



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

REOLOGÍA Y FÁBRICA DE LA MINERALIZACIÓN PRIMARIA,  
YACIMIENTO EL TENIENTE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

IVÁN PEDRO ROJAS CHURKOVIC

PROFESOR GUÍA:

ANDRÉS BRZOVIC PÉREZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

JAVIER VALLEJOS MASSA

SANTIAGO DE CHILE

2014

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**POR:** Iván Pedro Rojas Churkovic

**FECHA:** 05/12/2014

**PROFESOR GUÍA:** Andrés Brzovic Pérez

**REOLOGÍA Y FÁBRICA DE LA MINERALIZACIÓN PRIMARIA,  
YACIMIENTO EL TENIENTE.**

Dentro de la mina El Teniente se producen sismos de magnitud Mw entre -2 y +2, en su mayoría inducidos por la explotación minera, y con mayor concentración en las unidades intrusivas félsicas. Dicha concentración se debería a un contraste de rigidez entre ellas y la roca de caja, a escala de macizo rocoso. En este estudio se busca asociar variables petrográficas con la rigidez a escala de probeta (E, Módulo de Young) de las distintas unidades del yacimiento. Además, se busca establecer diferencias con rocas porfídicas no pertenecientes al interior del yacimiento, que puedan tener menor alteración, mineralización y estructuras.

Se cuenta con un total de 35 muestras con sección delgada y resultados de ensayos geotécnicos. De ellas, 17 fueron sometidas a ensayos de compresión uniaxial simple (CUS) en el marco de este trabajo, mientras que las 18 restantes fueron sometidas previamente a ensayos CUS y de compresión triaxial. Las secciones delgadas se confeccionaron a partir de las muestras ya ensayadas, y se realizó una descripción petrográfica de ellas.

El Módulo de Young de las muestras varía aproximadamente entre 25 y 99 GPa. Este parámetro tiene una relación directa con la densidad, la resistencia a la compresión uniaxial, y aumenta en rocas cristal-soportadas (al considerar la textura glomeroporfídica como un soporte de cristales). También se estableció una relación inversa entre el tamaño del cristal más grande en muestras matriz-soportadas (usualmente plagioclasa, o biotita, de hasta 6 mm) con el Módulo de Young. Es decir, a mayor tamaño máximo de cristal, menor Módulo de Young. Esto puede deberse a una redistribución de esfuerzos al interior de la roca, generándose una anisotropía por la razón largo/ancho mayor a 2 de estos cristales.

Las muestras del exterior del yacimiento no mostraron grandes diferencias con respecto a las del interior: tienen alteración (regional, calcita-epidota; o hidrotermal, sericita-clorita-opacos), y mineralización metálica de hasta un 5%, incluyendo esfalerita, magnetita, pirita, calcopirita y en algunos casos bornita. La diferencia que sí fue notoria, es la menor densidad de estructuras (vetillas, fracturas, etc.), lo que permitió obtener rupturas por matriz, como se buscaba.

Este estudio no fue determinante sobre la mayor rigidez de los intrusivos félsicos. Sin embargo, se establecieron variables petrográficas que afectan los parámetros geotécnicos, tanto para las unidades intrusivas como para la roca caja. Por lo anterior, se recomienda sectorizar volumétricamente las rocas de El Teniente en función del soporte, el tamaño máximo de cristales, entre otros.

*Al amor y esfuerzo de mi familia*

*Mis padres Carlos y Vezelka*

*Mi hermano Carlos*

## Agradecimientos

En las siguientes líneas quiero expresar mi gratitud a todas las personas que me ayudaron en el desarrollo de mi memoria, y también a quienes estuvieron presentes en mis años de vida universitaria.

En primer lugar agradezco a Andrés Brzovic, profesor guía de este trabajo, por proponer el tema de memoria, confiar en que lo podría desarrollar y ayudarme durante el desarrollo de él.

Agradezco a mis compañeros memoristas: Seba G. y Alonso Heriberto José, por las discusiones fructíferas, y las conversaciones del almuerzo.

A Felipe Celhay, Superintendente de Geología de División El Teniente, agradezco el permitirme desarrollar el trabajo dentro de la SGL. También al equipo de geólogos y personal de la Superintendencia: a Roberto González y José Seguel, por mantener viva la discusión y colaborar directamente con datos y muestras; a René Padilla, Carlos Nazal y Luis Rojas, por los kilómetros y palabras que compartieron conmigo. A Karen Baraona, por su ánimo y conversación tan útiles. A Carolina Becerra, Marcelo Ramírez y Paulina Schachter, por recibirme en la oficina y echar la talla. A Fernando Marambio, Christian Martínez, Claudio Soto, Ludovina Burgos, Alejandra Arévalo, Magdita, Carlos Guzmán y Francisco Ramírez, por ayudarme en distintas tareas que fueron necesarias para la ejecución de este trabajo. Al Nacho, por hacer bien su labor y de forma lúdica. A Carlos De Los Santos, Jack Cubillos, Diego Díaz, Ricardo Floody, José Millán y David Benado, por su buena disposición. A Melissa, Roxy, Romi y Marcela, por su diligencia. A Maribel y Brenda, por compartir su oficina con el microscopio. A Jaime Morales, por la confección de los cortes transparentes y pulidos de este trabajo. A Don Juan Lobos, por su muy buen trabajo en la bodega de Colón Bajo y su ánimo al atenderme, y a Aldo Borgna, Nico e Ignacio por su colaboración logística y operativa en la bodega.

Agradezco a la profesora Sofía, por ayudarme con los avances y el escrito, y recibirme cada vez que fuera necesario. Al profesor Javier Vallejos, por su colaboración en la discusión. A los funcionarios del Departamento de Geología: Blanca, María Rosa, Rosita, Don Carlos, Carlos Alvarado, Juanito, Roberto, Maritza, Christian Nieves.

A mi familia: mis padres Carlos y Vezelka, por haber hecho de mí quien soy y estar conmigo en todas las etapas de mi vida; mi hermano Carlos, por cuidarme y guiarme siempre, y darme el ejemplo con todas sus acciones; y a mi cuñi Andrea, por su ayuda y apoyo que han sido muy importantes.

A mis grupos de amigos: Los Mij@s, mi grupo de amigos del colegio que me molestan con comer piedras jajaja; Los 12, que forjamos la amistad entre los completos y el taca-taca; y los chicos que he conocido en geología, como Katy y Fabián (Pancho y Pablo se repiten el plato en geología, y el Benja también).

Al Coro Escuela de Ingeniería, tanto sus integrantes como su directora Verónica Rivas, por brindarme su amistad, y una actividad que enriquece el alma y nos ha llenado de dicha, recuerdos y valores.

Y a mi Laurita, por compartir todo lo que ha compartido conmigo, darme ánimo, ayudarme, escucharme y apoyarme. Te amo mucho.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción .....	1
1.1.	Objetivos .....	4
1.1.1.	Objetivo General.....	4
1.1.2.	Objetivo Específico.....	4
1.2.	Metodología de Trabajo .....	5
1.3.	Ubicación y Vías de Acceso .....	6
1.4.	Trabajos Anteriores .....	7
2.	Marco Geológico.....	10
2.1.	Geología Regional .....	10
2.1.1.	Rocas Estratificadas.....	11
2.1.2.	Rocas Intrusivas.....	16
2.1.3.	Estructuras.....	16
2.1.4.	Marco Geotectónico.....	18
2.2.	Geología del Yacimiento .....	22
2.2.1.	Litología .....	24
i.	Complejo Máfico El Teniente (CMET, Ex-“Andesitas de la mina”) .....	24
ii.	Complejo Félsico .....	24
	Pórfido Dacítico .....	25
	Tonalita .....	25
	Pórfido Diorítico.....	25
	Pórfido Microdiorítico .....	26
iii.	Complejo Brecha Braden .....	26
iv.	Cuerpos de Brechas .....	27
v.	Intrusivos Menores .....	27
vi.	Pórfido Latítico.....	27
vii.	Diques de Cuarzo y Anhidrita .....	28
viii.	Dique de Andesita.....	28
ix.	Diques de Lamprófidio .....	28
2.2.2.	Geología Estructural del Yacimiento.....	28
2.2.3.	Alteración y Mineralización.....	30

i.	Etapa Tardimagmática.....	30
ii.	Etapa Hidrotermal Principal.....	31
iii.	Etapa Hidrotermal Tardía.....	31
iv.	Etapa Póstuma .....	32
v.	Etapa Supérgena .....	32
3.	Resultados.....	33
3.1.	Muestras.....	33
3.2.	Ensayos Geotécnicos .....	36
3.3.	Descripciones petrográficas .....	39
4.	Discusiones .....	44
4.1.	Sobre estudios previos y enfoques a considerar .....	44
4.1.1.	Sílice y Módulo de Young .....	44
4.1.2.	Relaciones entre la petrografía y el BWi (Índice de Bond) .....	48
4.1.3.	Sobre las orientaciones de los esfuerzos y la respuesta de las unidades litológicas	50
4.2.	Sobre los resultados de este trabajo.....	53
4.2.1.	Relaciones entre los parámetros geotécnicos .....	53
4.2.2.	Relaciones entre parámetros petrográficos .....	58
4.2.3.	Relaciones entre los resultados de ensayos geotécnicos y las descripciones petrográficas.....	59
5.	Conclusiones .....	67
	Bibliografía.....	69
	Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos .....	Anexo A 1
	Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos.....	Anexo B 1

## Índice de Figuras

Figura 1.1: Vista en 3D de los niveles de producción de la mina El Teniente (Harrison, 2009). ...	1
Figura 1.2: Eventos sísmicos de magnitud $M_w$ mayor o igual a 1 en el sector Esmeralda (vista en planta). Se observa una concentración de estos sismos en las unidades distintas a la roca de caja (CMET). Modificado de Hudyma, 2009. ....	2
Figura 1.3: Fotomicrografías de las muestras DDH2187-PB396-2 (A) y TENA4-015 (B), que muestran la diferencia en el contenido de fenocristales en ambos. En el caso de A, la carga sería soportada por el esqueleto de fenocristales, mientras que en el de B los fenocristales tendrían un rol menos importante y la masa fundamental soportaría la carga principalmente. En ambos casos la barra de escala mide 1 mm. ....	3
Figura 1.4: Ubicación y vías de acceso al yacimiento El Teniente .....	6
Figura 1.5: Clasificación de rupturas en probetas sometidas a ensayos geotécnicos. Marambio <i>et al.</i> (1999). ....	8
Figura 2.1: Mapa geológico regional, modificado de Charrier <i>et al.</i> , 1996. El Teniente, centro de este estudio, se encuentra identificado con un círculo rojo. ....	10
Figura 2.2 Modelo de estructuras tipo Riedel para una zona de transcurrenciasinestral de rumbo N50W, modificado de Falcón y Rivera, 1998. ....	17
Figura 2.3 Ubicación del segmento Zona Volcánica Central (ZVC). Zona de <i>flat slab</i> y la porción norte de la Zona Volcánica Sur (ZVS). Los triángulos representan el volcanismo cuaternario y los círculos representan yacimientos de cobre del Eoceno Tardío y Oligoceno Temprano. Líneas segmentadas indican la profundidad actual de la zona de Benioff. Stern <i>et al.</i> , 2011. ....	19
Figura 2.4: Perfiles transversales de la evolución tectono-magmática de los Andes Centrales a los 34°S, entre el Mioceno y el Presente. Modificado de Stern & Skewes (1995). ....	21
Figura 2.5: Principales unidades litológicas y estructuras del nivel Ten-8 (1880 m.s.n.m). Urrutia <i>et al.</i> , 2006. ....	23
Figura 2.6: Zona de Falla El Teniente (TFZ), limitada al NW por la Qda. Teniente y al SE por la Falla Agua Amarga. Fuera de la zona de falla las estructuras presentan una amplia gama de orientaciones (Garrido, 1995). ....	29
Figura 3.1: Ubicación de las muestras obtenidas de superficie. Sistema de coordenadas WGS-1984. ....	34
Figura 3.2: Relación de escalamiento para probetas con diámetro distinto a 50mm. Modificada de Hoek & Brown, 1980, Tomada de Vallejos, 2013. D es el diámetro de la probeta en milímetros. ....	38
Figura 3.3: Esquemas para estimación visual del porcentaje de granos o cristales. Modificada de Reyes, 2011. ....	41
Figura 3.4: Triángulo de clasificación para rocas intrusivas, confeccionado a partir de Streckeisen, 1974. ....	42
Figura 4.1: Módulo de elasticidad (E, Módulo de Young) para rocas intrusivas, comparado con su contenido de sílice. Gráfico confeccionado a partir de datos para rocas intrusivas de Hoek y Brown, 1985. ....	44

Figura 4.2: Rigidez (Módulo de Young) contra contenido de sílice, para ensayos geotécnicos históricos de El Teniente. ....	46
Figura 4.3: Rigidez (Módulo de Young) contra contenido de sílice, para ensayos geotécnicos históricos de El Teniente que presentaron tipo de ruptura A y B .....	47
Figura 4.4: Rigidez (Módulo de Young) contra contenido de sílice, para ensayos geotécnicos históricos de El Teniente que presentaron tipo de ruptura A. ....	48
Figura 4.5: Fotomicrografía de Muestra de CMET, con grillas que representan la apertura de mallas Tyler de 10# y 65# respectivamente. Modificado de Guzmán <i>et al.</i> , 2004. En ella se ve observa que el producto final del proceso de molienda son partículas de tamaños menores a los de los fenocristales. ....	49
Figura 4.6: Fotomicrografías de muestras de las unidades Pórfido Basáltico y Pórfido Dacítico. Se indican sus valores de $W_i$ (índice de Bond) y una descripción de sus texturas. Modificado de Oyarzún y Arévalo, 2011. ....	50
Figura 4.7: Sección litológica 200S, que muestra la subverticalidad de las unidades litológicas. Tomada de Pérez, 2010. ....	52
Figura 4.8: Datos de Módulo de Young (en GPa) contra Razón de Poisson, separado por litología de cada probeta ensayada .....	54
Figura 4.9: Datos de Módulo de Young (en GPa) contra Resistencia a la compresión uniaxial simple (UCS) estandarizado a 50 mm de diámetro (en MPa), para todas las litologías sometidas al ensayo de ompresión uniaxial simple. ....	55
Figura 4.10: Datos de Módulo de Young (en GPa) contra Resistencia a la compresión uniaxial simple (UCS) estandarizado a 50 mm de diámetro (en MPa), separados por litología, para todas las probetas sometidas al ensayo de compresión uniaxial simple de los que se tienen resultados. ....	55
Figura 4.11: Relación entre Módulo de Elasticidad, $E$ , y la resistencia a la compresión simple, $\sigma_c$ . Modificado de González de Vallejo <i>et al.</i> , 2002 .....	56
Figura 4.12: Gráfico de Módulo de Young contra densidad, este último obtenido con el volumen calculado geoméricamente de las probetas. ....	56
Figura 4.13: Gráfico de Módulo de Young contra densidad, con simbología por unidad litológica .....	57
Figura 4.14: Gráfico de contraste entre UCS normalizado a un diámetro de 50 mm (MPa) y la densidad de las probetas ensayadas, con simbología por unidad litológica .....	58
Figura 4.15: Gráfico de Tamaño máximo de cristales y contenido de fenocristales, con leyenda por unidad litológica. ....	59
Figura 4.16: Gráfico de Módulo de Young contra contenido de fenocristales, separado por unidad litológica. Se presenta una banda que separa los arreglos “matriz-soportados” (<40%) de los “cristal-soportados” (>50%). En la FIG 3.3 se muestra cómo se ven estas proporciones de fenocristales. ....	60
Figura 4.17: Módulo de Young por categoría de soporte basada en el contenido de fenocristales: matriz-soportado, intermedio y cristal-soportado. ....	61
Figura 4.18: Módulo de Young por categoría de soporte: matriz-soportado y cristal-soportado, incluyendo en la última a las muestras que presentan textura glomeroporfídica .....	61



Figura 4.19: Fotomicrografía de la muestra IR7P2. En ella se observa un cúmulo de cristales de plagioclasa sobre la barra de escala, que representa 5 mm. ....	63
Figura 4.20: Gráfico de Módulo de Young contra contenido de sílice, por unidad litológica. ....	64
Figura 4.21: Gráfico de Módulo de Young contra tamaño máximo de cristales, con leyenda por unidad litológica. ....	65
Figura 4.22: Gráfico de Módulo de Young contra tamaño máximo de cristales, con leyenda según soporte.....	65
Figura 4.23: Gráfico de Módulo de Young contra intensidad de alteración, con leyenda por unidad litológica. ....	66
Figura 4.24: Gráfico de Módulo de Young contra intensidad de alteración, con leyenda por soporte.....	66

## Índice de Tablas

Tabla 2.1: Cuadro resumen de las Formaciones de los Andes de Chile Central. Modificado de Charrier <i>et al.</i> , 1996. ....	15
Tabla 3.1: Datos de los testigos de sondajes de la unidad Tonalita a partir de los cuales se confeccionaron las probetas ensayadas. Los valores de coordenadas están expresados en el sistema interno de El Teniente.....	33
Tabla 3.2: Datos de los bloques de roca recolectados para la confección de probetas.....	33
Tabla 3.3: Probetas confeccionadas a partir de testigos de sondajes de la unidad Tonalita. ....	35
Tabla 3.4: Datos de probetas confeccionadas a partir de las colpas obtenidas en superficie.....	35
Tabla 3.5: Características de las probetas ensayadas previamente a la realización de este estudio .....	36
Tabla 3.6: Resumen de resultados de ensayos geotécnicos realizados en el marco de esta memoria .....	37
Tabla 3.7: Resumen de los resultados de ensayos geotécnicos en las probetas ensayadas antes de la realización de esta memoria.....	38
Tabla 3.8: Tamaños absolutos de cristales. Modificado de Mackenzie <i>et al.</i> (1999).....	39
Tabla 3.9: Resumen de características petrográficas de los cortes transparentes y pulidos hechos a partir de las probetas y probetones ensayados.....	40
Tabla 3.10: Clasificación de rocas intrusivas según el criterio QAP, Streckeisen 1974. ....	42
Tabla 4.1: Datos de Módulo de Young y unidad litológica, modificados de Hoek y Brown, 1985, usados en la Figura 4.1. El porcentaje de sílice se asignó en función de la litología, y se usó el valor del Módulo de Young promedio (calculado entre el mínimo y el máximo cuando los hubo, y como el valor único cuando no).....	45
Tabla 4.2: Abreviaciones de las unidades litológicas ensayadas usadas en los gráficos de la sección Discusiones. ....	53
Tabla 4.3: Clasificación de las muestras según soporte basado en el contenido de fenocristales y la presencia de textura glomeroporfídica. MS*: Matriz Soportado y CS*: Cristal Soportado. ....	62

# 1. Introducción

El mega yacimiento de cobre-molibdeno El Teniente, considerado el más grande del mundo (Skewes *et al.*, 2002) se ubica en la Cordillera de Los Andes Centrales, en la VI Región de Chile, y forma parte del arco magmático del Mioceno-Plioceno Temprano. Su génesis es el resultado de la sucesiva intrusión de cuerpos félsicos y sus procesos de alteración hidrotermal, emplazados en rocas volcánicas del Mioceno, correspondientes a la Formación Farellones (Maksaev *et al.*, 2004).

La mineralización metálica del yacimiento consiste principalmente en calcopirita, bornita y molibdenita, los que se encuentran en vetillas que forman un enrejado polidireccional o *stockwork*, lo que además produce en la roca distintos grados de alteración. La mina El Teniente comenzó su explotación en 1906 y, actualmente, es la mayor mina subterránea de cobre en operación en el mundo, con una extracción de aproximadamente 140.000 toneladas por día, mediante los métodos de explotación de hundimiento de bloques (*block caving*) y hundimiento de paneles (*panel caving*) (Rojas *et al.*, 2001). La Figura 1.1 muestra los distintos niveles de producción y los sectores de la mina ubicados alrededor de la Brecha Braden.

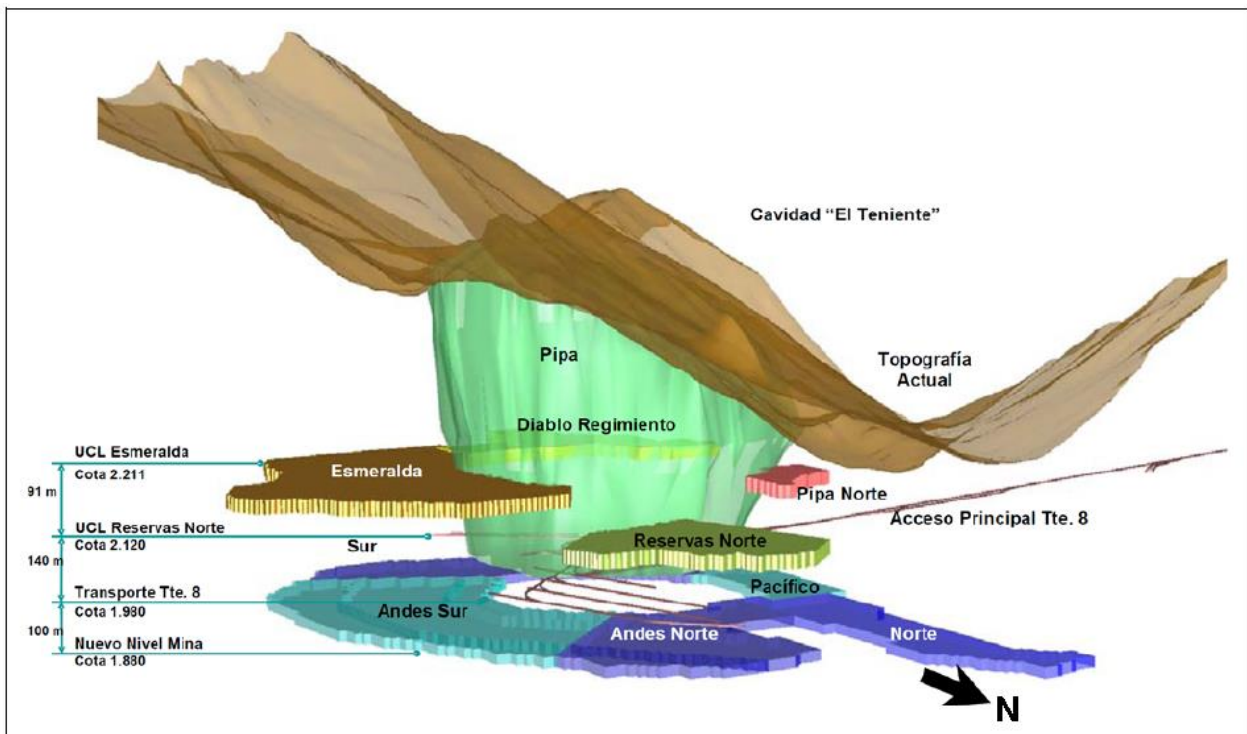


Figura 1.1: Vista en 3D de los niveles de producción de la mina El Teniente (Harrison, 2009).

## Introducción

En el interior de la mina ocurren sismos, tanto naturales como inducidos, de magnitudes que varían entre  $M_w = -2$  y  $M_w = 2$ , y que son registrados por estaciones ubicadas al interior de la mina. Se ha observado que ocurren más eventos, y eventos de mayor magnitud, al interior y en las inmediaciones de las unidades intrusivas félsicas (Figura 1.2, Hudyma, 2009; J. Seguel, comunicación verbal, 2014). A su vez, dichas unidades inducen mayor fallamiento en la roca de caja inmediatamente adyacente (González, 2014). La causa de la mayoría de los sismos del interior de la mina, especialmente los de mayor magnitud, sería la redistribución de esfuerzos debida a los métodos de extracción (por ejemplo, *panel caving*).

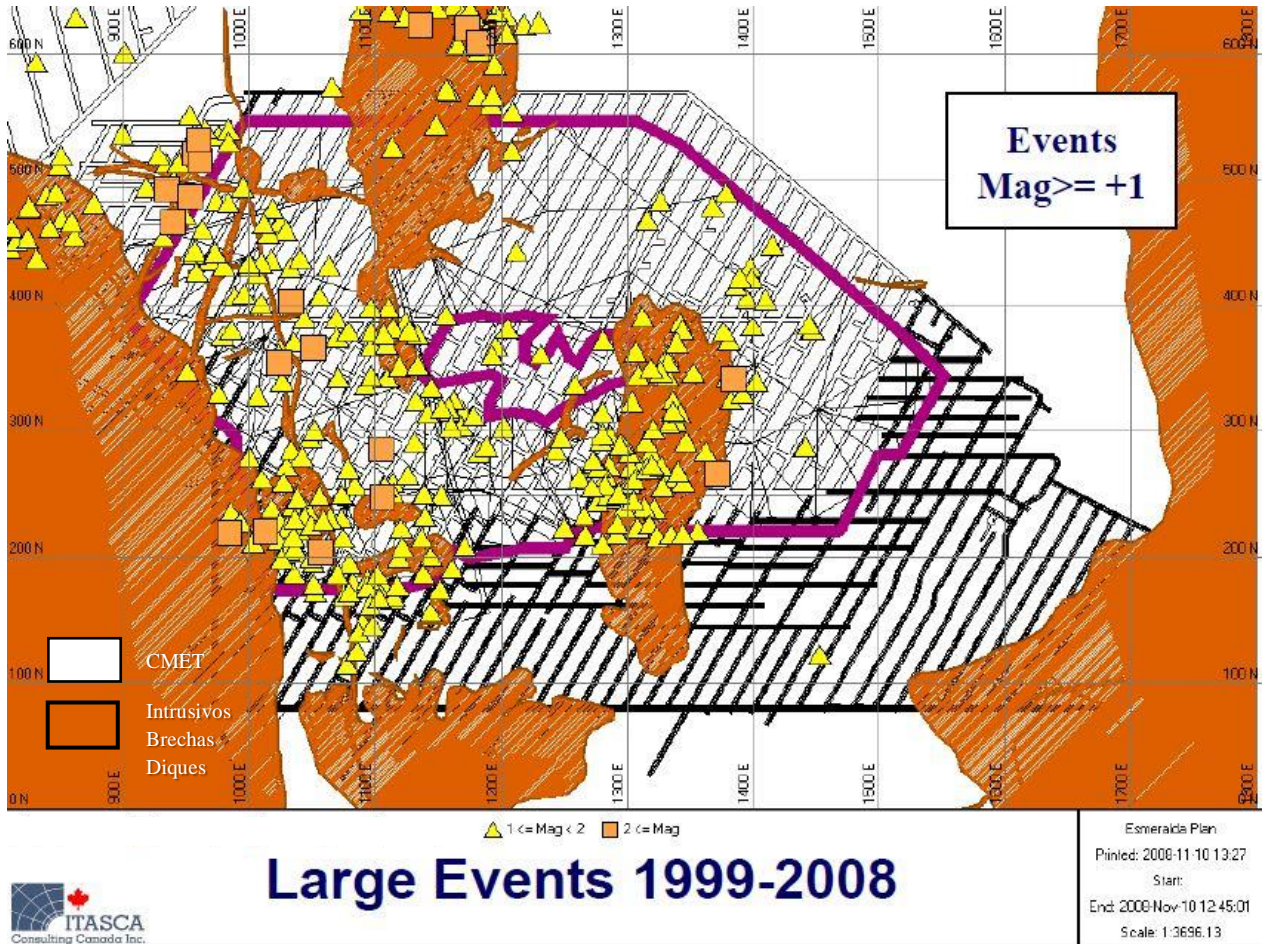


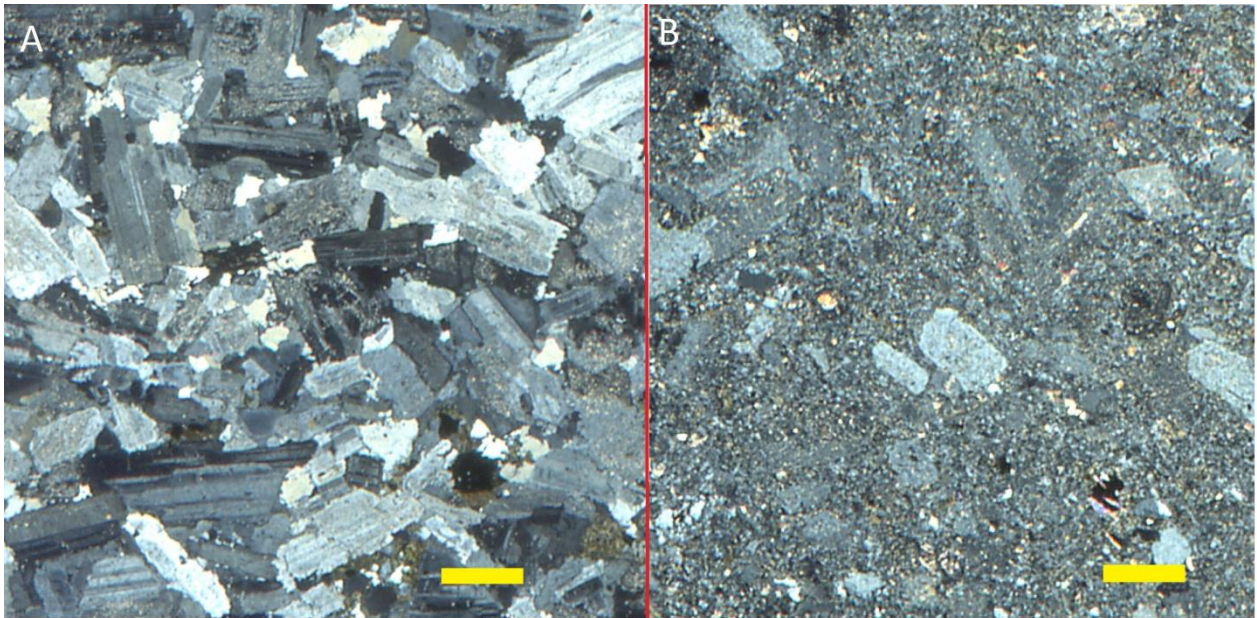
Figura 1.2: Eventos sísmicos de magnitud  $M_w$  mayor o igual a 1 en el sector Esmeralda (vista en planta). Se observa una concentración de estos sismos en las unidades distintas a la roca de caja (CMET). Modificado de Hudyma, 2009.



## Introducción

La concentración de sismos en las unidades félsicas (Pórfido Diorítico, Pórfido Dacítico, entre otras) se debería a un contraste de deformabilidad entre ellas y la roca de caja (Complejo Máfico El Teniente, CMET), a escala de macizo rocoso. En este estudio se busca correlacionar características petrográficas de la roca intacta con su rigidez a escala de probeta, tanto para la roca de caja como para unidades intrusivas félsicas, siendo este el primer paso para comprender la rigidez de un macizo rocoso. Por su parte, varios estudios han caracterizado la respuesta mecánica de las vetillas que forman parte del yacimiento.

Algunas características petrográficas de las unidades litológicas de El Teniente tendrían influencia en su rigidez a escala de probeta, caracterizada por el Módulo de Young ( $E$ ). La respuesta mecánica de la roca estaría dada por la interacción de los minerales que la conforman y, en particular, por los que soporten la carga tanto en ensayos como en el macizo rocoso. Esta situación puede tener dos variantes: un esqueleto de cristales que soportan la carga (Figura 1.3A); o cristales inmersos en una matriz o masa fundamental, sin tocarse entre ellos, donde la carga sería soportada principalmente por la masa fundamental (Figura 1.3B).



**Figura 1.3:** Fotomicrografías de las muestras DDH2187-PB396-2 (A) y TENA4-015 (B), que muestran la diferencia en el contenido de fenocristales en ambos. En el caso de A, la carga sería soportada por el esqueleto de fenocristales, mientras que en el de B los fenocristales tendrían un rol menos importante y la masa fundamental soportaría la carga principalmente. En ambos casos la barra de escala mide 1 mm.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo General**

Evaluar la correlación existente entre características petrográficas (textura, contenido de fenocristales, intensidad de alteración, mineralogía, entre otras) de unidades litológicas del yacimiento El Teniente (CMET y pórfidos de distintas composiciones), y sus parámetros geotécnicos a escala de probeta.

### **1.1.2. Objetivo Específico**

Obtener una caracterización petrográfica de roca intacta de El Teniente, tanto de los intrusivos félsicos primarios, como de la roca de caja adyacente y de rocas no pertenecientes al yacimiento, esto último con el fin de comparar la influencia de la alteración y mineralización metálica.

### 1.2. Metodología de Trabajo

El trabajo realizado en el marco de esta memoria consistió en tres etapas, la primera de las cuales fue de **análisis bibliográfico** referente a las variedades petrográficas de El Teniente, el comportamiento mecánico de las rocas y la relación entre litología y rigidez.

La segunda etapa consistió en la **obtención de muestras y resultados** a partir de ellas. Las muestras corresponden a probetas, tanto de rocas del interior del yacimiento como de rocas porfídicas exteriores al yacimiento, obtenidas en una salida a terreno dentro del distrito de exploración de El Teniente. En el caso de las probetas con origen al interior, ellas fueron preparadas a partir de testigos de sondaje diamantino de las campañas históricas o recientes; mientras que en el caso de las probetas de rocas con origen exterior, se recolectaron bloques en superficie de dimensiones cercanas a 40cm x 40cm x 50cm, de los cuales se extrajeron porciones cilíndricas que constituirían las probetas.

Los resultados consisten en: datos obtenidos de ensayos geotécnicos con medición de módulos elásticos estáticos a los que fueron sometidas las probetas, tanto dentro del marco de esta memoria como efectuados con anterioridad (en dicho caso, se contaba con la probeta ensayada); y descripciones petrográficas realizadas sobre secciones delgadas preparadas en el Laboratorio de Confección de Cortes de la Superintendencia de Geología, División el Teniente, a partir de las probetas ya ensayadas.

La tercera etapa consistió en un **análisis de los resultados obtenidos**, con énfasis en las características petrográficas que pueden influir en la rigidez de las rocas a escala de probeta.

### 1.3. Ubicación y Vías de Acceso

El yacimiento El Teniente se encuentra en la Cordillera de Los Andes de Chile Central, en la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Provincia del Cachapoal, aproximadamente a 40 km al NE de Rancagua y 73 km al SE de Santiago. Sus coordenadas geográficas con 70°21' longitud oeste y 34°14' latitud sur, con una elevación entre 2000 y 3200 m s.n.m. (Figura 1.4).

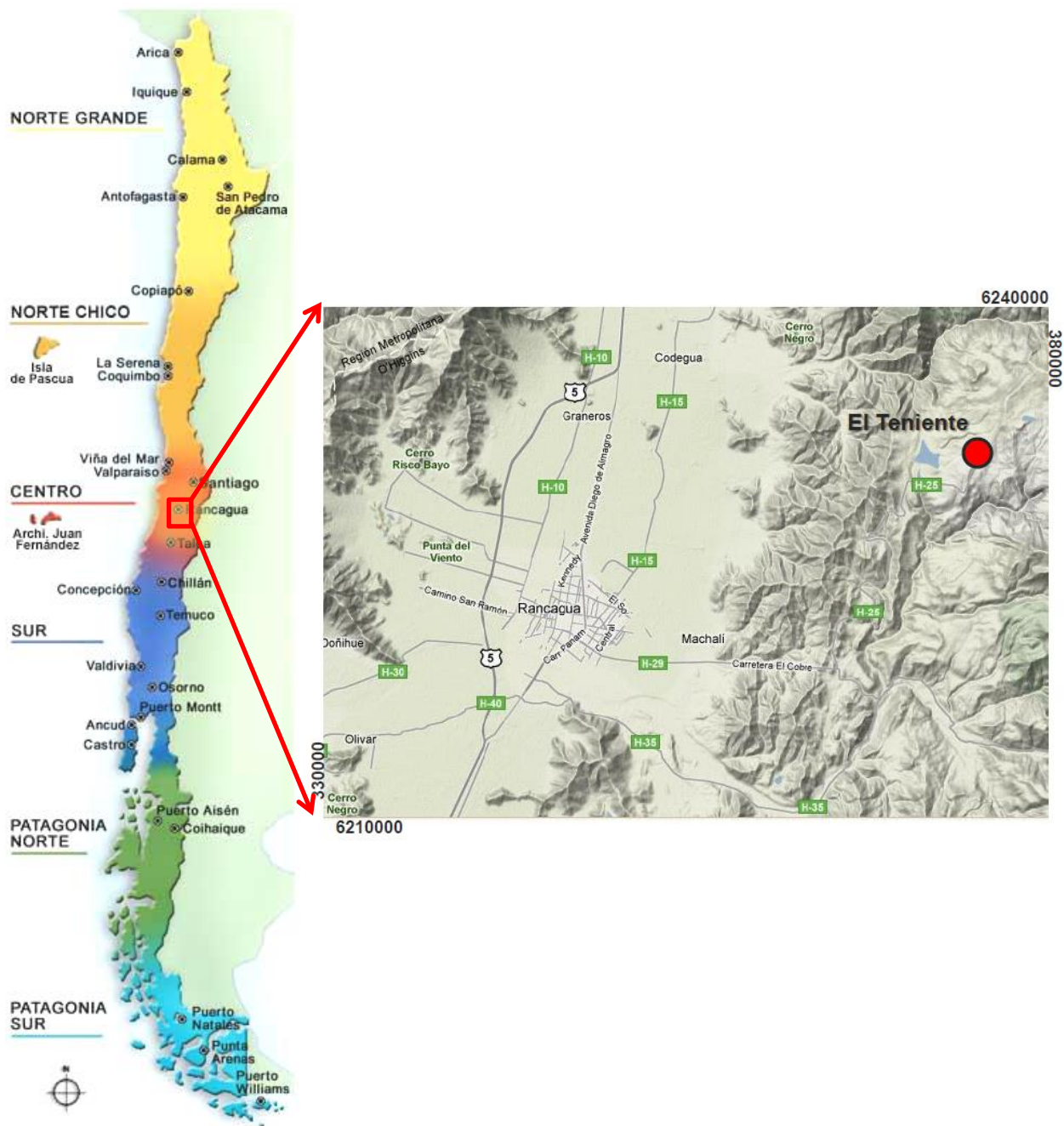


Figura 1.4: Ubicación y vías de acceso al yacimiento El Teniente



## Introducción

El acceso al yacimiento se efectúa desde la ciudad de Rancagua por la carretera asfaltada Eduardo Frei Montalva (ruta H-29 y H-25, también conocida como carretera El Cobre), que conecta dicha ciudad con la localidad de Colón Alto en el kilómetro 46 (1983 m s.n.m), ubicada al oeste del yacimiento. Un túnel de 8 km de largo une Colón Alto con el nivel TEN-8 (el nivel más profundo del yacimiento actualmente) mediante un ferrocarril eléctrico.

Un desvío en la carretera Eduardo Frei Montalva hacia la fundición Caletones constituye otro acceso. Desde la fundición se desprende un camino asfaltado que llega a Sewell, campamento minero ubicado a 3 km al oeste del yacimiento. A partir de allí existe un túnel que conecta el campamento con el nivel TEN-5 (2.284 m s.n.m.) y varios caminos asfaltados o consolidados que llegan a otros niveles.

Los niveles se encuentran conectados por piques de gran capacidad (Pique B, Pique C y Pique 2) que pueden transportar personal y vehículos motorizados, y también por rampas que permiten el acceso a niveles intermedios de producción.

### 1.4. Trabajos Anteriores

**Zúñiga (1979);** Realizó los primeros ensayos geotécnicos en rocas del yacimiento, siendo del tipo carga puntual.

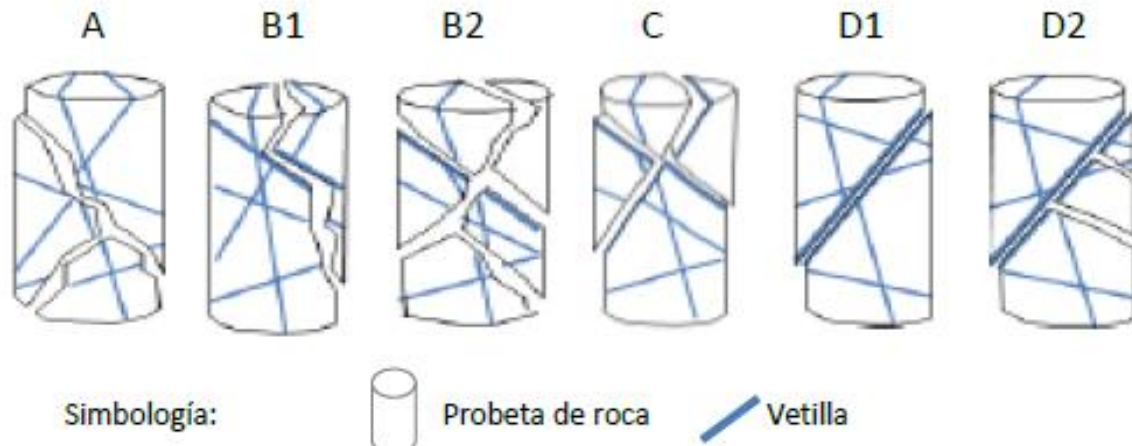
**Hevia (1984);** Estudió las probetas sometidas a ensayos geotécnicos, demostrando que cerca del 90% de las rupturas con carga puntual corresponden a vetillas del tipo *stockwork*.

**Pereira (1995);** Realizó un estudio orientado a la caracterización de la fase inicial del proceso de fragmentación de la roca primaria en la Mina Teniente 4 Sur. Al igual que Zúñiga (1979) demuestra que cerca del 80% de las caras que definen a estas colpas corresponden a vetillas del tipo *stockwork*.

**Marambio et al. (1999);** introdujeron un sistema de clasificación de las rupturas desarrolladas a través de las probetas ensayadas mediante los métodos de compresión uniaxial simple y compresión triaxial en la mina El Teniente (Figura 1.5).

**Rodrigo (1999);** A partir de la descripción de probetas de rocas sometidas a ensayos de compresión uniaxial y triaxial, extraídos en el sector productivo Teniente 4 Regimiento, concluyó que las vetillas que forman el *stockwork* de El Teniente, compuestas principalmente por anhidrita, cuarzo, calcopirita y turmalina, influyen en las rupturas de las probetas.

## Introducción



- **Tipo A:** Ruptura por roca. La probeta se fractura en múltiples fragmentos y cada superficie de ruptura puede atravesar vetillas sin desarrollarse por ellas.
- **Tipo B:** Ruptura mixta. La ruptura, que puede ser única (B1) o múltiple (B2), se propaga por roca y vetillas a la vez.
- **Tipo C:** Ruptura por varias vetillas. La muestra se parte en múltiples fragmentos.
- **Tipo D:** Ruptura por vetilla única. Ya sea por superficie única (D1) o múltiple (D2) en que la ruptura principal es por la vetilla y hay ramificaciones a un solo lado de ella.

Figura 1.5: Clasificación de rupturas en probetas sometidas a ensayos geotécnicos. Marambio *et al.* (1999).

**Marambio *et al.* (2000);** Redefinieron el concepto de roca intacta, pasando a considerar a las vetillas selladas del *stockwork* como parte de la roca intacta.

**Brzovic (2001);** Analizó el sistema de clasificación geotécnica del macizo rocoso primario de la Mina El Teniente. En el estudio aborda las propiedades de resistencia de las estructuras y propone una escala de resistencia relativa de las vetillas selladas basada en el índice de dureza en la escala de Mohs de los minerales que constituyen el relleno de la vetillas, introduce el concepto de vetillas blandas, que corresponde a vetillas gruesas (con un espesor mayor a 2 mm), en que las proporciones de minerales duros ( $H > 4$ ) es inferior a un tercio del total de constituyentes en la vetillas.

**Burgos (2002);** Estudió petrográfica y geoquímicamente la roca de caja del yacimiento (CMET, ex-“Andesitas de la Mina”), estableciendo que sus texturas predominantes son porfídica e intersertal, con un contenido de fenocristales entre 5% y 30%, y que su contenido de sílice varía entre 47,7% y 54,7%.

**Figuroa (2003);** Advirtiendo la importancia del relleno mineralógico de la vetillas, propuso un sistema de clasificación geotécnica de vetillas en función de la dureza relativa de su relleno.

## Introducción

**Rojas (2003);** Estudió petrográfica y geoquímicamente el *Pórfido Teniente*, usualmente llamado Pórfido Dacítico, que se distribuye hacia el NNE de la Brecha Braden. Determinó que está compuesto por 2 fases intrusivas porfídicas emplazadas sucesivamente, siendo la primera la que denominó Pórfido Dacítico Hipidiomorfo (PDH), intruyendo al Complejo Máfico El Teniente (CMET); y la segunda la que denominó Pórfido Dacítico Idiomorfo, en contacto oriental con el PDH e intruyéndolo junto al CMET. También estableció que la textura predominante en ambos es porfídica, con un contenido de fenocristales entre 40% y 60%, y que el contenido de sílice varía entre 66% y 68%.

**Padilla (2004);** Evaluó la resistencia a la tracción de las vetillas que forman *stockwork* mediante ensayos geotécnicos de carga diametral, y determinó las características geológicas que determinan la resistencia a la tracción de las vetillas.

**Hitschfeld (2006);** Estudió petrográfica y geoquímicamente los intrusivos leucocráticos del sector sureste del Yacimiento (Pórfido Diorítico, Tonalita, y otros intrusivos porfídicos). Estableció que sus contenidos de sílice variaban entre un 62,06% y un 67,04%.

**Karzulovic (2006);** Establece criterios para una minería en Roca Primaria con el fin de lograr una correcta caracterización y evaluación del comportamiento mecánico del macizo rocoso Primario de El Teniente, que permita su homologación con macizos primarios de otras minas y explique su proceso de desarme y la propagación del hundimiento.

**Brzovic y Villaescusa (2007);** Caracterizan las vetillas que participan en el desarme del macizo rocoso producto de la explotación minera, obteniendo la proporción de minerales duros y el espesor mínimo que deben tener estas vetillas.

**Brzovic et al. (2009);** Introdujeron el concepto de estructuras blandas, que representan las vetillas por donde debería fallar el macizo rocoso masivo y competente.

**De Los Santos (2011);** Estudió la correlación entre la mineralogía, alteración y geometría de vetillas y su resistencia mecánica en ensayos de compresión, corte directo y tensión directa. Estableció que a menor espesor de las vetillas, menor sería su resistencia; y que vetillas con menos de un 40% de minerales duros ( $H > 4$ ) resultan falladas en ensayos de compresión y corte directo; entre otros.

**Baraona (2013);** Estudió el comportamiento de vetillas sometidas a ensayos de tracción directa. Estableció que las vetillas de calcopirita tienden a tener menor resistencia que las de pirita de 1-4 mm de espesor; y que la presencia de minerales duros tiende a aumentar la resistencia de las vetillas, y que su ruptura suele darse por el medio del relleno de la vetilla; entre otros.

## 2. Marco Geológico

El mega-yacimiento de cobre y molibdeno El Teniente forma parte de la Franja Cuprífera del Mioceno Superior-Plioceno, ubicada en los Andes Centrales y que también incluye a los yacimientos Los Pelambres y Río Blanco-Los Bronces (Skewes *et al.*, 2002).

### 2.1. Geología Regional

El Teniente está ubicado en la franja cordillerana de Chile Central, comprendida entre los 33°45'-34°45' latitud sur y los 70°00'-71°00' longitud oeste, donde afloran principalmente potentes secuencias estratificadas de rocas volcánicas intercaladas con secuencias sedimentarias (marinas y continentales) depositadas desde el Triásico Superior. Estas unidades han sido intruidas por cuerpos hipabisales y plutónicos Cenozoicos, y en conjunto forman parte del Ciclo Orogénico Andino (Klöhn, 1960). Se presenta su distribución espacial en el mapa geológico regional (Figura 2.1).

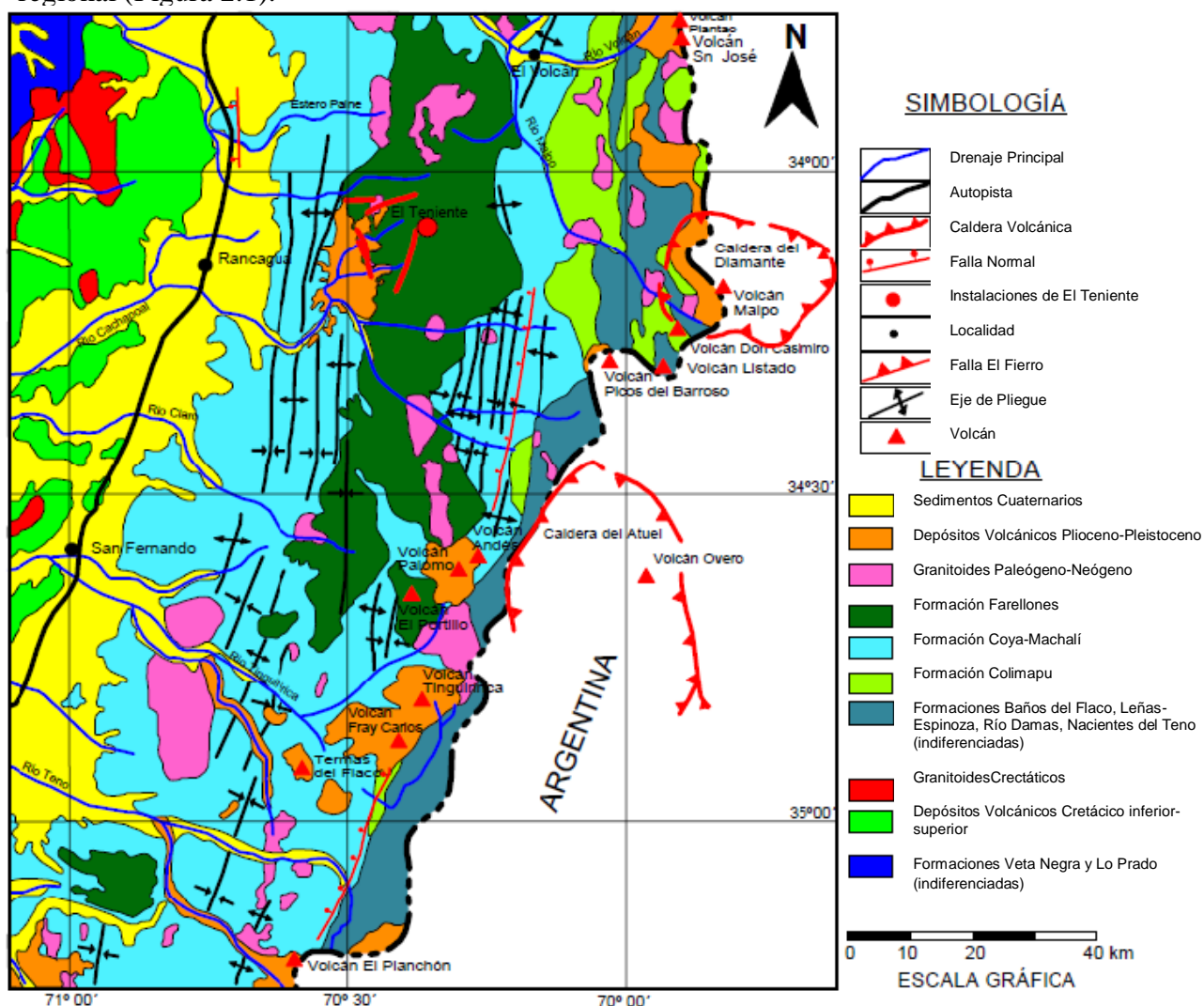


Figura 2.1: Mapa geológico regional, modificado de Charrier *et al.*, 1996. El Teniente, centro de este estudio, se encuentra identificado con un círculo rojo.

### **2.1.1. Rocas Estratificadas**

Las unidades estratificadas de la zona han sido incorporadas en formaciones, por autores como Klöhn (1960), Charrier (1973 y 1981) y González (2000). Dichas formaciones se describen a continuación, desde la más antigua a la más reciente.

#### **a) Formación Nacientes del Teno (Bajociano-Kimmeridgiano Inferior):**

Se presenta escasamente en el sector del yacimiento. Corresponde a un grupo de rocas sedimentarias clásticas, organogénicas y químicas, intercaladas con material piroclástico, depositadas durante el ciclo marino Bajociano-Kimmeridgiano Inferior, y se distribuye discontinuamente en el sector oriental de la región mostrada en la Figura 2.1 (Charrier, 1973). Davidson (1971) y Davidson y Vicente (1973) dividieron esta formación en dos miembros: el Miembro Santa Elena, definido por Klöhn (1960), o Miembro Superior Evaporítico (yeso y anhidrita), que se encuentra intensamente deformado, presentando una potencia de 500 a 600 metros, disminuyendo hacia el este; y el Miembro Rinconada o Miembro Inferior Detrítico y Calcáreo, con una potencia de 100 a 200 metros, cuya edad ha sido asignada sobre la base de su contenido fosilífero (Charrier, 1973). Esta Formación subyace concordantemente a la Formación Río Damas.

#### **b) Formación Río Damas (Kimmeridgiano Superior-Titoniano Inferior):**

Definida por Klöhn (1960), ubicada en el valle del río del mismo nombre, en la VI Región. Está conformada por rocas sedimentarias clásticas intercaladas con potentes depósitos de origen volcánico (efusivos y piroclásticos) y esporádicos sedimentos químicos, depositados en un ambiente continental (terrestre subaéreo y lagunar), representando el fin de un ciclo regresivo. La Formación se distribuye como una franja en dirección Norte-Sur en el margen oriental de la región (Figura 2.1). Presenta su mayor desarrollo en la zona del Río Damas, lugar donde exhibe un espesor promedio de 3.000 metros. Sobreyace de manera concordante a la Formación Nacientes del Teno y subyace en forma concordante y gradual a la Formación Baños del Flaco. A su vez, limita en contacto por falla con la Formación Leñas-Espinoza (Charrier, 1973).

#### **c) Formación Leñas-Espinoza (Kimmeridgiano Superior-Titoniano Inferior):**

Definida por Klöhn (1960) y posteriormente redefinida por Charrier (1981), corresponde a una serie transgresiva de rocas sedimentarias detríticas en la parte inferior y calcáreas fosilíferas en la parte superior, con una potencia de aproximadamente 1.200 metros. Estas series se distribuyen en afloramientos orientales restringidos con un ancho promedio de 1.000 metros y disposición N-S (Figura 2.1). Hacia su techo subyace a la Formaciones Baños del Flaco y Coya-Machalí en contacto gradual y discordante, respectivamente. Su límite inferior es desconocido, y presenta un contacto por falla con la Formación Río Damas, considerado como contemporáneo

**d) Baños del Flaco (Titoniano-Neocomiano)**

Definida por Klöhn (1960) como una secuencia de rocas sedimentarias calcáreas de carácter marino (margas y calizas) con intercalaciones detríticas y volcánicas (conglomerados, brechas, areniscas, tobas y lavas), con una potencia que varía entre 1.100 y 2.300 metros aproximadamente, disminuyendo su espesor hacia el este. Posteriormente, Charrier (1981) asigna a esta formación los estratos superiores de la Formación Leñas-Espinoza definida por Klöhn (1960). La edad de esta Formación coincide con el segundo ciclo de transgresión marina que se desarrolló entre el Kimmeridgiano y el Hauteriviano.

Su localidad tipo se sitúa en el sector de Baños del Flaco, en el valle del Río Tinguiririca. Se reconoce en el sector oriente de la región, con un espesor promedio de 1.000 metros. Sobreyace a las Formaciones Río Damas y Leñas-Espinoza de manera concordante y con paso gradual, y subyace a la Formación Colimapu (Tabla 2.1). En algunas áreas, su límite superior se encuentra erosionado y se presenta cubierto de manera discordante por la Formación Coya-Machalí. En general, esta Formación se encuentra intensamente deformada.

**e) Formación Colimapu (Barremiano-Albiano)**

Situada en la quebrada del mismo nombre, fue definida por Klöhn (1960), y posteriormente estudiada por González y Vergara (1962), corresponde a un conjunto de rocas estratificadas volcano-sedimentarias continentales, que incluye areniscas tobíferas rojizas, lutitastobíferas y tufitas rojas, que presentan intercalaciones con capas de conglomerados, brechas y lavas andesíticas, calizas y capas de yeso en forma discontinua.

Esta Formación se encuentra dividida en dos miembros: Miembro Inferior Sedimentario, compuesto de areniscas finas epiclásticas y calizas micríticas, con una potencia de 1.500 metros; y Miembro Superior Volcánico, compuesto de tobas lítico-cristalinas, tobas de lapilli e ignimbritas, de 1.600 metros de potencia (Charrier, 1981). Los depósitos de esta formación se generaron a partir del segundo ciclo sedimentario continental, asociado a una fase de alzamiento durante el Barremiano-Albiano, que culmina con una fase plegada de las unidades del Senoniano en la fase Sub-Hercínica (Charrier, 1973). Se dispone concordantemente sobre la Formación Baños del Flaco, mientras que hacia el techo se encuentra cubierto en discordancia de erosión bajo estratos de la Formación Coya-Machalí (Tabla 2.1). Su espesor mínimo aproximado es de 3.000 metros y aflora al nor-oriente de la región. Martínez y Osorio (1963), determina su edad albiana con base en el hallazgo de carófitas fósiles.

**f) Formación Coya-Machalí (Eoceno Superior-Mioceno Inferior):**

Definida por Klöhn (1960), corresponde a una potente secuencia estratificada de rocas continentales, principalmente volcánicas y con importantes intercalaciones sedimentarias. Las rocas volcánicas consisten en coladas, brechas y tobas de carácter andesítico y riolítico; mientras que las rocas sedimentarias consisten en brechas, conglomerados, areniscas y limonitas oscuras. Dataciones radiométricas K-Ar en muestras de la localidad tipo indican edades de 20,5-21,1 Ma (Charrier y Munizaga, 1979).

Los afloramientos de la Formación en la región se distribuyen en dos franjas paralelas de orientación Norte-Sur, separadas por afloramientos suprayacentes de la Formación Farellones (Charrier *et al.*, 1994) (Figura 2.1). La franja occidental consiste en una secuencia estratificada de rocas continentales, principalmente volcánicas, tales como lavas afaníticas, porfídicas y microfaneríticas, y presenta un espesor de más de 1.900 metros. Por otra parte, la franja oriental está formada por rocas piroclásticas, con importantes intercalaciones de sedimentitas finas (Charrier *et al.*, 1994 y Charrier y Munizaga, 1979), con un espesor de unos 1.300 metros. Ambos afloramientos se encuentran deformados y se presentan con vergencias opuestas, la franja oriental hacia el este y la occidental hacia el oeste. Algunos autores reconocen metamorfismo de bajo grado en las rocas pertenecientes a esta Formación (Levi y Aguirre., 1989, Vergara *et al.*, 1995). Debido a la orogénesis y erosión a la que se vio afectada después de su depositación, se superpone discordantemente sobre las formaciones Baños del Flaco, Leñas-Espinoza, Río Damas y Nacientes del Teno y subyace en discordancia angular a la Formación Farellones.

**g) Formación Farellones (Mioceno Superior):**

Definida por Klöhn (1960), principalmente volcánica, está compuesta por una potente unidad de sedimentitas clásticas terrígenas, lavas andesíticas, riolíticas y basálticas, y rocas piroclásticas alternadas con sedimentos derivados de la descomposición de las rocas efusivas y depósitos lagunares, que consisten en areniscas, lutitas, tufita y capaz delgadas de caliza.

Tiene un espesor mayor a 2.400 metros, y sus afloramientos se disponen en una franja de orientación N-S, y está delimitada hacia el este y oeste por la Formación Coya-Machalí, separando a la misma en dos franjas con la misma orientación (Figura 2.1).

La importancia de esta formación en la región radica en que en esta se aloja el yacimiento El Teniente. Se dispone con pliegues suaves, con inclinaciones de no más de 25°, a subhorizontal (Charrier, 1983), sobreyaciendo en discordancia angular a la Formación Coya-Machalí, y está localmente cubierta por la Formación Colorado-La Parva (Thiele, 1980), aunque en general su límite superior es la superficie de erosión actual. Dataciones radiométricas K-Ar realizadas por diversos autores ubican a esta formación entre el Mioceno Medio y Superior.

**h) Formación Colón-Coya (Plioceno-Pleistoceno):**

Reconocida por primera vez por Enrione (1972) entre el área industrial de Colón y el Poblado de Coya, y definida como Formación por Gómez (2001), corresponde a un conjunto de depósitos laháricos de granulometría heterogénea, insertos en una matriz arcillo-cinerítica, con intercalaciones locales de niveles de ceniza, coladas andesíticas de poca potencia y gravas fluviales. El espesor de los depósitos varía de algunos centímetros a unos 150 metros. Sobreyace en disconformidad a las Formaciones Coya-Machalí y Farellones (Tabla 2.1), cubriendo un área de aproximadamente 160 km<sup>2</sup> y rellenando la paleotopografía del valle. Su techo es la actual superficie de erosión. Dataciones radiométricas K-Ar obtenidas por Charrier y Munizaga (1979), coinciden con los resultados de Cuadra (1986), situando a esta Formación en el Plioceno-Pleistoceno (2,3-1,3 Ma) (Figura 2.1).

**i) Depósitos no consolidados (Plioceno-Pleistoceno):**

Asociados principalmente a los sistemas de drenaje del área, corresponden a depósitos aluviales, fluviales, lacustres, glaciofluviales, glaciales, de escombros y derrumbes (Charrier, 1983). Estos depósitos se encuentran rellenando los principales sistemas de drenaje, tales como los valles de los ríos Cachapoal, Maipo, Teno y Blanco.



Marco Geológico

Tabla 2.1: Cuadro resumen de las Formaciones de los Andes de Chile Central. Modificado de Charrier *et al.*, 1996.

Formación	Litología	Espesor (m)	Edad	Autor	Observaciones
Colón-Coya	Lahares, coladas de lavas, andesíticas, dacíticas y piroclastos	150	Plioceno Superior-Reciente	Gómez (2001)	
<b>Discordancia del 3° plegamiento</b>					<b>Fase del Mioceno-Plioceno</b>
Farellones	Depósitos continentales, lavas dacíticas y depósitos piroclásticos	2400	Mioceno (25-7 Ma)	Klöhn (1960)	
<b>Discordancia del 2° plegamiento</b>					<b>Fase del Oligoceno Inferior o del Mioceno Inferior</b>
Coya-Machalí	Depósitos volcanoclásticos y depósitos detríticos	3200	Paleógeno-Neógeno Inferior (62,3-164 Ma)	Klöhn (1960)	Correlacionable con la Formación Abanico
<b>Discordancia del 1° plegamiento</b>					<b>Fase del Cretácico Superior</b>
Colimapu	Depósitos sedimentarios rojos (M. Inferior) y depósitos volcánicos (M. Superior)	2000-3000	Barremiano-Albiano	Klöhn (1960)	
Baños del Flaco	Sedimentarias marinas fosilíferas	2000	Titoniano-Neocomiano	Klöhn (1960)	Correlacionable a la Formación Lo Valdés
Leñas-Espinoza	Rocas piroclásticas y depósitos turbidíticos	1200	Kimmeridgiano Superior	Klöhn (1960)	Concordante y en contacto por falla
Río Damas	Areniscas rojas. Contienen talus, conglomerados y lavas	3000	Kimmeridgiano Superior-Titoniano Inferior	Klöhn (1960)	
Nacientes del Teno	Areniscas marinas y calizas, 100-200 m de yeso (M. Superior)	600-1000	Bajociano-Kimmeridgiano Inferior	Klöhn (1960)	En Los Andes de Chile Central no afloran estratos más antiguos

### 2.1.2. Rocas Intrusivas

Los intrusivos presentes en el sector central de la Cordillera de los Andes, donde se encuentra emplazado el yacimiento El Teniente, tienen una variada composición, textura, edad y extensión. Se reconoce la existencia de al menos cinco franjas de intrusivos agrupados en complejos ígneos intrusivos del Paleógeno-Neógeno (Oligoceno Superior al Mioceno Superior), con edades que varían entre los 34,3 y 5,59 Ma (Falcón y Rivera, 1998). Estos cuerpos corresponden a intrusivos de carácter plutónico e hipabisal, siendo los tipos litológicos más comunes granodioritas de hornblenda y biotita, pórfidos dioríticos y andesíticos, monzonitas, monzodioritas y pórfidos dacíticos, cortando a las rocas de las Formaciones Coya-Machalí y Farellones (Skewes *et al.*, 2002).

Cuerpos menores reconocidos en la región, corresponden principalmente a stocks, apófisis, diques y filones consistentes en rocas faneríticas y subordinadamente afaníticas y brechas, entre los que se han reconocido granitos, granodioritas, tonalitas, monzonitas cuarcíferas y dioritas cuarcíferas (Charrier, 1981). Kurtz *et al.* (1997) agruparon estos cuerpos intrusivos en 3 unidades de acuerdo a sus edades Ar/Ar:

1. Plutones antiguos, cuya edad fluctúa entre  $21,6 \pm 4,9$  y  $16,2 \pm 1,2$  Ma.
2. Complejo Plutónico Teniente, que se subdivide en un grupo de 12 Ma ( $12,4 \pm 2,5$  y  $11,3 \pm 0,3$  Ma) y un segundo grupo de 8 Ma ( $8,8 \pm 0,1$  y  $7,7 \pm 0,1$  Ma).
3. Complejo Plutónico Joven, con una edad que oscila entre los  $6,6 \pm 0,1$  y los  $5,5 \pm 0,2$  Ma.

### 2.1.3. Estructuras

Las estructuras a escala regional que controlan la geología entre los 33°S y 39°S tienen orientaciones NW a NNW, y fueron formadas durante los eventos tectono-magmáticos del Paleozoico-Mesozoico (Godoy y Lara, 1994). Estas estructuras delimitarían los segmentos tectónicos que se disponen oblicuamente a la cadena Andina actual, habiendo sufrido numerosas reactivaciones durante el Mesozoico-Cenozoico (Rivera y Cembrano, 2000), cuyos movimientos laterales explicarían la distribución de franjas de centros volcánicos e intrusivos del Mioceno en la región (Falcón y Rivera, 1998).

En esta región en particular, los eventos tectónicos habrían sido controlados por una zona de transcurrencia sinistral N50W, con fracturas sintéticas sinestras (tipo R) de orientación N60W y antitéticas (tipo R') de orientación N50E (Falcón y Rivera, 1998) (Figura 2.2).

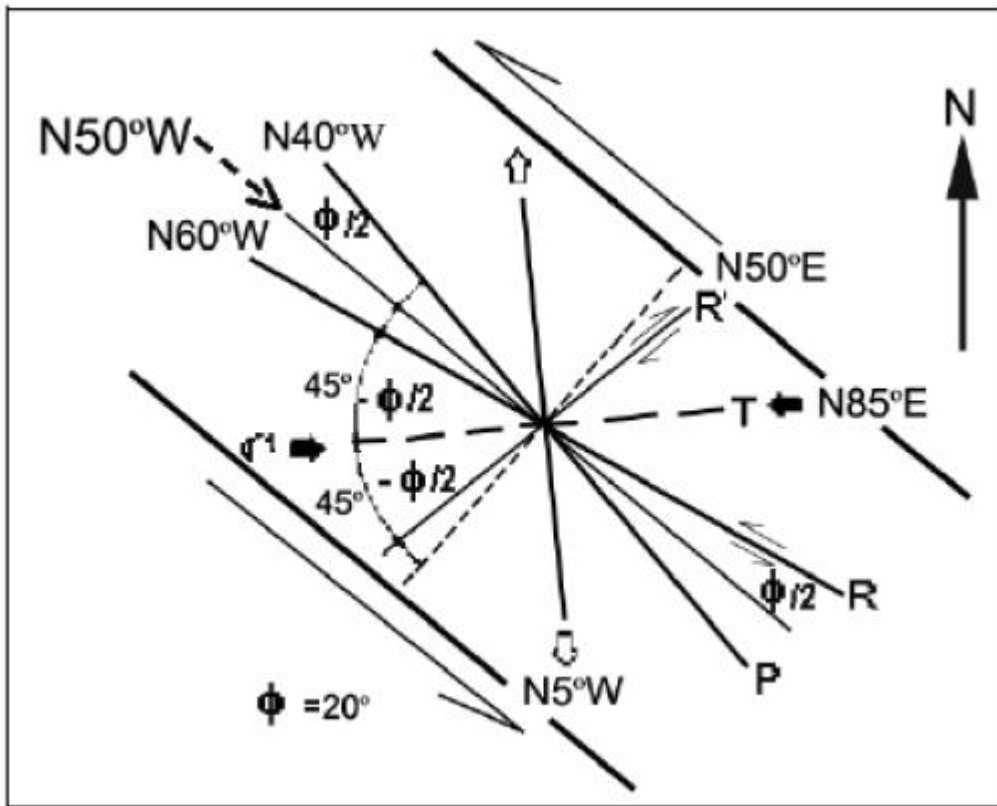


Figura 2.2 Modelo de estructuras tipo Riedel para una zona de transcurrenciasinestral de rumbo N50W, modificado de Falcón y Rivera, 1998

Se presenta a continuación una descripción de rasgos estructurales de la región:

- Pliegues: Tanto anticlinales como sinclinales, descritos por Klöhn (1960) y Charrier *et al.* (1994). Tienen un eje de rumbo general N-S, un leve buzamiento hacia el sur y muestran inflexiones en el rumbo desde N30W a N30E. Estas estructuras presentan continuidad longitudinal solamente entre los segmentos acotados por sistemas de falla N30W (Rivera y Falcón, 2000) (Figura 2.1).
- Fallas: Los sistemas de falla consisten en siete zonas de falla orientadas generalmente N30W, que se reconocen tanto en la Cordillera de la Costa como en la de Los Andes. En la Depresión Intermedia, el relleno sedimentario moderno tiende a obliterar la traza de esas estructuras. En torno al yacimiento El Teniente, destacan las zonas de falla Piuquencillo al norte, El Azufre al centro y Juanita al sur (Rivera y Cembrano, 2000), que truncan a los ejes de plegamiento de la Formación Farellones. Además, Rivera y Falcón (2000) describen a la cuenca de El Teniente como una depresión volcano-tectónica, que se encuentra limitada al norte por la falla Piuquencillo y al sur por el lineamiento Tinguiririca – Navidad, con un ancho de casi 100 km y largo superior a los 150 km en la dirección NW-SE.

## Marco Geológico

- Discordancia: Tres fases compresivas son reconocidas en la región, que se manifiestan a través de tres discordancias orogénicas de plegamiento y de erosión (Klöhn, 1960).
- Una fase compresiva del Cretácico Superior pondría en discordancia las unidades de la Formación Farellones y las rocas volcánicas terciarias y cuaternarias. La segunda fase compresiva sería la responsable de la depositación de la Formación Coya-Machalí, que se presenta en discordancia sobre la Formación Colimapu. La edad de esta fase no es clara, pues algunos autores la asignan al Oligoceno Inferior y otros al Mioceno Inferior (Charrier *et al.*, 1996). Finalmente, en el Mioceno-Plioceno, tomó lugar una fase compresiva que generó un suave plegamiento de la Formación Farellones, depositándose en discordancia la Formación Colón-Coya.

También pueden mencionarse las fallas descritas por Charrier (1981), unas de carácter inverso ubicadas en la franja oriental de la Formación Coya-Machalí, las que se verían favorecidas por la presencia de intercalaciones de roca incompetente, y la presencia de fallas normales con desplazamientos verticales, asociadas a la tectónica de bloques Plio-Cuaternaria resultante del alzamiento andino.

### 2.1.4. Marco Geotectónico

El depósito se ubica al este de la intersección de la dorsal de Juan Fernández y la fosa chilena, en el límite entre la Zona Volcánica Sur (ZVS) y el segmento tectónico andino de bajo ángulo o *flat slab* (Figura 2.3), segmento que se caracteriza por la ausencia de actividad volcánica moderna (Kurtz *et al.*, 1997).

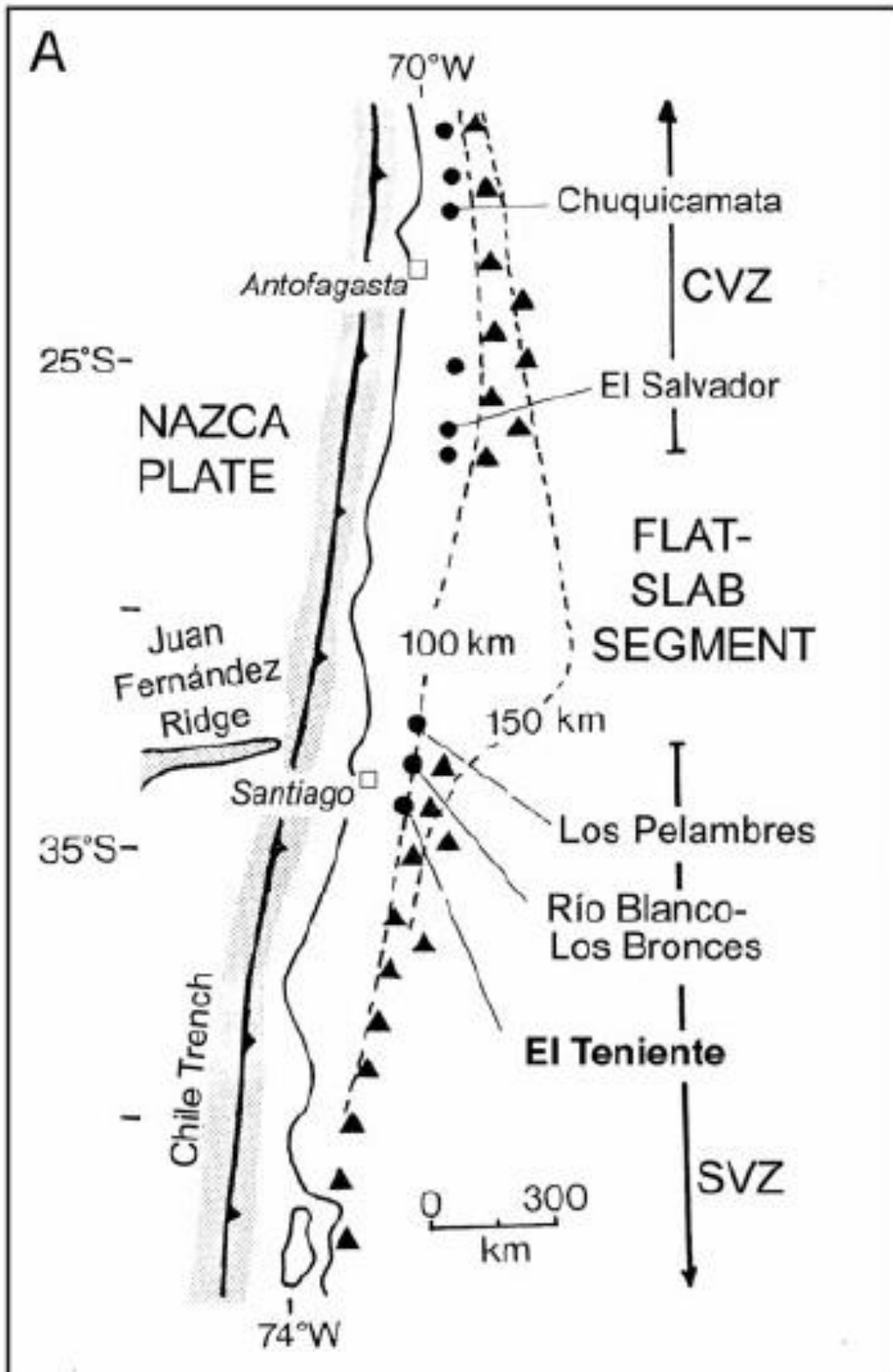


Figura 2.3 Ubicación del segmento Zona Volcánica Central (ZVC). Zona de *flat slab* y la porción norte de la Zona Volcánica Sur (ZVS). Los triángulos representan el volcanismo cuaternario y los círculos representan yacimientos de cobre del Eoceno Tardío y Oligoceno Temprano. Líneas segmentadas indican la profundidad actual de la zona de Benioff. Stern *et al.*, 2011.

## Marco Geológico

Dentro de la evolución de Los Andes se destacan dos grandes ciclos orogénicos, el ciclo pre-Andino (fin del Paleozoico, 230 Ma) y el ciclo Andino (Meso-Cenozoico). El ciclo Andino se divide en cinco intervalos principales, que representan condiciones tectónicas y paleogeográficas diferentes (Charrier *et al.*, 1996):

- Triásico Superior – Jurásico Inferior (205 a 180 Ma): Periodo en que se desarrolla un sistema de grabens de orientación NNW.
- Jurásico Inferior – Jurásico Superior (180 a 135 Ma): Periodo en que se desarrolla el arco volcánico en el lugar donde actualmente se encuentra la Cordillera de la Costa, parte de la Cordillera Principal y una cuenca de trasarco al este de ella.
- Jurásico Superior – Cretácico Inferior (135 a 95 Ma): Periodo de desarrollo de una cuenca de intraarco en la actual Cordillera de la Costa y parte occidental de la Cordillera Principal y formación de una cuenca de trasarco al este de ella.
- Cretácico superior – Terciario Inferior (95 a 24 Ma): Periodo de desarrollo de depósitos sedimentarios continentales y marinos, seguidos de un episodio de fuerte erosión.
- Neógeno – Presente (a partir de los 24 Ma): Periodo con desarrollo de dominios volcánicos y plutónicos en condiciones paleogeográficas muy diferentes entre sí.

Durante el Mioceno Inferior la corteza continental bajo la región era delgada, con un espesor inferior a los 45 km y se encontraba sobre una zona de subducción relativamente inclinada, mayor a los 25°. A partir del Mioceno Medio – Plioceno Temprano ha decrecido el ángulo de subducción, causando deformación, enfrosamiento y alzamiento de la corteza continental donde, al norte de los 33°S el descenso de ángulo es rápido y al sur de los 33°S es lento y menos extendido (Figura 2.4) (Stern & Skewes, 1994 y 1995).

Tres de los más grandes e importantes yacimientos de tipo pórfido cuprífero de Chile, El Teniente, Río Blanco–Los Bronces y Los Pelambres, se encuentran ubicados en la zona central del país, en el límite del segmento de *flat slab* y la Zona Volcánica Sur. La génesis de estos depósitos se relacionaría al engrosamiento cortical y solevantamiento asociado a la progresiva disminución del ángulo de subducción de la Placa de Nazca, entre el Mioceno y el Reciente (Figura 2.4). Así, el rápido alzamiento y la exhumación de los sistemas plutónicos emplazados en profundidad generaron la exsolución de fluidos magmáticos ricos en cobre, los que serían responsables de la mineralización del tipo pórfido cuprífero en la región (Stern&Skewes, 1995).

Con respecto a los rasgos geotectónicos mencionados, el yacimiento El Teniente se ubica a 260 km de la fosa chilena, a aproximadamente 90 km sobre la zona sísmica, y a aproximadamente a 50 km al oeste del frente magmático ubicado en los Andes altos, donde el drenaje se divide entre Chile y Argentina.

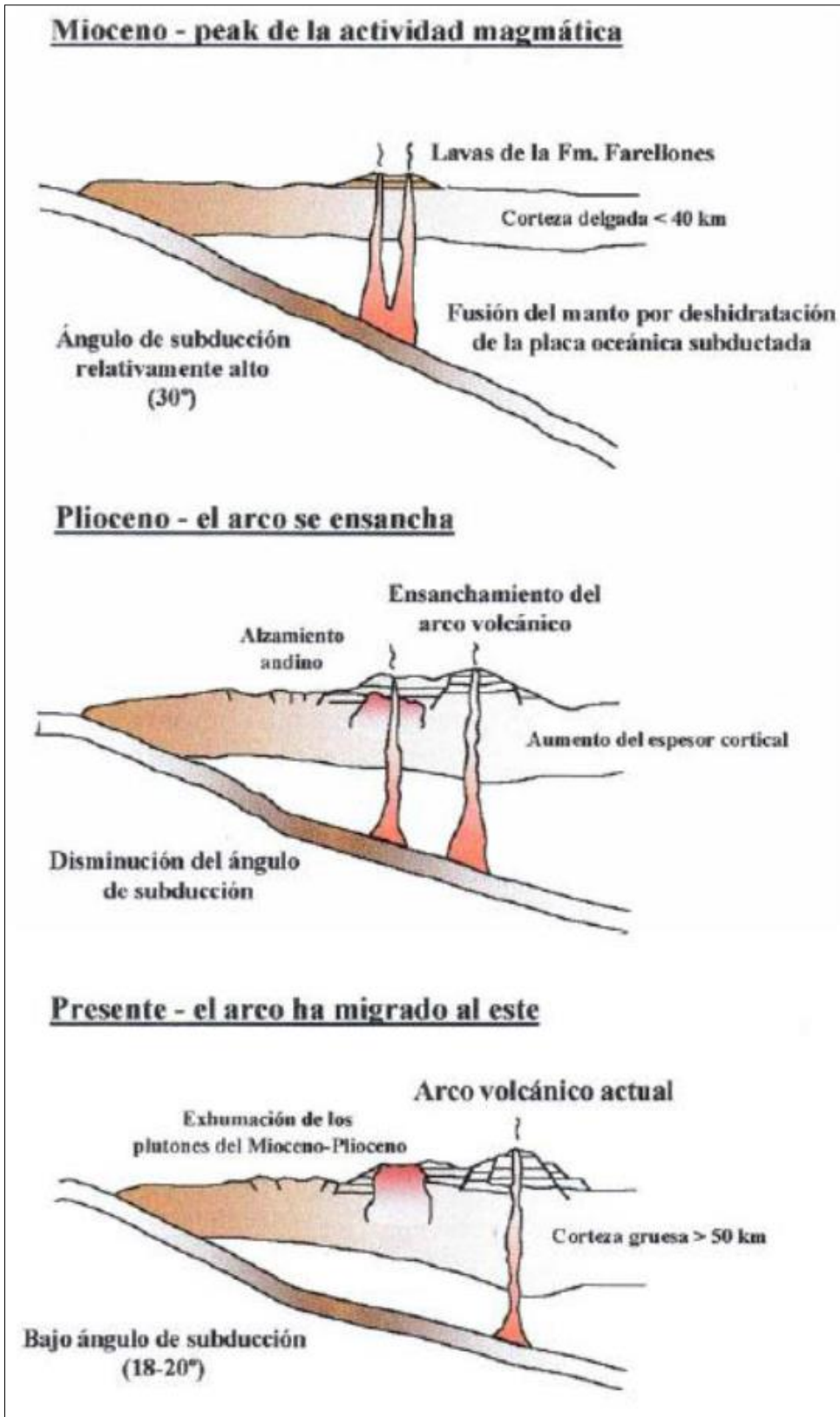


Figura 2.4: Perfiles transversales de la evolución tectono-magmática de los Andes Centrales a los 34°S, entre el Mioceno y el Presente. Modificado de Stern & Skewes (1995).

## 2.2. Geología del Yacimiento

El yacimiento hipógeno de cobre El Teniente pertenece al grupo de depósitos de cobre formado a fines del Mioceno y es uno de los más grandes del mundo con recursos estimados de 75 MTON (Skewes *et al.*, 2002). Además de explotar cobre como mineral principal, se obtiene molibdeno como subproducto. Se encuentra emplazado en rocas intrusivas, piroclásticas, volcánicas y subvolcánicas correspondientes a la Formación Farellones, de edad Miocena Media a Superior (Camus, 1975; Cuadra, 1986) (Figura 2.1).

El depósito es resultado de sucesivos eventos superpuestos de deformación, intrusión de cuerpos félsicos, mineralización y alteración, ocurridos en un lapso de al menos 2.0Ma, donde los recursos se generaron en un periodo de 0.69Ma (Maksaev *et al.*, 2004). Otra hipótesis, propuesta por Skewes *et al.* (2002) consiste en que el depósito sería de tipo megabrecha, generado por la exsolución de fluidos magmáticos de plutones en enfriamiento. Tanto las unidades intrusivas como las brechas presentes en el depósito, provendrían de un mismo reservorio magmático (Stern *et al.*, 2011), de sistema abierto, estratificado termal y químicamente, de gran volumen y de larga vida (>600 km<sup>3</sup> y ~3Ma), ubicado a al menos 4 km de profundidad desde la paleosuperficie.

La formación de vetas tardías, en asociación con el emplazamiento de brechas más jóvenes e intrusiones de pórfidos félsicos, generan una alteración sericitica que en algunos casos contribuye con Cu y en otros elimina o redistribuye la mineralización preexistente (Skewes *et al.*, 2002). La mineralización de cobre y molibdeno es principalmente en vetillas del tipo stockwork (70%), formando un cuerpo mineralizado de forma elíptica en planta de 1.600 x 2.000 metros aproximadamente. El 30% restante se concentra en el cemento de diversas brechas magmáticas-hidrotermales de biotita, anhidrita, cuarzo y turmalina, y en menor proporción, diseminada en la matriz de los cuerpos intrusivos félsicos. En su parte central se encuentra la megaestructura Brecha Braden, con forma de cono, en donde se ubican las instalaciones principales del yacimiento. Los minerales de mena más importantes del yacimiento, en la zona primaria, corresponden a la asociación calcopirita-bornita-pirita. En la zona de enriquecimiento secundario, los minerales característicos son calcosina, covelina, cobre nativo y cuprita (Cuadra, 1986). Dentro del yacimiento se pueden distinguir los siguientes grupos litológicos principales: Complejo Máfico El Teniente (ex “Andesitas de la Mina”), Complejo Félsico, Complejo Chimenea Braden (“Braden Pipe”), Complejo de Brechas e Intrusivos Menores.

En la mina se reconocen tres sistemas estructurales preferenciales: NS, NE y NNW, este último con continuidad distrital, evidenciados por la traza de los contactos entre unidades de rocas diferentes, por fallas y zonas de cizalle y por la distribución y geometría de las vetas y vetillas (Figura 2.5).



## Marco Geológico

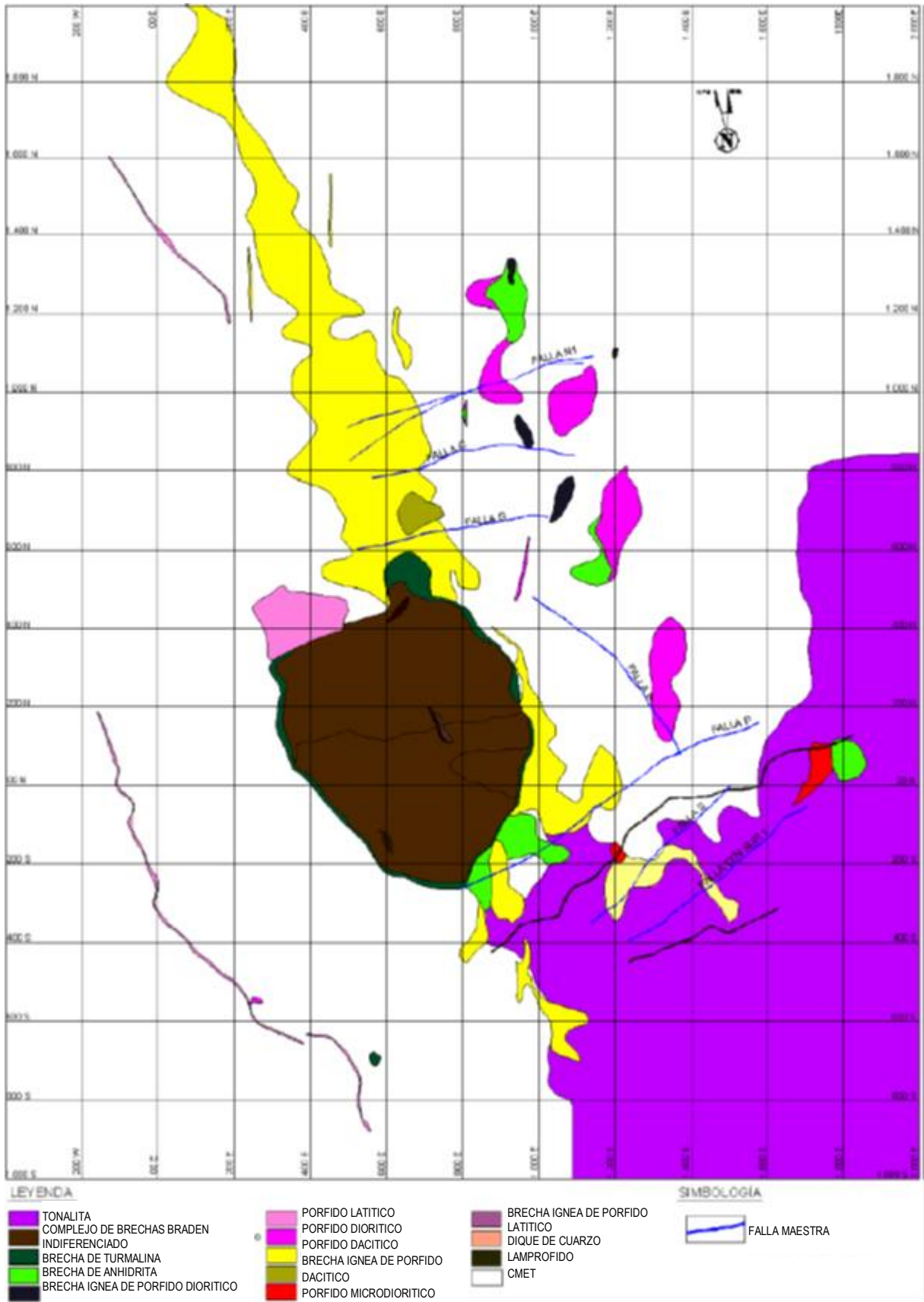


Figura 2.5: Principales unidades litológicas y estructuras del nivel Ten-8 (1880 m.s.n.m). Urrutia *et al.*, 2006

### 2.2.1. Litología

#### *i. Complejo Máfico El Teniente (CMET, Ex-“Andesitas de la mina”)*

Esta unidad es la roca de caja del yacimiento, y corresponde a un conjunto rocas oscuras, de edad Mioceno Superior, que a gran escala conforman un lacolito que intruye a la Formación Farellones (Skewes *et al.*, 2002; Stern *et al.*, 2011). Se trata de un complejo subvolcánico de composición básica, de color pardo oscuro a negro, cuyas dimensiones son de aproximadamente 2 km de alto, 2,4 km de ancho y 1,2 km de largo, donde se agrupan gabros, diabasas, basaltos, pórfidos basálticos y andesitas basálticas (Burgos, 2002). Esta unidad era conocida anteriormente como “andesitas de la mina”, y es la de más amplia distribución en el yacimiento (Figura 2.5), albergando más del 80% de la mineralización de cobre presente en el depósito (Camus, 1975).

La alteración, mineralización y brechización del complejo han cambiado la mineralogía y textura de este conjunto de rocas, obliterándolas. La alteración principal que afecta a esta unidad es la alteración potásica, que le da una coloración gris-pardo a negro a estas rocas y que tiene a la biotita como mineral predominante (Villalobos, 1975), y anhidrita, cuarzo, clorita, sericita, actinolita y turmalina en cantidades menores (Skewes *et al.*, 2002). Este complejo presenta, además, un intenso stockwork que enmascara las características primarias de las rocas.

Burgos (2002) confirmó que parte de este complejo corresponde a una diabasa de textura porfídica con variaciones en el tamaño de los fenocristales de plagioclasa. Las texturas de grano fino corresponderían a los márgenes del intrusivo y las de grano grueso al centro de él. Se encuentra constituido, generalmente, por plagioclasa y relictos de piroxeno, con una fuerte alteración biotítica.

Las diabasas y diques basálticos que conforman el Complejo Máfico El Teniente (CMET) se habrían emplazado durante el Mioceno. En este periodo se generó una cuenca volcano-tectónica en el Arco Andino por extensión, a partir de un sistema de fallas de orientación NNW, la cual se cerró en el Mioceno Tardío (Godoy, 1993; Falcón y Rivera, 1998).

#### *ii. Complejo Félsico*

Corresponde a un conjunto de cuerpos intrusivos subverticales de edad Mioceno a Plioceno que presentan formas de stocks, apófisis tabulares y diques. Rabbia *et al.* (2000) indicaron que estos cuerpos presentan afinidad calcoalcalina y contenido de sílice mayores al 56%. Según los Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas en El Teniente (referencia interna SGL-I-123/03), se los ha agrupado de la siguiente manera:

### Pórfido Dacítico

También llamado Dacita, Pórfido Teniente y Dacita Porfídica, fue caracterizado por Ossandón (1974), Cuadra (1986), Skewes *et al.* (2002), Rojas (2003), entre otros. Esos autores han señalado que corresponde a un cuerpo intrusivo de orientación N-S a NNW con manto subvertical. Está ubicado en el sector norte del depósito, presentando una longitud de 1500 m y una potencia que varía de 50 m en superficie a 300 m en el nivel Teniente 8 (Figura 2.5). Intruye al Complejo Máfico El Teniente, presentando contactos nítidos irregulares, brechoso o bien transicionales. En su extensión sur, es intruido por la Brecha Braden, presentando el desarrollo de una brecha con matriz de turmalina y cristales del pórfido.

El Pórfido Dacítico es de color gris claro a blanco con fenocristales de oligoclasa, biotita y cuarzo en menor medida (Cuadra, 1986), siendo una roca con abundante feldespato alcalino y pobre en sílice. Ossandón (1974) distinguió dos variedades texturales: la porfídica idiomorfa, que ocurre cerca de la zona de contacto; y la porfídica hipidiomorfa, que ocurre en la parte central del intrusivo.

El emplazamiento de esta unidad se considera asociado al evento mineralizador principal del depósito (Ojeda *et al.*, 1980). Cuadra (1986) le asignó una edad de 4,6 a 4,7 Ma a esta unidad mediante edades U/Pb en circón, indicando que la edad del intrusivo ocurrió hace  $5,28 \pm 0,10$  Ma.

### Tonalita

También denominada Diorita Sewell, se presenta como un cuerpo intrusivo en el sector sureste del depósito (Figura 2.5), intruyendo al CMET.

El cuerpo es de color gris claro. En las zonas marginales posee una textura porfídica con fenocristales primarios de plagioclasa, biotita y relictos de anfíbola. La parte central del intrusivo presenta una textura fanerítica. Ambas zonas han sufrido una fuerte alteración cuarzo-sericita-clorita (Cuadra, 1986). Su composición química es de carácter calcoalcalino, con contenidos de sílice variable entre el 63,6% y 64,2% (Rabbia *et al.*, 2000; Reich, 2001).

Cuadra (1986) le asignó una edad a este intrusivo de  $7,1 \pm 1,0$  Ma, mediante dataciones radiométricas K/Ar. Por otro lado, Makshev *et al.* (2004) indicaron una edad de  $5,47 \pm 0,12$  Ma a  $5,63 \pm 0,12$  Ma.

### Pórfido Diorítico

También conocido como Diorita Central, se presenta como una serie de stocks y diques menores de gran extensión vertical, alineados en dirección N30W en la parte norte y central del yacimiento (Figura 2.5). En su contacto con el CMET, generalmente se observan brechas ígneas y/o hidrotermales.

## Marco Geológico

Este intrusivo está compuesto por fenocristales de plagioclasa, biotita y ojos de cuarzo, conformando entre un 30 a 60% de la roca, y presenta localmente asociaciones mineralógicas de alteración potásica, fílica y argílica (Guzmán, 1991).

Dataciones radiométricas U/Pb en circón indican una edad de cristalización del intrusivo de  $6,11 \pm 0,13$  Ma a  $6,28 \pm 0,16$  Ma (Maksaev *et al.*, 2004).

### Pórfido Microdiorítico

También llamado “Pórfido A”, se trata de un cuerpo diorítico de grano fino, con abundantes xenolitos de “andesita” y cúmulos de biotita (Arredondo, 1994), emplazado en el sector centro-este del yacimiento, presentando contactos por intrusión con la Tonalita y el CMET (Figura 2.5). Este cuerpo genera un volumen importante de brechas ígneas e hidrotermales que contienen altas leyes de cobre.

Edades U/Pb en circón indican que la cristalización de este cuerpo ocurrió hace  $6,46 \pm 0,11$  Ma (Maksaev *et al.*, 2004).

### iii. Complejo Brecha Braden

También llamado “Pipa Braden”, corresponde a una chimenea volcánica o “pipa” producida por la salida explosiva de volátiles que han fragmentado y roto la roca de caja, rellenando el conducto con fragmentos angulosos. Tiene forma de tronco de un cono con la base mayor en la parte superior, y sección casi circular en planta, con un diámetro de 1.200 m y extensión vertical reconocida de 3.150 m (Floody, 2000). Su flanco oriental es subvertical, mientras que el resto posee una inclinación de entre  $60^\circ$  y  $70^\circ$  hacia el centro del cuerpo (Cuadra, 1986). Se encuentra emplazada en la parte central del yacimiento, cortando a la mayoría de las unidades litológicas.

La parte central de este complejo está conformada por un conjunto de brechas que, en general, se componen de fragmentos subredondeados polimícticos en una matriz de polvo de roca, con cemento de sericita, turmalina, calcita y/o sulfuros (principalmente piritita). En su interior existe una diversidad de unidades definidas por variaciones en el tamaño, selección y abundancia relativa de los cristales, y por el contenido de turmalina en el cemento, que son: Brecha BradenSericita, Brecha BradenSericita Fina, Brecha BradenSericita Bolones, Brecha BradenClorita, Brecha BradenTurmalina, Brecha BradenTurmalina Bloques. Existen, además, otras unidades de brecha sus bordes (Skewes *et al.*, 2002).

Dentro del complejo de brechas se encuentran grandes unidades geológicas: Unidad Brecha Braden y Unidad Brecha Marginal. La Unidad Brecha Marginal rodea a la Unidad Brecha

## Marco Geológico

Braden en casi toda su periferia con un contacto gradacional, que se reconoce por la variación en el porcentaje de turmalina (Ojeda *et al.*, 1980),

Se considera que la formación de esta estructura fue cercana a la fase tardimagmática del yacimiento, posterior al evento principal de mineralización, cuya edad ha sido estimada en 4,7 a 4,5 Ma (Cuadra, 1986).

### *iv. Cuerpos de Brechas*

Esta agrupación se compone de cristales monolíticos y/o heterolíticos. Arredondo (1994) reconoció en el sector centro-este del yacimiento varios cuerpos de brechas de distinta composición. Las brechas son clasificadas de acuerdo al mineral dominante en contenido en la matriz (Skewes *et al.*, 2002), entre las cuales destacan las Brechas de anhidrita, Brechas de turmalina, Brechas de biotita y Brechas ígneas.

Los cristales son de rocas intrusivas félsicas, máficas, o de ambos tipos, con matriz de biotita, turmalina, cuarzo, feldespato, clorita, anhidrita, yeso, apatito, clacopirita, bornita, pirita, rutilo y magnetita. La matriz suele encontrarse atravesada por vetillas de anhidrita, cuarzo, biotita, feldespato y sulfuros de cobre.

### *v. Intrusivos Menores*

Corresponden a unidades de ocurrencia restringida y de menor importancia, volumétricamente menos importantes y de carácter parcialmente estéril. Estos intrusivos corresponden a los últimos eventos intrusivos reconocidos en el yacimiento

### *vi. Pórfido Latítico*

Definido por Howell y Molloy (1960) como latita porfídica, corresponde a un grupo de diques de poca potencia (entre 2 a 15 m), concéntricos a la Brecha Braden. Se reconocen como cuerpos irregulares, discontinuos y autobrechizados. La roca tiene textura porfídica, con un 40% de fenocristales de plagioclasa en proporción mayor al Pórfido Dacítico. Contiene, además, fenocristales de biotita, anfíbolos alterados y “ojos de cuarzo” en una masa fundamental de cuarzo y feldespato (Skewes *et al.*, 2002). Su emplazamiento sería anterior a la formación de la Brecha Braden, según la edad K/Ar de  $4,96 \pm 0,25$  Ma (Riveros, 1991).

**vii. Diques de Cuarzo y Anhidrita**

Formados por cuarzo y, en menor medida, anhidrita y sulfuros diseminados. Abundan en el sector norte y oeste del depósito. Presentan una potencia de entre 10 cm y 3 m, y un manteo generalmente subvertical. En general, no desarrollan halo de alteración en la roca de caja, y sus contactos son tajantes (Brzovic, 1996; Morales y Pereira, 1996).

**viii. Dique de Andesita**

Atraviesa a la unidad Tonalita (o Diorita Sewell) en su sector sur. La roca es de color gris a negro y presenta textura porfídica. El cuerpo es de forma tabular, con una potencia de 0,52 a 1,0 m, rumbo N60E y corrida de 500 m.

**ix. Diques de Lamprófido**

Corresponden a cuerpos de diques tabulares que se sitúan en la zona sur-central del yacimiento, al sur de la Chimenea Braden (Figura 2.5), con una potencia variable de 0,5 a 2 m, orientación general NE y una corrida reconocida de 500 m. Existen, más al sur, otras unidades reconocidas de lamprófidos de menor corrida y espesor. La roca es de color gris verdoso y presenta textura porfídica fina, compuesta por fenocristales aciculares de hornblenda insertos en una masa fundamental microcristalina. Esta última está compuesta por microlitos de augita y labradorita, y presenta textura traquítica. Sus contactos son nítidos y regulares, cortando a las unidades CMET, Tonalita, Brecha Braden y Brecha Marginal. Los lamprófidos representan las últimas etapas de la actividad ígnea en el depósito y la zona donde este se encuentra. Makshev *et al.* (2004) determinaron que la edad de esta unidad es de  $3,85 \pm 0,18$  Ma, mediante  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en hornblenda, lo que permite, en conjunto con su ausencia de mineralización, deducir que son posteriores a los otros intrusivos.

### **2.2.2. Geología Estructural del Yacimiento**

Según Garrido (1992), el yacimiento se encuentra emplazado en una compleja zona de cizalle, de características distritales y con una orientación aproximada de N65E, denominada Zona de Falla El Teniente (ZFT). Esta zona presenta tres dominios estructurales particulares: Dominio N60E; Dominio N50W; y Dominio N20E, dispuesto *en echelon* con respecto a los anteriores. Los Dominios Estructurales corresponden a zonas de mayor frecuencia relativa de fallas, consituídos en su mayoría por fallas de rumbo con manteo subvertical. En la mina se

manifiestan en forma de mayor frecuencia de fallas paralelas, con un espesor variable de entre 20 y 400 m. Estas fallas de rumbo se caracterizan por desplazamientos de algunos centímetros y geometría anastomosada.

La ZFT presenta una extensión de 14 km y ancho de 3 km, limitando al norte con la quebrada Teniente y al sur con la Falla Agua Amarga (Figura 2.6). Dentro de la zona de falla el arreglo estructural es notoriamente distinto al reconocido en el entorno, independiente de la litología, definiendo un eje de acortamiento de dirección  $N48 \pm 11W$  (Garrido, 1995; Diagramas de Rosetas, Figura 2.6). Debido a la disposición de estas fallas en zonas, se suponen como generadas por cizalle, producto de la deformación distrital. Estos sistemas habrían estado activos antes, durante y después de la formación del yacimiento y serían controlados por el emplazamiento de la Chimenea Braden (Garrido, 1992).

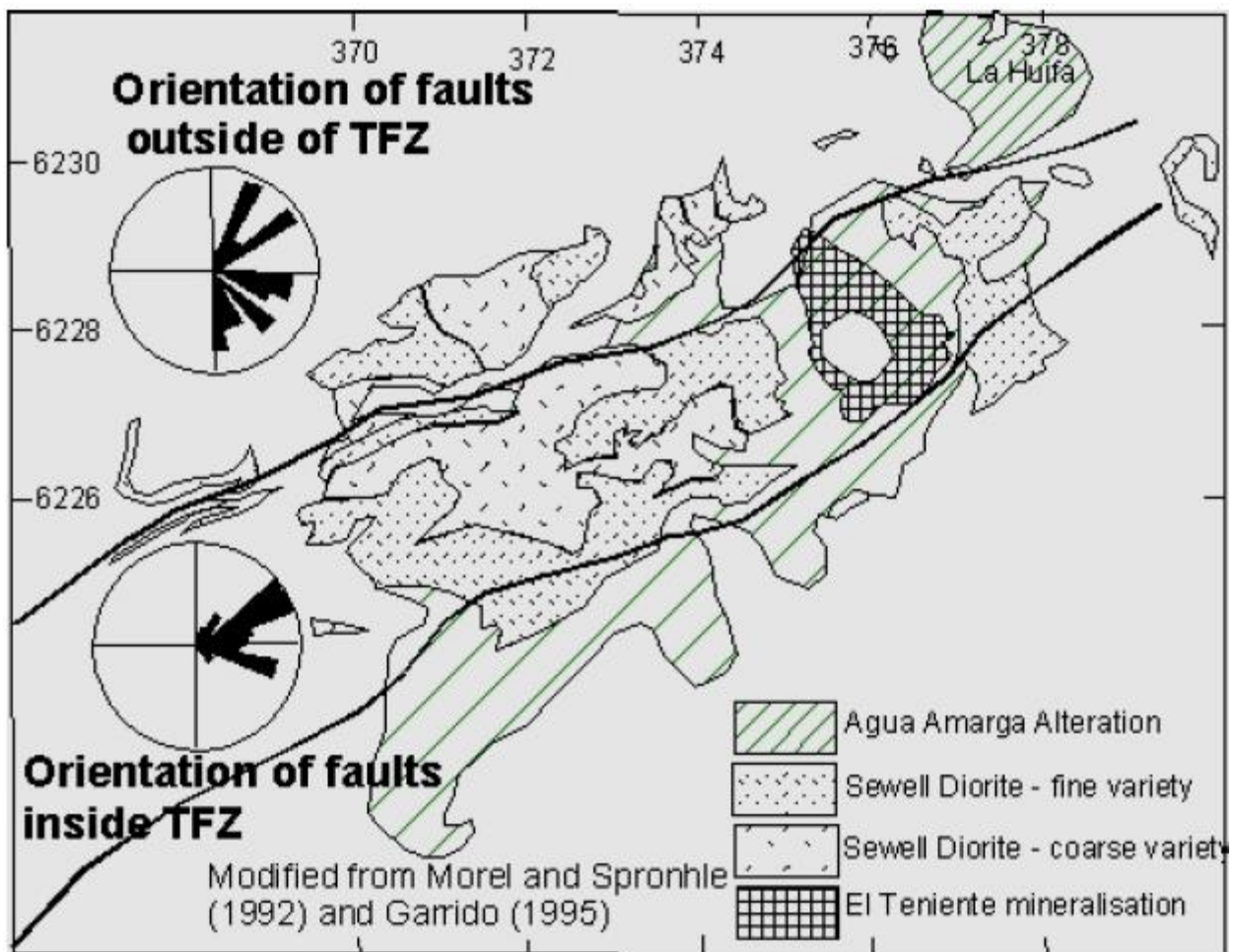


Figura 2.6: Zona de Falla El Teniente (TFZ), limitada al NW por la Qda. Teniente y al SE por la Falla Agua Amarga. Fuera de la zona de falla las estructuras presentan una amplia gama de orientaciones (Garrido, 1995)

### 2.2.3. Alteración y Mineralización

La mineralización del yacimiento El Teniente es producto de la superposición de diversos eventos de alteración y mineralización. En la actualidad se distinguen tres etapas hipógenas, denominadas Tardimagnética, Hidrotermal Principal e Hidrotermal Tardía, además de una etapa Supérgena. Estas etapas están relacionadas al emplazamiento de los intrusivos félsicos dacítico y diorítico, y al anillo de brecha hidrotermal de turmalina y Brecha Braden (Howell y Molloy, 1960). Asociadas a las tres etapas de alteración hipógena, se agrupan las vetillas en: Tardimagnéticas (TM), Hidrotermal Principal (HP) e Hidrotermal Tardía (HT), las que evidencian la evolución hipógena del yacimiento.

#### *i. Etapa Tardimagnética*

Corresponde a la primera etapa de alteración–mineralización del yacimiento. La mineralogía consta principalmente de biotita, con cantidades menores de anhidrita, cuarzo, clorita, albita, turmalina y sericita. La mineralización asociada a esta etapa ocurre en forma diseminada y, en mayor proporción, en vetillas sin halo de alteración, con una marcada zonación en torno al Pórfido Dacítico, con un núcleo rico en bornita, una zona intermedia con predominio de calcopirita y una zona periférica rica en pirita con abundante magnetita diseminada (Zúñiga, 1982).

La distribución de esta etapa en el yacimiento define claramente dos sectores. El primero se ubica en la mitad norte del yacimiento y está aparentemente relacionado con el emplazamiento del Pórfido Dacítico (Arévalo y Floody, 1995); se caracteriza por una zonación con gradiente de intensidad decreciente alrededor de un centro de intensa alteración potásica. Hacia los márgenes del yacimiento, las asociaciones mineralógicas de alteración potásica gradan a asociaciones de alteración propilítica. El segundo sector, ubicado al sur del depósito, presenta la zonación tardimagnética enmascarada por las sucesivas etapas posteriores de alteración superpuestas, aunque aún se distingue una elongación noroeste en que los valores porcentuales máximos de penetratividad coinciden con el eje mayor del Pórfido Dacítico.

Esta etapa se considera asociada a alteración potásica, que se manifiesta en la unidad Tonalita por el reemplazo de los cristales de plagioclasa por feldespato potásico, la ocurrencia de biotita secundaria y de feldespato potásico y biotita en su masa fundamental. En el Pórfido Dacítico, la alteración potásica se caracteriza por la pseudo–pertización de las plagioclasas y por la formación de cúmulos irregulares de biotita secundaria y vetillas de cuarzo. En el CMET, se manifiesta por la presencia de biotita, albita y cuarzo, destruyendo parcial o totalmente la textura original de la roca (Arredondo, 1994).



**ii. Etapa Hidrotermal Principal**

Esta etapa se sobreimpone a la anterior, y está relacionada con la reacción de los fluidos tardimagmáticos con aguas meteóricas. Se define por la sobreimposición de franjas de alteración fílica, ubicadas simétricamente con respecto al Pórfido Dacítico. Su intensidad se encuentra determinada por la frecuencia de vetillas de cuarzo, anhidrita y sulfuros, que obliteran la mineralogía preexistente y texturas tardimagmáticas (Ojeda *et al.*, 1980). La mineralización corresponde a calcopirita, pirita y molibdenita subordinada, principalmente en vetillas y escasamente en forma diseminada en los halos de alteración (Zúñiga, 1982). Las vetillas son de cuarzo, anhidrita y calcopirita, con mica blanca, digenita y bolibdenita en menor cantidad. Las vetillas “Hidrotermales Principales” (HP) se asocian a esta etapa.

La mineralogía en la roca de caja es reemplazada por una asociación de cuarzo-sericita, con menor proporción de anhidrita y clorita. La asociación se desarrolla a expensas de la biotita tardimagmática y de los feldespatos de las rocas máficas y del Pórfido Dacítico, respectivamente. En el Pórfido Diorítico y en el Pórfido Dacítico, el feldespato potásico, plagioclasa y minerales ferromagnesianos se encuentran alterados en forma similar y la textura original fanerítica y/o porfídica es reemplazada por una textura sacaroidal fina.

**iii. Etapa Hidrotermal Tardía**

Relacionada espacial y genéticamente a la unidad Brecha Marginal (Villalobos, 1975). Se manifiesta por la alteración cuarzo-sericita de los fragmentos de la brecha, así como por vetas y vetillas. Las vetas se presentan con relleno de anhidrita, yeso, turmalina, siderita, y cuarzo; y con halos de alteración de cuarzo-sericita-clorita-calcita. Las vetillas se presentan con relleno de cuarzo, turmalina, anhidrita, sericita, clorita, yeso, carbonatos y menas de cobre, hierro y molibdeno (Zúñiga, 1982). Estas estructuras se distribuyen en una franja concéntrica al anillo de brechas y, además, como cemento en la matriz de la brecha hidrotermal de turmalina y como parte de la alteración de sus fragmentos. Arévalo *et al.* (1998) dividieron a esta etapa en dos: una temprana y una tardía propiamente tal, asociada a la brecha de turmalina y que constituye los valores máximos de penetrabilidad de la etapa original.

*iv. Etapa Póstuma*

Está relacionada a la consolidación de la Brecha Braden y se caracteriza por una asociación mineralógica constituida fundamentalmente por sericita, calcita y pirita en el cemento, y por la alteración sericítica de los fragmentos de la brecha. También existe un relleno de estructuras planares y de cavidades con minerales de baja temperatura, tales como yeso, siderita, ankerita, baritina, esfalerita, galena, cuarzo, anhidrita y turmalina (Ojeda *et al.*, 1980). La mineralización hipógena se encuentra en vetas y vetillas de pirita, calcopirita, tenantita-tetraedrita, molibdenita y galena-esfalerita, con anhidrita como mineral de ganga predominante, y, de manera subordinada, cuarzo, turmalina, yeso y carbonatos. Como minerales secundarios se encuentran sericita, clorita y diseminaciones de pirita y calcopirita (Floody, 2000).

*v. Etapa Supérgena*

Esta etapa se distribuye con geometría elíptica de eje mayor NW en un área de 15 km<sup>2</sup> en la parte superior del yacimiento (Portigliati y Camus, 1974; Ojeda *et al.*, 1980; Álvarez, 1990). La cuenca alcanza una profundidad de entre 100 y 600 m y un ancho que varía entre los 100 y 500 m (Cuadra, 1986). Se caracteriza por la lixiviación total de la nahidrita y la presencia de sericita y arcillas. La mineralización corresponde a calcosina gris, calcosina celeste y covelina azul, los cuales fueron generados por el reemplazo total de los sulfuros preexistentes. El paso fue gradual, reemplazando selectivamente a los sulfuros de cobre, primero a bornita y luego a calcopirita. La pirita no sufrió alteración durante el proceso de lixiviación (Álvarez, 1990). La edad de los eventos de alteración y mineralización se encuentra comprendida entre los 5,3 y 4,7 Ma (Cuadra, 1986 y Makshev *et al.*, 2001).

### 3. Resultados

#### 3.1. Muestras

Para el desarrollo de este estudio se contó con 35 muestras, con sus respectivas secciones delgadas y resultados de ensayos geotécnicos. De ellas, 18 habían sido ensayadas previamente por la Superintendencia de Geología de Fivisión El Teniente, y 17 fueron ensayadas en el marco de esta memoria, teniendo especial cuidado de no incluir estructuras en la confección de las probetas, puesto que el objetivo de este trabajo es caracterizar la roca intacta.

Las muestras ensayadas en el marco de esta memoria (17) corresponden a 6 probetas de la unidad Tonalita, obtenidas a partir de testigos almacenados para la realización de ensayos geotécnicos (Tabla 3.1); y 11 probetas confeccionadas a partir de 8 bloques de roca (colpas, nombradas con códigos IR1 hasta IR8) de aproximadamente 40cm x 40cm x 50cm (Tabla 3.2). Los bloques de roca fueron recolectados en salidas a terreno en el Distrito de Exploración El Teniente en 5 sitios distintos (Figura 3.1).

Las probetas confeccionadas a partir de testigos de la unidad Tonalita tienen un código que consiste en el identificador del testigo, seguido de “-2”, indicando que fue la segunda probeta en prepararse sobre ese testigo (Tabla 3.3). Las probetas confeccionadas desde las colpas fueron clasificadas litológicamente según observaciones macroscópicas, y tienen una nomenclatura de la forma IR $n$ -P $m$ , siendo  $n$  el número de la colpa y  $m$  el número de la probeta confeccionada a partir de dicha colpa (Tabla 3.4).

**Tabla 3.1: Datos de los testigos de sondajes de la unidad Tonalita a partir de los cuales se confeccionaron las probetas ensayadas. Los valores de coordenadas están expresados en el sistema interno de El Teniente.**

ID	ESTE	NORTE	ELEVACION	Profundidad	Unidad	Largo (cm)	ID Probeta	Origen	Litología	Zona Geot.
DDH2164	1821,669E	99,025N	2167,44	1188	pies	25	DDH2164PB1188 25 cent	sondaje	Tonalita	1°
DDH2164	1821,669E	99,025N	2167,44	924	pies	24	DDH2164PB924 24 cent	sondaje	Tonalita	1°
DDH2176	1821,696E	98,948N	2166,81	858	pies	23	DDH2176PB858 23 cent	sondaje	Tonalita	1°
DDH2187	1821,563E	99,078N	2167,52	396	pies	24	DDH2187PB396 24 cm	sondaje	Tonalita	1°
DDH2188	1791,159E	153,015N	2167,51	863	pies	21	DDH2188PB863 21 cent	sondaje	Tonalita	1°
DDH2197	1822,652E	97,662N	2167,59	792	pies	20	DDH2197PB792 20 cent	sondaje	Tonalita	1°

**Tabla 3.2: Datos de los bloques de roca recolectados para la confección de probetas**

ID	ESTE	NORTE	ELEVACION	Datum	Origen	Tipo	Litología	Zona Geot.
IR1	378371	6230316	3211	WGS84	Superficie	Roca	Pórfido Diorítico	1°
IR2	378371	6230316	3211	WGS84	Superficie	Roca	Pórfido Diorítico	1°
IR3	377568	6230974	3322	WGS84	Superficie	Roca	Pórfido Diorítico	1°
IR4	377568	6230974	3322	WGS84	Superficie	Roca	Pórfido Diorítico	1°
IR5	372532	6232501	3068	WGS84	Superficie	Roca	Pórfido Granodiorítico	1°
IR6	374700	6229744	3068	WGS84	Superficie	Roca	Pórfido Basáltico	1°
IR7	374664	6230182	3192	WGS84	Superficie	Roca	Pórfido Basáltico	1°
IR8	374664	6230182	3192	WGS84	Superficie	Roca	Pórfido Basáltico	1°

# Resultados

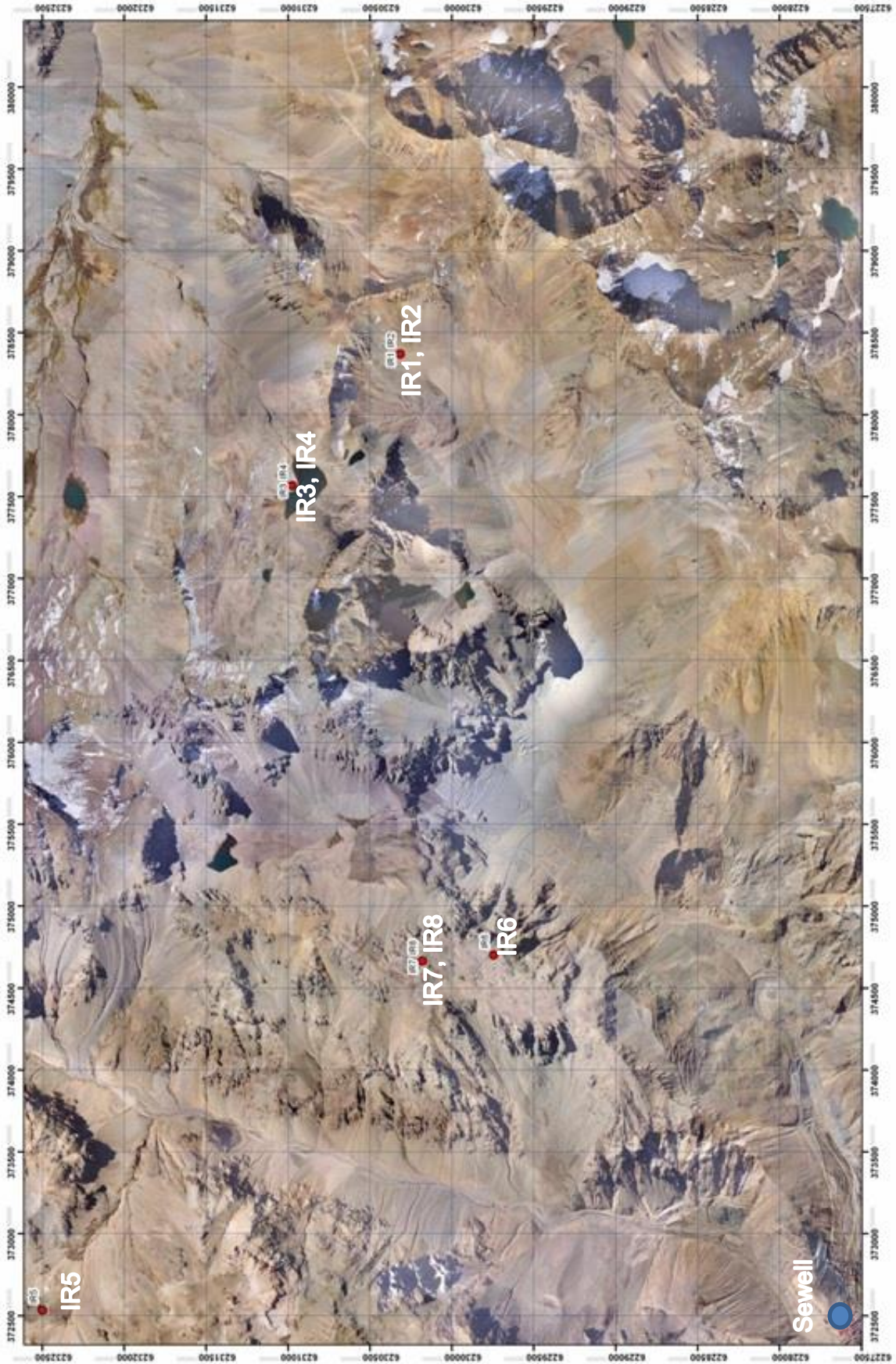


Figura 3.1: Ubicación de las muestras obtenidas de superficie. Sistema de coordenadas WGS-1984

## Resultados

**Tabla 3.3: Probetas confeccionadas a partir de testigos de sondajes de la unidad Tonalita.**

ID	Litología	Diámetro [cm]	Largo [cm]	Masa [g]	Peso Unitario (geométrico) [t/m <sup>3</sup> ]
DDH2164-PB-924-2	Tonalita	3,54	8,25	216,28	2,66
DDH2164-PB-1188-2	Tonalita	3,49	7,68	194,94	2,65
DDH2176-PB-858-2	Tonalita	3,54	8,46	222,38	2,66
DDH2187-PB-396-2	Tonalita	3,52	8,36	215,35	2,65
DDH2188-PB-863-2	Tonalita	3,51	8,22	212,15	2,67
DDH2197-PB-792-2	Tonalita	3,50	8,32	211,89	2,65

**Tabla 3.4: Datos de probetas confeccionadas a partir de las colpas obtenidas en superficie**

ID	Litología	Diámetro [cm]	Largo [cm]	Masa [g]	Peso Unitario (geométrico) [t/m <sup>3</sup> ]
IR6-P1	Pórfido Basáltico	5,02	11,68	640,61	2,77
IR7-P1	Pórfido Basáltico	5,02	10,51	575,15	2,77
IR8-P1	Pórfido Basáltico	5,02	11,18	608,67	2,76
IR2-P3	Pórfido Diorítico	5,04	10,88	550,81	2,54
IR3-P3	Pórfido Diorítico	5,02	11,01	545,68	2,50
IR4-P3	Pórfido Diorítico	5,02	10,89	535,60	2,49
IR5-P3	Pórfido Granodiorítico	5,02	11,01	570,64	2,62
IR3-P2	Pórfido Diorítico	5,02	12,26	604,97	2,49
IR4-P5	Pórfido Diorítico	5,01	10,98	539,62	2,50
IR6-P3	Pórfido Basáltico	5,01	11,76	643,44	2,78
IR7-P2	Pórfido Basáltico	5,02	11,64	637,28	2,77

Las probetas previamente ensayadas fueron confeccionadas a partir de testigos de sondajes en el sector Pilar Norte de El Teniente, a las unidades CMET Fw, Pórfido Diorítico, Pórfido Dacítico y Pórfido Andesítico (Tabla 3.5).



## Resultados

**Tabla 3.5: Características de las probetas ensayadas previamente a la realización de este estudio**

ID	Litología	Diámetro [cm]	Largo [cm]	Masa [g]	Peso Unitario (geométrico) [t/m <sup>3</sup> ]
SG333-53.00	CMET-Fw	6,30	13,8	1218,3	2,8
SG333-39.80	CMET-Fw	6,30	13,5	1219,1	2,9
SG334-37.10	CMET-Fw	6,34	13,92	1222,33	2,79
SG334-37.20	CMET-Fw	6,34	13,61	1226,96	2,86
SG331-71.00	CMET-Fw	6,09	13,16	1110,41	2,9
SG331-12.90	Pórfido Diorítico	6,08	13,48	1085,7	2,77
SG331-8.60	Pórfido Diorítico	6,09	13,2	1079,62	2,81
SG334-9.60	Pórfido Diorítico	6,09	13,12	1079,18	2,83
SG331-7.40	Pórfido Diorítico	6,09	13,18	1081,94	2,82
SG334-6.50	Pórfido Diorítico	6,34	13,08	1141,68	2,77
TENA4-010	Pórfido Andesítico	6,31	12,65	1071,82	2,71
TENA4-003	Pórfido Andesítico	6,30	12,47	1054,83	2,71
TENA4-011	Pórfido Andesítico	6,30	12,37	1031,69	2,67
TENA4-015	Pórfido Andesítico	6,33	12,92	1096,54	2,7
TENA7-2577	Pórfido Andesítico	6,34	12,71	1079,95	2,69
NNM8_11.00-11.32	Pórfido Dacítico	15	-	-	-
OR2_C13	Pórfido Dacítico	15	-	-	-
OR2_5.88-6.20	Pórfido Dacítico	15	-	-	-

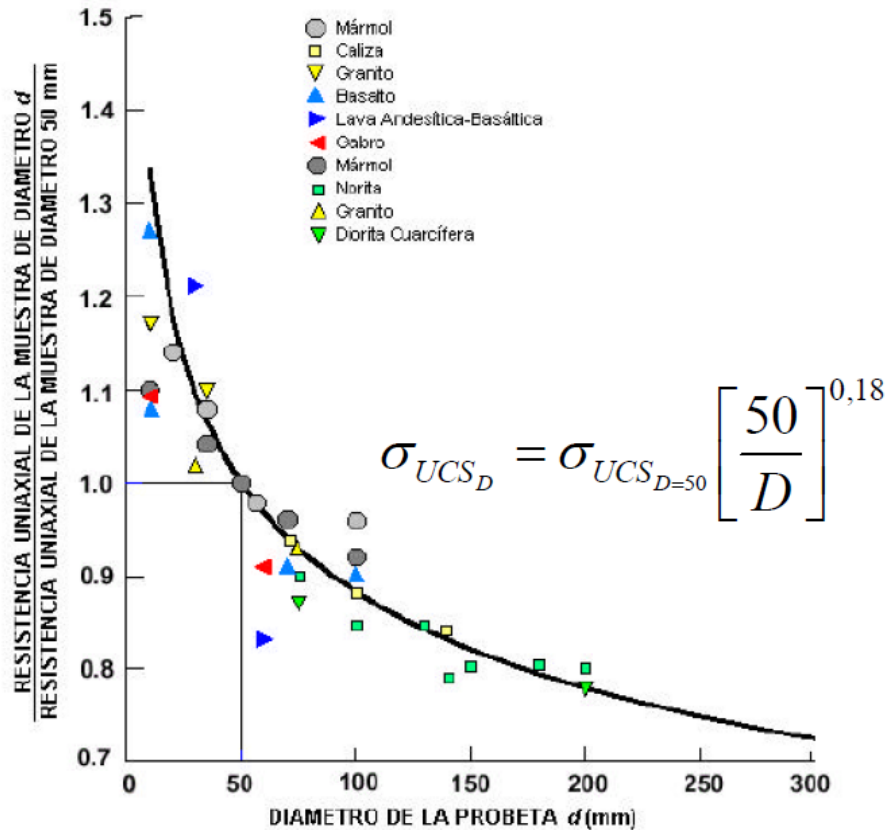
### 3.2. Ensayos Geotécnicos

Las probetas ensayadas en el marco de esta memoria fueron sometidas a ensayos de compresión uniaxial simple (CUS, o UCS por su sigla en inglés) con determinación de módulos elásticos estáticos (sistema *strain gauge*), cuyos resultados se exponen en la Tabla 3.6. Los resultados detallados de estos ensayos se encuentran en el Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos. Es de importancia mencionar que el valor de  $\sigma_{c50mm}$  se calcula según la relación de escalamiento establecida por Hoek & Brown (1980), explicitada en la Figura 3.2: Relación de escalamiento para probetas con diámetro distinto a 50mm. Modificada de Hoek & Brown, 1980, Tomada de Vallejos, 2013. D es el diámetro de la probeta en milímetros. Figura 3.2, donde se escala el valor del esfuerzo para una probeta de 50 mm de diámetro a partir de una probeta de diámetro D (en mm). En ambos casos, la relación largo : diámetro debe ser igual o semejante a 2 : 1.

## Resultados

**Tabla 3.6: Resumen de resultados de ensayos geotécnicos realizados en el marco de esta memoria**

Probeta	Litología	Resistencia a la comp. uniaxial (Mpa)	$\sigma_{c50mm}$ (MPa)	Módulo de Young Tangente (Gpa)	Razón de Poisson	Tipo de ruptura
DDH2164-PB-924-2	Tonalita	201,6	189,5	67,6	0,24	Matriz
DDH2164-PB-1188-2	Tonalita	211,7	198,5	51,2	0,30	Matriz
DDH2176-PB-858-2	Tonalita	133,7	125,7	55,8	0,27	Matriz
DDH2187-PB-396-2	Tonalita	188,2	176,6	62,2	0,04	Matriz
DDH2188-PB-863-2	Tonalita	163,3	153,3	58,1	0,28	Matriz
DDH2197-PB-792-2	Tonalita	162,8	152,7	38,6	0,29	Matriz
IR6-P1	Pórfido Basáltico	117,5	117,6	83,7	0,31	Matriz
IR7-P1	Pórfido Basáltico	136,7	136,8	98,9	0,25	Matriz
IR8-P1	Pórfido Basáltico	115,2	115,3	73,1	0,28	Matriz y/o estructura
IR2-P3	Pórfido Diorítico	59,6	59,7	25,1	0,22	Matriz
IR3-P3	Pórfido Diorítico	141,1	141,2	40,5	0,26	Matriz
IR4-P3	Pórfido Diorítico	140,6	140,7	42,9	0,27	Matriz
IR5-P3	Pórfido Granodiorítico	98,8	98,9	37,2	0,23	Matriz
IR3-P2	Pórfido Diorítico	165,2	165,3	44,5	0,28	Matriz
IR4-P5	Pórfido Diorítico	176,6	176,6	46,6	0,24	Matriz
IR6-P3	Pórfido Basáltico	234,5	234,5	93,9	0,25	Matriz
IR7-P2	Pórfido Basáltico	218,7	218,9	77,4	0,25	Matriz



## Resultados

**Figura 3.2: Relación de escalamiento para probetas con diámetro distinto a 50mm. Modificada de Hoek & Brown, 1980, Tomada de Vallejos, 2013. D es el diámetro de la probeta en milímetros.**

Los ensayos realizados anteriormente en probetas de la unidad Pórfido Andesítico y probetones de la unidad Pórfido Dacítico fueron del tipo compresión uniaxial simple (CUS) con determinación de módulos elásticos estáticos (sistema *strain gauge*), mientras que las probetas de las unidades CMET-Fw y Pórfido Diorítico fueron sometidas a ensayos de compresión triaxial con determinación de módulos elásticos estáticos (sistema *strain gauge*). Todos los resultados citados en este párrafo se resumen en la Tabla 3.7: Resumen de los resultados de ensayos geotécnicos en las probetas ensayadas antes de la realización de esta memoria. Tabla 3.7. En el caso de los ensayos uniaxiales, también se muestra el valor de  $\sigma_{c50mm}$ , obtenido a partir de la relación mostrada en la Figura 3.2.

**Tabla 3.7: Resumen de los resultados de ensayos geotécnicos en las probetas ensayadas antes de la realización de esta memoria.**

Probeta	Litología	Resistencia a la comp. uniaxial (Mpa)	$\sigma_{c50mm}$ (MPa)	$\sigma_3$ (Mpa)	$\sigma_1$ (Mpa)	Módulo de Young Tangente (Gpa)	Razón de Poisson	Tipo de ruptura
SG331 @ 71.00	CMET FW			3,3	148,8	61,7	0,23	Matriz
SG334 @ 37.20	CMET FW			3,2	139,1	60,3	0,21	Matriz
SG334 @ 37.10	CMET FW			18,1	224,4	70,6	0,26	Matriz
SG333 @ 39.80	CMET FW			26	227	68,3	0,35	Matriz
SG333 @ 53.00	CMET FW			26	205,3	78,4	0,28	Matriz
SG0331 @ 7.40	Pórfido Diorítico			2,8	151	72,6	0,25	Matriz y/o estructura
SG0331 @ 8.60	Pórfido Diorítico			9,5	214,8	76,3	0,28	Matriz
SG0334 @ 6.50	Pórfido Diorítico			17,9	221,4	63,9	0,24	Matriz
SG0331 @ 12.90	Pórfido Diorítico			16,1	226,7	66,4	0,24	Matriz
SG0334 @ 9.60	Pórfido Diorítico			26	257	66,5	0,28	Matriz
Ten-A7@2577	Pórfido Andesítico	159,1	166,1			57,6	0,26	Matriz y/o estructura
Ten-A4@0003	Pórfido Andesítico	143,8	149,9			80,1	0,16	Matriz y/o estructura
Ten-A4@0010	Pórfido Andesítico	111,8	116,5			72,1	0,22	Matriz y/o estructura
Ten-A4@0011	Pórfido Andesítico	148,0	154,3			47,3	0,30	Matriz y/o estructura
Ten-A4@0015	Pórfido Andesítico	103,3	107,8			57,0	-	Matriz y/o estructura
NNM8_11.00-11.32	Pórfido Dacítico	39,7	47,8			39,2	0,12	A
OR2_C13	Pórfido Dacítico	113,9	137,6			44,9	0,21	A
OR2_5.88-6.20	Pórfido Dacítico	83,9	101,4			35,8	0,11	A



### 3.3. Descripciones petrográficas

Se encargó la confección de secciones transparentes y pulidas de las probetas y probetones ensayados al laboratorio de corte de la Superintendencia de Geología, División El Teniente, ubicado en Colón Bajo, comuna de Machalí. Las secciones fueron descritas en el microscopio óptico de la Superintendencia de Geología, División El Teniente, así como en microscopios ópticos del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

La descripción petrográfica completa de los cortes transparentes y pulidos se presenta en el Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos, donde se usó la clasificación de tamaños absolutos de cristales propuesta por Mackenzie *et al.* (1999) (Tabla 3.8). Se muestra un resumen de algunas características petrográficas en la Tabla 3.9. El contenido porcentual de sílice se asignó en función de la unidad litológica y los valores establecidos por estudios anteriores; el contenido de fenocristales fue establecido con diagramas de estimación visual de porcentajes (Figura 3.3; Reyes, 2011); la forma de los cristales va desde 1-alotromorfa a 5-idiomorfa; y la intensidad de alteración varía desde 1 – Débil a 5 – Alta.

Para la descripción del empaquetamiento (proporción y distribución) de los fenocristales, se definieron y usaron las siguientes categorías:

- 1.- Cristales aislados lejanos
- 2.- Cristales aislados cercanos
- 3.- Cúmulos de cristales o glomeroporfídica
- 4.- Esqueleto de fenocristales

En función del contenido de fenocristales, se asignó una categoría de empaquetamiento o soporte a las muestras, donde las matriz soportadas (MS) contienen menos de un 40% de fenocristales, cristal soportadas (CS) contienen más de un 50%, y las intermedias (I) entre un 40 y 50%.

**Tabla 3.8: Tamaños absolutos de cristales. Modificado de Mackenzie *et al.* (1999)**

Grano muy fino	Grano fino	Grano medio	Grano grueso	Grano muy grueso
< 0,1 mm	0,1 a 1 mm	1 a 5 mm	5 a 30 mm	> 30 mm

## Resultados

**Tabla 3.9: Resumen de características petrográficas de los cortes transparentes y pulidos hechos a partir de las probetas y probetones ensayados**

Probeta	Litología	silice (%)	% Fenocristales	Forma Cristales	Alteración	Tamaño máximo de cristales [mm]	Categorías empaquetamiento	Categoría (% fenocristos)
DDH2164-PB-924-2	Tonalita	64	85	4	1	2,4	4	CS
DDH2164-PB-1188-2	Tonalita	64	75	4	1(0)	4	4	CS
DDH2176-PB-858-2	Tonalita	64	85	4	1	2,4	4	CS
DDH2187-PB-396-2	Tonalita	64	85	4	1	4	4	CS
DDH2188-PB-863-2	Tonalita	64	88	4	1	3	4	CS
DDH2197-PB-792-2	Tonalita	64	85	4	1	4	4	CS
IR6-P1	Pórfido Basáltico	51	35	3	2	4	2	MS
IR7-P1	Pórfido Basáltico	51	40	3	3	4	2-3	MS
IR8-P1	Pórfido Basáltico	51	35	5	3	2	2-3	MS
IR2-P3	Pórfido Diorítico	58	40	3	1	6	2	MS
IR3-P3	Pórfido Diorítico	58	50	3	2	6	2-4	CS
IR4-P3	Pórfido Diorítico	58	45	3	1	5	2-4	I
IR5-P3	Pórfido Granodiorítico	62	20	3	5	5	1	MS
IR3-P2	Pórfido Diorítico	58	45	3	2	4	2-4	I
IR4-P5	Pórfido Diorítico	58	45	3	1	3	4-3	I
IR6-P3	Pórfido Basáltico	51	40	3	2	5	2-3	MS
IR7-P2	Pórfido Basáltico	51	40	3	1	3	2-3	MS
SG333-53.00	CMET Fw	49	50	3	3	4	2-3	CS
SG333-39.80	CMET Fw	49	60	3	3	2	4	CS
SG334-37.10	CMET Fw	49	0	1	5	0,2	1	MS
SG334-37.20	CMET Fw	49	0	3	5	0,2	1	MS
SG331-71.00	CMET Fw	49	40	3	4	2	2-3	MS
SG331-12.90	PDIO	54	15	3	5	2	1	MS
SG331-8.60	PDIO	54	10	3	5	0,5	1	MS
SG334-9.60	PDIO	54	10	3	3	0,5	1	MS
SG331-7.40	PDIO	54	10	3	5	1,5	1	MS
SG334-6.50	PDIO	54	10	3	5	0,6	1	MS
Ten-A7@2577	PAND	56	30	3	2	2	1-2-3	MS
Ten-A4@0003	PAND	56	20	3	5(4)	5	1-3	MS
Ten-A4@0010	PAND	56	20	3	3	2	1	MS
Ten-A4@0011	PAND	56	17	3	5	1	1	MS
Ten-A4@0015	PAND	56	30	3	3	4	1-3	MS
NNM8_11.00-11.32	PDAC	66	35	3	2	3	2	MS
OR2_C13	PDAC	66	35	3	1(2)	4	2-3	MS
OR2_5.88-6.20	PDAC	66	30	3	1(2)	2	1	MS

## Resultados

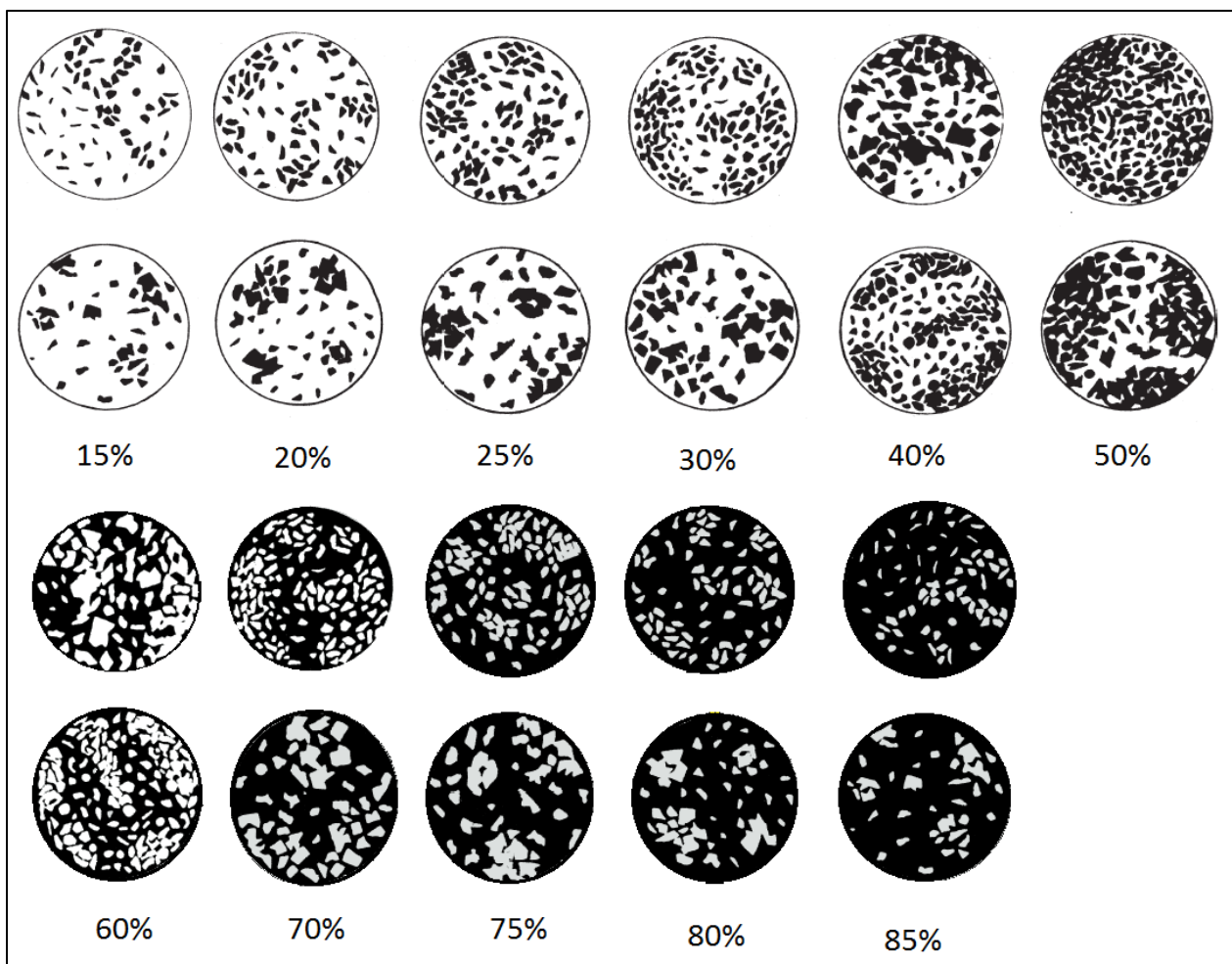


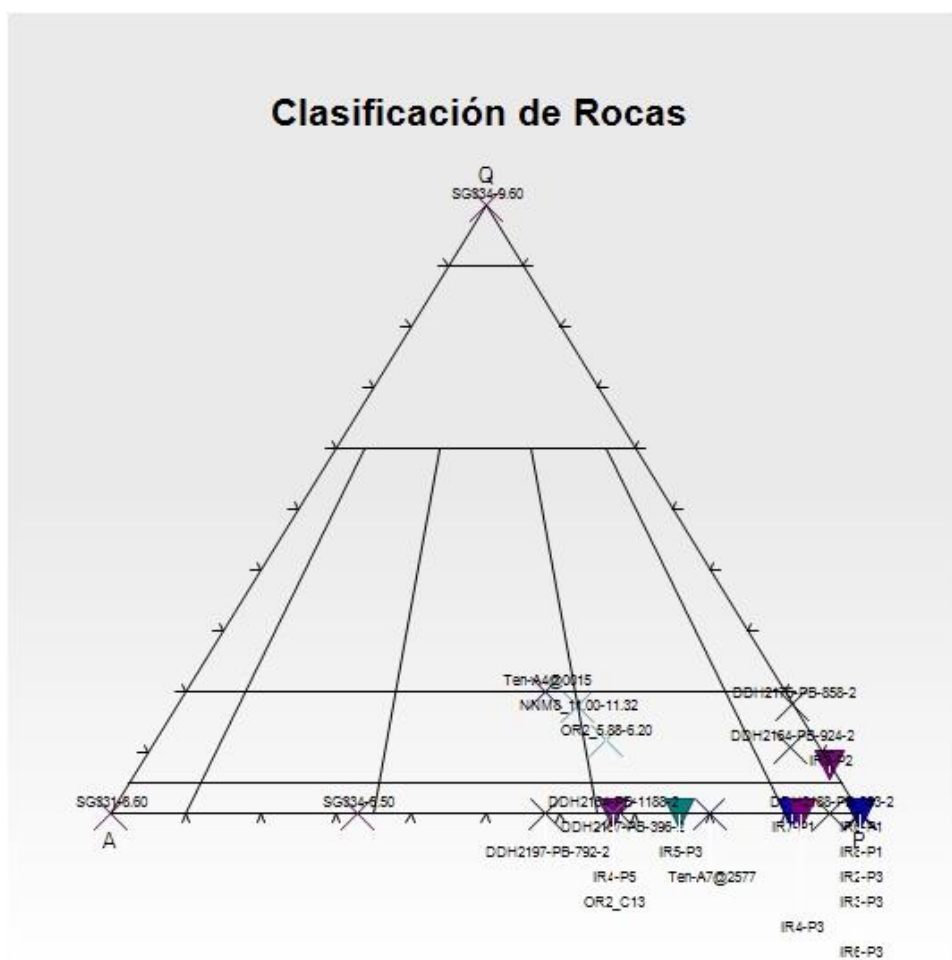
Figura 3.3: Esquemas para estimación visual del porcentaje de granos o cristales. Modificada de Reyes, 2011.

Se realizó una clasificación petrográfica en el triángulo de clasificación QAP para rocas intrusivas (Streckeisen, 1974), basada solo en el contenido de los fenocristales, pues la mineralogía de la masa fundamental puede contener minerales de alteración (sobre todo cuarzo y feldespato potásico). El resultado de esta clasificación se muestra en la Tabla 3.10, así como su representación gráfica en la Figura 3.4. Cabe notar que para las muestras SG334-37.10 y SG334-37.20 no fue posible efectuar la clasificación debido a que no presentaban fenocristales (solo sombras de algunos, pero totalmente reemplazados a minerales de alteración). Con esta clasificación se obtienen, en general, variedades litológicas similares a las unidades de las muestras.

## Resultados

**Tabla 3.10: Clasificación de rocas intrusivas según el criterio QAP, Streckeisen 1974.**

Muestra	Litología	Clasificación QAP	Muestra	Litología	Clasificación QAP
DDH2164-PB-924-2	Tonalita	Cuarzo anortosita	SG333-53.00	CMET Fw	Gabro
DDH2164-PB-1188-2	Tonalita	Monzodiorita	SG333-39.80	CMET Fw	Gabro
DDH2176-PB-858-2	Tonalita	Cuarzo anortosita	SG334-37.10	CMET Fw	N/A
DDH2187-PB-396-2	Tonalita	Monzodiorita	SG334-37.20	CMET Fw	N/A
DDH2188-PB-863-2	Tonalita	Gabro	SG331-71.00	CMET Fw	Gabro
DDH2197-PB-792-2	Tonalita	Monzonita	SG331-12.90	PDIO	Gabro
IR6-P1	Pórfido Basáltico	Gabro	SG331-8.60	PDIO	Sienita de feldespato alcalino
IR7-P1	Pórfido Basáltico	Gabro	SG334-9.60	PDIO	cuarzolita
IR8-P1	Pórfido Basáltico	Gabro	SG331-7.40	PDIO	Gabro
IR2-P3	Pórfido Diorítico	Gabro	SG334-6.50	PDIO	Sienita
IR3-P3	Pórfido Diorítico	Gabro	Ten-A7@2577	PAND	Monzodiorita
IR4-P3	Pórfido Diorítico	Gabro	Ten-A4@0003	PAND	Gabro
IR5-P3	Pórfido Granodiorítico	Monzodiorita	Ten-A4@0010	PAND	Gabro
IR3-P2	Pórfido Diorítico	Cuarzo anortosita	Ten-A4@0011	PAND	Gabro
IR4-P5	Pórfido Diorítico	Monzodiorita	Ten-A4@0015	PAND	Monzogranito
IR6-P3	Pórfido Basáltico	Gabro	NNM8_11.00-11.32	PDAC	Cuarzo monzodiorita
IR7-P2	Pórfido Basáltico	Gabro	OR2_C13	PDAC	Monzodiorita
			OR2_5.88-6.20	PDAC	Cuarzo monzodiorita



**Figura 3.4: Triángulo de clasificación para rocas intrusivas, confeccionado a partir de Streckeisen, 1974**

## Resultados

En cuanto a las diferencias entre las rocas exteriores al yacimiento (códigos IR) y las del interior, las descripciones han establecido que no es inusual la mineralización en las rocas de superficie, teniendo muchas de ellas calcopirita y, algunas, bornita. Su contenido de minerales opacos varía entre un 2 y un 5%, teniendo también presente esfalerita, magnetita y pirita. Las descripciones completas se encuentran en el Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos

.Respecto de la alteración, la mayoría está al menos débilmente alterada, ya sea con una alteración de carácter regional (carbonatos, epidota), o a una asociación de sericita-clorita-opacos. En tanto, las muestras del interior del yacimiento tienen alteración sericítica en intensidades moderada a alta, o en su defecto biotítica (por ejemplo, las muestras de Pórfido Andesítico).

Lo que sí diferencia notoriamente las muestras de superficie de aquellas del yacimiento es la densidad de estructuras. Esto permitió confeccionar probetas prácticamente sin estructuras, con lo que se obtuvo casi exclusivamente rupturas por matriz, que era el objetivo del estudio.

## 4. Discusiones

### 4.1. Sobre estudios previos y enfoques a considerar

Las referencias sobre la mecánica de rocas en general indican que la resistencia de las rocas aumenta con los siguientes parámetros: baja porosidad, baja meteorización, microfracturamiento, entre otros (Brady & Brown, 2005).

A continuación se investigará la relación de una serie de variantes que pueden servir para ver el problema de la rigidez de las unidades litológicas de El Teniente.

#### 4.1.1. Sílice y Módulo de Young

El contenido de sílice puede tener una influencia en la respuesta mecánica de las rocas, por cuanto su contenido mineralógico sería en general de mayor dureza y, a su vez, con una menor deformabilidad. Es decir, las rocas con mayor contenido de sílice (félsicas) tendrían una mayor rigidez que las con menor contenido de sílice (máficas). Este es el caso de los datos que se muestran en la Figura 4.1, obtenidos de Hoek y Brown, 1985. En la Tabla 4.1 se muestran los datos usados para la confección de dicha figura, donde el contenido de sílice se asignó en función de la unidad litológica. El valor graficado de la tabla corresponde al Módulo de Young promedio, que fue calculado como la media del mínimo y el máximo valor, o igual al único valor en caso de que la unidad contara con el dato de solo un ensayo.

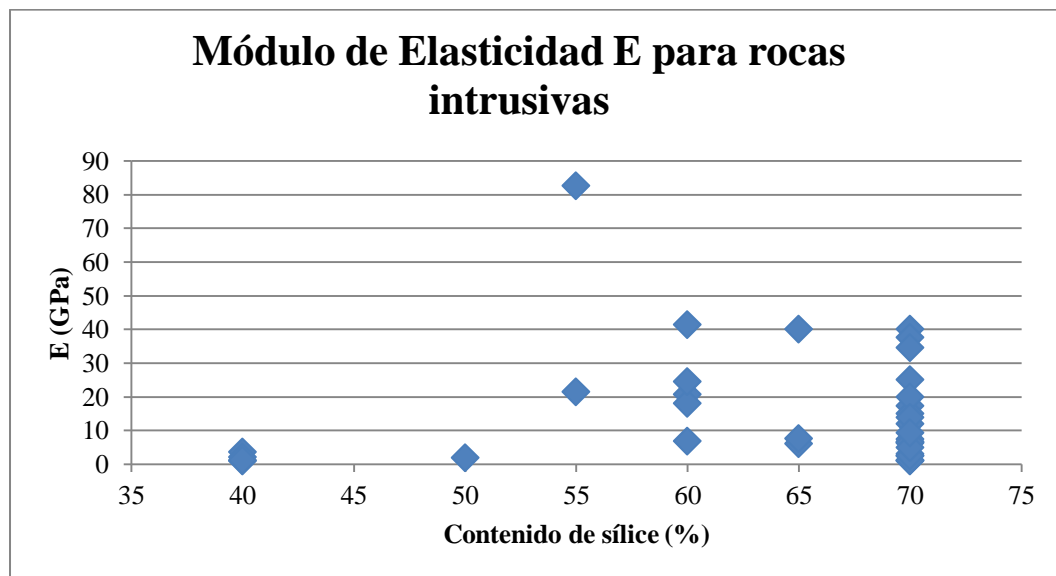


Figura 4.1: Módulo de elasticidad (E, Módulo de Young) para rocas intrusivas, comparado con su contenido de sílice. Gráfico confeccionado a partir de datos para rocas intrusivas de Hoek y Brown, 1985.

Discusiones

Tabla 4.1: Datos de Módulo de Young y unidad litológica, modificados de Hoek y Brown, 1985, usados en la Figura 4.1. El porcentaje de sílice se asignó en función de la litología, y se usó el valor del Módulo de Young promedio (calculado entre el mínimo y el máximo cuando los hubo, y como el valor único cuando no).

Litología	Sílice	Textura	Fracturas	Meteorización	Lugar	Tipo de Ensayo	Unico	Min	Max	Prom.	Observaciones
Diabasa	40		fisurada	meteorizada	Mina de Kloof de oro, Africa del Sur	gato hidr. 90,5m	3,5			3,5	
Diabasa	40				Presa Zillierback, Alemania	análisis de deformación	1,0			1,0	
Diabasa	40				Planta nucleoelectrica, Japon	ensayo de gato	2,0			2,0	
Gabro	40				Planta nucleoelectrica, Japon	prueba de gato	1,1			1,1	
Diorita	50				Planta de energia nucleoelectrica, Japon	ensayo de gato	1,8			1,8	
Diorita cuarcifera	55				Malga Bissona, Italia	medidor de presión	21,4			21,4	
Diorita cuarcifera	55				Cedar City, E.U.		82,7			82,7	
Granodiorita	60				Tumut 2, Australia	ensayo de gato	41,4			41,4	
Granodiorita	60				Tumut 2, Australia	cámara de presión	20,7			20,7	
Granodiorita	60				Tumut 2, Australia	análisis de deformación	6,9			6,9	
Granodiorita	60				Presa Pantano D'Avilo, Italia	cámara de presión		12,0	24,0	18,0	
Granodiorita	60				Presa Pantano D'Avilo, Italia	desplazamiento de presa		17,0	32,0	24,5	
Pórfiro cuarcifero	65				Forte Buso, Italia	cámara de presión	6,0			6,0	
Pórfido de cuarzo	65				Presa Sudegai, Japon			5,0	10,0	7,5	
Pórfido de cuarzo	65				Pozo de presión Sh. Antonio, Italia	cámara de presión	40,0			40,0	
Granito	70				Andermatt, Suiza	prueba de gato	40,0			40,0	paralelo a "est"
Granito	70				Andermatt, Suiza	prueba de gato	25,0			25,0	normal a "est"
Granito	70			meteorizado	Presa Alto Rabago, Portugal		6,6			6,6	
Granito	70			muy meteorizado	Presa Alto Rabago, Portugal		1,0			1,0	
Granito	70				Presa Cabril, Portugal	ensayo de gato		1,0	11,5	6,3	
Granito	70				Presa Cabril, Portugal	cámara de presión		11,5	23,0	17,3	
Granito	70			ligeramente meteorizado	Presa Canicada, Portugal	ensayo de gato		10,9	12,8	11,9	
Granito	70			muy alterado	Presa Canicada, Portugal	ensayo de gato		0,6	14,0	7,3	
Granito	70				Presa Candes, Francia	ensayo de gato	3,1			3,1	
Granito	70				Presa Grimsel, Suiza	análisis de deformación	15,0			15,0	
Granito	70	masivo	sano		Inner Kirchen, Suiza	cámara de presión	20,0			20,0	
Granito	70				Presa Korube, Japon	cámara de presión		1,6	3,2	2,4	
Granito	70		fisurado	meteorizado	Presa Kariba, Rodesia	Triaxial		1,1	1,3	1,2	
Granito	70		muy fisurado	meteorizado	Presa Kariba, Rodesia	Triaxial		1,1	1,2	1,2	
Granito	70		fisurado	fresco	Presa Kariba, Rodesia	Triaxial		1,6	3,4	2,5	
Granito	70				Presa Nagawado, Japon	ensayo de esfuerzo cortante de 2m2		3,0	10,0	6,5	
Granito	70	masivo			Tunel Schwarzenbach, Alemania	cámara de presión	37,5			37,5	
Granito	70				Presa Tsuga, Japon	ensayo de gato		2,6	7,2	4,9	
Granito	70				Tumut 1, Australia	ensayo de gato	34,5			34,5	granito, gneiss granítico
Granito	70				Tumut 1, Australia	cámara de presión	13,8			13,8	granito, gneiss granítico
Granito	70				Tumut 1, Australia	análisis de deformación		4,8	13,8	9,3	granito, gneiss granítico

## Discusiones

A pesar de lo expuesto anteriormente, los resultados de ensayos geotécnicos realizados históricamente en El Teniente no muestran la misma tendencia de aumento de la rigidez con el contenido de sílice. Para esquematizar esto se han confeccionado las Figura 4.2, Figura 4.3 y Figura 4.4, que muestran la rigidez en función del contenido de sílice (%) asignado por unidad litológica, en función de estudios petroquímicos (Burgos, 2002; Rojas, 2003; Hitschfeld, 2006, entre otros). Los datos fueron obtenidos de la base de datos histórica de ensayos geotécnicos de El Teniente, facilitada por el geólogo Carlos De Los Santos. En ellas se indican los tipos de ruptura propuestos por Marambio *et al.* (1999) para El Teniente (Figura 1.5).

El gráfico de la Figura 4.2 fue confeccionado a partir de 958 datos en rocas intrusivas, con litologías reconocidas de Diabasa, Gabro, Pórfido Latítico (PLAT), Complejo Máfico El Teniente (CMET), Pórfido Diorítico (PDIO), Pórfido Andesítico (PAND), Tonalita y Pórfido Dacítico (PDAC), para todos los tipos de ruptura. Se observa un amplio rango de valores de rigidez, desde 2,19 hasta 89,77 GPa.

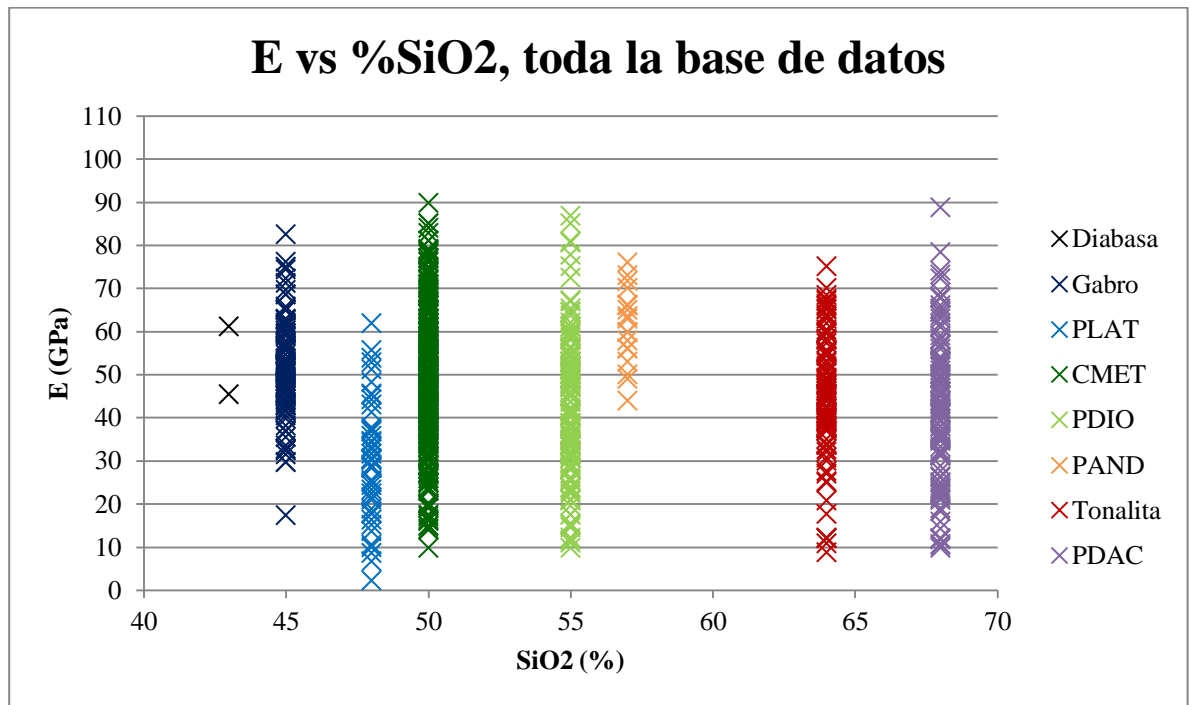


Figura 4.2: Rigidez (Módulo de Young) contra contenido de sílice, para ensayos geotécnicos históricos de El Teniente.

El gráfico de la Figura 4.3 fue confeccionado a partir de 233 datos en rocas intrusivas, con litologías reconocidas de Diabasa, Gabro, Pórfido Latítico (PLAT), Complejo Máfico El Teniente (CMET), Pórfido Diorítico (PDIO), Pórfido Andesítico (PAND), Tonalita y Pórfido Dacítico (PDAC), solo para los tipos de ruptura A y B. Estos tipos de ruptura son por matriz y por matriz y/o estructura (Marambio *et al.*, 1999) y pueden representar la rigidez de la roca intacta. Se observa un amplio rango de valores de rigidez, desde 17 hasta 84,1 GPa.



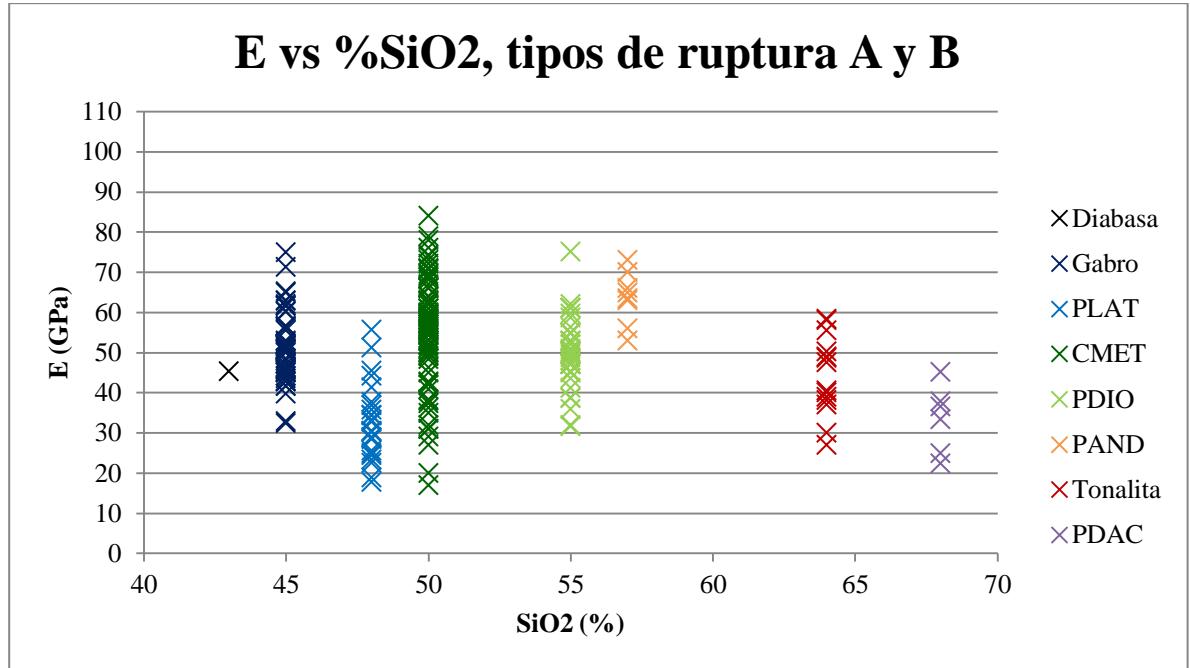


Figura 4.3: Rigidez (Módulo de Young) contra contenido de sílice, para ensayos geotécnicos históricos de El Teniente que presentaron tipo de ruptura A y B

El gráfico de la Figura 4.4 fue confeccionado a partir de 82 datos en rocas intrusivas, con litologías reconocidas de Gabro, Pórfido Latítico (PLAT), Complejo Máfico El Teniente (CMET), Pórfido Diorítico (PDIO), Pórfido Andesítico (PAND), Tonalita y Pórfido Dacítico (PDAC), solo para el tipo de ruptura A. Este tipo de ruptura ocurre por matriz (Marambio *et al.*, 1999) y representa la rigidez de la roca intacta. Se observa un rango de valores de rigidez desde 17,7 hasta 76,00 GPa. En esta figura se hace evidente la diferencia entre la cantidad de muestras ensayadas en la unidad CMET y las otras unidades intrusivas, lo cual es esperable por ser la roca caja del yacimiento, más abundante.

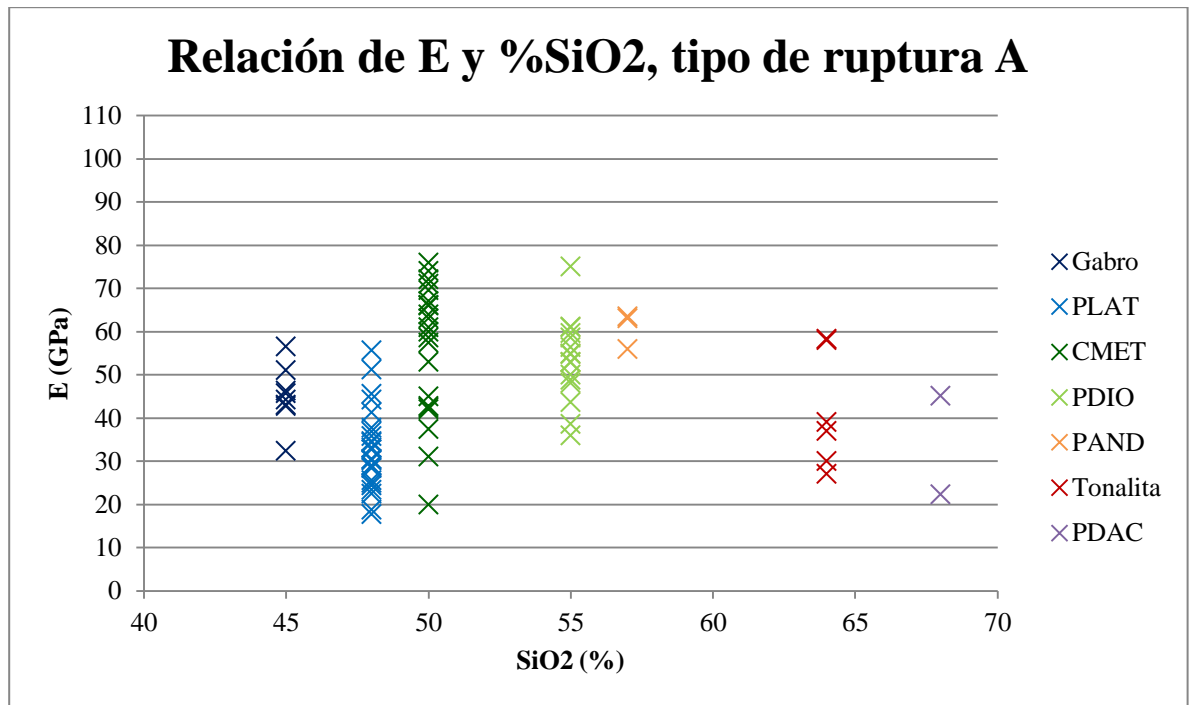


Figura 4.4: Rigidez (Módulo de Young) contra contenido de sílice, para ensayos geotécnicos históricos de El Teniente que presentaron tipo de ruptura A.

En las tres figuras anteriores se observa una tendencia inversa a la indicada al comienzo en la Figura 4.1, por lo que la influencia del contenido de sílice basado en la variedad litológica quedaría descartada para el caso de El Teniente.

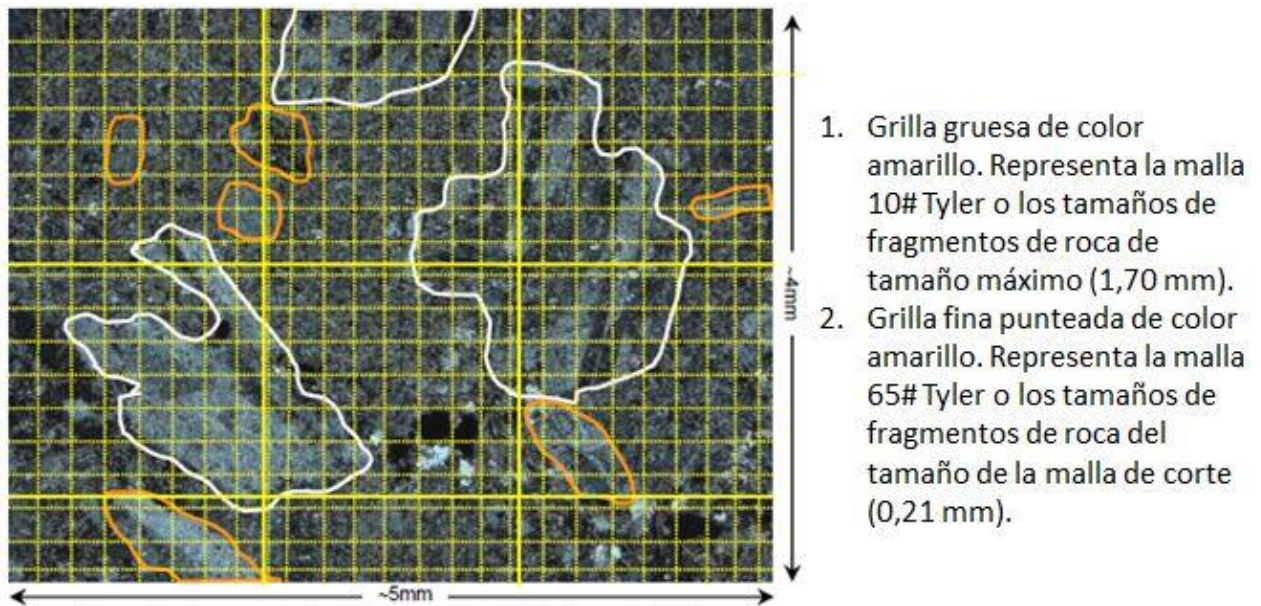
#### 4.1.2. Relaciones entre la petrografía y el BWi (Índice de Bond)

El *Work Index* o Índice de Bond (BWi o Wi) es una medida de la cantidad de energía necesaria por unidad de masa (usualmente expresado en kWh/st) para moler rocas hasta cierto tamaño durante el procesamiento mineral. Este parámetro se puede relacionar con la rigidez en el sentido de que mide la respuesta de los materiales ante un esfuerzo. Algunos estudios han buscado relaciones entre características petrográficas de unidades litológicas de El Teniente y el parámetro BWi.

Guzmán *et al.* (2004) indicaron que la influencia de parámetros geológicos en el proceso de molienda era difícil de estimar, debido a que la información geológica obtenida rutinariamente sobre los testigos de sondajes es una descripción macroscópica decimétrica a métrica, cuya escala sería de 2 a 3 órdenes de magnitud mayor a la escala de la situación de la molienda (Figura 4.5). A pesar de lo anterior, en dicho estudio se pudieron correlacionar las siguiente variables con el índice de Bond: la intensidad de alteración (ya sea tardimagnética, TM; hidrotermal principal, HP; o hidrotermal tardía, HT); la frecuencia de vetillas de cada tipo de alteración; la cantidad de

## Discusiones

algunos minerales de alteración y de mineralización. Sin embargo, ninguna de las variables con influencia en el BWi tiene una influencia transversal a las litologías (no es válido para todas).



**Figura 4.5:** Fotomicrografía de Muestra de CMET, con grillas que representan la apertura de mallas Tyler de 10# y 65# respectivamente. Modificado de Guzmán *et al.*, 2004. En ella se ve observa que el producto final del proceso de molienda son partículas de tamaños menores a los de los fenocristales.

Oyarzún y Arévalo (2011) establecieron rangos de valores para el BWi en función de algunas texturas en las rocas de El Teniente. En particular, indicaron que las unidades caracterizadas por presentar bordes rectos entre sus cristales tenían bajo valores de BWi (entre 10 y 13 KWh/st), mientras que las unidades cuyos cristales tienen bordes sinuosos o con alta área de contacto tendrían mayores valores (mayores a 15 KWh/st en general). Se expone parte de dicho trabajo en la Figura 4.6.

Los autores indicaron que esta se debería a que las unidades con contactos rectos entre los cristales tuvieron mayor tiempo en su sistema destinado en minimizar la energía en dichos contactos, por una recristalización tipo metamorfismo de contacto.

## Discusiones

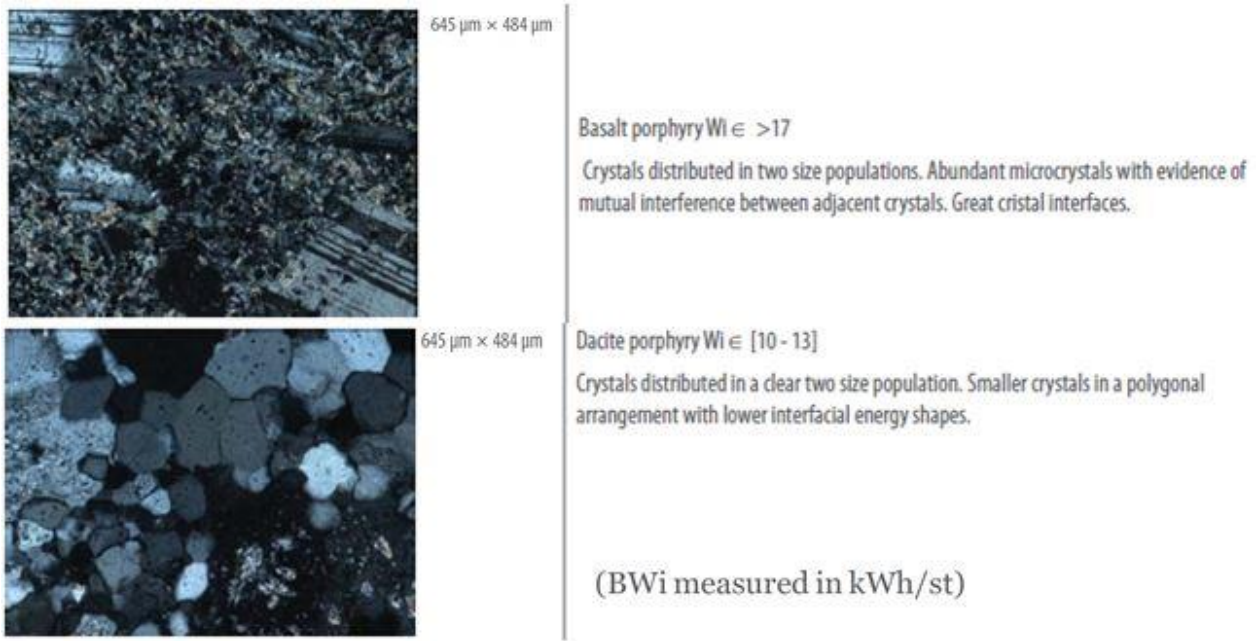


Figura 4.6: Fotomicrografías de muestras de las unidades Pórfido Basáltico y Pórfido Dacítico. Se indican sus valores de  $W_i$  (índice de Bond) y una descripción de sus texturas. Modificado de Oyarzún y Arévalo, 2011.

Teniendo en cuenta ambos trabajos, en este estudio se plantea la incorporación de la presencia de minerales micáceos y blandos (biotita, mica blanca, sericita, yeso) como elementos altamente deformables (tendrían bajo Módulo de Young) que absorberían la deformación antes de romperse, entregando un valor de  $BW_i$  mayor en las rocas que los contengan. Además, la proporción entre fenocristales y masa fundamental haría la diferencia entre quebrar un fenocristal o separar los minerales que conforman la masa fundamental (Figura 4.5), siendo en el primer caso más fácil separar una única entidad que, en el segundo caso, los contactos entre varias entidades.

### 4.1.3. Sobre las orientaciones de los esfuerzos y la respuesta de las unidades litológicas

Los sistemas físicos sometidos a esfuerzos se pueden modelar como un conjunto de resortes conectados en serie y/o en paralelo, respondiendo el sistema de forma distinta en cada caso. En el caso de resortes en serie, se mantiene constante el esfuerzo aplicado, y la deformación es diferente para cada resorte. En el caso de resortes en paralelo, la deformación es única y el esfuerzo soportado por cada resorte se distribuye en magnitudes diferentes.

En el caso de El Teniente, la carga es ejercida verticalmente, tanto por la columna de roca suprayacente a la explotación minera como por el proceso mismo de explotación. A su vez, las unidades litológicas y los contactos entre ellas y con la roca de caja (los medios involucrados, y

## Discusiones

sus interfaces) son subverticales a verticales (Figura 4.7), por lo que los intrusivos félsicos y la roca de caja se comportan como resortes en paralelo, siendo sometidas a la misma deformación pero con una distribución de esfuerzos que será mayor para el cuerpo más rígido que, según la hipótesis, son los intrusivos félsicos, razón por la que concentran sismicidad.

Junto con la orientación de las unidades, se debe considerar que los intrusivos félsicos, al ser más jóvenes que la roca de caja, han sido atravesados por menor cantidad de discontinuidades, ya sean fracturas, vetillas, fallas, etc. Esta condición también les conferiría mayor rigidez a escala de macizo rocoso.

## Discusiones

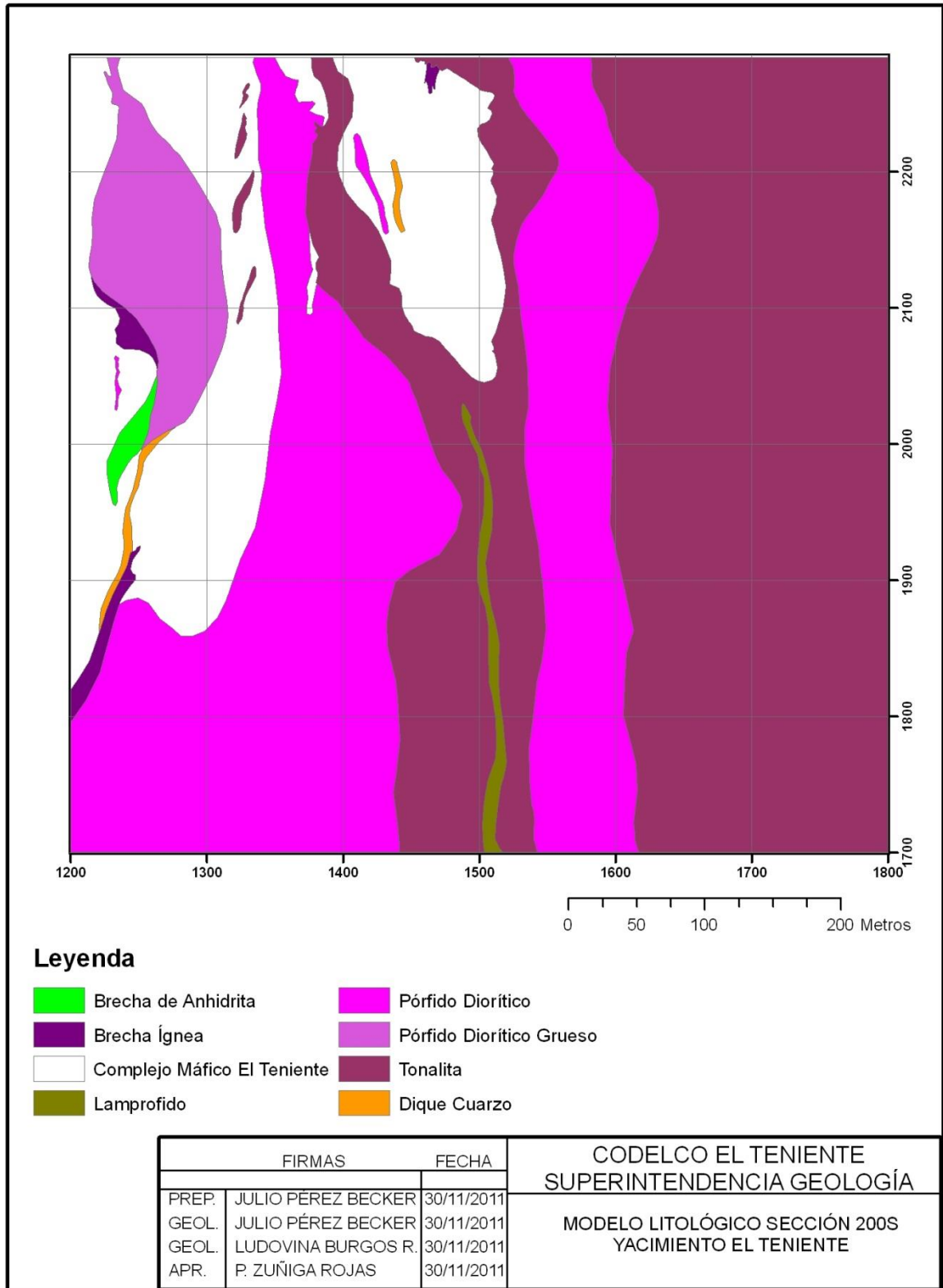


Figura 4.7: Sección litológica 200S, que muestra la subverticalidad de las unidades litológicas. Tomada de Pérez, 2010.

## 4.2. Sobre los resultados de este trabajo

En esta sección se exponen las principales discusiones obtenidas a partir de los resultados expuestos anteriormente. En los casos en que se ha clasificado las muestras por unidad litológica se ha usado la serie de abreviaciones de las unidades litológicas que se muestra en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2: Abreviaciones de las unidades litológicas ensayadas usadas en los gráficos de la sección Discusiones.**

PB-Superficie	Pórfido Basáltico, obtenido en superficie	Ensayados en este trabajo
PD-Superficie	Pórfido Diorítico, obtenido en superficie	Ensayados en este trabajo
PGr-Superficie	Pórfido Granodiorítico, obtenido en superficie	Ensayado en este trabajo
Tonalita	Tonalita,	Ensayados en este trabajo
CMET Fw-Pilar Norte	CMET Fw <sup>1</sup> , proveniente del sector Pilar Norte	Ensayados previamente
PDIO-Pilar Norte	Pórfido Diorítico, proveniente del sector Pilar Norte	Ensayados previamente
PAND-Pilar Norte	Pórfido Andesítico, proveniente del sector Pilar Norte	Ensayados previamente
PDAC-Pilar Norte	Pórfido Dacítico, proveniente del sector Pilar Norte	Ensayados previamente

### 4.2.1. Relaciones entre los parámetros geotécnicos

En la Figura 4.8 se muestra un gráfico confeccionado a partir de los datos de Módulo de Young y razón de Poisson, indicando la unidad litológica de la probeta. En él se establece que la mayoría de las probetas ensayadas tiene una razón de Poisson entre 0,2 y 0,3; y que el Módulo de Young se mueve entre valores de 20 y 100 GPa. El valor anómalo de razón de Poisson de una probeta de Tonalita (0,04 en la probeta DDH2187-PB-396-2, Tabla 3.6) no debiera ser tomado en cuenta y puede deberse a un error de tipeo.

<sup>1</sup> Fw hace referencia a una ubicación hacia el Este en El Teniente, y se lee “patilla” (proviene de *foot wall*). En tanto, al hablar del Oeste se emplea Hw, que se lee “cabeza” (y proviene de *head wall*).



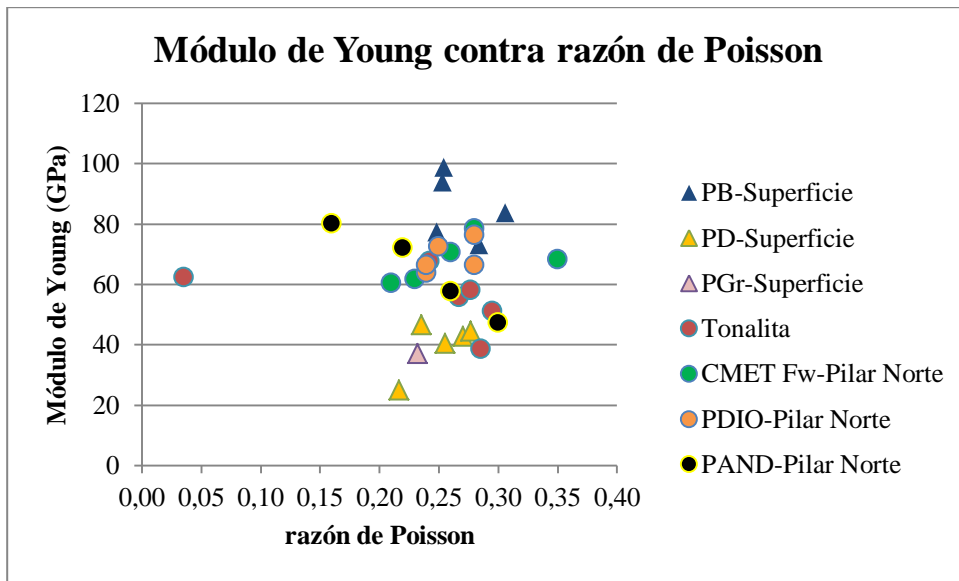


Figura 4.8: Datos de Módulo de Young (en GPa) contra Razón de Poisson, separado por litología de cada probeta ensayada

En la Figura 4.9 se muestra un gráfico confeccionado a partir de los datos de Módulo de Young y Resistencia a la compresión uniaxial simple (UCS) estandarizado a un diámetro de 50 mm. En este gráfico se aprecia una correlación lineal entre ambos parámetros, por lo que se muestra la línea de tendencia lineal que mejor ajusta esta correlación. Esta correspondencia permite afirmar la teoría de que los materiales rígidos son a su vez resistentes, mientras que los materiales comparativamente más dúctiles son menos resistentes. En la Figura 4.10 se muestra un gráfico confeccionado con los mismos datos, donde se indica la litología de cada dato. En general las distintas unidades siguen la tendencia indicada previamente, en cambio la unidad Pórfido Andesítico muestra menos variabilidad respecto del valor de UCS, y esto puede deberse a que durante los ensayos se registró que aquellas probetas tuvieron un modo de ruptura por matriz y/o estructura (Tabla 3.7). En la Figura 4.11 se superponen los mismos datos a una figura de González de Vallejo *et al.*, 2002 (en escala logarítmica). En ella se observa una correlación bien ajustada de los resultados de este trabajo con lo que plantean dichos autores para las rocas ígneas (tanto intrusivas como extrusivas).



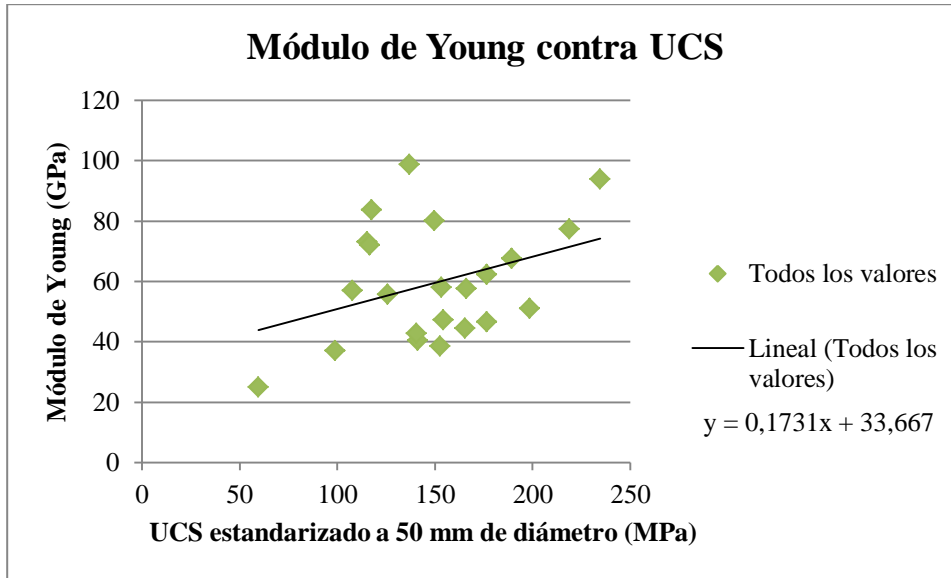


Figura 4.9: Datos de Módulo de Young (en GPa) contra Resistencia a la compresión uniaxial simple (UCS) estandarizado a 50 mm de diámetro (en MPa), para todas las litologías sometidas al ensayo de compresión uniaxial simple.

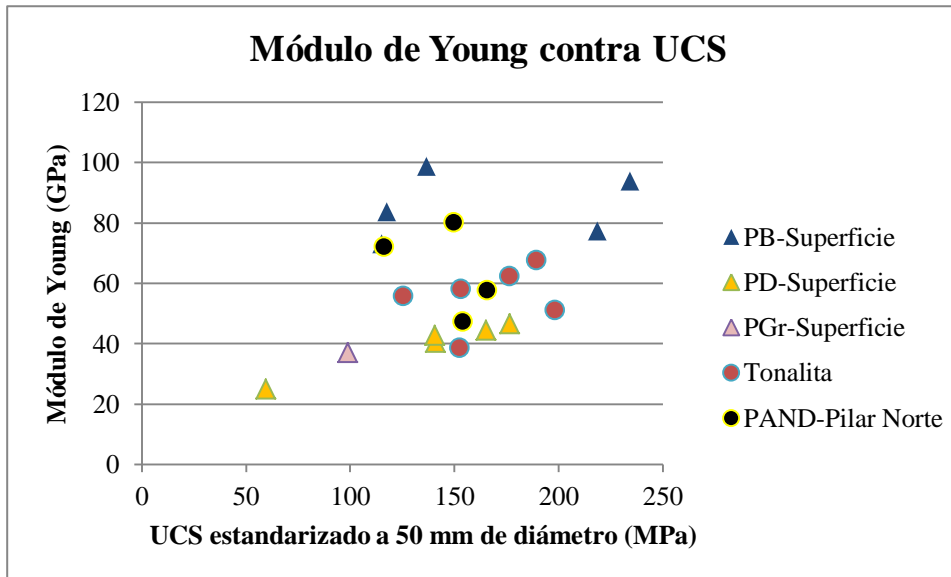


Figura 4.10: Datos de Módulo de Young (en GPa) contra Resistencia a la compresión uniaxial simple (UCS) estandarizado a 50 mm de diámetro (en MPa), separados por litología, para todas las probetas sometidas al ensayo de compresión uniaxial simple de los que se tienen resultados.

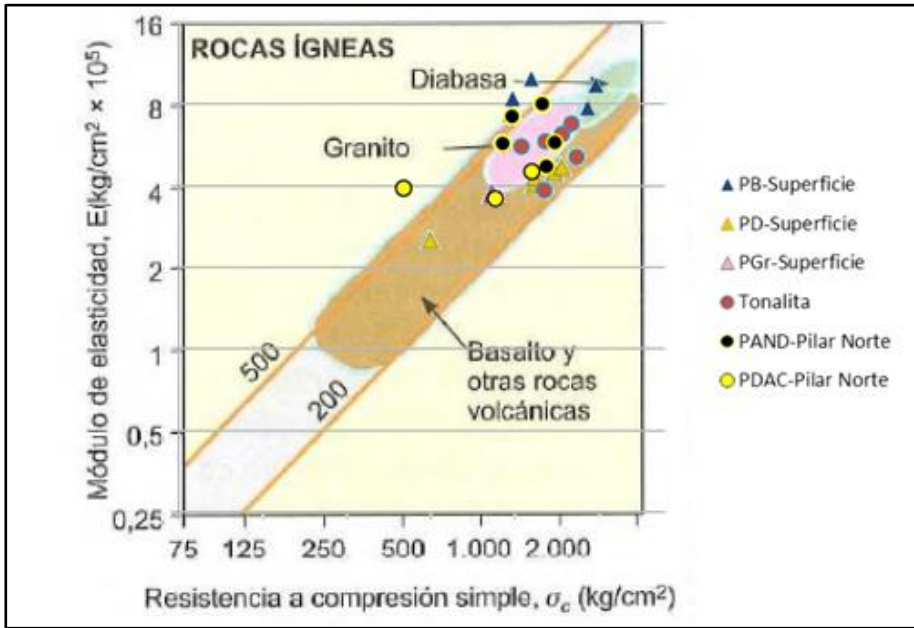


Figura 4.11: Relación entre Módulo de Elasticidad, E, y la resistencia a la compresión simple,  $\sigma_c$ . Modificado de González de Vallejo *et al.*, 2002

La Figura 4.12 consiste en un gráfico donde se comparan los valores de Módulo de Young y de densidad (a partir de la masa y el volumen de las probetas, calculada geoméricamente). En él se observa una buena correlación entre ambas variables, por lo que se ha trazado la línea de tendencia con el mejor ajuste. Esta correlación puede deberse a la menor presencia de poros en las rocas más densas,

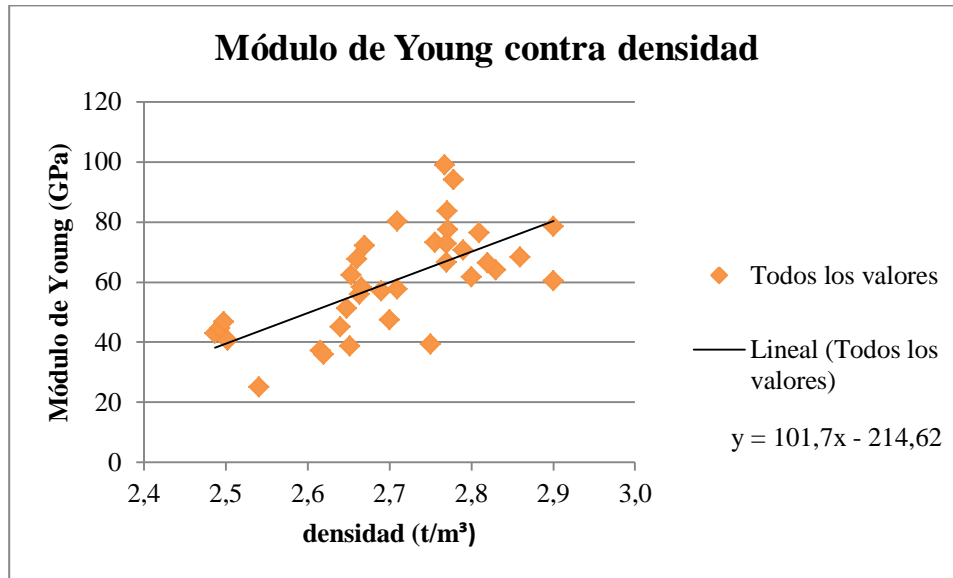


Figura 4.12: Gráfico de Módulo de Young contra densidad, este último obtenido con el volumen calculado geoméricamente de las probetas.

## Discusiones

En la Figura 4.13 se muestran los mismos datos de la Figura 4.12, separados por litología. En ella se observa que los valores de densidad están agrupados para cada unidad litológica, lo cual tiene sentido debido a su similar constitución de minerales.

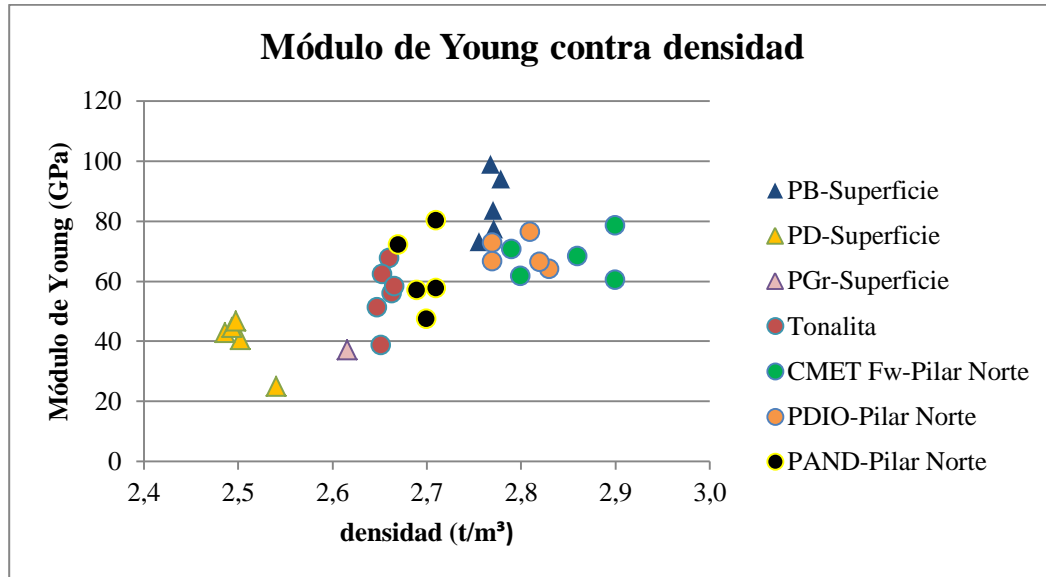


Figura 4.13: Gráfico de Módulo de Young contra densidad, con simbología por unidad litológica

La Figura 4.14 consiste en un gráfico de UCS versus densidad, indicando la unidad litológica correspondiente. Como ambas variables tenían buena correlación con el Módulo de Young, es esperable que la tengan también entre ellas, y si bien existe, no es tan notoria como en el caso de cada variable por separado con el Módulo de Young. Como se mencionó anteriormente, los valores de densidad tienden a agruparse por unidad litológica, por tener la misma composición mineralógica, y en este caso cada unidad no parece mostrar el patrón general de correlación.

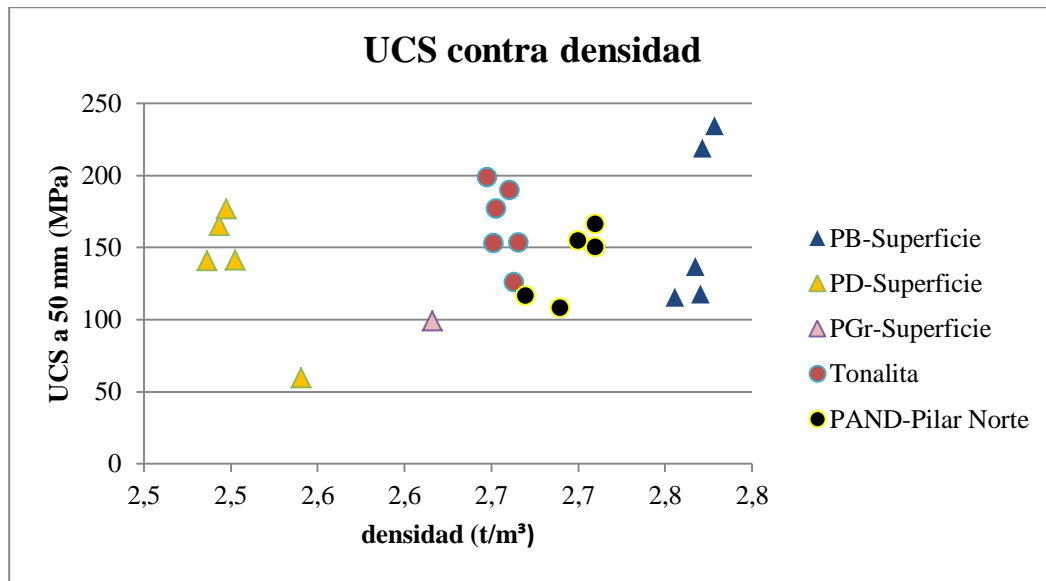


Figura 4.14: Gráfico de contraste entre UCS normalizado a un diámetro de 50 mm (MPa) y la densidad de las probetas ensayadas, con simbología por unidad litológica

En la Figura 4.14 se observa que las muestras de la unidad pórfido basáltico son las que tienen mayor densidad, dentro de las que fueron sometidas a ensayo CUS. Además, se observa en conjunto con la Figura 4.10 y Figura 4.13 que tienen en general un alto Módulo de Young. Estos tres valores pueden estar interconectados por su baja porosidad, dada por su alto contenido de carbonatos, probablemente precipitados en eventos posteriores a la cristalización de la roca ígnea.

#### 4.2.2. Relaciones entre parámetros petrográficos

La Figura 4.15 consiste en un gráfico donde se muestran el tamaño máximo de los fenocristales y el contenido de fenocristales, separado por unidad litológica. A grandes rasgos, se observa que el tamaño máximo de los cristales aumenta con el contenido de fenocristales, lo que tiene sentido pues las rocas con más fenocristales tuvieron mayor tiempo para cristalizar a partir del magma. En la figura se muestra una barra al 20% de fenocristales, que separa los de grano fino (menores a 2 mm en general) de los de grano medio y grueso. Se observa también que las muestras se agrupan por unidad litológica.

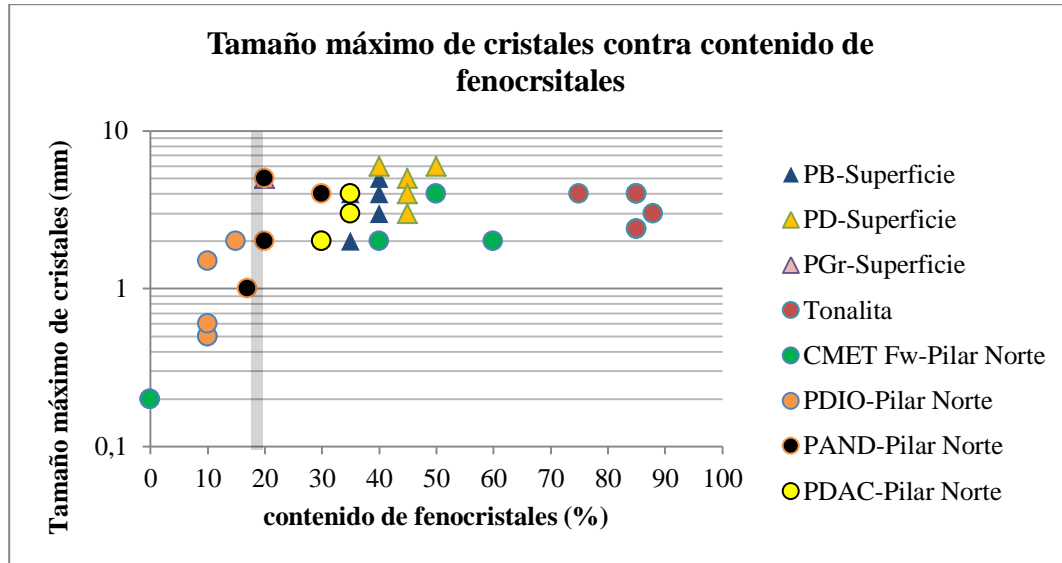


Figura 4.15: Gráfico de Tamaño máximo de cristales y contenido de fenocristales, con leyenda por unidad litológica.

#### 4.2.3. Relaciones entre los resultados de ensayos geotécnicos y las descripciones petrográficas

La Figura 4.16 consiste en un gráfico que contrasta los resultados de Módulo de Young contra el contenido de fenocristales (que fue estimado con los esquemas de la Figura 3.3), separados por unidad litológica. En ella se muestra una banda que separa los arreglos en que los fenocristales no se tocan entre ellos (“matriz-soportado”, <40%) y los arreglos en que los fenocristales forman un esqueleto (“cristal-soportado”, >50%). No parece existir una correlación entre ambas variables, pero se observa que entre el 0% y 40% de contenido de fenocristales aumenta la dispersión del Módulo de Young a medida que aumenta el contenido de fenocristales. Generalmente el contenido de fenocristales se agrupa por unidad litológica, con excepción de CMET Fw, de las cuales hay muestras sin fenocristales debido a la intensidad de alteración hidrotermal que sufrieron.

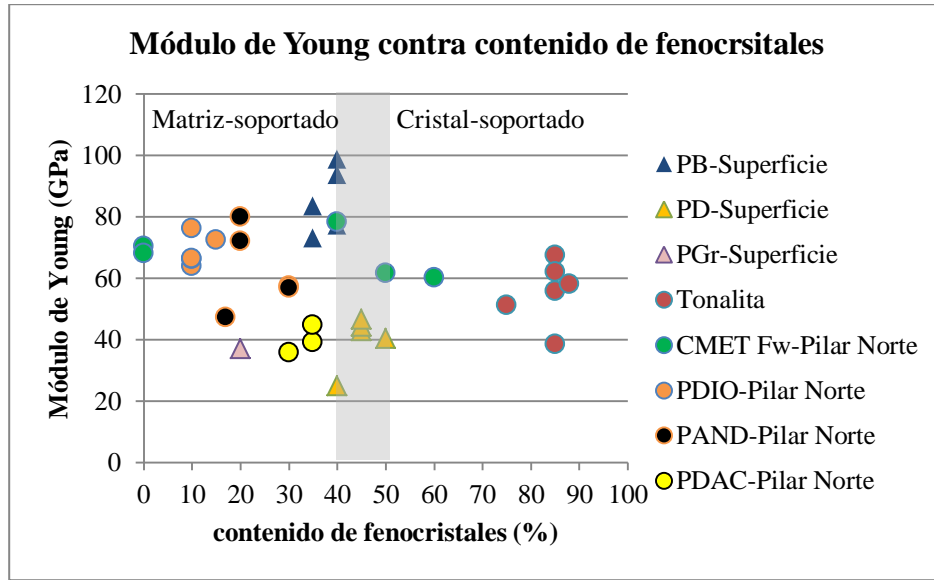


Figura 4.16: Gráfico de Módulo de Young contra contenido de fenocrsitaes, separado por unidad litológica. Se presenta una banda que separa los arreglos “matriz-soportados” (<40%) de los “cristal-soportados” (>50%). En la FIG 3.3 se muestra cómo se ven estas proporciones de fenocrsitaes.

La Figura 4.17 consiste en un gráfico de Módulo de Young por categoría de soporte: matriz-soportado, intermedio o cristal-soportado, basado en la clasificación de la Figura 4.16. Cada categoría tiene 23, 3 y 9 datos respectivamente (Tabla 3.9). En la Figura 4.18 se ha hecho la misma clasificación, incorporando en las muestras cristal-soportadas a las que presentan textura glomeroporfídica, quedando 18 matriz-soportadas y 17 cristal-soportadas. De este gráfico se puede apreciar que si bien en ambas categorías el Módulo de Young se mueve en un rango de valores, el rango de las muestras cristal-soportadas es de valores mayores (de 38,6 a 98,9 GPa, contra 25,1 a 83,7 GPa), lo que confirmaría la hipótesis de trabajo. Es decir, la textura de las rocas tiene una influencia en su rigidez a escala de probeta (E).

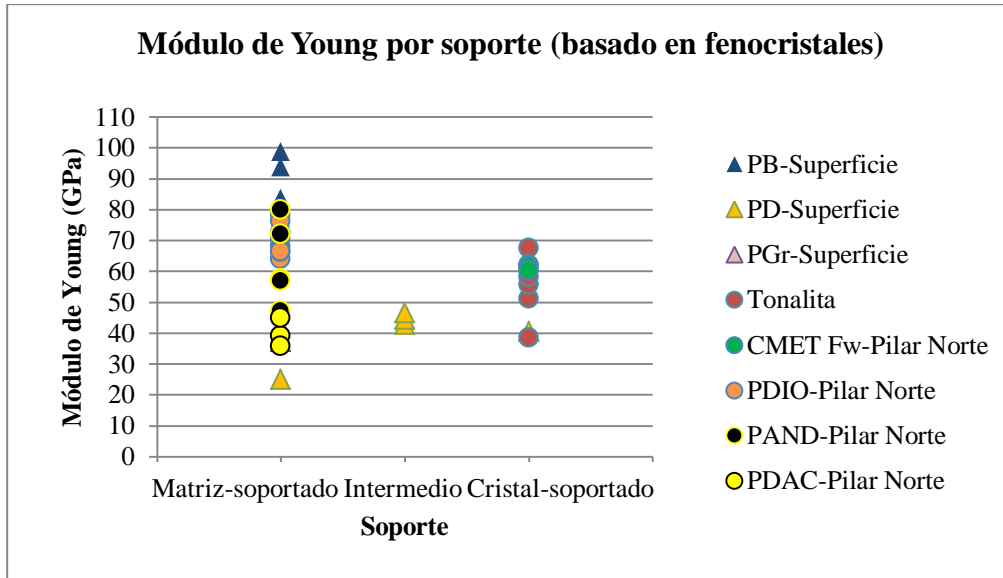


Figura 4.17: Módulo de Young por categoría de soporte basada en el contenido de fenocristales: matriz-soportado, intermedio y cristal-soportado.

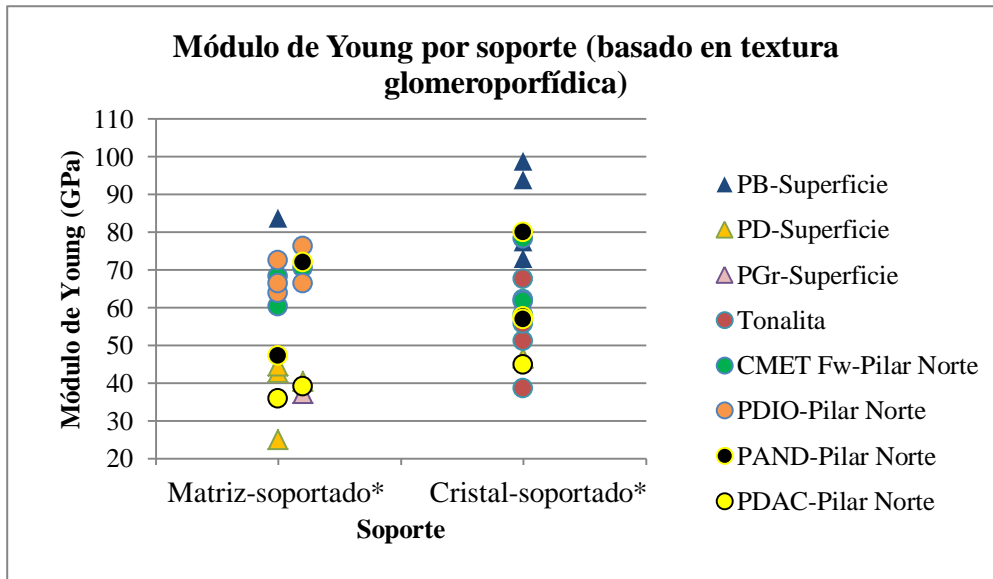


Figura 4.18: Módulo de Young por categoría de soporte: matriz-soportado y cristal-soportado, incluyendo en la última a las muestras que presentan textura glomeroporfídica

## Discusiones

Según el orden en que aparecen las muestras en la Figura 4.18, la nueva clasificación según soporte para las muestras es la que se expone en la Tabla 4.3 (\* indica la nueva clasificación).

**Tabla 4.3: Clasificación de las muestras según soporte basado en el contenido de fenocristales y la presencia de textura glomeroporfídica. MS\*: Matriz Soportado y CS\*: Cristal Soportado.**

Probeta	Litología	Soporte	Probeta	Litología	Soporte
DDH2164-PB-924-2	Tonalita	CS*	SG331 @ 71.00	CMET FW	CS*
DDH2164-PB-1188-2	Tonalita	CS*	SG334 @ 37.20	CMET FW	MS*
DDH2176-PB-858-2	Tonalita	CS*	SG334 @ 37.10	CMET FW	MS*
DDH2187-PB-396-2	Tonalita	CS*	SG333 @ 39.80	CMET FW	MS*
DDH2188-PB-863-2	Tonalita	CS*	SG333 @ 53.00	CMET FW	CS*
DDH2197-PB-792-2	Tonalita	CS*	SG0331 @ 7.40	Pórfido Diorítico	MS*
IR6-P1	Pórfido Basáltico	MS*	SG0331 @ 8.60	Pórfido Diorítico	MS*
IR7-P1	Pórfido Basáltico	CS*	SG0334 @ 6.50	Pórfido Diorítico	MS*
IR8-P1	Pórfido Basáltico	CS*	SG0331 @ 12.90	Pórfido Diorítico	MS*
IR2-P3	Pórfido Diorítico	MS*	SG0334 @ 9.60	Pórfido Diorítico	MS*
IR3-P3	Pórfido Diorítico	MS*	Ten-A7@2577	Pórfido Andesítico	CS*
IR4-P3	Pórfido Diorítico	MS*	Ten-A4@0003	Pórfido Andesítico	CS*
IR5-P3	Pórfido Granodiorítico	MS*	Ten-A4@0010	Pórfido Andesítico	MS*
IR3-P2	Pórfido Diorítico	MS*	Ten-A4@0011	Pórfido Andesítico	MS*
IR4-P5	Pórfido Diorítico	CS*	Ten-A4@0015	Pórfido Andesítico	CS*
IR6-P3	Pórfido Basáltico	CS*	NNM8_11.00-11.32	Pórfido Dacítico	MS*
IR7-P2	Pórfido Basáltico	CS*	OR2_C13	Pórfido Dacítico	CS*
			OR2_5.88-6.20	Pórfido Dacítico	MS*

En la Figura 4.19 se muestra un ejemplo de textura glomeroporfídica conformada por cristales de plagioclasa, de la muestra IR7P2.



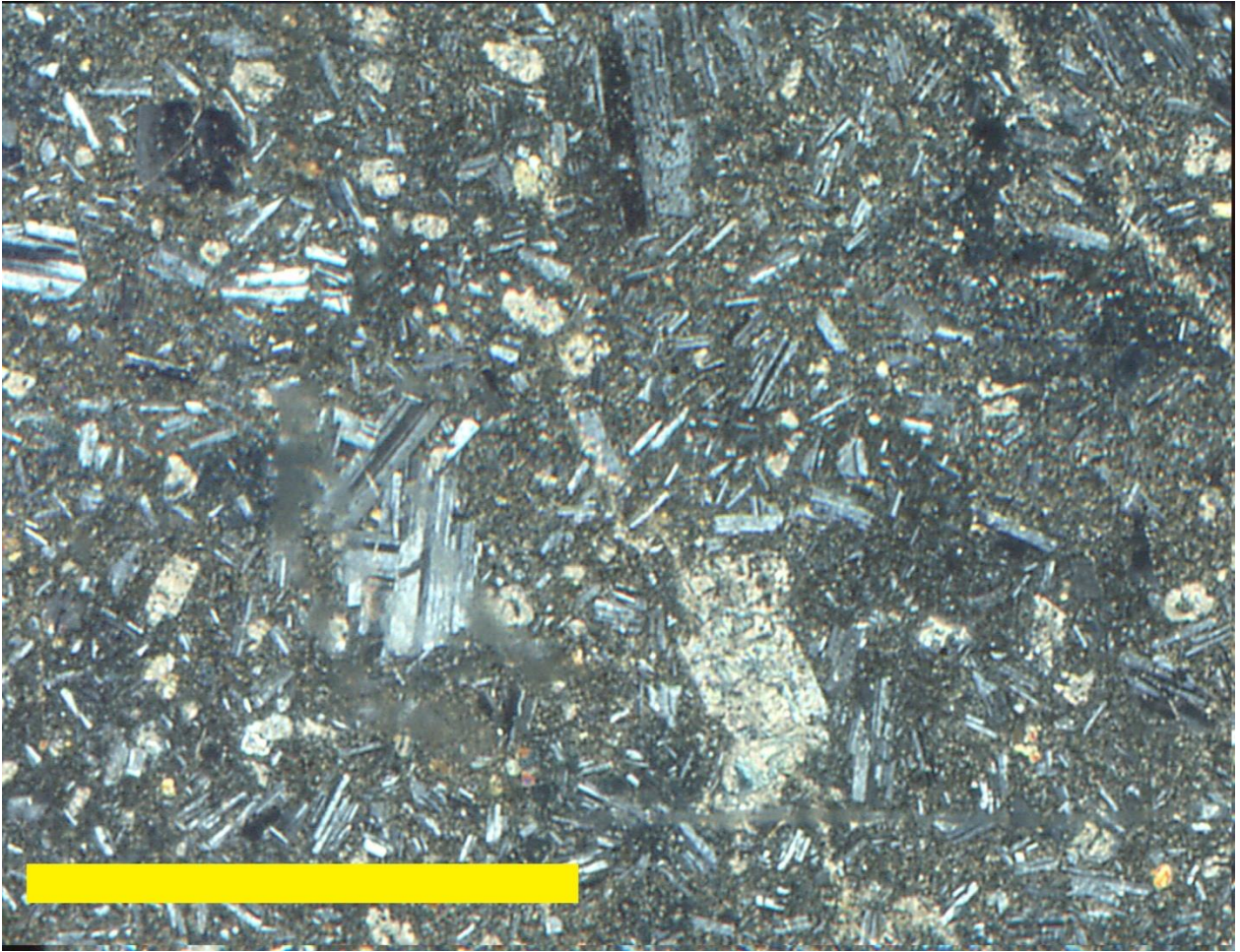


Figura 4.19: Fotomicrografía de la muestra IR7P2. En ella se observa un cúmulo de cristales de plagioclasa sobre la barra de escala, que representa 5 mm.

La Figura 4.20 consiste en un gráfico de Módulo de Young contra contenido de sílice (que fue asignado en función de la unidad litológica y los valores establecidos por estudios anteriores), y muestra una proporcionalidad inversa entre ambas variables. Esto no se correlaciona muy bien con la literatura, pero es el mismo comportamiento de las rocas de El Teniente en general (sección 4.1.1).

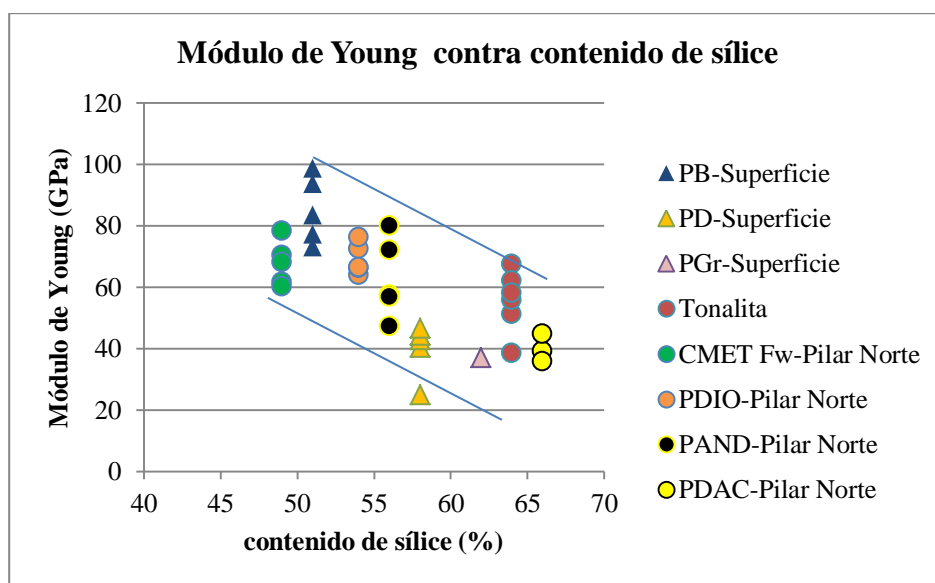


Figura 4.20: Gráfico de Módulo de Young contra contenido de sílice, por unidad litológica.

En la Figura 4.21 se muestra un gráfico de Módulo de Young contra tamaño máximo de cristales, con leyenda por unidad litológica. En él no se aprecia una tendencia global, pero algunas unidades presentan tendencias dentro de ellas mismas, como Módulo de Young descendente a mayor tamaño máximo de cristales en el caso de Tonalita y PD-Superficie, y ascendente en el caso de PB-Superficie y PDAC.

En tanto, la Figura 4.22 consiste también en un gráfico de Módulo de Young contra tamaño máximo de cristales, con leyenda según su soporte (MS\* y CS\*). En ella se observa que para las muestras matriz-soportadas, hay una disminución del Módulo de Young con el aumento del tamaño máximo de cristales, mientras que para las muestras cristal-soportadas habría un incremento de E con el aumento del tamaño máximo de cristales (hasta 6 mm).

Es de importancia mencionar que en la gran mayoría de los casos, los cristales de mayor tamaño son de plagioclasa, y en algunos casos biotita. Esta información está disponible en las descripciones completas del Anexo B.

La tendencia de disminución del Módulo de Young a mayor tamaño máximo de fenocristales en el caso de las muestras matriz-soportadas, puede ser explicada con una redistribución de esfuerzos alrededor de dichos cristales, que usualmente tienen una relación largo/ancho mayor a 2 o 3. Esto generaría debilidades locales en rocas matriz-soportadas con fenocristales relativamente grandes (grano medio), disminuyendo su valor de E.

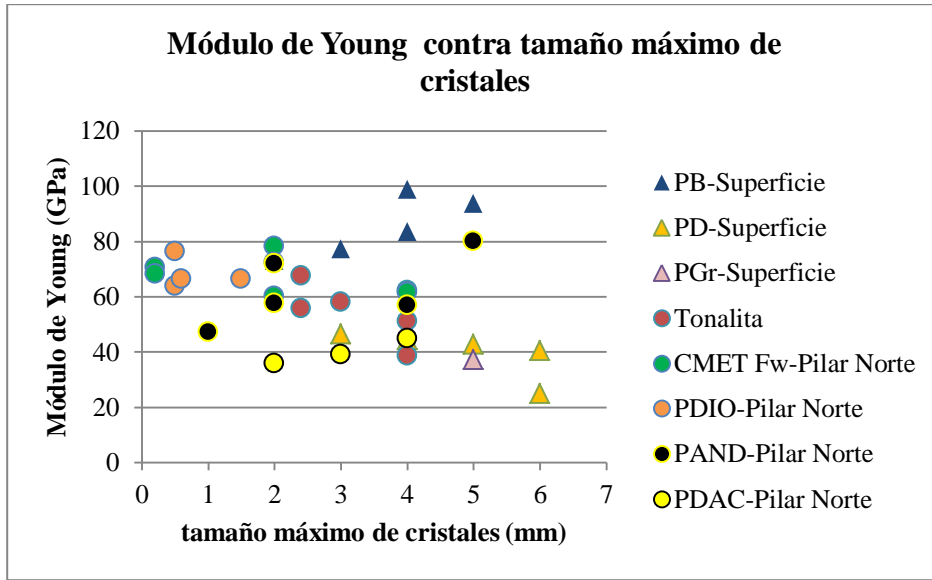


Figura 4.21: Gráfico de Módulo de Young contra tamaño máximo de cristales, con leyenda por unidad litológica.

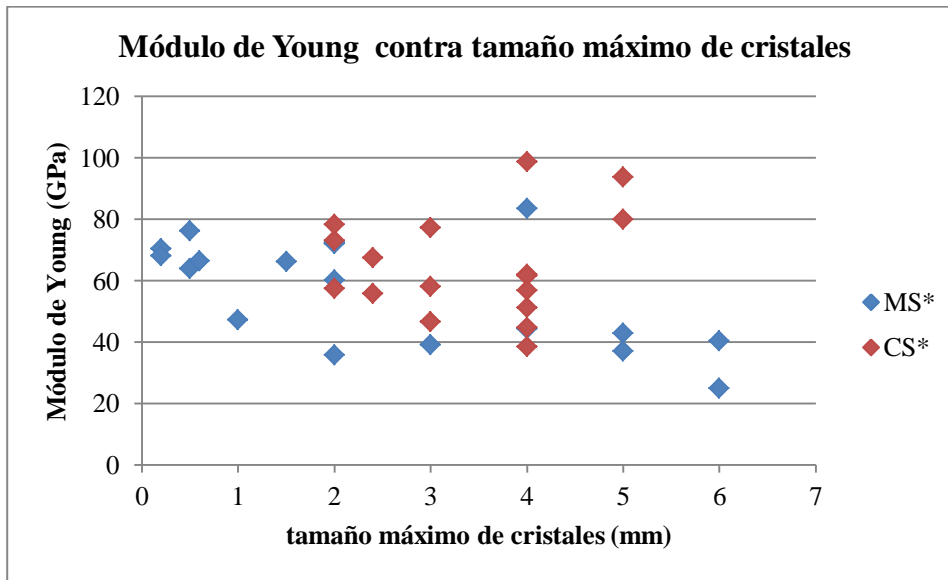


Figura 4.22: Gráfico de Módulo de Young contra tamaño máximo de cristales, con leyenda según soporte

En la Figura 4.23 se muestra un gráfico de Módulo de Young contra intensidad de alteración (Débil, Débil a Intermedia, Intermedia, Intermedia a Alta y Alta), con leyenda por unidad litológica. En ella se observa que hay poca variabilidad en la intensidad de alteración de las unidades litológicas, y no parece generar una tendencia universal. En tanto, la Figura 4.24 muestra los mismos datos, con leyenda por soporte. De esto se concluye que las muestras cristal-soportadas tienen en general menor intensidad de alteración que las matriz-soportadas.

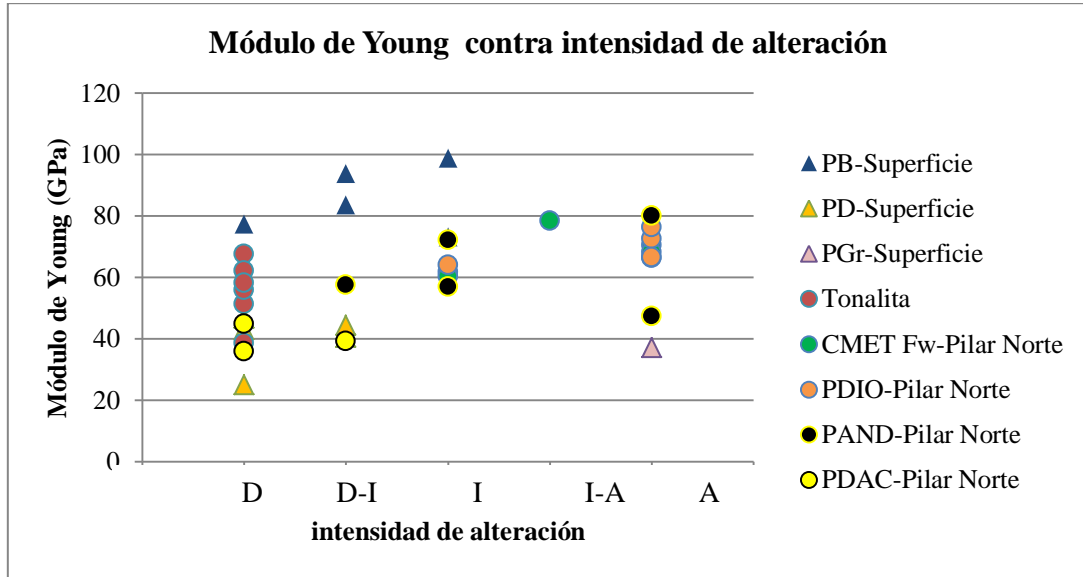


Figura 4.23: Gráfico de Módulo de Young contra intensidad de alteración, con leyenda por unidad litológica.

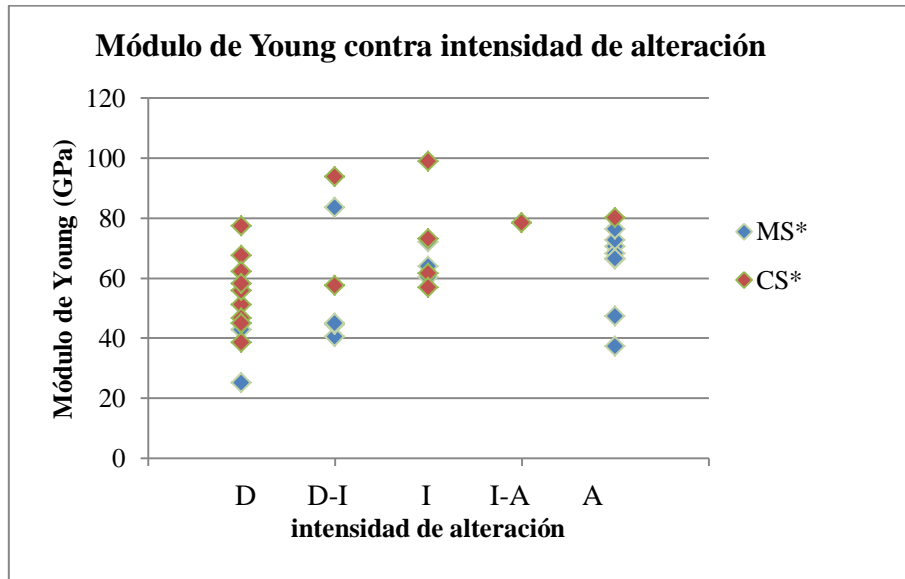


Figura 4.24: Gráfico de Módulo de Young contra intensidad de alteración, con leyenda por soporte.

## 5. Conclusiones

Existe gran variabilidad en la rigidez a escala de probeta (E, Módulo de Young) de las rocas ensayadas, incluso dentro de una misma unidad litológica. El espectro de valores es aproximadamente de 25 a 99 GPa.

Se hizo evidente una correlación muy estrecha entre la densidad de las probetas ensayadas y su Módulo de Young. Esta correlación se puede explicar con la menor presencia de poros en las unidades más densas, que les confieren menos propensión a desarrollar fracturas en los momentos iniciales de los ensayos.

A su vez, la resistencia a la compresión uniaxial mostró una buena correlación con el Módulo de Young, lo que es concordante con la literatura.

Las muestras obtenidas en superficie albergan mineralización, y alteración al menos débil de tipo regional (carbonatos-epidota) o sericita-clorita-opacos. La principal diferencia que presentan dichas muestras con respecto a las del interior del yacimiento es su menor densidad de estructuras, permitiendo rupturas por matriz, lo cual estaba dentro de los objetivos del estudio (características de roca intacta).

El contenido de fenocristales para determinar el soporte no mostró ser un discriminante directo para la rigidez de las probetas en las categorías matriz-soportadas y cristal-soportadas. Sin embargo, al cambiar de categoría a las muestras con bajo contenido de fenocristales pero que presentaban textura glomeroporfídica, se observó que los valores más altos del Módulo de Young se cambiaron de categoría, dejando los siguientes un rango de 38,6 a 98,9 GPa para las muestras cristal-soportadas y de 25,1 a 83,7 GPa para las muestras matriz-soportadas.

Para las muestras matriz-soportadas, a mayor tamaño máximo de cristales (usualmente de plagioclasa, hasta 6 mm), la roca tiene menor Módulo de Young. Esto se puede deber a una redistribución de esfuerzos alrededor de los cristales de grano medio, que suelen ser alargados (razón largo/ancho >2).

No hay un conjunto de características petrográficas que distinga unívocamente a las unidades de intrusivos félsicos del CMET, sino que todas ellas se dan en ambas unidades y en distintos rangos para cada una. Esto se debe a que las unidades litológicas suelen tener variaciones texturales dentro de su volumen total.

Este estudio no fue determinante sobre la mayor rigidez de los intrusivos félsicos. Sin embargo, se establecieron variables petrográficas que afectan los parámetros geotécnicos, tanto para las unidades intrusivas como para la roca caja.

Por lo anterior, se recomienda sectorizar volumétricamente las rocas de El Teniente en función del soporte, el tamaño máximo de los cristales, etc.

## Conclusiones

Para abordar la hipótesis del contraste de rigidez a escala de macizo rocoso, se recomienda el uso de simulaciones computacionales de distribución de esfuerzos y deformaciones a dicha escala; realizar otros análisis como este con mayor cantidad de muestras; evaluar las debilidades del macizo por sectores; analizar los umbrales de fracturamiento de los ensayos sistemáticamente; y realizar análisis de deformación de materiales sólidos con constituyentes de distintas constantes elásticas y tamaños (ejemplo: cuarzo, plagioclasa, biotita, sericita, arcillas).

## Bibliografía

**Álvarez, L. 1990.** Perfil de alteración y mineralización supérgena en el Yacimiento El Teniente, Rancagua, Chile. Memoria de Título. Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ciencias Geológicas. Antofagasta, Chile.

**Arévalo, A. y Floody, R. 1995.** Modelo global de alteración & mineralización. Estudio geometalúrgico del mineral a explotar a mediano & largo plazo. Informe inédito. CODELCO-Chile, División El Teniente, Superintendencia de Geología. 158 p.

**Arévalo, A., Floody, R. y Olivares, A. 1998.** Modelo geometalúrgico. Estudio geometalúrgico del mineral a explotar a mediano y largo plazo. Informe inédito (GL-133/98). CODELCO-Chile, División El Teniente, Superintendencia de Geología. 76 p.

**Arredondo, C. 1994.** Distribución, caracterización y génesis de los cuerpos de brecha en el sector central-este del yacimiento El Teniente. Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Santiago, Chile. 99 p.

**Baraona, K. 2013.** Comportamiento de vetillas de la Mina El Teniente sometidas a ensayos de tracción directa. Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Santiago, Chile.

**Brady, B. H. G.; Brown, E. T. 2005.** Rock Mechanics for underground mining, 3<sup>rd</sup> edition. Springer Science + Business Media, Inc.

**Brzovic, A. 1996.** Geología y geotecnia sector Quebrada Teniente. Informe de Avance N° 5, 11p.

**Burgos, L. 2002.** Petrografía y Geoquímica de la Diabasa y Diques Basálticos que constituyen las “Andesitas de la Mina” en el Yacimiento El Teniente VI Región, Chile. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas. Departamento de Ciencias de la Tierra. 108p.

**Cai, M.; Kaiser, P.K.; Tasaka, T.; Maejima, T.** Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 7 //2004, 41(5), 833-847.

**Camus, E. 1975.** Geology of the El Teniente ore body with emphasis on Wall-rock. CODELCO-Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología.

**Charrier, R. 1973.** Geología Regional de la Provincia de O'Higgins & Colchagua. Publicación INEN, vol.7, pp 1-69.

**Charrier, R. y Munizaga F. 1979.** Edades K-Ar de Volcanitas Cenozoicas del Sector Cordillerano del Río Cachapoal, Chile (34 ° 15' LS). Revista Geológica de Chile, vol.7. pp. 41-51.

## Bibliografía

- Charrier, R. 1981.** Geologie der chilenische Hauptkordillere zwischen 34°30' südlicher Breite und ihre tektonische, magmatische und paläogeographische Entwicklung. Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Berlín, vol.36, 370 p.
- Charrier, R. 1983.** Carta geológica de Chile, escala 1:250.000. Hoja El Teniente. Universidad de Chile, Departamento de Geología. Inédito N° 929, 155 p.
- Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher I, C., Spichiger, S. y Zapatta, F. 1994.** Nuevos antecedentes estratigráficos & estructurales para las Formaciones Coya-Machalí y Abanico, entre los 33°50' & 35° S, Cordillera Principal Chilena. En Congreso Geológico Chileno, Concepción, vol. 7, Actas 2, pp. 1316-1319.
- Cuadra, P. 1986.** Geocronología K-Ar del Yacimiento El Teniente y áreas adyacentes. Revista Geológica de Chile, N° 27, p. 3-26.
- Davidson, J. 1971.** Geología del área de las Nacientes del Teno, Provincia de Curicó. Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Santiago, Chile.
- Davidson, J. y Vicente, J. 1973.** Características paleogeográficas & estructurales del área fronteriza de las Nacientes del Teno (Chile) & Santa Elena (Argentina) (Cordillera Principal, 35° a 35°15' latitud S). Actas del Quinto Congreso Geológico Argentino. Buenos Aires, vol. 5, pp. 11-55.
- De Los Santos, C. 2011.** Efecto de la mineralogía, alteración y geometría en la resistencia mecánica de las vetillas, Mina El Teniente, Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas. Departamento de Ciencias de la Tierra.
- Falcón, M. y Rivera, O. 1998.** Estudio geológico distrital de la División El Teniente de CODELCO-Chile, escala 1:25.000. Informe inédito. Vicepresidencia de Exploraciones y Asociaciones Mineras, CODELCO Chile, 108 pp. Santiago, Chile.
- Floody, R. 2000.** Estudio de vulnerabilidad geológica-geotécnica de la Chimenea de Brechas Braden. Fase 1. Geología de Brechas Braden. Informe inédito (GL-044/00). CODELCO-Chile, División El Teniente, Superintendencia de Geología. 90 p.
- Garrido, I. 1992.** Resumen nuevo modelo geológico-estructural y geotécnico yacimiento El Teniente. Informe inédito. CODELCO-Chile, División El Teniente, Superintendencia de Geología. Pp.99-151.
- Garrido, I. 1995.** Geología estructural del distrito y la mina El Teniente y situación geodinámica regional. Proyecto Geodinámico Mina El Teniente, Proyecto API-1-1689. Reporte interno, CODELCO-Chile, División El Teniente. Superintendencia de Geología, vol. 1, 61 p.



## Bibliografía

- Godoy, E. 1993.** Geología del Área entre los ríos Claro del Maipo y Cachapoal, Volumen I: Texto y Mapas, 67 p. Informe Final Proyecto CODELCO y SERNAGEOMIN.
- Godoy, E. y Lara, L. 1994.** Segmentación estructural andina a los 33°-34° S. Nuevos Datos en la Cordillera Principal. 7° Congreso Geológico chileno, Actas, Vol. 2, pp. 1344-1346.
- Gómez, R. 2001.** Geología de las Unidades Volcanogénicas Cenozoicas del Área Industrial de la Mina El Teniente, entre Colón y Coya, Cordillera Principal de Rancagua, VI Región. Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Santiago, Chile.
- González, O. y Vergara, M., 1962.** Reconocimiento geológico de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 35° y 38° latitud S. Publicación N° 24, Instituto de Geología, Universidad de Chile, Santiago. 121 p.
- González, A. 2000.** Análisis estructural entre los valles del Río Tinguiririca & Teno, Cordillera Principal de Chile Central: Microsismicidad & Geología de superficie. Memoria de título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Santiago, Chile. 85p.
- González, S. 2014.** Análisis de la densidad de fallas mayores (P21) en la mina El Teniente. Memoria de Título, *in prep.* Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Santiago, Chile.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. 2002.** Ingeniería Geológica. Pearson Educación, Madrid. 744 p.
- Guzmán, C. 1991.** Alteración y mineralización de los pórfidos dioríticos del sector Central, yacimiento El Teniente. Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología y Geofísica. Santiago, Chile. 145 p.
- Guzmán, C., López, S., Valenzuela, R., 2004.** Informe Soporte Geológico Wi, Geometalúrgico fase 3. Informe inédito, referencia interna IM2-024-04.
- Harrison, D. 2009.** Caracterización estructural bajo el nivel Teniente 8, mediante el análisis de sondajes ortogonales orientados, para el proyecto nuevo nivel mina, Yacimiento El Teniente, VI Región, Chile. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Ciencias de la Tierra. Concepción, Chile. 127 p.
- Hitschfeld, M. 2006.** Petrografía y geoquímica de los intrusivos leucocráticos del sector sur este del Yacimiento El Teniente. VI Región, Chile. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Ciencias de la Tierra. Concepción, Chile.
- Hoek, E., y Brown, E. T. 1985.** Excavaciones Subterráneas en Rocas, McGraw Hill, México. (Original: Underground Excavations in Rock, 1980)

## Bibliografía

- Howell, F. & Molloy, J. 1960.** Geology of the Braden Orebody, Chile. *Economic Geology*, Vol. 55, p. 863-905.
- Hudyma, M. 2008.** Esmeralda Seismic Hazard Map. Itasca Consulting Canada, Inc. Preparado para Jorge Revuelta, Gerente Nuevo Nivel Mina, CODELCO-Chile, División El Teniente.
- Klöhn, C. 1960.** Geología de la cordillera de los Andes de Chile Central. Boletín N°8, 95 p. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Chile.
- Kurtz, A., Kay, S. Charrier, R. & Farrar, E. 1997.** Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente region. Central Chile (34°-35°). *Revista Geológica de Chile*, Vol. 16. p. 145-162.
- Levi, B. & Aguirre, L. 1981.** Ensisalic spreading subsidence in the Mesozoic and Paleogene Andes of Central Chile. *Journal of the Geological Society of London*, 138. p.75-81.
- Mackenzie, W., Donaldson, C. & Guilford, C. 1999.** Atlas of igneous rocks and their textures. Longman Group Limited, 149 p. London.
- Maksaev, V., Munizaga, F., Mc Williams, M., Thiele, K., Arévalo, A., Zúñiga, P. & Floody, R. 2001.**  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronology of the El Teniente Porphyry Copper Deposit. III Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Pucón, Chile. Extended Abstracts (CD-ROM) p. 496-499.
- Maksaev, V & Zentilli, M. 2002.** Chilean strata-bound Cu-(Ag) deposits: An Overview. In - Porter, T.M. (Editor), 2002 – Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global perspective, Vol. 2: PGC Publishing, Adelaide, Australia, pp. 185-205.
- Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Fanning, M., Mathur, R., Ruiz, J. & Zentilli, M. 2004.** New Chronology for El Teniente, Chilean Andes, from U-Pb,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , Re-Os, and Fission-Track Dating: Implications for the Evolucion of a Supergiant Porphyry Cu-Mo Deposit. *Society of Economic Geologists, Special Publication 11*, p. 15-54.
- Marambio, F., Pereira, J. & Russo, A. 1999.** Estudio Propiedades Geotécnicas Proyecto Pipa Norte. Superintendencia de Geología, División El Teniente. CODELCO-Chile. Informe inédito. Referencia interna GL-280/99. Rancagua.
- Martínez, R. y Osorio, R. 1963.** Consideraciones preliminares sobre la presencia de Carófitas fósiles en la Formación Colimapu. *Revista Minerale*s, v.18, N° 82. P.26-43.
- Morales, A. y Pereira, J. 1996.** Actualización geológica proyecto Esmeralda. Informe interno, referencia GI-083/96. Departamento de Geología, División El Teniente. 33 p.
- Ojeda, J., Hernández, E., Ossandón, G., Enrione, A. y Mestre, A. 1980.** El Pórfido Cuprífero El Teniente. Informe Inédito, 76 p. CODELCO-Chile, División El Teniente.

## Bibliografía

- Ossandón, G. 1974.** Petrología y alteración del Pórfido Dacítico, Yacimiento El Teniente. Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Santiago, Chile. 112p.
- Oyarzún, M. y Arévalo, A. 2011.** Rock texture and B<sub>W</sub>i Relationships, El Teniente Ore Deposit, Chile. The first AUSIMM International Geometallurgy Conference, Brisbane, Queensland, 5-7 sept 2011.
- Pérez, J. 2010.** Caracterización Petrográfica del Cuerpo Intrusivo Félsico denominado Tonalita en el Sector Sur Este del Yacimiento El Teniente. VI Región, Chile. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas. Departamento de Ciencias de la Tierra.
- Portigliati, C. y Camus, F. 1974.** Alteración hidrotermal del Yacimiento El Teniente. Informe inédito (preliminar). CODELCO-Chile, División El Teniente, Departamento de Geología. 36 p.
- Rabbia, O., Reich, M., Hernández, L., King, R. & López-Escobar, L. 2000.** High-Al TTG-like suite at the El Teniente porphyry copper deposit, Chile. Actas del IX Congreso Geológico Chileno, Vol. 1, p. 326-330. Puerto Varas.
- Reyes, M. 2011.** Apuntes de Petrografía y Petrología Metamórfica, Capítulo 5: Clasificación de las rocas metamórficas. Universidad Autónoma de Chihuahua [en línea] Chihuahua, México. p10 <[http://www.fing.uach.mx/licenciaturas/IG/Apuntes/2011/10/24/Petrologia\\_y\\_Petrografia\\_Metamorfica\\_2aParte2011.pdf](http://www.fing.uach.mx/licenciaturas/IG/Apuntes/2011/10/24/Petrologia_y_Petrografia_Metamorfica_2aParte2011.pdf)> [consulta: 30 de abril de 2014]
- Rivera, O. y Cembrano, J. 2000.** Modelo de formación de cuencas volcanotectónicas en zonas de transferencia oblicuas a la cadena andina: El caso de las cuencas Oligo-Miocenas de Chile Central & su relación con estructuras NNW-NW (33° 00'-34° 30'S). Actas IX Congreso Geológico Chileno. 31 de julio - 4 de agosto, Puerto Varas, Chile. V. 1, p. 631-636.
- Rivera, O. y Falcón, F. 2000.** Secuencias de relleno de cuencas volcano-tectónicas transversales Oligoceno-Miocenas en los alrededores del Yacimiento El Teniente (33° 45'-34° 30'S). IX Congreso Geológico Chileno, Puerto Varas, V 1, p. 819-823.
- Riveros, M. 1991.** Geología del Pórfido Latítico del sector sur del Yacimiento El Teniente. Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología y Geofísica. Santiago, Chile. 164 p.
- Rojas, E., Molina, R. & Cavieres, P. 2001.** Preundercutcaving in El Teniente mine, Chile. *In* Hustrulid, W. R. & Bullock, R. (Eds.). *Underground Mining Methods; engineering fundamental and international case studies.* Colorado, SME.
- Rojas, A. 2003.** Petrografía y geoquímica del Pórfido Teniente, ubicado en el sector norte del Yacimiento El Teniente. Provincia de Cachapoal, VI Región, Chile. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Ciencias de la Tierra. 133p.

## Bibliografía

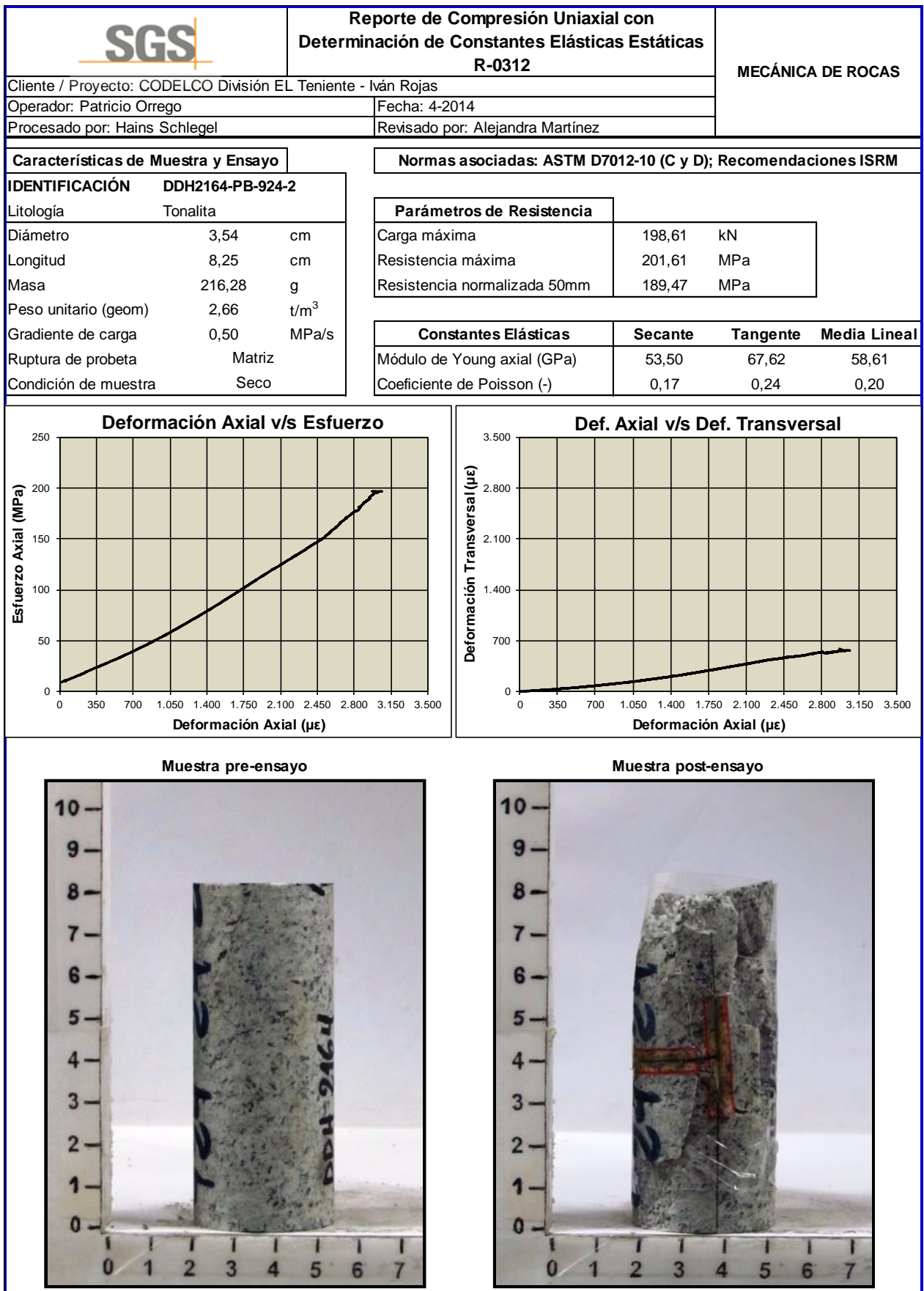
- Skewes, M., Arévalo, A., Floody, R., Zúñiga, P., Stern, C. 2002.** “The Giant El Teniente Breccia Deposit: Hypogene Copper Distribution and Emplacement”. Society of Economic Geologists Special Publication, 9, 2002, Chapter 14, p. 299-332.
- Streckeisen, A. L., 1974.** Classification and Nomenclature of Plutonic Rocks. Recommendations of the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Geologische Rundschau Internationale Zeitschrift für Geologie. Stuttgart. Vol 63, p. 773-785.
- Suzuki, K. 2013.** “Aplicación de la Técnica Synthetic Rock Mass a Escala de Laboratorio”. Tesis de Magíster en Minería, Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil de Minas. Santiago, Chile. 150 p.
- Thiele, R. 1980.** Carta Geológica de Chile N° 39, Hoja Santiago, escala 1:25.000. Instituto de Investigaciones Geológicas Chile, 51 p.
- Urrutia, E., Russo, A., Durán, M., Celhay, F., Zúñiga, P. 2006.** Orientaciones Preferenciales Estructuras Intermedias Interpretadas y Mayores. Proyecto Nuevo Nivel Mina. Nivel 1880. Referencia Interna: GL8-10002.
- Vallejos, J. 2013.** **Apuntes del curso MI4060 – Mecánica de Rocas.** Departamento de Ingeniería Civil de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Vergara, M., Levi, B., Nyström, J. O., Cancino, A. 1995.** Jurassic and Early Cretaceous island arc volcanism, extension, and subsidence in the Coast Range of Central Chile. Geological Society of America, Bulletin, Vol 107, No 12, p. 1427-1440.
- Villalobos, J. 1975.** Alteración hidrotermal de las andesitas del yacimiento El Teniente, Chile. Tesis de Doctorado. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. 125 p.
- Zúñiga, P. 1982.** Alteración y mineralización hipógenas en el sector oeste del yacimiento El Teniente. Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. 104 p.

## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

El Anexo A consiste en los reportes de resultados de los ensayos geotécnicos usados en este trabajo, preparados por el laboratorio Mecánica de Rocas de SGS Minerals Chile. En la siguiente tabla se muestra un resumen de estos resultados.

Probeta	Litología	UCS (Mpa)	$\sigma_{c50mm}$ (MPa)	$\sigma_3$ (Mpa)	$\sigma_1$ (Mpa)	Módulo de Young Tangente (Gpa)	Razón de Poisson	Tipo de ruptura
DDH2164-PB-924-2	Tonalita	201,6	189,5			67,6	0,24	Matriz
DDH2164-PB-1188-2	Tonalita	211,7	198,5			51,2	0,30	Matriz
DDH2176-PB-858-2	Tonalita	133,7	125,7			55,8	0,27	Matriz
DDH2187-PB-396-2	Tonalita	188,2	176,6			62,2	0,04	Matriz
DDH2188-PB-863-2	Tonalita	163,3	153,3			58,1	0,28	Matriz
DDH2197-PB-792-2	Tonalita	162,8	152,7			38,6	0,29	Matriz
IR6-P1	Pórfido Basáltico	117,5	117,6			83,7	0,31	Matriz
IR7-P1	Pórfido Basáltico	136,7	136,8			98,9	0,25	Matriz
IR8-P1	Pórfido Basáltico	115,2	115,3			73,1	0,28	Matriz y/o estructura
IR2-P3	Pórfido Diorítico	59,6	59,7			25,1	0,22	Matriz
IR3-P3	Pórfido Diorítico	141,1	141,2			40,5	0,26	Matriz
IR4-P3	Pórfido Diorítico	140,6	140,7			42,9	0,27	Matriz
IR5-P3	Pórfido Granodiorítico	98,8	98,9			37,2	0,23	Matriz
IR3-P2	Pórfido Diorítico	165,2	165,3			44,5	0,28	Matriz
IR4-P5	Pórfido Diorítico	176,6	176,6			46,6	0,24	Matriz
IR6-P3	Pórfido Basáltico	234,5	234,5			93,9	0,25	Matriz
IR7-P2	Pórfido Basáltico	218,7	218,9			77,4	0,25	Matriz
SG331 @ 71.00	CMET FW			3,3	148,8	61,7	0,23	Matriz
SG334 @ 37.20	CMET FW			3,2	139,1	60,3	0,21	Matriz
SG334 @ 37.10	CMET FW			18,1	224,4	70,6	0,26	Matriz
SG333 @ 39.80	CMET FW			26,0	227,0	68,3	0,35	Matriz
SG333 @ 53.00	CMET FW			26,0	205,3	78,4	0,28	Matriz
SG0331 @ 7.40	Pórfido Diorítico			2,8	151,0	72,6	0,25	Matriz y/o estructura
SG0331 @ 8.60	Pórfido Diorítico			9,5	214,8	76,3	0,28	Matriz
SG0334 @ 6.50	Pórfido Diorítico			17,9	221,4	63,9	0,24	Matriz
SG0331 @ 12.90	Pórfido Diorítico			16,1	226,7	66,4	0,24	Matriz
SG0334 @ 9.60	Pórfido Diorítico			26,0	257,0	66,5	0,28	Matriz
Ten-A7@2577	Pórfido Andesítico	159,1	166,1			57,6	0,26	Matriz y/o estructura
Ten-A4@0003	Pórfido Andesítico	143,8	149,9			80,1	0,16	Matriz y/o estructura
Ten-A4@0010	Pórfido Andesítico	111,8	116,5			72,1	0,22	Matriz y/o estructura
Ten-A4@0011	Pórfido Andesítico	148,0	154,3			47,3	0,30	Matriz y/o estructura
Ten-A4@0015	Pórfido Andesítico	103,3	107,8			57,0	-	Matriz y/o estructura
NNM8_11.00-11.32	Pórfido Dacítico	39,7	47,8			39,2	0,12	A
OR2_C13	Pórfido Dacítico	113,9	137,6			44,9	0,21	A
OR2_5.88-6.20	Pórfido Dacítico	83,9	101,4			35,8	0,11	A

Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos



## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

	<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas R-0312</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
Cliente / Proyecto: CODELCO División EL Teniente - Iván Rojas		
Operador: Patricio Orrego	Fecha: 4-2014	
Procesado por: Hains Schlegel	Revisado por: Alejandra Martínez	

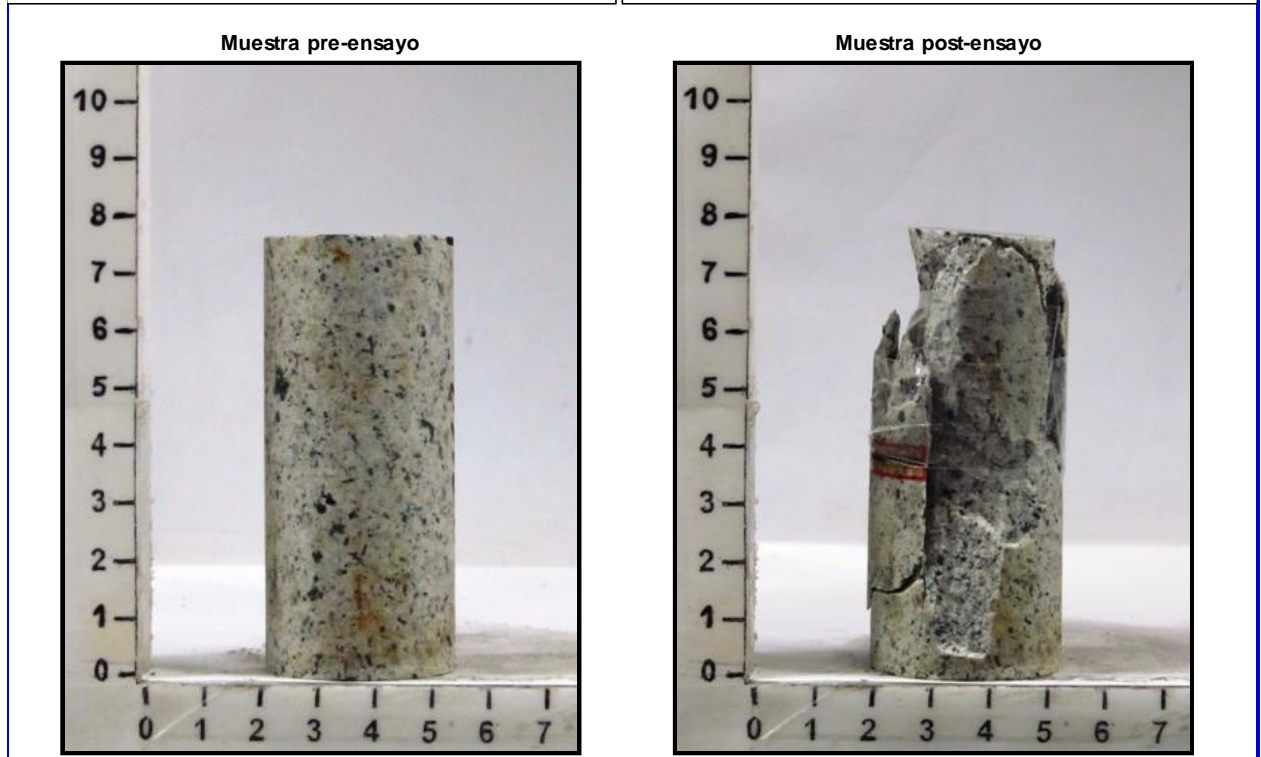
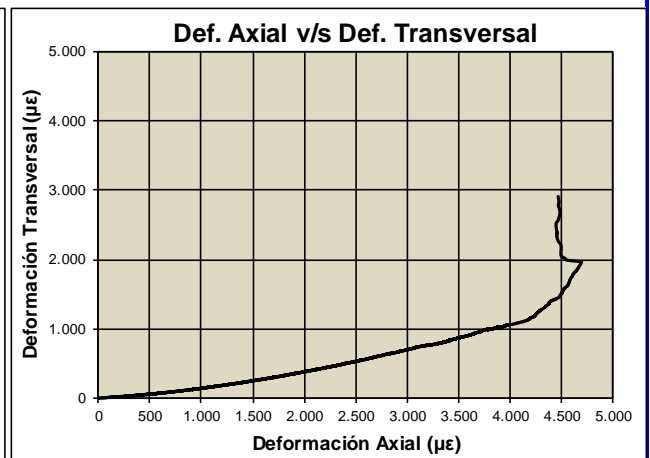
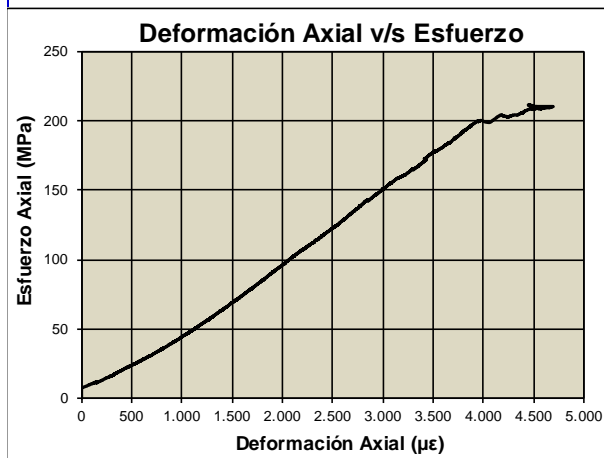
<b>Características de Muestra y Ensayo</b>	<b>Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM</b>		
<b>IDENTIFICACIÓN</b> DDH2164-PB-1188-2			
Litología Tonalita			
Diámetro 3,49 cm			
Longitud 7,68 cm			
Masa 194,94 g			
Peso unitario (geom) 2,65 t/m <sup>3</sup>			
Gradiente de carga 0,50 MPa/s			
Ruptura de probeta Matriz			
Condición de muestra Seco			

Parámetros de Resistencia	
Carga máxima	202,92 kN
Resistencia máxima	211,71 MPa
Resistencia normalizada 50mm	198,48 MPa


  

Constantes Elásticas			
	Secante	Tangente	Media Lineal
Módulo de Young axial (GPa)	46,98	51,19	51,68
Coefficiente de Poisson (-)	0,21	0,30	0,26

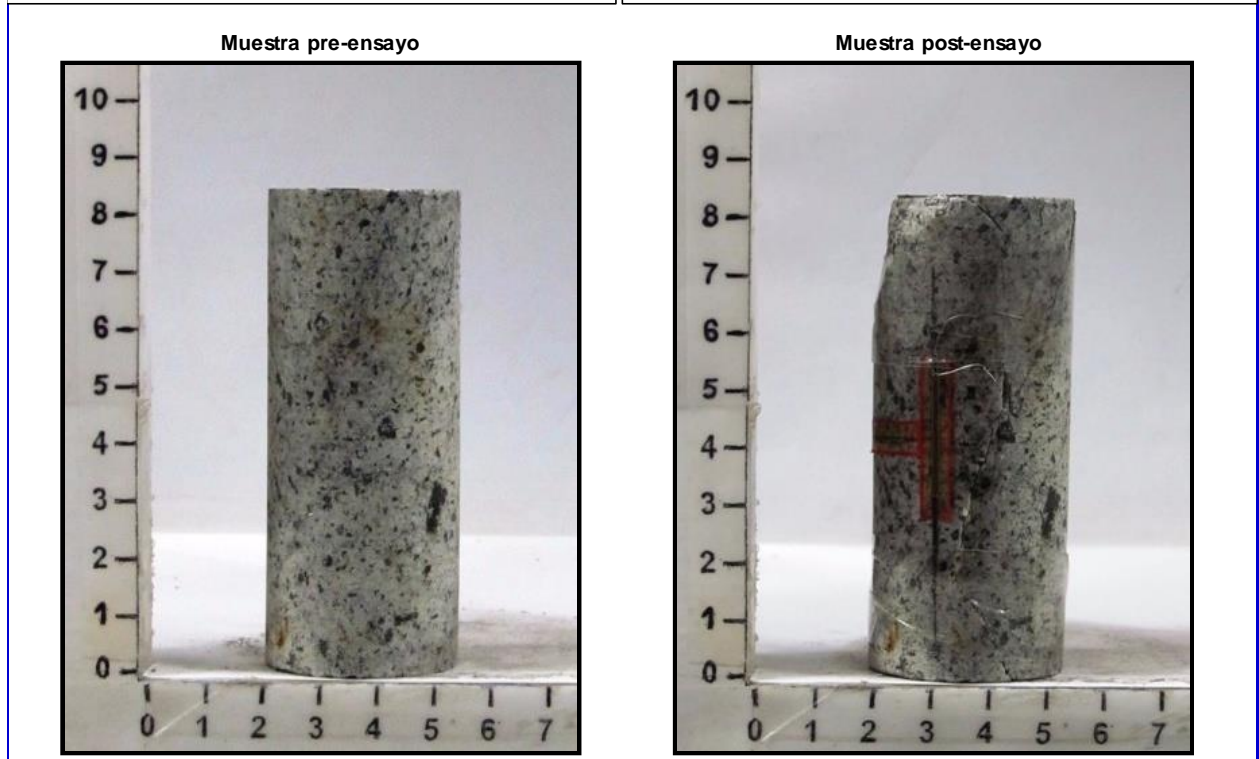
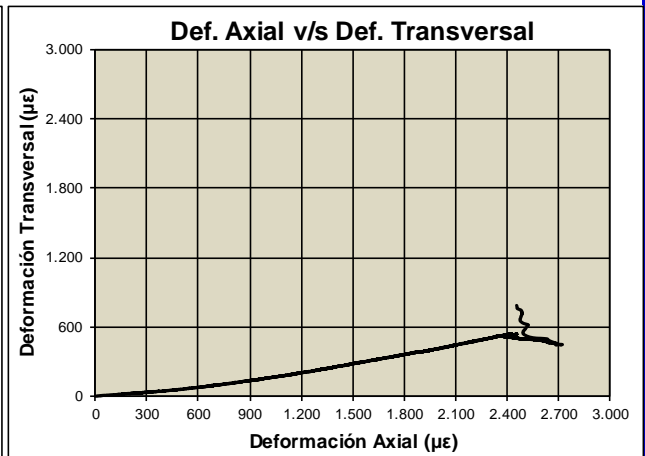
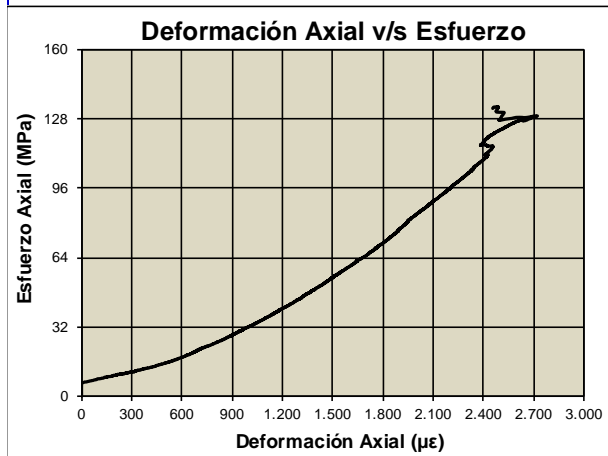




Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos


	<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas R-0312</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
	Cliente / Proyecto: CODELCO División EL Teniente - Iván Rojas	
Operador: Patricio Orrego	Fecha: 4-2014	
Procesado por: Hains Schlegel	Revisado por: Alejandra Martínez	

<b>Características de Muestra y Ensayo</b>		<b>Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM</b>	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>DDH2176-PB-858-2</b>	<b>Parámetros de Resistencia</b>	
Litología	Tonalita	Carga máxima	131,95 kN
Diámetro	3,54 cm	Resistencia máxima	133,71 MPa
Longitud	8,46 cm	Resistencia normalizada 50mm	125,68 MPa
Masa	222,38 g	<b>Constantes Elásticas</b>	
Peso unitario (geom)	2,66 t/m <sup>3</sup>	<b>Secante</b>	<b>Tangente</b>
Gradiente de carga	0,50 MPa/s	Módulo de Young axial (GPa)	37,54
Ruptura de probeta	Matriz	Coeficiente de Poisson (-)	0,21
Condición de muestra	Seco	Media Lineal	55,79
			54,40
			0,27

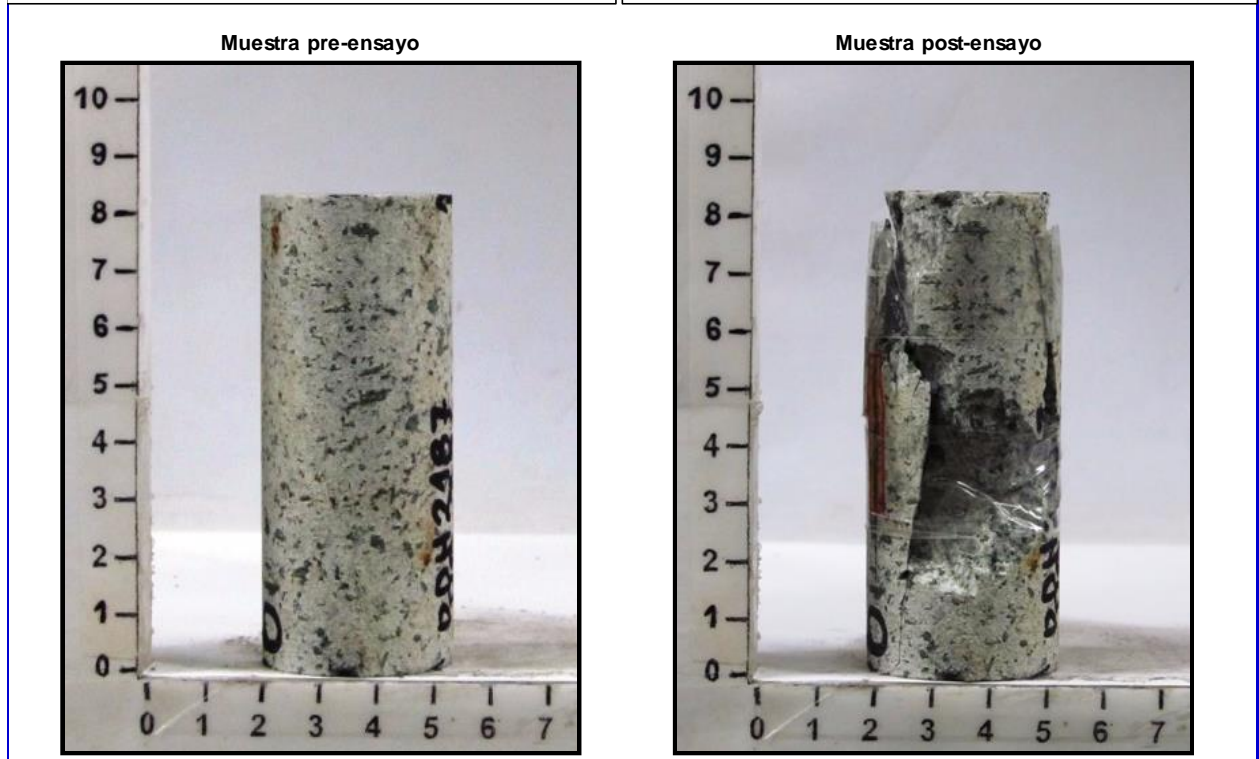
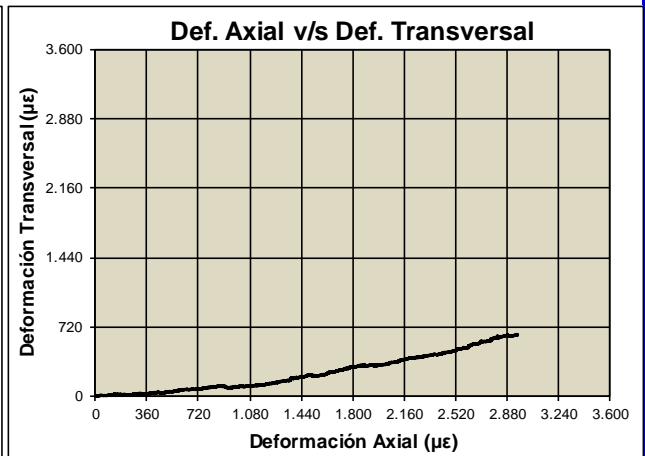
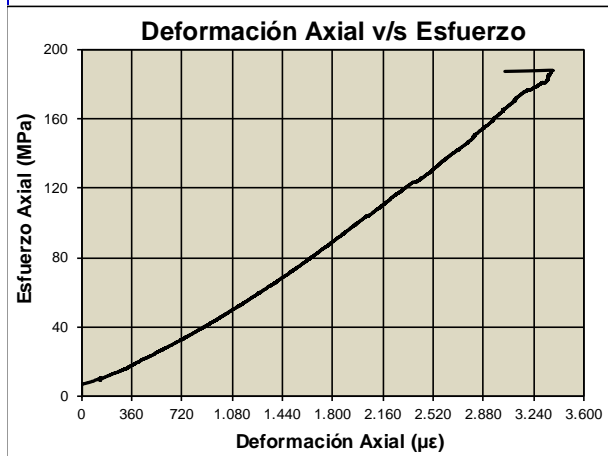





Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

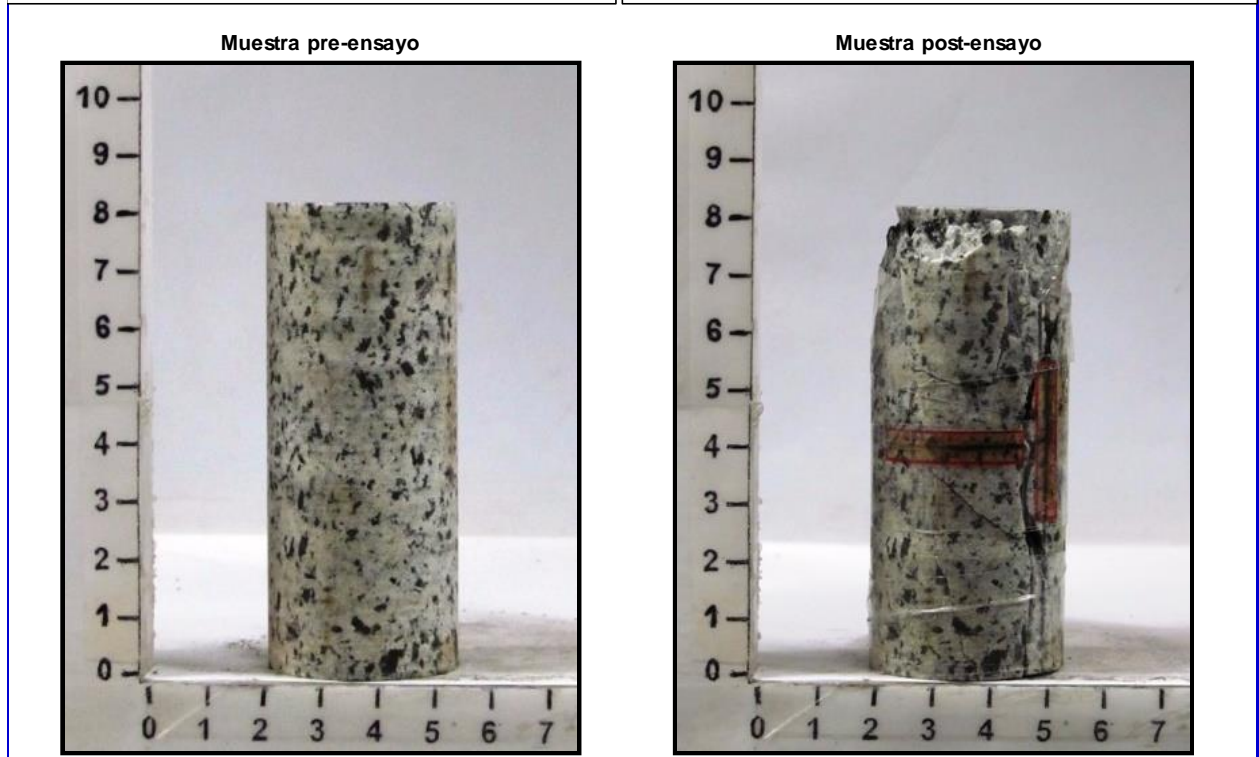
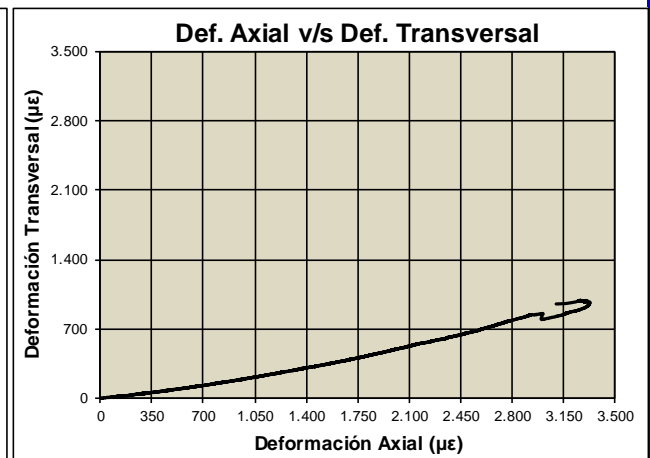
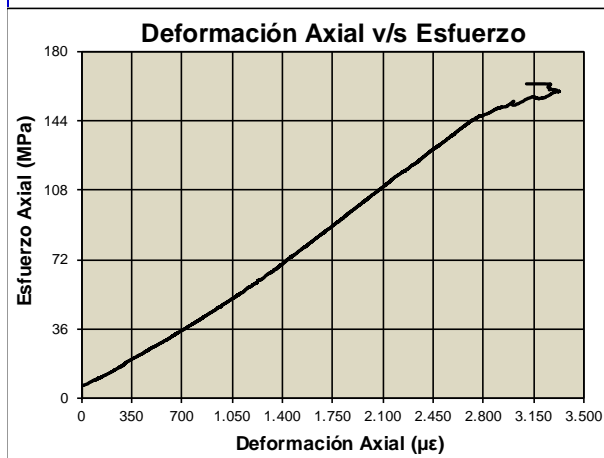
	<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas R-0312</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
	Cliente / Proyecto: CODELCO División EL Teniente - Iván Rojas	
Operador: Patricio Orrego	Fecha: 4-2014	
Procesado por: Hains Schlegel	Revisado por: Alejandra Martínez	

<b>Características de Muestra y Ensayo</b>		<b>Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM</b>	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>DDH2187-PB-396-2</b>	<b>Parámetros de Resistencia</b>	
Litología	Tonalita	Carga máxima	182,79 kN
Diámetro	3,52 cm	Resistencia máxima	188,15 MPa
Longitud	8,36 cm	Resistencia normalizada 50mm	176,61 MPa
Masa	215,35 g	<b>Constantes Elásticas</b>	
Peso unitario (geom)	2,65 t/m <sup>3</sup>	<b>Secante</b>	<b>Tangente</b>
Gradiente de carga	0,50 MPa/s	Módulo de Young axial (GPa)	48,30
Ruptura de probeta	Matriz	Coeficiente de Poisson (-)	0,17
Condición de muestra	Seco	Media Lineal	57,75
			0,26



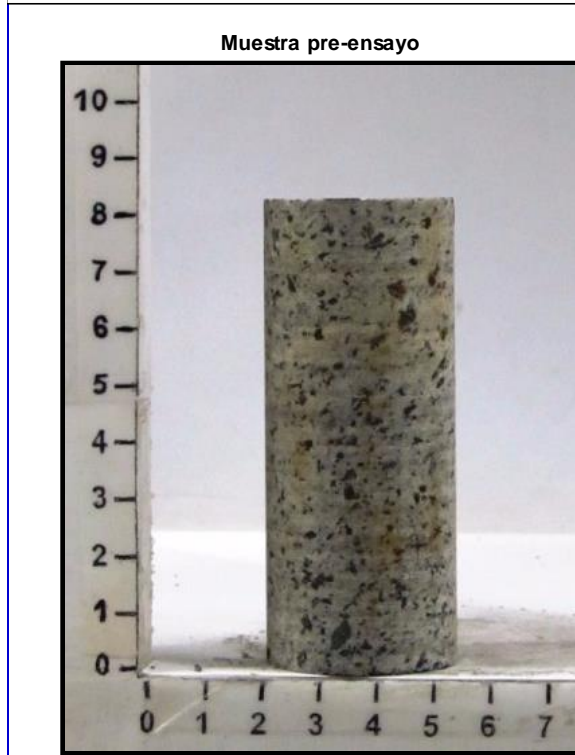
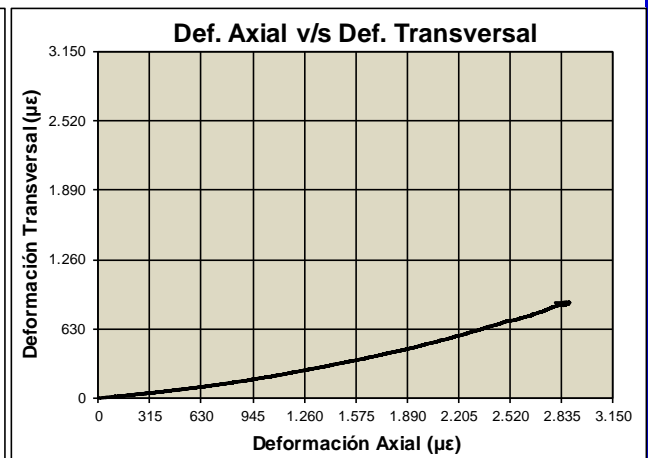
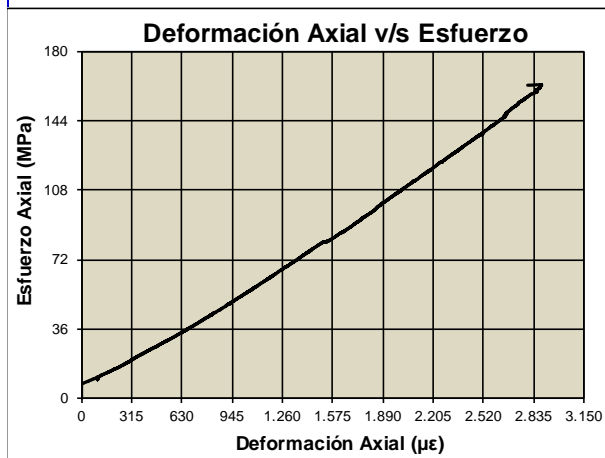
## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

	<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas R-0312</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>	
Cliente / Proyecto: CODELCO División EL Teniente - Iván Rojas			
Operador: Patricio Orrego	Fecha: 4-2014		
Procesado por: Hains Schlegel	Revisado por: Alejandra Martínez		
<b>Características de Muestra y Ensayo</b>		<b>Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM</b>	
<b>IDENTIFICACIÓN</b> DDH2188-PB-863-2			
Litología: Tonalita			
Diámetro	3,51 cm		
Longitud	8,22 cm		
Masa	212,15 g		
Peso unitario (geom)	2,67 t/m <sup>3</sup>		
Gradiente de carga	0,50 MPa/s		
Ruptura de probeta	Matriz		
Condición de muestra	Seco		
		<b>Parámetros de Resistencia</b>	
Carga máxima		158,21 kN	
Resistencia máxima		163,31 MPa	
Resistencia normalizada 50mm		153,25 MPa	
		<b>Constantes Elásticas</b>	
	<b>Secante</b>	<b>Tangente</b>	<b>Media Lineal</b>
Módulo de Young axial (GPa)	47,27	58,12	53,18
Coefficiente de Poisson (-)	0,23	0,28	0,29



Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

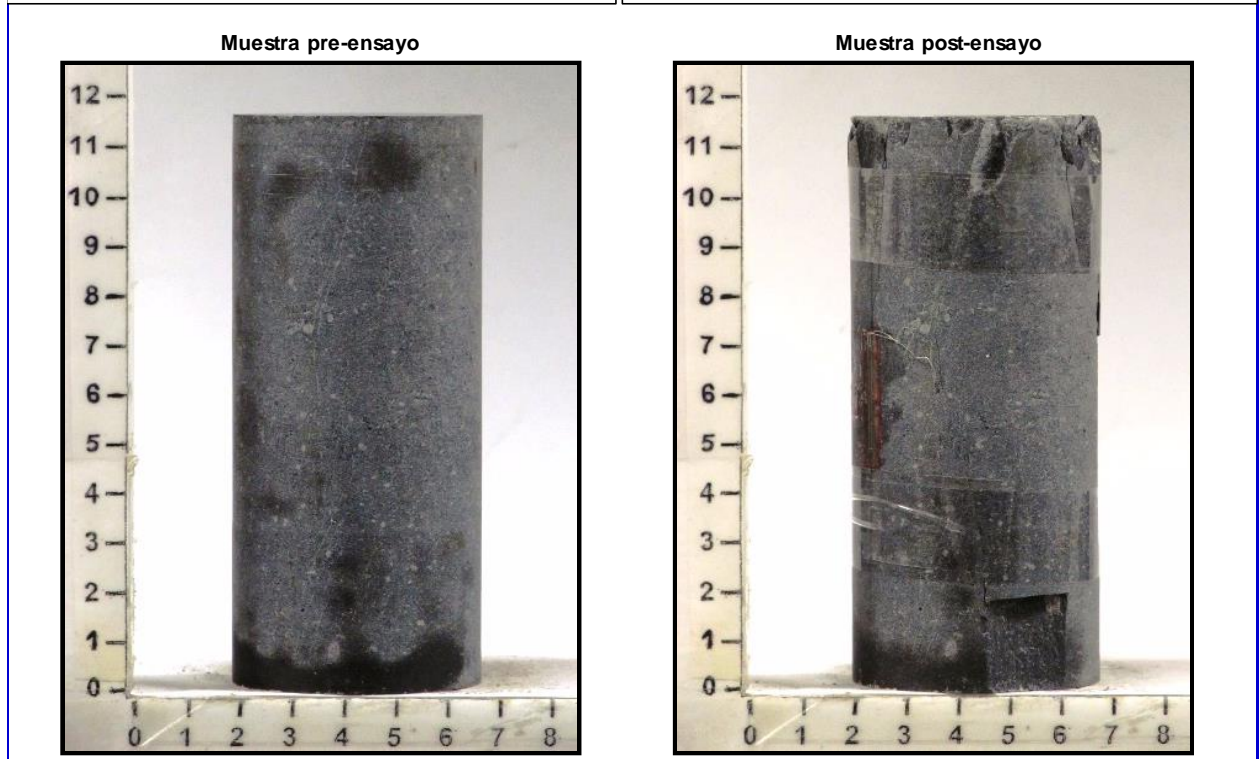
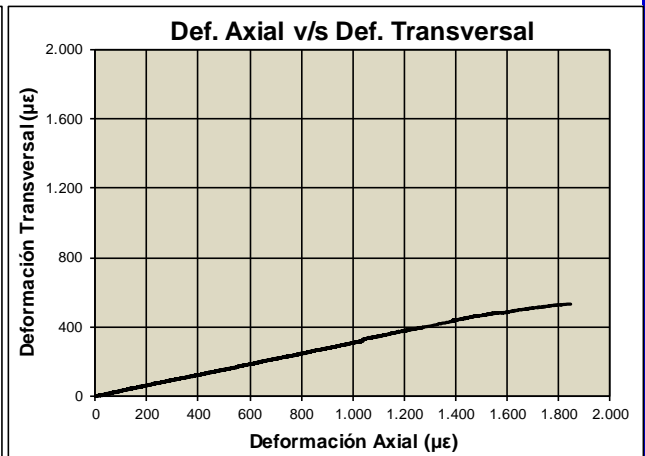
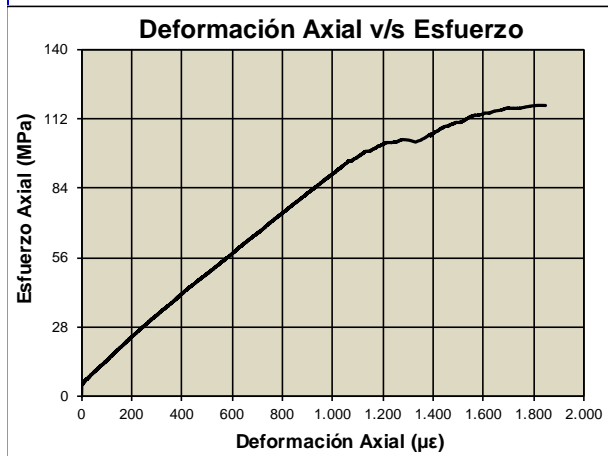
<b>SGS</b>		<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas R-0312</b>		<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>	
Cliente / Proyecto: CODELCO División EL Teniente - Iván Rojas					
Operador: Patricio Orrego		Fecha: 4-2014			
Procesado por: Hains Schlegel		Revisado por: Alejandra Martínez			
<b>Características de Muestra y Ensayo</b>		<b>Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM</b>			
<b>IDENTIFICACIÓN</b> DDH2197-PB-792-2		<b>Parámetros de Resistencia</b>			
Litología	Tonalita	Carga máxima	156,46	kN	
Diámetro	3,50	cm	Resistencia máxima	162,83	
Longitud	8,32	cm	Resistencia normalizada 50mm	152,69	
Masa	211,89	g			
Peso unitario (geom)	2,65	t/m <sup>3</sup>			
Gradiente de carga	0,50	MPa/s			
Ruptura de probeta	Matriz				
Condición de muestra	Seco				
		<b>Constantes Elásticas</b>	<b>Secante</b>	<b>Tangente</b>	<b>Media Lineal</b>
		Módulo de Young axial (GPa)	49,81	38,61	53,49
		Coefficiente de Poisson (-)	0,22	0,29	0,29



Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

	<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas</b> <b>R-0312</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
	Cliente / Proyecto: CODELCO Chile División El Teniente - Iván Rojas	
Operador: Patricio Orrego	Fecha: 4-2014	
Procesado por: Alejandra Martínez	Revisado por: Hains Schlegel	

<b>Características de Muestra y Ensayo</b>		<b>Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM</b>	
<b>IDENTIFICACIÓN IR6-P1</b>		<b>Parámetros de Resistencia</b>	
Litología: Pórfido Basáltico		Carga máxima: 232,56 kN	
Diámetro: 5,02 cm		Resistencia máxima: 117,51 MPa	
Longitud: 11,68 cm		Resistencia normalizada 50mm: 117,60 MPa	
Masa: 640,61 g			
Peso unitario (geom): 2,77 t/m <sup>3</sup>			
Gradiente de carga: 0,50 MPa/s			
Ruptura de probeta: Matriz			
Condición de muestra: Seco			
		<b>Constantes Elásticas</b>	
		<b>Secante</b>	<b>Tangente</b>
		Módulo de Young axial (GPa): 87,62	83,65
		Coeficiente de Poisson (-): 0,31	0,31
		Media Lineal: 83,73	0,31

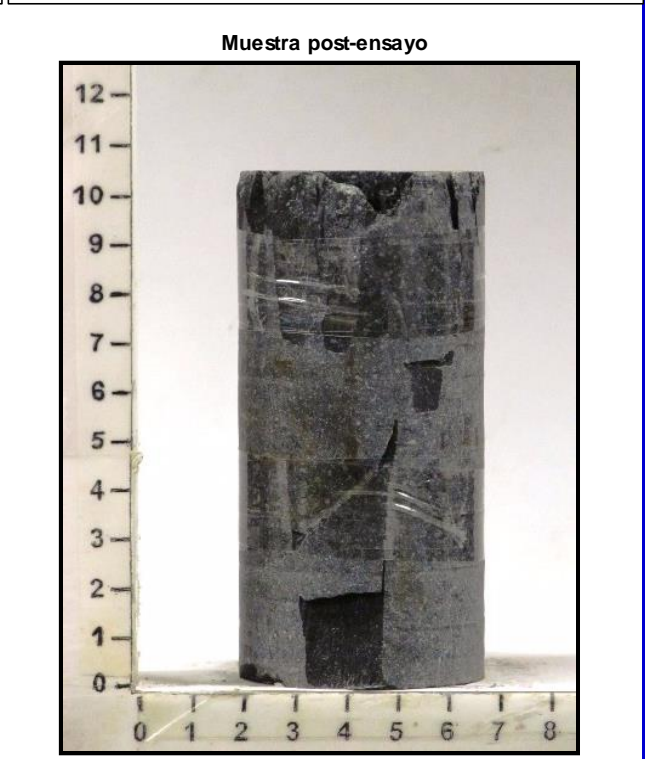
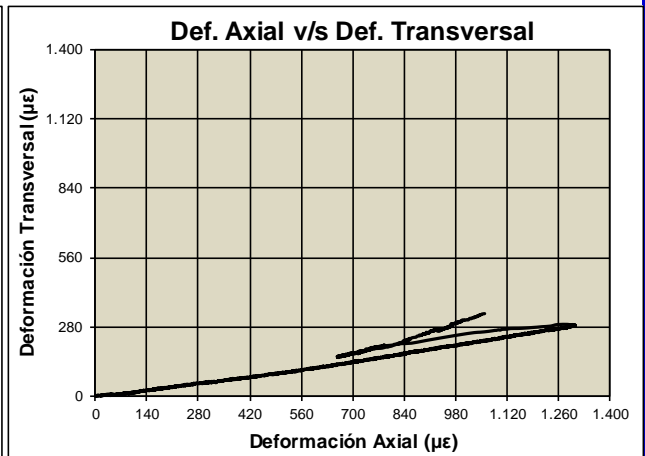
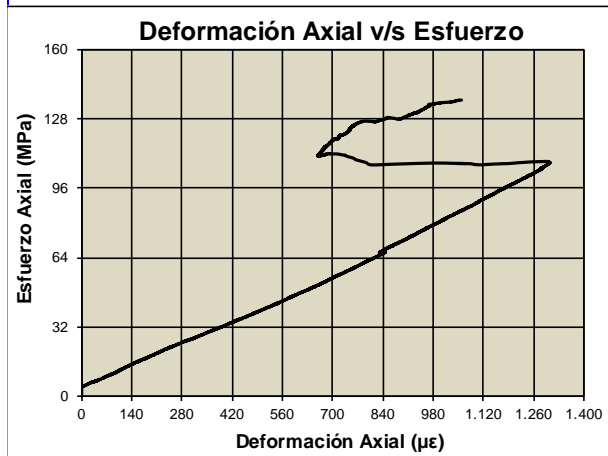





Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

	<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas</b> <b>R-0312</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
	Cliente / Proyecto: CODELCO Chile División El Teniente - Iván Rojas	
Operador: Patricio Orrego	Fecha: 4-2014	
Procesado por: Alejandra Martínez	Revisado por: Hains Schlegel	

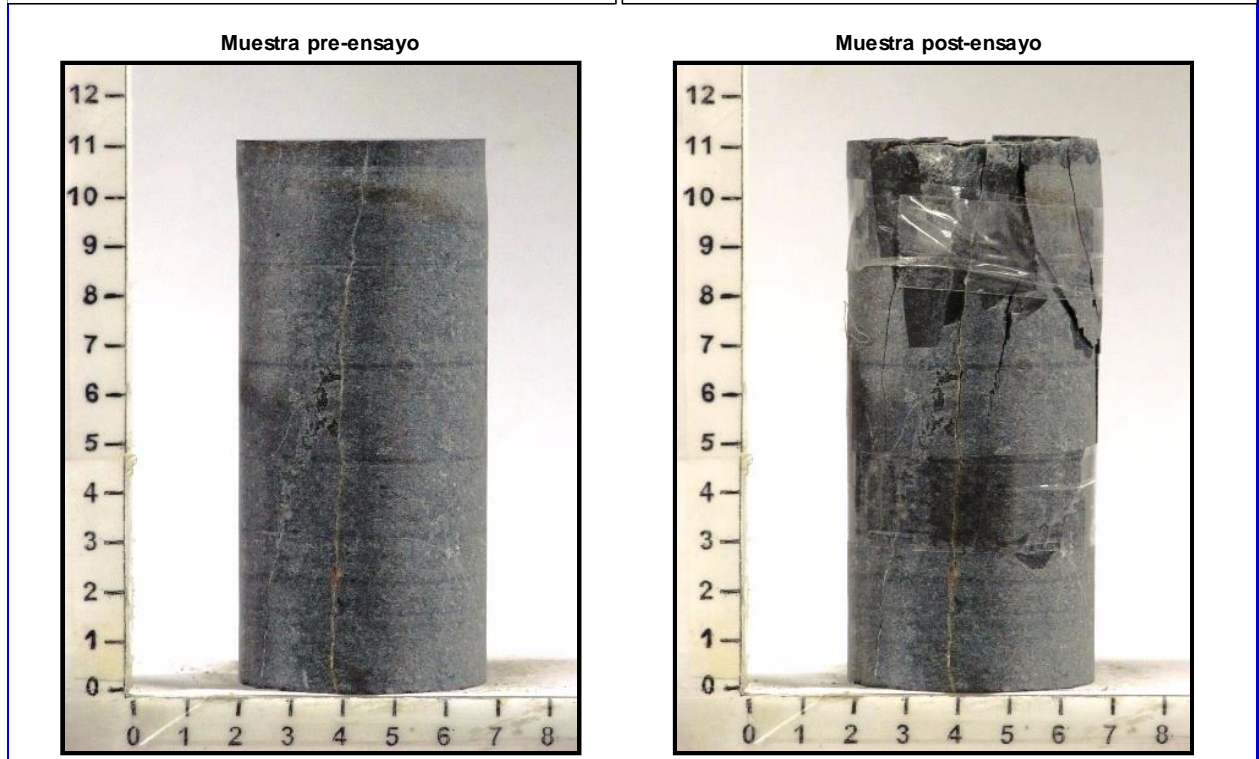
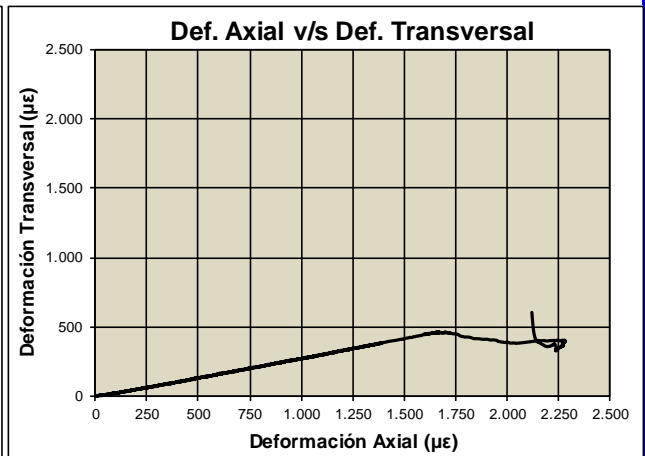
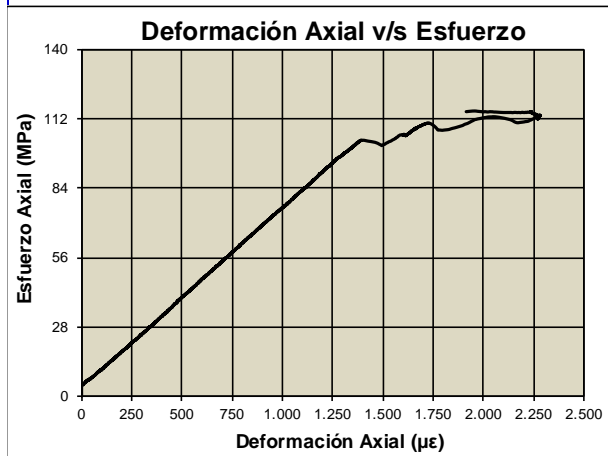
<b>Características de Muestra y Ensayo</b>		<b>Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM</b>	
<b>IDENTIFICACIÓN IR7-P1</b>		<b>Parámetros de Resistencia</b>	
Litología: Pórfido Basáltico		Carga máxima: 270,36 kN	
Diámetro: 5,02 cm		Resistencia máxima: 136,74 MPa	
Longitud: 10,51 cm		Resistencia normalizada 50mm: 136,83 MPa	
Masa: 575,15 g			
Peso unitario (geom): 2,77 t/m <sup>3</sup>			
Gradiente de carga: 0,50 MPa/s			
Ruptura de probeta: Matriz			
Condición de muestra: Seco			
		<b>Constantes Elásticas</b>	<b>Secante    Tangente    Media Lineal</b>
		Módulo de Young axial (GPa): 72,39	98,88    71,35
		Coeficiente de Poisson (-): 0,21	0,25    0,22




Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

	<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas</b> <b>R-0312</b>		<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>	
	Cliente / Proyecto: CODELCO Chile División El Teniente - Iván Rojas			
	Operador: Patricio Orrego	Fecha: 4-2014		
Procesado por: Alejandra Martínez		Revisado por: Hains Schlegel		

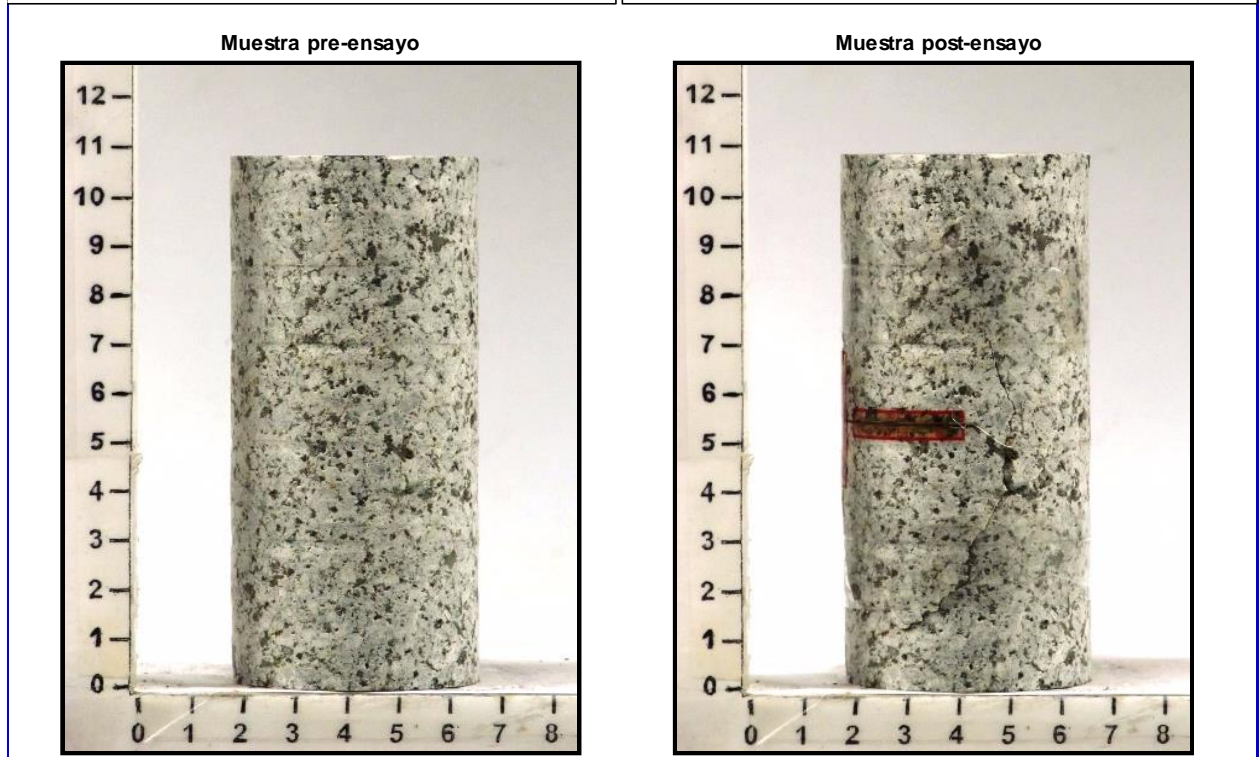
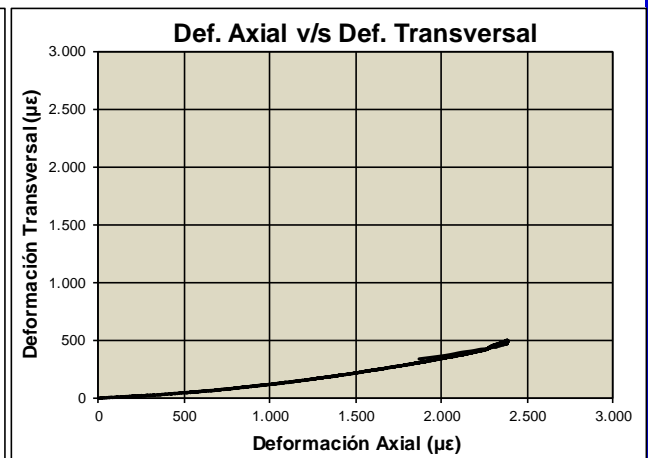
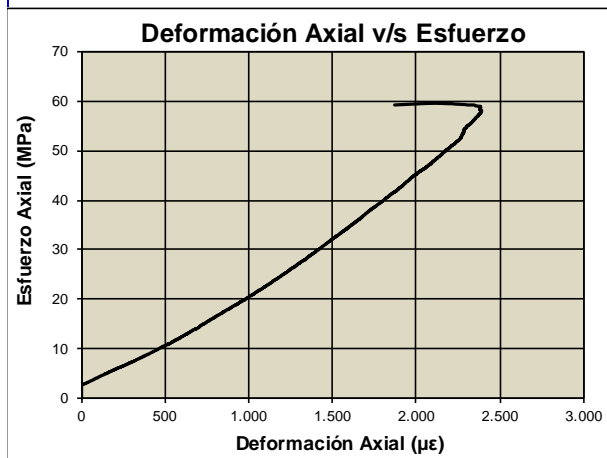
<b>Características de Muestra y Ensayo</b>		<b>Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM</b>	
<b>IDENTIFICACIÓN IR8-P1</b>		<b>Parámetros de Resistencia</b>	
Litología: Pórfido Basáltico		Carga máxima: 227,61 kN	
Diámetro: 5,02 cm		Resistencia máxima: 115,23 MPa	
Longitud: 11,18 cm		Resistencia normalizada 50mm: 115,29 MPa	
Masa: 608,67 g			
Peso unitario (geom): 2,76 t/m <sup>3</sup>			
Gradiente de carga: 0,50 MPa/s			
Ruptura de probeta: Matriz y/o estructura			
Condición de muestra: Seco			
		<b>Constantes Elásticas</b>	
		<b>Secante</b>	<b>Tangente</b>
		Módulo de Young axial (GPa): 72,57	73,10
		Coeficiente de Poisson (-): 0,27	0,28
			<b>Media Lineal</b>
			72,75
			0,28



Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

	<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas</b> <b>R-0312</b>		<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>	
	Cliente / Proyecto: CODELCO Chile División El Teniente - Iván Rojas			
	Operador: Patricio Orrego	Fecha: 4-2014		
Procesado por: Alejandra Martínez	Revisado por: Hains Schlegel			

<b>Características de Muestra y Ensayo</b>		<b>Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM</b>	
<b>IDENTIFICACIÓN IR2-P3</b>		<b>Parámetros de Resistencia</b>	
Litología: Pórfido Diorítico		Carga máxima: 118,67 kN	
Diámetro: 5,04 cm		Resistencia máxima: 59,58 MPa	
Longitud: 10,88 cm		Resistencia normalizada 50mm: 59,66 MPa	
Masa: 550,81 g			
Peso unitario (geom): 2,54 t/m <sup>3</sup>			
Gradiente de carga: 0,50 MPa/s			
Ruptura de probeta: Matriz			
Condición de muestra: Seco			
		<b>Constantes Elásticas</b>	
		Secante: 19,47	Tangente: 25,06
		Media Lineal: 24,13	
		Coeficiente de Poisson (-): 0,14	Coeficiente de Poisson (-): 0,22
		Coeficiente de Poisson (-): 0,21	

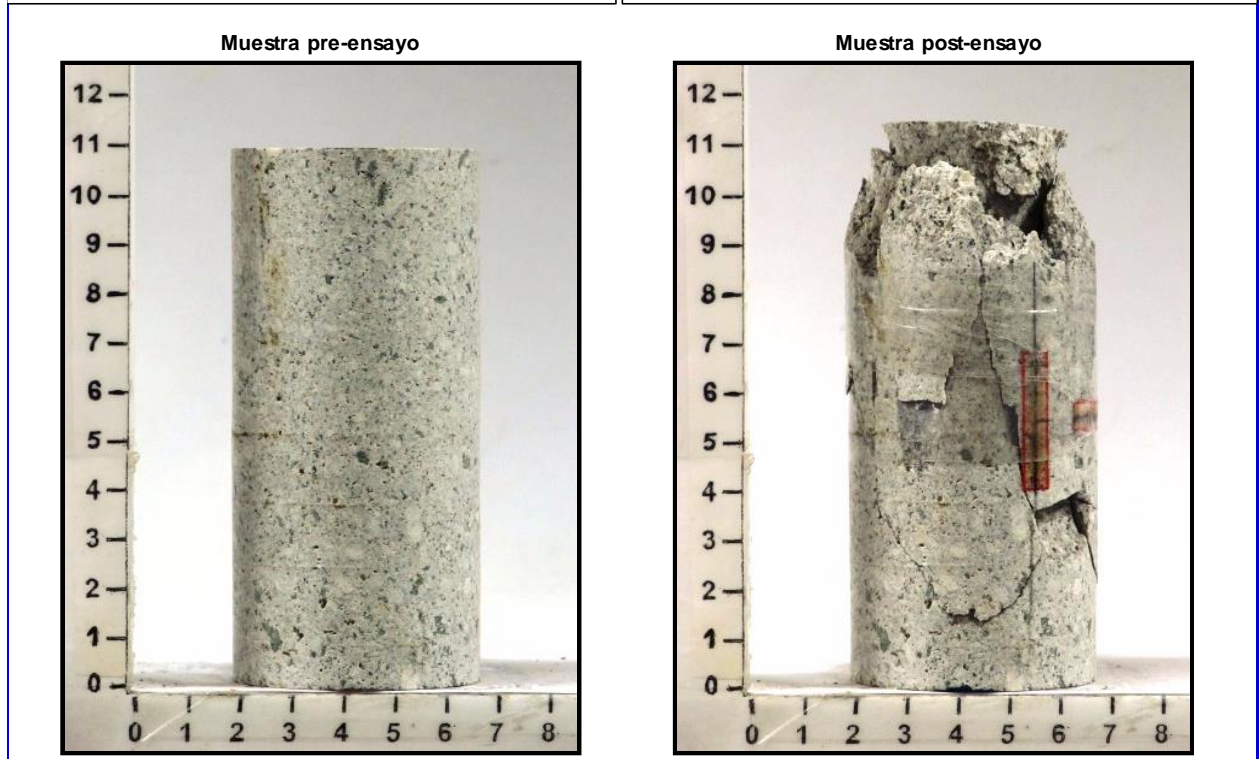
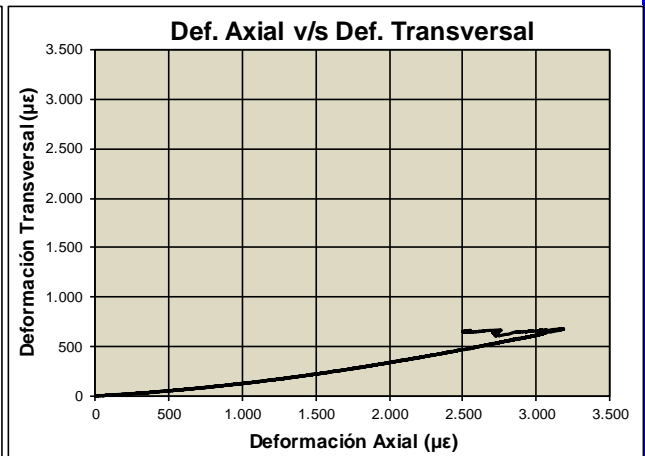
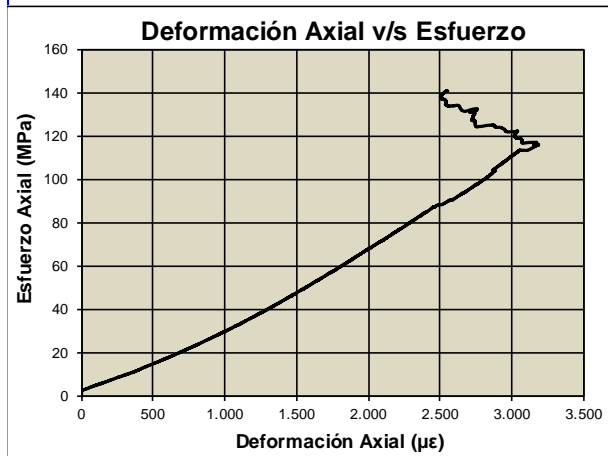




Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos


	<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas</b> <b>R-0312</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
	Cliente / Proyecto: CODELCO Chile División El Teniente - Iván Rojas	
Operador: Patricio Orrego Procesado por: Alejandra Martínez	Fecha: 4-2014 Revisado por: Hains Schlegel	

<b>Características de Muestra y Ensayo</b>		<b>Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM</b>	
<b>IDENTIFICACIÓN IR3-P3</b>		<b>Parámetros de Resistencia</b>	
Litología: Pórfido Diorítico		Carga máxima: 279,49 kN	
Diámetro: 5,02 cm		Resistencia máxima: 141,10 MPa	
Longitud: 11,01 cm		Resistencia normalizada 50mm: 141,21 MPa	
Masa: 545,68 g			
Peso unitario (geom): 2,50 t/m <sup>3</sup>			
Gradiente de carga: 0,50 MPa/s			
Ruptura de probeta: Matriz			
Condición de muestra: Seco			
		<b>Constantes Elásticas</b>	<b>Secante    Tangente    Media Lineal</b>
		Módulo de Young axial (GPa): 33,53	40,51    37,15
		Coeficiente de Poisson (-): 0,18	0,26    0,21

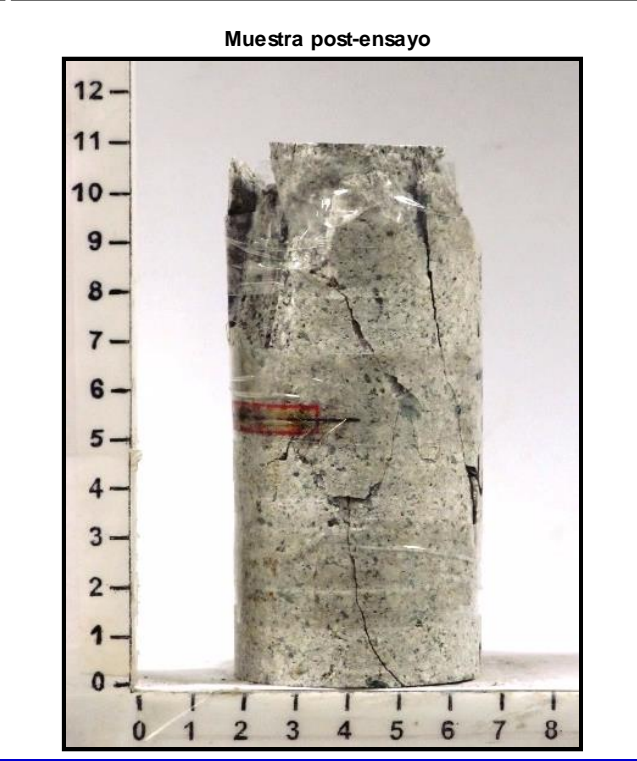
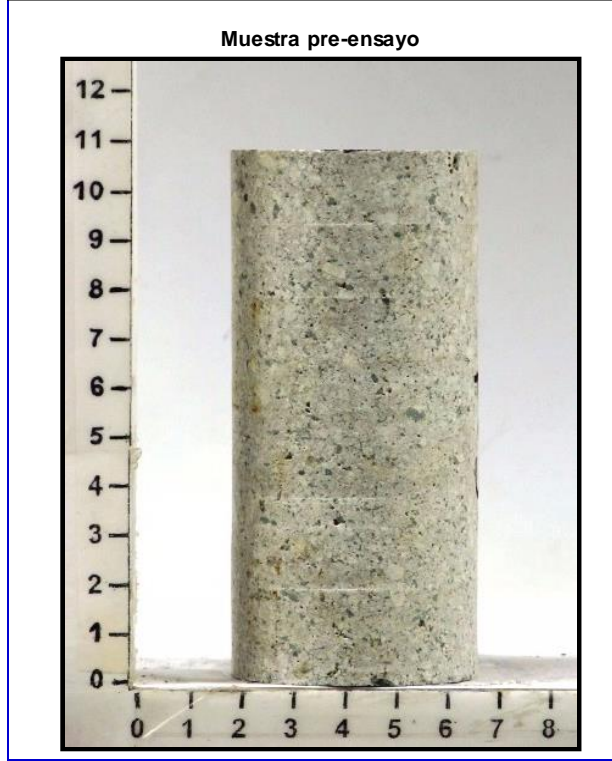
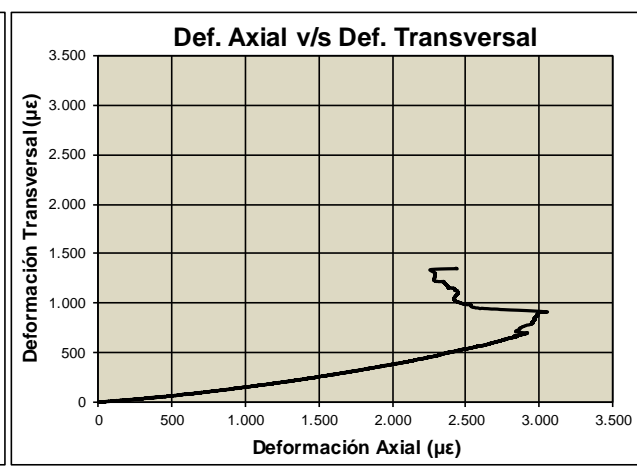
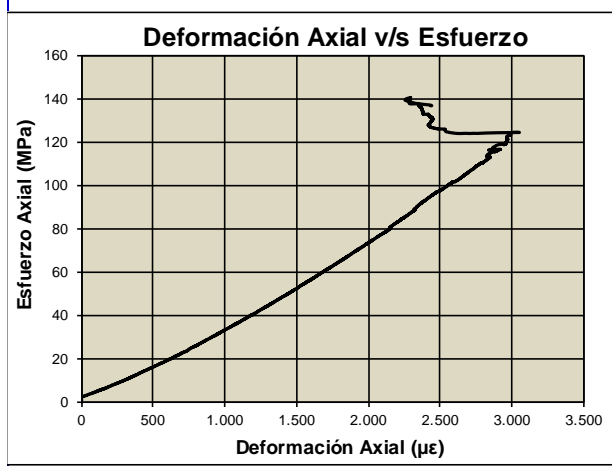





## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

	<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas</b> <b>R-0312</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
Cliente / Proyecto: CODELCO Chile División El Teniente - Iván Rojas		
Operador: Patricio Orrego	Fecha: 4-2014	
Procesado por: Alejandra Martínez	Revisado por: Hains Schlegel	

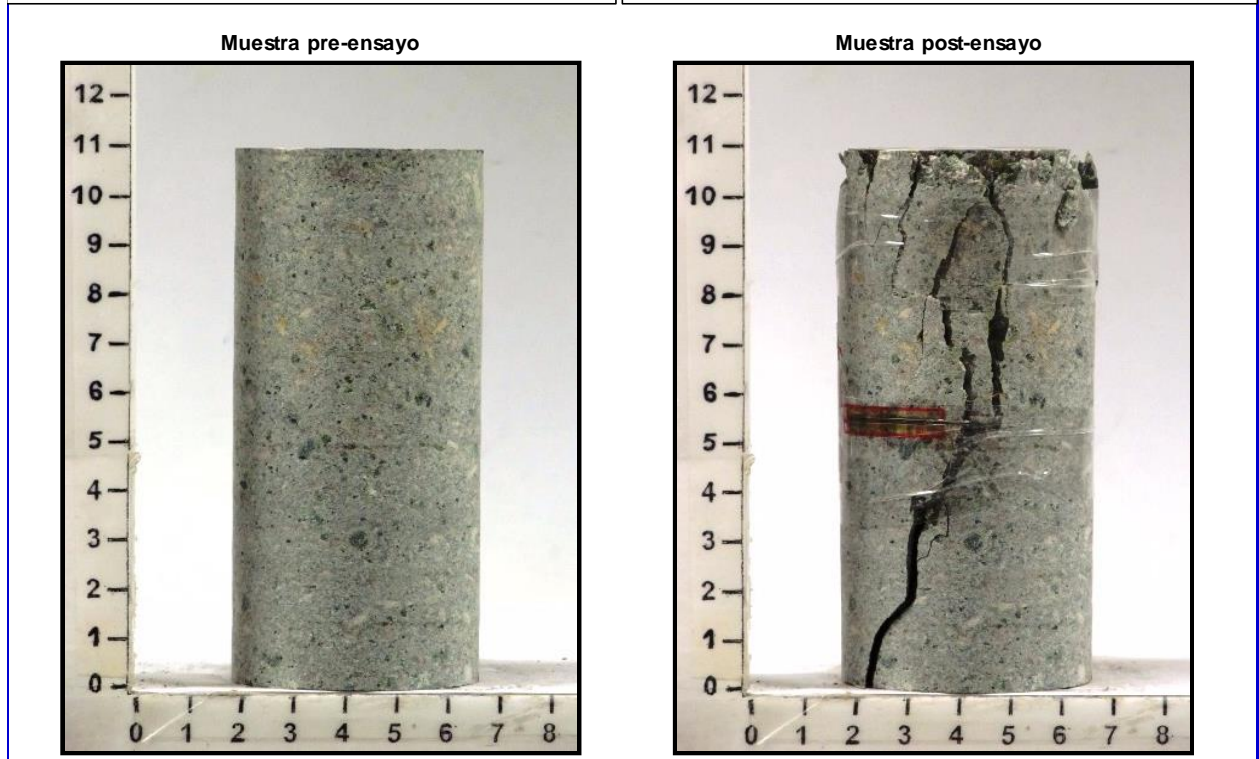
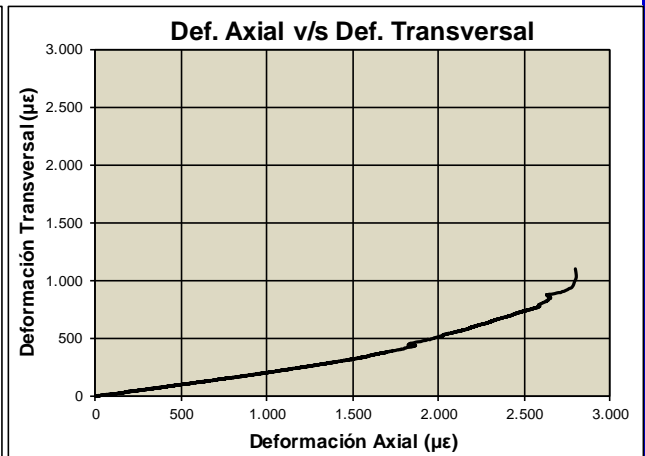
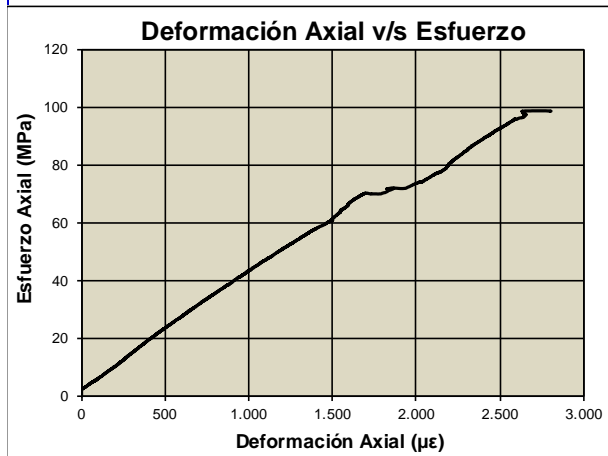
<b>Características de Muestra y Ensayo</b>	<b>Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM</b>											
<b>IDENTIFICACIÓN</b> IR4-P3 Litología Pórfido Diorítico	<b>Parámetros de Resistencia</b>											
Diámetro 5,02 cm Longitud 10,89 cm Masa 535,60 g Peso unitario (geom) 2,49 t/m <sup>3</sup> Gradiente de carga 0,50 MPa/s Ruptura de probeta Matriz Condición de muestra Seco	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Carga máxima</td> <td>278,19</td> <td>kN</td> </tr> <tr> <td>Resistencia máxima</td> <td>140,59</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>Resistencia normalizada 50mm</td> <td>140,69</td> <td>MPa</td> </tr> </table>			Carga máxima	278,19	kN	Resistencia máxima	140,59	MPa	Resistencia normalizada 50mm	140,69	MPa
Carga máxima	278,19	kN										
Resistencia máxima	140,59	MPa										
Resistencia normalizada 50mm	140,69	MPa										
	<b>Constantes Elásticas</b>	<b>Secante</b>	<b>Tangente</b>	<b>Media Lineal</b>								
	Módulo de Young axial (GPa)	36,07	42,89	41,55								
	Coefficiente de Poisson (-)	0,19	0,27	0,25								




Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

	<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas</b> <b>R-0312</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
	Cliente / Proyecto: CODELCO Chile División El Teniente - Iván Rojas	
	Operador: Patricio Orrego      Fecha: 4-2014 Procesado por: Alejandra Martínez      Revisado por: Hains Schlegel	

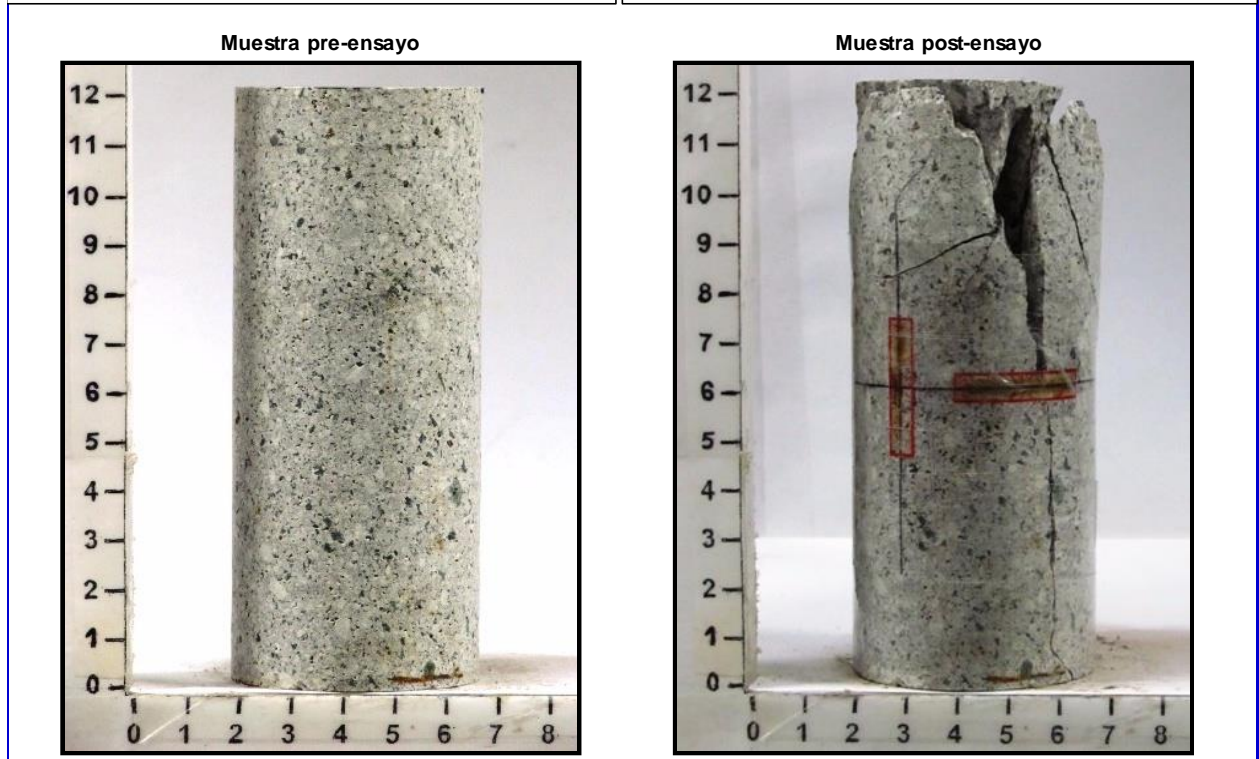
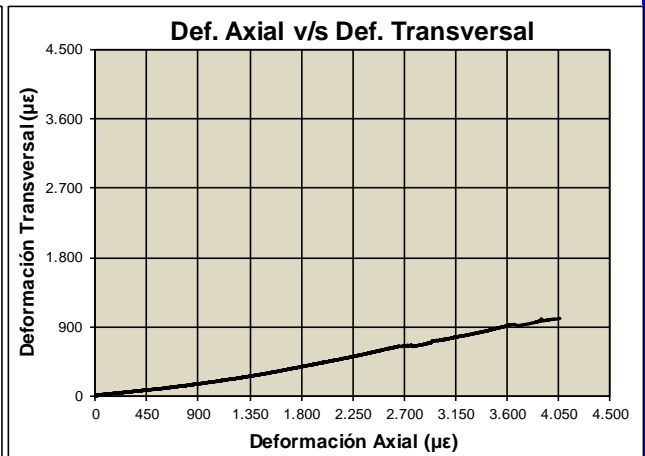
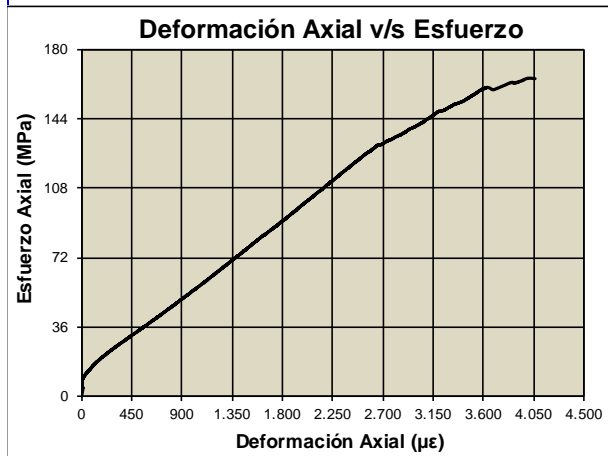
<b>Características de Muestra y Ensayo</b>		<b>Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM</b>	
<b>IDENTIFICACIÓN IR5-P3</b>		<b>Parámetros de Resistencia</b>	
Litología: Pórfido Granodiorítico		Carga máxima: 195,77 kN	
Diámetro: 5,02 cm		Resistencia máxima: 98,85 MPa	
Longitud: 11,01 cm		Resistencia normalizada 50mm: 98,92 MPa	
Masa: 570,64 g			
Peso unitario (geom): 2,62 t/m <sup>3</sup>			
Gradiente de carga: 0,50 MPa/s			
Ruptura de probeta: Matriz			
Condición de muestra: Seco			
		<b>Constantes Elásticas</b>	
		<b>Secante</b>	<b>Tangente</b>
		Módulo de Young axial (GPa): 41,08	37,20
		Coeficiente de Poisson (-): 0,21	0,23
			<b>Media Lineal</b>
			39,65




Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

	<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas R-0312</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
	Cliente / Proyecto: CODELCO División El Teniente - Iván Rojas	
Operador: Bárbara Pérez	Fecha: 4-2014	
Procesado por: Hains Schlegel	Revisado por: Alejandra Martínez	

<b>Características de Muestra y Ensayo</b>		<b>Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM</b>	
<b>IDENTIFICACIÓN IR3-P2</b>		<b>Parámetros de Resistencia</b>	
Litología: Pórfido Diorítico		Carga máxima: 326,88 kN	
Diámetro: 5,02 cm		Resistencia máxima: 165,22 MPa	
Longitud: 12,26 cm		Resistencia normalizada 50mm: 165,33 MPa	
Masa: 604,97 g			
Peso unitario (geom): 2,49 t/m <sup>3</sup>			
Gradiente de carga: 0,50 MPa/s			
Ruptura de probeta: Matriz			
Condición de muestra: Seco			
		<b>Constantes Elásticas</b>	<b>Secante    Tangente    Media Lineal</b>
		Módulo de Young axial (GPa): 44,74	44,51    44,73
		Coeficiente de Poisson (-): 0,19	0,28    0,24

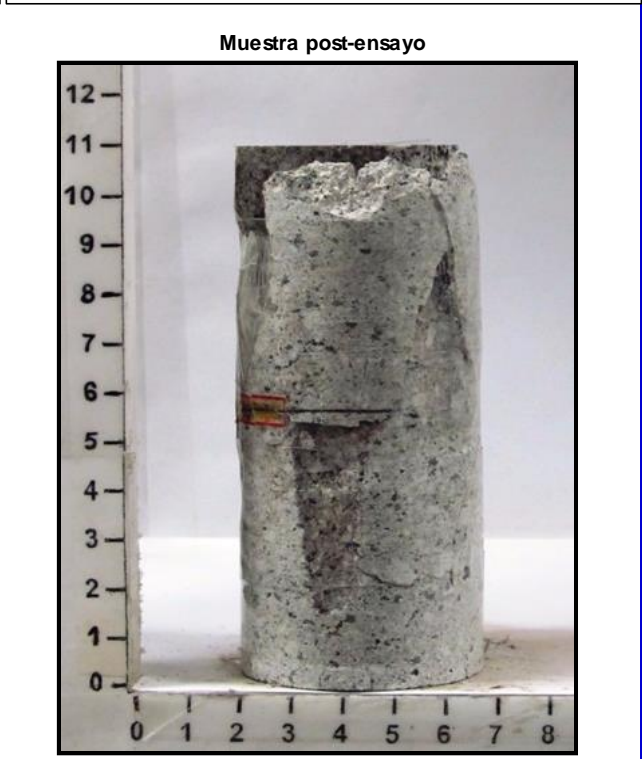
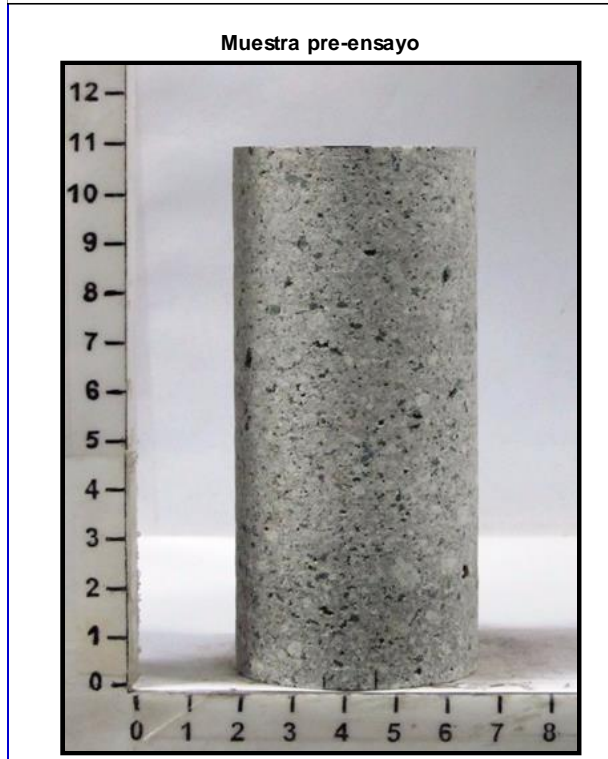
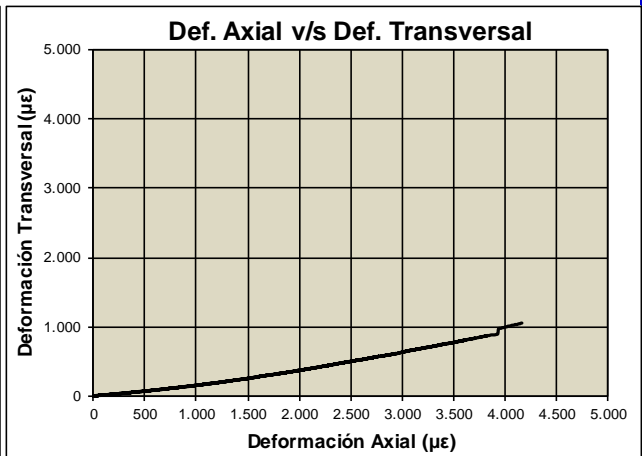
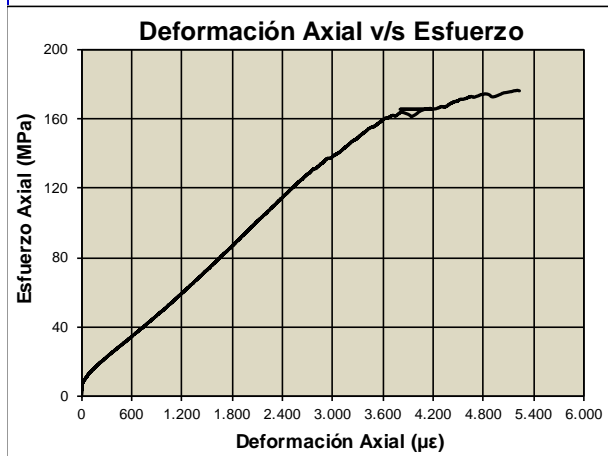


Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

	<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas R-0312</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
	Cliente / Proyecto: CODELCO División El Teniente - Iván Rojas	
Operador: Bárbara Pérez	Fecha: 4-2014	
Procesado por: Hains Schlegel	Revisado por: Alejandra Martínez	

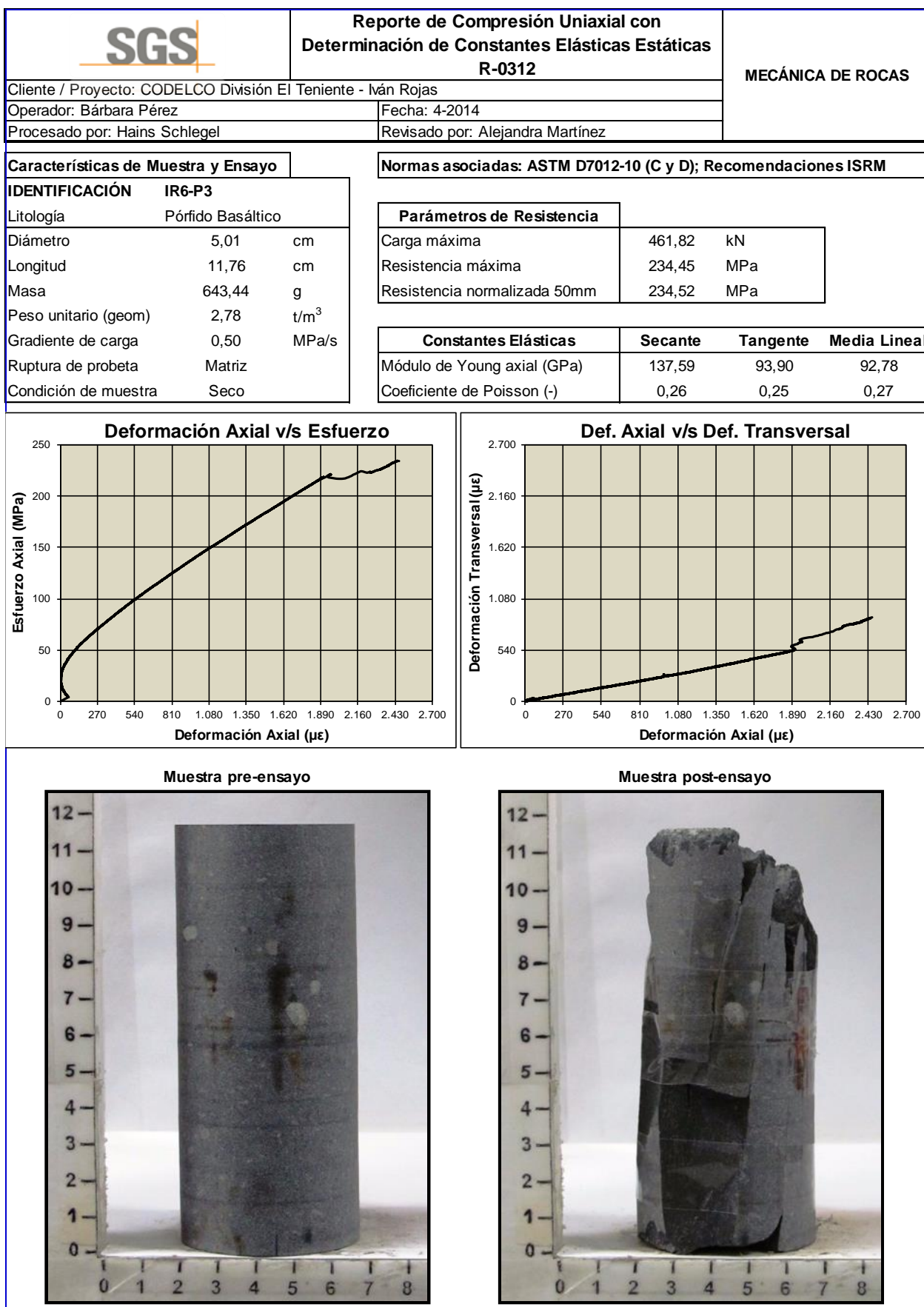
Características de Muestra y Ensayo	
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>IR4-P5</b>
Litología	Pórfido Diorítico
Diámetro	5,01 cm
Longitud	10,98 cm
Masa	539,62 g
Peso unitario (geom)	2,50 t/m <sup>3</sup>
Gradiente de carga	0,50 MPa/s
Ruptura de probeta	Matriz
Condición de muestra	Seco

Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM			
<b>Parámetros de Resistencia</b>			
Carga máxima	347,54 kN		
Resistencia máxima	176,55 MPa		
Resistencia normalizada 50mm	176,59 MPa		
Constantes Elásticas		Secante	Tangente
Módulo de Young axial (GPa)	43,02	46,63	44,17
Coefficiente de Poisson (-)	0,18	0,24	0,21






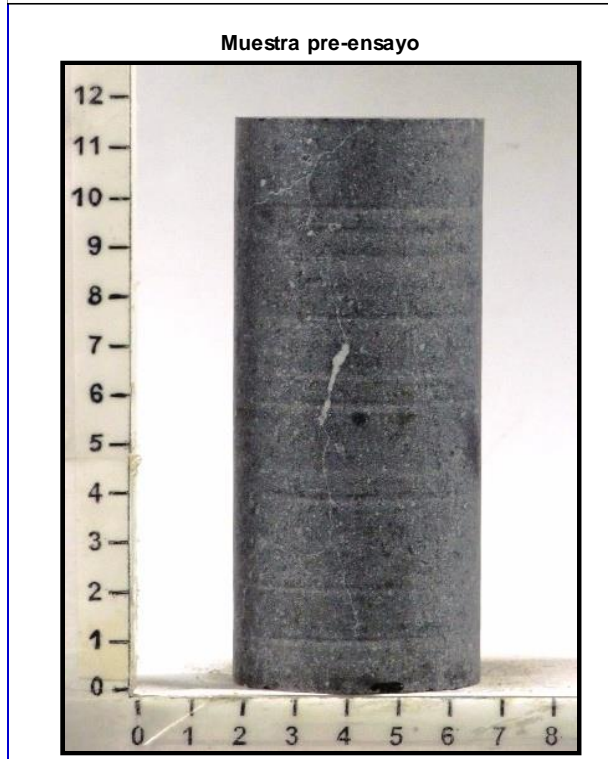
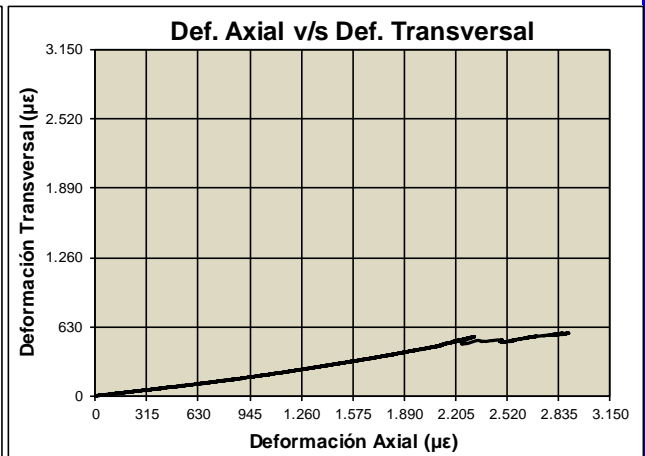
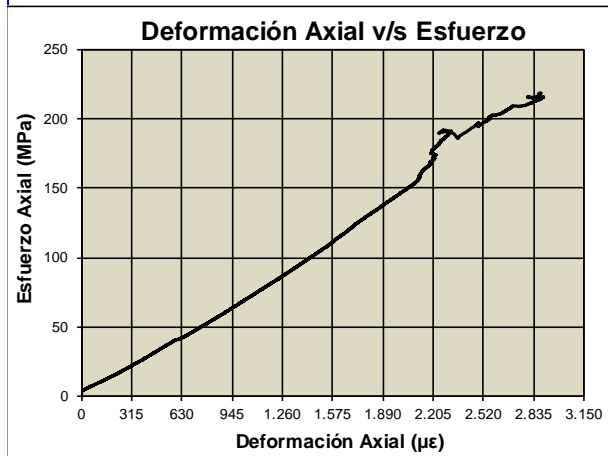
## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos



Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

	<b>Reporte de Compresión Uniaxial con Determinación de Constantes Elásticas Estáticas R-0312</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
	Cliente / Proyecto: CODELCO División El Teniente - Iván Rojas	
Operador: Bárbara Pérez Procesado por: Hains Schlegel	Fecha: 4-2014 Revisado por: Alejandra Martínez	

<b>Características de Muestra y Ensayo</b>		<b>Normas asociadas: ASTM D7012-10 (C y D); Recomendaciones ISRM</b>	
<b>IDENTIFICACIÓN IR7-P2</b>		<b>Parámetros de Resistencia</b>	
Litología: Pórfido Basáltico		Carga máxima: 432,20 kN	
Diámetro: 5,02 cm		Resistencia máxima: 218,74 MPa	
Longitud: 11,64 cm		Resistencia normalizada 50mm: 218,87 MPa	
Masa: 637,28 g			
Peso unitario (geom): 2,77 t/m <sup>3</sup>			
Gradiente de carga: 0,50 MPa/s			
Ruptura de probeta: Matriz			
Condición de muestra: Seco			
		<b>Constantes Elásticas</b>	
		Secante: 68,25	Tangente: 77,44
			Media Lineal: 73,72
		Coeficiente de Poisson (-): 0,20	Coeficiente de Poisson (-): 0,25
			Coeficiente de Poisson (-): 0,22



## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

<b>SGS</b>	<b>REPORTE COMPRESIÓN TRIAXIAL CON DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS ESTÁTICAS (SISTEMA STRAIN GAUGE)</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
Operador: Patricio Orrego		Procesado por: Alejandra Martinez
Cliente: CODELCO Chile División El Teniente		

IDENTIFICACION

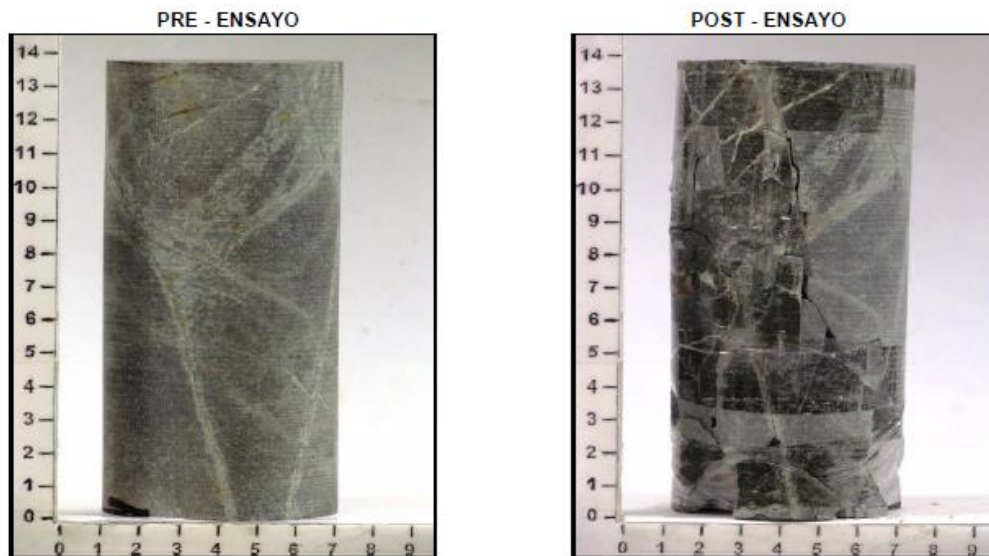
ene-2014

Proyecto	Pilar Norte II
Identificación Probeta	SG333 @ 53.00
Unidad Litológica	CMET FW

### CARACTERISTICAS

PROBETA	ENSAYO GEOTECNICO
Diámetro	6.317 cm
Largo	13.844 cm
Peso	1,218.26 gr
Densidad Geométrica	2.81 g/cm <sup>3</sup>
Condición	Seca
Tipo de Ruptura	Matriz
	<b>Normas Utilizadas</b>
	ASTM D-2938-95; D-3148-93
	<b>Carga de Ruptura</b>
	643.65 kN
	<b>Esfuerzo de Ruptura (<math>\sigma_1</math>)</b>
	205.32 MPa
	<b>Esfuerzo de Ruptura (50mm)</b>
	215.15 MPa
	<b>Confinamiento (<math>\sigma_3</math>)</b>
	26.02 MPa
	<b>Temperatura</b>
	20.00 °C
	<b>Módulo de Young Tangente</b>
	78.38 GPa
	<b>Razón de Poisson Tangente</b>
	0.28 (-)

### FOTOGRAFIA



## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

<b>SGS</b>	<b>REPORTE COMPRESIÓN TRIAXIAL CON DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS ESTÁTICAS (SISTEMA STRAIN GAUGE)</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
Operador: Patricio Orrego		Procesado por: Alejandra Martínez
Cliente: CODELCO Chile División El Teniente		

**IDENTIFICACION**

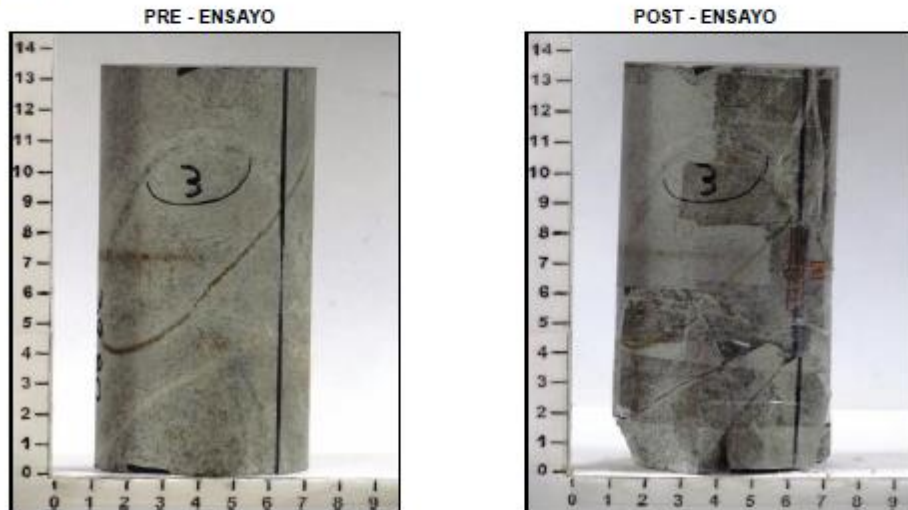
ene-2014

Proyecto	Pilar Norte II
Identificación Probeta	SG333 @ 39.80
Unidad Litológica	CMET FW

**CARACTERISTICAS**

PROBETA		ENSAYO GEOTECNICO	
Diámetro	6.334 cm	Normas Utilizadas	ASTM D-2938-95; D-3148-93
Largo	13.509 cm	Carga de Ruptura	715.64 kN
Peso	1,219.11 gr	Esfuerzo de Ruptura ( $\sigma_1$ )	227.04 MPa
Densidad Geométrica	2.86 g/cm <sup>3</sup>	Esfuerzo de Ruptura (50mm)	238.03 MPa
Condición	Seca	Confinamiento ( $\sigma_3$ )	26.01 MPa
Tipo de Ruptura	Matriz	Temperatura	20.00 °C
		Módulo de Young Tangente	68.25 GPa
		Razón de Poisson Tangente	0.35 (-)

**FOTOGRAFIA**





## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

<b>SGS</b>	<b>REPORTE COMPRESIÓN TRIAXIAL CON DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS ESTÁTICAS (SISTEMA STRAIN GAUGE)</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
Operador: Patricio Orrego		Procesado por: Alejandra Martinez
Cliente: CODELCO Chile División El Teniente		

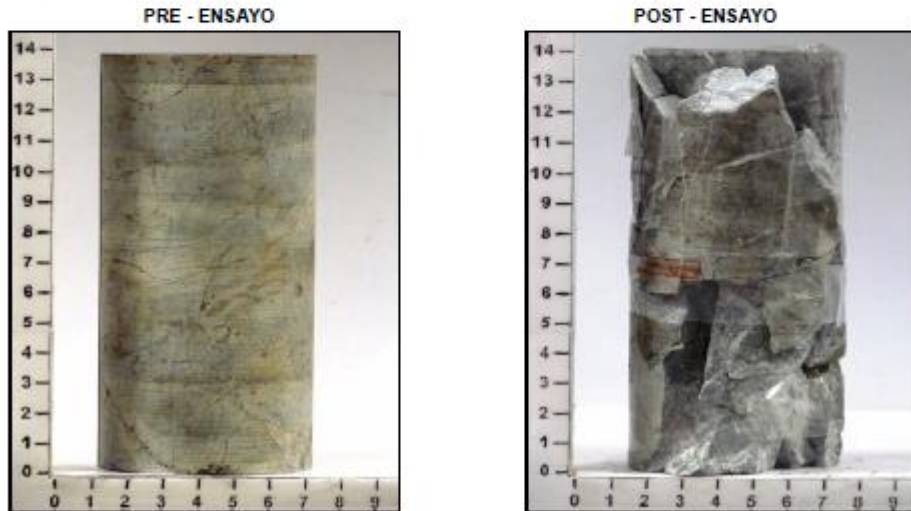
IDENTIFICACION ene-2014

Proyecto	Pilar Norte II
Identificación Probeta	SG334 @ 37.10
Unidad Litológica	CMET FW

### CARACTERISTICAS

PROBETA		ENSAYO GEOTECNICO	
Diámetro	6.335 cm	Normas Utilizadas	ASTM D-2938-95; D-3148-93
Largo	13.923 cm	Carga de Ruptura	707.71 kN
Peso	1,222.33 gr	Esfuerzo de Ruptura ( $\sigma_1$ )	224.43 MPa
Densidad Geométrica	2.79 g/cm <sup>3</sup>	Esfuerzo de Ruptura (50mm)	235.31 MPa
Condición	Seca	Confinamiento ( $\sigma_3$ )	18.11 MPa
Tipo de Ruptura	Matriz	Temperatura	20.00 °C
		Módulo de Young Tangente	70.56 GPa
		Razón de Poisson Tangente	0.28 (-)

### FOTOGRAFIA



## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

<b>SGS</b>	<b>REPORTE COMPRESIÓN TRIAXIAL CON DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS ESTÁTICAS (SISTEMA STRAIN GAUGE)</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
Operador: Patricio Orrego		Procesado por: Alejandra Martínez
Cliente: CODELCO Chile División El Teniente		

IDENTIFICACION

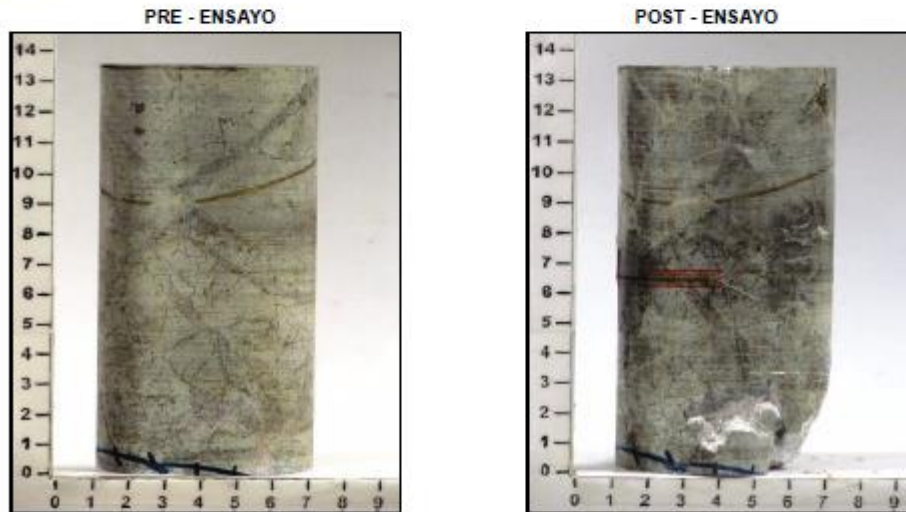
ene-2014

Proyecto	Pilar Norte II
Identificación Probeta	SG334 @ 37.20
Unidad Litológica	CMET FW

**CARACTERISTICAS**

PROBETA		ENSAYO GEOTECNICO	
Diámetro	6.335 cm	Normas Utilizadas	ASTM D-2938-96; D-3148-93
Largo	13.605 cm	Carga de Ruptura	438.59 kN
Peso	1,226.96 gr	Esfuerzo de Ruptura ( $\sigma_1$ )	139.10 MPa
Densidad Geométrica	2.86 g/cm <sup>3</sup>	Esfuerzo de Ruptura (50mm)	145.84 MPa
Condición	Seca	Confinamiento ( $\sigma_3$ )	3.21 MPa
Tipo de Ruptura	Matriz	Temperatura	20.00 °C
		Módulo de Young Tangente	60.33 GPa
		Razón de Poisson Tangente	0.21 (-)

**FOTOGRAFIA**



## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

<b>SGS</b>	<b>REPORTE COMPRESIÓN TRIAXIAL CON DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS ESTÁTICAS (SISTEMA STRAIN GAUGE)</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
Operador: Patricio Orrego		Procesado por: Alejandra Martinez
Cliente: CODELCO Chile División El Teniente		

### IDENTIFICACION

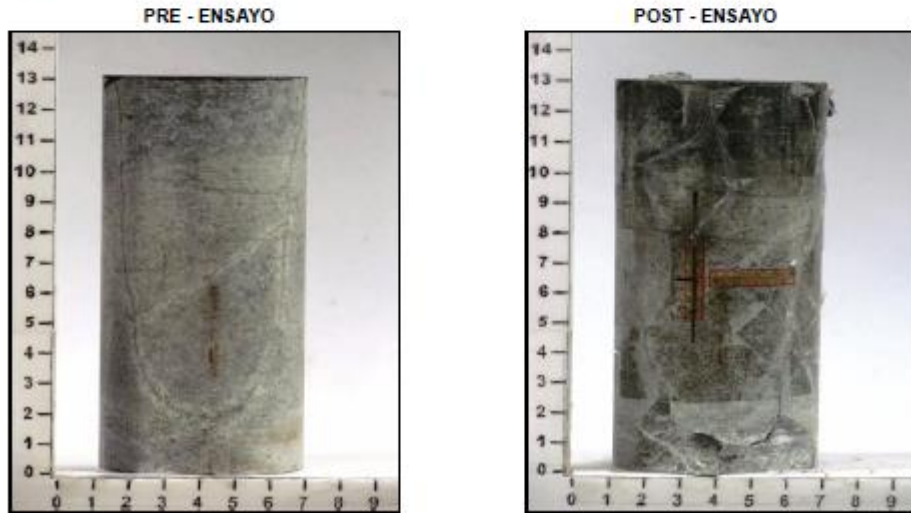
ene-2014

Proyecto	Pilar Norte II
Identificación Probeta	SG331 @ 71.00
Unidad Litológica	CMET FW


### CARACTERISTICAS

PROBETA		ENSAYO GEOTECNICO	
Diámetro	6.087 cm	Normas Utilizadas	ASTM D-2938-95; D-3148-93
Largo	13.156 cm	Carga de Ruptura	432.98 kN
Peso	1,110.41 gr	Esfuerzo de Ruptura ( $\sigma_1$ )	148.76 MPa
Densidad Geométrica	2.90 g/cm <sup>3</sup>	Esfuerzo de Ruptura (50mm)	154.72 MPa
Condición	Seca	Confinamiento ( $\sigma_3$ )	3.34 MPa
Tipo de Ruptura	Matriz	Temperatura	20.00 °C
		Módulo de Young Tangente	61.70 GPa
		Razón de Poisson Tangente	0.23 (-)

### FOTOGRAFIA



## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

	<b>REPORTE COMPRESIÓN TRIAXIAL CON DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS ESTÁTICAS (SISTEMA STRAIN GAUGE)</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
Operador: Patricio Orrego		Procesado por: Alejandra Martínez
Cliente: CODELCO Chile División El Teniente		

### IDENTIFICACION

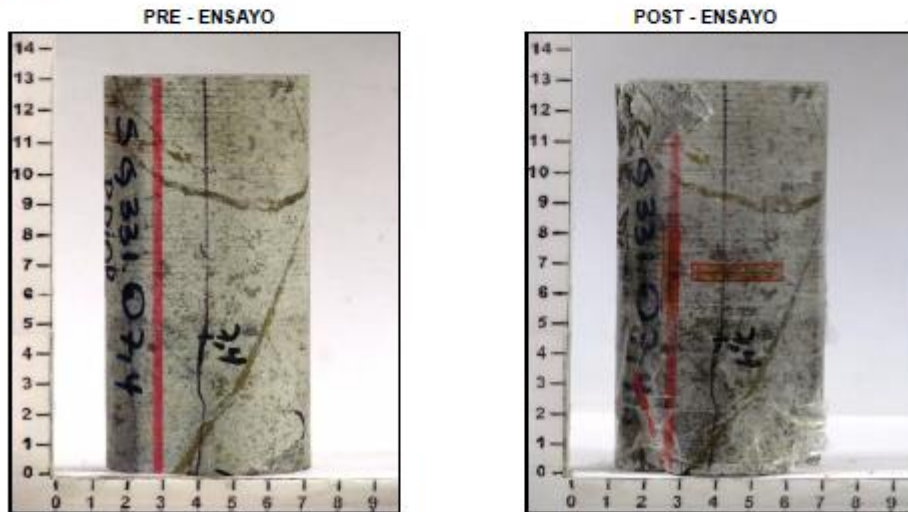
dic-2013

Proyecto	Pilar Norte II
Identificación Probeta	SG0331 @ 7.40
Unidad Litológica	Pórfido Diorítico

### CARACTERISTICAS

PROBETA		ENSAYO GEOTECNICO	
Diámetro	6.089 cm	Normas Utilizadas	ASTM D-2938-95; D-3148-93
Largo	13.176 cm	Carga de Ruptura	439.89 kN
Peso	1,081.94 gr	Esfuerzo de Ruptura ( $\sigma_1$ )	151.03 MPa
Densidad Geométrica	2.82 g/cm <sup>3</sup>	Esfuerzo de Ruptura (50mm)	157.10 MPa
Condición	Seca	Confinamiento ( $\sigma_3$ )	2.82 MPa
Tipo de Ruptura	Matriz y/o estructura	Temperatura	20.00 °C
		Módulo de Young Tangente	72.81 GPa
		Razón de Poisson Tangente	0.25 (-)

### FOTOGRAFIA





## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

<b>SGS</b>	<b>REPORTE COMPRESIÓN TRIAXIAL CON DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS ESTÁTICAS (SISTEMA STRAIN GAUGE)</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
Operador: Patricio Orrego		Procesado por: Alejandra Martínez
Cliente: CODELCO Chile División El Teniente		

### IDENTIFICACION

ene-2014

Proyecto	Pilar Norte II
Identificación Probeta	SG0331 @ 8.60
Unidad Litológica	Pórfido Diorítico

### CARACTERISTICAS

PROBETA		ENSAYO GEOTECNICO	
Diámetro	6.086 cm	Normas Utilizadas	ASTM D-2938-95; D-3148-93
Largo	13.201 cm	Carga de Ruptura	624.98 kN
Peso	1,079.62 gr	Esfuerzo de Ruptura ( $\sigma_1$ )	214.77 MPa
Densidad Geométrica	2.81 g/cm <sup>3</sup>	Esfuerzo de Ruptura (50mm)	223.38 MPa
Condición	Seca	Confinamiento ( $\sigma_3$ )	9.54 MPa
Tipo de Ruptura	Matriz	Temperatura	20.00 °C
		Módulo de Young Tangente	76.32 GPa
		Razón de Poisson Tangente	0.28 (-)

### FOTOGRAFIA

PRE - ENSAYO



POST - ENSAYO



## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

<b>SGS</b>	<b>REPORTE COMPRESIÓN TRIAXIAL CON DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS ESTÁTICAS (SISTEMA STRAIN GAUGE)</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
Operador: Patricio Orrego		Procesado por: Alejandra Martínez
Cliente: CODELCO Chile División El Teniente		

IDENTIFICACION ene-2014

Proyecto	Pilar Norte II
Identificación Probeta	SG0334 @ 6.50
Unidad Litológica	Pórfido Diorítico


### CARACTERISTICAS

PROBETA		ENSAYO GEOTECNICO	
Diámetro	6.339 cm	Normas Utilizadas	ASTM D-2938-95; D-3148-93
Largo	13.076 cm	Carga de Ruptura	698.99 kN
Peso	1,141.68 gr	Esfuerzo de Ruptura ( $\sigma_1$ )	221.38 MPa
Densidad Geométrica	2.77 $\text{g/cm}^3$	Esfuerzo de Ruptura (50mm)	232.15 MPa
Condición	Seca	Confinamiento ( $\sigma_3$ )	17.91 MPa
Tipo de Ruptura	Matriz	Temperatura	20.00 °C
		Módulo de Young Tangente	63.91 GPa
		Razón de Poisson Tangente	0.24 (-)

### FOTOGRAFIA



## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

	<b>REPORTE COMPRESIÓN TRIAXIAL CON DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS ESTÁTICAS (SISTEMA STRAIN GAUGE)</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
Operador: Patricio Orrego		Procesado por: Alejandra Martínez
Cliente: CODELCO Chile División El Teniente		

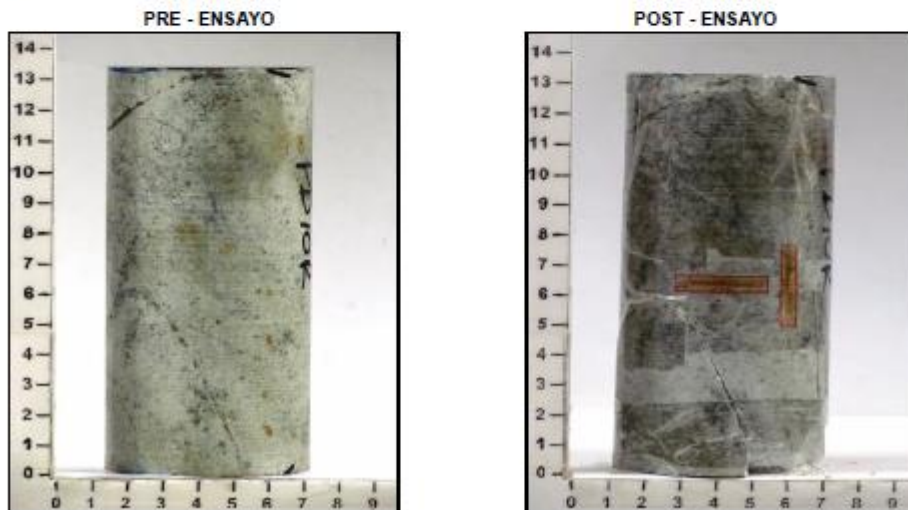
IDENTIFICACION ene-2014

Proyecto	Pilar Norte II
Identificación Probeta	SG0331 @ 12.90
Unidad Litológica	Pórfido Diorítico

### CARACTERISTICAS

PROBETA		ENSAYO GEOTECNICO	
Diámetro	6.085 cm	Normas Utilizadas	ASTM D-2938-96; D-3148-93
Largo	13.481 cm	Carga de Ruptura	659.30 kN
Peso	1,085.70 gr	Esfuerzo de Ruptura ( $\sigma_1$ )	226.66 MPa
Densidad Geométrica	2.77 g/cm <sup>3</sup>	Esfuerzo de Ruptura (50mm)	235.74 MPa
Condición	Seca	Confinamiento ( $\sigma_3$ )	18.1 MPa
Tipo de Ruptura	Matriz	Temperatura	20.00 °C
		Módulo de Young Tangente	66.38 GPa
		Razón de Poisson Tangente	0.24 (-)

### FOTOGRAFIA



## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

<b>SGS</b>	<b>REPORTE COMPRESIÓN TRIAXIAL CON DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS ESTÁTICAS (SISTEMA STRAIN GAUGE)</b>	<b>MECÁNICA DE ROCAS</b>
Operador: Patricio Orrego		Procesado por: Alejandra Martínez
Cliente: CODELCO Chile División El Teniente		

IDENTIFICACION ene-2014

Proyecto	Pilar Norte II
Identificación Probeta	SG0334 @ 9.80
Unidad Litológica	Pórfido Diorítico

### CARACTERISTICAS

PROBETA		ENSAYO GEOTECNICO	
Diámetro	6.340 cm	Normas Utilizadas	ASTM D-2938-95; D-3148-93
Largo	13.421 cm	Carga de Ruptura	811.63 kN
Peso	1,183.67 gr	Esfuerzo de Ruptura ( $\sigma_1$ )	256.98 MPa
Densidad Geométrica	2.75 g/cm <sup>3</sup>	Esfuerzo de Ruptura (50mm)	269.48 MPa
Condición	Seca	Confinamiento ( $\sigma_3$ )	26.03 MPa
Tipo de Ruptura	Matriz	Temperatura	20.00 °C
		Módulo de Young Tangente	66.45 GPa
		Razón de Poisson Tangente	0.28 (-)

### FOTOGRAFIA

PRE - ENSAYO



POST - ENSAYO





## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

<b>SGS</b>	<b>REPORTE COMPRESIÓN UNIAXIAL SIMPLE CON DETERMINACIÓN DE MÓDULOS ELÁSTICOS ESTÁTICOS (SISTEMA STRAIN GAUGE)</b>	<b>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS</b>
Controlado por Jefe de Proyectos de Laboratorio de Mecánica de Rocas		
Cliente: CODELCO Chile División El Teniente		
Operador: Patricio Orrego		
IDENTIFICACION		Jul-2013

Proyecto	Pilar Norte
Identificación Probeta	Ten-A7@2577
Unidad Litológica	Porfido Andesítico

### CARACTERÍSTICAS

#### PROBETA

Diámetro	6.340 cm
Largo	12.709 cm
Peso	1,079.95 gr
Densidad Geométrica	2.69 g/cm <sup>3</sup>
Condición	Seca
Tipo de Ruptura	Matriz y/o estructura

#### ENSAYO GEOTECNICO

Normas Utilizadas	ASTM D-2938-95; D-3148-93
Carga de Ruptura	502.49 kN
Esfuerzo de Ruptura	159.11 MPa
Temperatura	20.00 °C
Módulo de Young Tangente	57.58 GPa
Razón de Poisson Tangente	0.26

### FOTOGRAFIA

PRE - ENSAYO

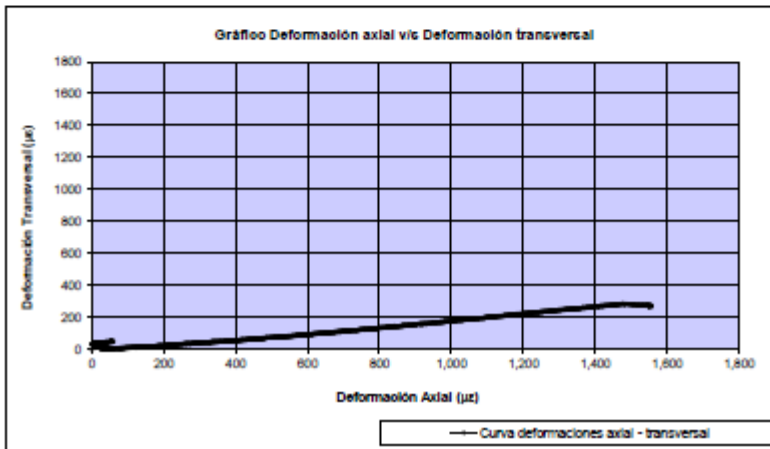
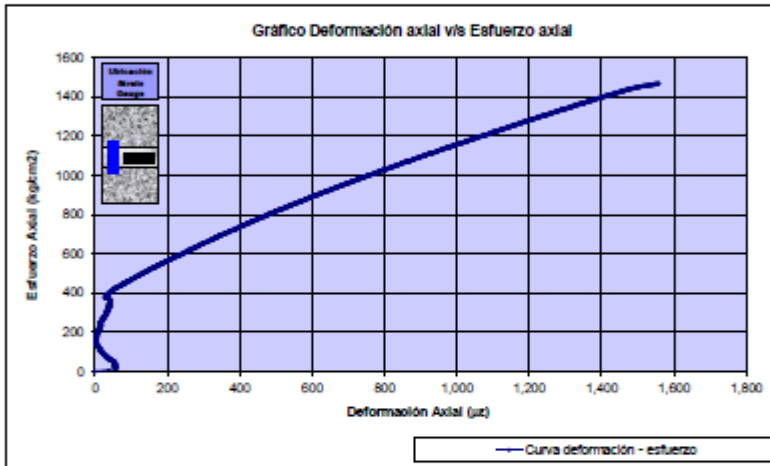


POST - ENSAYO



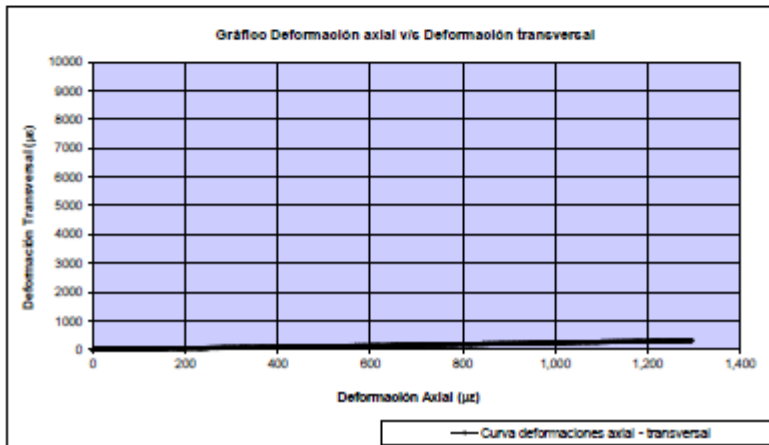
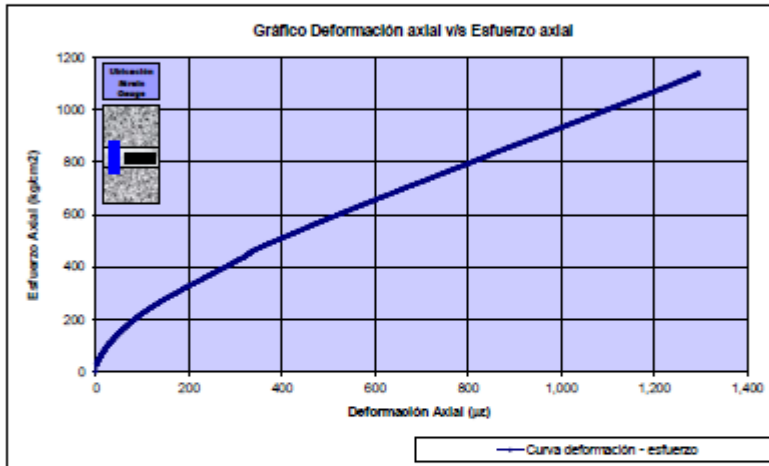
## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

ENSAYO	=	Ensayo módulo elástico	Jul-2013
Proyecto	=	Codeico División El Teriente - Pilar Norte	
Litología	=	Porfido Andesítico	
Muestra	=	Ten-AA@0003	
Diámetro	=	6.30 cm	
Largo	=	12.47 cm	
Masa	=	1054.83 g	
Peso unitario	=	2.71 t/m <sup>3</sup>	
Escala prensa	=	3000.00 kN	
Gradiente de carga	=	0.75 MPa/s	
Carga máxima	=	448.40 kN	224.20 (50% Cus)
Resistencia máxima (σ <sub>c</sub> )	=	143.84 MPa	
Esfuerzo Ruptura (50 mm)	=	149.96 MPa	
Mod. de Young axial Sec.	=	- GPa	80.07 Mod.tang
Razón de Poisson	=	-	0.16
Tipo de Ruptura	=	Matriz y/o estructura	



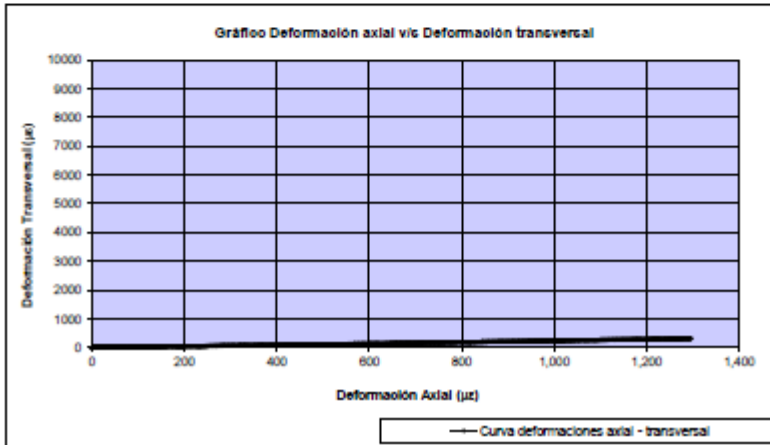
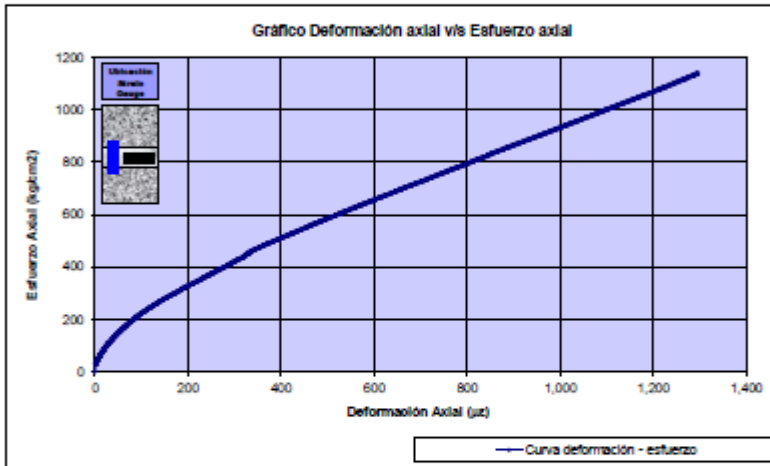
## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

ENSAYO	=	Ensayo módulo elástico	Jul-2013
Proyecto	=	Codeico División El Teniente - Pilar Norte	
Litología	=	Porfido Andesítico	
Muestra	=	Ten-A4@0010	
Diámetro	=	6.31 cm	
Largo	=	12.65 cm	
Masa	=	1071.82 g	
Peso unitario	=	2.71 t/m <sup>3</sup>	
Escala prensa	=	3000.00 kN	
Gradiente de carga	=	0.75 MPa/s	
Carga máxima	=	349.89 kN	174.95 (50% Cus)
Resistencia máxima (σ)	=	111.78 MPa	
Esfuerzo Ruptura (50 mm)	=	116.57 MPa	
Mod. de Young axial Sec.	=	105.92 GPa	72.07 Mod.tang.
Razón de Poisson	=	0.22	0.22
Tipo de Ruptura	=	Matriz y/o estructura	



## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

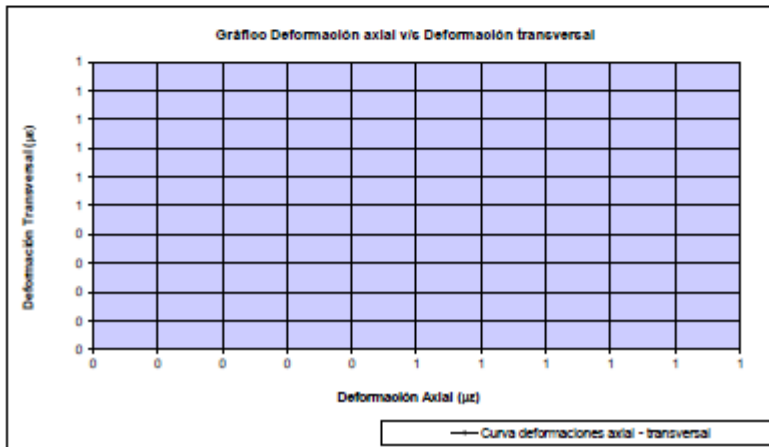
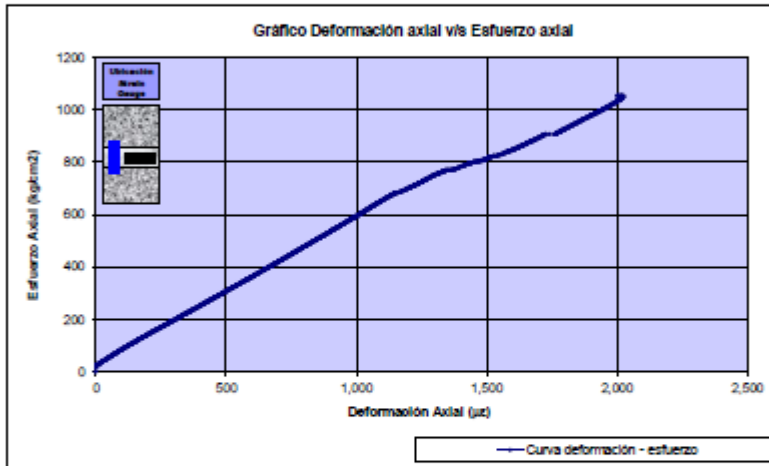
ENSAYO	=	Ensayo módulo elástico	Jul-2013
Proyecto	=	Codeico División El Teriente - Pilar Norte	
Litología	=	Porfido Andesítico	
Muestra	=	Ter-A4@0010	
Diámetro	=	6.31 cm	
Largo	=	12.65 cm	
Masa	=	1071.82 g	
Peso unitario	=	2.71 t/m <sup>3</sup>	
Escala prensa	=	3000.00 kN	
Gradiente de carga	=	0.75 MPa/s	
Carga máxima	=	349.89 kN	174.95 (50% Cus)
Resistencia máxima (σ <sub>c</sub> )	=	111.78 MPa	
Esfuerzo Ruptura (50 mm)	=	116.57 MPa	
Mod. de Young axial Sec.	=	105.92 GPa	72.07 Mod.tang
Razón de Poisson	=	0.22	0.22
Tipo de Ruptura	=	Matriz y/o estructura	



## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

ENSAYO	=	Ensayo módulo elástico	Jul-2013
Proyecto	=	Codelco División El Teniente - Pilar Norte	
Utiología	=	Porfido Andesítico	
Muestra	=	Ten-AA@0015	
Diámetro	=	6.33 cm	
Largo	=	12.92 cm	
Masa	=	1096.54 g	
Peso unitario	=	2.70 t/m <sup>3</sup>	
Escala prensa	=	3000.00 kN	
Gradiente de carga	=	0.75 MPa/s	
Carga máxima	=	324.73 kN	162.37 (50% Cus)
Resistencia máxima ( $\sigma_c$ )	=	103.32 MPa	
Esfuerzo Ruptura (50 mm)	=	107.79 MPa	
Mod. de Young axial Sec.	=	55.03 GPa	55.99 Mod.tang.
Razón de Poisson	=	-	-
Tipo de Ruptura	=	Matriz y/o estructura	

Observación: Debido a una lectura anómala en el sensor de deformación transversal no fue posible obtener la Razón de Poisson.

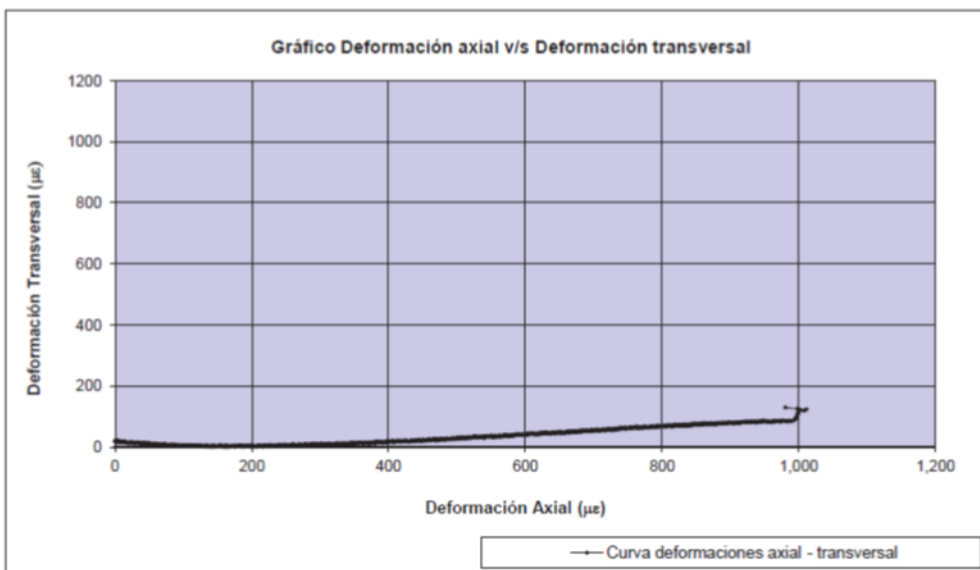
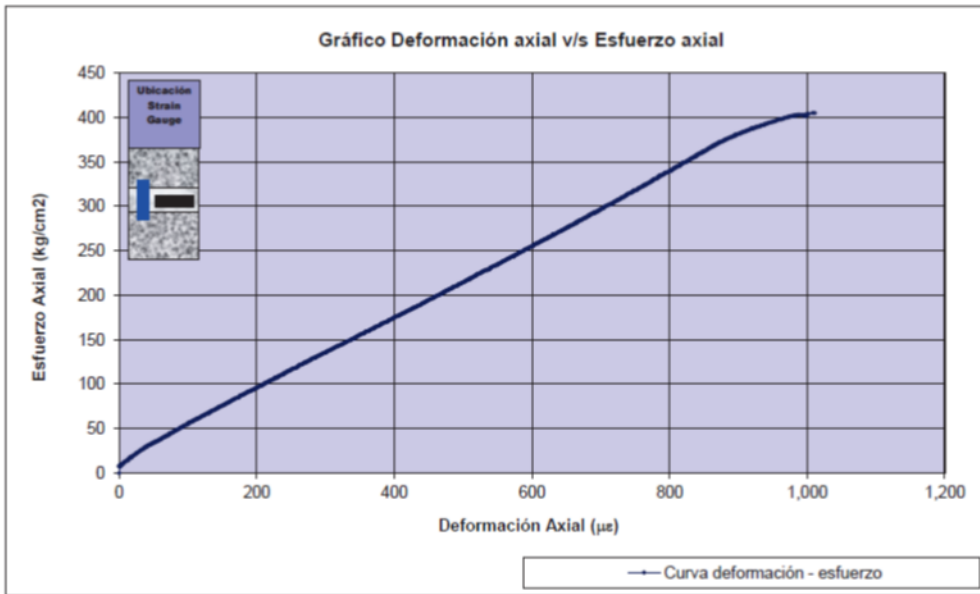


# Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos


	<b>REPORTE DE COMPRESIÓN UNIAXIAL CON DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS ESTÁTICAS</b>	<b>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS</b>	
	Controlado por Jefe de Proyecto de Laboratorio de Mecánica de Rocas		
	Cliente: CODELCO Chile División El Teniente		
	Operador: Patricio Orrego		

sep-2013

Proyecto	=	Probetones 150mm	
Litología	=	-	
Muestra	=	NNM8 - 11.00 - 11.32	
Diámetro	=	13.98 cm	
Largo	=	30.66 cm	
Masa	=	12923.00 g	
Peso unitario	=	2.75 t/m <sup>3</sup>	
Escala prensa	=	3000.00 kN	
Gradiente de carga	=	0.75 MPa/s	
Carga máxima	=	609.81 kN	304.91 (50% Cus)
Resistencia máxima ( $\sigma_1$ )	=	39.72 MPa	
Esfuerzo Ruptura (50 mm)	=	47.80 MPa	
Mod. de Young axial Sec.	=	39.75 GPa	39.16 Mod.tang.
Razón de Poisson	=	- -	0.12
Tipo de Ruptura	=	Matriz	

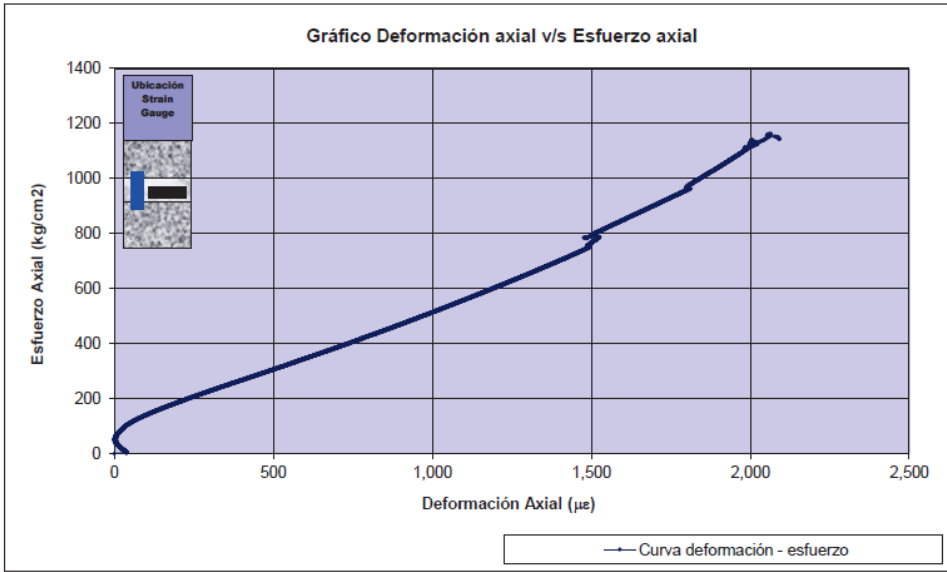


# Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos

	<b>REPORTE DE COMPRESIÓN UNIAXIAL CON DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS ESTÁTICAS</b>	<b>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS</b>						
Controlado por Jefe de Proyecto de Laboratorio de Mecánica de Rocas								
Cliente: CODELCO División El Teniente								
Operador: Patricio Orrego								
Proyecto = Probetones 150mm Litología = - Muestra = OR2-C.13 Diámetro = 14.30 cm Largo = 30.70 cm Masa = 13010.00 g Peso unitario = 2.64 t/m <sup>3</sup> Escala prensa = 3000.00 kN Gradiente de carga = 0.20 MPa/s Carga máxima = 1828.45 kN Resistencia máxima ( $\sigma_1$ ) = 113.89 MPa Esfuerzo Ruptura (50 mm) = 137.60 MPa Mod. de Young axial Sec. = 43.61 GPa Razón de Poisson = 0.17 - Tipo de Ruptura = Matriz		oct-2013						
	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>914.23</td> <td>(50% Cus)</td> </tr> </table> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>44.87</td> <td>Mod.tang.</td> </tr> <tr> <td>0.21</td> <td></td> </tr> </table>	914.23	(50% Cus)	44.87	Mod.tang.	0.21		
914.23	(50% Cus)							
44.87	Mod.tang.							
0.21								

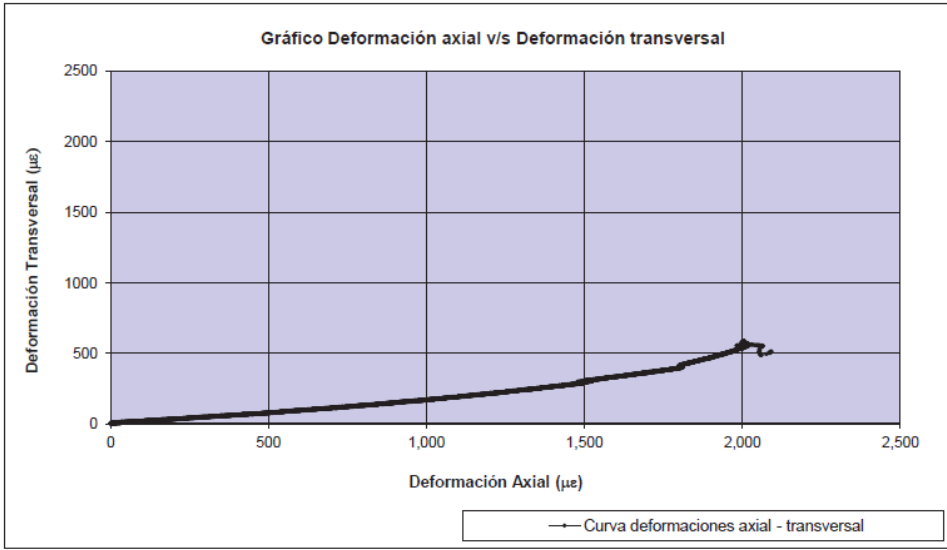
  

**Gráfico Deformación axial v/s Esfuerzo axial**



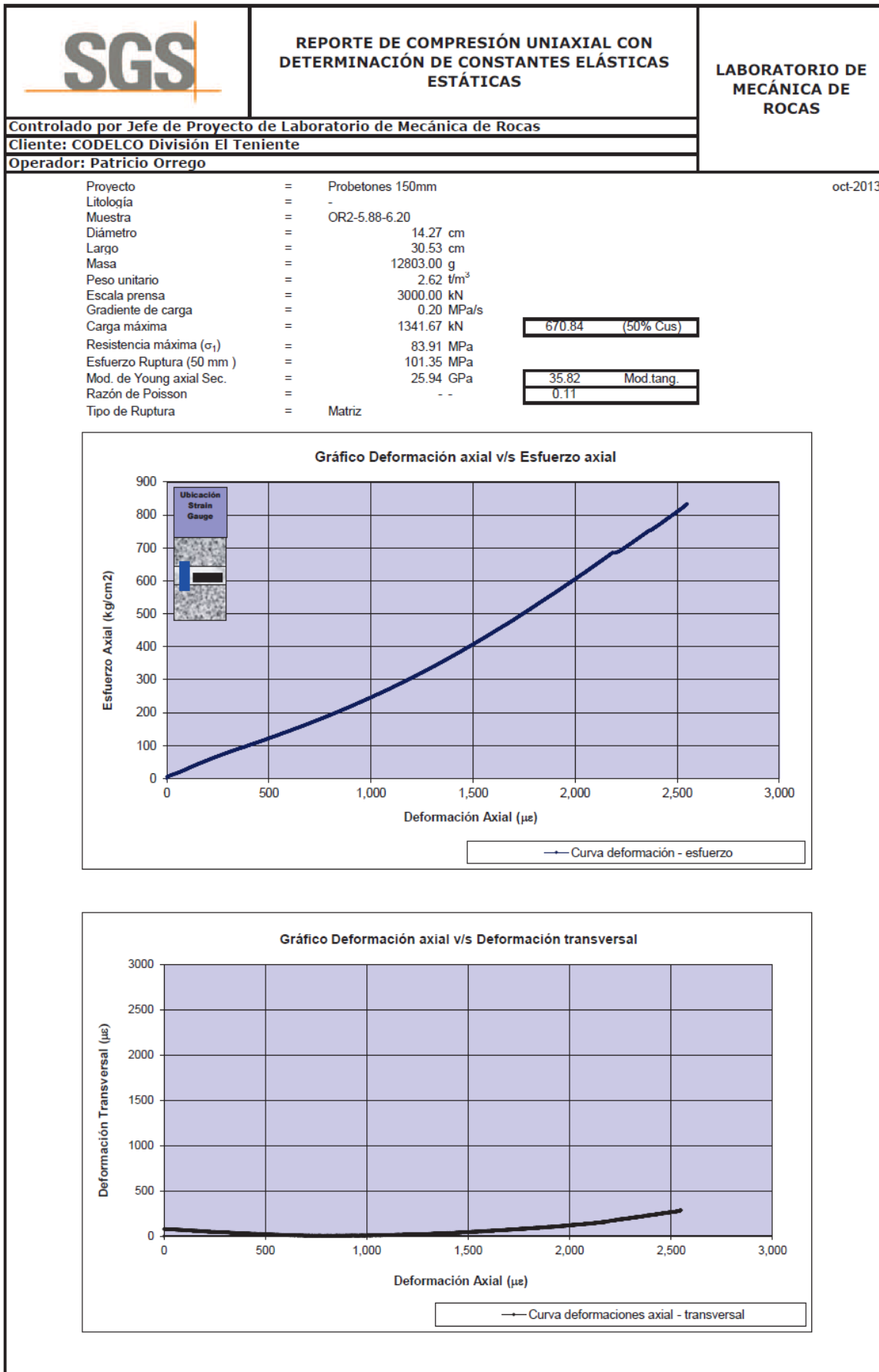
— Curva deformación - esfuerzo

**Gráfico Deformación axial v/s Deformación transversal**



— Curva deformaciones axial - transversal

## Anexo A: Resultados de Ensayos Geotécnicos





## **Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos**

El Anexo B consiste en las descripciones petrográficas detalladas de los cortes transparentes y pulidos confeccionados en el marco de este trabajo. En estas descripciones se utiliza el concepto de descripción de categoría de empaquetamiento, introducido en la sección 3.3.

### **DDH2164-924 (2)**

Roca gris de grano fino, inequigranular, hipidiomorfa a idiomorfa, conformada por un 85% de fenocristales y un 15% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 65% de plagioclasa euhedral a subhedral de hasta 2,4 mm; 4% biotita euhedral a subhedral de hasta 2 mm; 8% de cuarzo anhedral de hasta 1,4 mm; 3% de opacos de hasta 1 mm; 2% de relictos de anfíbolos euhedrales a anhedrales de hasta 2 mm; y 3% de feldespato potásico subhedral peritítico de hasta 1,4 mm.

La masa fundamental está compuesta principalmente por cristales de cuarzo de 0,02 a 0,3 mm, que presentan textura consertal, y, en menor medida, cristales de plagioclasa, feldespato potásico, biotita y opacos.

Cerca de la mitad de los fenocristales de plagioclasa se presentan zonados, varían de frescos a débilmente alterados a sericita o presentan antipertitas, y tanto plagioclasa como cuarzo contienen apatito (en traza). Algunos cristales de cuarzo y plagioclasa muestran fracturamiento. Los relictos de anfíbolos están completamente alterados a biotita-clorita-opacos; mientras que los cristales de biotita se presentan alterados a clorita-opacos o frescos. Muchos cristales de feldespatos han sido reemplazados por albita por alteración. Otros minerales de alteración presentes son sericita y anhidrita. Presenta circón como mineral accesorio.

La intensidad de la alteración es débil, consistente en albita (8%), biotita (5%), clorita (2%), y trazas de sericita y anhidrita.

La mineralización metálica consiste en magnetita, tenantita-tetraedrita, esfalerita, calcopirita, en orden de abundancia, y se presenta diseminada y en cúmulos. El corte transparente presenta una fractura longitudinal que se ramifica.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la número 4: esqueleto de fenocristales.

### **DDH2164-1188 (2)**

Roca gris claro de grano fino a medio, inequigranular, idiomorfa a hipidiomorfa, conformada por un 75% de fenocristales y un 25% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 40% de plagioclasa euhedral a subhedral de 0,5 a 3,5 mm alterados a sericita, estando algunos zonados, que muestran fracturamiento; 20% de feldespato potásico subhedral de hasta 1 mm; 10% de relictos de anfíbola euhedral a subhedral alterados a biotita y clorita; 3% de biotita euhedral a de hasta 4 mm; y 2% de opacos euhedrales a subhedrales de hasta 0,6 mm.

## Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos

La masa fundamental está compuesta de un 15% de cuarzo con bordes aserrados; 8% de feldespato potásico y 2% de opacos. La intensidad de alteración es nula a débil.

La mineralización metálica (4% en total) corresponde, en orden decreciente de abundancia, a magnetita, esfalerita, bornita, calcopirita y trazas de pirita, y se presenta en cúmulos y diseminada.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la número 4: esqueleto de fenocristales.

### **DDH2176-858 (2)**

Roca gris de grano fino, inequigranular, hipidiomorfa a idiomorfa, conformada por un 85% de fenocristales y un 15% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 70% de plagioclasa euhedral a subhedral de hasta 2,4 mm; 5% biotita euhedral a subhedral de hasta 2 mm; 16% de cuarzo anhedral de hasta 1,4 mm; 4% de opacos de hasta 1 mm; 2% de relictos de anfíbolos euhedrales a anhedrales de hasta 2 mm; y 3% de feldespato potásico subhedral peritítico de hasta 1,4 mm.

La masa fundamental está compuesta principalmente por cristales de cuarzo de 0,02 a 0,3 mm, que presentan textura consertal, y, en menor medida, cristales de plagioclasa, feldespato potásico, biotita y opacos.

La mayoría de los fenocristales de plagioclasa se presenta zonados, y varían de frescos a débilmente alterados a sericita, y tanto plagioclasa como cuarzo contienen apatito (en traza). Los fenocristales de cuarzo suelen mostrar fracturamiento. Los relictos de anfíbolos están completamente alterados a biotita-clorita-opacos; mientras que los cristales de biotita se presentan, en igual proporción, frescos y alterados a clorita-opacos. Muchos cristales de feldespatos han sido reemplazados a albita por alteración.

La intensidad de la alteración es débil, consistente en biotita (8%), albita (7%), clorita (5%), y trazas de mica blanca, sericita y anhidrita.

La mineralización metálica consiste en magnetita, calcopirita, bornita, y esfalerita, en orden de abundancia, y se presenta diseminada y en cúmulos.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la número 4: esqueleto de fenocristales.

### **DDH2187-396 (2)**

Roca gris (con manchas negras) de grano fino a medio, inequigranular, idiomorfa a hipidiomorfa, conformada por un 85% de fenocristales y un 15% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 42% de plagioclasa euhedral de hasta 4 mm alterados a sericita, que muestran fracturamiento; 20% de feldespato potásico euhedral a subhedral de hasta 1 mm; 15% de biotita euhedral a subhedral de hasta 2 mm, alterados a opacos; y 3% de opacos euhedrales a subhedrales de hasta 0,5 mm.

La masa fundamental está compuesta de un 5% de feldespato potásico, 5% de cuarzo (estos dos minerales mostrando texturas aserradas), 3% de clorita, 1% de anhidrita (y yeso) rellenando espacios, y 1% de opacos. Hay cantidades menores de apatito. La intensidad de alteración es débil, con trazas de epidota.

## Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos

La mineralización metálica (4% en total) corresponde a magnetita, esfalerita, calcopirita, , en orden decreciente de abundancia, y se presenta en cúmulos y diseminada.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la número 4: esqueleto de fenocristales.

### **DDH2188-863 (2)**

Roca gris de grano fino, inequigranular, hipidiomorfa a idiomorfa, conformada por un 88% de fenocristales y un 12% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 75% de plagioclasa euhedral a subhedral de hasta 3 mm; 5% biotita euhedral a subhedral de hasta 2,4 mm; 10% de cuarzo anhedral de hasta 1,4 mm; 3% de opacos de hasta 1 mm; 2% de relictos de anfíbolos euhedrales a anhedrales de hasta 2 mm; y 3% de feldespato potásico subhedral peritítico de hasta 1,4 mm.

La masa fundamental está compuesta principalmente por cristales de cuarzo de 0,02 a 0,3 mm, que presentan textura consertal, y, en menor medida, cristales de plagioclasa, feldespato potásico, biotita y opacos.

Cerca de la mitad de los fenocristales de plagioclasa se presentan zonados, varían de frescos a débilmente alterados a sericita o presentan antipertitas, y tanto plagioclasa como cuarzo contienen apatito (en traza). Algunos cristales de cuarzo y plagioclasa muestran fracturamiento. Los relictos de anfíbolos están completamente alterados a biotita-clorita-opacos; mientras que los cristales de biotita se presentan alterados a clorita-opacos o y frescos. Muchos cristales de feldespatos han sido reemplazados por albita por alteración. Presenta circón como mineral accesorio.

La intensidad de la alteración es débil, consistente en albita (8%), biotita (5%), clorita (2%), y trazas de sericita y anhidrita.

La mineralización metálica consiste en magnetita, esfalerita, calcopirita, pirita, tenantita-tetraedrita, en orden de abundancia, y se presenta diseminada y en cúmulos. El corte transparente presenta una fractura sinuosa.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la número 4: esqueleto de fenocristales.

### **DDH2197-792 (2)**

Roca gris (con manchas negras) de grano fino a medio, inequigranular, idiomorfa a hipidiomorfa, conformada por un 85% de fenocristales y un 15% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 35% de plagioclasa euhedral de hasta 4 mm, que muestran fracturamiento; 25% de feldespato potásico subhedral a euhedral de hasta 2 mm, alterados a sericita; 17% de biotita euhedral a subhedral de hasta 4 mm, alterados a opacos; 5% de relictos de anfíbolos euhedrales de hasta 2 mm, alterados a biotita y clorita; y 3% de opacos euhedrales a subhedrales de hasta 0,5 mm.

La masa fundamental está compuesta de un 5% de feldespato potásico, 5% de cuarzo (estos dos minerales mostrando texturas aserradas), 2% de anhidrita rellenando espacios, 2% de clorita y 1% de opacos. Hay cantidades menores de apatito. La intensidad de alteración es débil.

## Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos

La mineralización metálica (4% en total) corresponde a magnetita, esfalerita, calcopirita, bornita y pirita, en orden decreciente de abundancia, y se presenta diseminada, en cúmulos y en vetillas.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la número 4: esqueleto de fenocristales.

### **IR6-P1**

Roca de color negro de grano fino a medio, porfídica, hipidiomorfa, conformada por un 35% de fenocristales y un 65% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 30% de plagioclasa euhedral a subhedral de hasta 4 mm, alterados moderadamente a sericita, carbonatos y epidota y mostrando fracturamiento; 3% de anfíbolos subhedrales a euhedrales de hasta 0,7 mm; y 2% de opacos subhedrales de hasta 0,6 mm.

La masa fundamental está compuesta por un 20% de carbonatos, 15% de plagioclasa, 12% de clorita, 7% de opacos, 5% de cuarzo, 4% de sericita y 2% de epidota. Parte de los carbonatos y clorita se presentan rellenando amígdalas. Por los minerales de alteración nombrados, la intensidad de alteración es moderada a débil.

El 9% de mineralización metálica (minerales opacos) corresponde a magnetita, y se presenta en forma diseminada.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la 2: cristales aislados cercanos.

### **IR7-P1**

Roca de color negro de grano fino a medio, inequigranular, hipidiomorfa, conformada por un 40% de fenocristales y un 60% de masa fundamental. Los fenocristales forman textura porfídica y consisten en 30% de plagioclasa euhedral a subhedral de hasta 4 mm, alterados moderadamente a carbonatos, zoisita y sericita, y mostrando fracturamiento; 4% de relictos de olivino subhedrales a euhedrales; 3% de feldespato potásico de hasta 0,2 mm; 2% de opacos euhedrales a subhedrales; y 1% de relicto de anfíbola euhedral de 0,3 mm altamente alterados a carbonatos.

La masa fundamental está compuesta por un 35% de microlitos de plagioclasa; 10% de carbonatos; 10% de minerales opacos; 3% de feldespato potásico y 2% de carbonatos-zoisita reemplazando completamente a relictos de anfíbolos. Por los minerales de alteración nombrados (tanto en la masa fundamental, como alterando a los fenocristales), la intensidad de alteración es moderada.

La mineralización metálica (12% en total) corresponde a magnetita, blenda, calcopirita y pirita en orden decreciente de abundancia, y se presenta en forma diseminada.

La categoría de empaquetamiento puede corresponder a la 2: cristales aislados cercanos o 3: cúmulos de cristales o textura glomeroporfídica.

### **IR8-P1**

Roca de color negro de grano fino, inequigranular, idiomorfa, conformada por un 35% de fenocristales y un 65% de masa fundamental. Los fenocristales forman textura porfídica y consisten en 29% de plagioclasa euhedral de hasta 2 mm, alterados moderadamente a zoisita, carbonatos, sericita y arcillas; 5% de opacos euhedrales a subhedrales de hasta 0,2 mm; y 1% de chert de hasta 1 mm, alterado moderadamente a carbonatos.

La masa fundamental está conformada por un 30% de microlitos de plagioclasa, 20% de carbonatos; 10% de opacos euhedrales a subhedrales; y 5% de Chert. Tanto la masa fundamental como los fenocristales muestran fracturamiento. La intensidad de alteración es moderada. La roca presenta vetillas de carbonatos-zoisita-óxidos de hierro (hematita), y un fuerte color rojo en toda la roca, que evidencia oxidación.

La mineralización metálica (15% en total) consiste en magnetita, hematita, pirita, calcopirita y esfalerita, en orden decreciente de abundancia, y se presenta diseminada en cristales pequeños (de 20 a 30 micrones) y en vetilla.

La categoría de empaquetamiento puede corresponder a la 2: cristales aislados cercanos o 3: cúmulos de cristales o textura glomeroporfídica.

### **IR2-P3**

Roca gris de grano fino, inequigranular, hipidiomorfa, conformada por un 40% de fenocristales y un 60% de masa fundamental. Los fenocristales forman texturas porfídicas y glomeroporfídicas, y consisten en 25% de plagioclasa subhedral a euhedral, de hasta 3 mm, zonados y con antipertitas; 10% de biotita subhedral a anhedral, de hasta 1 mm, alterados a clorita y opacos en forma débil; 3% de opacos euhedrales a subhedrales; y 2% de relictos de anfíbola euhedrales a subhedrales reemplazados a biotita y en menor medida a clorita.

La masa fundamental está compuesta por 57% de cuarzo subhedral a anhedral de 0,03 mm, 2% de biotita de hasta 0,05 mm, y 1% de opacos de aproximadamente 0,03 mm.

Cerca de la mitad de los fenocristales de plagioclasa se presentan zonados, varían de frescos a débilmente alterados a sericita o presentan antipertitas.

La intensidad de la alteración es débil, consistente en sericita y mica blanca a partir de feldspatos (~5%).

La mineralización metálica (4% en total) consiste en magnetita, esfalerita, y en grados menores pirita, hematita y tenantita-tetrahedrita, y se presenta en cúmulos y diseminada.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la número 2: cristales aislados cercanos

### **IR3-P3**

Roca de color gris rosáceo de grano fino a medio, inequigranular, hipidiomorfa, conformada por un 50% de fenocristales y un 50% de masa fundamental. Los fenocristales forman textura porfídica, y consisten en 30% de plagioclasa euhedral a subhedral, de hasta 3 mm, con antipertitas y zonados (10%), alterados débil a moderadamente mica blanca y sericita, y

## Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos

presentan fracturamiento; 15% de biotita subhedral, de hasta 1 mm, alterados a epidota y opacos en forma débil; 3% de opacos euhedrales a subhedrales; 1% de relictos de anfíbola euhedrales a subhedrales reemplazados a biotita y opacos; y un cristal de titanita euhedral de 0,7 mm.

La masa fundamental está compuesta por 10% de feldespato potásico de 0,05 mm; 5% de cuarzo; 10% de la asociación cuarzo-feldespato potásico en textura granofírica de hasta 0,02 mm; 10% de plagioclasa; 5% de biotita; 3% de titanita y 2% de opacos.

La intensidad de la alteración es débil, y se presenta como 5% de monocristales de mica blanca, sericita, y epidota, y trazas de actinolita y anhidrita.

La mineralización metálica (5% en total) consiste en magnetita, bornita, calcopirita y esfalerita y se presenta diseminada y en cúmulos.

Las categorías de empaquetamiento pueden corresponder a las 2: cristales aislados cercanos o 4: esqueleto de cristales.

### **IR4-P3**

Roca de color gris rosáceo de grano fino a medio, inequigranular, hipidiomorfa, conformada por un 45% de fenocristales y un 55% de masa fundamental. Los fenocristales forman textura porfídica, y consisten en 35% de plagioclasa euhedral a subhedral, de hasta 5 mm, alterados débilmente a sericita y pirofilita, mostrando fracturas y oquedades; 2% de biotita euhedral a subhedral, de hasta 3 mm, alterados a opacos en forma débil; 3% de opacos subhedrales a euhedrales; 2% de relictos de anfíbola subhedrales a euhedrales, altamente alterados a biotita y opacos; y 3% de feldespato potásico subhedral a anhedral con trazas de apatito.

La masa fundamental está compuesta por un 10% de feldespato potásico; 5% de cuarzo; 23% de la asociación cuarzo-feldespato potásico en textura granofírica; 10% de plagioclasa, 3% de opacos y 1% de biotita.

La intensidad de la alteración es débil, y se presenta como un 3% de monocristales de epidota, sericita y trazas de actinolita.

La mineralización metálica (6% en total) consiste en magnetita, tenantita-tetraedrita, esfalerita, bornita y calcopirita, en orden decreciente de abundancia, y se presenta diseminada y en cúmulos.

Las categorías de empaquetamiento pueden corresponder a las 2: cristales aislados cercanos o 4: esqueleto de cristales.

### **IR5-P3**

Roca de color gris-verde de grano fino a medio, porfídica, hipidiomorfa, conformada por un 20% de fenocristales y un 80% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 13% de plagioclasa subhedral de hasta 5 mm, alterados intensamente a sericita y carbonatos; 4% de feldespato potásico subhedral a anhedral de hasta 1 mm; y 3% de opacos subhedrales de hasta 0,5 mm.

## Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos

La masa fundamental está conformada por un 27% de carbonatos; un 25% de clorita; un 20% de cuarzo; un 5% de epidota; y un 3% de opacos. La intensidad de alteración es alta (de carbonatos-clorita-cuarzo-epidota). La roca muestra además oquedades, y amígdalas rellenas con carbonatos-clorita-epidota.

La mineralización metálica (6% en total) consiste en magnetita, pirita, calcopirita (~1%) y esfalerita, en orden decreciente de abundancia, y se presenta en forma diseminada y en cúmulos

La categoría de empaquetamiento puede corresponder a la 1: cristales aislados lejanos.

### **IR3-P2**

Roca de color gris rosáceo de grano fino a medio, inequigranular, hipidiomorfa, conformada por un 45% de fenocristales y un 55% de masa fundamental. Los fenocristales forman textura porfídica, y consisten en 23% de plagioclasa euhedral a subhedral, de hasta 4 mm, alterados débil a moderadamente a mica blanca y sericita; 15% de biotita subhedral, de hasta 3 mm, alterados a opacos en forma débil; 4% de opacos euhedrales a subhedrales; 1% de relictos de anfíbola subhedrales a euhedrales, de hasta 3 mm, alterados a biotita y opacos; y 2% de cuarzo anhedral.

La masa fundamental está compuesta por un 10% de feldespato potásico; 5% de cuarzo; 12% de la asociación cuarzo-feldespato potásico en textura granofírica de hasta 0,5 mm; 10% de plagioclasa; 5% de biotita; 3% de titanita y 2% de opacos.

Se presenta fracturamiento tanto en los fenocristales de plagioclasa como en la masa fundamental de la roca.

La intensidad de la alteración es débil, y se presenta como 8% de monocristales de actinolita, epidota, calcita y sericita. La sección transparente muestra oquedades con actinolita y plagioclasa alterada a pirofilita.

La mineralización metálica (6% en total) consiste en magnetita, calcopirita, esfalerita y tenantita-tetraedrita, en orden decreciente de abundancia, y se presenta en cúmulos y diseminada.

Las categorías de empaquetamiento pueden corresponder a las 2: cristales aislados cercanos o 4: esqueleto de cristales.

### **IR4-P5**

Roca de color gris rosáceo de grano medio a fino, porfídica, hipidiomorfa a idiomorfa, conformada por un 45% de fenocristales y un 55% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 25% de plagioclasa euhedral, de hasta 3 mm, alterados débilmente a sericita, mostrando fracturas y formando textura glomeroporfídica; 10% de feldespato potásico anhedral de hasta 1,2 mm con ocurrencia de apatito; 5% de biotita euhedral, de hasta 2 mm; 5% de relictos de anfíbola subhedrales, alterados a opacos y epidota; y 5% de opacos subhedrales.

La masa fundamental está compuesta por un 22% de la asociación cuarzo-feldespato potásico en textura granofírica, 15% de cuarzo, 5% de epidota, 5% de clorita, 3% de actinolita, 3% de opacos y 2% de sericita, por lo que la intensidad de alteración es débil (actinolita-epidota-clorita). El corte transparente muestra actinolita en drusa.

## Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos

La mineralización metálica (8% en total) consiste en magnetita y esfalerita, en orden decreciente de abundancia, y se presenta diseminada y en cúmulos.

Las categorías de empaquetamiento pueden corresponder a la 4: esqueleto de cristales o 3: cúmulos de cristales o glomeroporfídica.

### **IR6-P3**

Roca de color negro de grano fino a medio, porfídica, hipidiomorfa, conformada por un 40% de fenocristales y un 60% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 33% de plagioclasa euhedral a subhedral de hasta 5 mm, alterados moderadamente a carbonatos, epidota y sericita y atravesados por microvetillas de carbonatos; 5% de anfíbolos subhedrales de hasta 0,5 mm; y 2% de opacos subhedrales de hasta 0,5 mm.

La masa fundamental está compuesta por un 15% de plagioclasa, 15% de carbonatos, 12% de clorita, 5% de cuarzo, 5% de epidota, 5% de opacos y 3% de sericita. Por los minerales de alteración nombrados, la intensidad de alteración es moderada a débil.

El 7% de mineralización metálica (minerales opacos) corresponde a magnetita, y se presenta en forma diseminada.

La categoría de empaquetamiento puede corresponder a la 2: cristales aislados cercanos o 3: cúmulos de cristales o textura glomeroporfídica.

### **IR7-P2**

Roca de color negro de grano fino a medio, porfídica, hipidiomorfa, conformada por un 40% de fenocristales y un 60% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 31% de plagioclasa euhedral a subhedral de hasta 3 mm, alterados a carbonatos y zoisita; 5% de ortopiroxeno subhedral alterados débilmente; 2% de olivino subhedral alterados débilmente y 2% de opacos subhedrales de hasta 0,4 mm. Los cristales de plagioclasa, olivino y piroxeno muestran fracturamiento.

La masa fundamental está conformada por 28% de microlitos de plagioclasa, 15% de zoisita, 10% de carbonatos y 7% de opacos. La intensidad de alteración es débil en toda la roca, pero alta en algunos minerales, por lo que también es selectiva. La roca presenta microvetillas de calcita, de un ancho aproximado de 50 micrones.

La mineralización metálica (9% en total) corresponde a magnetita, esfalerita y calcopirita en orden decreciente de abundancia, y se presenta en forma diseminada.

La categoría de empaquetamiento puede corresponder a la 2: cristales aislados cercanos o 3: cúmulos de cristales o textura glomeroporfídica.

### **SG333 – 53.00**

Roca de color gris oscuro de grano medio a fino, inequigranular, hipidiomorfa, conformada por un 50% de fenocristales y un 50% de masa fundamental. Los fenocristales forman textura porfídica, y consisten en 48% de plagioclasa euhedral a subhedral de hasta 4 mm,



## Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos

alterados moderadamente a sericita, mostrando fracturamiento y con biotitas sobre ellos; y 2% de opacos subhedrales de hasta 0,3 mm.

La masa fundamental está conformada por un 25% de sericita; 10% de biotita; 5% de cuarzo; 5% de clorita; y 5% de opacos. Por los minerales de alteración nombrados, la intensidad de alteración es moderada (sericita-biotita-clorita). La roca muestra oquedades rekebas con cuarzo (drusas).

La mineralización metálica (7% en total) consiste en magnetita, pirita y calcopirita, en orden decreciente de abundancia, y se presenta diseminada y en cúmulos.

La categoría de empaquetamiento puede corresponder a la 2: cristales aislados cercanos o 3: cúmulos de cristales o textura glomeroporfídica.

### **SG333 – 39.80**

Roca de color gris oscuro de grano medio a fino, inequigranular, hipidiomorfa, conformada por un 60% de fenocristales y un 40% de masa fundamental. Los fenocristales forman textura porfídica, y consisten en 55% de plagioclasa subhedral de hasta 2 mm, débil a moderadamente alterados a mica blanca y sericita; y 5% de opacos subhedrales de hasta 1 mm.

La masa fundamental está compuesta por 10% de cuarzo (de 30 micrones usualmente), 10% de mica blanca, 10% de opacos de hasta 0,6 mm, 5% de sericita y 5% de anhidrita. Por los minerales de alteración nombrados, la intensidad de alteración es moderada. La roca presenta oquedades de hasta 2mm x 1mm y fracturas a lo largo de las vetillas.

La mineralización metálica (15% en total) consiste en calcopirita, pirita, esfalerita y magnetita, en orden decreciente de abundancia, y se presenta en grano, diseminada, en cúmulos y vetillas.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la número 4: esqueleto de fenocristales.

### **SG334 – 37.10**

Roca de color gris de grano fino, inequigranular, alotromorfa, sin fenocristales pero con 15% aproximadamente de sombras de cristales reemplazados completamente a cuarzo y sericita. La mineralogía de la roca consiste en 35% de sericita; 20% de cuarzo; 15% de yeso-anhidrita; 10% de mica blanca; 10% de opacos; 5% de actinolita; 3% de clorita; y 2% de epidota. Por los minerales de alteración nombrados, la intensidad de alteración es alta.

La mineralización metálica (10%) consiste en calcopirita, pirita, esfalerita y magnetita, en orden decreciente de abundancia, y se presenta en vetillas, en cúmulos y diseminada. Además, la muestra presenta oquedades.

La categoría de empaquetamiento puede ser la 1: fenocristales aislados lejanos, o una nueva, 5: sin fenocristales (debido a las sombras reemplazadas).

**SG334 – 37.20**

Roca de color gris de grano fino, inequigranular, alotomorfa, sin fenocristales pero con 5% aproximadamente de sombras de cristales reemplazados completamente a cuarzo y sericita. La mineralogía de la roca consiste en 55% de sericita; 20% de cuarzo; 10% de yeso-anhidrita; 10% de opacos de hasta 0,2 mm; y 5% de mica blanca. La roca presenta drusas de cuarzo y mica blanca. La intensidad de alteración es alta.

La mineralización metálica (10% en la roca, sin considerar vetillas) consiste en calcopirita, pirita y magnetita, en orden decreciente de abundancia, y se presenta diseminada y en cúmulos. Además la roca presenta abundantes vetillas de cuarzo-pirita y cuarzo-sericita-calcopirita.

La categoría de empaquetamiento puede ser la 1: fenocristales aislados lejanos, o una nueva, 5: sin fenocristales (debido a las sombras reemplazadas).

**SG331 – 71.00**

Roca de color gris de grano fino a medio, inequigranular, hipidiomorfa, conformada por un 40% de fenocristales y un 60% de masa fundamental. Los fenocristales forman textura porfídica, y consisten en un 30% de plagioclasa euhedral hasta anhedral, mostrando fracturamiento y con alteración moderada a alta a sericita, mica blanca y carbonatos; y 10% de opacos euhedrales a subhedrales.

La masa fundamental está compuesta por 40% de sericita-mica blanca; 10% de carbonatos; 5% de anhidrita y 5% de opacos. Por los minerales de alteración nombrados, la intensidad de alteración es moderada-alta.

La mineralización metálica (15% en total) consiste en pirita (13%) y calcopirita (2%), y se presenta diseminada, en cúmulos y vetillas. Un grupo de vetillas se caracteriza por la asociación carbonatos + pirita y ser onduladas.

La categoría de empaquetamiento puede corresponder a la 2: cristales aislados cercanos o 3: cúmulos de cristales o textura glomeroporfídica.

**SG331 – 12.90**

Roca gris a gris claro de grano fino, inequigranular (porfídica si se consideran algunas sombras de cristales), hipidiomorfa, conformada por un 15% de fenocristales y un 85% de masa fundamental (30/70 si se consideran todas las sombras). Los fenocristales consisten en 5% de plagioclasa subhedral de hasta 1,5 mm, moderadamente alterados a sericita; 3% de mica blanca euhedral a subhedral de hasta 2 mm; 2% de drusas de cuarzo; y 5% de opacos subhedrales.

La masa fundamental está compuesta de 35% de cuarzo, 32% de mica blanca, 5% de anhidrita, 5% de sericita, 3% de clorita y 5% de opacos. Los minerales de alteración nombrados indican una alta intensidad de alteración. La roca presenta oquedades de hasta 3 mm y vetillas de cuarzo+opacos.

## Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos

La mineralización metálica (10% en total) consiste en calcopirita, pirita, esfalerita y magnetita, en orden decreciente de abundancia, y se presenta en cúmulos, diseminada y en vetillas.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la 1: cristales aislados lejanos.

### **SG331 – 8.60**

Roca gris de grano fino, inequigranular (porfídica si se consideran algunas sombras de cristales), hipidiomorfa, conformada por un 10% de fenocristales y un 90% de masa fundamental (30/70 si se considera el 20% de sombras de plagioclasa reemplazadas a cuarzo-sericita y obliteradas). Los fenocristales consisten en 2% de feldespatos potásicos subhedral a anhedral de hasta 0,5 mm; 2% de drusas de anhidrita; 1% de mica blanca de aproximadamente 0,1 mm; y 5% de opacos de hasta 0,5 mm.

La masa fundamental está compuesta de 40% de cuarzo, 25% de mica blanca (los cristales de ambos minerales de 30 micrones en general), 10% de anhidrita, 5% de sericita, 5% de clorita y 5% de opacos. Los minerales de alteración nombrados indican una alta intensidad de alteración.

La mineralización metálica (10% en total) consiste en calcopirita, pirita, esfalerita y magnetita, en orden decreciente de abundancia, y se presenta en cúmulos, diseminada y en vetillas.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la 1: cristales aislados lejanos.

### **SG334 – 9.60**

Roca gris de grano fino, inequigranular (porfídica si se consideran algunas sombras de cristales), hipidiomorfa, conformada por un 10% de fenocristales y un 90% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 3% de mica blanca subhedral a euhedral de hasta 0,3 mm; 1% de cuarzo subhedral de hasta 0,5 mm; y 6% de opacos subhedrales de hasta 0,5 mm.

La masa fundamental está compuesta por un 50% de cuarzo, 25% de mica blanca, 10% de sericita, y 5% de opacos. Los minerales de alteración indican una intensidad moderada. La roca presenta oquedades y drusas de cuarzo, además de vetillas de cuarzo y opacos.

La mineralización metálica (11% en total) consiste en calcopirita (9%), pirita (1%) y magnetita (1%), y se presenta en cúmulos, diseminada y en vetillas.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la 1: cristales aislados lejanos.

### **SG334 – 7.40**

Roca gris de grano fino, inequigranular (porfídica si se consideran algunas sombras de cristales), hipidiomorfa, conformada por un 10% de fenocristales y un 90% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 2% de mica blanca, alterada débilmente a cuarzo y anhidrita; 2% de drusas de cuarzo de 0,5 a 1,5 mm; 2% de sombras de plagioclasas de hasta 1 mm, altamente alterados a mica blanca y sericita; y 4% de opacos euhedrales a subhedrales de hasta 0,4 mm.

## Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos

La masa fundamental está compuesta por un 35% de cuarzo, de 30 micrones; 15% de sericita; 15% de mica blanca; 10% de anhidrita; 5% de feldespato potásico; 5% de clorita; y 5% de opacos. Por los minerales de alteración nombrados, la intensidad de alteración es alta. La roca presenta cantidades menores de actinolita, asociada a vetillas; y, además, presenta microvetillas de anhidrita y oquedades.

La mineralización metálica (9% en total) consiste en calcopirita, pirita, esfalerita y magnetita, en orden decreciente de abundancia, y se presenta en cúmulos y diseminada. Parte de la calcopirita presente se da ocurre intercrecida con clorita.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la 1: cristales aislados lejanos.

### **SG334 – 6.50**

Roca gris de grano fino, inequigranular (porfídica si se consideran algunas sombras de cristales), hipidiomorfa, conformada por un 10% de fenocristales y un 90% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 2% de mica blanca euhedral a subhedral de hasta 0,6 mm; 2% de feldespato potásico subhedral de hasta 0,2 mm 1% de plagioclasas subhedrales; y 5% de opacos subhedrales.

La masa fundamental está compuesta por un 20% de mica blanca, 15% de cuarzo, 15% de sericita, 15% de anhidrita, 10% de feldespato potásico, 10% de clorita, y 5% de opacos. Los minerales de alteración nombrados indican una intensidad alta.

La mineralización metálica (10% en total) consiste en calcopirita, pirita, esfalerita y magnetita, en orden decreciente de abundancia, y se presenta en cúmulos y diseminada. Parte de la calcopirita presente se da ocurre intercrecida con clorita.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la 1: cristales aislados lejanos.

### **TENA7 – 2577**

Roca gris de grano medio, inequigranular, hipidiomorfa, conformada por un 30% de fenocristales y un 70% de masa fundamental. Los fenocristales (que no están homogéneamente distribuidos en la roca, sino que se concentran en algunos sectores y dejan otros constituidos solo por masa fundamental) forman textura porfídica, y consisten en 20% de plagioclasa subhedral de hasta 2 mm, alterados débilmente a sericita y que forman textura glomeroporfídica; 5% de feldespato potásico subhedral a anhedral de hasta 1 mm; 3% de biotita euhedral a subhedral de hasta 2 mm; y 2% de opacos subhedrales de hasta 0,6 mm.

La masa fundamental está compuesta por 30% de cuarzo de aproximadamente 20 micrones, 20% de biotita secundaria, 10% de yeso, 5% de sericita y 5% de opacos. Por los minerales de alteración nombrados, la intensidad de alteración es moderada a débil. La roca muestra oquedades y vetillas de cuarzo + opacos, y vetillas con yeso.

La mineralización metálica consiste en magnetita, calcopirita, bornita, esfalerita, en orden de abundancia, y se presenta diseminada y en cúmulos.

La mineralización metálica (7% en total) consiste en calcopirita, bornita, magnetita y esfalerita, y se presenta en forma diseminada, en cúmulos y vetillas.

## Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos

La categoría de empaquetamiento puede corresponder a la 1: cristales aislados lejanos, a la 2: cristales aislados cercanos o la 3: cúmulos de cristales o textura glomeroporfídica.

### **TENA4 – 003**

Roca gris de grano fino, porfídica, hipidiomorfa, conformada por un 20% de fenocristales y un 80% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 12% de plagioclasa subhedral de hasta 5 mm, alterados a sericita y mica blanca, y que muestran fracturamiento; 5% de mica blanca euhedral a subhedral de hasta 0,8 mm, alteradas a opacos; y 3% de opacos subhedrales de hasta 0,5 mm. Algunos cristales forman textura glomeroporfídica.

La masa fundamental está compuesta por 35% de cuarzo, que muestra drusas con tamaños de cristales de entre 50 y 100 micrones; 15% de sericita; 5% de mica blanca; 10% de biotita; 10% de anhidrita; y 5% de opacos. Por los minerales de alteración nombrados, la intensidad de alteración es alta. La roca muestra drusas con mica blanca.

La mineralización metálica (8% en total) consiste en calcopirita, moibdenita, magnetita y esfalerita, y se presenta en forma diseminada, en vetillas y en cúmulos.

La categoría de empaquetamiento puede corresponder a la 1: cristales aislados lejanos o a la 3: cúmulos de cristales o textura glomeroporfídica.

### **TENA4 – 010**

Roca gris oscuro de grano fino a medio, porfídica, conformada por un 20% de fenocristales y un 80% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 14% de plagioclasa subhedral a euhedral de hasta 2 mm, alterados a sericita, anhidrita y con biotita sobreimpuesta; 2% de biotita subhedral de hasta 1 mm, alterados a clorita; 2% de relictos de anfíbola subhedrales de hasta 1 mm; y 3% de opacos subhedrales de hasta 0,6 mm.

La masa fundamental está compuesta por 40% de cuarzo, 25% de biotita, 5% de sericita y 10% de opacos. Por los minerales de alteración nombrados, la intensidad de alteración es moderada. La roca muestra vetillas de mica blanca y microvetillas de cuarzo.

La mineralización metálica (13% en total) consiste en magnetita, calcopirita (~2%), bornita (0,5%) y esfalerita, y se presenta en forma diseminada, en cúmulos y vetillas.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la 1: cristales aislados lejanos.

### **TENA4 – 011**

Roca gris claro de grano fino, inequigranular (seriada), hipidiomorfa, conformada por un 17% de fenocristales y un 83% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 5% de plagioclasa subhedral de hasta 1 mm, alterados a sericita y mica blanca; 2% de biotita euhedral de hasta 0,5 mm; y 10% de opacos subhedrales de hasta 0,6 mm.

La masa fundamental está compuesta por 40% de cuarzo, que muestra drusas con tamaños de cristales de entre 50 y 100 micrones; 10% de sericita; 10% de mica blanca; 10% de anhidrita; 8% de feldespato potásico y 5% de opacos. Por los minerales de alteración nombrados, la

## Anexo B: Descripciones petrográficas de cortes transparentes y pulidos

intensidad de alteración es alta. La roca presenta actinolita en una drusa y vetillas rellenas con mica blanca.

La mineralización metálica (15% en total) consiste en calcopirita (~5%), magnetita, blenda y molibdenita (principalmente en vetillas), y se da en cúmulos, disseminada y en vetillas.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la 1: cristales aislados lejanos

### **TENA4 – 015**

Roca gris a gris claro de grano fino a medio, porfídica, conformada por un 30% de fenocristales y un 70% de masa fundamental. Los fenocristales consisten en 12% de plagioclasa subhedral a euhedral de hasta 4 mm, alterados a anhidrita y sericita, y que muestran fracturamiento; 8% de feldespato potásico subhedral a anhedral de hasta 2 mm, alterados a sericita; 5% de cuarzo anhedral de hasta 1 mm, mostrando fracturamiento; 3% de opacos subhedrales a euhedrales de hasta 0,5 mm; 1% de biotita subhedral de un tamaño aproximado de 0,5 mm; y 1% de mica blanca.

La masa fundamental está compuesta por 30% de cuarzo, 15% de anhidrita, 10% de biotita, 10% de sericita, 3% de opacos y 2% de mica blanca. Por los minerales de alteración mencionados, la intensidad de alteración es moderada.

La mineralización metálica (6% en total) consiste en calcopirita (~3%), magnetita, molibdenita, esfalerita y posibles trazas de covelina, y ocurre en cúmulos, disseminada y en vetillas.

La categoría de empaquetamiento puede corresponder a la 1: cristales aislados lejanos o a la 3: cúmulos de cristales o textura glomeroporfídica.

### **NNM 8 – 11.00 – 11.32**

Roca de color blanco (a gris claro) de grano medio a fino, inequigranular, hipidiomorga, conformada por un 35% de fenocristales y un 65% de masa fundamental. Los fenocristales forman textura porfídica, y consisten en 15% de plagioclasa subhedral a euhedral de hasta 3 mm, moderadamente alterados a sericita; 8% de feldespato potásico subhedral de hasta 0,7 mm, moderadamente alterados a sericita; 5% de cuarzo subhedral de hasta 0,7 mm, mostrando fracturas; 5% de mica blanca euhedral a subhedral de hasta 1 mm; alterados a opacos; y 2% de opacos euhedrales a subhedrales de hasta 1 mm.

La masa fundamental está conformada por un 40% de cuarzo, 10% de sericita, 5% de mica blanca, 5% de carbonatos y 5% de opacos. Los minerales de alteración indican una intensidad moderada a débil. La roca presenta oquedades y fracturamiento en algunos fenocristales de plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico.

La mineralización metálica (7% en total) consiste en piritita, calcopirita (~3%) y magnetita, y se presenta en cúmulos, disseminada y en vetillas.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la 2: cristales aislados cercanos.

## **OR2 – C13**

Roca de color gris a gris claro de grano medio a fino, inequigranular, hipidiomorfa, conformada por un 35% de fenocristales y un 65% de masa fundamental. Los fenocristales forman textura porfídica, y consisten en 20% de plagioclasa subhedral de hasta 4 mm, moderadamente alteradas a sericita; 10% de feldespato potásico subhedral a anhedral de hasta 2 mm, alterados moderadamente a sericita; 3% de cúmulos de yeso; y 2% de opacos subhedrales a anhedrales de hasta 0,6 mm.

La masa fundamental está conformada por un 50% de cuarzo, 5% de anhidrita, 5% de sericita, 2% de carbonatos y 3% de opacos. Los minerales de alteración indican una intensidad débil.

La mineralización metálica (5% en total) consiste en bornita (2%), calcopirita (1%), magnetita y trazas de covelina, y se presenta en cúmulos diseminada y en vetillas.

La categoría de empaquetamiento puede corresponder a la 2: cristales aislados cercanos o 3: cúmulos de cristales o textura glomeroporfídica.

## **OR2 – 5.88 – 6.20**

Roca de color gris a gris claro de grano medio a fino, inequigranular, hipidiomorfa, conformada por un 30% de fenocristales y un 70% de masa fundamental. Los fenocristales forman textura porfídica, y consisten en 15% de plagioclasa subhedral a euhedral de hasta 2 mm; 7% de feldespato potásico subhedral a anhedral de hasta 1 mm, alterados débilmente a anhidrita; 3% de cuarzo anhedral a subhedral de hasta 1 mm; 3% de xenolitos máficos de hasta 4 mm, alterados a sericita y biotita; y 2% de opacos subhedrales a anhedrales de hasta 0,5 mm.

La masa fundamental está conformada por un 47% de cuarzo de diferentes tamaños, 10% de biotita, 5% de sericita, 3% de anhidrita, 2% de carbonatos y 3% de opacos. Los minerales de alteración indican una intensidad débil.

La mineralización metálica (5% en total) consiste en bornita (2%), calcopirita (1%), magnetita y trazas de covelina, y se presenta en cúmulos diseminada y en vetillas.

La categoría de empaquetamiento corresponde a la 1: cristales aislados lejanos.