción de condición de inestabilidades en futuras etapas de producción.

Se reconocieron 3 familias de fallas correspondientes a NE-SW, N-S y NNW-SSE, donde en el dominio SW se identificó una abundante presencia de fallas subsidiarias, principalmente en las secciones 17NW y 20 NW.

De acuerdo con los resultados de los análisis estadísticos de la base de datos y observaciones de modelamiento es posible afirmar que el ambiente de alteración-mineralización tipo epitermal constituye un macizo rocoso de menor calidad, respecto al ambiente con características de alteración-mineralización tipo pórfido. Esto se debe a una mayor presencia de fallas (de los diferentes tipos reconocidos), sobre todo de tipo intermedio y menores, como también, el reconocimiento de una predominancia de unidades geológicas geotécnicas de menor competencia en el dominio SW, tales como, Unidad de Rocas con Alteración Argílica Intensa (ARGI), Rocas con Alteración Argílica Moderada (ARGM), y Unidad de Rocas Lixiviadas (RLX).

La metodología aplicada permitió estudiar estadísticamente el comportamiento espacial de poblaciones de valores asociadas a cualquier tipo de variable, identificando además su posicionamiento para este caso dentro del modelo de rajo Rosario.

Capítulo 8. Referencia

Araya, C. (2010). Caracterización geotécnica/hidrogeológica mina Chuquicamata, región de Antofagasta, Chile. Tesis para optar al título de Geólogo, Universidad Católica del Norte. Antofagasta, Chile. pp. 194. <http://bibliotecadigital.ucn.cl/rbe/IP/tesis/2014931-1337tesisban53090.pdf>

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

Ávalos, N. (2018). Documento sobre inclusiones fluidas VI: exploración para depósitos pórfido cuprífero basada en petrografía de inclusiones fluidas en el distrito minero Collahuasi, Chile. Tesis para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile. Santiago, Chile, pp. 178. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168703>

Baker, M. J., Wilkinson, J. J., Wilkinson, C. C., Cooke, D. R., y Ireland, T. (2020). Epidote trace element chemistry as an exploration tool in the Collahuasi district, northern Chile. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 115(4), 749–770. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4739>

Barton, N. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *ISRM, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(6).

Berrios, D. (2020). Alteración hidrotermal en el sector Las Amarillas, valle del río volcán, Región Metropolitana, Chile. Tesis para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Santiago, pp 84.

Bieniawski, ZT. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications: a Complete Manual*. John Wiley and Sons: 251 pp. New York.

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. (2002) The Andean porphyry systems. Vol. 4, de Giant Ore Deposits: Characteristics, Genesis and Exploration, edited by David R. Cooke and June Pongratz, 5-21. Australia: Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania.

Camus, F. (2003). Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería.

Clark, A. H., Archibald, D. A., Lee, A. W., Farrar, E., y Hodgson, C. J. (1998). Laser probe $40\text{ Ar}/39\text{ Ar}$ ages of early and late stage alteration assemblages, Rosario porphyry copper-molybdenum deposit, Collahuasi District, I Region, Chile. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, v.93, p. 326–337. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.3.326>

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

CMDIC, (2021). Nota técnica, actualización definición y códigos de Unidades Geológicas Geotécnicas Rosario. Informe inédito. Iquique, Chile, pp. 27.

Corbett, G., Leach, T. (1998). Southwest Pacific Rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization (No. 6). Boulder, Co: Society of Economic Geologists.

Cornejo, P. (2005). Estudio Petrográfico y Calcográfico Proyecto La Grande. Informe Interno de la compañía, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, Iquique, Chile, pp 78.

Deere, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D., y Cording, E. J. (1967). Design of Surface and Near-Surface Construction in Rock, in Failure and Breakage of Rock. C. Fairhurst, Ed. *Society of Mining Engineers of AIME*: 237-302. New York.

Djouka-Fonkwe, M. L., Kyser, K., Clark, A. H., Urqueta, E., Oates, C. J., & Ihlenfeld, C. (2012). Recognizing propylitic alteration associated with porphyry cu-mo deposits in lower greenschist facies metamorphic terrain of the collahuasi district, northern Chile-- implications of petrographic and carbon isotope relationships. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 107(7), 1457–1478. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.7.1457>

Hoek, E., Carter, T. G., & Diederichs, M. S. (2013). Quantification of the geological strength index chart. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-2013). ARMA.

Diederichs, M.S. (2013). Quantification of the Geological Strength Index chart. American Rock Mechanics Association, San Francisco.

Dilles, J. H., y John, D. A. (2021). Porphyry and epithermal mineral deposits. En *Encyclopedia of Geology* (Elsevier), vol. 5, pp. 847-866.

Egaña, M. (2008). Geoestadística aplicada a parámetros geotécnicos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile. Santiago, Chile, pp. 96.

Espinoza, R. (2018). Variabilidad espacial de la resistencia de la roca intacta (IRS) y del índice geológico de resistencia (GSI) en las unidades geotécnicas básicas de mina Chuquicamata. Región de Antofagasta, Chile. Tesis para optar al título de Geólogo, Universidad de Concepción. Concepción, Chile, pp. 121.

Garay, J. (2021). Modelamiento estructural de la ocurrencia y distribución del arsénico en el yacimiento rosario, distrito Collahuasi, región de Tarapacá, Chile. Universidad Andrés Bello, Departamento de Ciencias de la Ingeniería (Inédito): 213 pp. Iquique.

García, A. (2021). Caracterización mineralógica de las alteraciones hidrotermales en el área geotérmica de Paipa Boyacá, Colombia. Trabajo de investigación para optar al título de magister, Universidad Nacional de Colombia. Colombia, pp. 260.

Giggenbach, W.F., (1992). Magma degassing and mineral deposition in hydrothermal systems along convergent plate boundaries: *Economic Geology*, 87, 1927-1944.

González, M. (2019). Actualización del modelo geotécnico rajo Rosario. Informe inédito, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi Iquique, Chile, pp. 76.

González, L. I. (2002). Ingeniería Geológica. Prentice Hall. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro%202.pdf

Hammarstrom, J. M., Zientek, M. L., Parks, H. L., Dicken, C. L., y the U.S. Geological Survey Global Copper Mineral Resource Assessment Team. (2019). Assessment of undiscovered copper resources of the world, 2015. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018–5160, 619 p.

Hedenquist, J. W., Arribas, A., Jr., y Reynolds, T. J. (1998). Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93(4): 373–404.

Hoek, E. (1994). Strength of rock and masses. *News Journal of the ISRM*, 2(2), 4-16.

Hoek, E. y Brown, E. (1997). Practical estimates of rock mass strength. In international journal of rock mechanics and Mining sciences. 25pp.

John, D., Ayuso, R., Barton, M., Blakely, R., Bodnar, R., Dilles, J., Gray, F., Graybeal, F., Mars, J., McPhee, D., Seal, R., Taylor, R. y Vikre, P. (2010). USGS Porphyry Copper Deposit Model. (John, D. editor). Mineral deposit models for resource assessment: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-B.

Lowell, J. D., & Guilbert, J. M. (1970). Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4): 373–408.

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. J., Cooke, D. R., Berry, R. F., Clark, A. H., Archibald, D. A., Mathur, R., Walshe, J. L., y Duran, M. (2004). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Re-Os geochronology of porphyry copper-molybdenum deposits and related copper-silver veins in the Collahuasi district, northern Chile. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*. Vol. 99: 673–690 pp. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.4.673>

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. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.100.5.835>

Mella, M. (2022). Caracterización geológica del arsénico en el yacimiento Rosario, Región de Tarapacá, Chile. Tesis para optar al título de geólogo, Universidad de Concepción.

Meyer, C., y Hemley, J. J. (1967). Wall rock alteration. En: Barnes, H. L. (Eds.). *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York, Holt, Rinehart and Winston. 166–235.

Montan, D. (2016) Caracterización geotécnica del macizo rocoso, sector acantilado población Coviefi, Antofagasta. Tesis para optar al título de Geólogo, Universidad Católica del Norte. Antofagasta, Chile. pp. 132.

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.

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.

Orbezo, R. (2019). Geología de Collahuasi. Informe Inédito. Gerencia de Recursos Minerales y Desarrollo, Vicepresidencia de Desarrollo y Sustentabilidad, CMDIC. Iquique, Chile, pp. 76.

Oyarzún, G. (2010). Caracterización estructural del yacimiento Rosario Oeste, Distrito Collahuasi, I Región de Atacama, Chile. Tesis para optar al título de Geólogo, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, pp. 148.

Pérez, J. (2023). Gerencia de recursos minero y desarrollo. Informe inédito. Iquique, Chile, pp. 114.

Priest, S. D. y Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacing in rock. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science, and Geomechanics Abstracts*, Vol. **13**:135– 148.

Quiroga, J. (2019). Caracterización y modelamiento de vetillas en Rosario, compañía minera doña Inés de Collahuasi S.C.M., Región de Tarapacá, Chile. Tesis para optar al título de Geólogo, Universidad de Atacama. Copiapó, Chile, pp. 161. <https://repositorioacademico.uda.cl/handle/20.500.12740/16220?show=full>

Quispe, A. (2019). Modelo de Bloques Geotécnico – Rajo Rosario. Informe Inédito. Iquique Chile, pp. 86.

Reyes, A.G., (1991). Mineralogy, distribution and origin of acid alteration in Philippine geothermal systems: Geological Survey of Japan Reports, 277, 59-65.

Richards, J. P. (2003). Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology*, 98(8): 1515–1533.

Rowland JV, Simmons SF. (2012). Hydrologic, magmatic, and tectonic controls on hydrothermal fluid flow, Taupō Volcanic Zone, New Zealand: implications for the formation of epithermal vein deposits. *Economic Geology*. 107:427–457.

Sanhueza, A., Alarcón., B. Giglio. S., (2006). Informe Campaña Exploraciones Fase II Proyecto Rosario Oeste: Informe interno de la compañía, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, Iquique, Chile, 82 p.

Seedorff, E., Dilles, J. H., Proffett, J. M., Jr., Einaudi, M. T., Zurcher, L., Stavast, W. J. A., Johnson, D. A., y Barton, M. D. (2005). Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume: 251–298.

Seequent (2020). Duplicate holes & overlapping segments, errors & warnings [power point slide]. Seequent. <https://help.seequent.com/Geo/6.0/en-GB/Content/data/correct-errors.htm>

Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 105(1), 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>

Sobarzo, A. (2010). Geología y distribución del Au-Ag en el yacimiento Rosario Oeste. Tesis para optar al título de Geólogo, Universidad de Concepción, Chile, pp. 151.

Steven, T.A., Lipman, P.W., Fisher, F.S., Blenlewski, C.L., Meeves, H.C., (1990). Mineral resources of study areas contiguous to the Uncompahgre Primitive area, San Juan Mountains, southwestern Colorado: U.S. Geological Survey Bulletin, 1391-E, 126

Tomlinson, A.; Martin, M.; Blanco, N. (2001). U-Pb and K-Ar geochronology from the Cerro Empexa Formation, 1a and 2a Regions, Precordillera, northern Chile. In *South American Symposium on Isotope Geology, Comunicaciones 52, Actas I*: 169. Pucón.

Vega, P. (2018). Estimación de la frecuencia de fracturas en yacimientos mineros vía herramientas geoestadísticas. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Minas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. pp. 89.

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 N° 59 Collacagua, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Carta Geológica de Chile, 1:250.000, pp. 79.

White, N.C., Leake, M.J., McCaughey, S.N., Parris, B.W., (1995). Epithermal gold deposits of the southwest Pacific: *Journal of Geochemical Exploration*, 54, 87-136.

Williams-Jones, A. E., Migdisov, A. A., Archibald, S. M., y Xiao, Z. F. (2002). Vapor-transport of ore metals. *Geochemical Society Special Publication*, 7: 279–305.

Capítulo 9. Anexos

9.1 Confección de secciones representativas

9.1.1 Sección 28

9.1.1.1 Variable GSI

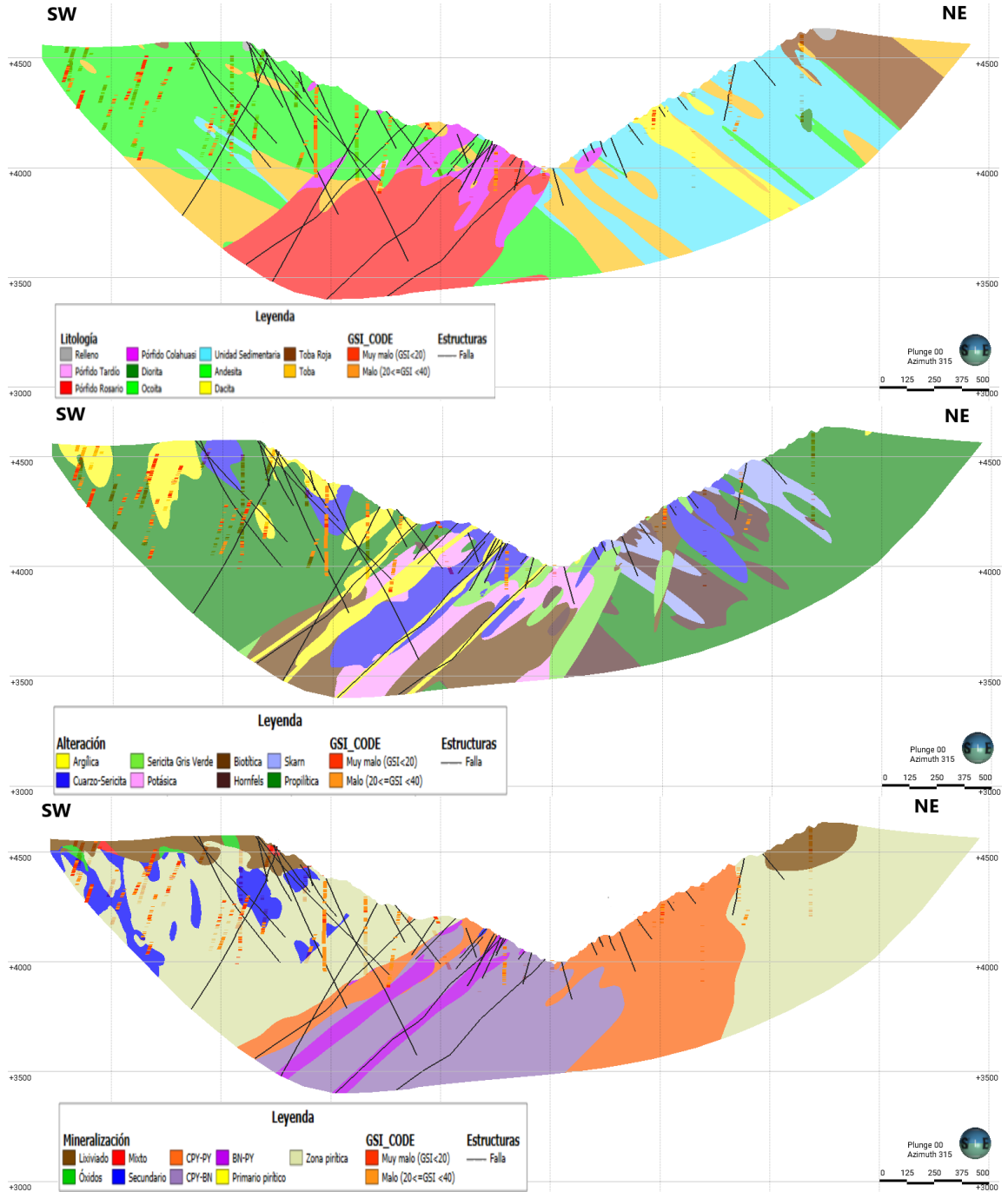


Figura 9.1: Distribución espacial de la variable índice de resistencia geológica (GSI) en sección de modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización (sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras.

9.1.1.2 Variable RQD

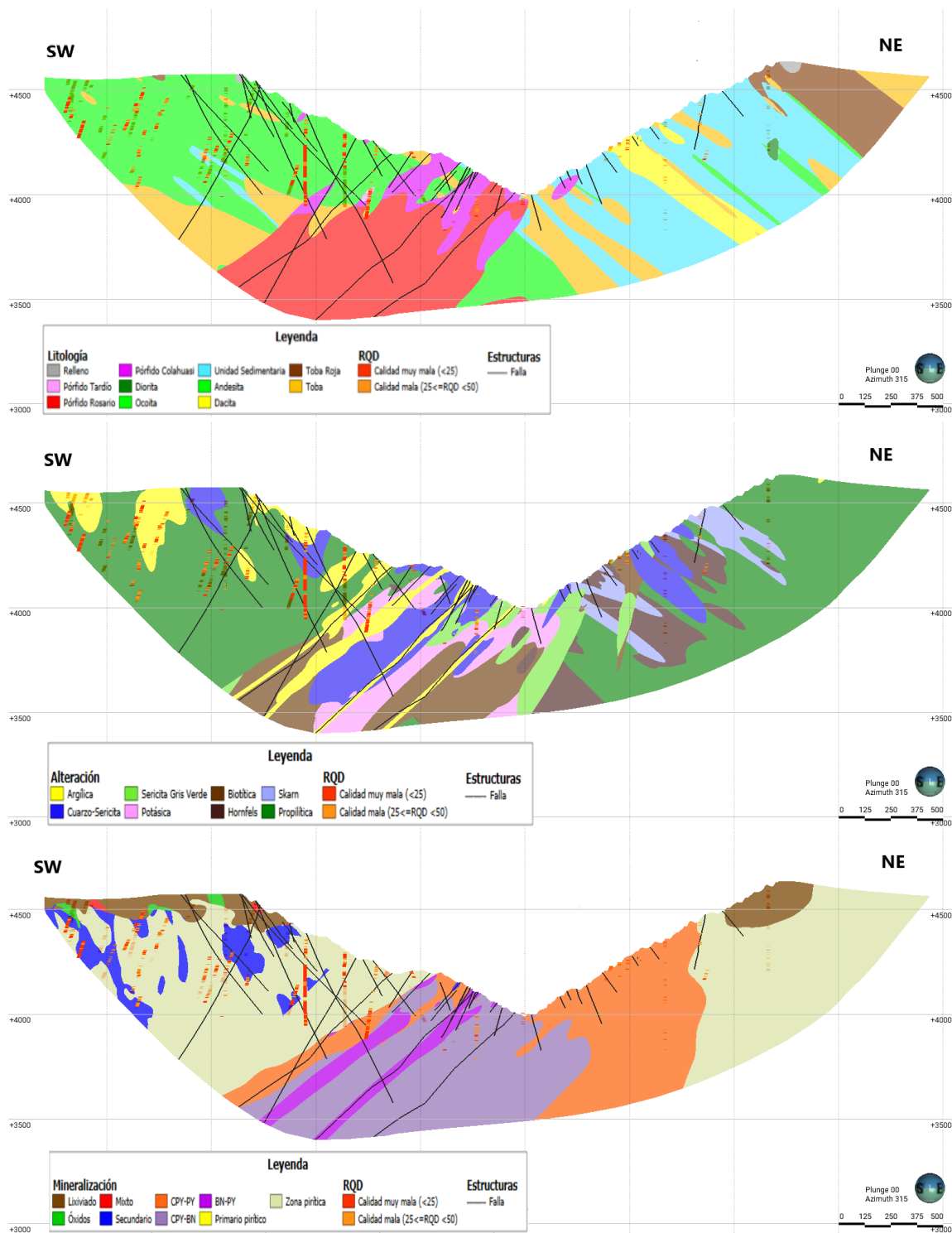


Figura 9.2: Distribución espacial de la variable índice de resistencia geológica (RQD) en sección de modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización (sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras. Fuente elaboración propia.

9.1.1.3 Variable joint condition (JC)

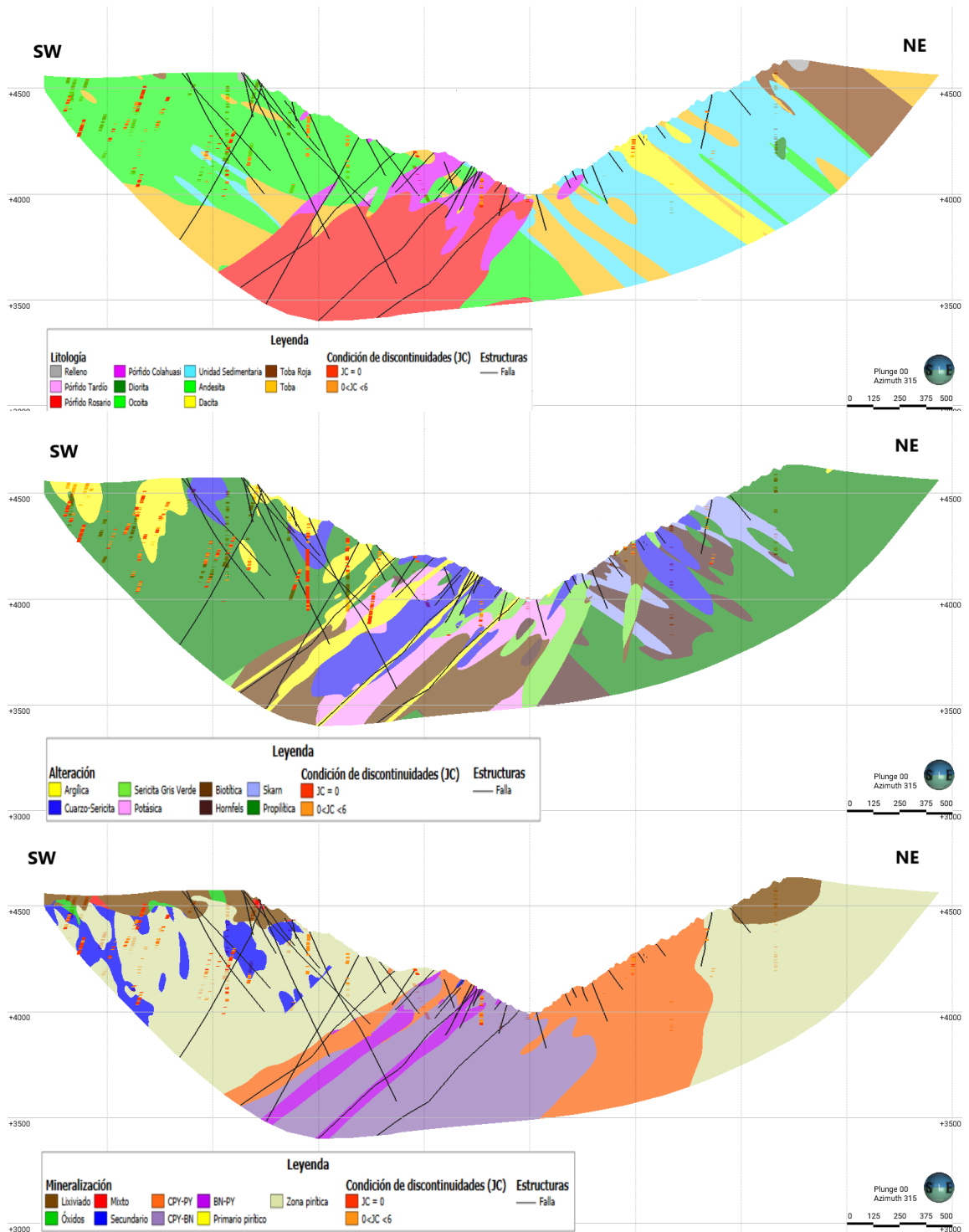


Figura 9.3: Distribución espacial de la variable condición de discontinuidades (JC) en sección de modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización (sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras. Fuente elaboración propia.

9.1.2 Sección 20

9.1.2.1 Variable GSI

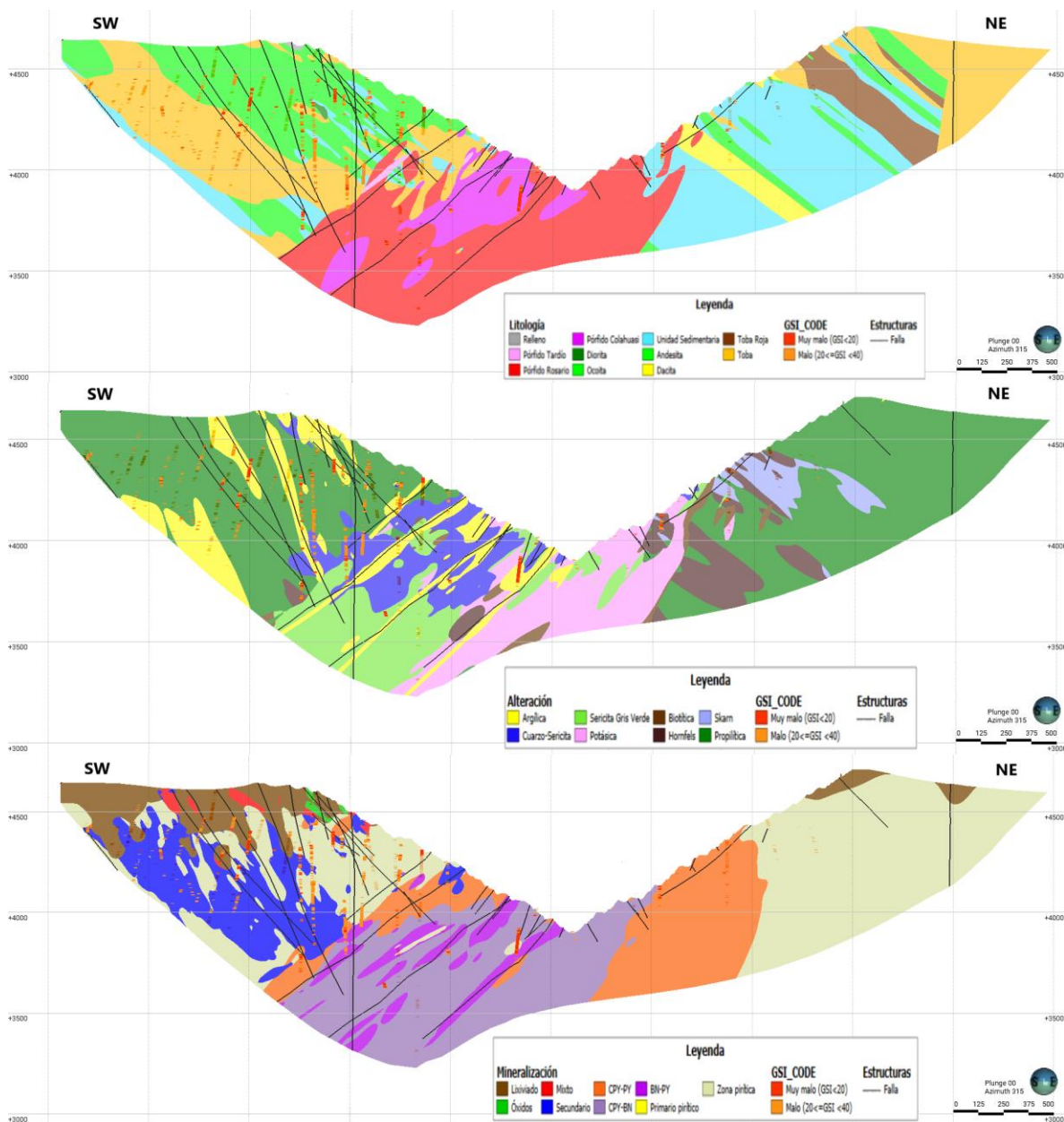


Figura 9.4: Distribución espacial de la variable índice de resistencia geológica (GSI) en sección de modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización (sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras. Fuente elaboración propia.

9.1.2.2 Variable RQD

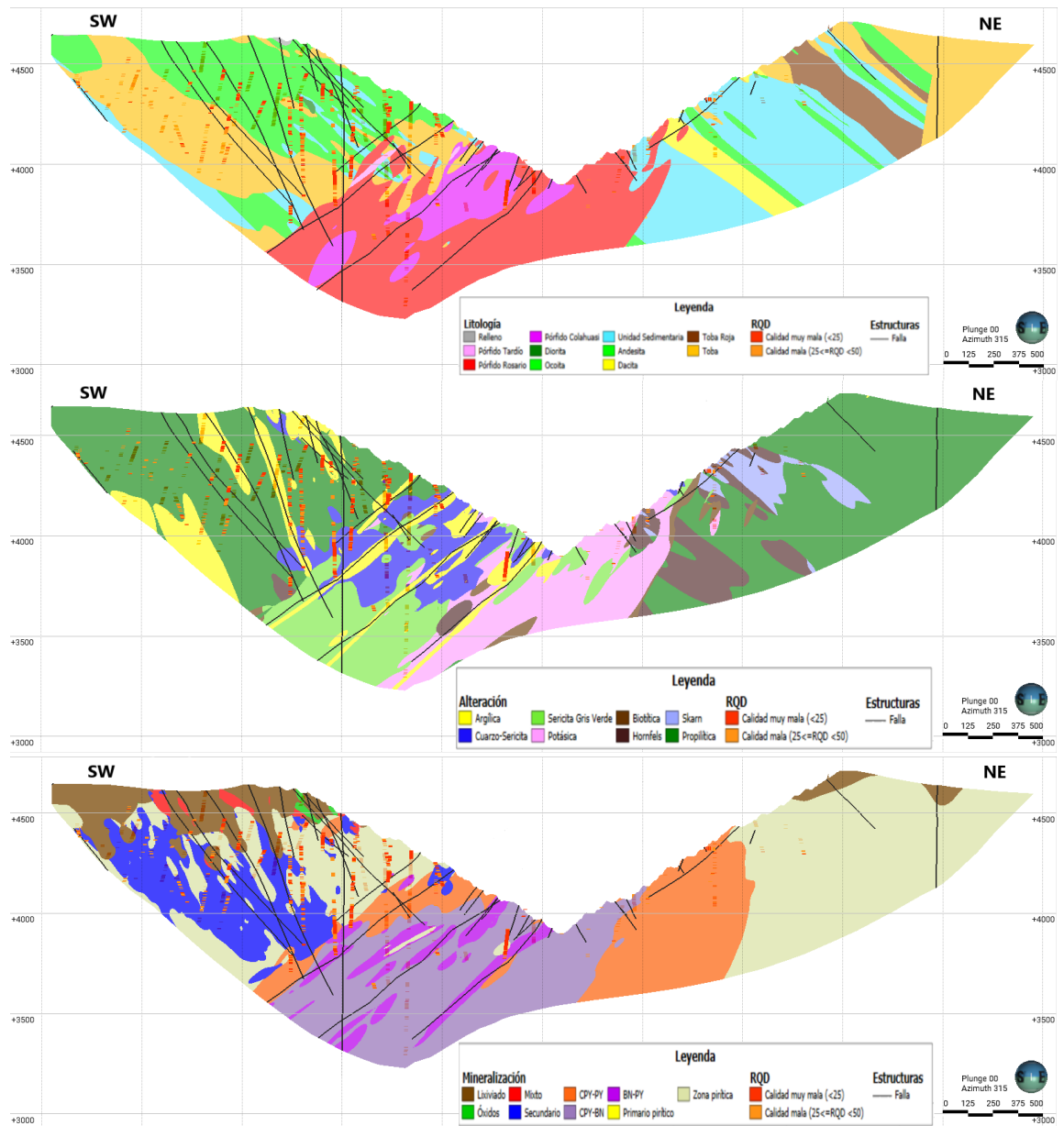


Figura 9.5: Distribución espacial de la variable índice de resistencia geológica (RQD) en sección de modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización (sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras. Fuente elaboración propia.

9.1.2.3 Variable Joint condition (JC)

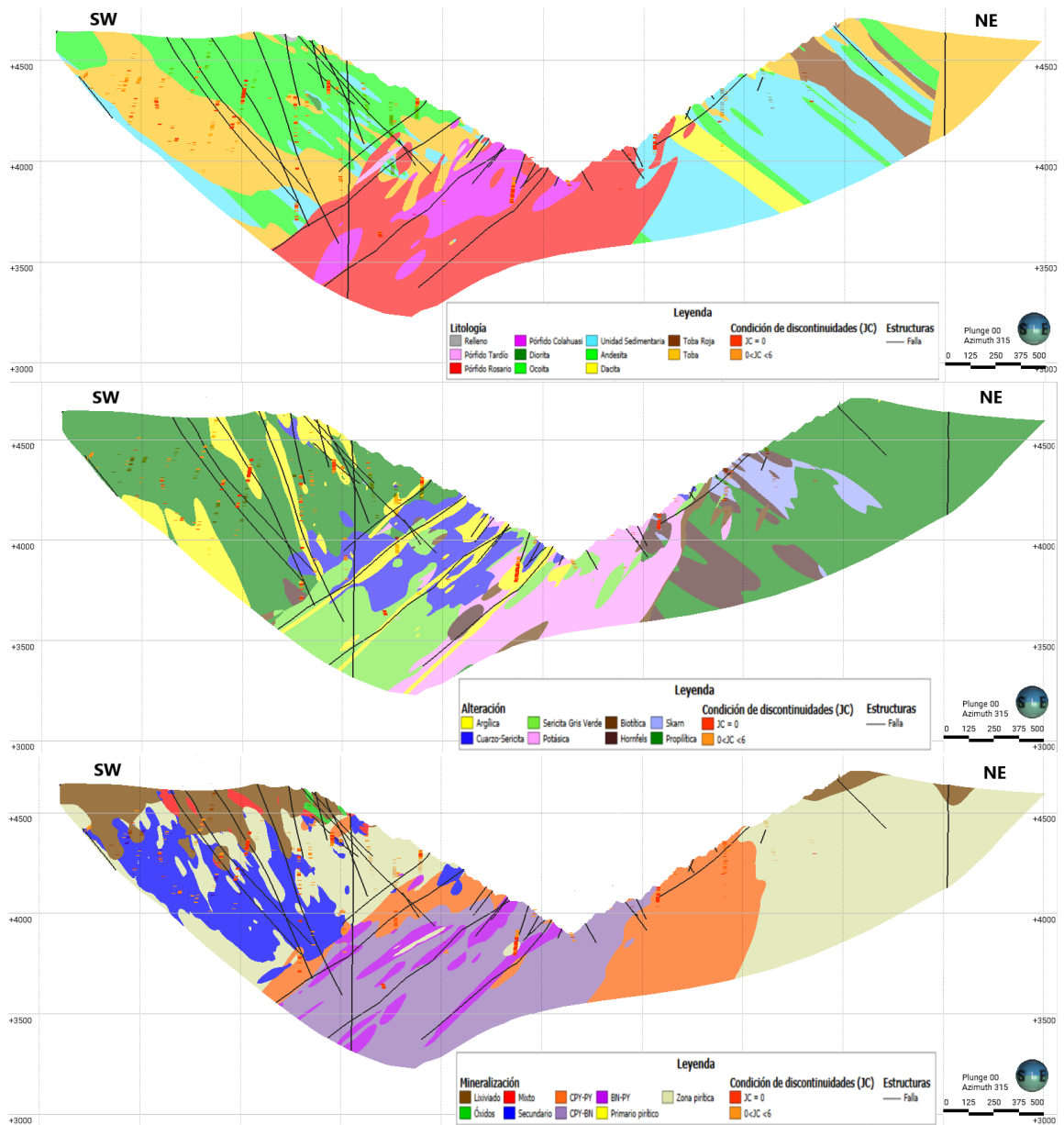


Figura 9.6: Distribución espacial de la variable condición de discontinuidades (JC) en sección de modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización (sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras. Fuente elaboración propia.

9.1.3 Sección 17NW

9.1.3.1 Variable GSI

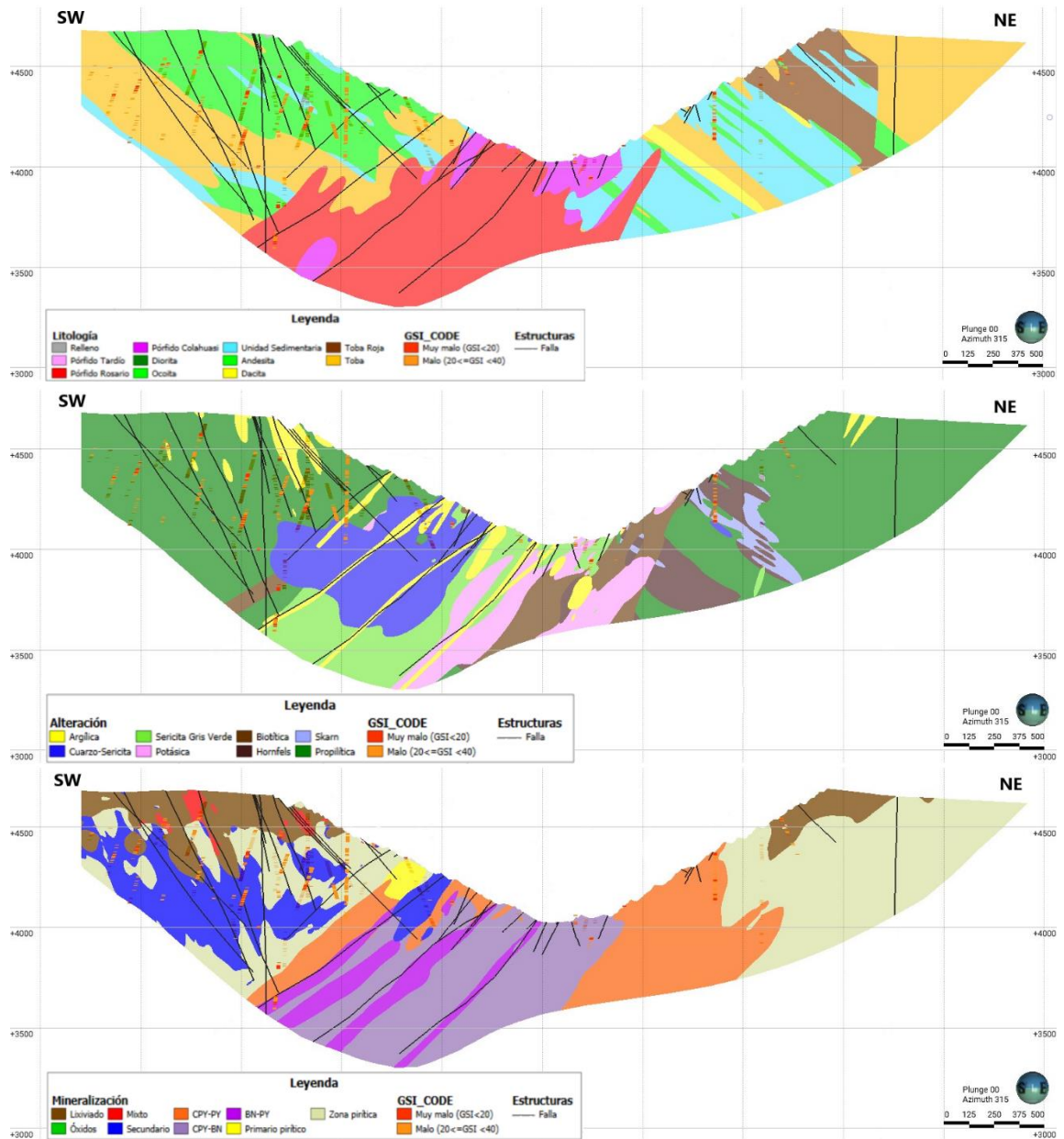


Figura 9.7: Distribución espacial de la variable índice de resistencia geológica (GSI) en sección de modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización (sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras. Fuente elaboración propia.

9.1.3.2 variable RQD

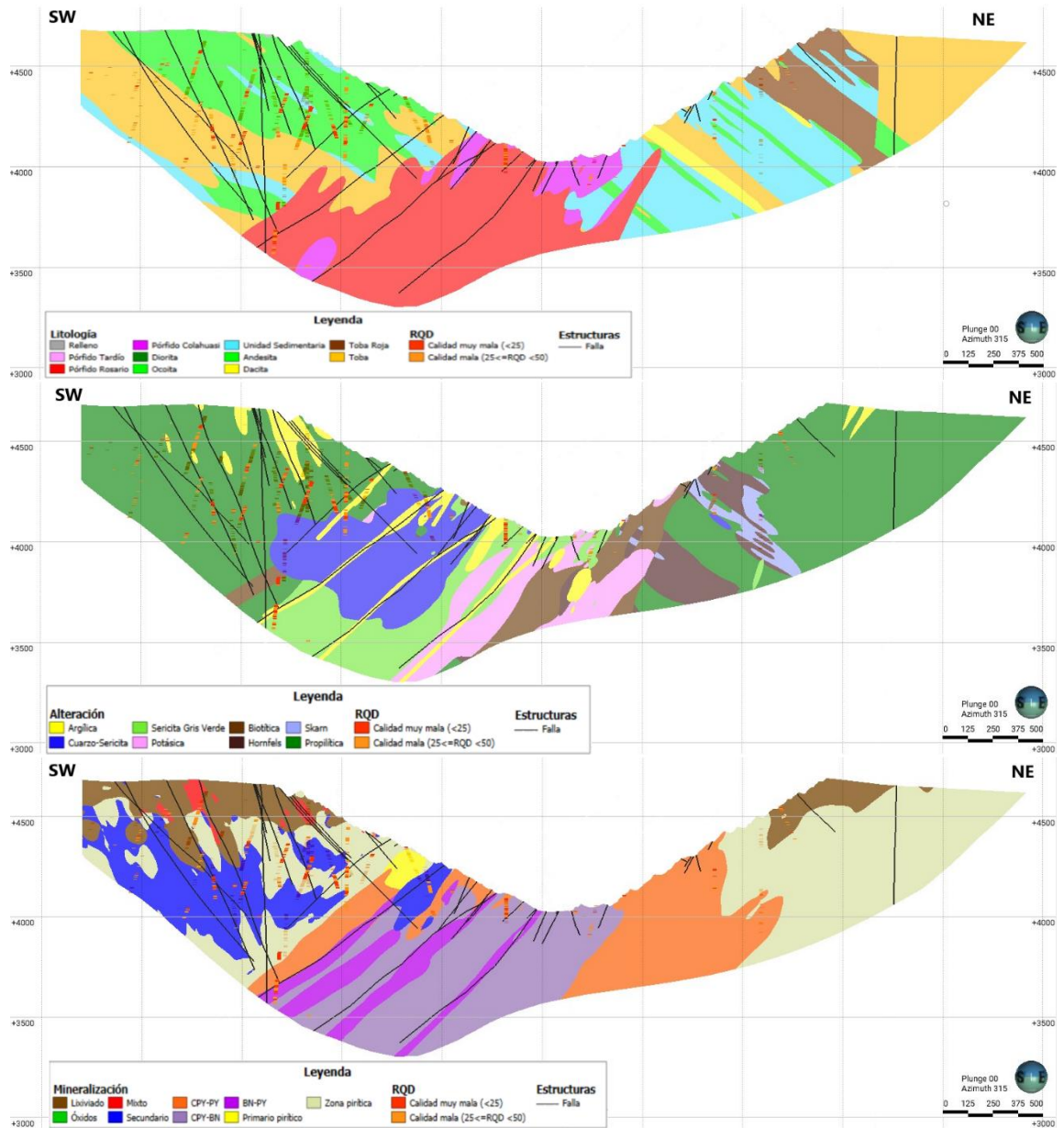


Figura 9.8: Distribución espacial de la variable índice de resistencia geológica (RQD) en sección de modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización (sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras. Fuente elaboración propia.

9.1.3.3 Variable Joint condition (JC)

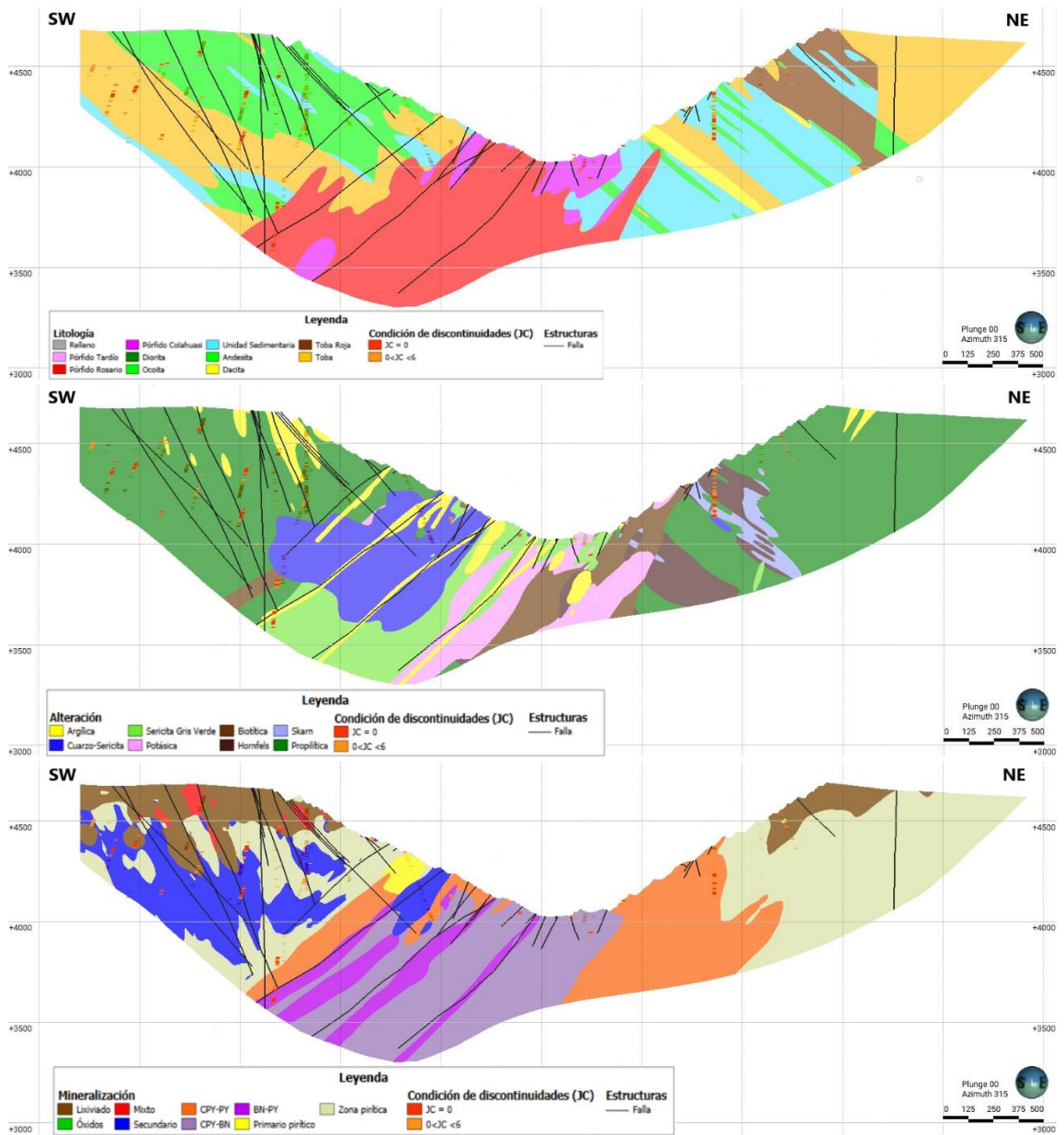


Figura 9.9: Distribución espacial de la variable condición de discontinuidades (JC) en sección de modelo litológico (sección superior), alteración (sección central) y mineralización (sección inferior), en rajo Rosario. Además, se ilustra la distribución de estructuras. Fuente elaboración propia.

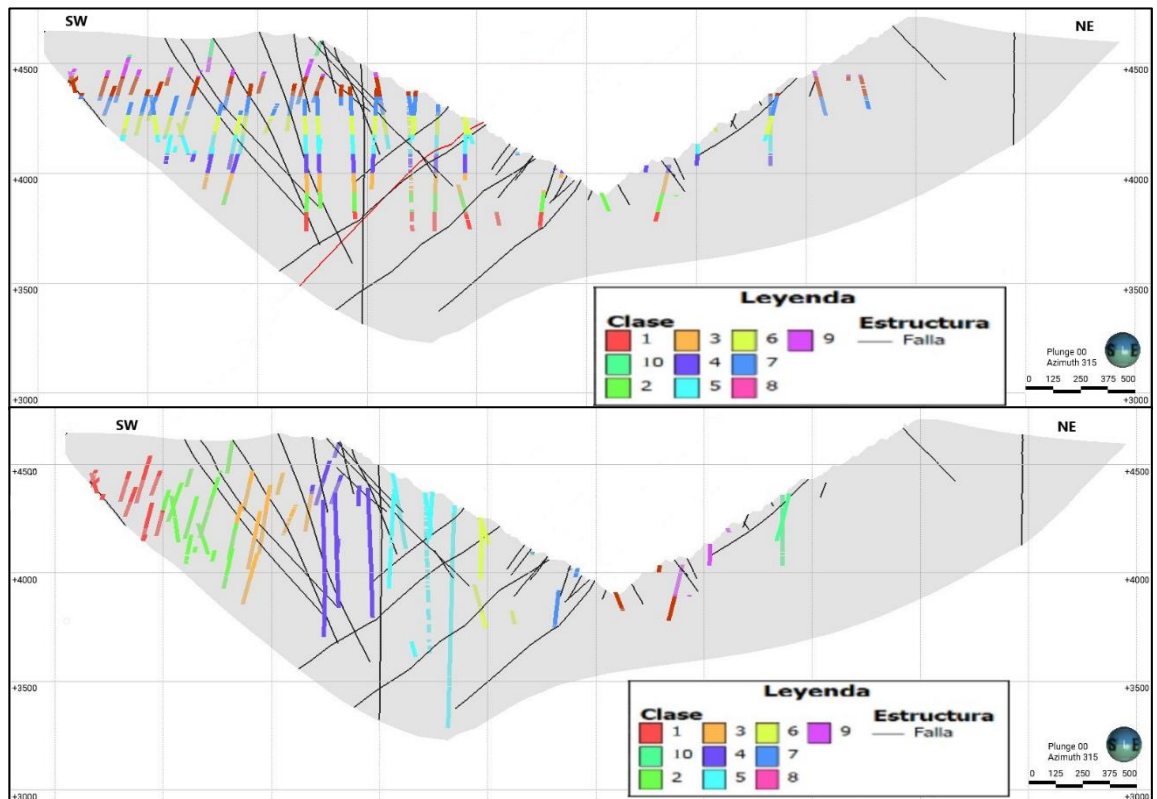


Figura 9.10. Ilustración espacial de las clases generadas y definidas en la sección 20NW. Imagen superior, desplazamiento en cotas, cada 88 metros. Imagen inferior, desplazamiento en trayectoria $N45^{\circ}E$, cada 339 m, con su respectiva distribución estructural. Línea roja límite geotécnico. Fuente elaboración propia.

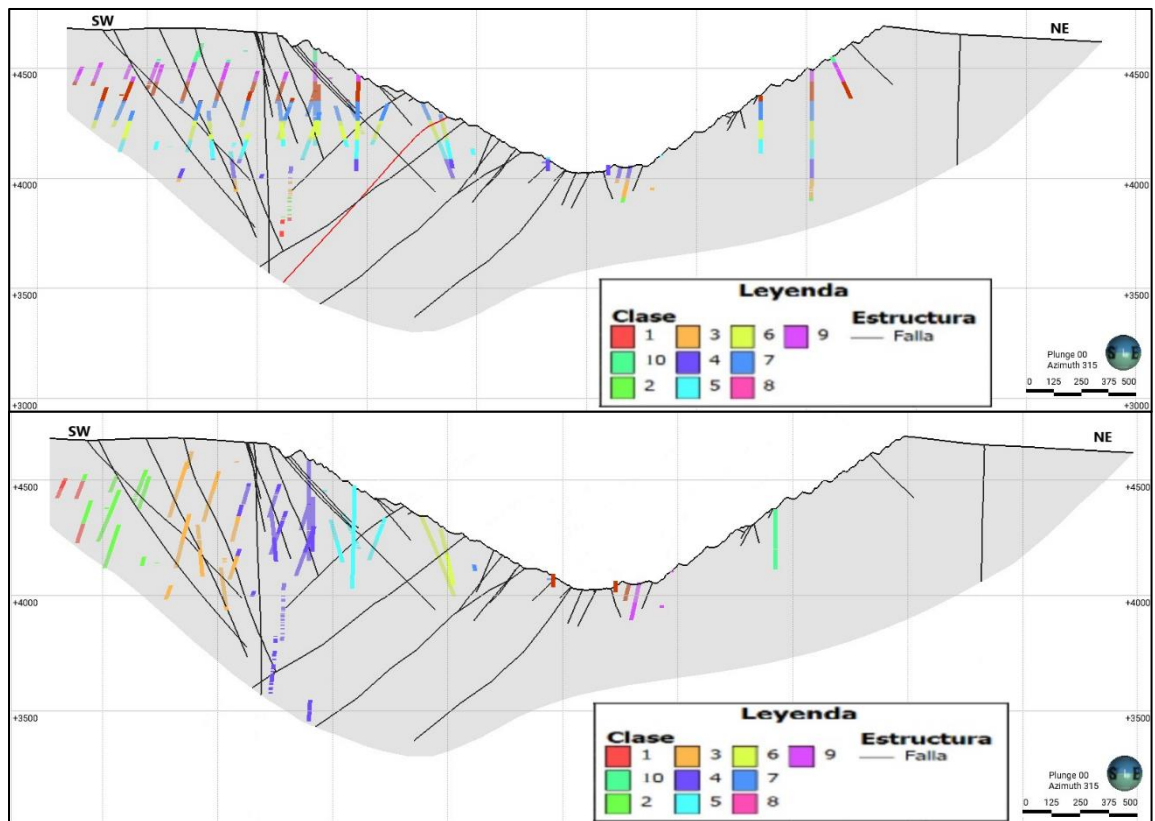


Figura 9.11. Ilustración espacial de las clases generadas y definidas en la sección 17NW. Imagen superior, desplazamiento en cotas, cada 88 metros. Imagen inferior, desplazamiento en trayectoria N45°E, cada 339 m, con su respectiva distribución estructural. Línea roja límite geotécnico. Fuente elaboración propia.

9.2 Gráficos de deriva espacial

9.2.2 Gráficos de Sección 20NW

9.2.2.1 Unidades geológicas geotécnicas respecto a las variables GSI, trayectoria en cotas.

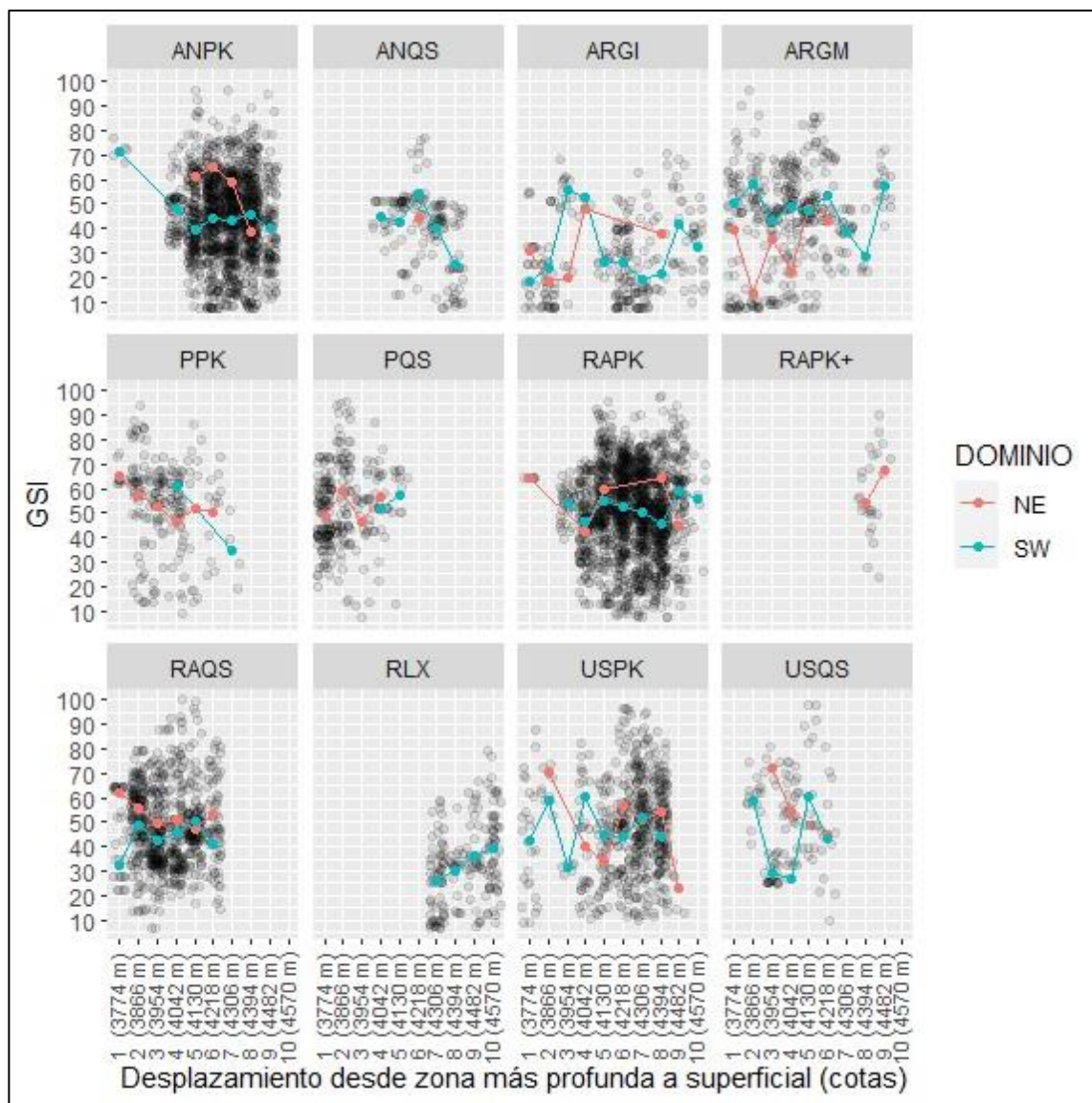


Figura 9.12: Gráfico de deriva espacial representado por promedios de clases de la sección 20NW, que indica el comportamiento de la variable GSI en la trayectoria de cotas, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.

9.2.2.2 Unidades geológicas geotécnicas respecto a las variables GSI, trayectoria N45°E

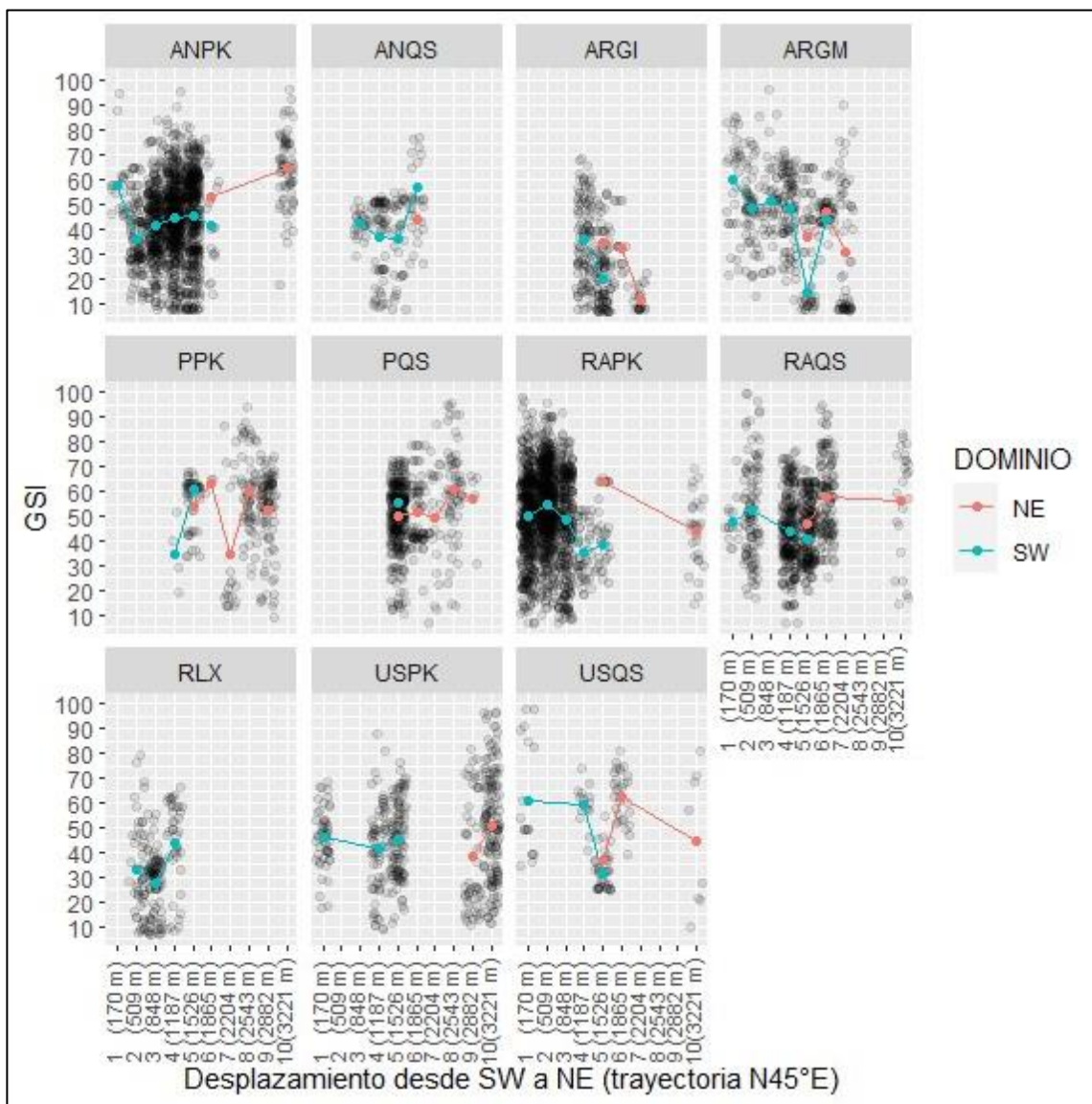


Figura 9.13: Gráfico de deriva espacial de la sección 20NW que indica el comportamiento de la variable GSI en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.

9.2.2.3 Unidades geológicas geotécnicas respecto a las variables FF, en cotas.

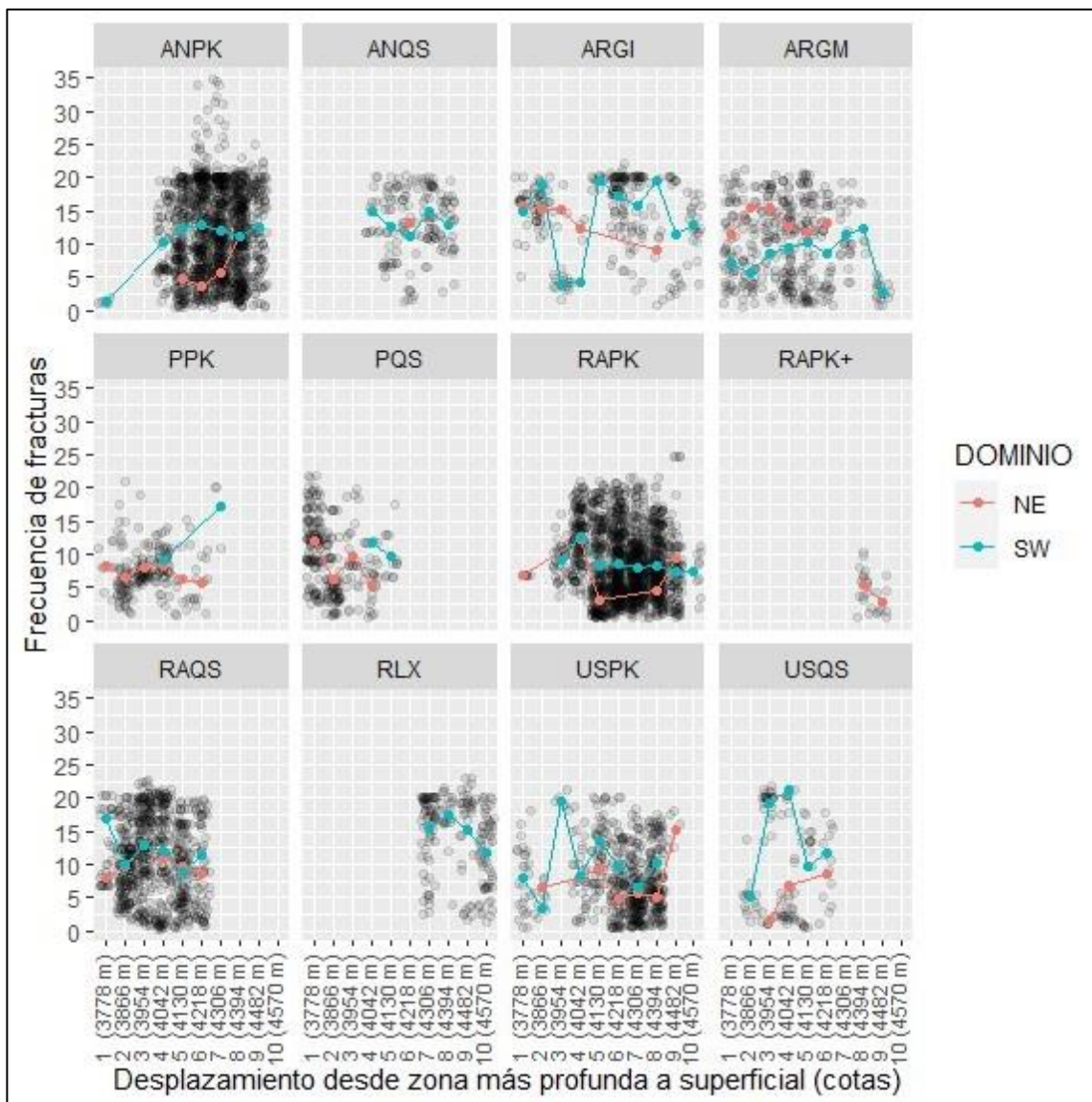


Figura 9.14: Gráfico de deriva espacial de la sección 20NW, que indica el comportamiento de la variable Frecuencia de fracturas en la trayectoria de cotas, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.

9.2.2.4 Unidades geológicas geotécnicas respecto a las variables FF, trayectoria N45°E

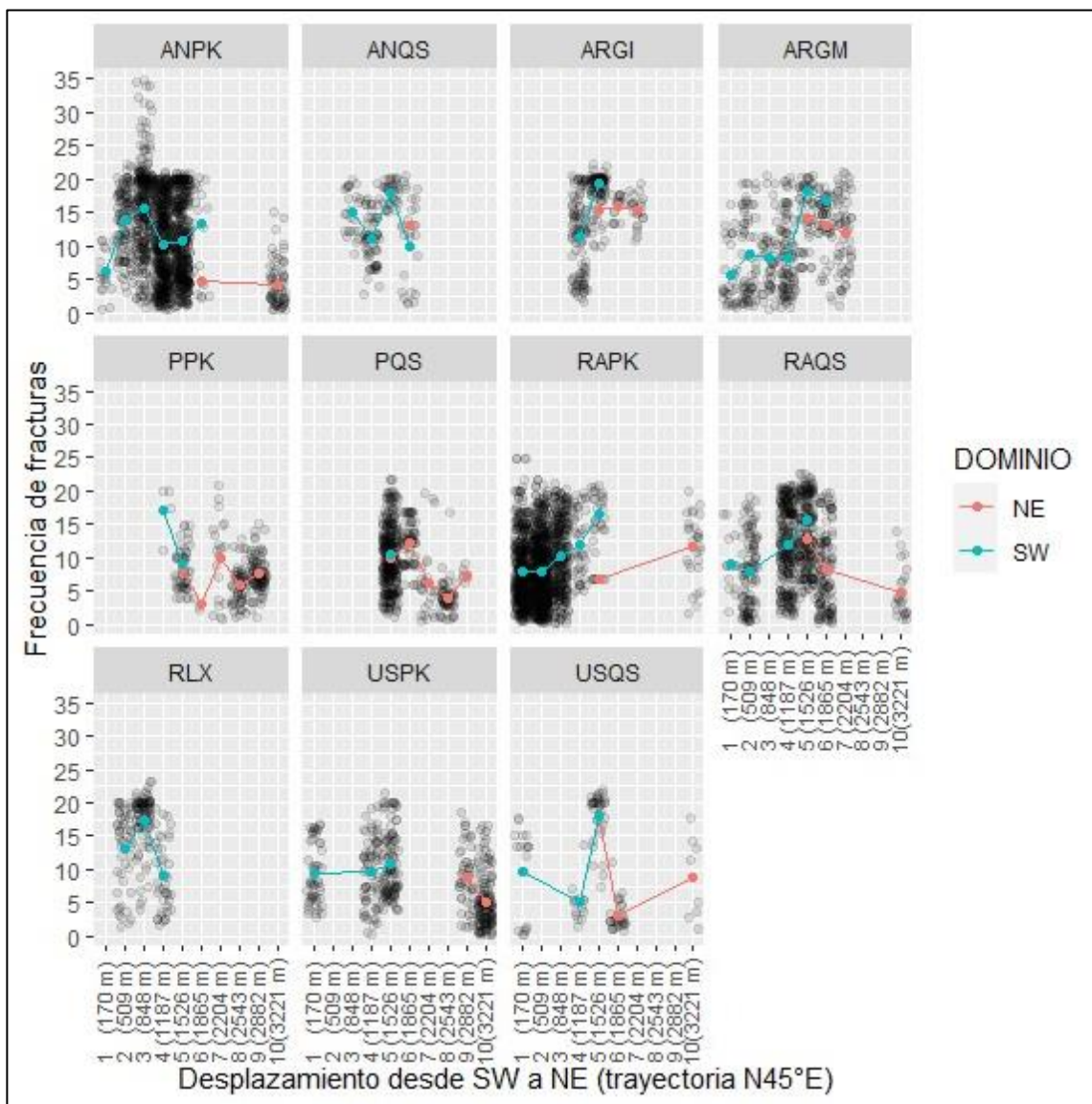


Figura 9.15: Gráfico de deriva de la sección 20NW, que indica el comportamiento de la variable frecuencia de fracturas en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases equidistantes.

9.2.2.5 Unidades geológicas geotécnicas respecto a las variables RQD, en cotas.

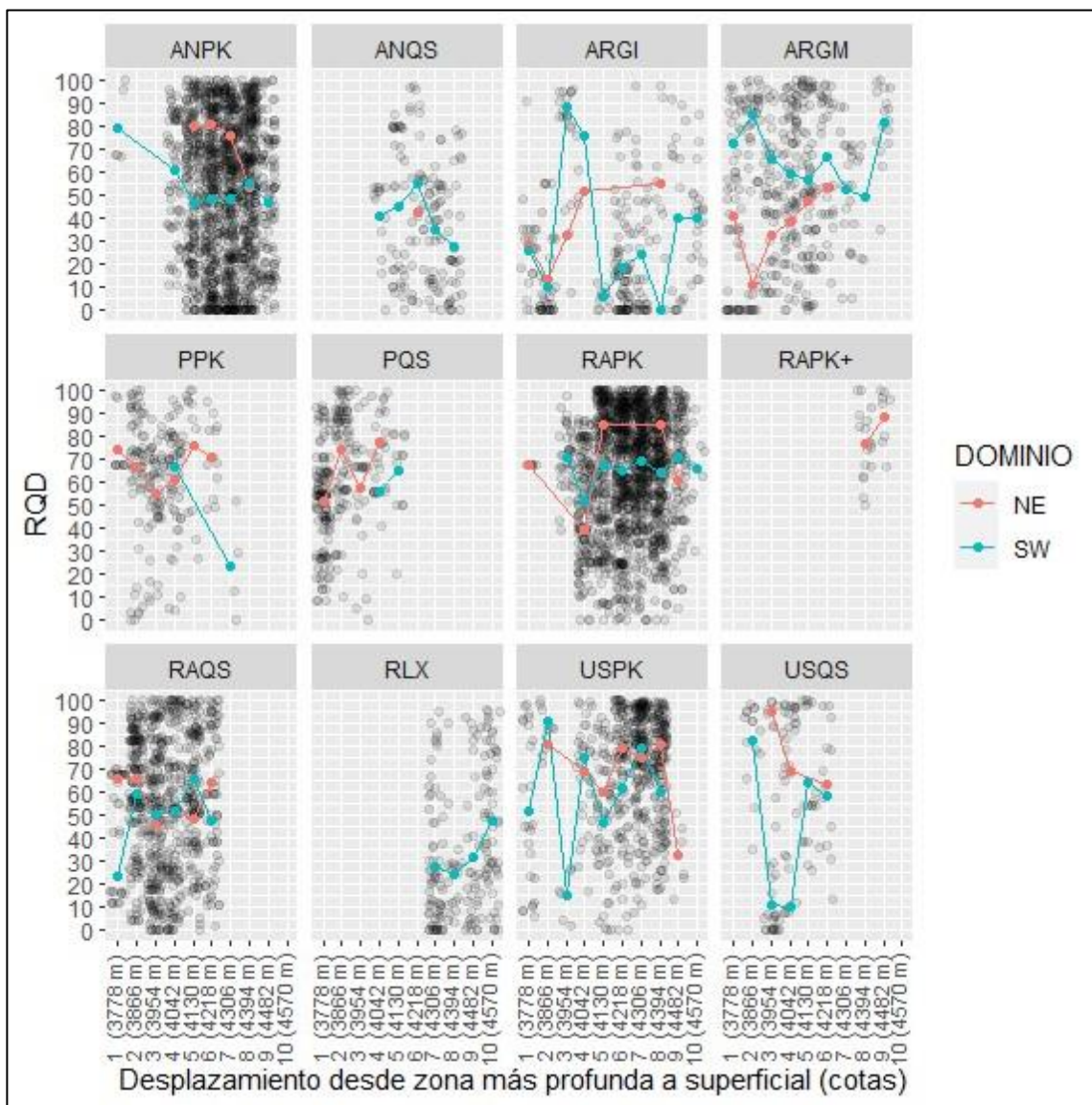


Figura 9.16: Gráfico de deriva de la sección 20NW, que indica el comportamiento de la variable RQD en sus respectivas cotas, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases equidistantes.

9.2.2.6 Unidades geológicas geotécnicas respecto a las variables RQD, trayectoria N45°E.

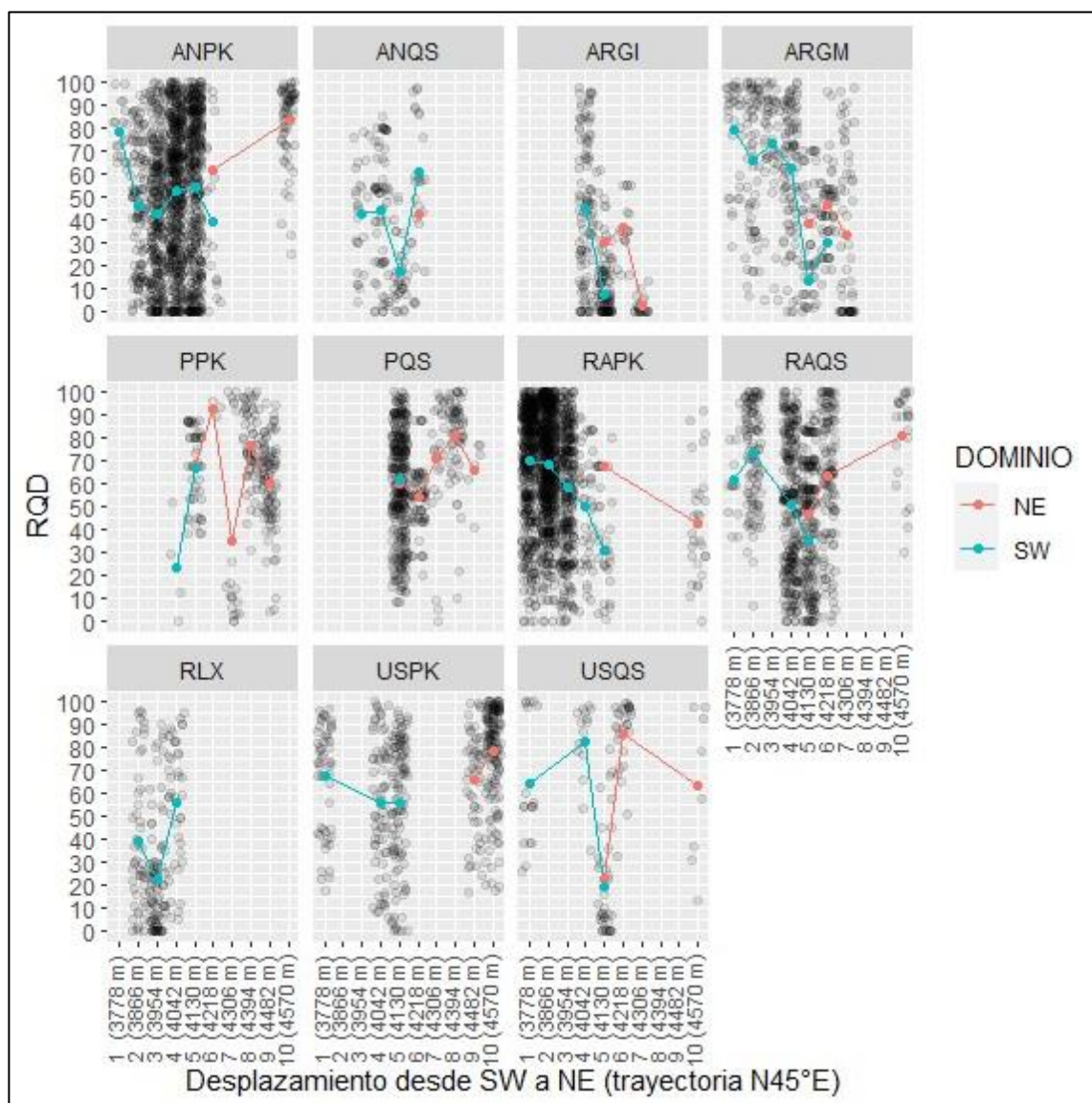


Figura 9.17: Gráfico de deriva de la sección 20NW, que indica el comportamiento de la variable RQD en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases equidistantes.

9.2.2.7 Unidades geológicas geotécnicas respecto a las variables Joint condition, trayectoria en cotas.

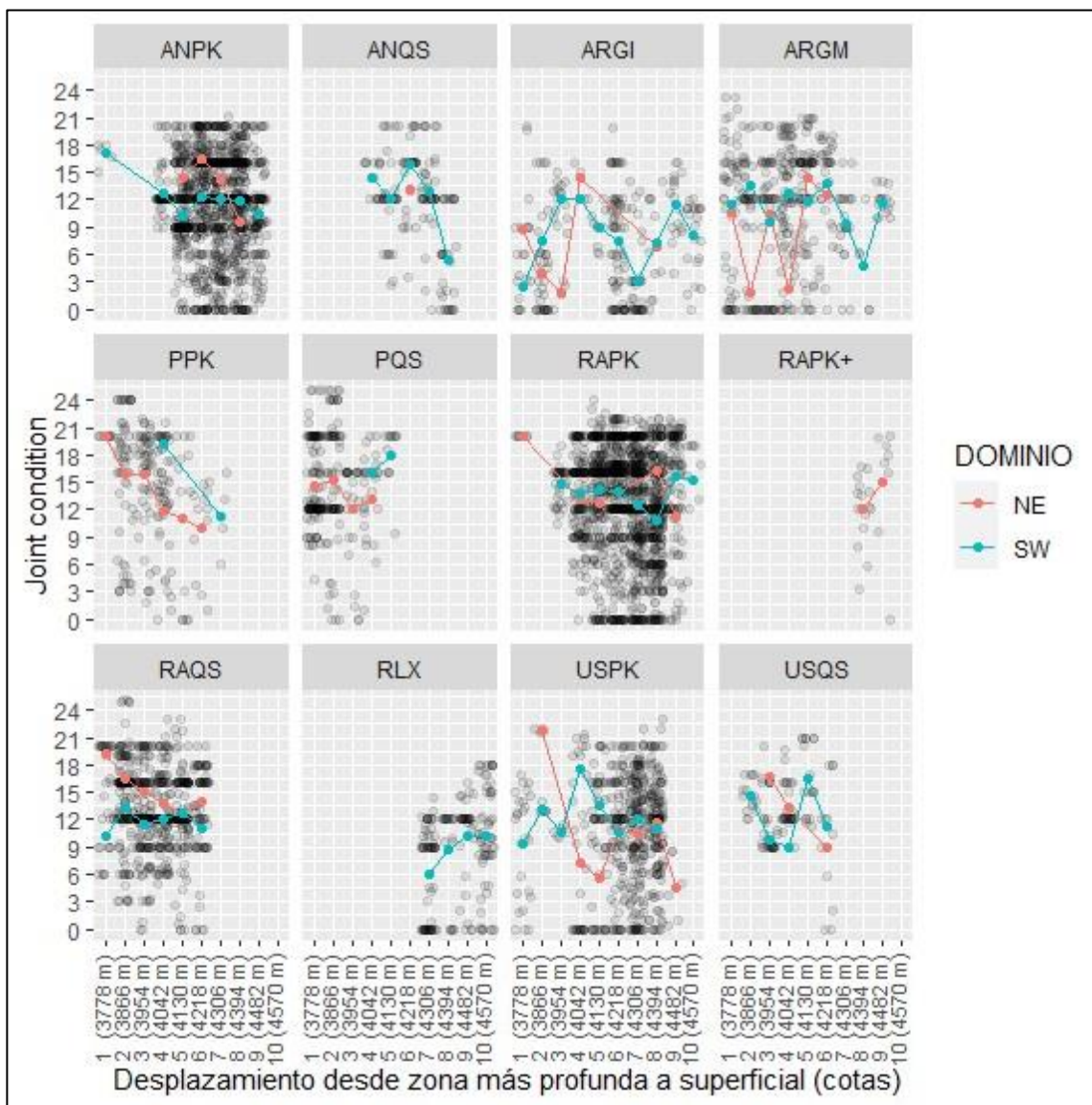


Figura 9.18: Gráfico de deriva de la sección 20NW, que indica el comportamiento de la variable Joint condition en sus respectivas cotas, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases equidistantes.

9.2.2.8 Unidades geológicas geotécnicas respecto a las variables Joint condition, trayectoria N45°E.

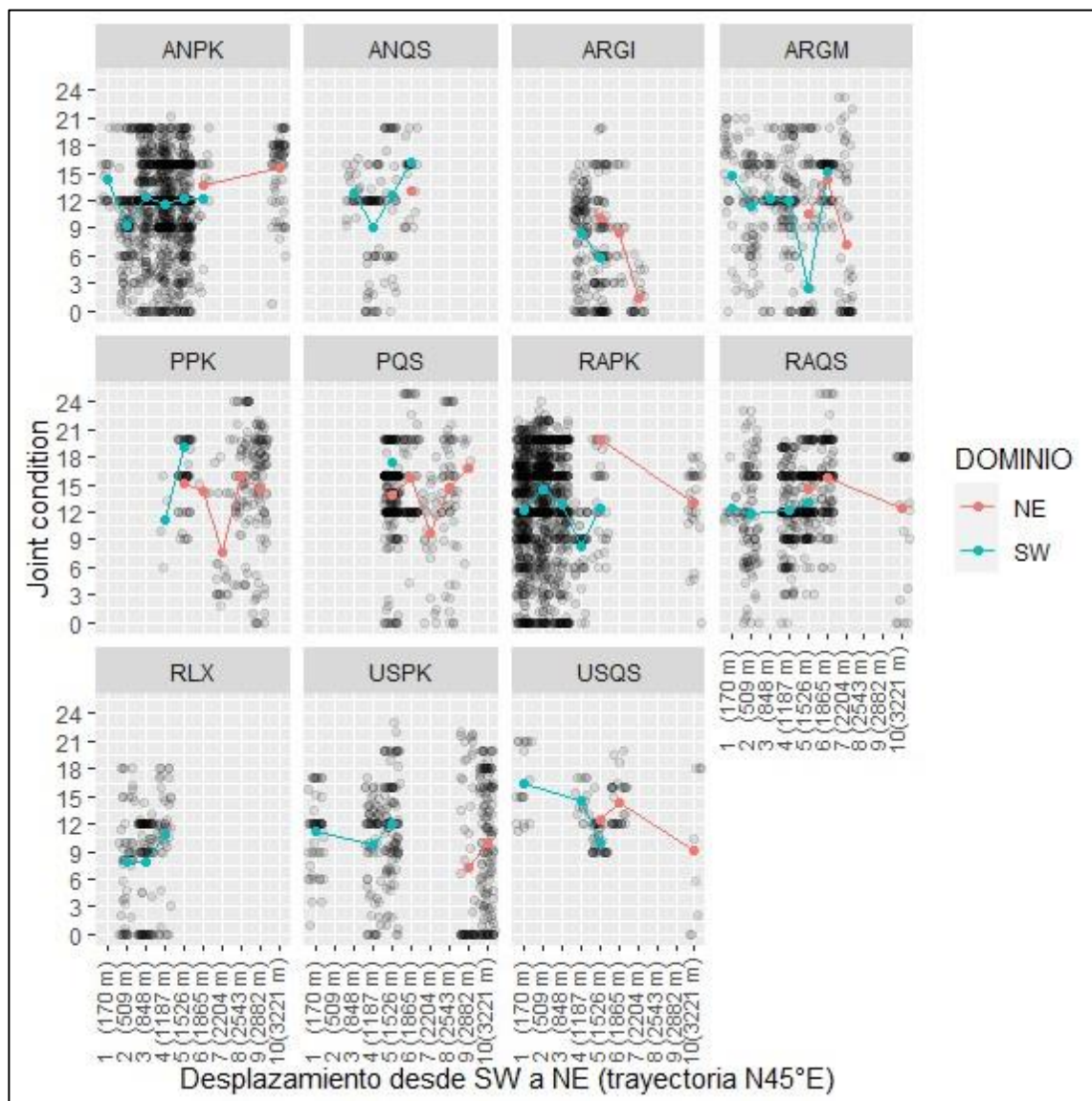


Figura 9.19: Gráfico de deriva de la sección 20NW, que indica el comportamiento de la variable Joint condition en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases equidistantes.

9.2.3 Gráficos de Sección 17

9.2.3.1 Unidades geológicas geotécnicas respecto a las variables GSI, trayectoria en cotas.

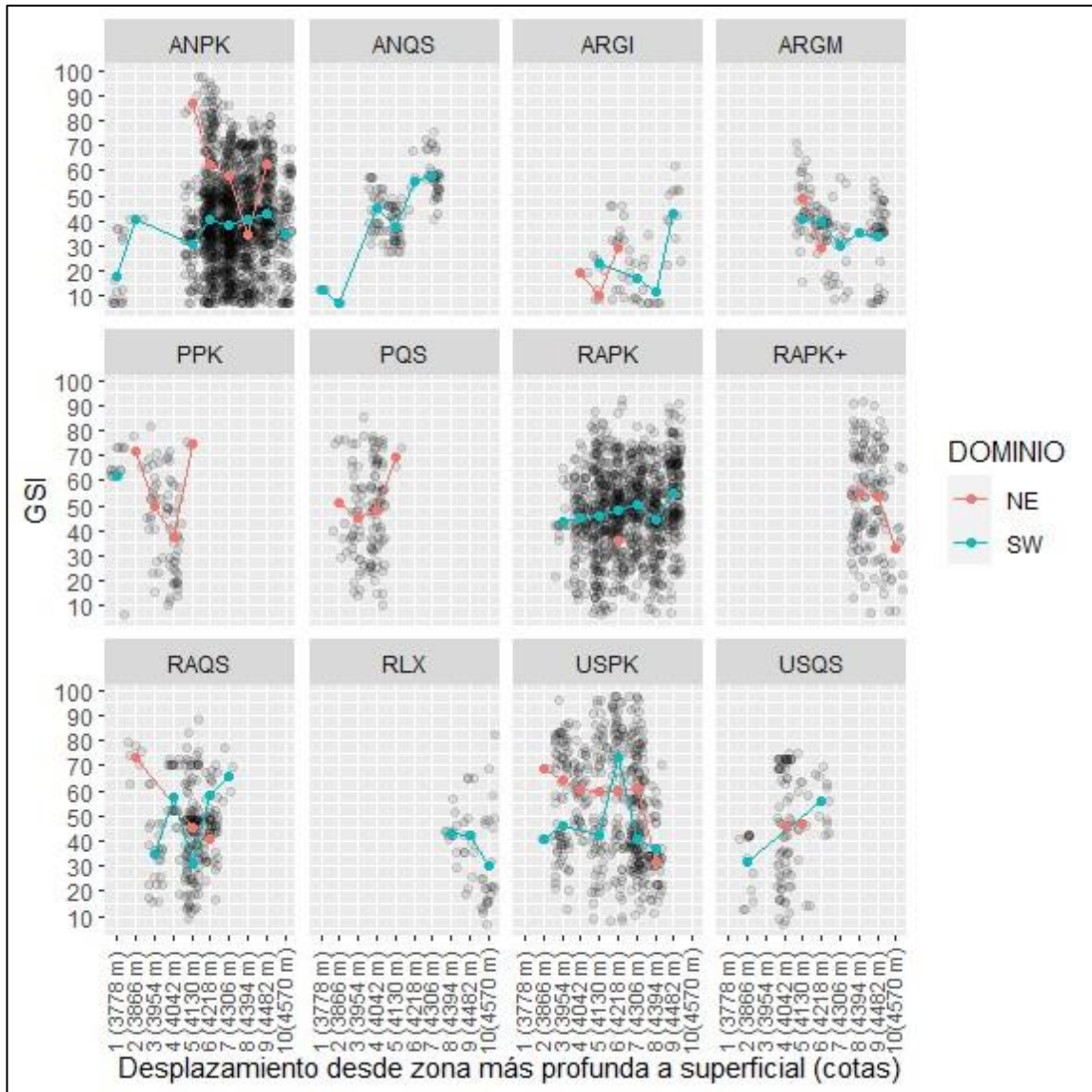


Figura 9.20: Gráfico de deriva espacial de la sección 17NW, que indica el comportamiento de la variable GSI en la trayectoria de cotas, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases equidistante.

9.2.3.2 Unidades geológicas geotécnicas respecto a las variables GSI, trayectoria N45°E

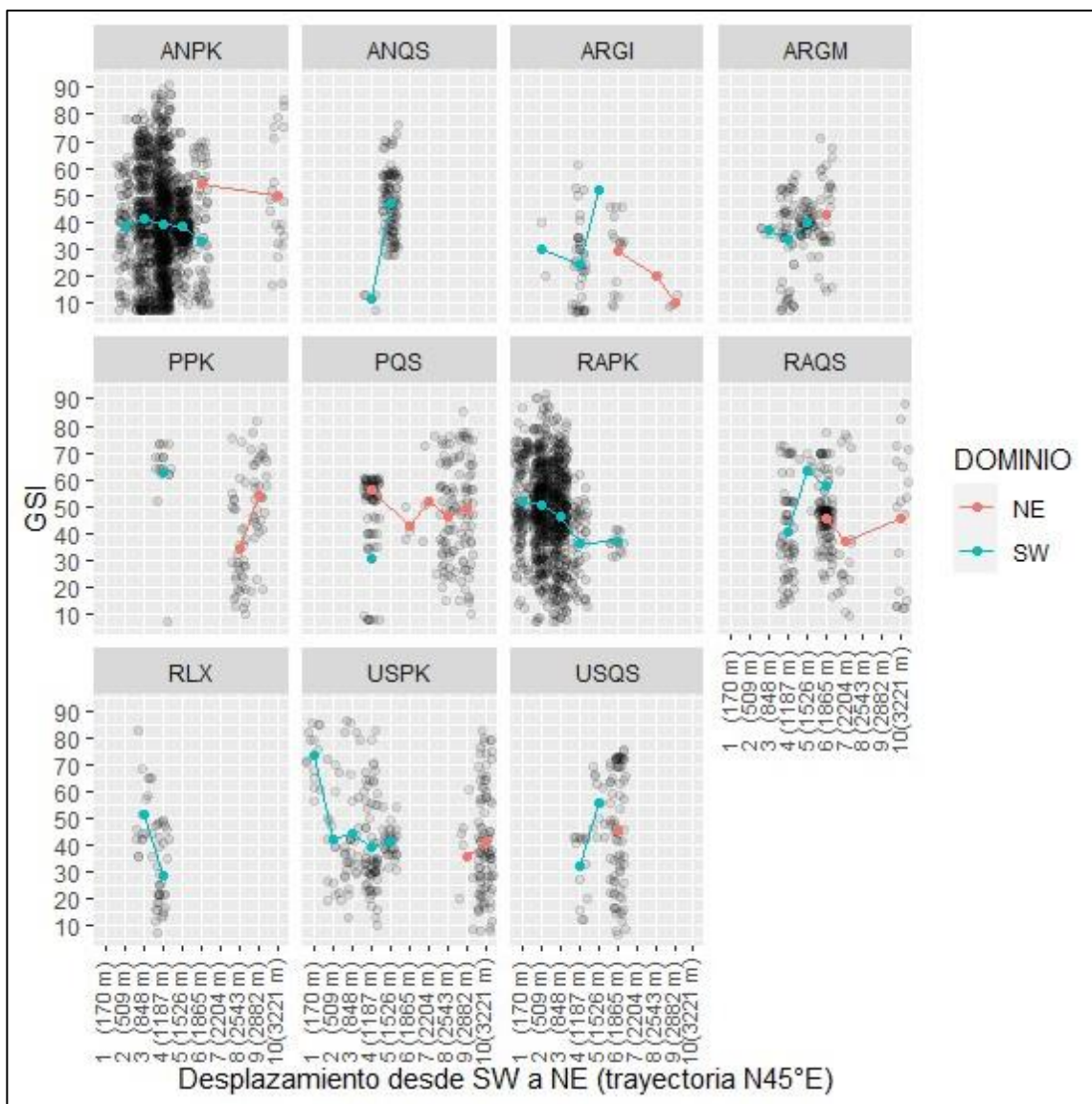


Figura 9.21: Gráfico de deriva espacial de la sección 17NW, que indica el comportamiento de la variable GSI en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases iguales.

9.2.3.3 Unidades geológicas geotécnicas respecto a las variables frecuencia de fracturas, trayectoria en cotas.

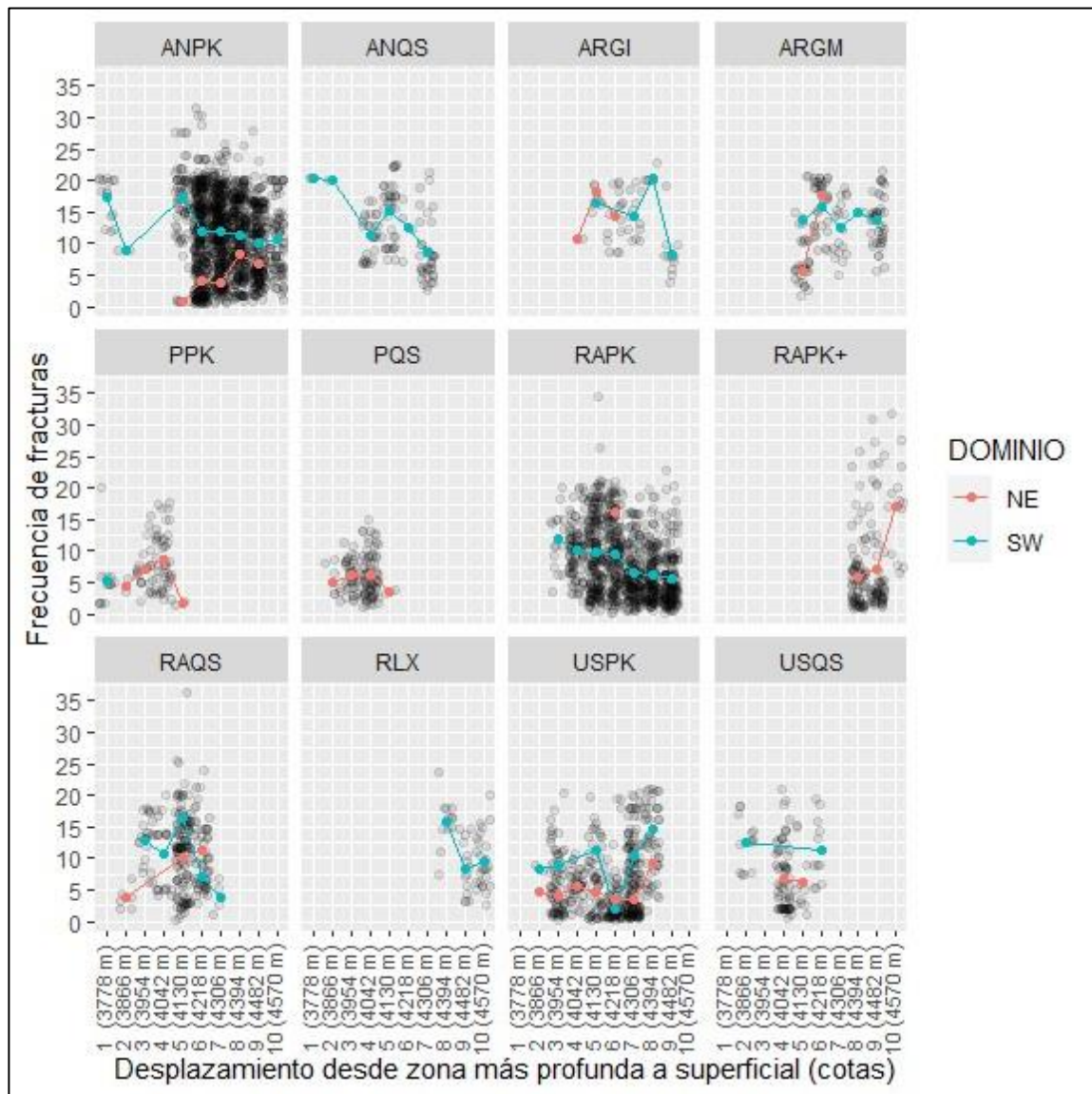


Figura 9.22: Gráfico de deriva espacial de la sección 17NW, que indica el comportamiento de la variable Frecuencia de fracturas en la trayectoria de cotas, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases equidistantes.

9.2.3.4 Unidades geológicas geotécnicas respecto a las variables frecuencia de fracturas, trayectoria N45°E.

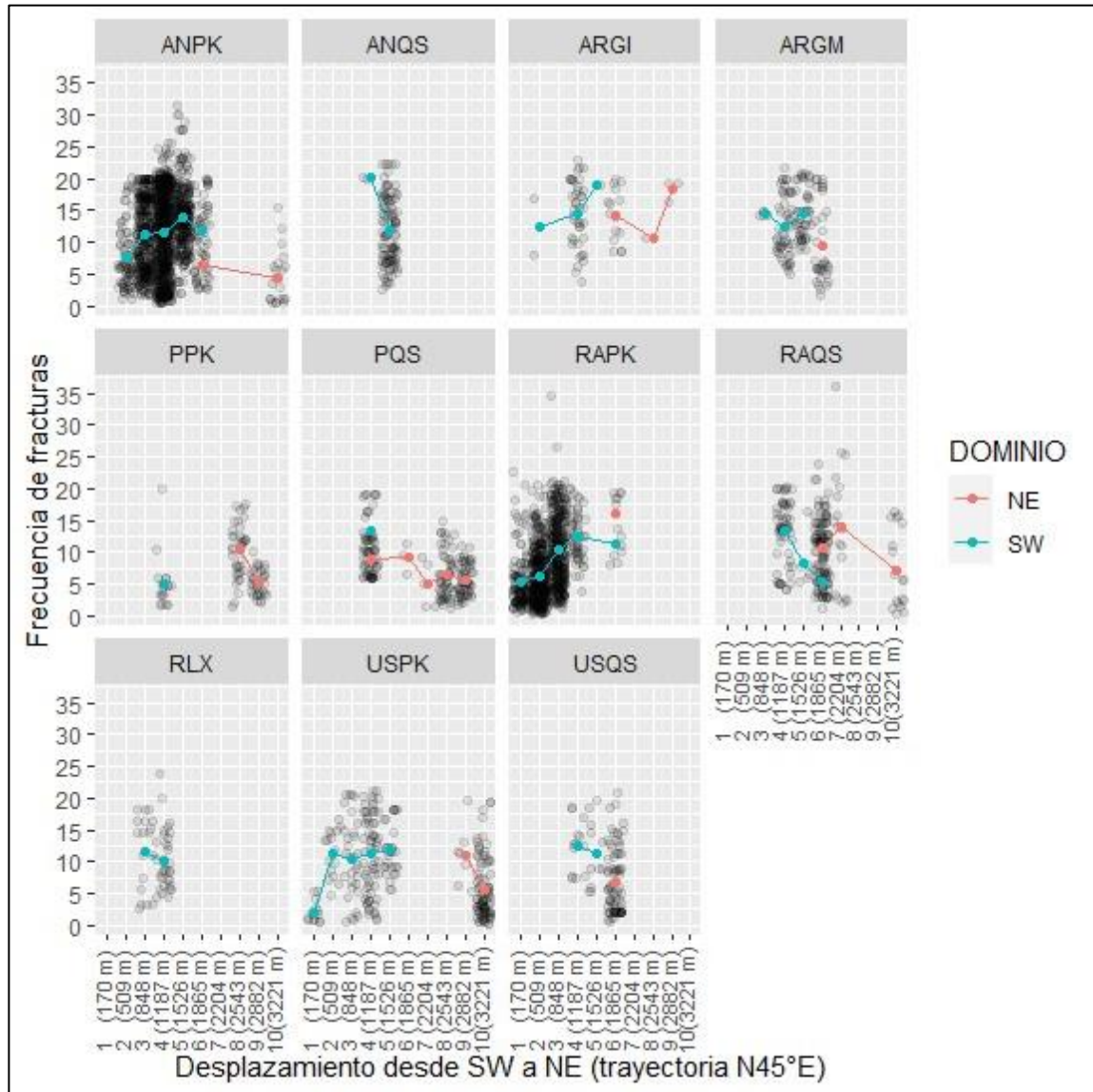


Figura 9.23: Gráfico de deriva de la sección 17NW, que indica el comportamiento de la variable frecuencia de fracturas en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases equidistantes.

9.2.3.5 Unidades geológicas geotécnicas respecto a la variable RQD, trayectoria en cotas.

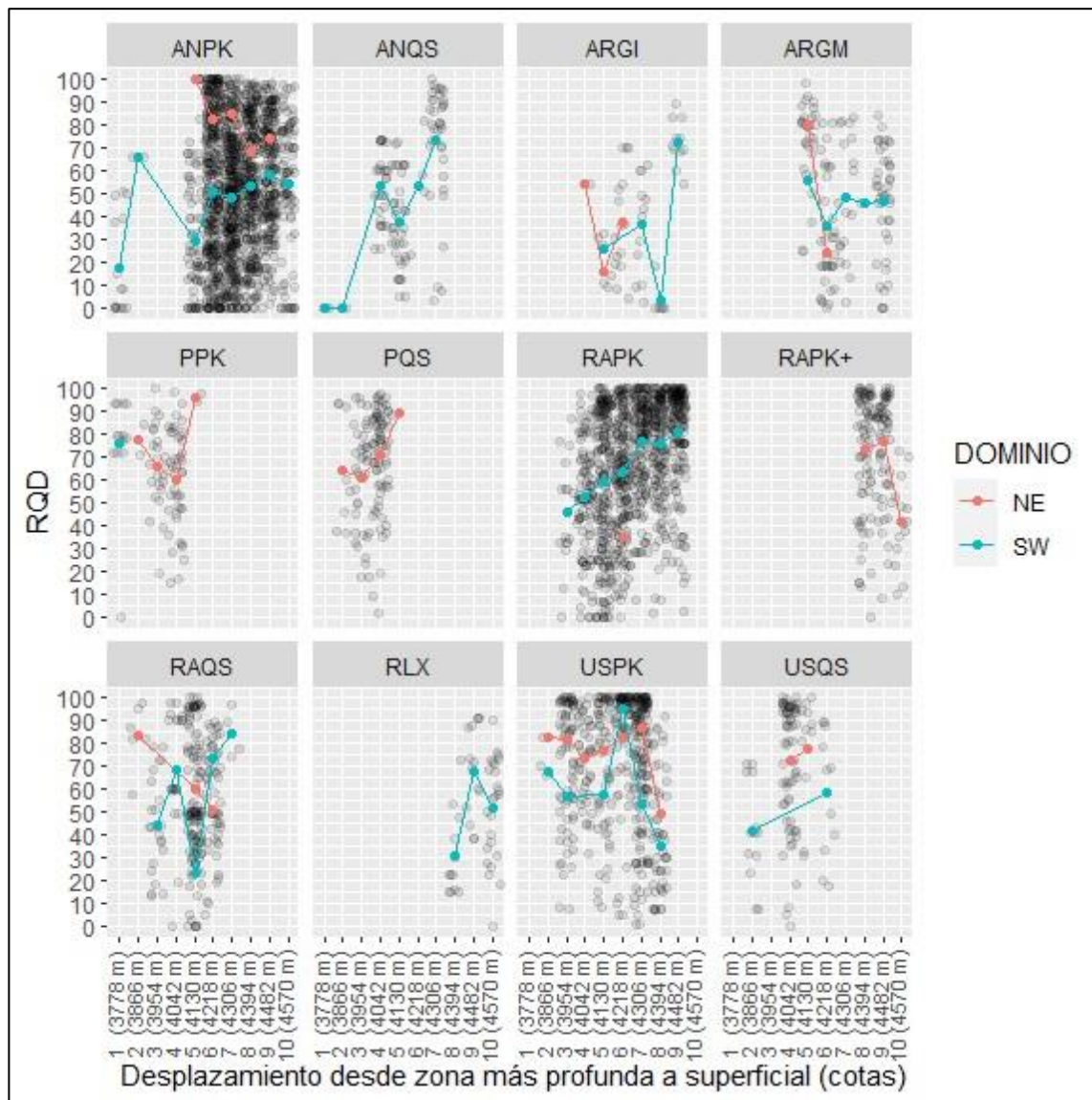


Figura 9.24: Gráfico de deriva espacial de la sección 17NW, que indica el comportamiento de la variable RQD en la trayectoria de cotas, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases equidistantes.

9.2.3.6 Unidades geológicas geotécnicas respecto a la variable RQD, trayectoria N45°E

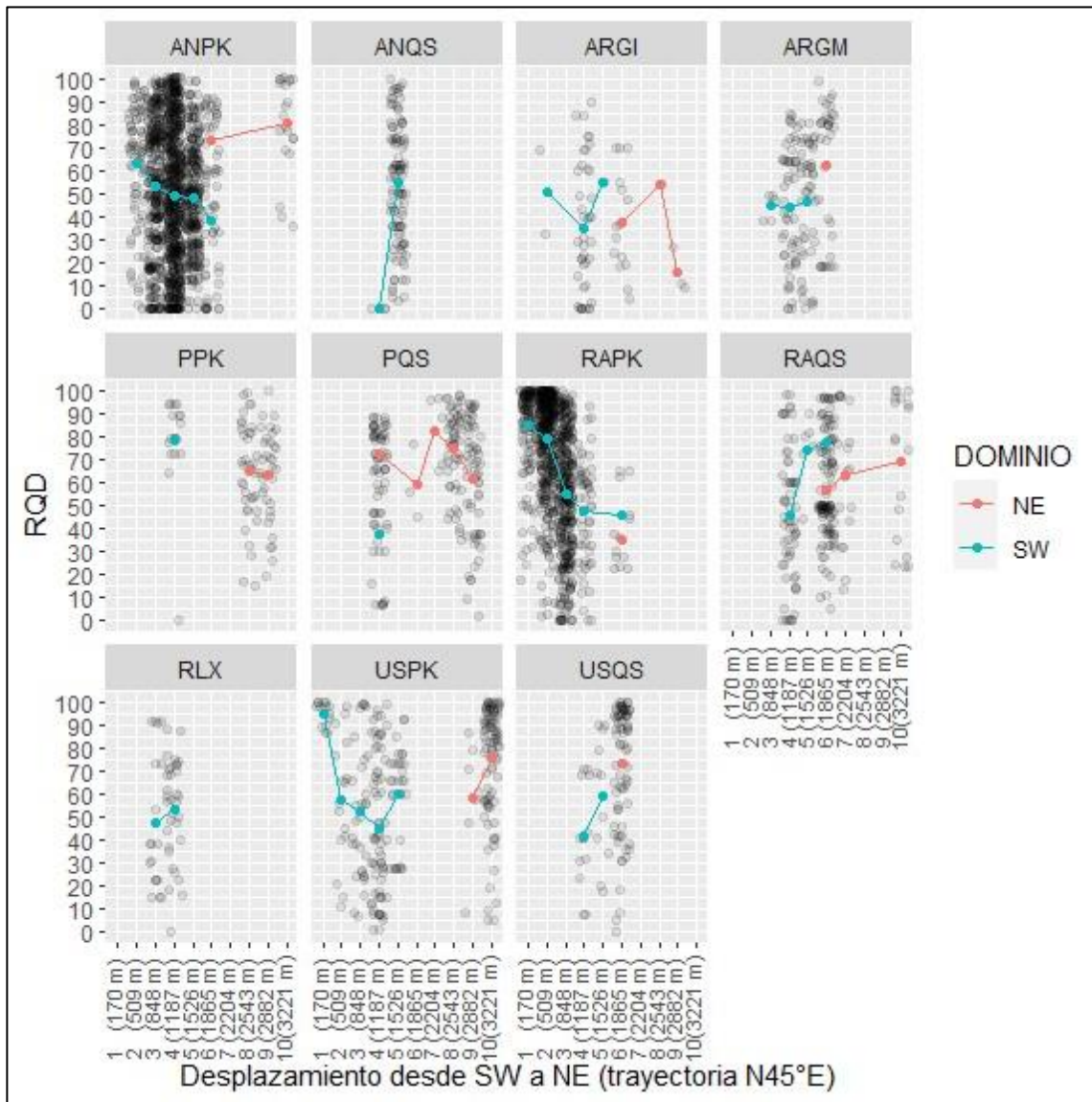


Figura 9.25: Gráfico de deriva de la sección 17NW, que indica el comportamiento de la variable RQD en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases equidistantes.

9.2.3.7 Unidades geológicas geotécnicas respecto a la variable Joint condition, trayectoria en cotas.

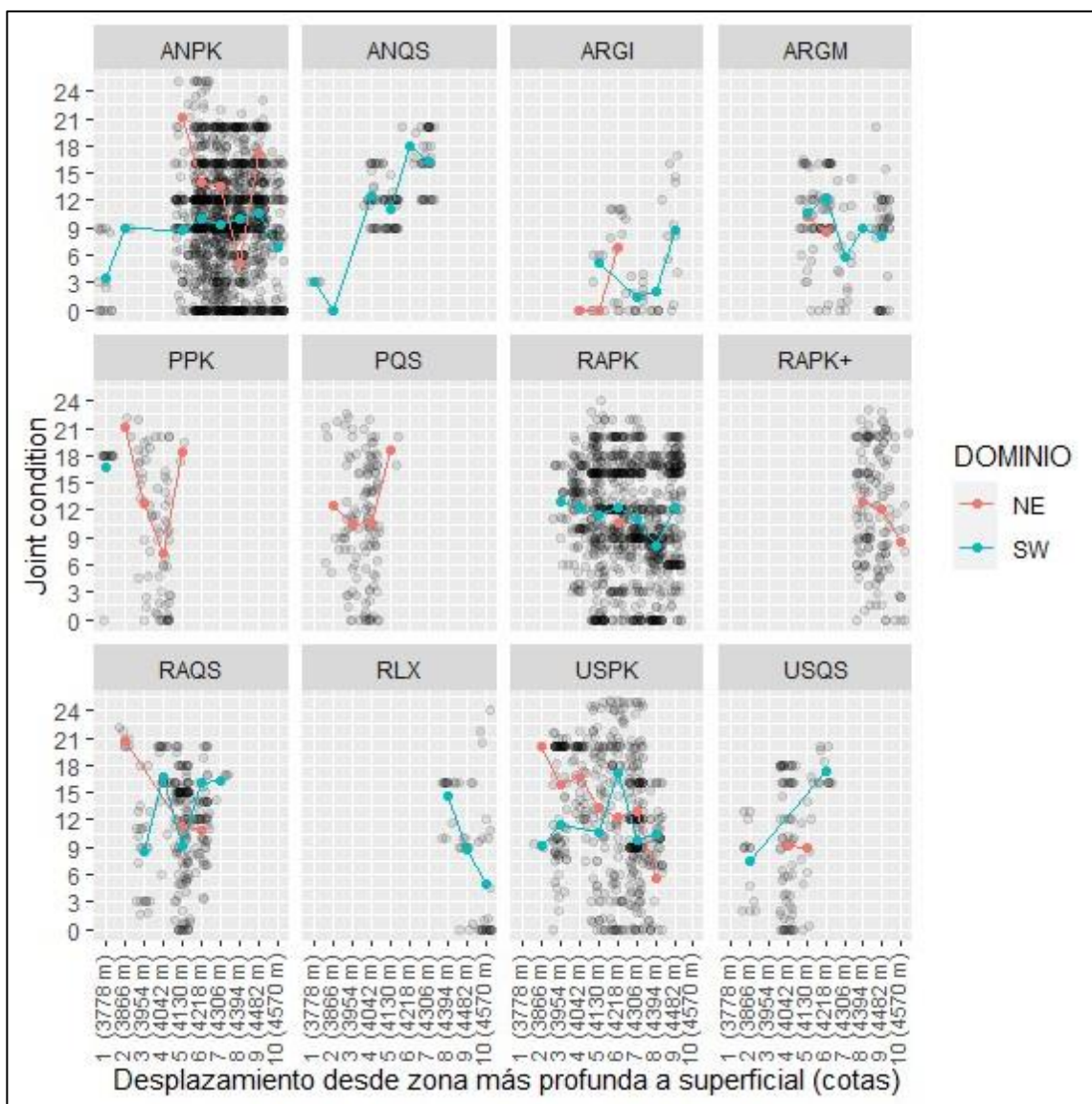


Figura 9.26: Gráfico de deriva de la sección 17NW, que indica el comportamiento de la variable Joint condition en la trayectoria de cotas, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases equidistantes.

9.2.3.8 Unidades geológicas geotécnicas respecto a la variable Joint condition, trayectoria N45°E.

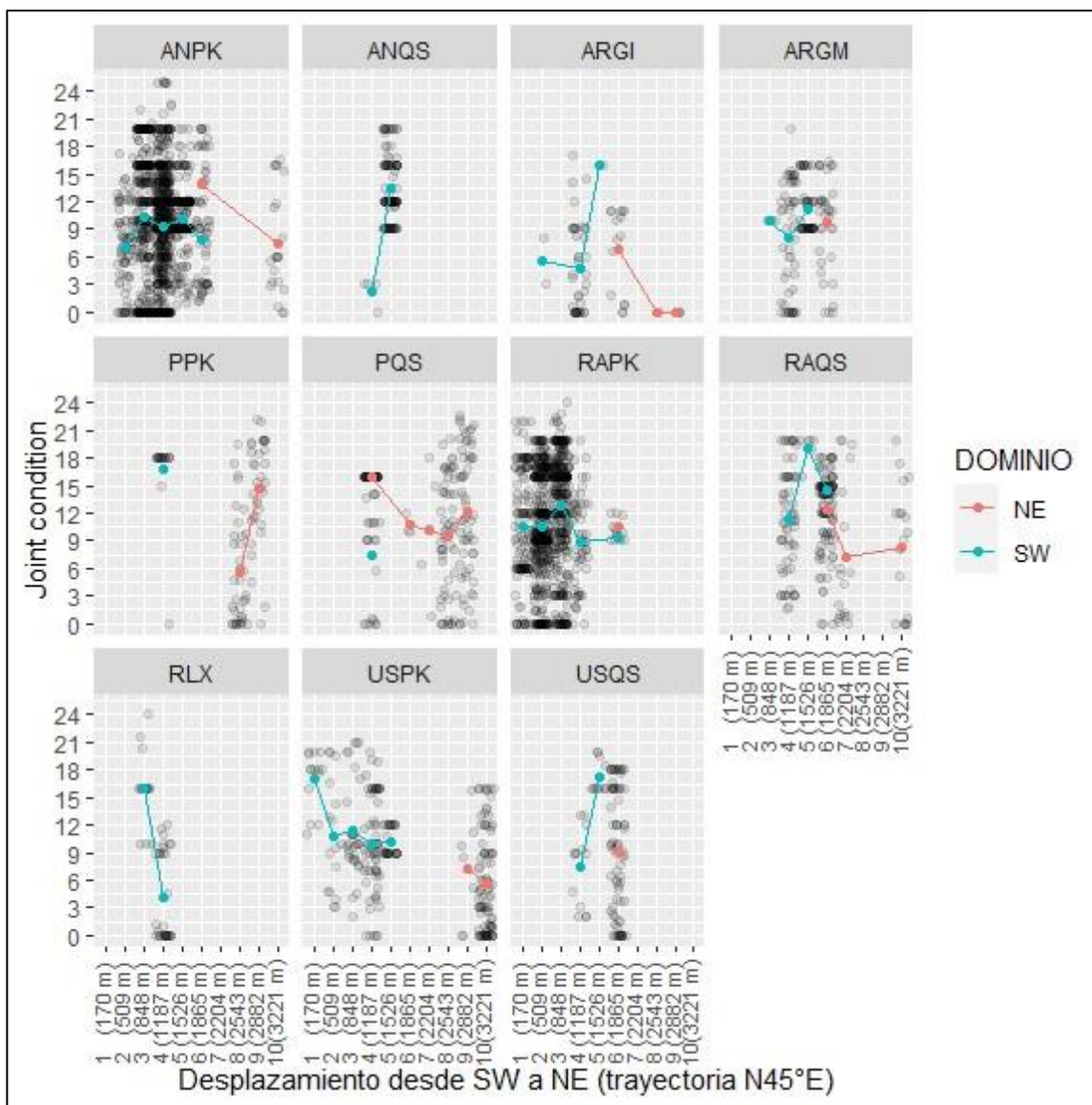


Figura 9.27: Gráfico de deriva de la sección 17NW, que indica el comportamiento de la variable Joint condition en la trayectoria N45°E, por cada unidad geológica geotécnica. El eje de las abscisas está dividido en 10 clases equidistantes.

GSI											GSI													
Desplazamiento desde zona más profunda a superficial (cotas)											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)													
UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ANPK (52)	SW (44)	72			48	39	44	44	45	40		ANPK (52)	SW (44)	58	36	42	44	46	42					64
	NE (61)					62	65	59	39				NE (61)											
ANQS (42)	SW (40)				45	43	54	40	25			ANQS (42)	SW (40)			42	36	36	57					
	NE (44)						44				NE (44)													
ARGI (28)	SW (29)	18	24	55	52	26	26	19	21	42	33	ARGI (28)	SW (29)				36	20						
	NE (26)	31	18	20	48				38				NE (26)					34	32	11				
ARGM (43)	SW (49)	50	58	43	48	47	53	38	28	57		ARGM (43)	SW (49)	60	49	51	48	15	44					
	NE (38)	39	13	35	22	48	43				NE (38)							37	47	31				
PPK (54)	SW (55)					61		35				PPK (54)	SW (55)				35	61						
	NE (53)	65	57	53	46	52	50				NE (53)							54	63	35	60	52		
PQS (53)	SW (55)				52	57						PQS (53)	SW (55)					55						
	NE (52)	49	59	47	57						NE (52)							50	51	49	61	57		
RAPK (51)	SW (51)			54	47	55	52	50	46	59	55	RAPK (51)	SW (51)	50	55	48	35	38						
	NE (50)	64			42	59			64	45			NE (50)					64						44
RAPK+ (58)	SW											RAPK+ (58)	SW											
	NE (58)								54	67			NE (58)											58
RAQS (49)	SW (46)	33	49	43	46	50	41					RAQS (49)	SW (46)	48	52		44	41						
	NE (52)	62	56	49	51	47	54				NE (52)							47	58					56
RLX (33)	SW (33)							26	30	36	40	RLX (33)	SW (33)		33	28	44							
	NE										NE													
USPK (47)	SW (44)	42	59	31	60	45	44	52	44			USPK (47)	SW (44)	46				42	45					
	NE (50)		71		40	34	57	51	54	23			NE (50)										39	51
USQS (51)	SW (46)		59	29	27	61	43					USQS (51)	SW (46)	61			59	31						
	NE (55)				73	54	44				NE (55)							37	63					44

FF											FF													
Desplazamiento desde zona más profunda a superficial (cotas)											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)													
UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ANPK (8)	SW (12)	1			10	12	13	12	11	13		ANPK (8)	SW (12)	6	14	16	10	11	13					4
	NE (5)					5	4	6	11		NE (5)													
ANQS (13)	SW (13)				15	13	11	15	13			ANQS (13)	SW (13)			15	11	18	10					
	NE (13)						13				NE (13)													
ARGI (15)	SW (15)	15	19	4	4	20	17	16	20	11	13	ARGI (15)	SW (15)					11	19					
	NE (15)	16	15	15	12				9		NE (15)							15	16	15				
ARGM (11)	SW (9)	7	6	8	9	10	9	11	12	3		ARGM (11)	SW (9)	6	9	8	8	18	17					
	NE (13)	11	15	16	13	12	13				NE (13)							14	13	12				
PPK (9)	SW (11)				9			17				PPK (9)	SW (11)					17	9					
	NE (7)	8	6	8	8	6	6				NE (7)							8	3	10	6	8		
PQS (10)	SW (10)				12	10						PQS (10)	SW (10)					10						
	NE (9)	12	6	10	5						NE (9)							10	12	6	4	7		
RAPK (9)	SW (9)									4	10	RAPK (9)	SW (9)	8	8	10	12	17						
	NE (9)	7			12	3					NE (9)							7						12
RAPK+ (4)	SW											RAPK+ (4)	SW											
	NE (4)								5	3			NE (4)											4
RAQS (11)	SW (11)	17	10	13	12	9	11					RAQS (11)	SW (11)	9	8		12	16						
	NE (10)	8	10	13	11	10	9				NE (10)							13	8					5
RLX (14)	SW (14)							15	17	15	12	RLX (14)	SW (14)		13	17	9							
	NE										NE													
USPK (8)	SW (10)	8	3	19	8	13	10	7	10			USPK (8)	SW (10)	9				10	11					
	NE (6)		7		8	9	5	6	5	15			NE (6)										9	5
USQS (9)	SW (13)		5	19	21	10	12					USQS (9)	SW (13)	10			5	18						
	NE (6)			2	7		9				NE (6)							18	3					9

RQD											RQD													
Desplazamiento desde zona más profunda a superficial (cotas)											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)													
UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ANPK (65)	SW (51)	80			61	47	48	48	55	47		ANPK (65)	SW (51)	78	46	43	53	54	39					
	NE (80)					81	81	76	53		NE (80)									62				83
ANQS (41)	SW (39)				40	45	55	35	28			ANQS (41)	SW (39)			42	44	17	61					
	NE (43)						43				NE (43)									43				
ARGI (27)	SW (29)	26	10	89	76	5	18	24	0	40	40	ARGI (27)	SW (29)				45	7						
	NE (26)	28	13	32	52				55		NE (26)								30	37	2			
ARGM (52)	SW (65)	73	85	66	60	57	67	52	49	82		ARGM (52)	SW (65)	79	66	73	63	13	30					
	NE (39)	41	10	33	38	48	53				NE (39)								38	47	33			
PPK (61)	SW (57)				66			23				PPK (61)	SW (57)				23	66						
	NE (64)	74	67	55	61	76	71				NE (64)								69	93	35	77	60	
PQS (62)	SW (62)				56	65						PQS (62)	SW (62)					62						
	NE (63)	51	74	58	78						NE (63)								60	54	71	81	66	
RAPK (61)	SW (66)			71	52	68	65	69	65	71	66	RAPK (61)	SW (66)	70	69	59	50	30						
	NE (57)	68			39	85			85	61	NE (57)								68					42
RAPK+ (81)	SW											RAPK+ (81)	SW											
	NE (81)								77	89			NE (81)											81
RAQS (55)	SW (54)	23	59	50	52	66	48					RAQS (55)	SW (54)	62	74		51	35						
	NE (57)	66	66	45	52	48	64				NE (57)								47	63				81
RLX (35)	SW (35)							28	24	32	48	RLX (35)	SW (35)		39	22	56							
	NE										NE													
USPK (67)	SW (59)	52	91	15	75	47	62	79	60															

GSI																								
Desplazamiento desde zona más profunda a superficial (cotas)											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)													
UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ANPK (50)	SW (39)	18	41			31	41	38	40	43	34	ANPK (50)	SW (39)		38	41	39	38	33					49
	NE (62)					87	63	58	34	62			NE (62)						54					
ANQS (46)	SW (46)	13	7		45	38	56	58				ANQS (46)	SW (46)				11	47						
	NE												NE											
ARGI (25)	SW (25)					23		17	12	43		ARGI (25)	SW (25)		30		24	52				29	20	10
	NE (26)				20	10	29						NE (26)											
ARGM (39)	SW (37)					41	40	30	35	34		ARGM (39)	SW (37)			37	34	40						
	NE (42)					49	29						NE (42)									42		
PPK (53)	SW (63)		62									PPK (53)	SW (63)				63							
	NE (44)			72	50	37	75						NE (44)									34	54	
PQS (50)	SW											PQS (50)	SW (31)				31							
	NE (50)			51	45	48	69						NE (50)				56		43	52	47	49		
RAPK (42)	SW (48)				44	45	46	48	51	44	55	RAPK (42)	SW (48)	52	50	47	36			37				
	NE (36)						36						NE (36)						36					
RAPK+ (52)	SW											RAPK+ (52)	SW											
	NE (52)									55	53	33												52
RAQS (45)	SW (45)				35	57	31	58	66			RAQS (45)	SW (45)					41	64	58				
	NE (45)			73			46	41					NE (45)							46	37			46
RLX (37)	SW (37)									43	42	30	RLX (37)	SW (37)			51	29						
	NE													NE										
USPK (52)	SW (44)			41	46		42	73	41	37		USPK (52)	SW (44)	73	42	44	39	41						
	NE (59)			69	64	61	60	60	62	31			NE (59)										35	41
USQS (44)	SW (43)									56			USQS (44)	SW (43)				32	56					
	NE (46)				46	47							NE (46)									46		

FF																								
Desplazamiento desde zona más profunda a superficial (cotas)											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)													
UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ANPK (8)	SW (12)	17	9			17	12	12	11	10	11	ANPK (8)	SW (12)		8	11	11	14	12					4
	NE (5)					1	4	4	8	7			NE (5)						7					
ANQS (12)	SW (12)	20	20		11	15	13	9				ANQS (12)	SW (12)				20	12						
	NE												NE											
ARGI (15)	SW (15)					17		14	20	8		ARGI (15)	SW (15)		12		15	19				14	11	18
	NE (15)				11	18	14						NE (15)											
ARGM (12)	SW (14)					14	16	13	15	14		ARGM (12)	SW (14)			14	12	14						
	NE (10)					6	18						NE (10)									10		
PPK (6)	SW (5)		5									PPK (6)	SW (5)				5							
	NE (8)			5	7	9	2						NE (8)									10	5	
PQS (10)	SW											PQS (10)	SW (14)				14							
	NE (7)			5	6	6	3						NE (7)				9		9	5	6	6		
RAPK (12)	SW (8)				12	10	10	9	6	6	6	RAPK (12)	SW (8)		5	6	10	12				11		
	NE (16)						16						NE (16)									16		
RAPK+ (8)	SW											RAPK+ (8)	SW											
	NE (8)								6	7	17			NE (8)										8
RAQS (11)	SW (12)				13	11	17	7	4			RAQS (11)	SW (12)					13	8	5				
	NE (10)			4			10	11					NE (10)								11	14		7
RLX (11)	SW (11)									16	8	10	RLX (11)	SW (11)			12	10						
	NE												NE											
USPK (7)	SW (10)			8	9		11	2	11	15		USPK (7)	SW (10)		2	11	11	11	12					
	NE (4)			5	4	6	5	4	3	9			NE (4)										11	6
USQS (9)	SW (12)			13					11				USQS (9)	SW (12)				13	11					
	NE (7)					7	6						NE (7)									7		

RQD																								
Desplazamiento desde zona más profunda a superficial (cotas)											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)													
UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ANPK (66)	SW (50)	17	66			29	51	48	53	58	54	ANPK (66)	SW (50)			63	53	49	48	38				81
	NE (80)					100	82	85	68	75			NE (80)											
ANQS (53)	SW (53)	0	0		53	37	53	73				ANQS (53)	SW (53)				0	55						
	NE												NE											
ARGI (35)	SW (36)					26		36	3	73		ARGI (35)	SW (36)		51		35	54						
	NE (35)				54	15	37						NE (35)									37	54	15
ARGM (54)	SW (45)					56	36	48	46	46		ARGM (54)	SW (45)			44	44	47						
	NE (62)					80	24						NE (62)									62		
PPK (71)	SW (78)		76									PPK (71)	SW (78)				78							
	NE (64)			78	66	60	96						NE (64)										64	63
PQS (69)	SW											PQS (69)	SW (37)				37							
	NE (69)			64	61	71	89						NE (69)				72	59	82	75	61			
RAPK (52)	SW (69)				46	52	59	64	76	76	81	RAPK (52)	SW (69)		85	79	55	47				45		
	NE (35)						35						NE (35)									35		
RAPK+ (72)	SW											RAPK+ (72)	SW											
	NE (72)								73	77	49			NE (72)										72
RAQS (56)	SW (53)				45	68	23	74	85			RAQS (56)	SW (53)				46	74	78					
	NE (58)				84		60	51					NE (58)									56	63	
RLX (51)	SW (51)									31	68	52	RLX (51)	SW (51)			47	53						
	NE												NE											
USPK (67)	SW (55)			68	56		57	95	54	35		USPK (67)	SW (55)		95	57	52	45	60					
	NE (79)			83	82	73	77	83	87	49			NE (79)										58	76
USQS (61)	SW (50)									59														

JOINT CONDITION (JC) EN SECCIÓN 28NW																								
Desplazamiento desde zona más profunda a superficial (cotas)											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)													
UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ANPK (9)	SW (9)			11	11	10	10	7	9	4		ANPK (9)	SW (9)	7	11	10	10	11						
	NE (8)			7	11	9	6	8					NE (8)				10	8	0					10
ANQS (8)	SW (9)					11	10	7	9	5	12	ANQS (8)	SW (9)		8	9	9	11						
	NE (6)			0		11							NE (6)					11	0					
ARGI (7)	SW (6)					9	6	9	4	5	9	ARGI (7)	SW (6)	8	4	7	7							
	NE (8)		5	5	12	12	1						NE (8)					8	11	3				
ARGM (11)	SW (9)			12	16	6	11	9	10	7		ARGM (11)	SW (9)	7	10	4	12							
	NE (14)	16	14	13	9								NE (14)				9	13	16					
PPK (13)	SW (12)			12								PPK (13)	SW (12)				12							
	NE (14)	21	17	14	10	9							NE (14)					10	18	14				
PQS (14)	SW											PQS (14)	SW											
	NE (14)	16	17	12	12	20							NE (14)						14	12				
RAPK (10)	SW (8)			9	10	14	7		5	4		RAPK (10)	SW (8)	12	9	6	9							
	NE (12)				17	16	10	14	20	10	6		NE (12)					3				13	10	11
RAPK+ (6)	SW											RAPK+ (6)	SW											
	NE (6)										6		NE (6)											6
RAQS (11)	SW (0)							0				RAQS (11)	SW (0)					0						
	NE (14)			15	14	17	10	13					NE (14)					7	17	13	13	16		
RLX (3)	SW (3)								2	3	3	RLX (3)	SW (3)	3	1	3								
	NE												NE											
USPK (12)	SW (10)					10	8					USPK (12)	SW (10)		9	10								
	NE (14)	20	19	16	13	14	13	14	14	9			NE (14)									15	16	12
USQS (19)	SW											USQS (19)	SW											
	NE (19)						20	18	15				NE (19)										19	17

JOINT CONDITION (JC) EN SECCIÓN 20NW																								
Desplazamiento desde zona más profunda a superficial (cotas)											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)													
UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ANPK (13)	SW (12)	17				13	10	12	12	10		ANPK (13)	SW (12)	14	9	12	12	12	12					
	NE (15)					14	17	14	10				NE (15)						14					15
ANQS (12)	SW (11)					14	12	16	13	5		ANQS (12)	SW (11)				13	9	13	16				
	NE (13)							13					NE (13)							13				
ARGI (7)	SW (7)	2	7	12	12	9	7	3	7	11	8	ARGI (7)	SW (7)				9	6						
	NE (6)	9	4	2	14				7				NE (6)					10	8	1				
ARGM (11)	SW (12)	11	14	10	13	12	14	9	5	12		ARGM (11)	SW (12)	15	11	12	12	2	15					
	NE (10)	11	2	10	2	14	12						NE (10)					11	14	7				
PPK (16)	SW (17)					19				11		PPK (16)	SW (17)					11	19					
	NE (14)	20	16	16	12	11	10						NE (14)					15	14	8	16	15		
PQS (16)	SW (17)					16	18					PQS (16)	SW (17)					17						
	NE (14)	15	15	12	13								NE (14)					14	16	10	15	17		
RAPK (14)	SW (13)			15	14	14	14	13	11	16	15	RAPK (14)	SW (13)	12	14	13	8	12						
	NE (14)	20			13	13				16	11		NE (14)					20						13
RAPK+ (13)	SW											RAPK+ (13)	SW											
	NE (13)									12	15		NE (13)											13
RAQS (14)	SW (12)	10	13	12	12	13	11					RAQS (14)	SW (12)	12	12		12	13						
	NE (15)	19	16	15	14	13	14						NE (15)					14	16					12
RLX (9)	SW (9)							6	9	10	10	RLX (9)	SW (9)		8	8	11							
	NE												NE											
USPK (11)	SW (11)	9	13	11	18	14	11	12	11			USPK (11)	SW (11)	11			10	12						
	NE (10)		22		7	6	11	10	12	5			NE (10)										7	10
USQS (13)	SW (13)		15	10	9	16	11					USQS (13)	SW (13)	16			15	10						
	NE (13)			17	13		9						NE (13)					12	14					9

JOINT CONDITION (JC) EN SECCIÓN 17NW																									
Desplazamiento desde zona más profunda a superficial (cotas)											Desplazamiento desde SW a NE (trayectoria N45°E)														
UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	UGT	DOMINIO / CLASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
ANPK (12)	SW (10)	4	9				9	10	9	10	7	ANPK (12)	SW (10)		7	10	9	10	8						
	NE (15)						21	14	14	5	17		NE (15)							14				7	
ANQS (13)	SW (13)	3	0			13	11	18	16			ANQS (13)	SW (13)					2	14						
	NE												NE												
ARGI (5)	SW (5)						5		1	2	9	ARGI (5)	SW (5)		6		5	16							
	NE (5)				0	0	7						NE (5)						7		0	0			
ARGM (10)	SW (10)						11	12	6	9	8	ARGM (10)	SW (10)				10	8	11						
	NE (10)						10	8					NE (10)						10						
PPK (13)	SW (17)		17									PPK (13)	SW (17)					17							
	NE (10)			21	13	7	18						NE (10)									5	15		
PQS (10)	SW											PQS (10)	SW (7)					7							
	NE (12)			12	10	11	19						NE (12)					16		11	10	9	12		
RAPK (11)	SW (11)					13	12	11	12	11	8	12	RAPK (11)	SW (11)	11	11	13	9			9				
	NE (11)						11					NE (11)								11					
RAPK+ (12)	SW											RAPK+ (12)	SW												
	NE (12)								13	12	8		NE (12)					11	19	15				12	
RAQS (12)	SW (12)			8	17	11	9	11	16	16		RAQS (12)	SW (12)					11	19	15					
	NE (12)			21									NE (12)							12	7			8	
RLX (8)	SW (8)								15	9	5	RLX (8)	SW (8)				16	4							
	NE												NE												
USPK (12)	SW (11)		9			12	11	17	10	10		USPK (12)	SW (11)	17	11	11	10	10							
	NE (13)		20	16	17	13	12	13	6				NE (13)										7	6	
USQS (11)	SW (12)		7					17				USQS (11)	SW (12)					7	17						
	NE (9)					9	9						NE (9)							9					

Tabla 9.3; Sección 28NW-20NW-17NW, que indica los promedios de las variables joint condition (JC) en sus respectivas trayectorias, con sus correspondientes clases de UGT. Celda roja, señala valores de promedios asociados a macizos rocoso de menor calidad. Celda gris, ilustra promedios no representativos. Valores entre paréntesis corresponden a promedios de dominios y UGT.