



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



**" VALIDACIÓN DE LOS RANGOS DE RESISTENCIA DEL MACIZO
ROCO SO A PARTIR DE ENSAYOS DE CARGA PUNTUAL PARA LA
ACTUALIZACIÓN DEL MODELO GEOTÉCNICO Y OPTIMIZACIÓN
DEL DISEÑO DE TRONADURA, RAJO ZALDÍVAR, REGIÓN DE
ANTOFAGASTA, CHILE (24°12'S; 69°05'O)."**

Trabajo de Habilitación Profesional para optar al Título de Geólogo

José Matías Rodrigo Henríquez Rodríguez

Profesor Guía : MSc Abraham Elías González
Martínez
Profesional Co-Guía : Sr. Héctor Aníbal Villalobos Kirmayr
Profesor Comisión : Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

Concepción, 2026

INDICE

RESUMEN.....	v
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERALIDADES.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 UBICACIÓN Y ACCESOS	4
1.5 AGRADECIMIENTOS	6
2. MARCO GEOLOGICO.....	7
2.1 CONTEXTO REGIONAL.....	7
2.2 GEOLOGÍA LOCAL DEL YACIMIENTO ZALDÍVAR.....	9
2.2.1 Andesita (AND).....	10
2.2.2 Pórfido Zaldívar (ZPY).....	11
2.2.3 Pórfido Riolítico (PRG).....	12
2.2.4 Granito Grueso De Biotita (GGB).....	12
2.2.5 Pórfido Llamo Intermineral Temprano (LPF).....	13
2.2.6 Pórfido Llamo Intermineral Tardío (LPP).....	13
2.2.7 Brechas Hidrotermales	13
2.2.8 Gravas Continentales (SCG).....	14
2.3 ALTERACIÓN HIDROTERMAL Y ZONAS MINERALIZADAS	14
2.3.1 Alteración Potásica.....	15
2.3.2 Alteración Cuarzo–Sericita Y Propilítica	16
2.3.3 Alteraciones Argílica Avanzada Y Supérgena.....	16
2.3.4 Zonas Mineralizadas	17
3. MARCO GEOTECNICO.....	20
3.1 CONTEXTO ESTRUCTURAL DEL YACIMIENTO	20
3.2 UNIDADES GEOTÉCNICAS BÁSICAS	23

4. MARCO TEORICO.....	26
4.1 FUNDAMENTOS DE LA RESISTENCIA DE LAS ROCAS.....	26
6.2 ENSAYOS MECÁNICOS APLICADOS A MACIZOS ROCOSOS	27
6.2.1 Ensayo De Compresión Uniaxial.....	27
4.2.2 Ensayo De Carga Puntual.....	28
5. METODOLOGIAS.....	31
5.1 ETAPA PRETERRENO.....	31
5.1.1 Planilla de Registro de Muestras.....	31
5.1.2 Planilla de Ensayo de Carga Puntual.....	32
5.1.3 Planilla de Consolidación por UGTB.....	33
5.2 ETAPA DE TERRENO.....	34
5.3 ENSAYOS PLT	34
5.4 CONSOLIDACIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS COMPARATIVO.....	37
5.4.1 Integración De Datos UCS (PLT) Con El Modelo CMZ	37
5.4.2 Comparación Por Fases Operacionales	37
5.4.3 Análisis De Variación Por Bancos Dentro De La Fase 8.....	38
6. RESULTADOS	39
6.1 ACTUALIZACIÓN DE VALORES UCS POR UGTB	39
6.2 DIFERENCIACIÓN DE POBLACIONES DE RESISTENCIA DENTRO DE UNA MISMA UGTB	43
6.2.1 Análisis De Brecha Hidrotermal – UGTB-11	44
6.2.2 Análisis De Resistencia Y Diferenciación Litológica - UGTB-12	47
6.2.3 Análisis De Resistencia Y Diferenciación Litológica - UGTB-14	50
6.2.4 Análisis De Resistencias En La UGTB-82.....	54
6.3 ANÁLISIS POR FASES.....	56
6.3.1 Comparación Por Fases: UGTB-11 Y UGTB-12.....	57
6.3.2 Comparación Por Fases: UGTB-13 Y UGTB-14	58
6.3.3 Comparación Por Fases: UGTB-21, UGTB-22, UGTB-31 Y UGTB-32	59
6.4 ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA CON LA PROFUNDIDAD EN FASE 8.....	60
7. DISCUSION.....	62

7.1. COEXISTENCIA DE POBLACIONES DE DISTINTA RESISTENCIA DENTRO DE UNA MISMA UGTB	65
7.2. INFLUENCIA DE LA FASE OPERACIONAL Y PROFUNDIZACIÓN DEL BANCO .	65
7.3. LIMITACIONES DEL ANÁLISIS	66
8. RECOMENDACIONES	67
8.1 RECOMENDACIONES OPERACIONALES PARA TRONADURA.....	67
8.2 RECOMENDACIONES PARA LA CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA	68
CONCLUSIONES	69
REFERENCIAS	71
ANEXO	73

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de ubicación y accesos al yacimiento Zaldívar.	5
Figura 2: Franja Eoceno medio – Oligoceno temprano..	8
Figura 3: Plano geológico del yacimiento Zaldívar.	10
Figura 4: Plano de alteraciones del yacimiento Zaldívar.	15
Figura 5: Perfil esquemático de zonas minerales del yacimiento Zaldívar.	18
Figura 6: Plano de zonas minerales del yacimiento Zaldívar.	19
Figura 7: Vista en planta de trazas de fallas principales	20
Figura 8: Vistas en planta e isometría de los dominios estructurales del rajo Zaldívar.	22
Figura 9: Modelo tridimensional y secciones A–A' y B–B' del modelo geotécnico CMZ 2023. .	24
Figura 10: Medidas recomendadas para bloques irregulares.	35
Figura 11: Modos típicos de falla para muestras válidas e inválidas.	36
Figura 12. Ubicación de los puntos de muestreo..	40
Figura 13. Brecha hidrotermal asociada a la UGTB-11.....	44
Figura 14. Distribución espacial de las muestras correspondientes a la brecha (11-Bx).	45
Figura 15. Comparación de la distribución de UCS entre la UGTB-11 y las brechas hidrotermales asociadas (Bx-11).	46
Figura 16. Distribución de valores de resistencia a compresión uniaxial para la UGTB-12.	47
Figura 17. Diferencias texturales entre litologías presentes en la UGTB-12.....	48
Figura 18. Distribución espacial de las muestras correspondientes a andesitas silicificadas.	50
Figura 19. Distribución de los valores de UCS para la UGTB-14.	51
Figura 20. Litologías representativas presentes en la UGTB-14. A).	52
Figura 21. Distribución espacial de las muestras PRG y LPF.....	54

Figura 22. Distribución de valores de resistencia a compresión uniaxial (UCS) para la UGTB-82.	55
Figura 23. Distribución de los valores de UCS por fase minera para UGTB-11 y UGTB-12.....	57
Figura 24. Distribución de valores de UCS por fase para UGTB-13 (A) y UGTB-14 (B)..	58
Figura 25. Distribución de valores de UCS por fase para UGTB-21 (A), UGTB-22 (B), UGTB-31 (C) y UGTB-32 (D).	59
Figura 26. Comparación de la UCS promedio entre los bancos 2945 y 2930 en F8.....	61
Figura 27. Distribución espacial de las UGTB en Fase 9 (A) y Fase 8 (B).	62

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades geomecánicas promedio de las UGTB del rajo Zaldívar..	23
Tabla 2. Validez de ensayos PLT por UGTB.....	39
Tabla 3. Tabla de estadísticos por UGTB.....	41
Tabla 4. Propiedades de resistencia por UGTB.....	42
Tabla 5. Disponibilidad de ensayos PLT por UGTB y fase minera.....	56

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar la resistencia del macizo rocoso en distintas unidades geotécnicas del rajo Zaldívar mediante la estimación de la resistencia a compresión uniaxial (UCS) a partir de ensayos de carga puntual (PLT). La investigación se desarrolla en el contexto de optimizar la estimación de parámetros geomecánicos utilizados en el diseño de tronaduras. Para ello, se analizaron estadísticamente los resultados de ensayos PLT obtenidos en distintas fases del rajo, comparándolos con valores históricos utilizados en la faena. El análisis incluyó la construcción de histogramas, diagramas de caja y la aplicación de criterios estadísticos para identificar poblaciones de resistencia diferenciadas dentro de una misma unidad geotécnica básica (UGTB). Asimismo, se realizó un registro detallado en cartillas, fotografías y descripciones litológicas con el fin de relacionar los valores de resistencia con características geológicas específicas.

Los resultados evidencian un aumento general de los valores de UCS en unidades con alteración Q>S y/o silicificación respecto de los valores históricos utilizados en la faena. Además, se identifican diferencias significativas de resistencia dentro de algunas UGTB, particularmente en la UGTB-12, donde las andesitas silicificadas presentan valores de resistencia mayores que las andesitas con alteración Q>S, y en la UGTB-14, donde los pórfidos riolíticos gruesos (PRG) exhiben resistencias superiores a las litologías LPF. Asimismo, en la UGTB-11 se identifican brechas hidrotermales con valores de resistencia significativamente superiores al promedio de la unidad.

El análisis por fases indica que las variaciones observadas en la resistencia se asocian principalmente a cambios en la distribución de dominios litológicos y de alteración, más que a una variación espacial o temporal propia de la fase minera. En conjunto, los resultados permiten mejorar la caracterización geomecánica del macizo rocoso y aportan información relevante para la optimización del diseño de tronaduras, contribuyendo a reducir la incertidumbre en la estimación de parámetros operacionales utilizados en la planificación minera.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

La caracterización geotécnica del macizo rocoso constituye uno de los pilares fundamentales para la planificación y operación segura de minas a cielo abierto. Su adecuada determinación permite definir parámetros de resistencia y deformabilidad que condicionan el diseño de taludes, el control de la estabilidad global y la eficiencia del proceso de perforación y tronadura. En operaciones de gran escala como la Compañía Minera Zaldívar (CMZ), perteneciente al Distrito Escondida, el conocimiento preciso de la calidad y comportamiento mecánico del macizo rocoso adquiere una importancia crítica, ya que influye directamente en la fragmentación, en la seguridad operacional y en la optimización de recursos energéticos y explosivos empleados durante la producción.

El rajo Zaldívar se ubica en la Cordillera de Domeyko, Región de Antofagasta, aproximadamente a 170 km al sureste de la ciudad homónima y a una altitud promedio cercana a los 3 100 m s.n.m. (Perelló et al., 2018). El yacimiento forma parte de la franja metalogénica eocena de pórfidos cupríferos que alberga depósitos de relevancia mundial, como Escondida y Escondida Norte, dentro del sistema estructural Domeyko. Desde su descubrimiento en 1981, el yacimiento ha sido explotado mediante minería a rajo abierto, desarrollando un modelo geológico y geotécnico complejo controlado por fallas de orientación NE–SW y NW–SE que delimitan bloques con litologías y grados de alteración contrastantes (SRK Consulting, 2023).

El modelo geotécnico vigente de CMZ define un conjunto de Unidades Geotécnicas Básicas (UGTB), determinadas a partir de la litología, el tipo de alteración y la zona mineral predominante. Sin embargo, la variabilidad natural del macizo, la superposición de alteraciones hidrotermales y la heterogeneidad en los registros de ensayos de laboratorio generan incertidumbres en los valores representativos de resistencia utilizados en los cálculos de diseño de la tronadura. En este contexto, los ensayos de carga puntual (Point Load Test, PLT) constituyen una herramienta práctica, rápida y de bajo costo para estimar la resistencia a compresión simple (Uniaxial Compressive Strength, UCS) de las rocas in situ o de muestras irregulares, permitiendo una calibración más realista de los

rangos de resistencia asignados a cada UGTB (ISRM, 1985; Bieniawski, 1975; Broch & Franklin, 1972).

El presente estudio se enmarca en el trabajo desarrollado por el área técnica de Enaex (EMTS), en conjunto con la superintendencia de Perforación y Tronadura, cuyo propósito es validar los rangos de resistencia del macizo rocoso del rajo Zaldívar mediante la aplicación sistemática de ensayos PLT en muestras representativas de las principales unidades geotécnicas. Este estudio busca disminuir la brecha existente entre los valores teóricos de resistencia considerados en el diseño operacional y los valores reales determinados experimentalmente, contribuyendo así a un modelo geotécnico-operacional más robusto, capaz de optimizar los diseños de malla, la eficiencia energética de la tronadura y la estabilidad del macizo durante las operaciones diarias.

La investigación pretende, por tanto, integrar la caracterización geológica-estructural, la alteración hidrotermal y la respuesta mecánica de las rocas, estableciendo una correlación directa entre la litología, el grado de alteración y la resistencia obtenida experimentalmente. Con ello se espera aportar información técnica útil para la actualización continua del modelo geotécnico del rajo Zaldívar optimizando la perforación y tronadura, etapa clave en la cadena productiva minera.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La caracterización geotécnica del macizo rocoso en faenas a cielo abierto depende en gran medida de la calidad y representatividad de los datos de resistencia que alimentan los modelos operacionales. En el caso del rajo Zaldívar, el modelo geotécnico vigente incorpora diecisiete Unidades Geotécnicas Básicas, definidas a partir de la combinación entre litología, tipo de alteración y zona mineral. Sin embargo, la información de resistencia que sustenta estas unidades proviene de campañas históricas con metodologías heterogéneas y, en muchos casos, con una baja densidad de ensayos de laboratorio en comparación con la variabilidad real del macizo.

Las condiciones geológicas y estructurales del yacimiento agravan este escenario. La presencia de pórfidos riolíticos y andesitas intensamente fracturadas, junto con zonas de brechización hidrotermal y alteraciones superpuestas (cuarzo-sericita, clorita, biotita, potásica), genera cambios

significativos en la resistencia de la roca a corta distancia (Según Perelló et al., 2018). Esta heterogeneidad provoca que los valores de resistencia uniaxial estimados a partir de bases de datos históricas o correlaciones teóricas puedan no reflejar las condiciones reales encontradas durante la operación, afectando la precisión de los modelos de diseño geotécnico y de tronadura.

En el contexto operacional, Enaex Servicios S.A., a través de su área técnica, utiliza estos parámetros geotécnicos para definir diseños de malla, cargas de explosivo y secuencias de detonación. Si los rangos de resistencia asignados a cada UGTB no corresponden al comportamiento real del macizo, pueden producirse desviaciones en la fragmentación esperada, sobreperforación, sobrerotura o inestabilidad local de taludes. Tales discrepancias generan impactos tanto en la seguridad como en los costos de operación, al requerir ajustes posteriores en los diseños y un mayor consumo de explosivo o energía.

Por lo tanto, se evidencia la necesidad de validar experimentalmente los rangos de resistencia del macizo rocoso del rajo Zaldívar, de modo que los valores empleados por Enaex y CMZ sean coherentes con la realidad mecánica de cada unidad geotécnica. Los ensayos de carga puntual (PLT) representan una herramienta eficiente para alcanzar este objetivo, ya que permiten obtener de forma rápida y económica el índice de resistencia puntual (I_{s50}) en muestras irregulares o de tamaño reducido, correlacionable con la resistencia a compresión simple (UCS) (ISRM, 1985; Broch & Franklin, 1972; Bieniawski, 1975).

El problema principal radica, entonces, en la disparidad existente entre los valores de resistencia de la roca intacta utilizados en el modelo geotécnico-operacional y las propiedades reales del macizo rocoso, situación que limita la precisión del diseño de tronadura y de las evaluaciones de estabilidad. La presente investigación busca reducir dicha brecha mediante la aplicación sistemática de ensayos PLT sobre muestras representativas, estableciendo correlaciones estadísticas confiables que permitan recalibrar los rangos de resistencia y fortalecer la base geotécnica del modelo CMZ 2023.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Calibrar los rangos de resistencia del macizo rocoso del rajo Zaldívar a partir de ensayos de carga puntual, para optimización del diseño de tronadura rajo Zaldívar

1.3.2 Objetivos Específicos

- Recolectar muestras representativas del macizo rocoso en el rajo Zaldívar.
- Determinar la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) del macizo rocoso a partir de la ejecución de ensayos de carga puntual (PLT) sobre muestras representativas
- Crear y adaptar planillas técnicas de registro y cálculo, orientadas al procesamiento, control y análisis de los resultados de ensayos PLT, para su integración al sistema geotécnico-operacional de la faena Zaldívar.
- Analizar las diferencias en la resistencia del macizo rocoso entre distintas fases operacionales del rajo Zaldívar, evaluando cómo estas variaciones afectan la precisión del modelo geotécnico.
- Determinar la diferencia entre resistencias de acuerdo a la intensidad de alteración presente en el macizo.
- Determinar las diferencias en la resistencia del macizo entre distintos bancos dentro de una misma fase, para identificar patrones de variación vertical y ajustar los rangos de resistencia en función de la profundidad.

1.4 UBICACIÓN Y ACCESOS

El yacimiento Zaldívar se encuentra ubicado en la Región de Antofagasta, aproximadamente a 175 km al sureste de la ciudad de Antofagasta y a una altitud media de 3.050 m s.n.m. Administrativamente pertenece a la Comuna de Sierra Gorda, Provincia de Antofagasta, en el norte de Chile. El yacimiento se emplaza en el sector occidental de la Cordillera de Domeyko, al oeste del Salar de Atacama.

El acceso principal a la faena se realiza desde la ciudad de Antofagasta por la Ruta B-475, que conecta hacia el sureste hasta empalmar con la Ruta B-855, vía que conduce directamente a las

instalaciones de la Faena Zaldívar. El trayecto total es de aproximadamente 175 km y se encuentra completamente asfaltado. El acceso secundario se realiza desde Sierra Gorda a través de la misma red vial. En la Figura 1 se muestra la localización general del yacimiento y la ruta de acceso principal desde Antofagasta, junto con su posición relativa dentro del territorio nacional.

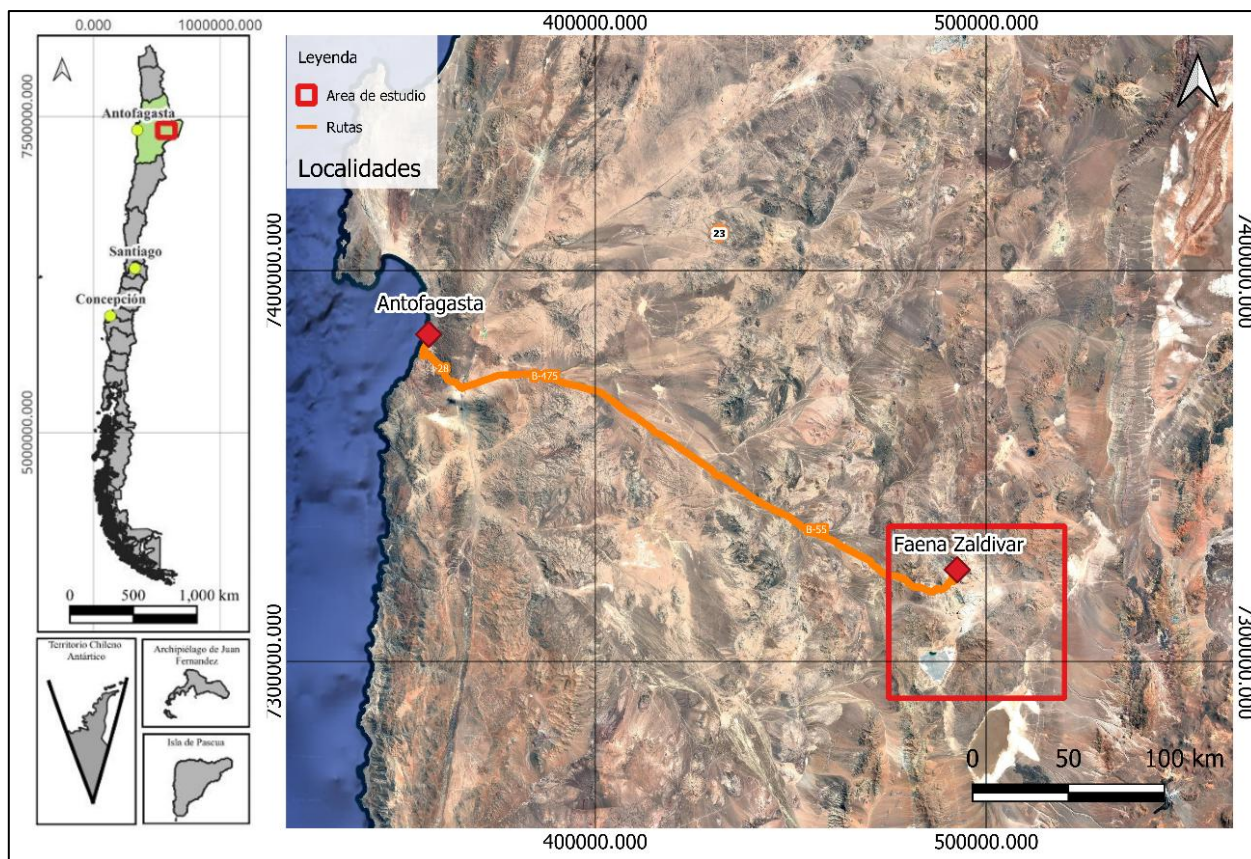


Figura 1: Mapa de ubicación y accesos al yacimiento Zaldívar.

1.5 AGRADECIMIENTOS

Iniciar agradeciendo a Enaex Servicios S.A por darme la oportunidad de desarrollar mi habilitación profesional junto a ellos, brindándome la confianza y recursos para que esto fuera posible. Agradecer al Sr. Héctor Villalobos quien permitió y genero esta instancia de investigación. Agradezco también a todo el personal Enaex Zaldivar tanto del área técnica como de operaciones, quienes me entregaron su apoyo, compañía y resguardo desde el primer momento, especialmente a la señorita Brenda Sandoval Silva, Geóloga en Enaex Zaldivar, quien me guio dentro de la faena, me acompañó en la toma de muestras, me brindo transporte, oriento en la realización de ensayos y ayudo de mil maneras durante toda mi estadía en CMZ.

No podría dejar de lado a los amigos que conocí a lo largo de la universidad, partiendo por Diego Mella Jara, gracias por mostrarme este camino y apoyarme en todo momento, Florencia Ordoñez Soto gracias por tu sincera amistad y por siempre estar dispuestos a tenderme una mano cuando lo necesite. A Gonzalo Hernández Martínez, Constanza Riquelme Sanhueza y Antonia Oñate Carrasco quienes se encargaron de hacer más grato cada momento en que estuvieron presentes. De igual manera agradecer a Daniela Belén Velásquez Zapata, por su apoyo y compañía a lo largo de estos años de estudio.

Agradecer a mis padres María Cristina Rodríguez Sáez y José Luis Henríquez Rodríguez por permitirme estudiar y entregarme todas las herramientas para poder lograr mis objetivos, sin ellos nada de esto sería posible. Dar las gracias a las personas más importantes en mi vida, Cristina Aida Henríquez Rodríguez y Nicolas Alejandro Henríquez Rodríguez, mis hermanos.

Por último, dedicar este y cada uno de mis logros a mi difunto abuelo José Cristino Rodríguez Fuentes, solo espero que donde estes puedas verme con orgullo.

2. MARCO GEOLOGICO

2.1 CONTEXTO REGIONAL

El yacimiento Zaldívar se emplaza en el Distrito Escondida, dentro del cinturón de pórfidos cupríferos del Eoceno medio–Oligoceno temprano (aproximadamente entre 44 y 33 Ma) del norte de Chile (Figura 2). Este cinturón se desarrolla a lo largo de la Cordillera de Domeyko, una estructura de orientación norte-sur que constituye el principal lineamiento tectónico y magmático del norte del país. La cordillera alberga numerosos depósitos tipo pórfido cuprífero formados durante la deformación Incaica, evento tectónico transpresivo caracterizado por un régimen compresivo con componente de rumbo, que facilitó la intrusión de magmas cupríferos y el emplazamiento de sistemas hidrotermales mineralizantes (Amilibia et al., 2008; Mpodozis & Cornejo, 2012). A escala distrital, la estructura más relevante corresponde a la denominada “Escondida shear lens”, un corredor estructural de aproximadamente 150 km de largo y 20 km de ancho que agrupa los principales centros pórfidos del distrito: Escondida, Escondida Norte, Pampa Escondida y Zaldívar, entre otros (Perelló et al., 2018). Este corredor marca el contacto entre los depocentros mesozoicos situados al oeste y los bloques de basamento paleozoico elevados hacia el este, actuando como zona de transferencia estructural que controla el emplazamiento de los intrusivos pre-, sin- y posmineral, así como la disposición de las secuencias volcánico-plutónicas hospedantes (Perelló et al., 2018) (Geología Zaldívar, 2023).

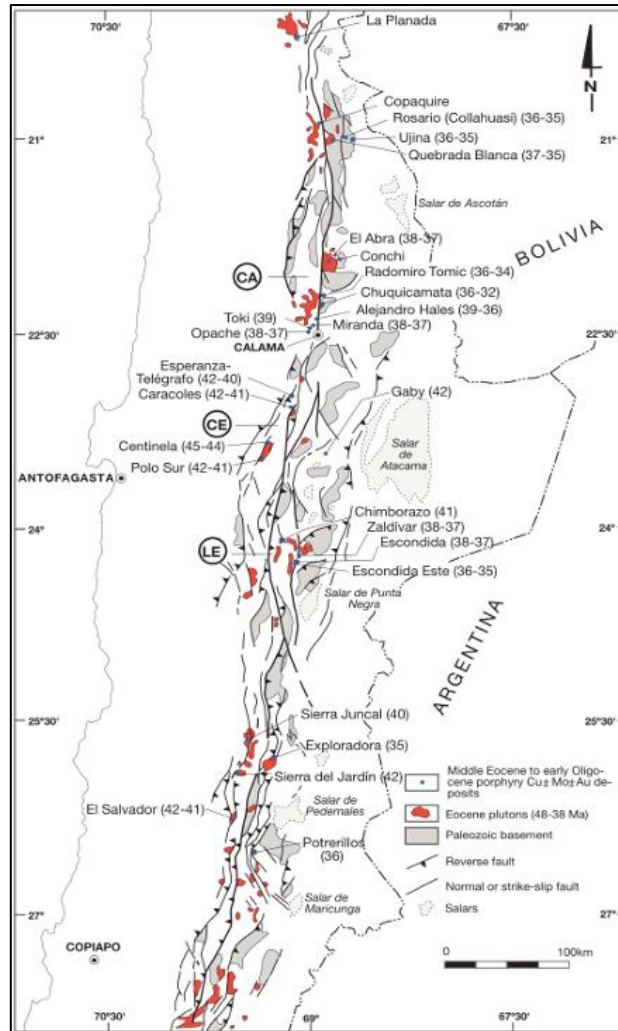


Figura 2: Franja Eoceno medio – Oligoceno temprano. Extraído de Mpodozis y Cornejo (2012).

En términos de localización, Zaldívar se sitúa aproximadamente a 175 km al sureste de la ciudad de Antofagasta, a cotas comprendidas entre 2 600 y 3 500 m s. n. m., en el sector central de la Cordillera de Domeyko. Geológicamente, comparte continuidad con el depósito Escondida Norte, y ambas minas han sido históricamente consideradas partes oriental y occidental de un mismo sistema magmático-mineral, separadas solo por límites de propiedad. En la actualidad, la minería a rajo abierto se desarrolla en Escondida, Escondida Norte y Zaldívar, dentro de este marco tectónico-magmático que explica la concentración y la afinidad metalogénica de cobre, oro y molibdeno característica del clúster Escondida (Geología Zaldívar, 2023; Perelló et al., 2018).

2.2 GEOLOGÍA LOCAL DEL YACIMIENTO ZALDÍVAR

El yacimiento cuprífero Zaldívar corresponde a un depósito asociado a una actividad intrusiva de edad eocena, de afinidad intermedia a ácida, emplazado a lo largo de la megaestructura denominada Falla Oeste, con orientación norte-sur, y asociado a sistemas de fallas secundarias con dirección noroeste y noreste. La alteración hidrotermal y la mineralización se presentan tanto dentro de los cuerpos intrusivos como en las rocas volcánicas adyacentes que actuaron como rocas de caja (Geología Zaldívar, 2023).

La zona mineralizada principal abarca un área de aproximadamente 2,5 km en dirección norte-sur por 3 km en dirección este-oeste, extendiéndose hacia el este en continuidad con el Proyecto Escondida Norte, con el que comparte el mismo sistema y evento de mineralización. La Main Zone (MZ), de alrededor de $1\ 300 \times 1\ 000$ m, constituye la zona central del depósito y coincide con un cuerpo intrusivo de afinidad granodiorítica con marcada orientación N-NE, intersectado por estructuras N-NW responsables de la generación de vetas tardías y brechas hidrotermales. (Geología Zaldívar, 2023). A continuación, se expone un plano con las diferentes litologías descritas para el rajo Zaldívar (Figura 3), las cuales serán descrita más adelante.

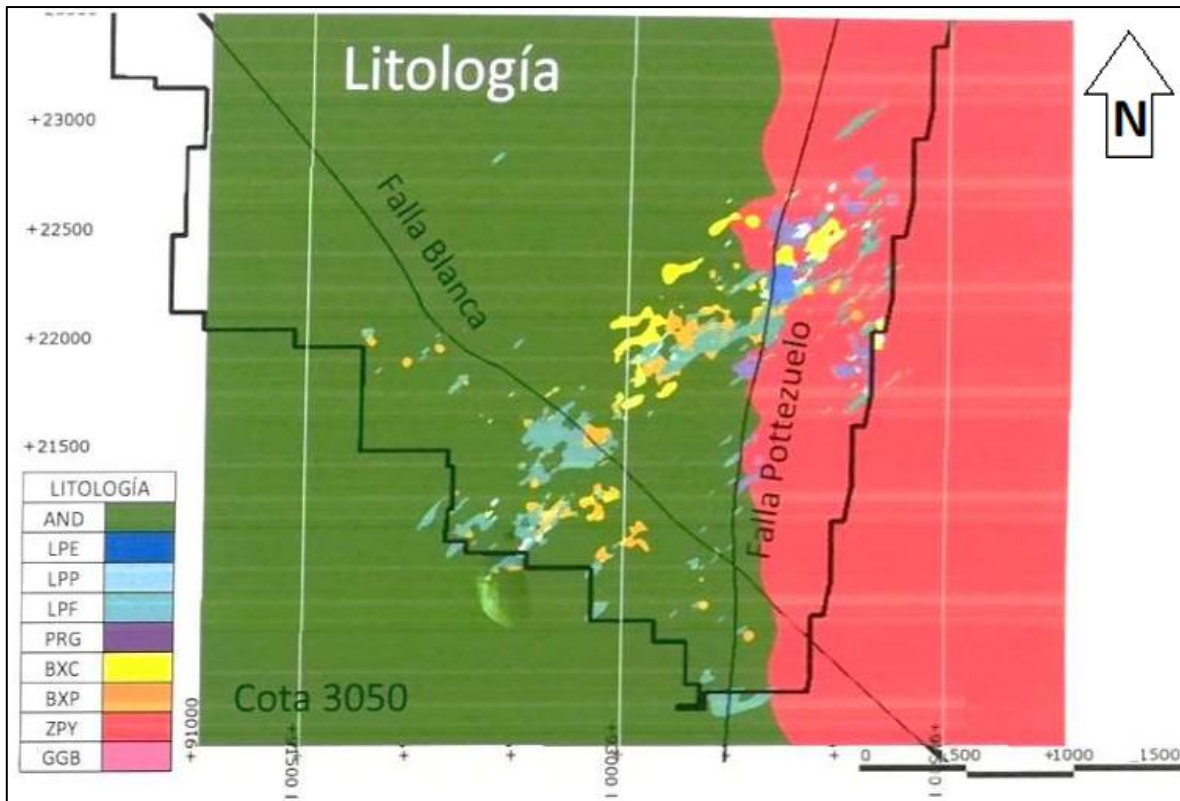


Figura 3: Plano geológico del yacimiento Zaldívar. Se observa la distribución de las distintas unidades litológicas que conforman el yacimiento, donde se aprecia el bloque occidental conformado principalmente por rocas volcánicas andesíticas (AND) y el bloque oriental conformado principalmente por tobas y lavas riolíticas (ZPY). Además, se observan los pórfidos mineralizadores (LPP y LPP) de orientación NE-SW con sus respectivas brechas asociadas. (extraído de Geología Zaldívar, 2023).

2.2.1 Andesita (AND)

Las andesitas de Zaldívar corresponden a dos conjuntos principales: la andesita inferior de la Formación La Tabla, de edad paleozoica, y las andesitas de edad eocena media, previamente asignadas a la Formación Augusta Victoria (Maturana y Saric, 1991; Marinovic et al., 1995; Navarro et al., 2009). Ambas unidades fueron intensamente afectadas por procesos hidrotermales, por lo que sus contactos originales se encuentran obliterados y se comportan de forma similar ante los fluidos mineralizantes, razón por la cual no se diferencian en el modelamiento geológico (Geología Zaldívar, 2023).

Petrográficamente, las andesitas se presentan como flujos porfídicos a afaníticos, con variedades fragmentarias de grano fino que incluyen tobas de lapilli y rocas volcánicas fragmentarias. La textura porfídica original, cuando se conserva, está compuesta por aproximadamente 25 % de

fenocristales de plagioclasa y menos del 10 % de minerales ferromagnesianos (anfíboles y piroxenos), en una masa fundamental pilotaxítica con microlitos seriados. Localmente se observan cuerpos de andesita afanítica intruyendo riolitas y granitoides comagmáticos, generando zonas de brechas de intrusión en los contactos. Estas rocas presentan tonalidades gris verdosas a gris oscuras, y en la mayoría de los casos su textura original ha sido completamente obliterada por alteración hidrotermal, desarrollando asociaciones de biotita, clorita, plagioclasa y moscovita. En sectores con preservación parcial de la textura, se reconocen variedades fragmentarias con 55 % de matriz cloritizada y 45 % de piroclastos compuestos principalmente por líticos andesíticos y cristales quebrados de plagioclasa (Geología Zaldívar, 2023).

2.2.2 Pórfido Zaldívar (ZPY)

Bajo la denominación Pórfido Zaldívar (ZPY) se agrupa un conjunto de rocas silíceas de composición riolítica, que incluye ignimbritas, lavas y cuerpos subvolcánicos pertenecientes a la Formación La Tabla, de edad pérmica. Estas rocas constituyen la roca huésped dominante en la parte oriental del depósito, distribuyéndose inmediatamente al este de la Falla Portezuelo (Geología Zaldívar, 2023).

El ZPY muestra una textura porfídica de grano medio, con fenocristales de plagioclasa (30–40 %), feldespato potásico (20–25 %) y cuarzo (35 %) de hábito anhedral, embayado y parcialmente reabsorbido. Presenta texturas fragmentarias, tufáceas, anilladas y soldadas, que indican un origen extrusivo o ignimbrítico. En secciones frescas, el cuarzo forma cristales embayados (“ojos de cuarzo”) de hasta 5 mm, rodeados por una masa microgranular de cuarzo y feldespato potásico parcialmente sericitizada. Los feldespatos plagioclasa y sanidina muestran reemplazo parcial por K-feldespato, y se reconocen minerales accesorios como circón y rutilo.

Radiométricamente, esta unidad ha sido datada en 290 ± 4 Ma y 288 ± 18 Ma (Carbonífero Superior), confirmando su pertenencia a la Formación La Tabla (Richards et al., 1999, en Geología Zaldívar, 2023).

2.2.3 Pórfido Riolítico (PRG)

El pórfido riolítico (PRG) corresponde a una fase intrusiva de grano grueso y textura porfídica bien desarrollada, presente en la parte centro-oriental del depósito, a lo largo del cordón principal de la Falla Portezuelo, cerca del contacto entre el granito grueso de biotita (GGB) y las riolitas de la Formación La Tabla. El PRG se caracteriza por fenocristales de cuarzo subcentimétricos (2–5 mm), redondeados a subredondeados, acompañados por plagioclasa subhedral y feldespato potásico menor, en una masa fundamental silíceo de grano medio.

Los contactos son agudos y netamente intrusivos, y la roca se encuentra intensamente vetillada por vetillas tipo A de cuarzo–feldespato K–calcopirita, además de vetillas delgadas de cuarzo y clorita. Estas relaciones indican un emplazamiento sincrónico con la mineralización principal, previo a la intrusión de diques aplíticos tardíos (Geología Zaldívar, 2023).

2.2.4 Granito Grueso De Biotita (GGB)

El granito grueso de biotita (GGB) corresponde a un cuerpo holocristalino de textura fanerítica media a gruesa, compuesto principalmente por plagioclasa (40 %), feldespato potásico (30 %), cuarzo (20 %) y biotita (10 %). Intruye tanto a las andesitas como a las riolitas de la Formación La Tabla, extendiéndose desde las inmediaciones de la Falla Portezuelo hacia el este, bajo la cota 2 650 m s. n. m.

Se observan facies granodioríticas, monzograníticas y sienograníticas, con texturas equigranulares e inequigranulares. La roca presenta alteración potásica moderada a fuerte, caracterizada por el reemplazo de plagioclasas por feldespato K, desarrollo de vetillas de cuarzo–feldespato potásico y reemplazo de biotita primaria por biotita secundaria fina. Dataciones U–Pb en circones entregan edades de $291 \pm 2,3$ Ma y $289,9 \pm 3,5$ Ma (Carbonífero–Pérmico), confirmando su afinidad con los granitoides paleozoicos de la región (Geología Zaldívar, 2023).

2.2.5 Pórfido Llamo Intermineral Temprano (LPF)

El pórfido Llamo intermineral temprano (LPF) corresponde a un conjunto de pórfidos dioríticos–granodioríticos de biotita y dioritas cuarcíferas de biotita y anfíbol, dispuestos como un enjambre de diques de orientación NE, que se extiende por aproximadamente 2 km hacia Escondida Norte. Estos cuerpos forman parte de la familia de intrusiones interminerales tempranas, definidas por la ausencia de truncamiento de vetillas preexistentes y por su coexistencia con brechas hidrotermales potásicas.

Petrográficamente, son rocas porfídicas de grano medio a grueso (hasta 6 mm), compuestas por plagioclasa (60–70 %), feldespato K (20–30 %), cuarzo y biotita (≤ 10 %). La masa fundamental es microcristalina, con alteración fílica pervasiva y cloritización leve en máficos. Se observan vetillas de cuarzo–feldespato K y cuarzo–clorita–sericita, con texturas holocristalinas e inequigranulares (Geología Zaldívar, 2023).

2.2.6 Pórfido Llamo Intermineral Tardío (LPP)

El pórfido Llamo intermineral tardío (LPP) está constituido por rocas de grano medio e inequigranular, de composición dacítica, caracterizadas por la presencia de anfíbol y biotita idiomórficos, además de plagioclasa (20–35 %) y cuarzo (2 %). La masa fundamental es microgranular, con agregados de cuarzo y feldespato K. Estas rocas muestran texturas amigdalógenas con cavidades miarolíticas rellenas de clorita, epidota, anhidrita y sulfuros, indicando atrapamiento de fluidos durante la cristalización. La alteración dominante es propilítica, con reemplazo de biotita por clorita y plagioclasa por epidota y carbonatos (Geología Zaldívar, 2023).

2.2.7 Brechas Hidrotermales

En Zaldívar se reconocen dos tipos principales de brechas hidrotermales, íntimamente asociadas a las fases de pórfido con las que se relacionan espacial y genéticamente. Se describen más de once centros discretos de brechamiento, clasificados como brechas hidrotermales tempranas (pegmatíticas, albiticas, biotíticas) y tardías (cloríticas) (Geología Zaldívar, 2023).

Las brechas pegmatíticas (BXP) presentan un cemento de feldespato K, cuarzo, biotita y anhidrita, con mineralización de calcopirita, bornita y molibdenita, y se asocian al pórfido intermineral

temprano. Las brechas albiticas (BXA) exhiben una matriz de cuarzo–albita–biotita–clorita, mientras que las brechas biotíticas (BXB) contienen una matriz de cuarzo–biotita fina–clorita y escasos líticos andesíticos.

Las brechas cloríticas (BXC) corresponden a eventos tardíos, con cementos de pirita–calcopirita–clorita–epidota–sericita, y presentan clastos de andesita y pórfido Llamo tardío, con proporciones dominadas por fragmentos milimétricos a centimétricos. Estas brechas se relacionan genéticamente al pórfido intermineral tardío.

2.2.8 Gravas Continentales (SCG)

Las gravas (SCG) afloran en la ladera oeste del cerro Zaldívar, a partir de la cota 3 240 m s. n. m., con espesores promedio de 60 m y máximos superiores a 100 m. Están compuestas por fragmentos angulosos a subredondeados de litologías riolíticas y andesíticas, inmersos en una matriz arenosa fina, de coloración parda. En su base, se han identificado cuerpos lenticulares de mineralización exótica con cementos de óxidos y sulfuros de cobre.

La edad de estas gravas, determinada mediante datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita, corresponde a $6,8 \pm 0,6$ Ma (Mioceno superior), asignándolas a la Formación Pampa de Mulas (Geología Zaldívar, 2023)

2.3 ALTERACIÓN HIDROTHERMAL Y ZONAS MINERALIZADAS

El depósito Zaldívar presenta un sistema de alteraciones y mineralizaciones complejo, producto de la superposición de procesos hipógenos y supérgenos a lo largo de su evolución. Estas alteraciones se distribuyen espacialmente en torno a los distintos cuerpos intrusivos que conforman el sistema de pórfido, y controlan en gran medida la zonación vertical y lateral de las mineralizaciones. En términos generales, el sistema está dominado por una alteración potásica temprana, sobre la cual se superponen alteraciones cuarzo–sericita (QSE), potásica (POT) y argílica (ARG), además de una alteración supérgena asociada a la lixiviación de la columna superior de rocas (Geología Zaldívar, 2023).

En el yacimiento se han definido seis alteraciones principales (Figura 4). El bloque occidental, conformado principalmente por andesitas (AND), se caracteriza por la presencia de alteraciones clorítica (CLO), con cloritización de minerales máficos, biotítica (BIO) con desarrollo de biotita fina secundaria, y cuarzo-sericita (QSE) donde la sericita reemplaza a los feldespatos. En cambio, en el bloque oriental, dominado por las unidades riolíticas y el pórfido riolítico, predomina la alteración QSE, de grado moderado a intenso.

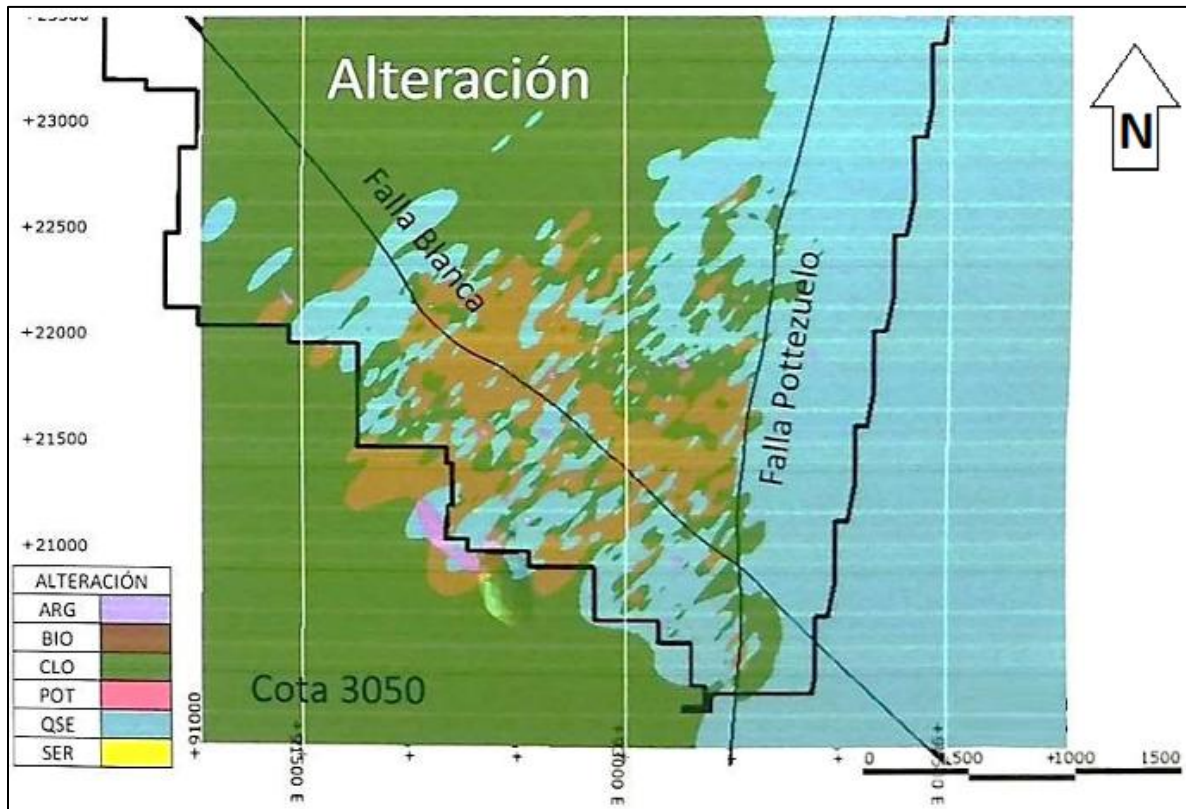


Figura 4: Plano de alteraciones del yacimiento Zaldivar. (Extraído de Geología Zaldivar, 2023)

2.3.1 Alteración Potásica

La alteración potásica constituye la etapa inicial del evento hidrotermal y está compuesta por feldespato potásico secundario, cuarzo y biotita secundaria pervasiva. Se desarrolla principalmente bajo la cota 3 050 m s.n.m., volviéndose masiva a partir de los 2 820 m s.n.m. hacia niveles más profundos. Afecta de manera preferente al Pórfido Llamo intermineral temprano (LPF) y a las rocas paleozoicas del bloque oriental, caracterizándose por reemplazo de plagioclasa por feldespato K,

desarrollo de vetillas de cuarzo–feldespato potásico y reemplazo de biotita primaria por biotita fina secundaria.

La mineralización asociada está compuesta por magnetita, bornita, calcopirita y calcosina primaria, generando zonas con altas leyes de cobre dentro del núcleo del sistema. La edad K/Ar de esta alteración se ha estimado en $36,1 \pm 1,3$ Ma, coherente con la fase principal del magmatismo eoceno (Geología Zaldívar, 2023).

2.3.2 Alteración Cuarzo–Sericita Y Propilítica

Sobre la alteración potásica se desarrolla una amplia alteración cuarzo–sericita (QSE), la cual conforma halos de reemplazo total en torno a las zonas de vetillas de cuarzo y sulfuros. Esta alteración es penetrativa y destructiva, obliterando la textura original de las rocas. Mineralógicamente, está compuesta por cuarzo, sericita, illita, muscovita, arcillas y pirita, con contenidos de pirita que pueden superar el 5 % en volumen. Se distribuye principalmente en la parte central del depósito, en asociación con las intrusiones del pórfido Llamo.

La alteración propilítica, en cambio, se localiza hacia los márgenes occidentales y sur del sistema, afectando a las andesitas de la Formación Augusta Victoria y al Pórfido Llamo tardío (LPP). Se caracteriza por el reemplazo de biotita por clorita, de plagioclasas por epidota y calcita, y por la presencia de vetillas de clorita–epidota–sericita, típicas de zonas de menor temperatura hidrotermal. Esta asociación define la periferia del sistema mineralizado (Geología Zaldívar, 2023).

2.3.3 Alteraciones Argílica Avanzada Y Supérgena

La alteración argílica avanzada es restringida y se asocia a las vetas tardías de cuarzo que sellan estructuras mayores de orientación NW–SE. Los minerales más representativos son cuarzo, illita, vermiculita, dickita y diásporo, lo que indica una etapa hidrotermal de baja temperatura.

Finalmente, la alteración argílica supérgena se desarrolla ampliamente sobre toda la columna de rocas, con grados variables de intensidad, siendo más pronunciada en las andesitas. Está compuesta por caolinita, esmectita, montmorillonita, halloysita y alunita, y refleja el proceso de lixiviación y oxidación superficial posterior al evento mineralizante principal (Geología Zaldívar, 2023).

2.3.4 Zonas Mineralizadas

La mineralización del yacimiento Zaldívar es el resultado de la superposición de procesos hipógenos (primarios) y supérgenos (secundarios), que configuran una secuencia vertical característica, con una zona lixiviada superior, una zona de óxidos, seguida por sulfuros secundarios y finalmente la zona de sulfuros primarios. (Geología Zaldívar, 2023).

De acuerdo con la información geológica y de modelamiento, se reconocen las siguientes zonas minerales (Figura 5):

- Zona lixiviada (LXX): corresponde al horizonte superior, con profundidades de hasta 300 m, dominada por hidróxidos y sulfatos de hierro (hematita, goethita, jarosita).
- Zona de óxidos de cobre (CUO): se distribuye hacia el suroeste, con espesores medios de 90 m, compuesta por crisocola, brochantita, pseudomalaquita, libethenita y cobre nativo.
- Zona de sulfuros secundarios (SSE): cuerpo con elongación NE–SW, espesores de hasta 350 m, dominado por calcosina y covelina como reemplazo de pirita y calcopirita, representando la principal zona de enriquecimiento secundario.
- Zona mixta (MSP): transición entre los sulfuros secundarios y los primarios, con potencias de hasta 50 m, donde coexisten covelina, calcosina, bornita y calcopirita.
- Zona de sulfuros primarios (PRI): núcleo hipógeno, compuesto por pirita, calcopirita, bornita y molibdenita, con mineralización diseminada y en vetillas, acompañada por anhidrita y feldespatos potásico.

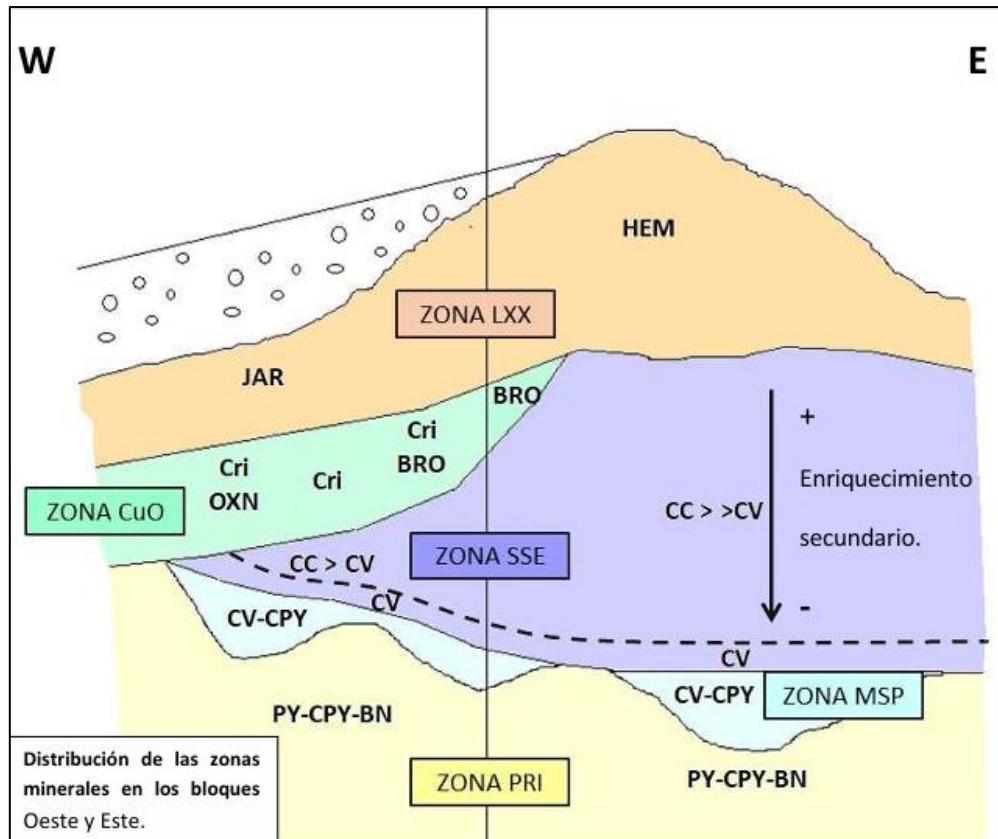


Figura 5: Perfil esquemático de zonas minerales del yacimiento Zaldívar. Se observa la distribución vertical de las principales zonas mineralizadas en los bloques oeste y este del depósito, mostrando la secuencia de enriquecimiento secundario. LXX: zona lixiviada; CUO: zona de óxidos; SSE: zona de sulfuros secundarios; MSP: zona de mineralización secundaria-primaria; PRI: zona de sulfuros primarios. Minerales presentes: HEM: hematita; JAR: jarosita; CRI: crisocola; OXN: cobres negros; BRO: brocantita; CC: calcosina; CV: covelina; PY: pirita; CPY: calcopirita; BN: bornita. (Geología Zaldívar, 2023).

La disposición de estas zonas sigue una geometría tipo cuña inclinada hacia el noreste (Figura 6), coincidiendo con el “trend” de intrusión del Pórfido Llamo, y se encuentra fuertemente controlada por la Falla Portezuelo, que actúa como estructura canalizadora de fluidos mineralizantes. La zonación vertical refleja el gradiente térmico e hidrotermal del sistema, con una clara transición desde mineralizaciones oxidadas superficiales hacia mineralizaciones sulfídicas en profundidad.

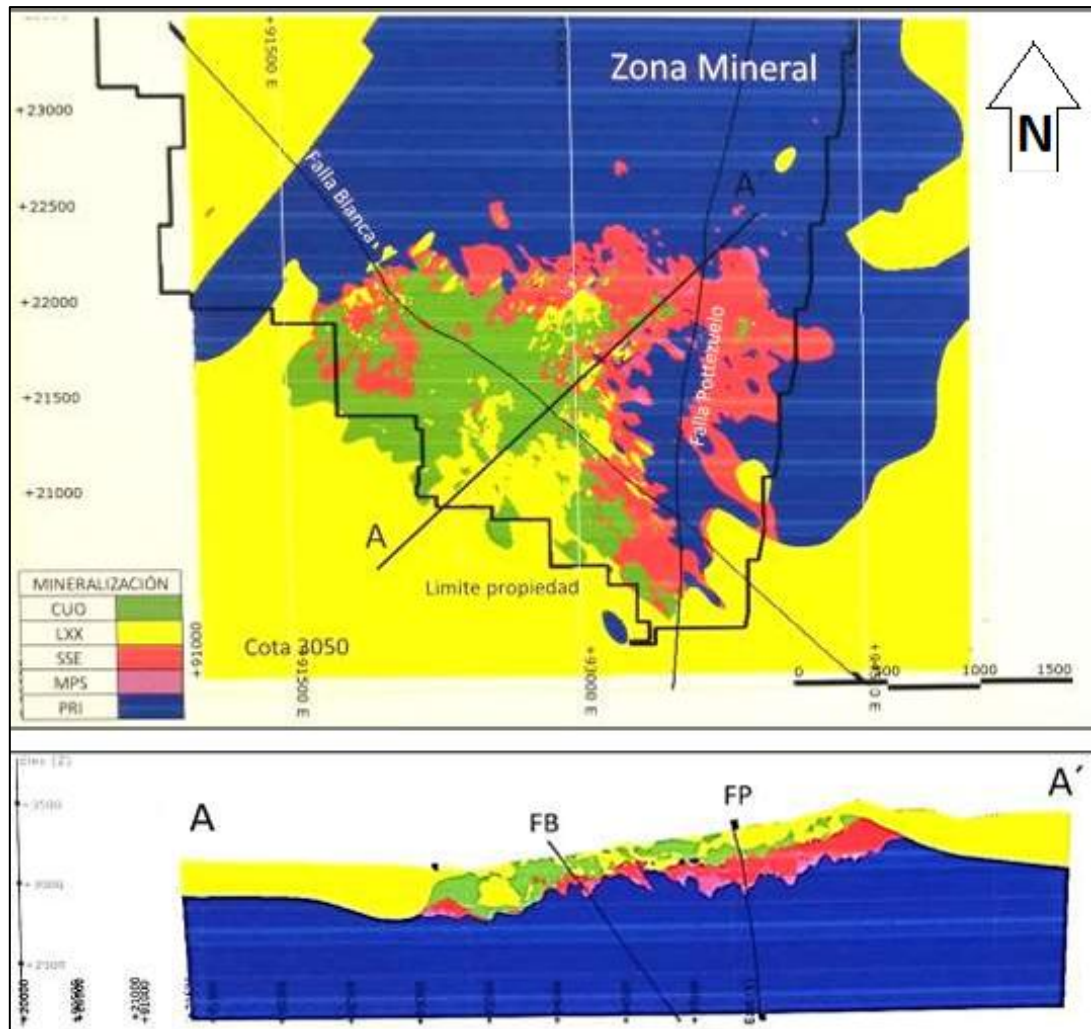


Figura 6: Plano de zonas minerales del yacimiento Zaldivar. Se observa la distribución en planta y un perfil.

3. MARCO GEOTECNICO

3.1 CONTEXTO ESTRUCTURAL DEL YACIMIENTO

El yacimiento Zaldívar se emplaza en la Cordillera de Domeyko, dentro de un dominio estructural fuertemente controlado por sistemas de fallas de orientación predominante NE–SW y N–S, que conforman el sistema Portezuelo–Panadero, parte del Sistema de Fallas Domeyko. Estas estructuras han tenido un papel determinante en el emplazamiento de los cuerpos intrusivos mineralizados, en la evolución del sistema hidrotermal y en la configuración actual del macizo rocoso explotado en el rajo (SRK Consulting, 2023; Geología Zaldívar, 2023). En el área del rajo se reconocen fallas principales (Figura 7) que delimitan bloques estructurales con comportamientos geomecánicos contrastantes.

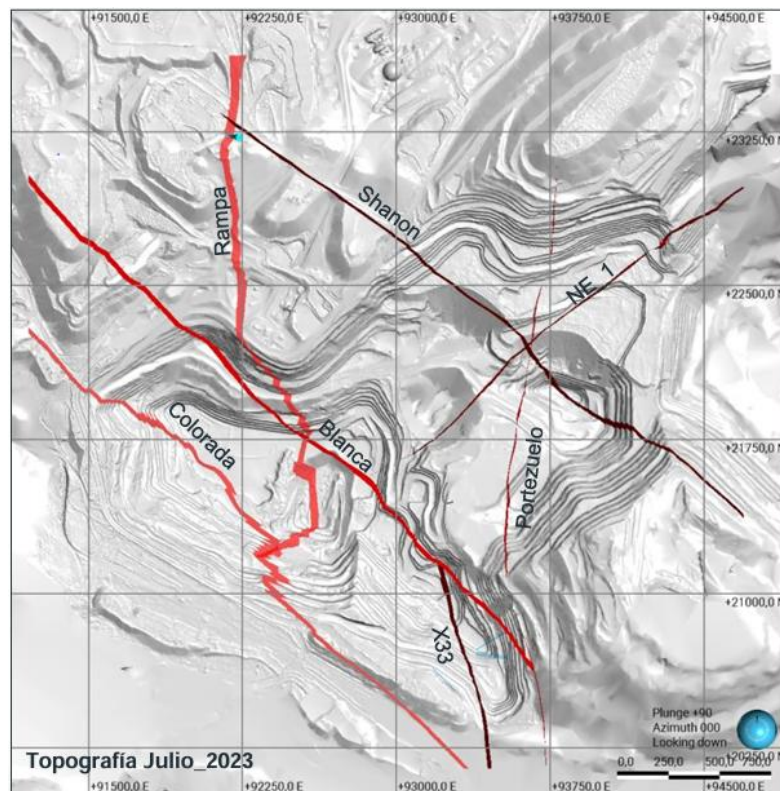


Figura 7: Vista en planta de trazas de fallas principales, límites de dominios estructurales, rajo Zaldívar.

A continuación, se detallan las fallas principales del rajo, expuestas en la figura 7:

- Falla Portezuelo, de rumbo NE–SW, constituye la estructura de mayor jerarquía y marca el contacto entre el bloque oriental riolítico y el bloque occidental andesítico. Es una falla de carácter inverso y transpresivo, responsable de la compartimentación principal del yacimiento y de la canalización de fluidos hidrotermales durante la mineralización.
- Falla Blanca, con rumbo N–S, actúa como límite estructural intermedio entre los dominios centrales del rajo. Presenta fuerte fracturamiento y desplazamientos verticales acumulados de decenas de metros, y define el límite occidental de la zona de sulfuros primarios.
- Falla Rampa y Falla Colorado, ambas con orientación N–S a NNW–SSE, controlan la continuidad del macizo rocoso hacia el oeste y el desarrollo de estructuras subsidiarias asociadas al sistema Portezuelo.
- Falla Shannon y Falla NE–1, de orientación NE–SW, delimitan los extremos norte y noreste del rajo, actuando como estructuras de transferencia entre dominios.

Estas fallas, junto con una red de fracturas menores asociadas, dividen el yacimiento en dominios estructurales definidos en el modelo geotécnico CMZ 2023 (Figura 8). Dichos dominios, denominados A1, A2, A3, B, C, D, E, F y G, fueron delimitados en base a la densidad y orientación de discontinuidades, la naturaleza de las estructuras mayores, el grado de alteración y la distribución de las UGTB (SRK Consulting, 2023).

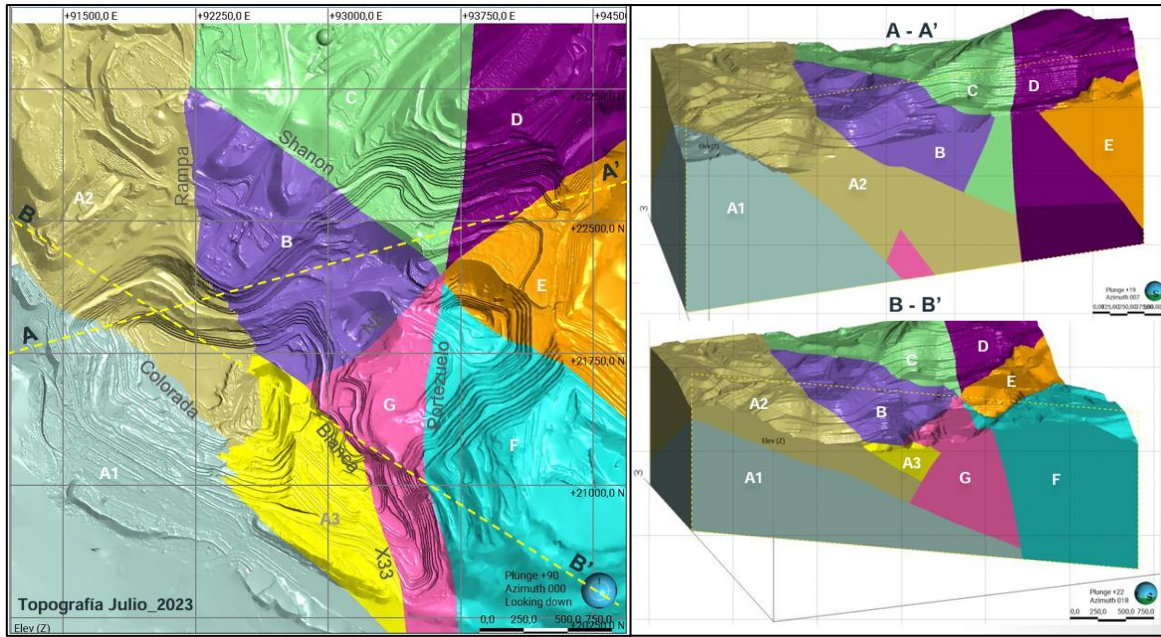


Figura 8: Vistas en planta e isometría de los dominios estructurales del rajo Zaldívar. La disposición de los dominios se ilustra en planta y en las secciones A–A' y B–B', según el modelo estructural CMZ 2023 (SRK Consulting, 2023).

Los dominios A1, A2 y A3, ubicados al oeste de la Falla Blanca, corresponden a sectores con menor densidad de fracturas y mayor continuidad del macizo, dominados por litologías andesíticas con alteración clorítica y biotítica. En contraste, los dominios B, C y D, ubicados entre las fallas Blanca y Portezuelo, presentan fracturamiento intenso, estructuras subverticales y desarrollo de zonas de cizalla menores, asociadas a la sobreimposición de alteración cuarzo–sericita. Estos sectores corresponden a las áreas más mineralizadas y con mayor variabilidad geotécnica del rajo.

Hacia el este, los dominios E, F y G se desarrollan dentro del bloque riolítico, caracterizados por rocas más frágiles, con alta densidad de fracturas y zonas de brechamiento. Estos dominios presentan macizos de calidad baja a media y concentran la mayor parte de la mineralización de sulfuros primarios.

3.2 UNIDADES GEOTÉCNICAS BÁSICAS

El modelo geotécnico vigente del rajo Zaldívar, desarrollado por SRK Consulting (2023), establece la definición de diecisiete Unidades Geotécnicas Básicas, UGTB 01A–10B, (Tabla 1) las cuales constituyen la base de la caracterización geomecánica actual del macizo rocoso. Estas unidades se definen a partir de la integración de información geológica, estructural, mineralógica y geotécnica obtenida de campañas de sondajes, registros geológicos y ensayos de laboratorio ejecutados entre 1998 y 2023.

Tabla 1: Propiedades geomecánicas promedio de las Unidades Geotécnicas Básicas del rajo Zaldívar. Se presentan los valores medios de densidad (γ) y resistencia a compresión uniaxial existentes previo a la realización de este trabajo, diferenciados por unidad y subunidad (A/B). Los datos provienen del modelo geotécnico CMZ 2023, elaborado por SRK Consulting (2023).

Unidad Geotécnica				Prop. Índice	Ensayos			
LIT	ALT	MIN	UG	γ	UCS	UCS ₃₀	UCS ₅₀	
				(gr/cm ³)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	
				Promedio	2.52	59.77	47.59	61.76
AND/BX	Q>S /POT/ SIL	SEC	UG01	1A	2.47	53.23	46.27	55.38
		PRIM		1B	2.65	70.08	50.64	72.87
				1C	2.43	49.00	39.06	50.74
LPY	Q>S /POT/ SIL	SEC		1D	2.49	66.75	54.41	68.05
		PRIM						
				Promedio	2.63	48.81	34.02	50.73
AND/LP/BX	CLO	SEC	UG02	2A	2.60	37.89	28.66	39.37
		PRIM		2B	2.66	59.74	39.37	62.10
				Promedio	2.48	44.74	36.36	46.25
AND/LP/BX	ARG/Q<S/SER	SEC	UG03	3A	2.44	43.32	36.21	45.04
		PRIM		3B	2.52	46.16	36.50	47.45
	BIO	LI/MIX/SEC/OXI	UG04	-	2.59	35.06	26.34	36.45
		PRIM	UG05	-	2.72	76.22	58.04	79.03
PRG/ZPY	Q<S/SER/CLO/ARG	SEC (LIX)	UG06	-	2.46	58.05	37.02	60.30
				Promedio	2.60	50.12	44.87	50.17
ZPY	Q<S/SER/CLO/ARG	SEC (SSE/OXI/MIX)	UG07	7A	2.58	58.05*	37.02*	60.3*
	Q<S/SIL/POT	PRIM		7B	2.62	50.1	44.87	50.17
				Promedio	2.56	100.73	81.26	102.32
ZPY	Q>S/SIL/POT/BIO	SEC	UG08	8A	2.52	78.1	63.20	81.21
		PRIM		8B	2.60	123.4	99.33	123.43
GGB	Q>S/CLO/POT/BIO	PRIM	UG09	-	2.52	104.9	92.32	106.20
SCG			UG10	-				

Cada UGTB representa un conjunto homogéneo de comportamiento mecánico dentro del macizo rocoso, delimitado según litología, tipo de alteración, mineralización y grado de fracturamiento, permitiendo agrupar zonas con propiedades geomecánicas comparables y facilitar su incorporación en los modelos numéricos de estabilidad y diseño de taludes (SRK Consulting, 2023). Esta

metodología de zonificación busca reducir la incertidumbre asociada a la alta heterogeneidad del depósito, particularmente en sectores donde las condiciones estructurales y de alteración generan variabilidad significativa en los parámetros de resistencia y deformabilidad. La figura siguiente (Figura 9) presenta la distribución tridimensional del modelo de UGTB y las secciones A–A' y B–B', en las que se observa la compartimentación del macizo rocoso y la correspondencia de las unidades con los dominios estructurales descritos en el apartado anterior.

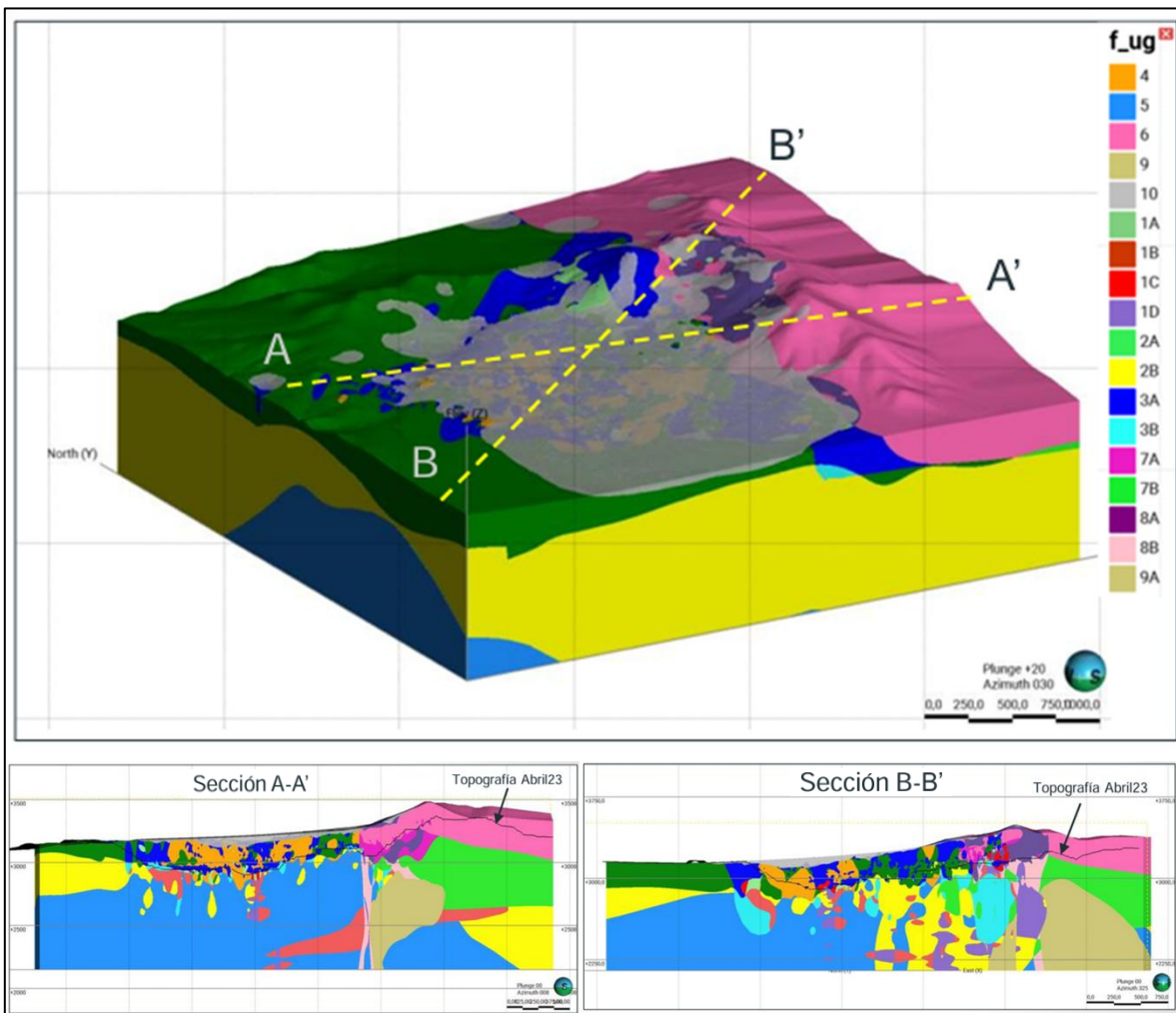


Figura 9: Modelo tridimensional y secciones A–A' y B–B' del modelo geotécnico CMZ 2023. Se observa la distribución espacial de las 17 UGTB y su correspondencia con los principales dominios estructurales del rajo Zaldívar (extraído de SRK Consulting, 2023).

En general, las UGTB asociadas a las litologías andesíticas presentan una mayor densidad de fracturas y menor competencia mecánica, mientras que las unidades vinculadas a pórfidos riolíticos y granitoides exhiben mayores valores de resistencia a compresión uniaxial (UCS) y mejor continuidad estructural.

El análisis de propiedades geomecánicas realizado por SRK (2023) muestra que las unidades con alteraciones Q<S o CLO registran los valores más bajos de resistencia y GSI, mientras que las unidades POT y BIO concentran los valores más altos de UCS (superiores a 90 MPa) y mejor calidad estructural. La densidad promedio de las UGTB varía entre 2,45 y 2,70 g/cm³, con un rango de UCS teórica entre 35 y 120 MPa, dependiendo del grado de alteración y la litología predominante.

4.MARCO TEORICO

4.1 FUNDAMENTOS DE LA RESISTENCIA DE LAS ROCAS

La resistencia de una roca corresponde a la capacidad del material para soportar esfuerzos sin sufrir ruptura. Este parámetro depende tanto de la naturaleza mineralógica y textural de la roca como de las condiciones de esfuerzo que actúan sobre ella. De manera general, la resistencia se define como la máxima tensión que un cuerpo puede soportar antes de fallar y se expresa en función de los esfuerzos principales: compresivo, tensil y cortante (Hudson & Harrison, 1997).

En un estado de esfuerzos tridimensional, las rocas están sometidas a tres esfuerzos principales ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$). La diferencia entre ellos determina la intensidad de la deformación y el modo de falla. En la mayoría de los casos, la falla ocurre cuando el esfuerzo cortante máximo excede la resistencia al corte del material, la cual depende de la cohesión (c) y del ángulo de fricción interna (ϕ), de acuerdo con el criterio de Mohr–Coulomb, expresado como:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$$

donde τ es el esfuerzo cortante en el plano de falla y σ_n es el esfuerzo normal. Este modelo explica la relación directa entre el confinamiento y la resistencia: a mayor presión confinante, mayor esfuerzo necesario para inducir la ruptura (Hoek & Brown, 1997).

La composición, el estado de humedad y la porosidad influyen significativamente en la resistencia. La presencia de agua reduce la tensión efectiva, debilita los enlaces intergranulares y facilita los procesos de fractura, lo que resulta en una disminución considerable de la resistencia a la compresión simple (UCS) (Bieniawski, 1975). Del mismo modo, la anisotropía estructural — causada por planos de foliación, esquistosidad o estratificación— introduce direccionalidad en el comportamiento mecánico, haciendo que la resistencia dependa de la orientación del esfuerzo aplicado.

Desde el punto de vista aplicado, la resistencia de la roca intacta es solo una parte del comportamiento global del macizo. En un contexto minero, la resistencia real está controlada principalmente por la densidad, orientación y relleno de las discontinuidades, que reducen

drásticamente la capacidad portante respecto a la roca intacta. Por esta razón, las propiedades mecánicas determinadas a escala de laboratorio deben interpretarse con precaución y ajustarse a condiciones de campo mediante factores empíricos o sistemas de clasificación (RMR, GSI).

En el caso de Minera Zaldívar, la marcada variabilidad litológica y de alteración genera diferencias notorias en la resistencia entre unidades geotécnicas. Los sectores con alteración cuarzo-sericita (QSE) o clorítica (CLO) tienden a mostrar resistencias significativamente menores que las unidades potásicas (POT) o biotitizadas (BIO), en las cuales los minerales secundarios incrementan la cohesión y la competencia del macizo. Esta heterogeneidad justifica la aplicación de ensayos de carga puntual (PLT) para obtener valores representativos de resistencia local y contrastarlos con los rangos teóricos del modelo CMZ (SRK Consulting, 2023).

6.2 ENSAYOS MECÁNICOS APLICADOS A MACIZOS ROCOSOS

El comportamiento mecánico de las rocas se evalúa a través de ensayos de laboratorio y de campo que permiten estimar sus propiedades resistentes, deformacionales y de durabilidad. Entre los parámetros más relevantes se encuentran la resistencia a compresión uniaxial (UCS), la resistencia a tracción indirecta y los índices derivados de métodos indirectos como la carga puntual (PLT). Estos ensayos constituyen la base para la caracterización geotécnica del macizo rocoso y la definición de sus unidades geotécnicas (Hudson & Harrison, 1997; Singh & Goel, 1999).

6.2.1 Ensayo De Compresión Uniaxial

El ensayo de compresión uniaxial (UCS) es el método estándar para determinar la resistencia de la roca intacta bajo condiciones sin confinamiento. Consiste en aplicar una carga axial creciente sobre un cilindro rocoso de dimensiones normalizadas hasta alcanzar la ruptura, registrando los valores de esfuerzo y deformación. De acuerdo con la norma ASTM D7012-14, la resistencia uniaxial se calcula mediante la expresión:

$$\sigma_c = \frac{P_{max}}{A}$$

donde P_{max} es la carga máxima soportada por la muestra (en newtons) y A es el área transversal inicial del espécimen (en mm²).

Este ensayo permite determinar parámetros complementarios como el módulo de Young (E) y la relación de Poisson (ν), fundamentales para modelar el comportamiento elástico de la roca. No obstante, su aplicación presenta limitaciones importantes en el contexto minero: requiere testigos cilíndricos de diámetro ≥ 54 mm y longitud/diámetro ≥ 2.5 , superficies perfectamente paralelas, y un control cuidadoso de la humedad y la velocidad de carga. Estas condiciones son difíciles de reproducir cuando los testigos presentan fracturas naturales, alteración intensa o geometrías irregulares, como ocurre frecuentemente en sondajes de faenas a cielo abierto (ASTM, 2014; ISRM, 1985).

Además, la ejecución del ensayo UCS es costosa y demandante en tiempo, lo que limita la cantidad de muestras analizadas. Por ello, en campañas de caracterización geotécnica se recurre habitualmente a ensayos indirectos o no destructivos, que permiten obtener correlaciones empíricas con la resistencia uniaxial, como es el caso del ensayo de carga puntual (PLT).

4.2.2 Ensayo De Carga Puntual

El ensayo de carga puntual (Point Load Test, PLT) es un método empírico estandarizado por la International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1985) para estimar la resistencia de la roca intacta a partir de la carga requerida para fracturar una muestra mediante la aplicación de presión concentrada entre dos puntas cónicas de acero. Este ensayo se utiliza ampliamente como alternativa indirecta al ensayo de compresión uniaxial, debido a su simplicidad, bajo costo y aplicabilidad en terreno, especialmente cuando las condiciones impiden obtener testigos cilíndricos regulares (Broch & Franklin, 1972).

El principio fundamental del PLT consiste en someter una muestra de roca a un esfuerzo puntual creciente hasta que ocurre la rotura, registrando la carga máxima aplicada (P) y el diámetro equivalente (D) entre los puntos de contacto. El resultado se expresa en términos del índice de resistencia puntual (I_s), definido por la relación:

$$I_s = \frac{P}{D^2}$$

donde I_s se expresa en MPa, P es la carga de rotura (kN) y D el diámetro equivalente de la muestra (en mm). Dado que el valor de I_s depende del tamaño de la muestra, los resultados se normalizan a un diámetro estándar de 50 mm, obteniéndose el índice normalizado $I_s(50)$ mediante la ecuación empírica propuesta por Broch y Franklin (1972):

$$I_s(50) = F \cdot I_s = I_s \left(\frac{D}{50}\right)^{0.45}$$

donde F es el factor de corrección por tamaño. Este procedimiento de normalización permite comparar resultados entre muestras de diferentes dimensiones y condiciones, garantizando consistencia estadística en la interpretación (ISRM, 1985).

Según la configuración de carga, la ISRM (1985) reconoce tres modos principales de ensayo:

- Diametral, aplicado sobre testigos cilíndricos, con la carga orientada perpendicular al eje longitudinal.
- Axial, donde la carga se aplica a lo largo del eje del testigo.
- Irregular o de fragmento, aplicable a trozos de roca o muestras sin forma regular, permitiendo su ejecución directa en terreno o laboratorio sin preparación previa.

El modo diametral es el más común, ya que reproduce condiciones similares al esfuerzo compresivo sin confinamiento. No obstante, en contextos operacionales donde las muestras provienen de tronaduras o testigos fragmentados, se prefiere el modo irregular, que mantiene una buena correlación con la resistencia uniaxial cuando se cumplen los criterios geométricos mínimos establecidos por ISRM (1985).

Los resultados del ensayo PLT son interpretados en términos del índice I_{s50} , el cual puede correlacionarse empíricamente con la resistencia a compresión simple (UCS) mediante factores de conversión (k) dependientes del tipo de roca. Valores típicos de correlación varían entre $UCS = 20 \cdot I_{s50}$ y $UCS = 25 \cdot I_{s50}$ para rocas ígneas y volcánicas compactas, y entre $UCS = 15 \cdot I_{s50}$ y $UCS = 18 \cdot I_{s50}$ para rocas metamórficas o sedimentarias (Bieniawski, 1975; Ulusay, 2001). Estos rangos permiten estimar la resistencia uniaxial de manera aproximada cuando no es posible ejecutar ensayos UCS, lo que resulta de especial utilidad en campañas geotécnicas mineras.

Entre las principales ventajas del ensayo PLT se destacan su portabilidad, la posibilidad de ensayar muestras irregulares o alteradas, la rapidez de ejecución y la baja demanda logística, lo que permite obtener un número elevado de mediciones en poco tiempo.

No obstante, el método presenta limitaciones que deben considerarse para asegurar la representatividad de los resultados. Entre ellas destacan la influencia de la humedad, la anisotropía de la roca y la irregularidad en la superficie de contacto, las cuales pueden provocar dispersión en los valores de I_{50} . Por ello, la ISRM (1985) recomienda realizar al menos 10 ensayos válidos por unidad litológica o geotécnica, descartando resultados en los que la fractura no ocurra dentro del eje de carga o las dimensiones de la muestra no cumplan los criterios geométricos mínimos.

5. METODOLOGIAS

5.1 ETAPA PRETERRENO

La etapa preterreno correspondió al proceso de planificación y diseño de instrumentos de registro, cuyo propósito fue asegurar la trazabilidad, uniformidad y calidad de los datos generados durante los ensayos PLT. Para ello se desarrolló un sistema de control digital compuesto por tres formularios complementarios: la planilla de registro de muestras, la Planilla de Ensayo de Carga Puntual y la Planilla de estadísticas por UGTB. La primera planilla se destinó al inventario de muestras recolectadas en terreno, integrando campos de identificación, litología, tipo de alteración, unidad geotécnica, condición física y observaciones geológicas, con el objetivo de mantener un control trazable desde el muestreo hasta el laboratorio. La segunda planilla, utilizada durante la ejecución de los ensayos, permitió el ingreso directo de los datos geométricos y de carga, e incluyó fórmulas automatizadas para el cálculo del índice de resistencia puntual (I_s) y su normalización al diámetro estándar de 50 mm (I_{s50}), conforme a la metodología establecida por la ISRM (1985). Finalmente, la tercera planilla tuvo como función consolidar los resultados por unidad geotécnica, generando parámetros estadísticos

5.1.1 Planilla de Registro de Muestras

La Planilla de Registro de Muestras (Anexo 1) constituye el instrumento base del sistema de control, mediante el cual se documentó toda la información asociada a la recolección, preparación y seguimiento de las muestras destinadas a los ensayos de carga puntual. Su función principal fue garantizar la trazabilidad completa del proceso, desde la extracción del fragmento en terreno hasta la obtención de los resultados en laboratorio. Cada muestra fue identificada mediante un código alfanumérico estandarizado con el formato FX_BXXXX_MXX_PX, donde FX corresponde a la fase, BXXXX al número de banco, MXX a la malla de perforación y PX al pozo específico de procedencia. Este sistema permitió relacionar cada ensayo con su ubicación exacta dentro del modelo geotécnico y con la Unidad geotécnica básica correspondiente.

En esta planilla se registran los siguientes campos: ID de muestra (código FX_BXXXX_MXX_PX), ubicación de la muestra, litología, tipo de alteración, presencia o

ausencia de mineralización visible y unidad geotécnica asignada. También se incluyen las fechas de extracción de la muestra y de ejecución del ensayo, junto con un registro fotográfico cada 120° antes del ensayo, durante la aplicación de carga y posterior a la ruptura. Además, se incorpora una descripción macroscópica de cada muestra, indicando color, textura, litología, mineralización y estructuras. Finalmente, tras la ejecución del ensayo, se agregan los resultados obtenidos.

5.1.2 Planilla de Ensayo de Carga Puntual

La Planilla de Ensayo de Carga Puntual (Anexo 2) fue diseñada para registrar de forma sistemática los datos obtenidos durante la ejecución de cada ensayo, permitiendo calcular de manera automatizada los parámetros requeridos para determinar el Índice de Carga Puntual normalizado (I_{s50}) y, posteriormente, estimar la resistencia a la compresión simple (UCS).

Cada ensayo se asocia a un código de muestra, y a un número correlativo interno, ya que de una misma bolsa de fragmentos pueden obtenerse múltiples submuestras para ensayo. Junto con este identificador, la planilla registra la unidad geotécnica correspondiente, el ancho (W) y el diámetro (D) de la muestra, así como la presión de carga aplicada (L), medida por el equipo en megapascuales (MPa). A partir de estos valores, el formato ejecuta los cálculos necesarios para obtener los índices de resistencia.

El procedimiento de cálculo implementado en la planilla sigue el modelo utilizado por Mella (2025), donde en primer lugar se determina la carga de falla (P) a partir de la lectura de presión (L) y del área efectiva de contacto entre las puntas del equipo (A_e):

$$P (MN) = L (MPa) \times A_e (m^2)$$

donde A_e representa el área efectiva de contacto entre los conos del equipo, con un valor de 0,00096 m² para el dispositivo empleado.

El diámetro equivalente (D_e) de la muestra se calcula considerando su geometría mediante la siguiente expresión:

$$D_e (m) = \sqrt{\frac{4 \times D \times W}{\pi}}$$

siendo D el diámetro y W el ancho medido en metros. Con estos valores se obtiene el índice de carga puntual (I_s):

$$I_s (MPa) = \frac{P}{D_e^2}$$

Dado que las muestras presentan variaciones dimensionales, el resultado se normaliza al diámetro estándar de 50 mm mediante el factor de corrección por tamaño (F):

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45}$$

y se obtiene el valor corregido:

$$I_s(50) = F \times I_s$$

Este índice permite posteriormente estimar la resistencia a compresión simple (UCS) de la roca mediante una relación empírica:

$$UCS = I_s(50) \times K$$

donde K es un factor de conversión dependiente del tipo de roca y de las condiciones de ensayo. Cuando no se dispone de correlaciones locales entre UCS e I_{s50} , la norma ASTM D5731-16 recomienda utilizar un valor teórico de $K = 23$. Sin embargo, cuando se cuenta con ensayos de compresión uniaxial realizados sobre las mismas muestras, es posible determinar un valor K específico mediante análisis estadístico, siguiendo los criterios propuestos por Ulusay et al. (2001) y Rusnak & Mark (2000).

5.1.3 Planilla de Consolidación por UGTB

La Planilla de Consolidación por UGTB (Anexo 3) reúne los resultados obtenidos en todos los ensayos PLT válidos, permitiendo el tratamiento estadístico de los datos y la caracterización

mecánica de cada unidad. En esta planilla se registran los valores de UCS estimada correspondientes a cada muestra válida, y a partir de ellos se calculan automáticamente parámetros estadísticos de control, tales como media aritmética, error típico, mediana, desviación estándar, curtosis, asimetría, rango, valor mínimo, valor máximo y número total de ensayos válidos. Estos indicadores permiten evaluar la dispersión y confiabilidad de los resultados, facilitando el análisis comparativo entre unidades geotécnicas.

5.2 ETAPA DE TERRENO

La recolección de muestras se realizó siguiendo los lineamientos del documento interno “Procedimiento de obtención y preparación de muestras para ensayos de laboratorio” (Enaex S.A., 2024), adaptado a las condiciones operativas de Minera Zaldívar. Antes de cada jornada de trabajo, se efectuó la evaluación de riesgos mediante el Análisis de Riesgo de Tarea Planificada (ARTP), con el propósito de identificar condiciones inseguras y establecer medidas preventivas relacionadas con la manipulación de herramientas, estabilidad del terreno y tránsito de equipos en el área de muestreo. Este proceso permitió ejecutar las labores de recolección bajo los estándares de seguridad exigidos por la compañía, garantizando que el muestreo se realizara en zonas autorizadas y con el uso adecuado de elementos de protección personal.

Por requerimientos de seguridad operacional de faena Zaldívar, la obtención de muestras no se efectuó directamente desde los bancos de producción, sino a partir de fragmentos representativos recolectados en los pretilos de seguridad ubicados en los sectores adyacentes a cada banco. Esta modalidad permitió acceder a material con características comparables al frente de explotación, minimizando la exposición a riesgos operativos. En terreno, cada fragmento seleccionado fue rotulado de inmediato con su código de identificación (FX_BXXXX_MXX_PX), colocado en bolsas de muestreo selladas. Posteriormente, las muestras fueron almacenadas y trasladadas al laboratorio para su preparación previa al ensayo.

5.3 ENSAYOS PLT

Las muestras seleccionadas fueron preparadas conforme a los criterios geométricos definidos en el Procedimiento de Ensayo de Carga Puntual (PLT) elaborado por Enaex S.A. (2024) y basado en

las normativas ISRM (1985) y ASTM D5731-16. Cada fragmento fue inspeccionado visualmente para descartar fisuras o geometrías irregulares que pudieran afectar la validez del ensayo. Los bloques escogidos presentaron proporciones dentro de los rangos definidos por la norma, con relaciones $0,3 < D/W < 1,0$ y $L > 0,5 D$, garantizando un contacto estable entre los conos del equipo y las caras opuestas del espécimen. En la Figura 10 se ilustran las dimensiones y proporciones recomendadas para el ensayo en bloques irregulares, de acuerdo con los criterios del procedimiento y las directrices de la ISRM (1985).

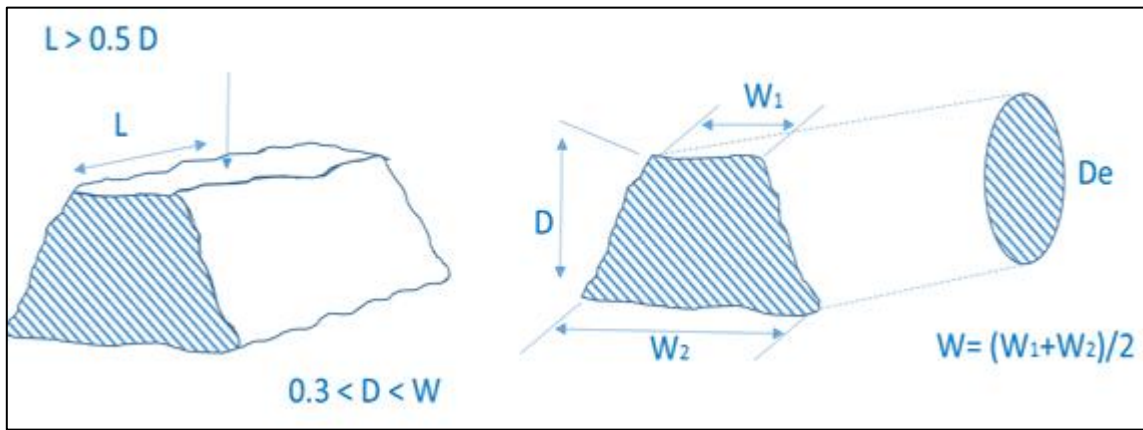


Figura 10: Medidas recomendadas para bloques irregulares.

Los ensayos se realizaron en primera instancia utilizando un equipo de carga puntual INGEROC modelo MCP-01D, de fabricación nacional, con accionamiento hidráulico manual y celda de carga digital de lectura directa en megapascales (MPa). Este equipo posee una capacidad máxima de 70 kN, puntas cónicas de acero templado con diámetro de contacto efectivo de $0,00096 \text{ m}^2$ y un sistema de registro de carga progresiva hasta la fractura del espécimen. Mas tarde se cambio este equipo por el modelo MCP-02D Manual del mismo fabricante, equipo con carga máxima de 100 kN y misma área efectiva que modelo predecesor, contando con una bomba manual externa la cual permite realizar los ensayos empleando menor esfuerzo físico.

Durante la ejecución de cada ensayo, la muestra es colocada entre las puntas cónicas del equipo, asegurando que ambas estuvieran en contacto firme con la superficie de la roca y alineadas dentro del eje de carga. Se aplicó presión de manera gradual y continua mediante el sistema hidráulico

hasta producir la fractura del espécimen, registrándose el valor máximo de presión en el manómetro digital.

La rotura debe ocurrir dentro del eje de carga y atravesar el cuerpo principal de la muestra; bajo esas condiciones, el ensayo se consideró válido. En cambio, se clasificaron como inválidos aquellos ensayos en que la ruptura se produjo fuera del eje de carga, se observó deslizamiento o pérdida de contacto entre las puntas, la fractura se generó por estructuras preexistentes o hubo un desprendimiento parcial. En la Figura 11 se presentan los modos de falla típicos observados para muestras válidas e inválidas, conforme a lo descrito en Flores y Tinoco (2019) y el Procedimiento PLT Enaex (2024).

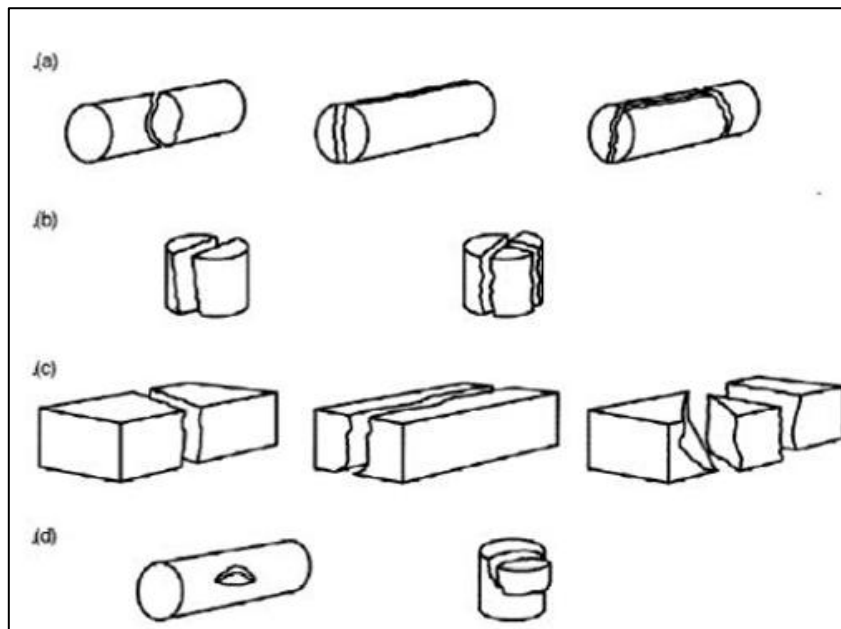


Figura 11: Modos típicos de falla para muestras válidas e inválidas: (a) diametrales válidas, (b) axiales válidas, (c) bloques válidos y (d) muestras inválidas. Modificado de Flores y Tinoco (2019).

Una vez completados los ensayos y verificada la validez de cada registro, los datos obtenidos (presión máxima, carga aplicada, diámetro equivalente, índice I_s e I_{s0}) fueron traspasados a sus respectivas planillas, donde se realizó su procesamiento estadístico y la agrupación por UGTB.

5.4 CONSOLIDACIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS COMPARATIVO

Para llevar a cabo la integración de los datos de UCS obtenidos mediante ensayos PLT con los rangos del modelo geotécnico CMZ, así como la comparación entre fases operacionales y el análisis de la variación por bancos, se utilizaron los resultados consolidados de las planillas de ensayo. Cada conjunto de datos se agrupó en hojas de conciliación por UGTB, empleando planillas diferenciadas para cada fase y, en el caso de la Fase 8, para cada banco. A partir de esta organización de la información, se desarrollaron los análisis específicos que se detallan en los apartados siguientes, permitiendo así una evaluación comparativa clara y fundamentada.

5.4.1 Integración De Datos UCS (PLT) Con El Modelo CMZ

Para realizar la comparación, se utilizará la UCS media obtenida de los ensayos PLT y se confrontará con la UCS media previamente establecida en el modelo geotécnico CMZ. Adicionalmente, se generará una nueva tabla de propiedades para el conjunto general de la faena, en la cual se expondrán los valores de UCS mínima, media y máxima por cada UGTB.

En aquellos casos donde no se hayan obtenido ensayos PLT para ciertas UGTB, se mantendrán los valores del modelo original, indicándolo claramente en la tabla. De este modo, la comparación permitirá visualizar de manera clara las diferencias entre los datos históricos y los resultados actualizados.

5.4.2 Comparación Por Fases Operacionales

En esta etapa, se analizarán las diferencias de resistencia del macizo rocoso entre las diferentes fases operacionales del rajo Zaldívar. Para ello, se emplearán gráficos comparativos que reflejen las UCS medias obtenidas en cada fase, permitiendo identificar patrones de variación entre fases. De manera específica, los resultados de las UCS para cada UGTB se agruparán por fase (F8, F9E, F9W) y se presentarán en forma de gráficos de barras o boxplots, facilitando así una visualización clara de las diferencias. Este análisis permitirá evaluar la consistencia del modelo geotécnico en función de las distintas etapas operacionales y ajustar las estimaciones de resistencia de acuerdo a las condiciones específicas de cada fase.

5.4.3 Análisis De Variación Por Bancos Dentro De La Fase 8

En esta sección, se realizará un análisis enfocado en la variación de la resistencia del macizo rocoso entre los bancos 2945 y 2930 dentro de la misma Fase 8. Para ello, se utilizará la UCS media obtenida de los ensayos realizados en cada banco.

El análisis se presentará mediante gráficos de barras por UGTB, buscando identificar si existe una tendencia a que la resistencia aumente o disminuya con la profundidad. Este enfoque se justifica porque la Fase 8 es aquella en la que se dispone de un mayor número de datos, lo que permite una evaluación más robusta de las variaciones verticales.

De este modo, se analizará si hay diferencias consistentes de resistencia entre los bancos de distinta cota, proporcionando así una base para ajustar el modelo geotécnico en función de la profundidad y las condiciones específicas de cada banco.

6. RESULTADOS

6.1 ACTUALIZACIÓN DE VALORES UCS POR UGTB

Para la obtención de los valores UCS se realizaron un total de 363 ensayos PLT de los cuales 392 fueron válidos y los restantes 52 no válidos, dando un porcentaje de validez del 88,3%. Estos valores no se reparten de manera uniforme entre las UG como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Validez de ensayos PLT por UGTB.

	Valido	No valido	% Validez
UG-01A	87	9	90.6
UG-01B	39	7	84.8
UG-01C	23	1	95.8
UG-01D	64	10	86.5
UG-02A	21	2	91.3
UG-02B	25	12	67.6
UG-03A	12	0	100.0
UG-03B	4	0	100.0
UG-04	12	0	100.0
UG-07A	15	2	88.2
UG-07B	16	0	100.0
UG-08A	25	4	86.2
UG-08B	49	5	90.7
Total	392	52	88.3

Con el fin de contextualizar espacialmente el muestreo realizado, se proyectaron los puntos de recolección de muestras sobre la topografía del rajo. La Figura 12 muestra la ubicación de las muestras utilizadas para los ensayos PLT dentro de las distintas fases del rajo.

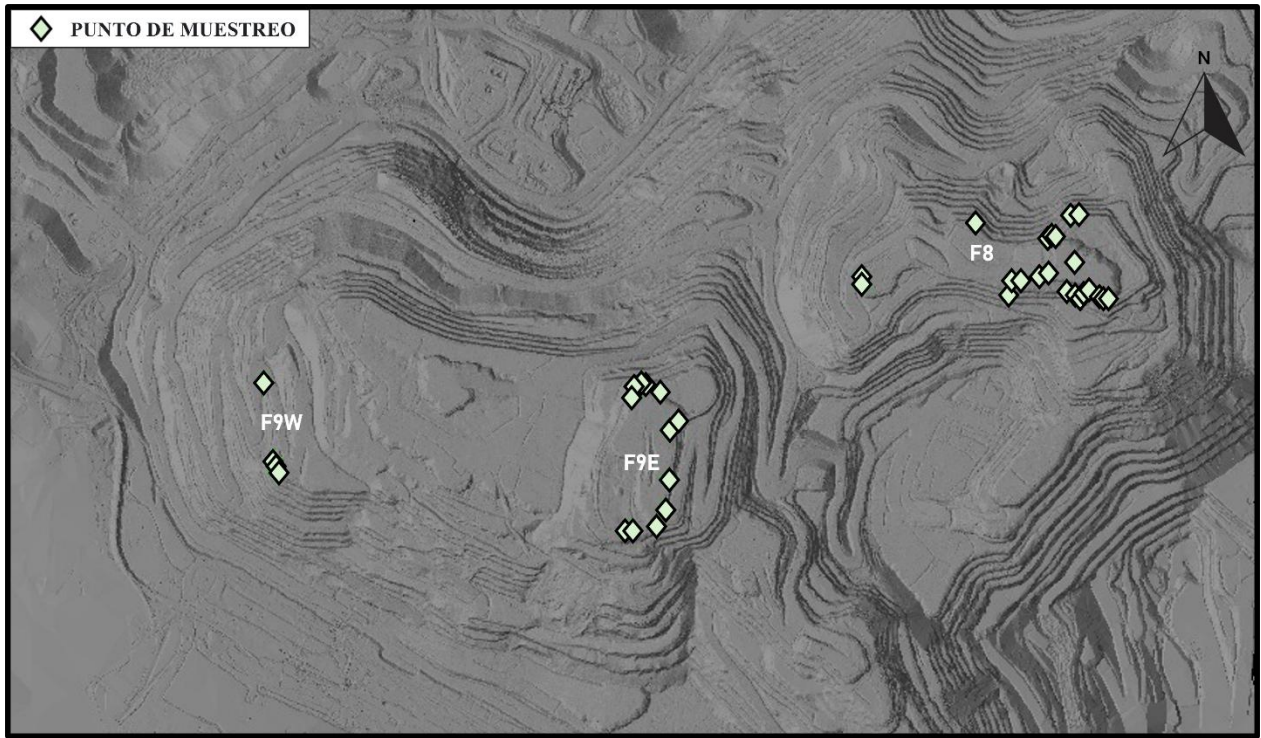


Figura 12. Ubicación de los puntos de muestreo. Los rombos verdes indican la posición de las muestras recolectadas en terreno dentro de las fases F8, F9E y F9W.

A partir de los resultados de ensayos considerados válidos, y luego de aplicar un proceso de depuración estadística orientado a la identificación y eliminación de valores atípicos mediante el método del rango intercuartílico (IQR), se obtuvo un total de 278 ensayos. Con esta base de datos depurada se generó la siguiente tabla, donde se presentan los estadísticos descriptivos por cada UGTB (Tabla 3).

Tabla 3. Tabla de estadísticos por UGTB. Se utilizan los valores obtenidos luego del análisis IQR.

UGTB	Media	Mediana	Desviación Estandar	Curtosis	Asimetría	Rango	Min	Max	BV
11	58.0	58.2	12.9	-0.12	0.12	53.1	31.3	84.4	44
12	107.7	93.5	34.5	-0.93	0.76	104.3	68.5	172.8	25
13	68.3	66.3	13.9	-0.72	-0.50	44.1	42.4	86.5	15
14	114.3	112.9	23.6	-0.96	-0.15	86.3	66.8	153.0	54
21	39.8	38.9	13.7	-1.58	0.04	40.1	19.5	59.5	10
22	56.5	61.1	18.4	-1.01	-0.61	56.1	23.1	79.1	20
31	33.1	33.7	8.5	-0.27	-0.28	29.3	17.2	46.5	12
32	43.2	44.0	13.3	-3.90	-0.19	28.3	28.2	56.5	4
40	31.8	32.2	5.9	4.44	-1.50	24.6	16.2	40.8	12
50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
71	59.2	60.6	8.9	-0.60	-0.30	31.0	41.6	72.5	14
72	85.7	82.8	13.1	-1.66	0.04	35.5	66.3	101.8	12
81	90.9	90.2	13.4	0.07	0.41	54.3	67.5	121.8	20
82	111.4	110.8	22.1	-0.48	0.26	87.3	72.5	159.8	36
90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Total BV									278

La media se utilizó como valor representativo de la UCS promedio para cada UGTB, mientras que los valores mínimo y máximo permitieron definir los límites de resistencia asociados a cada unidad. Por su parte, la curtosis y la asimetría fueron empleadas para evaluar la forma de la distribución y detectar posibles variaciones en el comportamiento estadístico de las poblaciones. Finalmente, la desviación estándar se utilizó como medida de dispersión respecto de la media, permitiendo identificar aquellas UGTB con mayor heterogeneidad interna en términos de resistencia.

En función de los criterios descritos anteriormente, se presenta a continuación la tabla 4, donde se resumen las propiedades de resistencia a compresión uniaxial para cada Unidad Geotécnica Básica. En color rojo se destacan los valores de resistencia media que disminuyen su resistencia en comparación a los datos previos en faena, mientras que en verde se resaltan los que perciben un aumento.

Tabla 4. Propiedades de resistencia por UGTB.

PROPIEDADES									
LIT	ALT	MIN	UG		UCS	UCS	UCS	σ	
					Mínima		Máxima		
					(MPa)	(MPa)	(MPa)		
AND/BX	Q>S/POT/SIL	SEC	11	UG-01A	31.3	58.0	84.4	12.9	
		PRIM	12	UG-01B	68.5	107.7	172.8	34.5	
LP(LPY-LPT-LPF)/PRG	Q>S/POT/SIL	SEC	13	UG-01C	42.4	68.3	86.5	13.9	
		PRIM	14	UG-01D	66.8	114.3	153.0	23.6	
AND/LP(LPY-LPT-LPF)/BX (BXA-BXB-BXC-BXP)/PRG	CLO	SEC	21	UG-02A	19.5	39.8	59.5	13.7	
		PRIM	22	UG-02B	23.1	56.5	79.1	18.4	
	ARG/Q<S/SER	SEC	31	UG-03A	17.2	33.1	46.5	8.5	
		PRIM	32	UG-03B	28.2	43.2	56.5	13.3	
	BIO	SEC	40	UG-04	16.2	31.8	40.8	5.9	
		PRIM	50	UG-05	24.4	58.0	91.6		
ZPY	Q<S/SER/CLO/ARG	SEC (LIX)	60	UG-06	51.8	65.2	78.6		
		SEC (SSE/OXI/MIX)	71	UG-07A	41.6	59.2	72.5	8.9	
	Q<S/CLO	PRIM	72	UG-07B	66.3	85.7	101.8	13.1	
		Q>S/SIL/POT/BIO	SEC	81	UG-08A	67.5	90.9	121.8	13.4
PRIM	82		UG-08B	72.5	111.4	159.8	22.1		
GGB	Q>S/CLO/POT/BIO	PRIM	90	UG-09	71.9	97.1	122.3		
SCG	-		100	UG10	0.0	0.0	0.0		

Las UGTB asociadas a alteración Q>S y/o silicificación (UGTB 11, 12, 13, 14, 81 y 82) presentan los mayores incrementos en la UCS media, con aumentos del orden de 20% a 50% respecto de los valores históricos previamente utilizados. En contraste, las UGTB no vinculadas a estas alteraciones (UGTB 21, 22, 31, 32, 40, 71 y 72) muestran variaciones acotadas de la UCS media, comprendidas entre una disminución cercana al 10% y un incremento de hasta 10%, lo que sugiere un comportamiento relativamente estable. Como excepción, la UGTB 72 registra una disminución significativa del orden de 25% en la UCS media en comparación con los valores anteriores.

Cabe destacar que la detonación de explosivos en roca induce un número significativo de microfracturas internas, generadas por las ondas de choque emitidas alrededor del orificio de blasthole (blast-induced microcracks), lo cual contribuye a una disminución de la resistencia a trituración y aplastamiento en ensayos posteriores (Nielsen & Malvik, 1999). En el contexto de este trabajo, se entiende que al ensayar sobre material afectado por tronaduras y con un posterior retrabajo y manipulación de fragmentos durante la construcción de pretiles, los valores de resistencia medidos en los ensayos de UCS podrían estar subestimando la resistencia real de la roca

intacta in situ, ya que las microfracturas inducidas artificialmente reducen la coherencia mecánica del espécimen sometido a prueba.

6.2 DIFERENCIACIÓN DE POBLACIONES DE RESISTENCIA DENTRO DE UNA MISMA UGTB

El análisis de los valores de resistencia permitió identificar variaciones significativas entre las distintas unidades geotécnicas analizadas, las cuales pueden influir en el comportamiento del macizo rocoso durante los procesos de tronadura.

En la UGTB-11 se identificó la presencia local de brechas hidrotermales ricas en cuarzo, las cuales presentan valores de resistencia significativamente mayores en comparación con las andesitas que componen mayoritariamente la unidad. Esta diferencia genera una población de resistencias más altas, lo que indica un comportamiento mecánico distinto dentro de la misma unidad geotécnica.

En la UGTB-12, el análisis litológico permitió separar dos poblaciones de resistencia asociadas a andesitas silicificadas y andesitas Q>S. Las andesitas silicificadas presentan resistencias considerablemente mayores, lo que refleja el efecto del aumento de cuarzo en la competencia de la roca.

En la UGTB-14 también se observó una diferencia de resistencia asociada a la litología, particularmente entre las unidades PRG y LPF, donde las primeras presentan valores de UCS mayores, asociados a su mayor contenido de cuarzo y textura porfídica más competente.

Finalmente, la UGTB-82 presenta un rango amplio de resistencias, sin que se identifiquen subdivisiones litológicas claras que permitan separar poblaciones distintas. La variabilidad observada parece estar controlada principalmente por diferencias en el grado de alteración hidrotermal, particularmente entre dominios con mayor desarrollo de sericitización y sectores con mayor presencia de cuarzo o silicificación.

En contraste, el resto de las unidades analizadas presentan distribuciones de resistencia normales y rangos de variación acotados, dentro de los valores esperados para las litologías presentes en el área de estudio. En estos casos no se identificaron subdivisiones litológicas claras ni poblaciones

diferenciadas de resistencia que justificaran un análisis más detallado, por lo que su comportamiento geomecánico se considera homogéneo dentro del contexto de este estudio.

6.2.1 Análisis De Brecha Hidrotermal – UGTB-11

En Fase 9W, se identificó un afloramiento localizado de brecha hidrotermal perteneciente a la UGTB-11 (Figura 13A). La elevada competencia del material dificultó el remate del talud, impidiendo alcanzar la geometría proyectada del banco y dejando bloques remanentes asociados a una fragmentación insuficiente durante la tronadura previa. Esta condición fue aprovechada para la obtención dirigida de muestras y la ejecución de ensayos de resistencia. Las muestras obtenidas corresponden a una brecha hidrotermal de color gris oscuro con tonos rojizos rica en cuarzo, de carácter monomíctico, con clastos de composición andesítica en una matriz intensamente silicificada, presentando además óxidos de Fe, óxidos de Cu, sulfuros secundarios y cúmulos de yeso botroidal (Figura 13B).

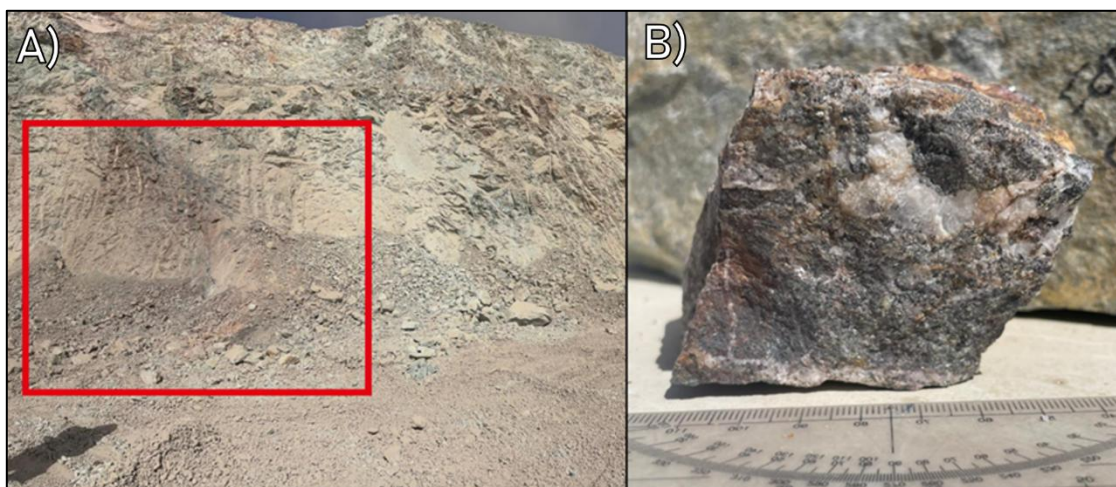


Figura 13. Brecha hidrotermal asociada a la UGTB-11. A) Afloramiento de brecha expuesto en Fase 9W, banco 3005 (sector destacado en rojo). B) Muestra representativa de brecha hidrotermal monomíctica rica en cuarzo, con clastos de composición andesítica en matriz silicificada, acompañada por óxidos de Fe responsables de la coloración rojiza, óxidos de Cu, sulfuros secundarios

Con el fin de visualizar la distribución espacial de las muestras asociadas a esta unidad, se proyectaron los puntos de muestreo sobre la topografía del rajo Saldívar. La Figura 14 muestra la ubicación de las muestras correspondientes a la brecha identificada dentro de la UGTB-11.

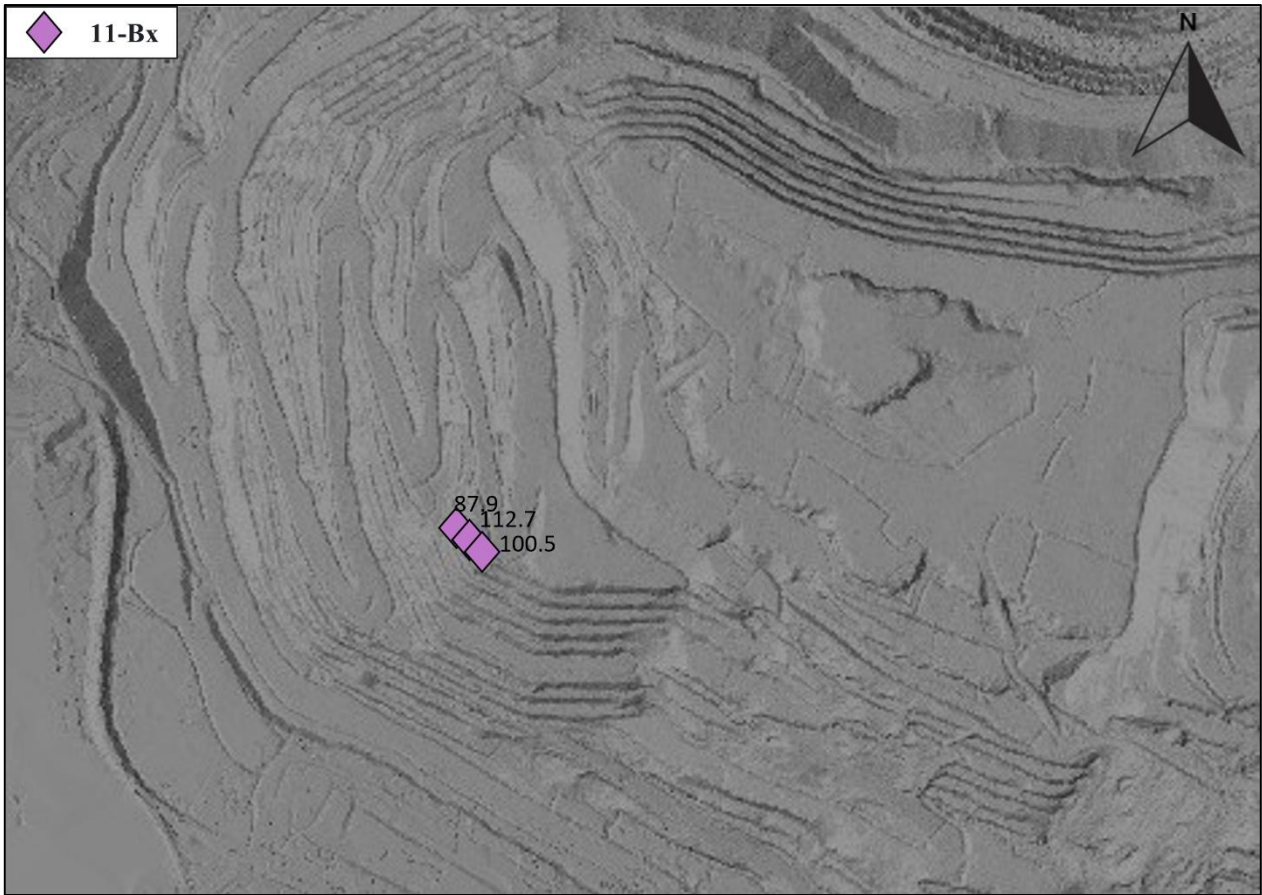


Figura 14. Distribución espacial de las muestras correspondientes a la brecha (11-Bx). Se muestra con rombos morados los puntos de muestreo para la 11-Bx, indicando sobre ellos la UCS máxima obtenida. La zona corresponde a F9W banco 3005 malla 49 desde el pozo 816 al 819.

Al analizar la totalidad de los datos de la UGTB-11, esta unidad presenta una distribución aproximadamente normal, con desviación estándar y rango acotados. Sin embargo, al aplicar la limpieza estadística mediante el método del rango intercuartílico (IQR), los resultados asociados a las brechas tienden a clasificarse como valores atípicos. Esto se debe al desbalance muestral existente (67 muestras de andesitas versus 20 de brechas), la aplicación del método IQR dentro del conjunto total tendía a clasificar estos valores como atípicos.

Por esta razón, se optó por realizar un análisis independiente de las brechas dentro de la UGTB-11. En la Figura 15 se presenta el diagrama de cajas donde se comparan los valores de UCS de la UGTB-11 (andesitas) con los correspondientes a la brecha (BX-UGTB-11), evidenciándose claramente un desplazamiento hacia valores superiores en esta última.

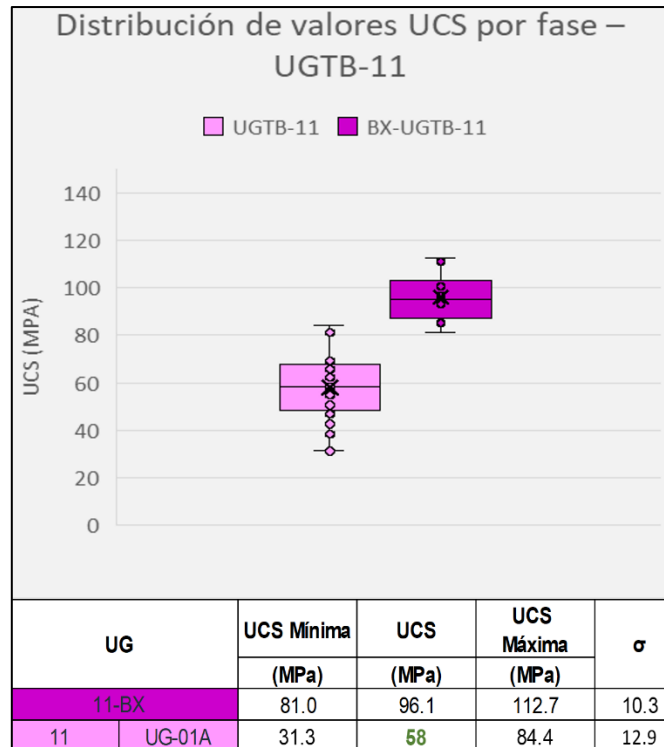


Figura 15. Comparación de la distribución de UCS entre la UGTB-11 (andesitas) y las brechas hidrotermales asociadas (BX-UGTB-11). Las brechas muestran valores sistemáticamente superiores, con una UCS media de 96.1 MPa, frente a 58 MPa para la UGTB-11. El valor destacado en verde corresponde al promedio de UCS adoptado en la tabla de propiedades para la UGTB-11 en este estudio.

Los ensayos muestran que la brecha hidrotermal presenta valores significativamente mayores que la media de la unidad, con una resistencia mínima de 81.0 MPa (aproximadamente 50 MPa por sobre la mínima registrada para la UGTB-11 y solo 3.4 MPa por debajo del máximo de la unidad), una resistencia máxima de 112.7 MPa y un valor promedio de 96.1 MPa. Estos resultados confirman un comportamiento mecánico diferenciado respecto de la andesita predominante en la UGTB-11.

6.2.2 Análisis De Resistencia Y Diferenciación Litológica - UGTB-12

Durante el análisis de los resultados de resistencia a compresión uniaxial asociados a esta unidad, se observó inicialmente una dispersión elevada de los valores obtenidos, reflejada en una desviación estándar considerablemente mayor en comparación con otras unidades geotécnicas analizadas.

Con el objetivo de evaluar la distribución de los datos y comprender el origen de esta variabilidad, se generó un histograma (Figura 16A) de los valores de UCS correspondientes a la UGTB-12. Este análisis permitió identificar la presencia de dos poblaciones de datos claramente diferenciadas, lo que sugería la coexistencia de materiales con comportamientos mecánicos distintos dentro de la misma unidad geotécnica

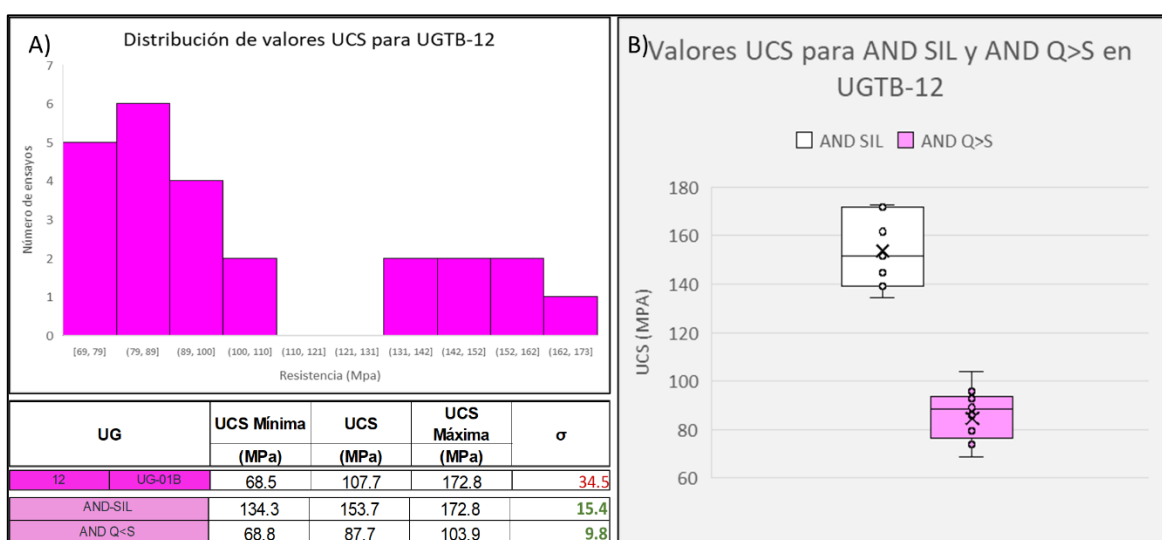


Figura 16. Distribución de valores de resistencia a compresión uniaxial (UCS) para la UGTB-12. A) Histograma de los valores de UCS obtenidos para la unidad, donde se evidencia la presencia de dos poblaciones de resistencia diferenciadas. B) Diagrama de caja que muestra la separación de las muestras según litología, distinguiendo andesitas silicificadas (AND SIL) y andesitas con alteración cuarzo-sericita (AND Q>S). La separación de ambas poblaciones permite reducir la dispersión de los datos, observándose desviaciones estándar de 15.4 MPa para las andesitas silicificadas y 9.8 MPa para las andesitas Q>S, en contraste con la desviación original de 34.5 MPa al considerar la unidad de forma conjunta. Esta diferenciación refleja el mayor comportamiento resistente de las andesitas silicificadas respecto de las andesitas Q>S dentro de la UGTB-12.

A partir de esta observación, se procedió a revisar en detalle la información asociada a cada muestra, incluyendo las cartillas de registro de muestreo, fotografías y descripciones litológicas.

Este análisis permitió establecer que la población de mayor resistencia correspondía a andesitas silicificadas (Figura 16B), mientras que la población de menor resistencia se asociaba a andesitas con alteración cuarzo-sericita dominante (Q>S).

La diferenciación entre ambos tipos litológicos también puede apreciarse a escala de muestra. Las andesitas con alteración Q>S (Figura 17A) conservan parcialmente la textura original de la roca, presentando sectores con vetillas y cúmulos de sericita, mientras que en las andesitas silicificadas (Figura 17B) la matriz se encuentra fuertemente reemplazada por sílice, generando una roca de aspecto masivo, con mayor brillo, donde la textura de la roca original resulta difícil de reconocer.

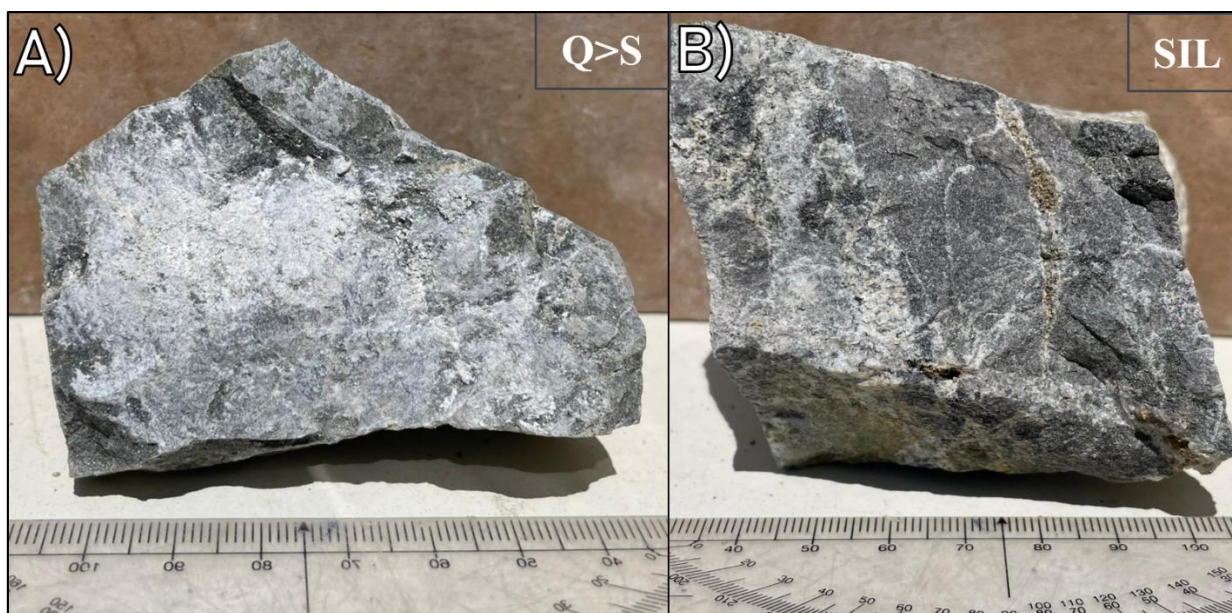


Figura 17. Diferencias texturales entre litologías presentes en la UGTB-12. A) Andesita con alteración cuarzo-sericita (Q>S), donde aún se reconocen parcialmente la textura original, presenta presencia de vetillas y cúmulos de sericita asociados a la alteración. B) Andesita silicificada (SIL), caracterizada por un mayor reemplazo de la matriz por sílice, generando una textura, con mayor brillo y escasa preservación de la textura original de la roca.

Una vez identificada esta diferencia litológica, se procedió a separar las muestras correspondientes a ambas poblaciones y analizar sus propiedades mecánicas de manera independiente. Esta diferenciación puede observarse en el diagrama de caja presentado en la Figura 14B, donde se evidencia claramente la separación entre las andesitas silicificadas “AND – SIL” y las andesitas con alteración cuarzo-sericita “AND Q>S”. Tras realizar esta separación, se observa una reducción

significativa de la dispersión estadística de los datos. En efecto, la desviación estándar de la población original ($\sigma = 34.5$ MPa) disminuye considerablemente al analizar cada litología por separado, alcanzando valores de 15.4 MPa para las andesitas silicificadas y 9.8 MPa para las andesitas Q>S, lo que indica distribuciones más acotadas y estadísticamente representativas del comportamiento mecánico de cada tipo de roca.

En términos de resistencia, las andesitas silicificadas presentan valores mayores, registrando una UCS media de 153.7 MPa, mientras que las andesitas con alteración Q>S presentan una UCS media de 87.7 MPa. Adicionalmente, se observa una clara separación entre ambas poblaciones incluso en sus rangos de resistencia, registrándose una diferencia de 30.4 MPa entre el valor máximo de las andesitas Q>S y el valor mínimo de las andesitas silicificadas, lo que refuerza la interpretación de que ambas litologías corresponden a materiales con comportamientos geo mecánicos distintos dentro de la UGTB-12.

Esta diferencia refleja el efecto del proceso de silicificación sobre las propiedades mecánicas de la roca, donde el reemplazo de la matriz original por sílice genera un material más rígido y competente frente a esfuerzos compresivos. En sistemas hidrotermales, las zonas intensamente silicificadas suelen formar rocas particularmente resistentes debido al reemplazo de la matriz original por cuarzo, lo que incrementa la competencia mecánica del macizo rocoso según lo estudiado por Sillitoe, 2010. En consecuencia, la diferenciación entre ambas litologías permite representar de manera más adecuada el comportamiento mecánico de los materiales presentes en la UGTB-12, evitando que la mezcla de ambas poblaciones genere estimaciones poco representativas de las propiedades de resistencia utilizadas en el modelo geotécnico.

Para visualizar la distribución espacial de las muestras asociadas a los mayores valores de UCS dentro de la UGTB-12, se proyectaron sobre la topografía del rajo las muestras clasificadas como andesitas silicificadas (AND-SIL) (Figura 18). Estas litologías corresponden a las responsables de los valores más altos de resistencia observados en esta unidad.

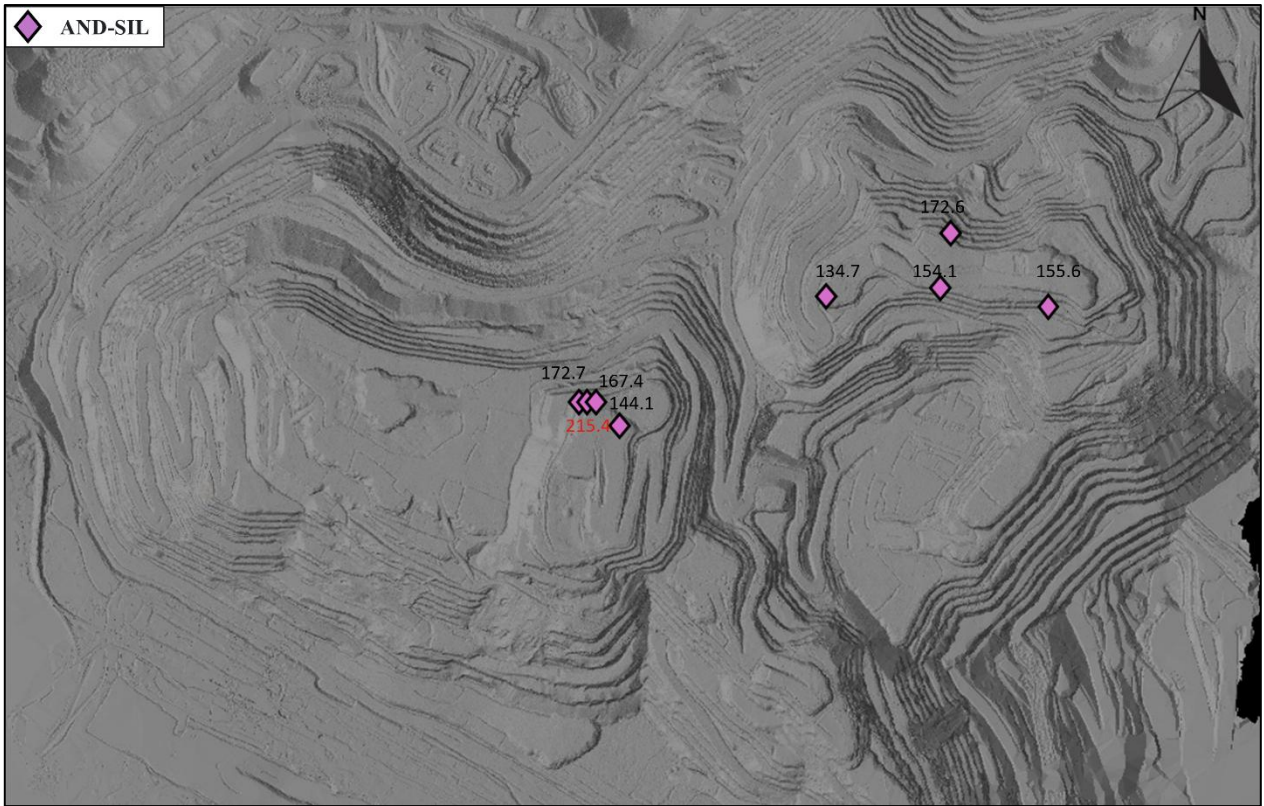


Figura 18. Distribución espacial de las muestras correspondientes a andesitas silicificadas. Los valores indicados corresponden a los UCS máximos obtenidos para cada muestra, resaltando en rojo el valor máximo obtenido durante todo el estudio el cual corresponde a una AND-SIL. Concentrando esta litología los valores más altos no solo de la unidad, si no de todo el estudio.

6.2.3 Análisis De Resistencia Y Diferenciación Litológica - UGTB-14

Con el fin de analizar el comportamiento de la resistencia a compresión uniaxial de esta unidad geotécnica, se elaboró inicialmente un histograma de los valores de UCS, presentado en la Figura 19A. A partir de este análisis se identifica la existencia de dos poblaciones de datos parcialmente solapadas, evidenciadas por la presencia de dos máximos de frecuencia en torno a 110 MPa y 140 MPa, respectivamente. Este comportamiento sugiere la coexistencia de materiales con diferentes propiedades mecánicas dentro de la misma unidad geotécnica.

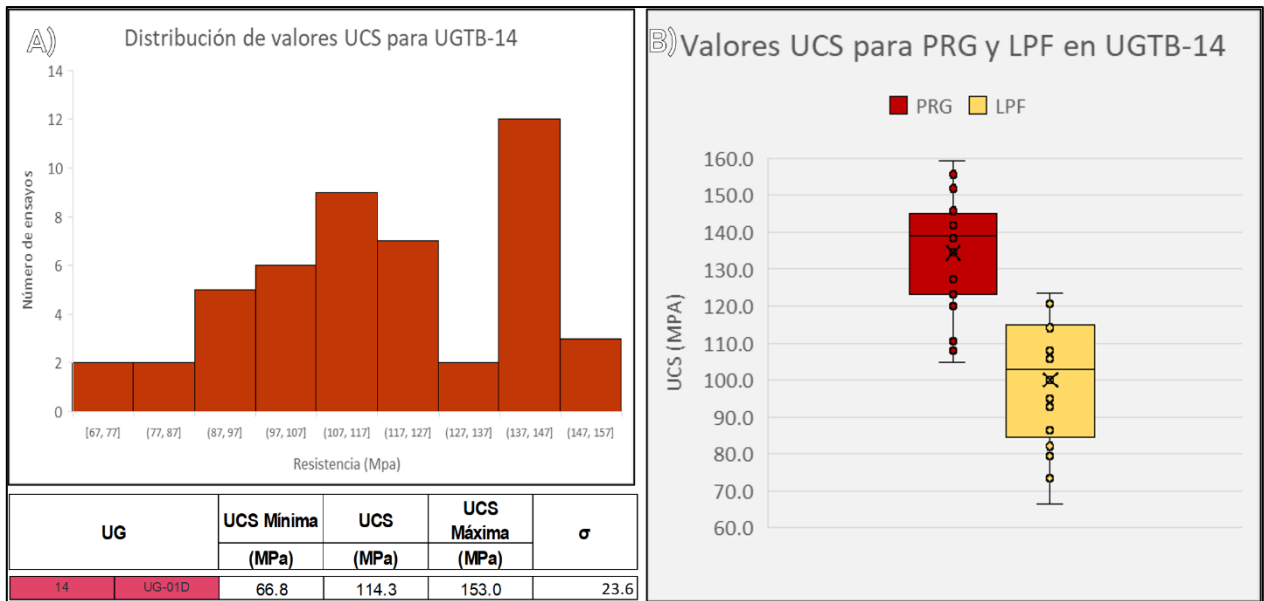


Figura 19. Distribución de los valores de UCS para la UGTB-14. A) Histograma de los valores de UCS obtenidos para la unidad, donde se observa la presencia de dos poblaciones parcialmente solapadas. B) Diagramas de caja que muestran la separación de las muestras según litología, distinguiendo PRG y LPF. Se observa que los PRG presentan valores de resistencia sistemáticamente mayores que LPF, aunque ambas poblaciones muestran un rango de resistencias parcialmente solapados.

Se realizó una revisión individual de las muestras mediante el análisis de cartillas de registro, fotografías de muestras y descripciones litológicas, lo que permitió identificar que la población de mayor resistencia corresponde principalmente a pórfidos riolíticos gruesos (PRG) (Figura 20A), mientras que la población de menor resistencia se asocia a las rocas pertenecientes a LPF (Figura 20B).

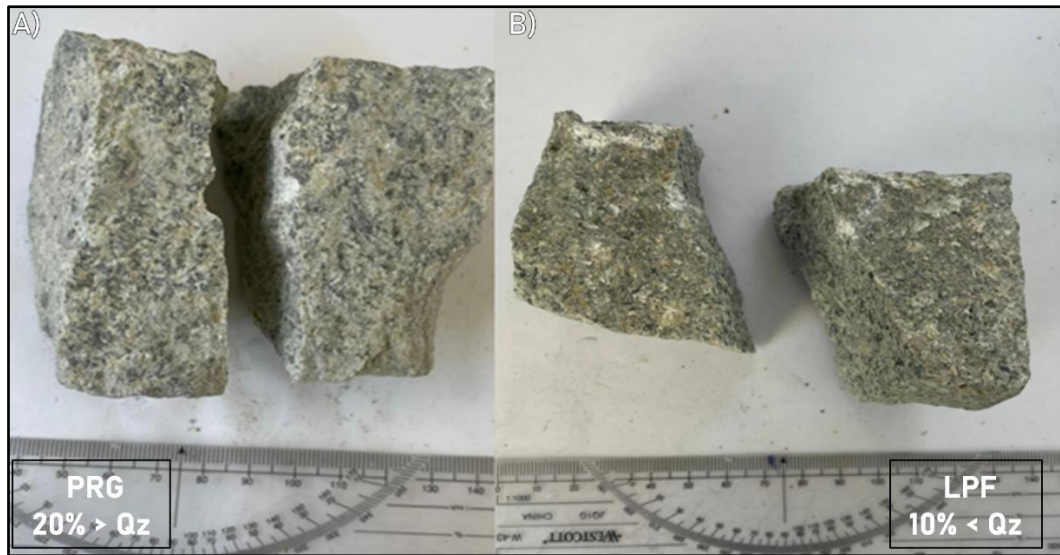


Figura 20. Litologías representativas presentes en la UGTB-14. A) PRG, roca de composición riolítica caracterizada por una mayor proporción de cuarzo y feldspatos en una matriz de grano grueso, con contenidos de cuarzo superiores al 20%. B) LPF, compuestas principalmente por granodioritas y dioritas, que presentan una mineralogía dominada por feldspatos y minerales máficos, con contenidos de cuarzo inferiores al 10%.

Una vez identificada esta relación litológica, se procedió a separar estadísticamente ambas poblaciones y a representar sus distribuciones mediante diagramas de caja, presentados en la Figura 19B. En este se puede visualizar con mayor claridad la diferencia de comportamiento mecánico entre ambas litologías, observándose que los PRG presentan valores de UCS mayores que las rocas LPF, aunque ambas poblaciones presentan un rango de resistencias parcialmente solapado.

La diferencia en resistencia puede explicarse principalmente por la composición mineralógica de las rocas. Los pórfidos riolíticos gruesos presentan composiciones riolíticas, con contenidos de cuarzo que superan el 20%, mientras que las rocas de la unidad LPF, compuestas principalmente por granodioritas y dioritas, presentan contenidos de cuarzo inferiores al 10%. Este contraste mineralógico tiene un impacto directo en la resistencia mecánica de la roca, ya que el cuarzo es uno de los minerales más resistentes presentes en las rocas ígneas.

En este contexto, estudios geomecánicos han señalado que la resistencia de la roca está fuertemente controlada por su composición mineralógica, siendo las rocas con mayor contenido de cuarzo generalmente más resistentes frente a esfuerzos compresivos (Hoek & Brown, 1997). De esta

forma, el mayor contenido de cuarzo presente en los PRG proporciona una explicación consistente para los valores de resistencia más elevados observados en esta litología.

No obstante, dado que ambas litologías presentan contenidos de cuarzo dentro de un rango relativamente amplio, se observa una zona de solapamiento entre las distribuciones de resistencia, lo que explica que algunos valores de UCS correspondientes a LPF se aproximen a los rangos inferiores de los PRG. A pesar de este solapamiento parcial, la tendencia general indica que las resistencias menores se asocian principalmente a LPF, mientras que los valores más altos corresponden a PRG, reflejando la influencia del contenido mineralógico sobre el comportamiento mecánico de estas rocas.

La Figura 21 muestra la distribución espacial de las muestras correspondientes a los pórfidos presentes en la UGTB-12, diferenciando PRG y LPF. En la Fase 8 se observa una mayor presencia de PRG en relación con LPF, lo que se refleja en la concentración de muestras de esta litología en el sector oriental del rajo. En contraste, en la Fase 9E solo se registran muestras asociadas a LPF, sin presencia de PRG. Por su parte, en la Fase 9W no se identificaron muestras correspondientes a pórfidos dentro de esta unidad.

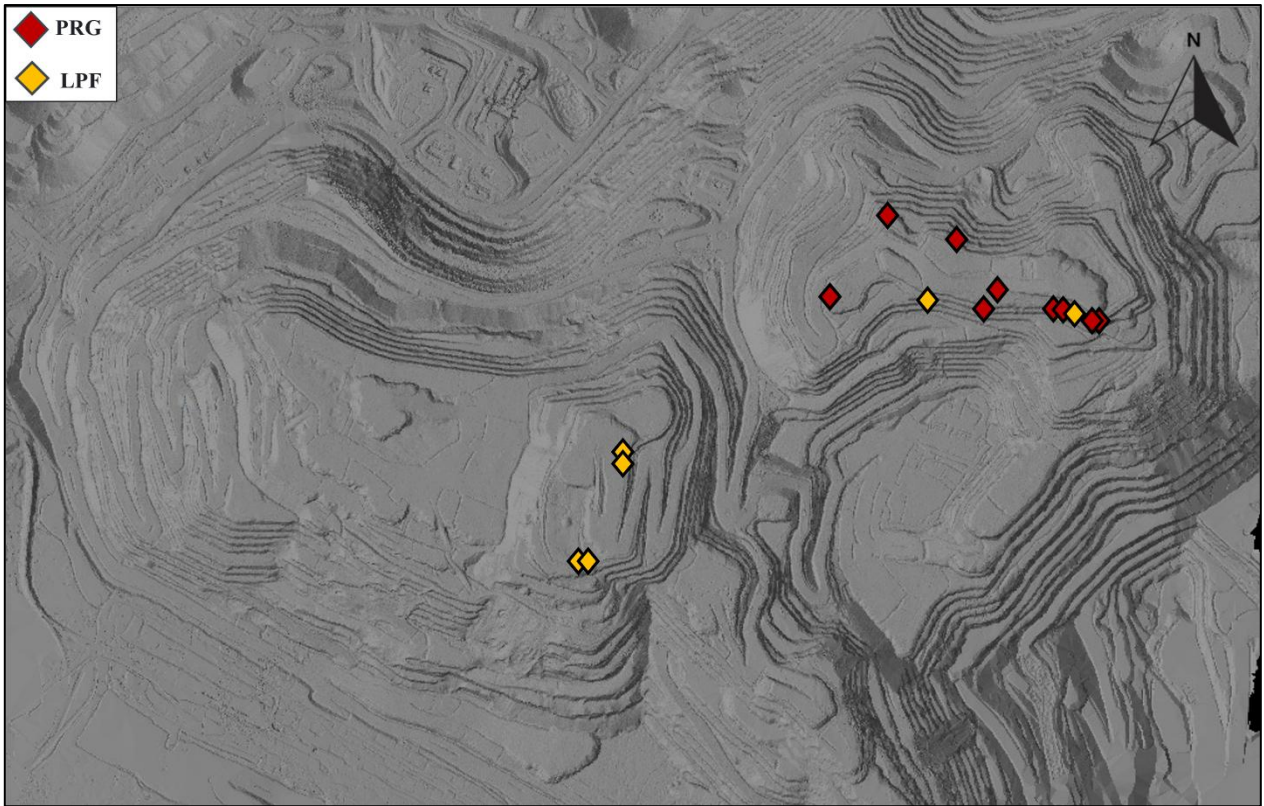


Figura 21. Distribución espacial de las muestras PRG y LPF. Se observa una mayor concentración de PRG en sectores correspondientes a la Fase 8, mientras que en la Fase 9E predominan muestras asociadas a LPF, sin presencia de PRG. En la Fase 9W no se registraron muestras correspondientes a pórfidos dentro de esta unidad.

6.2.4 Análisis De Resistencias En La UGTB-82

Esta unidad fue analizada debido a que presenta uno de los rangos más amplios de resistencia dentro del conjunto de datos, siendo la segunda unidad con mayor dispersión luego de la UGTB-12, previamente estudiada.

El análisis inicial se realizó mediante el histograma de valores UCS (Fig. 22A), donde se observa una distribución aproximadamente normal, aunque con una ligera asimetría hacia los valores menores de resistencia, reflejada en una mayor concentración de datos en el extremo izquierdo del histograma.

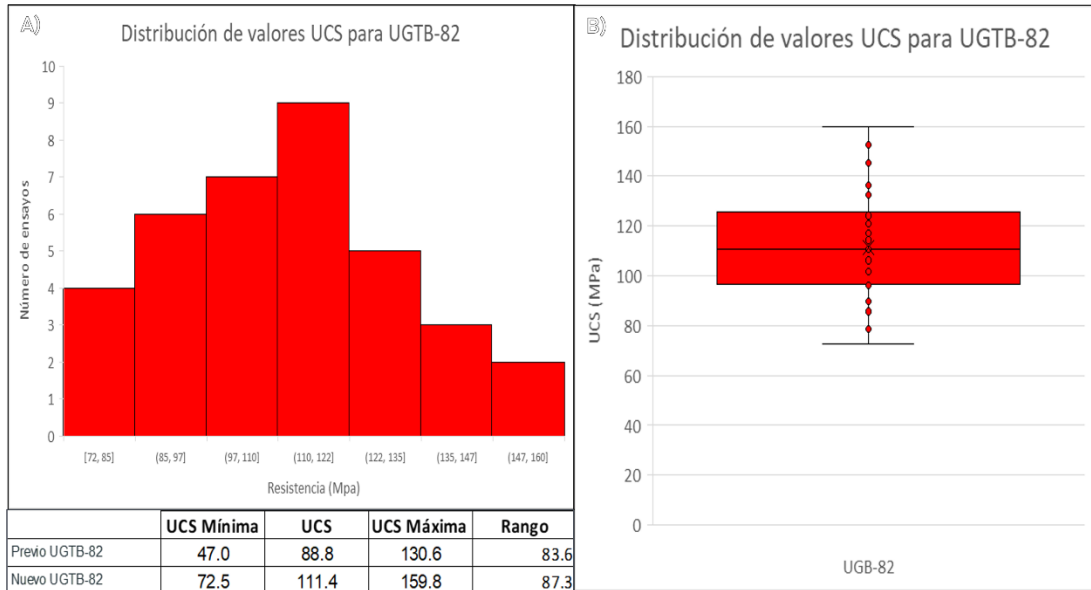


Figura 22. Distribución de valores de resistencia a compresión uniaxial (UCS) para la UGTB-82. A) Histograma de los valores de resistencia obtenidos en este estudio, donde se observa una distribución aproximadamente normal con ligera asimetría hacia los valores menores. Junto con la comparación de los rangos de resistencia reportados previamente en faena. B) Boxplot de los valores UCS obtenidos para la unidad.

Posteriormente, se revisaron individualmente las muestras asociadas a esta unidad, considerando registros de terreno, descripciones litológicas y fotografías, con el objetivo de identificar posibles controles litológicos o texturales que explicaran el amplio rango de resistencias observado. Sin embargo, no se identificaron anomalías claras ni subdivisiones litológicas evidentes que permitieran separar la población de datos en subgrupos bien definidos, como ocurrió en otras unidades geotécnicas.

Debido a esto, se realizó una comparación con los datos históricos de faena asociados a esta misma unidad geotécnica. Como se observa en la Figura 18, el rango de los datos previos es muy similar al obtenido en este estudio, variando solo levemente. En particular, los nuevos resultados muestran un aumento general de los valores de resistencia, con una resistencia media que pasa de 88.8 MPa a 111.4 MPa, una resistencia máxima que aumenta de 130.6 MPa a 159.8 MPa, y una resistencia mínima que pasa de 47.0 MPa a 72.5 MPa.

A pesar de este incremento general de los valores, el rango global de la unidad se mantiene comparable al observado en los datos históricos, lo que sugiere que la variabilidad observada

corresponde a una característica inherente del macizo rocoso y no a una anomalía asociada al muestreo.

Desde el punto de vista litológico y mineralógico, se observa una tendencia general en la que muestras con mayor desarrollo de alteración sericitica presentan resistencias menores, mientras que aquellas con mayor presencia de cuarzo o silicificación tienden a registrar valores de resistencia más elevados. Sin embargo, esta relación no genera una separación clara de poblaciones, como se observó en otras unidades geotécnicas, sino más bien una variación continua dentro del mismo conjunto de datos, lo que explica el amplio rango de valores registrado para esta unidad.

6.3 ANÁLISIS POR FASES

Con el fin de analizar la variabilidad de la resistencia en función de la fase minera, en esta sección se presentan los resultados de los ensayos PLT desagregados por unidad geotécnica básica por fase. Previo al análisis comparativo, se evaluó la disponibilidad de ensayos por UGTB, identificando aquellas que cuentan con información suficiente para permitir comparaciones representativas entre fases. La tabla 5 resume la presencia de ensayos PLT por UGTB y fase, y a partir de esta distribución el análisis se restringe a las UGTB que presentan datos en más de una fase.

Tabla 5. Disponibilidad de ensayos PLT por UGTB y fase minera. Las celdas en verde indican la presencia de ensayos para la UGTB correspondiente dentro de cada fase (F8, F9E y F9W), mientras que las celdas en blanco indican ausencia de datos.

UGTB	11	12	13	14	21	22	31	32	40	71	72	81	82
F8													
F9E													
F9W													

6.3.1 Comparación Por Fases: UGTB-11 Y UGTB-12

La figura 23 presenta la distribución de los valores de resistencia a compresión uniaxial (UCS) por fase minera para las unidades geotécnicas UGTB-11 y UGTB-12.

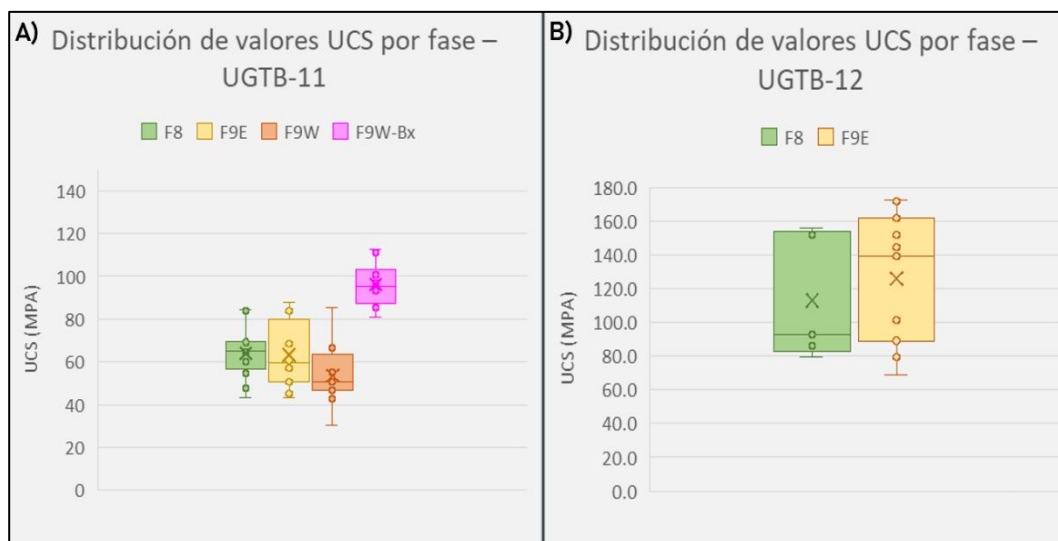


Figura 23. Distribución de los valores de UCS por fase minera para las unidades UGTB-11 y UGTB-12. A) UGTB-11: los valores medios son similares entre fases, aunque con variaciones en los rangos; la brecha de F9W (F9W-Bx) presenta valores superiores al resto de las muestras. B) UGTB-12: ambas fases presentan rangos comparables, con mayor dispersión atribuida a la coexistencia de andesitas silicificadas (AND-SIL) y andesitas Q>S; el mayor promedio en F9E se asocia a una mayor proporción de material silicificado.

En el caso de la UGTB-11, no se observan diferencias significativas en las resistencias medias entre las fases analizadas. Sin embargo, se aprecia cierta variabilidad en los rangos de valores dentro de cada fase. La fase F9W presenta un rango ligeramente mayor respecto a las otras fases.

Adicionalmente, la brecha identificada en F9W, analizada previamente como una litología diferenciada dentro de esta unidad, presenta valores de resistencia superiores al resto de las muestras, ubicándose por sobre los rangos mínimos, promedio y máximos observados para las otras litologías de la misma unidad geotécnica.

Por su parte, la UGTB-12 presenta una mayor dispersión de los valores de UCS. Esta variabilidad se atribuye a la coexistencia de andesitas silicificadas y andesitas AND Q>S dentro de la unidad. Aunque ambas fases presentan rangos de resistencia similares, se observa un aumento en el valor

promedio de resistencia en la fase F9E, lo que se asocia a una mayor proporción de material silicificado en esta fase respecto a la fase F8.

6.3.2 Comparación Por Fases: UGTB-13 Y UGTB-14

La Figura 24 presenta la distribución de valores de UCS por fase para las unidades geotécnicas UGTB-13 (Fig. 24A) y UGTB-14 (Fig. 24B).

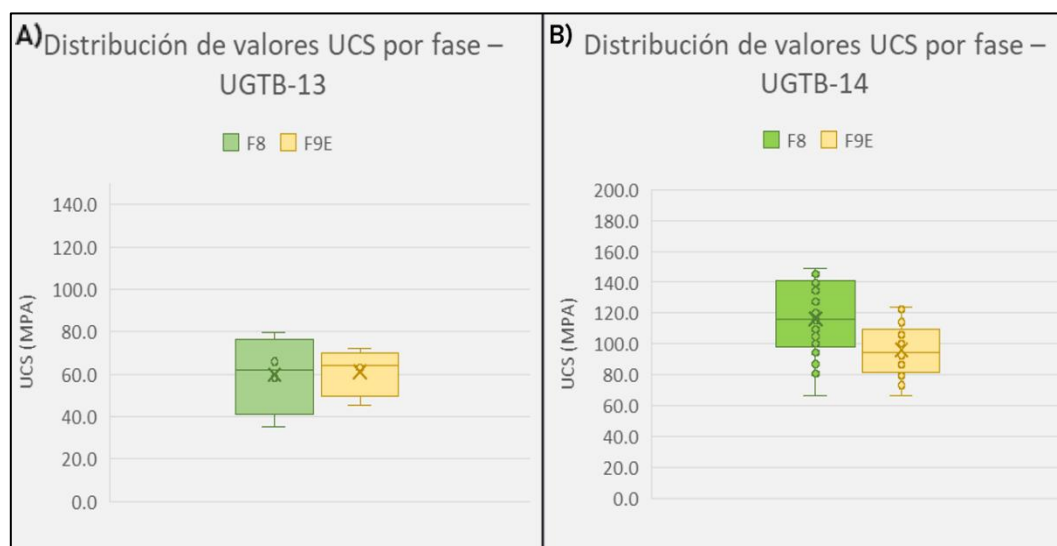


Figura 24. Distribución de valores de UCS por fase para UGTB-13 (A) y UGTB-14 (B). UGTB-13. Muestra valores similares entre F8 y F9E, mientras que en UGTB-14 se observa una mayor resistencia en F8 respecto a F9E.

En el caso de UGTB-13, los resultados muestran una relación bastante similar entre Fase 8 y Fase 9E, tanto en términos de dispersión como en los valores centrales de la distribución. Las medianas y promedios de UCS son comparables entre ambas fases, lo que sugiere que no existe una diferencia significativa en la resistencia del material entre estos sectores para esta unidad.

Por su parte, en UGTB-14 se observa una diferencia más marcada entre fases. Fase 8 presenta una mayor media de UCS en comparación con Fase 9E. Esta diferencia se relaciona principalmente con la composición litológica de las muestras analizadas. Como se observó previamente en la distribución espacial de muestras de esta unidad (Fig. 21), en Fase 8 existe una mayor presencia de PRG, mientras que en Fase 9E predominan muestras asociadas a LPF.

En este contexto, la diferencia observada entre fases no respondería necesariamente a un control propio de la fase minera, sino más bien a la distinta proporción de litologías representadas en el conjunto de muestras. Esto se refleja también en el diagrama de caja de UGTB-14, donde los valores mínimos de UCS son similares entre ambas fases, debido a la presencia de LPF en ambos casos. En contraste, los valores máximos y el promedio de UCS son mayores en Fase 8, debido a la presencia adicional de PRG, litología que presenta resistencias superiores dentro de esta unidad.

6.3.3 Comparación Por Fases: UGTB-21, UGTB-22, UGTB-31 Y UGTB-32

La Figura 25 muestra la distribución de valores de UCS por fase para las unidades geotécnicas UGTB-21 (A), UGTB-22 (B), UGTB-31 (C) y UGTB-32 (D).

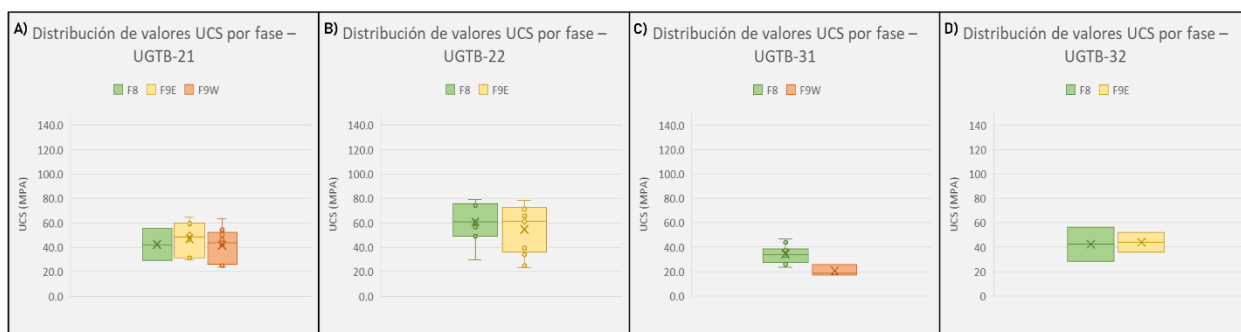


Figura 25. Distribución de valores de UCS por fase para UGTB-21 (A), UGTB-22 (B), UGTB-31 (C) y UGTB-32 (D). Diagramas de caja que muestran la distribución de valores de UCS por fase para las unidades geotécnicas analizadas. En UGTB-21 y UGTB-22 no se observan diferencias relevantes entre fases. En UGTB-31 y UGTB-32, la cantidad de datos disponibles es limitada, por lo que no es posible establecer tendencias claras en la resistencia entre fases.

En UGTB-21 y UGTB-22 no se observan diferencias significativas en los valores de UCS entre las distintas fases analizadas. Las medianas, rangos y valores promedio presentan distribuciones comparables, lo que sugiere que la resistencia del material se mantiene relativamente constante entre Fase 8 y Fase 9, sin evidenciar un control directo asociado a la fase minera.

Por otro lado, en UGTB-31 y UGTB-32 la cantidad de datos disponibles es limitada, lo que impide establecer tendencias claras o diferencias confiables entre fases. En estos casos, la baja representatividad de las muestras no permite realizar una interpretación robusta respecto al comportamiento de la resistencia en función de la fase.

En términos generales, para estas unidades no se observa un control significativo de la UCS asociado únicamente a la fase minera.

6.4 ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA CON LA PROFUNDIDAD EN FASE 8

Con el objetivo de evaluar la variación de la resistencia a la compresión uniaxial con la profundidad, se realizó una comparación entre los bancos 2945 y 2930 correspondientes a la fase 8, seleccionada por ser la fase con mayor cantidad y continuidad de registros disponibles. Para este análisis se utilizaron un total de 175 ensayos PLT válidos, agrupados por unidad geotécnica básica, lo que permitió obtener valores representativos de UCS media para cada banco.

La Figura 26 muestra la comparación de la UCS estimada para ambos bancos por UGTB. En términos generales, se observa una tendencia predominante a la disminución de la resistencia con el aumento de la profundidad, con reducciones del orden de 8 a 10 % al pasar del banco 2945 al banco 2930 en la mayoría de las unidades analizadas. Las UGTB que presentan incrementos de resistencia con la profundidad (UGTB 71 y UGTB 72) muestran aumentos acotados, los cuales resultan poco significativos en comparación con las disminuciones registradas en el resto de las unidades. Este comportamiento sugiere que, al menos para la fase 8, la resistencia del macizo rocoso tiende a disminuir de manera sistemática con la profundidad, mientras que los incrementos puntuales observados corresponden a variaciones menores que no modifican la tendencia general del conjunto de datos.

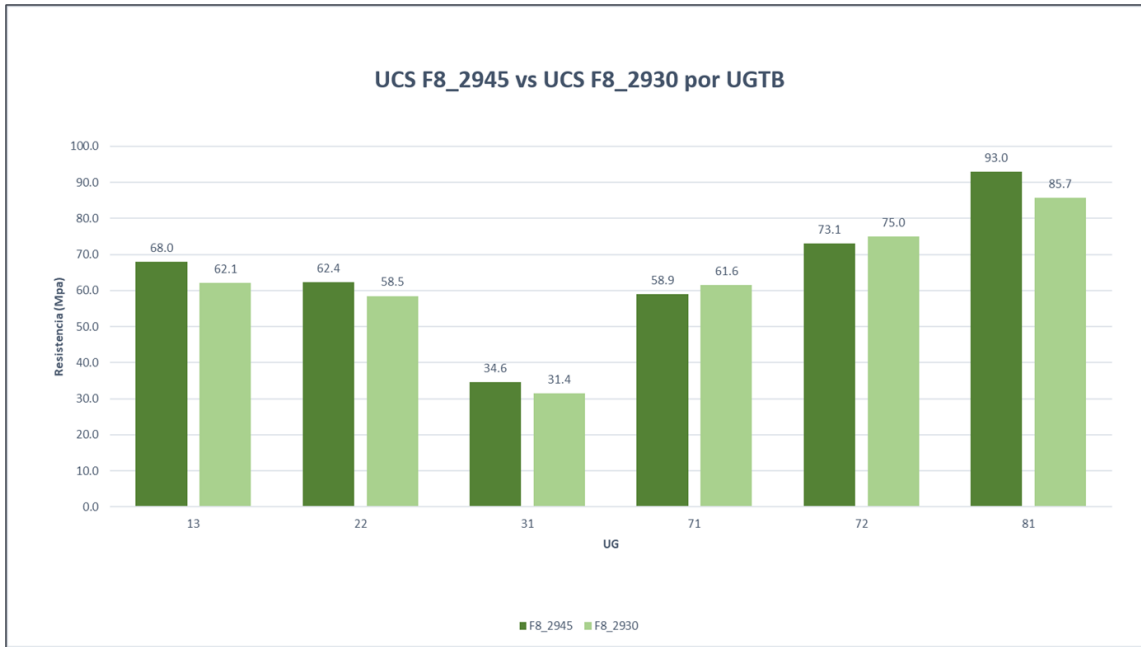


Figura 26. Comparación de la UCS promedio estimada entre los bancos 2945 y 2930 de la fase 8, por unidad geotécnica básica, mostrando una tendencia general a la disminución de la resistencia con la profundidad.

Sin embargo, estos resultados deben considerarse preliminares, dado que el análisis se basa en la comparación de un número limitado de bancos. Para validar de manera robusta esta tendencia, sería necesario incorporar información adicional de bancos superiores o inferiores con el fin de descartar efectos locales o condicionantes no capturados en el presente estudio.

Las tablas de propiedades generadas para cada banco, junto con sus respectivas planillas de consolidación por UGTB y los estadísticos descriptivos, se presentan de manera detallada en los Anexos.

6.5 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS UGTBs

Para representar la distribución espacial de las UGTBs (Figura 27) se integró la información obtenida a partir de los muestreos realizados en el presente estudio, complementado con los registros de mapeos de pozos ejecutados por personal de Enaex.

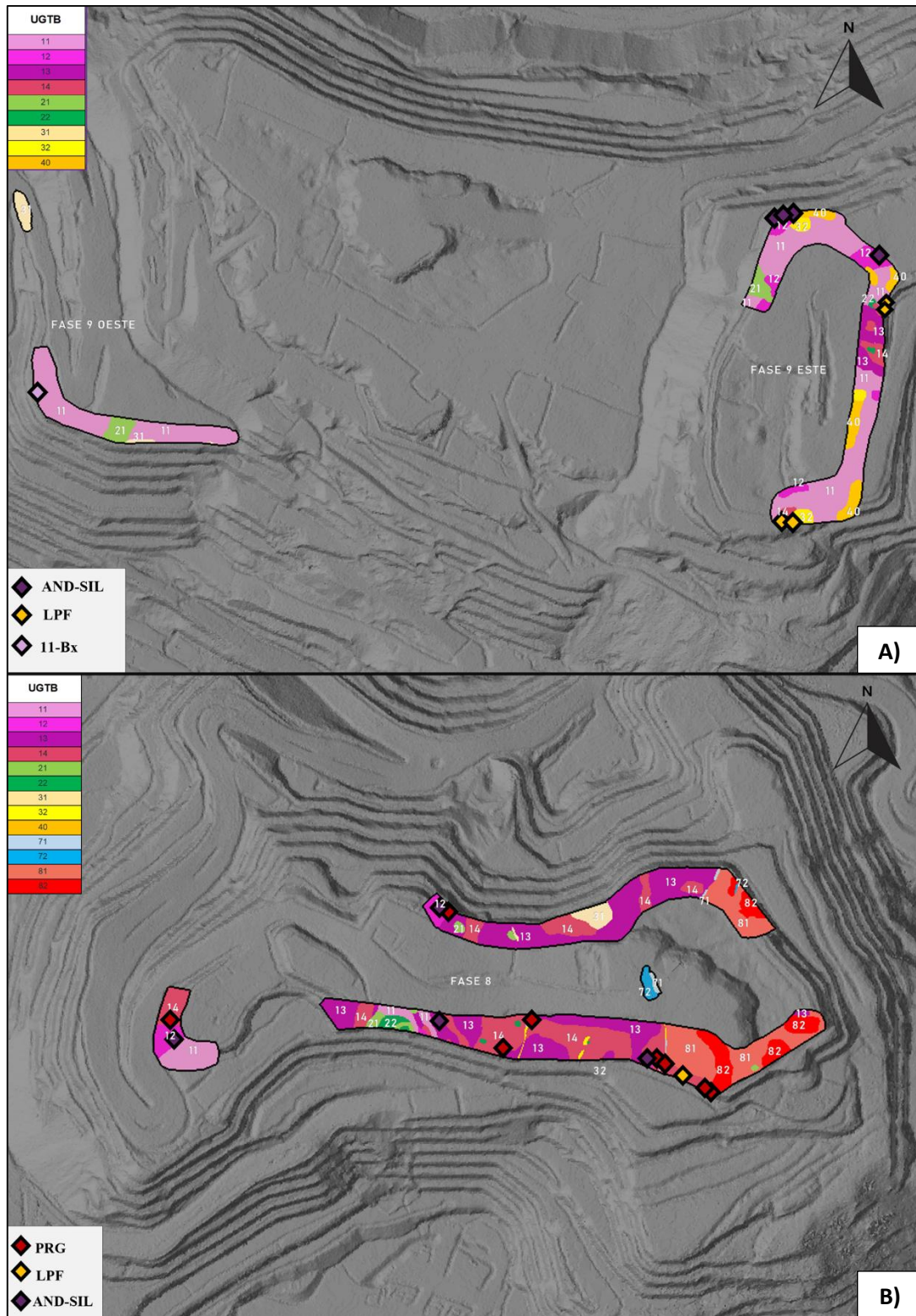


Figura 27. Distribución espacial de las UGTBs en Fase 9 (A) y Fase 8 (B). Se exhibe la ubicación de las UGTBs cercanas a zonas muestreadas. Cada unidad se representa por el color indicado en la leyenda, así mismo los rombos señalan puntos de muestreo con litologías específicas.

En Fase 9 Oeste predomina la UGTB-11, asociada principalmente a andesitas alteradas, además se observa la ubicación de la brecha hidrotermal descrita previamente en este estudio, señalada mediante un rombo rosado. En este sector as u vez se identifican afloramientos menores correspondientes a UGTB-21 y UGTB-31.

En Fase 9 Este aflora UGTB-11, UGTB-12, UGTB-13, UGTB-14, UGTB-21, UGTB-22, UGTB-23 y UGTB-40, siendo este el único sector donde se registraron muestras asociadas a UGTB-40. Se mantiene la predominancia de UGTB-11 vista hacia el oeste de la fase, con la diferencia de que en esta área corresponde a andesitas sin presencia de brechas. En el sector se observan puntos de muestreo donde se identificó LPF, asociados a UGTB-14, así como puntos donde se registró andesita silicificada. Estos símbolos representan únicamente los lugares donde se obtuvo muestreo directo de dichas litologías, por lo que su distribución en el mapa no implica que estas litologías estén restringidas exclusivamente a estos puntos, sino que corresponden a los sectores donde existe confirmación mediante muestreo.

En Fase 8 se observa una mayor complejidad en la distribución de las unidades geotécnicas, registrándose la presencia de UGTB-11, UGTB-12, UGTB-13, UGTB-14, UGTB-21, UGTB-22, UGTB-31, UGTB-32, UGTB-71, UGTB-72, UGTB-81 y UGTB-82, constituyendo la fase con mayor diversidad de unidades geotécnicas dentro del área estudiada. Los puntos de muestreo indican la presencia de PRG, LPF y andesita silicificada dentro de estas unidades. Desde el punto de vista espacial, se observa que hacia el sector oeste de Fase 8 predominan las unidades asociadas a UGTB-13 y UGTB-14, correspondientes a PRG y LPF, mientras que hacia el sector este predomina el pórfido Zaldívar, representado por UGTB-71, UGTB-72, UGTB-81 y UGTB-82.

Finalmente, la distribución espacial de las UGTB permite reconocer un patrón general de variación litológica en sentido occidente–oriente dentro del área estudiada. En el sector más occidental, correspondiente a Fase 9 Oeste, predominan las andesitas, las cuales se observan mayoritariamente sin asociación directa con pórfidos y se encuentran representadas principalmente por UGTB-11. Hacia el sector oriental de Fase 9, se mantiene la presencia dominante de andesitas, pero comienzan a aparecer los primeros pórfidos, representados por LPF asociado a UGTB-13 y UGTB-14, coexistiendo con las unidades andesíticas previamente descritas. Esta transición continúa hacia

Fase 8. En la zona occidental de esta fase se observa la coexistencia de andesitas y pórfidos, predominando los pórfidos asociados a UGTB-13 y UGTB-14, correspondientes a PRG y LPF. En contraste, hacia el sector oriental de Fase 8 se observa una predominancia casi absoluta del pórfido Zaldívar, representado por UGTB-81 y UGTB-82, mientras que la presencia de andesitas disminuye progresivamente en esta dirección. Adicionalmente, a lo largo de las tres fases se identifican unidades geotécnicas que presentan material fino o que potencialmente podrían generar finos durante su procesamiento, entre las que se incluyen UGTB-21, UGTB-22, UGTB-31, UGTB-32, UGTB-40, UGTB-71 y UGTB-72, las cuales aparecen de manera variable dentro de las zonas mapeadas.

7. DISCUSION

7.1. COEXISTENCIA DE POBLACIONES DE DISTINTA RESISTENCIA DENTRO DE UNA MISMA UGTB

Los resultados obtenidos a partir del análisis estadístico e histórico de la UCS evidencian que, en determinadas UGTB, coexisten poblaciones con respuestas mecánicas significativamente distintas. Este comportamiento es particularmente evidente en las UGTB-12 y UGTB-14, donde los histogramas y boxplots muestran distribuciones bimodales o con alta dispersión, sugiriendo la existencia de dos poblaciones de muestras con comportamientos diferentes en cuanto a su resistencia.

En el caso de la UGTB-12, la diferenciación entre andesitas silicificadas y andesitas con alteración Q>S explica el aumento de resistencia observado en ciertos subconjuntos de datos, coherente con el mayor contenido de cuarzo y la consecuente reducción de porosidad y aumento de competencia del macizo. De forma análoga, en la UGTB-14, la coexistencia de litologías PRG y LPF genera una respuesta mecánica heterogénea, donde las rocas con mayor desarrollo de fases silíceas tienden a concentrar los valores más altos de UCS.

Este patrón indica que la UGTB, como unidad de clasificación geotécnica, puede agrupar materiales con comportamientos mecánicos distintos cuando existe heterogeneidad litológica o de alteración, lo que se refleja directamente en la dispersión de los resultados de resistencia.

7.2. INFLUENCIA DE LA FASE OPERACIONAL Y PROFUNDIZACIÓN DEL BANCO

El análisis comparativo por fases operacionales muestra que las diferencias observadas en la UCS no responden exclusivamente a un efecto temporal u operacional, sino que están fuertemente condicionadas por la distribución de dominios litológicos y de alteración muestreados en cada fase. Si bien se identifican variaciones sistemáticas entre fases, destacando que la fase 9E presenta, en general, los valores medios de resistencia más bajos, estas diferencias no pueden interpretarse como un control único de la fase, sino como el reflejo de los materiales efectivamente expuestos y ensayados en cada etapa.

Cabe destacar que los dominios litológicos dominantes en una fase no son exclusivos de ella, sino que pueden presentarse, en menor proporción, en otras fases. Por ejemplo, se reconoce la presencia de LPF en fase 9 y de rocas porfíricas en fase 8, lo que refuerza la idea de que la fase operacional actúa como un marco de muestreo, pero no como el factor controlador primario de la resistencia. En este contexto, la aparente disminución de resistencia en fases más profundas o avanzadas debe interpretarse con cautela, considerando la combinación entre litología, alteración y representatividad del muestreo.

7.3. LIMITACIONES DEL ANÁLISIS

El análisis realizado presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados obtenidos. En primer lugar, si bien la clasificación litológica y de alteración permite explicar gran parte de la variabilidad observada en la UCS, esta se basa principalmente en descripciones macroscópicas, por lo que variaciones mineralógicas o texturales a escala microscópica podrían no estar completamente capturadas y contribuir a la dispersión de los valores de resistencia.

Por otra parte, la estimación de la resistencia a compresión uniaxial a partir de ensayos de carga puntual introduce incertidumbres asociadas al uso del factor de conversión K. En este estudio se utilizó un valor teórico de $K = 24$, adoptado conforme a las recomendaciones de la norma ASTM D5731-16 para casos en los que no se dispone de correlaciones locales entre UCS e I_{s50} . Sin embargo, K es un factor dependiente del tipo de roca y de las condiciones de ensayo, por lo que su aplicación uniforme puede generar desviaciones respecto de la resistencia real del material.

Cabe destacar que, cuando se dispone de ensayos de compresión uniaxial realizados sobre las mismas muestras, es posible determinar un valor de K específico mediante análisis estadístico, siguiendo los criterios propuestos por Ulusay et al. (2001) y Rusnak y Mark (2000). La ausencia de dicha calibración local constituye una limitación del presente trabajo y sugiere que futuras etapas podrían refinar aún más los resultados de UCS mediante la obtención de un factor K ajustado a las condiciones geológicas y geotécnicas para cada UGTB.

8. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones presentadas a continuación se basan en los valores de UCS estimados a partir de ensayos de carga puntual, los cuales permiten caracterizar la resistencia del material intacto. Sin embargo, es importante considerar que el comportamiento del macizo rocoso durante la tronadura no depende únicamente de la resistencia de la roca intacta, sino también del estado estructural del macizo, incluyendo la presencia de discontinuidades, grado de fracturamiento, diaclasamiento y fallamiento. Por lo tanto, los ajustes propuestos para el diseño de tronadura deben interpretarse como lineamientos basados en la resistencia, litología, alteración y mineralización del material, los cuales deben complementarse con la evaluación geomecánica del macizo rocoso en terreno.

8.1 RECOMENDACIONES OPERACIONALES PARA TRONADURA

Cuando durante el mapeo geológico de bancos se identifiquen sectores con mayor competencia del macizo rocoso, se recomienda considerar ajustes en los parámetros de diseño de tronadura, particularmente en burden, espaciamiento, distribución de carga explosiva y en caso de identificar estos incrementos luego del diseño de la malla, se recomienda la perforación de pozos auxiliares, con el objetivo de compensar la mayor resistencia del material y mantener condiciones adecuadas de fragmentación.

En el caso de la UGTB-11, se recomienda distinguir las brechas hidrotermales (Bx-11) del resto de las andesitas que componen la unidad. Cuando estas brechas sean identificadas durante el mapeo de banco, se sugiere tratarlas operativamente como una unidad independiente y utilizar los valores de resistencia definidos específicamente para esta litología.

Para la UGTB-12, se recomienda que durante el mapeo geológico se diferencien andesitas silicificadas de aquellas con alteración $Q>S$, registrando el porcentaje de cuarzo en estas últimas. En sectores donde se identifiquen andesitas silicificadas, se sugiere considerar los valores máximos de UCS definidos para la unidad, debido a la mayor competencia asociada al aumento del contenido de sílice.

En la UGTB-14, se recomienda distinguir entre pórfido riolítico grueso y LPF. Cuando se identifique PRG, se sugiere utilizar valores medios a máximos de UCS, mientras que en sectores dominados por LPF se recomienda considerar valores medios a mínimos, reflejando así la diferencia de competencia observada entre ambas litologías.

8.2 RECOMENDACIONES PARA LA CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Los resultados indican que algunas UGTB agrupan materiales con comportamientos mecánicos distintos, lo que se refleja en una mayor dispersión de los valores de resistencia. En este contexto, se propone la diferenciación y redefinición de algunas UGTB.

En el caso de la UGTB-14, se recomienda diferenciar las litologías PRG y LPF, creando una nueva unidad independiente únicamente para los pórfidos riolíticos gruesos, debido a las diferencias de resistencia observadas entre ambas litologías. Alternativamente, en caso de preferirse mantener un número reducido de unidades geotécnicas, los resultados de este estudio sugieren que una aproximación válida consiste en utilizar valores mínimos a medios de UCS para LPF y valores medios a máximos para PRG, como se sugiere anteriormente.

Para la UGTB-11, se recomienda excluir las brechas hidrotermales de la definición de la unidad, manteniendo esta UGTB compuesta únicamente por andesitas. Esta modificación permitiría reducir la dispersión de los valores de resistencia observados en esta unidad, considerando que las brechas presentan un comportamiento mecánico significativamente distinto al resto de las litologías presentes. Los resultados obtenidos indican que ambas litologías pueden comportarse como poblaciones de resistencia diferenciables, por lo que su separación contribuiría a una mejor representación de los rangos mínimo, medio y máximo de UCS asociados a cada dominio.

En conjunto con lo anterior, se recomienda definir una nueva unidad geotécnica específica para las brechas hidrotermales. Esta unidad se caracterizaría por litología de brechas, alteración SIL/Q>S/POT y mineralización secundaria. En el contexto de este estudio, estas brechas presentan valores de UCS superiores al resto de las litologías de la UGTB-11, lo que justifica su tratamiento como una unidad independiente. Si bien sería posible evaluar en el futuro una subdivisión adicional en función del tipo de mineralización (primaria/secundaria), el presente estudio no cuenta con observaciones de brechas con mineralización primaria que permitan sustentar dicha diferenciación.

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió caracterizar el comportamiento mecánico del macizo rocoso a partir de la estimación de la UCS mediante ensayos de carga puntual, integrando información litológica, de alteración y de fase operacional para distintas UGTB. Los resultados obtenidos evidencian un aumento general de los valores de UCS en unidades geotécnicas con alteración Q>S y/o silicificación, en comparación con los valores históricos utilizados en la faena. Este incremento sugiere que las estimaciones previas de resistencia podrían subestimar la competencia real de algunos dominios del macizo rocoso.

En la UGTB-11 se identifica la presencia de brechas hidrotermales con valores de UCS significativamente superiores al promedio de la unidad, lo que indica que estas litologías presentan un comportamiento mecánico distinto al de las andesitas dominantes dentro de la misma UGTB. Esta diferencia sugiere que la inclusión de ambas litologías dentro de una misma unidad geotécnica puede generar una mayor dispersión en los valores de resistencia.

Dentro de la UGTB-12, se observa una diferencia clara en el comportamiento mecánico entre litologías que pertenecen a una misma unidad geotécnica. En particular, las andesitas con alteración Q>S presentan menores valores de resistencia que las andesitas silicificadas, lo que evidencia que el grado de silicificación constituye un factor relevante en el control de la resistencia de la roca.

En la UGTB-14, los pórfidos riolíticos gruesos (PRG) presentan valores de resistencia mayores que los observados en LPF, a pesar de que ambas litologías corresponden a una misma unidad geotécnica y presentan un tipo de alteración similar. Esta diferencia se interpreta principalmente como consecuencia del mayor contenido de cuarzo presente en los PRG, lo que incrementa la competencia mecánica de estas rocas.

El análisis comparativo entre fases indica que las variaciones de resistencia observadas se asocian principalmente a cambios en los dominios litológicos y/o de alteración presentes en cada fase, más que a una variación espacial o operacional propia de la fase minera. En este sentido, la distribución de las litologías muestreadas dentro de cada fase constituye el principal factor que controla las diferencias observadas en los valores de UCS.

Finalmente, no se logra establecer una relación clara entre la resistencia de la roca y la profundidad dentro de una misma fase, lo que sugiere que el comportamiento mecánico del macizo rocoso está controlado principalmente por factores litológicos y de alteración, más que por un gradiente vertical asociado a la profundización del rajo.

En este contexto, los resultados obtenidos constituyen un aporte directo a la optimización del proceso de tronadura desde la perspectiva de Enaex, al proporcionar una caracterización más robusta y actualizada de la resistencia del macizo rocoso basada en ensayos PLT. La integración del análisis estadístico de la UCS, la identificación de dominios de comportamiento mecánico diferenciados y su relación con las fases operacionales permite reducir la incertidumbre asociada a la estimación de parámetros clave para el diseño de tronaduras, tales como offset, burden, espaciamiento y tipo de explosivo. Asimismo, la metodología desarrollada establece una base técnica para futuras calibraciones del factor de conversión PLT–UCS y su incorporación en herramientas de apoyo a la toma de decisiones operacionales, fortaleciendo la planificación y el control de tronaduras.

REFERENCIAS

- Amilibia, A., Sábata, F., McClay, K., Muñoz, J. A., Roca, E., & Chong, G. (2008). The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean mountain belt: Insights from the Cordillera de Domeyko. *Journal of Structural Geology*, 30(11), 1520–1539. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.09.002>
- ASTM International. (2014). ASTM D7012-14: Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D7012-14>
- ASTM International. (2016). ASTM D5731-16: Standard test method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classification. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D5731-16>
- Bieniawski, Z. T. (1975). The point load test in geotechnical practice. *Rock Mechanics*, 7(2), 97–107. <https://doi.org/10.1007/BF01239445>
- Broch, E., & Franklin, J. A. D. (1972). The point-load strength test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9(6), 669–697. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(72\)90030-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90030-7)
- Enaex S.A. (2024). Procedimiento de obtención y preparación de muestras para ensayos de laboratorio. Documento interno no publicado, Área de Geotecnia y P&T, Minera Zaldívar.
- Enaex S.A. (2024). Procedimiento de ensayo de carga puntual (PLT). Documento interno no publicado, Área de Geotecnia y P&T, Minera Zaldívar.
- Flores, M., & Tinoco, J. (2019). Manual de ensayos de laboratorio para geotecnia. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Geología Zaldívar. (2023). Modelo geológico del yacimiento Zaldívar. Documento interno no publicado, Minera Zaldívar.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (1997). *Engineering rock mechanics: An introduction to the principles*. Oxford: Pergamon.
- ISRM. (1985). Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 22(2), 51–60.
- Mella, D. (2025). *Validación de los rangos de resistencia del macizo rocoso del Rajo Zaldívar a partir de ensayos de carga puntual (PLT)*. Memoria de título, Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Ciencias de la Tierra.

- Mpodozis, C., & Cornejo, P. (2012). Cenozoic tectonics and porphyry copper systems of the Chilean Andes. In Sillitoe, R. H. et al. (Eds.), *Society of Economic Geologists Special Publication 16* (pp. 329–360).
- Nielsen, K., & Malvik, T. (1999). *Grindability enhancement by blast-induced microcracks*. *Powder Technology*, 105(1–3), 52–56. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00117-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00117-5)
- Perelló, J., Kojima, S., Muhr, R., & Bisso, D. (2018). Geologic controls on hypogene enrichment at the Zaldívar copper deposit, Northern Chile. *Economic Geology*, 113(2), 375–398. <https://doi.org/10.5382/SP.21.12>
- Sillitoe, R. H. (2010). *Porphyry copper systems*. **Economic Geology**, 105(1), 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Singh, B., & Goel, R. K. (1999). *Rock mass classification: A practical approach in civil engineering*. Amsterdam: Elsevier.
- SRK Consulting. (2023). *Modelo geotécnico y estructural del rajo Zaldívar, Rev. B. Documento técnico interno, Minera Zaldívar*.
- Ulusay, R. (2001). An empirical equation for strength conversion between UCS and point load index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(5), 749–752. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(01\)00035-8](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00035-8)
- Ulusay, R., Hudson, J. A., & International Society for Rock Mechanics (ISRM). (2001). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006*. Ankara: Turkish National Group.

ANEXO

INDICE ANEXO

Anexo 1: Planilla tipo de registro de muestras.	75
Anexo 2: Planilla tipo de Ensayo de Carga Puntual (PLT)	76
Anexo 3: Planilla de Consolidación por UGTB. Los números no representan datos reales, son únicamente para verificar su funcionamiento.....	76
Anexo 5: Planilla de Consolidación por UGTB para F8.....	77
Anexo 6. Tabla propiedades F8	78
Anexo 7. Planilla de Consolidación por UGTB para F8_2945	78
Anexo 8. Planilla de Consolidación por UGTB para F8_2930	78
Anexo 9. Planilla de Consolidación por UGTB para F9E	79
Anexo 10. Tabla propiedades F9E	80
Anexo 11. Planilla de Consolidación por UGTB para F9W	80
Anexo 12. Tabla propiedades F9W.....	80
Anexo 13. Planilla completa de registro datos ensayo PLT.	82

Anexo 1: Planilla tipo de registro de muestras.

DESCRIPCIÓN MUESTRAS ENSAYOS PLT				
Objetivo del estudio:		ID_MUESTRA		
Registro de muestras para ensayos PLT, descripción macroscópica.		Ubicación		
		Litología		
		Alteración		
		Mineralización		
		UGTB		
Procedencia Exacta:	Coord. Norte	Coord. Este	Elevación	
Procedencia de la muestra:	Fecha de obtención:	Fecha de ensayo:		
Registro Fotográfico				
A) 0°	B) 60°		C) 120°	
D) 180° desde C)	E) Ensayo		F) Fractura	
	Observación Macroscópica			
Clasificación				
Resultados	IS(50) CALCULADO (MPa)	UCS CALCULADO(MPa)	UCS en base a modelo UGT (MPa)	CLASIFICACIÓN ISRM
Autor		Fecha		
José Henríquez Rodríguez				

Anexo 4: Planilla de Consolidación por UGTB para F8.

UG	Media	Error típico	Mediana	Desviación Estandar	Curtosis	Asimetría	Rango	Min	Max	Muestras
11	66.3	13.9	65.7	13.9	0.41	0.51	52.7	43.4	96.1	15
12	103.0	39.4	89.8	39.4	0.30	1.12	130.9	54.2	185.1	12
13	59.8	18.7	62.1	18.7	1.03	-0.69	44.7	35.1	79.8	4
14	117.3	23.9	118.1	23.9	-1.04	-0.20	92.4	66.8	159.2	42
21	42.3	18.5	42.3	18.5			26.2	29.2	55.4	2
22	60.8	17.6	60.5	17.6	0.08	-0.81	49.3	29.8	79.1	7
31	34.6	7.2	34.0	7.2	-0.55	0.06	23.2	23.3	46.5	11
32	42.3	20.0	42.3	20.0			28.3	28.2	56.5	2
40										
50										
60										
71	59.2	8.9	60.6	8.9	-0.60	-0.30	31.0	41.6	72.5	14
72	82.5	22.3	81.4	22.3	0.68	-0.44	90.3	33.0	123.3	15
81	94.4	33.3	88.2	33.3	0.59	0.60	143.6	29.8	173.4	27
82	113.0	36.5	110.7	36.5	0.21	0.63	152.5	54.3	206.8	47
90										
100										

Anexo 5. Tabla propiedades F8

PROPIEDADES Fase 8							
LIT	ALT	MIN	UG		UCS Mínima	UCS	UCS Máxima
					(MPa)	(MPa)	(MPa)
AND/BX	Q>S/POT/SIL	SEC	11	UG-01A			
		PRIM	12	UG-01B	54.2	103.0	185.1
LP(LPY-LPT-LPF)/PRG	Q>S/POT/SIL	SEC	13	UG-01C	35.1	59.8	79.8
		PRIM	14	UG-01D	66.8	117.3	159.2
AND/LP(LPY-LPT-LPF)/ BX (BXA-BXB-BXC-BXP)/ PRG	CLO	SEC	21	UG-02A	29.2	42.3	55.4
		PRIM	22	UG-02B	29.8	60.8	79.1
	ARG/Q<S/SER	SEC	31	UG-03A	23.3	34.6	46.5
		PRIM	32	UG-03B	28.2	42.3	56.5
	BIO	SEC	40	UG-04			
		PRIM	50	UG-05			
ZPY	Q<S/SER/CLO/ARG	SEC (LIX)	60	UG-06			
	Q<S/SER/CLO/ARG	SEC (SSE/OXI/MIX)	71	UG-07A	41.6	59.2	72.5
	Q<S/CLO	PRIM	72	UG-07B	33.0	82.5	123.3
	Q>S/SIL/POT/BIO	SEC	81	UG-08A	29.8	94.4	173.4
PRIM		82	UG-08B	54.3	113.0	206.8	
GGB	Q>S/CLO/POT/BIO	PRIM	90	UG-09			
SCG	-		100	UG10			

Anexo 6. Planilla de Consolidación por UGTB para F8_2945

UG	Media	Error típico	Mediana	Desviación Estandar	Curtosis	Asimetría	Rango	Min	Max	Muestras
11										
12	115.0	48.7	92.8	48.7	-1.66	0.32	130.9	54.2	185.1	7
13	68.0	10.9	65.9	10.9		0.85	21.4	58.4	79.8	3
14	119.7	29.8	120.3	29.8	0.61	-0.32	139.6	40.1	179.8	34
21										
22	73.9	21.5	74.3	21.5	-0.85	-1.01	49.3	29.8	79.1	6
31	34.6	7.2	34.0	7.2	-0.55	0.06	23.2	23.3	46.5	11
32	42.3	20.0	42.3	20.0			28.3	28.2	56.5	2
40										
50										
60										
71	58.9	9.0	58.7	9.0	-0.69	-0.19	31.0	41.6	72.5	14
72	73.1	10.0	74.4	10.0	1.61	-1.19	31.3	52.9	84.2	8
81	98.9	20.2	86.5	20.2	0.10	0.69	74.3	58.4	132.7	18
82	128.2	34.2	118.4	34.2	-0.12	0.57	134.3	72.5	206.8	23
90										
100										

Anexo 7. Planilla de Consolidación por UGTB para F8_2930

UG	Media	Error típico	Mediana	Desviación Estandar	Curtosis	Asimetría	Rango	Min	Max	Muestras
11	66.3	13.9	65.7	13.9	0.41	0.51	52.7	43.4	96.1	15
12										
13	62.1	5.3	62.1	5.3			7.5	58.4	65.9	2
14										
21										
22	58.5	2.9	58.5	2.9			4.2	56.4	60.5	2
31	31.4	5.2	33.3	5.2	-1.36	-0.50	14.3	23.3	37.6	8
32										
40										
50										
60										
71	62.6	6.1	63.0	6.1	-1.13	-0.51	16.1	53.4	69.5	8
72	75.0	6.3	74.4	6.3	-0.29	0.15	17.9	66.3	84.2	6
81	85.7	12.6	84.0	12.6	4.73	1.96	42.0	74.1	116.1	9
82										
90										
100										

Anexo 8. Planilla de Consolidación por UGTB para F9E

UG	Media	Error típico	Mediana	Desviación Estandar	Curtosis	Asimetría	Rango	Min	Max	BV
11	70.2	26.9	68.5	26.9	-1.05	-0.02	91.7	21.9	113.6	19
12	125.8	38.3	139.2	38.3	-1.67	-0.19	104.0	68.8	172.8	11
13	61.1	11.4	63.8	11.4	2.40	-1.29	26.8	45.1	71.8	4
14	96.1	17.0	94.6	17.0	-1.00	0.05	57.3	66.3	123.6	18
21	47.2	13.0	48.4	13.0	-1.05	-0.21	34.7	29.9	64.7	7
22	54.7	19.4	61.1	19.4	-1.45	-0.43	55.6	23.1	78.6	15
31										
32	44.0	11.4	44.0	11.4			16.1	36.0	52.0	2
40	31.8	5.9	32.2	5.9	4.44	-1.50	24.6	16.2	40.8	12
50										
60										
71										
72										
81										
82										
90										
100										

Anexo 9. Tabla propiedades F9E

PROPIEDADES Fase 9E							
LIT	ALT	MIN	UG		UCS Mínima	UCS	UCS Máxima
					(MPa)	(MPa)	(MPa)
AND/BX	Q>S/POT/SIL	SEC	11	UG-01A	21.9	70.2	113.6
		PRIM	12	UG-01B	68.8	125.8	172.8
LP(LPY-LPT-LPF)/PRG	Q>S/POT/SIL	SEC	13	UG-01C	45.1	61.1	71.8
		PRIM	14	UG-01D	66.3	96.1	123.6
AND/LP(LPY-LPT-LPF)/ BX (BXA-BXB-BXC-BXP)/ PRG	CLO	SEC	21	UG-02A	29.9	47.2	64.7
		PRIM	22	UG-02B	23.1	54.7	78.6
	ARG/Q<S/SER	SEC	31	UG-03A	0.0		0.0
		PRIM	32	UG-03B	36.0	44.0	52.0
	BIO	SEC	40	UG-04	16.2	31.8	40.8
		PRIM	50	UG-05			
ZPY	Q<S/SER/CLO/ARG	SEC (LIX)	60	UG-06			
	Q<S/SER/CLO/ARG	SEC (SSE/OXI/MIX)	71	UG-07A	0.0		0.0
	Q<S/CLO	PRIM	72	UG-07B	0.0		0.0
	Q>S/SIL/POT/BIO	SEC	81	UG-08A	0.0		0.0
PRIM		82	UG-08B	0.0	0.0	0.0	
GGB	Q>S/CLO/POT/BIO	PRIM	90	UG-09			
SCG	-		100	UG10			

Anexo 10. Planilla de Consolidación por UGTB para F9W

UG	Media	Error típico	Mediana	Desviación Estandar	Curtosis	Asimetría	Rango	Min	Max	BV
11.0	58.2	16.3	53.2	16.3	0.27	0.76	62.9	30.5	93.3	17
12.0										
13.0	87.5	16.1	85.1	16.1	1.20	0.66	47.9	66.3	114.2	6
14.0										
21.0	41.8	13.9	43.4	13.9	-1.10	-0.04	39.5	24.0	63.5	9
22.0										
31.0	37.8	23.6	34.6	23.6	-4.25	0.30	47.5	17.2	64.8	4
32.0										
40.0										
50.0										
60.0										
71.0										
72.0										
81.0										
82.0										
90.0										
100.0										

Anexo 11. Tabla propiedades F9W

PROPIEDADES Fase 9W							
LIT	ALT	MIN	UG		UCS Mínima	UCS	UCS Máxima
					(MPa)	(MPa)	(MPa)
AND/BX	Q>S/POT/SIL	SEC	11	UG-01A	30.5	58.2	93.3
		PRIM	12	UG-01B	0.0		0.0
LP(LPY-LPT-LPF)/PRG	Q>S/POT/SIL	SEC	13	UG-01C	66.3		114.2
		PRIM	14	UG-01D	0.0	0.0	0.0
AND/LP(LPY-LPT-LPF)/ BX (BXA-BXB-BXC-BXP)/ PRG	CLO	SEC	21	UG-02A	24.0	41.8	63.5
		PRIM	22	UG-02B	0.0		0.0
	ARG/Q<S/SER	SEC	31	UG-03A	17.2	37.8	64.8
		PRIM	32	UG-03B	0.0		0.0
	BIO	SEC	40	UG-04	0.0		0.0
		PRIM	50	UG-05	0.0		0.0
ZPY	Q<S/SER/CLO/ARG	SEC (LIX)	60	UG-06	0.0		0.0
	Q<S/SER/CLO/ARG	SEC (SSE/OXI/MIX)	71	UG-07A	0.0		0.0
	Q<S/CLO	PRIM	72	UG-07B	0.0		0.0
	Q>S/SIL/POT/BIO	SEC	81	UG-08A	0.0		0.0
		PRIM	82	UG-08B	0.0		0.0
GGB	Q>S/CLO/POT/BIO	PRIM	90	UG-09	0.0		0.0
SCG	-		100	UG10	0.0		0.0

1	0.011624	2521.014299	50.209703	4.610716	1.001885	4.619408	106.2464	BV	INGEROC MCP-01D
2	0.012404	2383.504428	48.821147	5.204169	0.989321	5.148592	118.4176	BV	INGEROC MCP-01D
3	0.008057	1527.887454	39.088201	5.273477	0.895126	4.720425	108.5698	BV	INGEROC MCP-01D
4	0.006655	1082.253613	32.897623	6.148947	0.828300	5.093171	117.1429	BV	INGEROC MCP-01D
5	0.010082	1833.464944	42.818979	5.498834	0.932610	5.128285	117.9501	MI	Rompe por estructura.
6	0.009571	1833.464944	42.818979	5.220280	0.932610	4.868483	111.9751	BV	INGEROC MCP-01D
1	0.003426	1271.966305	35.664637	2.693666	0.858955	2.313730	53.2158	BV	INGEROC MCP-01D
2	0.005221	2342.760762	48.402074	2.228755	0.985490	2.196416	50.5176	BV	INGEROC MCP-01D
3	0.003550	1026.231073	32.034842	3.439693	0.818453	2.815227	64.7502	BV	INGEROC MCP-01D
4	0.006507	1578.817035	39.734331	4.121364	0.901754	3.716457	85.4785	MI	Parcial
5	0.003160	1375.098708	37.082333	2.998250	0.874155	2.009027	46.2076	MI	Ventilla de clorita
6	0.005080	1589.002952	39.862300	3.197175	0.903060	2.887240	66.4065	BV	INGEROC MCP-01D
7	0.012856	3393.183387	58.251038	3.788867	1.071150	4.058443	93.3442	BV	INGEROC MCP-01D
1	0.003607	1833.464944	42.818979	1.967161	0.932610	1.834593	42.1956	BV	INGEROC MCP-01D
2	0.001765	1507.515621	38.826738	1.171092	0.892426	1.045114	24.0376	BV	INGEROC MCP-01D
3	0.003564	1298.704336	36.037541	2.744643	0.862985	2.368586	54.4775	BV	INGEROC MCP-01D
4	0.009467	3758.603136	61.307448	2.518638	1.096086	2.760643	63.4948	BV	INGEROC MCP-01D
5	0.008611	4481.803197	66.946271	1.921370	1.140356	2.191045	50.3940	BV	INGEROC MCP-01D
6	0.002518	2291.831181	47.873074	1.098720	0.980629	1.077436	24.7810	BV	INGEROC MCP-01D
7	0.001628	1145.915590	33.851375	1.419162	0.839021	1.190707	27.3863	BV	INGEROC MCP-01D
8	0.003646	1792.721279	42.340539	2.033824	0.927906	1.887197	43.4055	BV	INGEROC MCP-01D
1	0.011257	3155.087592	56.170166	3.567876	1.053758	3.759679	86.4726	BV	INGEROC MCP-01D
2	0.006903	1871.662311	43.262711	3.688388	0.936946	3.455793	79.4832	BV	INGEROC MCP-01D
3	0.007677	1861.476214	43.144828	4.124211	0.935797	3.859422	88.7667	MI	Ventilla de clorita
4	0.005631	1818.186070	42.640193	3.097241	0.930855	2.883083	66.3109	BV	INGEROC MCP-01D
5	0.014100	4392.676429	66.277629	1.35214	1.167234	3.643785	83.8070	BV	INGEROC MCP-01D
6	0.021139	4970.727183	70.503394	4.252738	1.167234	4.963941	114.1706	BV	INGEROC MCP-01D
7	0.012036	3340.980565	57.801216	3.602382	1.067420	3.845283	88.4410	MI	Ventilla de clorita
8	0.013076	3393.183387	58.251038	3.853656	1.071150	4.127842	94.9404	BV	INGEROC MCP-01D
1	0.002313	2956.462223	54.373359	0.782232	1.038454	0.812312	18.6832	BV	INGEROC MCP-01D
2	0.001203	1413.295895	37.593828	0.851117	0.879561	0.748609	17.2180	BV	INGEROC MCP-01D
3	0.007856	3947.042589	62.825493	1.990270	1.108217	2.205650	50.7300	BV	INGEROC MCP-01D
4	0.006087	3549.791851	59.580130	1.714850	1.082079	1.855604	42.6789	BV	INGEROC MCP-01D
5	0.003976	1818.186070	42.640193	2.186971	0.930855	2.035753	46.8223	BV	INGEROC MCP-01D
6	0.007922	2692.901637	51.893175	2.941778	1.016865	2.991390	68.8020	BV	INGEROC MCP-01D
7	0.006814	2941.183348	54.232678	2.316782	1.037244	2.403068	55.2706	BV	INGEROC MCP-01D
1	0.002662	1489.690267	38.596506	1.787002	0.890041	1.590506	36.5816	BV	INGEROC MCP-01D
2	0.004524	2566.850922	50.664099	1.762658	1.005955	1.773155	40.7826	BV	INGEROC MCP-01D
3	0.003198	2521.014299	50.209703	1.268442	1.001885	1.270833	29.2292	BV	INGEROC MCP-01D
4	0.002629	1925.138192	43.876397	1.365845	0.942904	1.287860	29.6208	BV	INGEROC MCP-01D
5	0.002594	1787.628231	42.280354	1.451040	0.927312	1.345567	30.9480	BV	INGEROC MCP-01D
6	0.004248	3529.420018	59.408922	1.203597	1.080679	1.300702	29.9162	BV	INGEROC MCP-01D
7	0.002654	2094.479051	45.765479	1.267332	0.960961	1.217856	28.0107	BV	INGEROC MCP-01D
8	0.005622	1874.208610	43.292131	2.999538	0.937233	2.811266	64.6591	BV	INGEROC MCP-01D
9	0.002123	3178.005904	56.373805	1.055476	1.055476	0.704942	16.2137	BV	INGEROC MCP-01D
1	0.007561	1566.084640	39.573787	4.827938	0.900113	4.345689	99.9508	BV	INGEROC MCP-01D
2	0.006251	2648.338253	51.462008	2.360182	1.013054	2.390991	54.9928	BV	INGEROC MCP-01D
3	0.003704	1884.394526	43.409613	1.965448	0.938377	1.844331	42.4196	BV	INGEROC MCP-01D
4	0.010797	3300.236900	57.447688	3.271620	1.064477	3.482563	80.0989	BV	INGEROC MCP-01D
5	0.007601	2994.659409	54.723481	2.538279	1.041458	2.638510	60.8007	BV	INGEROC MCP-01D
6	0.009141	3259.493235	57.091972	2.804460	1.061506	2.976950	68.4699	BV	INGEROC MCP-01D
7	0.004385	3475.943957	58.957137	1.261608	1.076973	1.358718	31.2505	BV	INGEROC MCP-01D
8	0.006132	2401.329781	49.003365	2.553385	0.990981	2.530355	58.1982	BV	INGEROC MCP-01D
9	0.008778	2444.619926	49.443098	3.590840	0.994972	3.572787	82.1741	BV	INGEROC MCP-01D

	1	22	72	46	0.6389	11.14	0.010693	4216.969372	64.938197	2.535812	1.124834	2.852368	65.6045	BV		INGEROC MCP-01D
PE_2885_09_81	2	21	58	39	0.6724	7.52	0.007219	2880.067850	53.666284	2.506608	1.032355	2.587709	59.5173	BV		INGEROC MCP-01D
	3	22	54	41	0.7593	4.53	0.004344	2618.952352	53.093807	1.540988	1.027365	1.583198	36.4136	MI	Ruptura en forma de cuña	INGEROC MCP-01D
	4	12	41	35	0.8537	7.90	0.007588	1627.098747	42.744576	4.152945	0.931880	3.870046	89.0111	BV		INGEROC MCP-01D
	5	11	55	42	0.7636	8.89	0.008534	2941.183348	54.232674	2.901689	1.037244	3.009760	69.2245	BV		INGEROC MCP-01D
	6	21	51	34	0.6667	3.23	0.003103	2207.797371	46.987204	1.405346	0.972421	1.366588	31.4315	BV		INGEROC MCP-01D
	7	21	42	30	0.7143	3.72	0.003575	1604.281826	40.053487	2.228436	0.905006	2.016749	46.3852	BV		INGEROC MCP-01D
	8	13	51	31	0.6078	4.32	0.004143	2012.991720	44.866310	0.952419	1.960373	45.0886		BV		INGEROC MCP-01D
PE_2885_07_14	1	13	54	49	0.9074	10.25	0.009841	3368.991835	58.043017	2.921040	1.069427	3.123838	71.8483	BV		INGEROC MCP-01D
	3	13	54	41	0.7593	7.84	0.007522	2818.952352	53.093807	2.668225	1.027365	2.741295	63.0498	BV		INGEROC MCP-01D
	4	13	50	46	0.9200	8.26	0.007928	2928.450953	54.115164	2.707124	1.036232	2.805209	64.5198	BV		INGEROC MCP-01D
	5	12	49	45	0.9184	5.79	0.005562	2807.493196	52.985783	1.981212	1.026444	2.033603	46.7729	BV		INGEROC MCP-01D
	6	12	52	30	0.5769	7.56	0.007258	1986.253690	44.567406	3.653914	0.949588	3.469602	79.8008	MI	Por vetilla de cuarzo	INGEROC MCP-01D
	7	12	47	43	0.9149	7.97	0.007649	2573.217120	50.728888	2.972682	1.006516	2.992022	68.8165	BV		INGEROC MCP-01D
	8	32	54	44	0.8148	6.83	0.006558	3025.217158	55.001974	2.167899	1.043859	2.262730	52.0428	BV		INGEROC MCP-01D
9	32	36	31	0.8611	2.63	0.002524	1420.935332	37.695296	1.776182	0.880628	1.564157	35.9756	BV		INGEROC MCP-01D	
PE_2885_08_81	1	40	44	40	0.9091	3.54	0.003401	2240.901599	47.338162	1.517818	0.975683	1.480908	34.0609	BV		INGEROC MCP-01D
	2	40	34	30	0.8824	2.21	0.002124	1298.704336	36.037541	1.635107	0.862965	1.411073	32.4547	BV		INGEROC MCP-01D
	3	40	50	37	0.7400	3.91	0.003751	2355.493158	48.534233	1.592329	0.986683	1.571139	36.1362	BV		INGEROC MCP-01D
	4	40	36	30	0.8333	2.34	0.002248	1375.098708	37.082323	1.635024	0.874155	1.429265	32.8731	BV		INGEROC MCP-01D
	5	40	43	34	0.7907	2.88	0.002767	1861.476214	43.144828	1.466304	0.935797	1.390878	31.9902	BV		INGEROC MCP-01D
	6	40	40	31	0.7750	2.41	0.002315	1578.817035	39.734331	1.466009	0.901754	1.321980	30.4055	BV		INGEROC MCP-01D
	7	14	40	36	0.9000	6.54	0.006274	1833.464944	42.818979	3.421718	0.932610	3.19127	73.3959	BV		INGEROC MCP-01D
PE_2845_04_71	1	14	37	34	0.9189	9.31	0.008940	1601.735347	40.021686	5.581746	0.904683	5.049711	116.1433	BV		INGEROC MCP-01D
	2	14	40	37	0.8843	12.34	0.011848	2597.046671	50.964779	4.561593	1.008637	4.609228	105.8228	BV		INGEROC MCP-01D
	3	14	51	40	0.7143	8.67	0.008325	1914.952275	43.760168	4.347429	0.941779	4.094318	94.1693	BV		INGEROC MCP-01D
	4	14	47	32	0.6809	8.67	0.008629	2330.028367	48.270367	3.703577	0.984283	3.645366	83.8434	BV		INGEROC MCP-01D
	1	11	61	30	0.4918	8.99	0.006829	2034.397478	45.106948	3.998748	0.954713	3.817659	87.8061	BV		INGEROC MCP-01D
	2	11	47	34	0.7234	8.48	0.008136	2034.397478	45.106948	3.998748	0.954713	3.817659	87.8061	BV		INGEROC MCP-01D
	3	11	62	44	0.7097	9.38	0.009004	3473.397478	58.935537	2.592229	1.076796	2.791300	64.1999	MI	Rompe en diagonal	INGEROC MCP-01D
PE_2885_02_81	4	11	57	40	0.7018	13.31	0.012777	2902.986162	53.879367	4.401206	1.034198	4.551718	104.6895	BV		INGEROC MCP-01D
	5	11	60	47	0.7833	5.60	0.005376	3590.535516	59.921077	1.497270	1.084862	1.624330	37.3596	MI	Estructura preexistente	INGEROC MCP-01D
	6	11	50	36	0.7200	12.02	0.011543	2291.831811	47.873074	5.036601	0.980629	4.939036	113.5978	BV		INGEROC MCP-01D
	1	22	43	25	0.5814	6.05	0.005808	1368.732511	36.996385	4.243342	0.873243	85.2258	BV		INGEROC MCP-01D	
	2	22	35	25	0.7143	8.99	0.008629	1114.084602	33.377906	7.745767	0.833720	6.457759	148.5294	MI	Vetilla de cuarzo	INGEROC MCP-01D
	3	22	25	22	0.8800	3.01	0.002889	700.281750	26.462837	4.124988	0.751017	3.097922	71.2522	BV		INGEROC MCP-01D
	4	22	45	26	0.5778	4.78	0.004590	1489.690267	38.596506	3.081016	0.890041	2.742231	63.0713	BV		INGEROC MCP-01D
F9_2945_33 C	1	14	57	31	0.5439	12.757	0.012247	2249.814276	47.432207	5.443436	0.976555	5.315812	122.2637	BV		INGEROC MCP-01D
	2	14	48	35	0.7292	15.443	0.014825	2139.042435	46.249783	6.930802	0.965524	6.691853	153.9126	MI	Estructura preexistente	INGEROC MCP-01D
	3	14	63	33	0.5238	20.307	0.019495	2647.065014	51.449636	7.364655	1.012944	7.459985	171.5796	BV		INGEROC MCP-01D
	4	14	51	32	0.6275	8.232	0.007903	2077.926937	45.584284	3.803175	0.959247	3.648183	83.9082	MI	Fractura lateral	INGEROC MCP-01D
	5	14	52	29	0.5577	8.553	0.008211	1920.045233	43.818321	4.276399	0.942342	4.298831	92.6861	BV		INGEROC MCP-01D
	6	14	44	31	0.7045	13.066	0.012543	1736.698739	41.673718	7.225531	0.921301	6.654124	153.0449	BV		INGEROC MCP-01D
	7	14	45	24	0.5333	8.807	0.008455	1375.098708	37.082323	6.148446	0.874155	5.374697	123.6180	BV		INGEROC MCP-01D
F9E_2945_33	8	14	51	24	0.4706	8.377	0.008042	1558.445203	39.477148	5.160220	0.899123	4.639672	106.7125	BV		INGEROC MCP-01D
	9	14	22	21	0.9545	3.981	0.003822	588.236670	24.253591	6.496977	0.722126	4.691633	107.9076	BV		INGEROC MCP-01D
	10	14	38	24	0.6316	9.102	0.008738	1161.194465	34.076304	7.524941	0.841525	6.332427	145.6458	BV		INGEROC MCP-01D
	1	12	45	30	0.6667	8.34	0.008008	1718.873885	41.459298	4.659052	0.919165	4.282436	98.4960	MI	Vetilla de clorita	INGEROC MCP-01D
	2	12	49	30	0.6122	19.48	0.018699	1871.662131	43.262711	9.990521	0.936946	9.360581	215.2934	BV		INGEROC MCP-01D
	3	22	38	27	0.7153	1.58	0.001517	1306.343773	36.143378	1.161103	0.864125	1.003338	23.0768	BV		INGEROC MCP-01D
	4	22	34	25	0.7353	2.01	0.001930	1082.253613	32.897623	1.782946	0.828300	1.476814	33.9667	BV		INGEROC MCP-01D
2900_07_804	5	22	40	32	0.8000	3.35	0.003212	1629.746617	40.370120	1.970957	0.908219	1.790060	41.1714	BV		INGEROC MCP-01D
	6	12	37	32	0.8649	13.13	0.012609	1507.515621	38.826738	8.363854	0.892426	7.464124	171.6748	BV		INGEROC MCP-01D
	7	12	49	35	0.7143	14.77	0.014175	2183.605819	46.729068	6.491721	0.970013	6.297056	144.8323	BV		INGEROC MCP-01D

	1	12	0.9143	7.44	0.007140	1426.028290	37.762790	5.006577	0.881338	4.412485	101.4871	BV		INGEROC MCP-01D
	2	12	0.6182	10.64	0.010211	2380.957949	48.795061	4.288425	0.989083	4.241607	97.5570	MI	Vetilla de clorita	INGEROC MCP-01D
	3	12	0.6809	17.57	0.016864	1914.952275	43.760168	8.806653	0.941779	8.293921	190.7602	BV		INGEROC MCP-01D
2900.07_806	4	12	0.5510	11.60	0.011139	1684.485918	41.042611	6.612589	0.914696	6.050494	139.1614	BV		INGEROC MCP-01D
	5	12	0.9730	4.34	0.004165	1695.955074	41.181975	2.456103	0.916393	2.250755	51.7674	MI	Vetilla de clorita	INGEROC MCP-01D
	6	12	0.4828	16.89	0.016212	2067.741021	45.472420	7.840672	0.968187	7.512828	172.7950	BV		INGEROC MCP-01D
	7	12	0.5714	8.23	0.007900	891.267681	29.854107	8.663600	0.792894	7.027898	161.6417	BV		INGEROC MCP-01D
	1	22	0.5000	7.66	0.007352	2291.831181	47.873074	3.207776	0.980629	3.145637	72.3496	BV	Veta de clorita	INGEROC MCP-01D
	2	22	0.7778	5.47	0.005254	2005.352283	44.781160	2.620028	0.951604	2.483230	57.3443	MI		INGEROC MCP-01D
	3	12	0.4839	16.47	0.015813	2368.225553	48.664418	6.677202	0.987890	6.996942	151.7159	BV		INGEROC MCP-01D
F9E_2900_05	4	22	0.6667	2.36	0.002261	1100.078967	33.167438	2.055125	0.831350	1.708528	39.2961	BV		INGEROC MCP-01D
	5	22	0.7813	2.71	0.002599	1018.591636	31.915382	2.551287	0.817078	2.084601	47.9458	MI	Veta de clorita	INGEROC MCP-01D
	6	22	0.6604	6.62	0.006355	2361.859355	48.598965	2.690761	0.987292	2.656567	61.1011	BV		INGEROC MCP-01D
	7	22	0.5672	4.40	0.004227	3241.667881	56.935647	1.303921	1.060197	1.382413	31.7955	MI	Veta de clorita	INGEROC MCP-01D
	8	22	0.6857	4.36	0.004189	1069.521218	32.703535	3.917117	0.826097	3.235919	74.4261	BV	Veta de clorita	INGEROC MCP-01D
	1	12	0.8718	4.81	0.004613	1688.315636	41.089118	2.732191	0.915463	2.501218	57.5280	MI		INGEROC MCP-01D
	2	12	0.6154	1.61	0.001543	529.667651	23.014510	2.912619	0.705284	2.054225	47.2472	MI		INGEROC MCP-01D
	3	12	0.6410	4.64	0.004455	1241.408556	35.233628	3.588955	0.854268	3.877315	70.5164	MI		INGEROC MCP-01D
FE_2900.07_806	4	12	0.5957	7.41	0.007109	1675.583241	40.933889	4.242582	0.913905	3.877315	89.1783	BV		INGEROC MCP-01D
	5	12	0.5769	2.39	0.002293	496.563422	22.283703	4.618625	0.695117	3.210484	73.8411	BV		INGEROC MCP-01D
	6	12	0.6579	5.71	0.005477	1209.577567	34.778982	4.527862	0.849290	3.845468	88.4458	BV		INGEROC MCP-01D
	1	12	0.7143	6.38	0.006124	1604.281826	40.053487	3.817185	0.905006	3.454577	79.4553	BV		INGEROC MCP-01D
	2	12	0.7778	9.10	0.008735	2005.352283	44.781160	4.355863	0.951604	4.145058	95.3363	MI	Veta de clorita	INGEROC MCP-01D
	3	21	0.6200	4.56	0.004379	1973.521294	44.424332	2.218654	0.948185	2.103693	48.3649	BV		INGEROC MCP-01D
FE_2885.02.8	4	11	0.7292	9.94	0.009543	2139.042435	46.249783	4.461510	0.965524	4.307693	99.0769	BV		INGEROC MCP-01D
	5	11	0.8846	11.05	0.010612	3045.588991	55.186855	3.484331	1.045417	3.642579	83.7793	BV		INGEROC MCP-01D
	6	21	0.5682	3.64	0.003493	1400.563499	37.424103	2.494310	0.877772	2.189435	50.3570	BV		INGEROC MCP-01D
	1	22	0.5000	7.658	0.008401	2291.831181	47.873074	3.665610	0.980629	3.594603	82.6759	BV	M	INGEROC MCP-01D
	2	22	0.7778	5.473	0.010344	2005.352283	44.781160	5.158196	0.951604	4.908561	112.8969	MI	Estructura	INGEROC MCP-01D
	3	12	0.4839	16.472	0.008954	2368.225553	48.664418	3.780856	0.987890	3.735071	85.9066	BV	M	INGEROC MCP-01D
	4	22	0.6667	2.355	0.007960	1100.078967	33.167438	7.236135	0.831350	6.015760	138.3625	BV	M	INGEROC MCP-01D
	5	22	0.7813	2.71	0.002599	1018.591636	31.915382	2.551287	0.817078	2.084601	47.9458	MI	Estructura	INGEROC MCP-01D
	6	22	0.6604	6.62	0.006355	2361.859355	48.598965	2.690761	0.987292	2.656567	61.1011	BV	M	INGEROC MCP-01D
F9E_2900.05	7	22	0.5672	4.40	0.004227	3241.667881	56.935647	1.303921	1.060197	1.382413	31.7955	MI	Estructura	INGEROC MCP-01D
	8	22	0.6857	4.36	0.004189	1069.521218	32.703535	3.917117	0.826097	3.235919	74.4261	BV	M	INGEROC MCP-01D
	9	11	0.7843	8.75	0.008401	2597.408671	50.964779	3.234362	1.008637	3.262298	75.0329	MI	Estructura	INGEROC MCP-01D
	10	21	0.6296	10.78	0.010344	2337.667804	48.349434	4.424623	0.985008	4.358563	100.2474	BV	M	INGEROC MCP-01D
	11	11	0.9744	9.33	0.008954	1886.941005	43.438934	4.745204	0.938662	4.454141	102.4453	BV	M	INGEROC MCP-01D
	12	11	0.8947	8.29	0.007960	1645.025492	40.558914	4.839025	0.910128	4.404131	101.2950	BV	M	INGEROC MCP-01D