



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

ANÁLISIS DE PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE ALGUNAS ROCAS COMUNES EN CHILE.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

EIAL SALINAS RIVEROS

PROFESORA GUÍA:
ALEJANDRA SEREY AMADOR

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
MARISOL LARA CASTILLO
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

SANTIAGO DE CHILE
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Eial Salinas Riveros
FECHA: 17/12/2018
PROFESORA GUÍA: Alejandra Serey Amador

ANÁLISIS DE PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE ALGUNAS ROCAS COMUNES EN CHILE.

Las rocas poseen propiedades mecánicas las cuales definen la capacidad del material para resistir acciones externas o internas que implican la aplicación de fuerzas sobre el mismo, además de parámetros geológicos-geotécnicos, los cuales varían en distintos tipos de rocas. Este trabajo, tiene como finalidad realizar una caracterización geotécnica y posteriormente un análisis del comportamiento mecánico a partir de correlaciones entre los parámetros de las rocas ensayadas en el Laboratorio de Block Caving del Departamento de Minas, mediante una descripción de los parámetros geológicos-geotécnicos (UCS, ángulo de fricción, cohesión, módulo de Young, coeficiente de Poisson, rugosidad/JRC) presentes en probetas de rocas ensayadas.

Se realiza un trabajo de reconocimiento, registro y organización de muestras disponibles para armar un catastro de todo el material con el cual se dispone y se recopila información de ensayos anteriores realizados en el laboratorio, los cuales entregan los valores de cohesión (C), ángulo de fricción interna (ϕ), módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν) (pertenecientes al laboratorio de Block Caving). El resto de los parámetros se obtuvieron mediante la revisión y descripción de muestras de mano, obtenidas de distintos lugares de Chile. Se describieron características como: mineralogía, rugosidad, alteraciones, dureza, etc. Se realizaron diagramas de dispersión de datos de los parámetros (UCS, ángulo de fricción, cohesión, módulo de Young, coeficiente de Poisson, rugosidad/JRC) con respecto a la litología y JRC.

Entre los resultados de este trabajo, se comparó la litología con parámetros de roca intacta, como la compresión simple (UCS), el ángulo de fricción (ϕ), la cohesión (C), valores para el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν).

Para resultados de ensayos realizados en discontinuidades, se compara el coeficiente de rugosidad (medido después del ensayo) y la mineralogía (al ser cuarzo el relleno de las cuatro muestras), con la cohesión y el ángulo de fricción.

En general, para roca intacta la mayoría de los parámetros geomecánicos se encontraban dentro de los rangos propuestos bibliográficamente. Existe un número menor de muestras que se alejan de los valores referenciales, siendo la meteorización, alteración y variación mineralógica presentes en estas muestras posiblemente las responsables. En cambio, para discontinuidades se encontró una relación entre el coeficiente de rugosidad (JRC), mineralogía, cohesión (C) y ángulo de fricción (ϕ), lamentablemente este análisis se realizó solamente con 4 muestras, razón por la cual no se puede concluir nada al respecto.

Agradecimientos

A mi familia, mis padres y hermano, por apoyarme en los buenos y malos momentos, por siempre estar ahí cuando se les necesitaba, entender y acompañarme en cada una de mis decisiones.

A Camila, mi amiga y compañera en este largo viaje por la universidad, siempre enseñándome todo y llenando de felicidad mis días.

A Alejandra Serey, por su apoyo, buenos consejos y preocupación; por guiarme hacia delante cuando no podía ver el camino.

A Sofía Rebolledo, por sus recomendaciones, cariño y gran disposición. Por ser una de las personas más comprensivas y entregadas que he conocido.

A Marisol Lara, por aceptar ser parte de la comisión evaluadora, y por ser la gran persona y docente que tuve el privilegio de tener como profesora.

A Blanca Baccola, por ser la persona más preocupada por todos, todos los alumnos del departamento y ser la primera persona que me ayudó a encontrar el camino de vuelta.

A David Veloz y Flavia Polanco, quienes dieron toda su disposición para ayudarme en el laboratorio, enseñándome y compartiendo conmigo el día a día.

A Javier Vallejos, por conceder el espacio para poder trabajar en el laboratorio de Block Caving del departamento de Ingeniería en Minas.

A Vicente Piel, por tener una gran disposición, ganas de trabajar y ayudarme con el trabajo pesado en el laboratorio.

A mis amigos, quienes han estado en todo este camino, haciéndolo un completo agrado.

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
2.	Formulación.....	2
2.1	Objetivos.....	2
2.1.1	Objetivo General.....	2
2.1.2	Objetivos Específicos	2
2.2	Metodología.....	3
3.	Marco teórico.....	5
3.1	Introducción.....	5
3.2	Roca intacta.....	6
3.2.1	Ensayo uniaxial o de compresión simple (UCS).....	6
3.2.2	Ensayo de compresión triaxial.....	7
3.2.3	Resistencia y parámetros resistentes	8
3.2.4	Deformabilidad.....	9
3.2.5	Grado de meteorización y alteración	11
3.3	Discontinuidades.....	12
3.3.1	Tipos de discontinuidades	12
3.3.2	Características de las discontinuidades.....	13
	Discontinuidades con relleno.....	14
3.3.3	Resistencia al corte de los planos de discontinuidad.....	15
3.3.4	Coefficiente de rugosidad de la discontinuidad. JRC	17
3.4	Macizo rocoso.....	18
4.	Resultados.....	19
4.1	Litología vs Resistencia a la Compresión Simple	23
4.1.1	Análisis del Diagrama 1	25
4.2	Litología vs Ángulo de Fricción	26
4.2.1	Análisis del Diagrama 2	27
4.3	Litología vs Cohesión	28
4.3.1	Análisis del Diagrama 3	29
4.4	Litología vs Módulo de Young.....	30
4.4.1	Análisis del Diagrama 4	32
4.5	Litología vs Coeficiente de Poisson.....	33
4.5.1	Análisis del Diagrama 5	34

4.6	Coeficiente de Rugosidad vs Cohesión de discontinuidades	35
4.6.1	Análisis del Diagrama 6	36
4.7	Coeficiente de Rugosidad vs Ángulo de Fricción de discontinuidades	37
4.7.1	Análisis del Diagrama 7	38
5.	Discusiones	39
6.	Conclusiones	47
7.	Bibliografía	48
ANEXO	51

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Ensayo de Compresión Simple (Figura extraída de Prodyogi).	7
Ilustración 2. Ensayo de compresión triaxial (Figura extraída de Prodyogi).	8
Ilustración 3. Resistencia al corte peak y residual (GdV, 2002).	15
Ilustración 4. Celda de Hoek (GdV, 2002).	16
Ilustración 5. Perfiles para estimar el Coeficiente de Rugosidad JRC (GdV, 2002).	17
Ilustración 6 Porción de las probetas de trabajos y estudios anteriormente realizados, almacenadas en el laboratorio de Block Caving del departamento de Ingeniería en Minas de la Universidad de Chile.	39

Índice de Tablas

Tabla 1. Parámetros Resistentes de Roca Intacta (GdV, 2002).	9
Tabla 2. Constantes Elásticas en Roca Intacta (GdV, 2002).	10
Tabla 3. Grado de Meteorización ISRM (1981).	11
Tabla 4 Criterios para determinar el grado de alteración de las paredes.	11
Tabla 5. Parámetros Resistentes de Discontinuidades con Rellenos ((GdV, 2002)).	16
Tabla 6. Tabla de Recopilación de Datos Geológico-Geotécnicos (Parte 1)	20
Tabla 7. Tabla de Recopilación de Datos Geológico-Geotécnicos (Parte 2)	21
Tabla 8. Tabla de Recopilación de Datos Geológico-Geotécnicos: Discontinuidades	22
Tabla 9. Comparación de rangos de resistencia a la compresión simple en roca intacta entre otros autores y este trabajo.	24
Tabla 10. Comparación de rangos de Ángulo de Fricción en roca intacta entre otros autores y este trabajo.	27
Tabla 11. Comparación de rangos de Cohesión en roca intacta entre *González de Vallejo, 2002 y este trabajo.	29
Tabla 12. Comparación de rangos del Módulo de Young en roca intacta entre otros autores y este trabajo.	31
Tabla 13. Comparación de rangos del Coeficiente de Poisson en roca intacta entre otros autores y este trabajo.	34
Tabla 14. Valores de cohesión respecto a la rugosidad en muestras ensayadas en la discontinuidad (Este trabajo).	36
Tabla 15. Valores del ángulo de fricción respecto a la rugosidad en muestras ensayadas en la discontinuidad (Este trabajo).	38
Tabla 16 Muestras fuera de los rangos descritos en bibliografía.	40
Tabla 17 Estabilidad general y meteorización de minerales formadores de roca (Cabria, 2015). ..	44
Tabla 18 Tablas de rugosidad versus cohesión y ángulo de fricción.	46

Índice de Diagramas

Diagrama 1. Litología vs Resistencia a la Compresión Simple (UCS).....	23
Diagrama 2. Litología vs Ángulo de Fricción (ϕ)	26
Diagrama 3. Litología vs Cohesión (C).....	28
Diagrama 4. Litología vs Módulo de Young (E).....	30
Diagrama 5. Litología vs Coeficiente de Poisson (ν).....	33
Diagrama 6. Coeficiente de Rugosidad (JRC) vs Cohesión (C).....	35
Diagrama 7. Coeficiente de Rugosidad (JRC) vs Ángulo de Fricción (ϕ).....	37

1. Introducción

Las rocas poseen propiedades mecánicas las cuales definen la capacidad del material para resistir acciones externas o internas que implican la aplicación de fuerzas sobre el mismo, además de parámetros geológicos-geotécnicos, los cuales varían en distintos tipos de rocas. De esta manera se analizarán los parámetros de varias muestras, en busca de posibles correlaciones entre estos y de esta forma determinar alguna tendencia. Los macizos rocosos, mecánicamente hablando son medios discontinuos, anisótropos y heterogéneos, que se componen de una matriz (roca intacta) y discontinuidades. La roca intacta corresponde a el material rocoso sin discontinuidades y mecánicamente se caracteriza por su densidad, resistencia y deformabilidad, dados por los parámetros de roca intacta: resistencia a la compresión simple (UCS), tracción, módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν), etc. Y por otro lado las discontinuidades corresponden a cualquier separación en el continuo de la roca, estas condicionan el comportamiento geomecánico e hidráulico del macizo rocoso. Los valores de los parámetros obtenidos de las probetas son en su mayoría de roca intacta y en menor proporción a discontinuidades. A partir de los resultados, se puede analizar el comportamiento de estos parámetros para distintas litologías comunes en la geología de Chile y de esta forma estandarizar los resultados dentro de rangos esperados, además de reconocer dependencias entre distintos factores.

Dentro de los estudios que son relevantes para este trabajo, se encuentran variados autores que analizan estos parámetros (UCS, ángulo de fricción, cohesión, módulo de Young, coeficiente de Poisson, rugosidad/JRC) de forma independiente, principalmente Luis González de Vallejo (González de Vallejo, 2002) y Richard Goodman (Goodman,1989), quienes presentan la mayor parte de material existente respecto a esta materia. Otros autores como Gerceck en el año 2007 y Kahraman en el año 2001, aportan al estudio, pero en una manera mucho más limitada, específicamente acotados a una litología.

En la bibliografía generada por estos autores y otros estudios, no se analiza si existe una correlación entre los distintos parámetros, de esta forma se realizará un análisis de las propiedades geomecánicas, las cuales fueron ensayadas en el laboratorio de Block Caving del departamento en Minas de la Universidad de Chile, los objetivos específicos son: realizar una descripción detallada de los parámetros geológicos-geotécnicos de las probetas del laboratorio, y realizar un análisis de las propiedades geotécnicas a partir de las correlaciones entre estos parámetros. Luego de realizar los ensayos y recopilación de información de los parámetros de interés se procederá a comparar correlaciones entre estos (UCS, ángulo de fricción, cohesión, módulo de Young, coeficiente de Poisson, rugosidad/JRC). A continuación, se explicará la formulación, seguido de un breve marco teórico para contextualizar la información con que se trabajará y abordará en los resultados, finalizando en una discusión y conclusiones.

2. Formulación

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo General

El trabajo, tiene como finalidad global realizar un análisis de las propiedades geotécnicas de algunas rocas comunes chilenas, mediante una caracterización geomecánica y posteriormente una búsqueda de correlaciones entre los parámetros de las rocas ensayadas en el Laboratorio de Block Caving del Departamento de Minas.

Para lo anterior, se buscará apoyo en los siguientes objetivos específicos.

2.1.2 Objetivos Específicos

1. Descripción detallada de los parámetros geológicos-geotécnicos (UCS, ángulo de fricción, cohesión, módulo de Young, coeficiente de Poisson, rugosidad/JRC) presentes en probetas de rocas ensayadas en el Departamento Ingeniería en Minas.
2. Realizar un análisis de las propiedades geotécnicas de algunas rocas comunes chilenas a partir de correlaciones entre los parámetros del objetivo específico 1, con algún parámetro geológico-geotécnico (litología, JRC).

2.2 Metodología

Metodologías para objetivo específico 1

Objetivo específico 1:

Descripción detallada de los parámetros geológicos-geotécnicos (UCS, ángulo de fricción, cohesión, módulo de Young, coeficiente de Poisson, rugosidad/JRC) determinadas en probetas de rocas ensayadas en el Departamento Ingeniería en Minas.

Actividades

Primero, de todo el stock de muestras almacenadas en el Laboratorio de Block Caving, se parte seleccionando las rocas que son representativas de las litologías más comunes en Chile, razón por la cual, se realiza un trabajo de reconocimiento, registro y organización de muestras disponibles para armar un catastro de todo el material con el que se dispone. Posteriormente, estas son reorganizadas según litologías y pertenencia a mismos proyectos, reduciendo la cantidad de probetas a 41 muestras representativas.

Se recopila información de los ensayos anteriormente realizados por el laboratorio para otros estudios y se describen posteriormente las probetas (Anexo). Estos ensayos anteriores incluyen principalmente valores de cohesión (C), ángulo de fricción interna (ϕ), módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν), pertenecientes al laboratorio de Block Caving.

El resto de los parámetros (UCS, módulo de Young, coeficiente de Poisson y rugosidad/JRC) se obtuvieron mediante análisis de muestra de mano en las probetas seleccionadas, utilizando herramientas como: martillo de Schmidt (determina UCS) y peine (mide JRC). Posteriormente, se completaron los registros faltantes (UCS, JRC, litología,) utilizando la información presente en los informes generados por personal del laboratorio.

Las muestras corresponden a distintos lugares de Chile y el registro de dónde pertenecen estas muestras es muy limitado.

Metodologías para el objetivo específico 2

Objetivo específico 2:

Realizar un análisis de las propiedades geotécnicas de algunas rocas comunes chilenas a partir de correlaciones entre 2 grupos de parámetros geológico-geotécnicos de las probetas estudiadas. El primer grupo asocia parámetros geotécnicos asociados a roca intacta. Estos son: Resistencia a la Comprensión Simple (UCS), ángulo de fricción (ϕ), Módulo de Young (E) y Coeficiente de Poisson (ν). El segundo grupo abarca 2 parámetros relevantes. Estas últimas son litología (roca intacta) y JRC (discontinuidades).

Actividades

Con toda la información recopilada (UCS, ángulo de fricción, cohesión, módulo de Young, coeficiente de Poisson, rugosidad/JRC) asociada a las muestras seleccionadas se realiza un análisis de las propiedades geotécnicas. Mediante diagramas de dispersión se realizaron distintas correlaciones para posteriormente comparar con bibliografía.

3. Marco teórico

3.1 Introducción

Las rocas poseen propiedades mecánicas las cuales definen la capacidad del material para resistir acciones externas o internas que implican la aplicación de fuerzas sobre el mismo, estos parámetros geológicos-geotécnicos, varían en distintos tipos de rocas. Los factores geológicos que dominan el comportamiento y las propiedades mecánicas de los macizos rocosos son (González de Vallejo, 2002):

- La litología y propiedades de la matriz rocosa.
- La estructura geológica y las discontinuidades.
- El estado de esfuerzos a que está sometido el material.
- El grado de alteración o meteorización.
- Las condiciones hidrogeológicas.

El tipo de roca y su grado de alteración determinan las propiedades resistentes de la matriz rocosa. La estructura geológica del macizo rocoso define zonas y planos de debilidad, concentración de tensiones, zonas proclives a la meteorización, caminos de flujo de agua, etc. Los esfuerzos que actúan sobre las rocas determinan los modelos de deformación y el comportamiento mecánico del conjunto del macizo; el estado de esfuerzos es consecuencia de la historia geológica, aunque el conocimiento de ésta no es suficiente para su evaluación cuantitativa. Un aspecto importante en el estudio de los macizos rocosos es la influencia de los procesos de alteración o meteorización sobre algunos tipos de rocas poco resistentes como las margas, lutitas, pizarras arcillosas, etc., cuyas propiedades varían considerablemente con el paso del tiempo ante su exposición a las condiciones atmosféricas o a la acción del agua, o debido al cambio en el estado de esfuerzos, factores que suelen ir asociados. En el caso de construcción de una obra de ingeniería sobre o en este tipo de materiales, debe tenerse en cuenta que su resistencia puede disminuir después de un tiempo hasta alcanzar el límite de estabilidad (González de Vallejo, 2002).

Los macizos rocosos, mecánicamente hablando son medios discontinuos, anisótropos y heterogéneos, que se componen de una matriz (roca intacta) y discontinuidades. La roca intacta corresponde a el material rocoso sin discontinuidades y mecánicamente se caracteriza por su densidad, resistencia y deformabilidad, dados por los parámetros de roca intacta: resistencia a la compresión simple (UCS), tracción, módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν), etc. Y por otro lado las discontinuidades corresponden a cualquier separación en el continuo de la roca, estas condicionan el comportamiento geomecánico e hidráulico del macizo rocoso.

3.2 Roca intacta

Material rocoso sin discontinuidades o bloques de roca intacta entre discontinuidades (muestra de mano o mayor). A pesar de considerarse continua es heterogénea y anisótropa, ligada a la fábrica, textura y estructura, mineral. Mecánicamente, la matriz rocosa se caracteriza por su densidad, resistencia y deformabilidad, dadas por parámetros de roca intacta: resistencia a la compresión simple (UCS) y a la tracción, módulo de Young, razón de Poisson, etc. (González de Vallejo, 2002)

3.2.1 Ensayo uniaxial o de compresión simple (UCS)

El ensayo permite determinar en laboratorio la resistencia uniaxial no confinada de la roca, o resistencia a compresión simple (UCS), y sus constantes elásticas: el módulo de Young (E , parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza.) y coeficiente de Poisson (ν , parámetro característico de cada material que indica la relación entre las deformaciones longitudinales que sufre el material en sentido perpendicular a la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo). Es, por tanto, un ensayo para la clasificación de la roca por su resistencia y para la determinación de su deformabilidad. La relación entre los esfuerzos aplicados en el ensayo es: $\sigma_1 \neq 0$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

En los resultados de los ensayos de laboratorio influyen tanto los factores referentes a la naturaleza y condición de la roca como a las condiciones del ensayo. El ensayo se ve usualmente como se muestra en la Ilustración 1. Con respecto a las condiciones de la roca como el ensayo, según González de Vallejo (2002), los aspectos más importantes son:

- Forma y volumen de la probeta.
- Preparación y tallado de la probeta.
- Dirección de aplicación de la carga (en rocas con anisotropía).
- Velocidad de aplicación de la carga.

La distribución de esfuerzos varía con la geometría de la probeta. La causa de la variación se debe principalmente a la fricción entre la probeta y la placa de aplicación de la carga. La resistencia a compresión simple disminuye al aumentar el volumen de la probeta. El efecto de concavidad que suele aparecer al inicio de la rama elástica de la curva esfuerzo-deformación, puede ser considerablemente reducido si se consigue el paralelismo de las bases de la probeta.

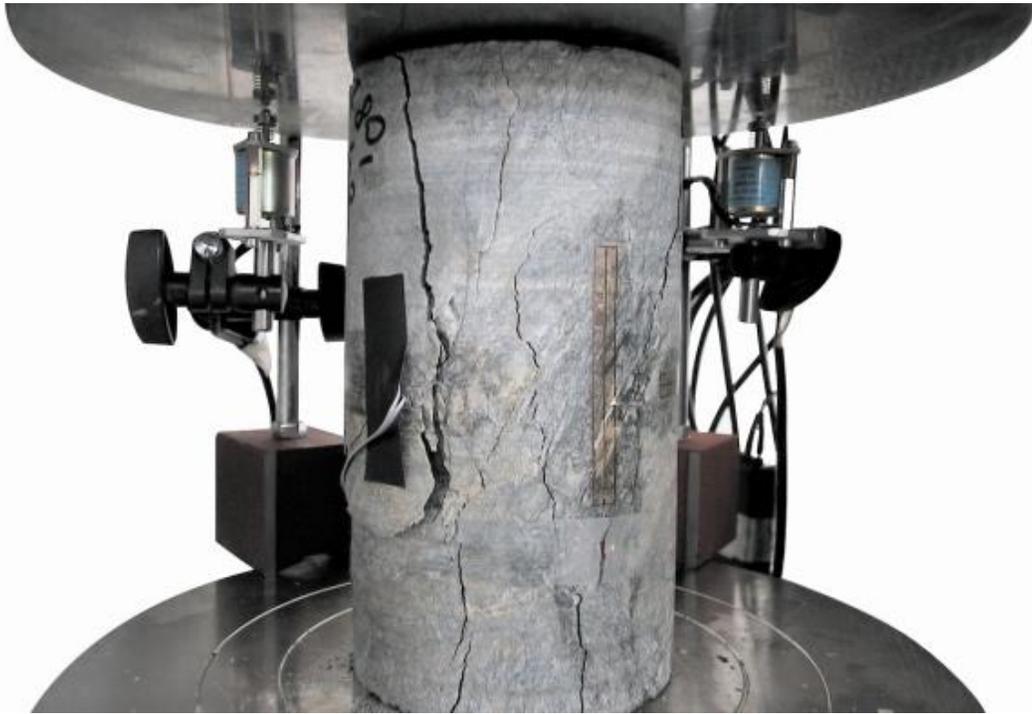


Ilustración 1. Ensayo de Compresión Simple (Figura extraída de Prodyogi).

3.2.2 Ensayo de compresión triaxial

Este ensayo representa las condiciones de las rocas *in situ* sometidas a esfuerzos confinantes, mediante la aplicación de presión hidráulica uniforme alrededor de la probeta, como se puede ver en la Ilustración 2. Permite determinar la envolvente o línea de resistencia del material rocoso ensayado, a partir de la que se obtienen los valores de sus parámetros resistentes cohesión (c , es la fuerza de unión entre las partículas minerales que forman la roca) y fricción (ϕ , es el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca). El ensayo de compresión triaxial es el más extendido de los ensayos de compresión multiaxial en mecánica de rocas. La relación entre los esfuerzos aplicados a la probeta es: $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$

Los resultados del ensayo de compresión triaxial dependerán fundamentalmente, además de las características de la roca, de la presión confinante aplicada. El valor de la resistencia compresiva para un determinado valor de σ_3 se obtiene dividiendo la fuerza aplicada por la sección de la probeta. La resistencia peak será diferente en cada caso, aumentando según lo hace σ_3 . La interpretación de los resultados de este ensayo se basa en la aplicación del criterio de rotura de Mohr-Coulomb. A partir de las curvas $\sigma - \epsilon$ obtenidas para diferentes valores de σ_3 , se pueden dibujar los círculos de Mohr y la envolvente de rotura, que proporciona los valores de c y ϕ del material ensayado (González de Vallejo, 2002).



Ilustración 2. Ensayo de compresión triaxial (Figura extraída de Prodyogi).

3.2.3 Resistencia y parámetros resistentes

La resistencia es función de las fuerzas cohesivas y friccionales del material. La cohesión, c , es la fuerza de unión entre las partículas minerales que forman la roca. El ángulo de fricción interna, ϕ , es el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca; para la mayoría de las rocas este ángulo varía entre 25° y 45° . La fuerza friccional depende del ángulo de fricción y del esfuerzo normal, σ_n , actuando sobre el plano considerado. La resistencia de la roca no es un valor único, ya que además de los valores de c y ϕ , depende de otras condiciones, como la magnitud de los esfuerzos confinantes, la presencia de agua en los poros o la velocidad de aplicación de la carga de rotura. También, incluso en rocas aparentemente isótropas y homogéneas, los valores de c y ϕ pueden variar según el grado de cementación o variaciones en la composición mineralógica. En la Tabla 1 se incluyen valores característicos de la cohesión y fricción de la matriz rocosa. Ambos parámetros se determinan a partir del ensayo de compresión triaxial de laboratorio. (González de Vallejo, 2002)

Tabla 1. Parámetros Resistentes de Roca Intacta (González de Vallejo,2002).

roca intacta	resistencia a compresión simple (Mpa)	
	valores medios	rango de valores
Andesita	210-320	100-500
Anfibolita	280	210-530
Anhidrita	90	80-130
Arenisca	55-140	30-235
Basalto	150-215	80-350
Caliza	80-140	60-200
Cuarcita	200-320	100-500
Diabasa	240-350	130-365
Diorita	180-245	120-335
Dolerita	200-300	100-350
Dolomía	90-250	65-350
Esquisto	50-60	20-160
Gabro	210-280	180-300
Gneiss	160-200	85-250
Granito	170-230	100-300
Grauvaca	180	80-220
Limolita		35-250
Lutita	30-70	10-100
Marga	70-140	70-190
Mármol	120-200	60-250
Pizarra	100-180	90-250
Sal	12	5-30
Toba		10-46
Yeso	25	10-40

roca	Cohesión (Mpa)	Angulo de fricción (°)
Andesita	28	45
Arenisca	8-35	30-50
Basalto	20-60	48-55
Caliza	5-40	35-50
Caliza margosa	1-6	30
Cuarcita	25-70	40-55
Diabasa	90-120	40-50
Diorita	15	50-55
Dolomía	22-60	25-35
Esquisto	25 20-15*	25-30* 20-30*
Gabro	30	35
Gneiss	15-40	30-40
Granito	15-50	45-58
Grauvaca	6-10	45-50
Mármol	15-35	35-45
Lutita	3-35	40-60 12-25*
Pizarra	10-50 <10*	40-55 15-30*
Toba	0,7	
Yeso		30

(*) En superficies de laminación o esquistocidad
 Datos seleccionados a partir de Walthan (1999), Rahn (1986), Goodman (1989), Farmer (1968), Jiménez Salas y Justo Alpañés (1975)

Datos seleccionados a partir de Walthan (1999), Rahn (1986), Goodman (1989), Farmer (1968), Jiménez Salas y Justo Alpañés (1975)

3.2.4 Deformabilidad

Es la propiedad que posee la roca de alterar su forma en respuesta a fuerzas externas. Según intensidad y el modo de la fuerza en conjunto a las características mecánicas de la roca, la deformación será permanente o elástica (recupera su forma original después de la fuerza). La deformabilidad de la roca se expresa por sus constantes elásticas E y ν :

- $E = \sigma / \varepsilon_{\alpha\alpha}$ (Unidades de esfuerzo)
- $\nu = \varepsilon_t / \varepsilon_{\alpha\alpha}$ (Adimensional)

El módulo de Young, E , define la relación lineal elástica entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida en la dirección de aplicación del esfuerzo, y el coeficiente de Poisson, ν , define la relación entre la deformación transversal y axial. Ambas constantes se obtienen del ensayo de compresión simple y definen las características de la deformación de la roca, ejemplos de estos valores en roca intacta se pueden ver en la Tabla 2. Una roca dura con comportamiento frágil presenta mayor módulo de Young y menor coeficiente de Poisson que una roca blanda con comportamiento dúctil (González de Vallejo, 2002).

Tabla 2. Constantes Elásticas en Roca Intacta (González de Vallejo, 2002).

Roca Intacta	Módulo de elasticidad estático, E kg/cm ² ($\times 10^6$)	Módulo de elasticidad dinámico, E_d kg/cm ² ($\times 10^6$)	Coefficiente de Poisson, ν
Andesita	3,0-4,0		0,23-0,32
Anfibolita	1,3-9,2	4,6-10,5	
Anhidrita	0,15-7,6		
Arenisca	0,3-6,1	0,5-5,6	0,1-0,4 (0,24-0,31)
Basalto	3,2-10	4,1-8,7	0,19-0,38 (0,25)
Caliza	1,5-9,0 (2,9-6,0)	0,8-9,9	0,12-0,33 (0,25-0,30)
Cuarcita	2,2-10 (4,2-8,5)		0,08-0,24 (0,11-0,15)
Diabasa	6,9-9,6	6,0-9,8	0,28
Diorita	0,2-1,7	2,5-4,4	
Dolomía	0,4-5,1	2,2-8,6	0,29-0,34
Gabro	1-6,5		0,12-0,20
Gneiss	1,7-8,1 (5,3-5,5)	2,5-10,5	0,08-0,40 (0,20-0,30)
Esquisto	0,6-3,9 (2,0)		0,01-0,31 (0,12)
Granito	1,7-7,7	1,0-8,4	0,1-0,4 (0,18-0,24)
Grauvaca	4,7-6,3	2,3-10,7	
Limolita	5,3-7,5	0,7-6,5	0,25
Lutita	0,3-2,2	1,0-7,0	0,25-0,29
Marga	0,4-3,4	1,0-4,9	
Mármol	2,8-7,2		0,1-0,4 (0,23)
Micasquisto	0,1-2,0		
Pizarra	0,5-3,0		
Sal	0,5-2,0		0,22
Toba	0,3-7,6		0,24-0,29
Yeso	1,5-3,6		

3.2.5 Grado de meteorización y alteración

El grado de meteorización de la roca es una observación importante en cuanto a que condiciona de forma definitiva sus propiedades mecánicas. Según avanza el proceso de meteorización aumentan la porosidad, permeabilidad y deformabilidad del material rocoso, al tiempo que disminuye su resistencia. Habla de una alteración natural de los materiales rocosos, que conlleva procesos físicos de disgregación y químicos de descomposición, véase Tabla 3 donde se especifican los grados de meteorización. Por otro lado, el grado de alteración corresponde a la modificación de las características de los materiales, de su composición o de sus propiedades, normalmente por exposición al ambiente. Es consecuencia de la interacción material normalmente por exposición al ambiente. Es consecuencia de la interacción material-ambiente. En la Tabla 4 se muestra una descripción de los grados de alteración.

Tabla 3. Grado de Meteorización ISRM (1981).

TERMINO	DESCRIPCIÓN	GRADO
Roca Fresca	No presenta signos visibles de meteorización en la roca: tal vez una leve decoloración en las superficies de las discontinuidades mayores.	I
Levemente Meteorizada	La decoloración indica meteorización de la roca y en las superficies de las discontinuidades. La roca en su totalidad puede estar decolorada por la meteorización y puede estar externamente algo más débil, que en su condición fresca.	II
Moderadamente Meteorizada	Menos de la mitad de la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos continuos.	III
Muy Meteorizada	Más de la mitad de la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos discontinuos.	IV
Completamente Meteorizada	Toda la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La estructura original del macizo aún se mantiene en gran parte intacta.	V
Suelo Residual	Toda la roca está convertida como suelo. La estructura del macizo y la fábrica del material están destruidas. Existe un gran cambio de volumen, sin embargo el suelo no ha sido transportado significativamente.	VI

Tabla 4 Criterios para determinar el grado de alteración de las paredes.

Código	Grado de Alteración	Descripción
1	Alta	La pared se encuentra totalmente alterada, y su grado de alteración es alto con respecto a la matriz de la roca.
2	Media	La pared se encuentra medianamente alterada y su grado de alteración es medio con respecto a la matriz.
3	Baja	La pared se encuentra ligeramente alterada en relación con la matriz.
4	Igual Matriz	El grado de alteración entre la pared y la matriz es similar.
5	Menor Matriz	La pared se encuentra menos alterada que la matriz de la roca.

3.3 Discontinuidades

Corresponden a cualquier separación en el continuo de roca que posee muy baja o nula resistencia a la tracción. Puede ser de origen mecánico o sedimentario que separa bloques (o matriz rocosa): planos de estratificación, diaclasas, planos de foliación, fallas, vetas, etc. La presencia de discontinuidades determina el comportamiento geomecánico e hidráulico del macizo rocoso. Este comportamiento está condicionado por la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad (González de Vallejo, 2002).

3.3.1 Tipos de discontinuidades

Las discontinuidades corresponden a planos de separación en el macizo rocoso, pueden tener orígenes sedimentarios, como planos de estratificación, o tectónicos como diaclasas o fallas. Las diaclasas o juntas son los planos de discontinuidad más frecuentes en los macizos rocosos, correspondientes a superficies de rotura de la roca donde no ha habido desplazamiento o ha sido muy pequeño. Afectan a cualquier tipo de roca. Atendiendo a su origen se distinguen varios tipos (González de Vallejo, 2002):

- Diaclasas de origen tectónico asociadas a plegamientos y a fallas.
- Diaclasas en rocas ígneas formadas por contracción del emplazamiento del cuerpo ígneo.
- Diaclasas de relajación debidas a una reducción de la carga litostática.
- Planos de estratificación. (superficies que limitan los estratos en las rocas sedimentarias).
- Superficies de laminación. (Discontinuidades que aparecen en las rocas sedimentarias).
- Planos de esquistosidad. (En rocas que han sufrido una deformación importante, perpendicular a la dirección de la compresión).
- Superficies de contacto litológico. (Planos de separación entre diferentes litologías).
- Fallas (Discontinuidades correspondientes a planos de rotura con desplazamiento relativo entre los bloques).

3.3.2 Características de las discontinuidades

Al describir las discontinuidades en un macizo rocoso hay características y parámetros que se tienen en consideración tales como: orientación, espaciado, continuidad, rugosidad, abertura, relleno, filtraciones y resistencia de las paredes. (González de Vallejo, 2002)

Algunos de ellos, como la rugosidad, abertura, relleno y resistencia de las paredes, determinan el comportamiento mecánico.

La **orientación** de una discontinuidad en el espacio queda definida por su buzamiento y por su dirección de buzamiento.

El **espaciado** es la distancia perpendicular entre los planos de discontinuidad. Influye en el comportamiento global de macizo rocoso. Si los espaciados son pequeños, la resistencia del macizo rocoso disminuye de forma considerable. El espaciado entre discontinuidades juega un papel muy importante en la permeabilidad del macizo rocoso.

La **continuidad** es la extensión del plano de discontinuidad. Define en gran parte si la matriz rocosa va a estar involucrada o no en los procesos de rotura del macizo rocoso, y en qué grado condiciona los parámetros resistentes globales del mismo.

La **rugosidad** de un plano de discontinuidad determina su resistencia al corte. A mayor rugosidad mayor es la resistencia. La presencia de irregularidades dificulta el movimiento durante los procesos de desplazamiento tangencial por corte a favor de las discontinuidades. (Capítulo 3.3.4)

La **abertura** es la distancia que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno. Este parámetro puede sufrir gran variación en diferentes zonas del macizo rocoso. La influencia de la abertura en la resistencia al corte es importante incluso en discontinuidades muy cerradas, al modificar las tensiones efectivas que actúan sobre las paredes.

En ocasiones las discontinuidades aparecen con **relleno** de materiales blandos arcillosos o con material rocoso de naturaleza distinta a la de las paredes. Las propiedades físicas y mecánicas del relleno, como la resistencia al corte, deformabilidad y permeabilidad pueden ser muy variables, y controlan el comportamiento de la discontinuidad; en el caso de materiales blandos o alterados, la

resistencia puede sufrir variaciones importantes a corto plazo si varía el contenido en humedad del relleno o si tiene lugar desplazamiento a lo largo de las juntas. Las características principales del relleno son su naturaleza, espesor, resistencia al corte y permeabilidad.

La **resistencia a la compresión simple** de la pared de una discontinuidad, que depende del tipo de matriz rocosa, de la existencia o no de relleno y del grado de alteración de las paredes, influye en la resistencia al corte y en la deformabilidad del plano de discontinuidad, sobre todo si no presentan relleno. Esta resistencia suele ser menor que la de la roca intacta por la alteración superficial. (Capítulo 3.2.1)

Discontinuidades con relleno

En el caso de discontinuidades rellenas la resistencia al corte de los planos estará condicionada por el tipo y espesor del relleno. Si el espesor es importante, generalmente la rotura sucederá a través del relleno. Si éste es duro y consolidado, la rotura puede producirse a favor del contacto roca-relleno. Las propiedades de los rellenos, como la resistencia al corte, deformabilidad y permeabilidad pueden ser muy variables, y controlan el comportamiento de la discontinuidad. El tipo de relleno puede ser (González de Vallejo, 2002):

- Arcilloso.
- Brechas o fragmentos angulares rocosos con mayor o menor proporción de matriz arcillosa.
- Materiales cristalizados (calcita, yeso, etc.).

Dependiendo del espesor del relleno, la rugosidad de los planos, parámetro definitivo en la resistencia al corte de discontinuidades limpias, puede tener una influencia nula en la resistencia al corte. Además, se debe tener en cuenta la dureza de los minerales en relleno, se pueden tener rellenos duros e.g., cuarzo, feldespatos, etc. y blandos e.g., yeso, calcita, arcillas, ceolitas, etc.

3.3.3 Resistencia al corte de los planos de discontinuidad

El estudio del comportamiento mecánico de las discontinuidades se basa en las relaciones entre los esfuerzos de corte aplicados y los desplazamientos tangenciales producidos. La resistencia de los planos de discontinuidad viene dada por el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, y se determina en el ensayo de resistencia al corte en laboratorio.

La resistencia al corte de las discontinuidades depende fundamentalmente de la fricción de los planos y, en menor cantidad, de la cohesión. La rugosidad o irregularidad de las paredes de la discontinuidad es uno de los factores que más influye en la resistencia friccional, sobre todo en discontinuidades sometidas a bajos esfuerzos normales.

La resistencia al corte peak, τ_p , de discontinuidades planas viene dada por la expresión de Mohr-Coulomb:

$$\tau_p = c + \sigma'_n \tan \varphi_p$$

donde σ'_n es el esfuerzo efectivo normal sobre el plano de discontinuidad, c es la cohesión una constante que representa la tensión cortante que puede ser resistida sin que haya ninguna tensión normal aplicada. y φ_p es su ángulo de fricción o rozamiento, en la Ilustración 3 se puede ver la diferencia entre la resistencia al corte peak y la resistencia al corte residual (González de Vallejo, 2002).

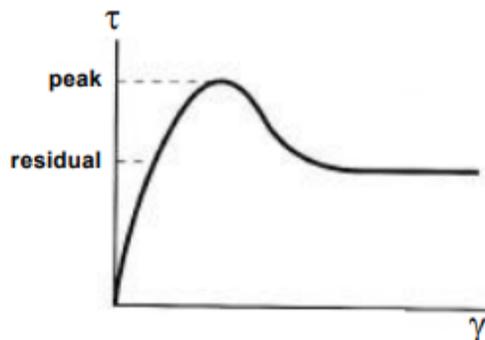


Ilustración 3. Resistencia al corte peak y residual (González de Vallejo, 2002).

El ensayo en celda de Hoek consiste en un aparato que posee una caja de corte desmontable en dos mitades (Ilustración 4) en donde se introducen las dos partes de la muestra tallada o probeta conteniendo el plano de discontinuidad, haciéndolo coincidir con la unión de las dos mitades de la caja. Las muestras se fijan a cada parte de la caja. La superficie a ensayar debe estar colocada paralela a la dirección de aplicación de la fuerza de cizalle, preferiblemente será cuadrada y con un área mínima de 2.500 mm. Las partes superior e inferior de la caja deben estar suficientemente separadas para permitir la contracción vertical de la discontinuidad al ser cargada normalmente (González de Vallejo, 2002).

Tabla 5. Parámetros Resistentes de Discontinuidades con Rellenos (González de Vallejo, 2002).

Roca	Descripción	Resistencia de pico		Resistencia residual	
		Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de fricción (°)
Basalto	Brecha arcillosa con fragmentos rocosos.	2,4	42		
Caliza	Relleno arcilloso de 6 mm.			0	13
	Id. de 1 a 2 cm.	1	13-14		
	Id. < 1 mm.	0,5-2	17-21		
Dionita	Marga de 2 cm.	0	25	0	15-24
	Relleno de arcilla.	0	26,5		
	Relleno arcilloso de ≈ 15 cm de espesor.	0,41	14,5	0,22	17
Esquistos y cuarcitas	Relleno arcilloso 10-15 cm de espesor.	0,3-0,8	32		
	Relleno arcilloso fino en planos de estratificación.	6,1-7,4	41		
	Relleno arcilloso espeso en planos de estratificación.	3,8	31		
Granito	Fallas con relleno arcilloso.	0-1,0	24-25		
	Fallas con relleno arenoso.	0,5	40		
	Zona de cizalla, granito roto, roca desintegrada y rellenos arcillosos.	2,42	42		
Grauvaca	Relleno arcilloso de 1-2 mm en planos de estratificación.			0	21
Lutita	Relleno de arcilla.	0,6	32		
Pizarra	Arcilla en planos de estratificación.			0	19,5
	Alteradas y laminadas	0,5	33		

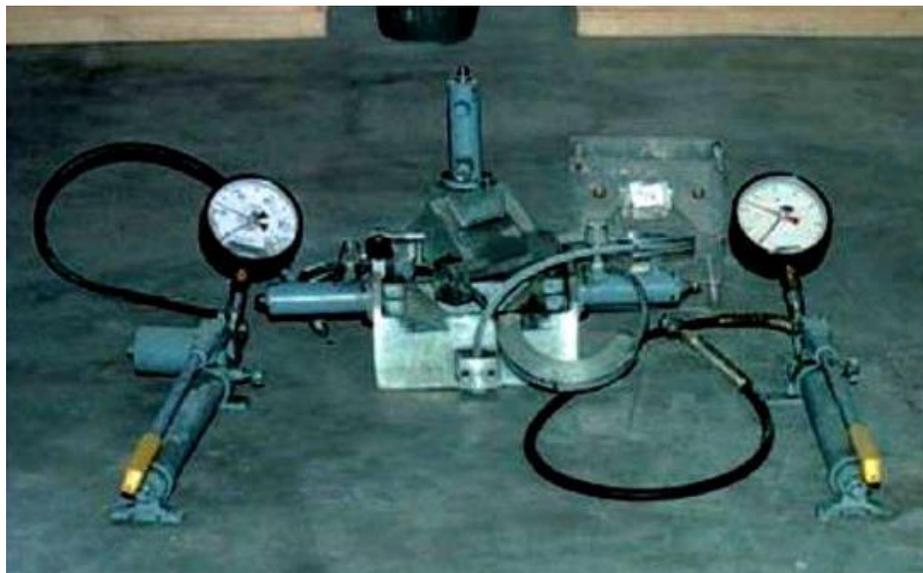


Ilustración 4. Celda de Hoek (González de Vallejo, 2002).

3.3.4 Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad. JRC

El coeficiente JRC depende de la rugosidad de las paredes de la discontinuidad, este valor ronda entre 1 y 20, a partir de perfiles de rugosidad estandarizados se puede determinar a cuál corresponde una muestra (Ilustración 2).

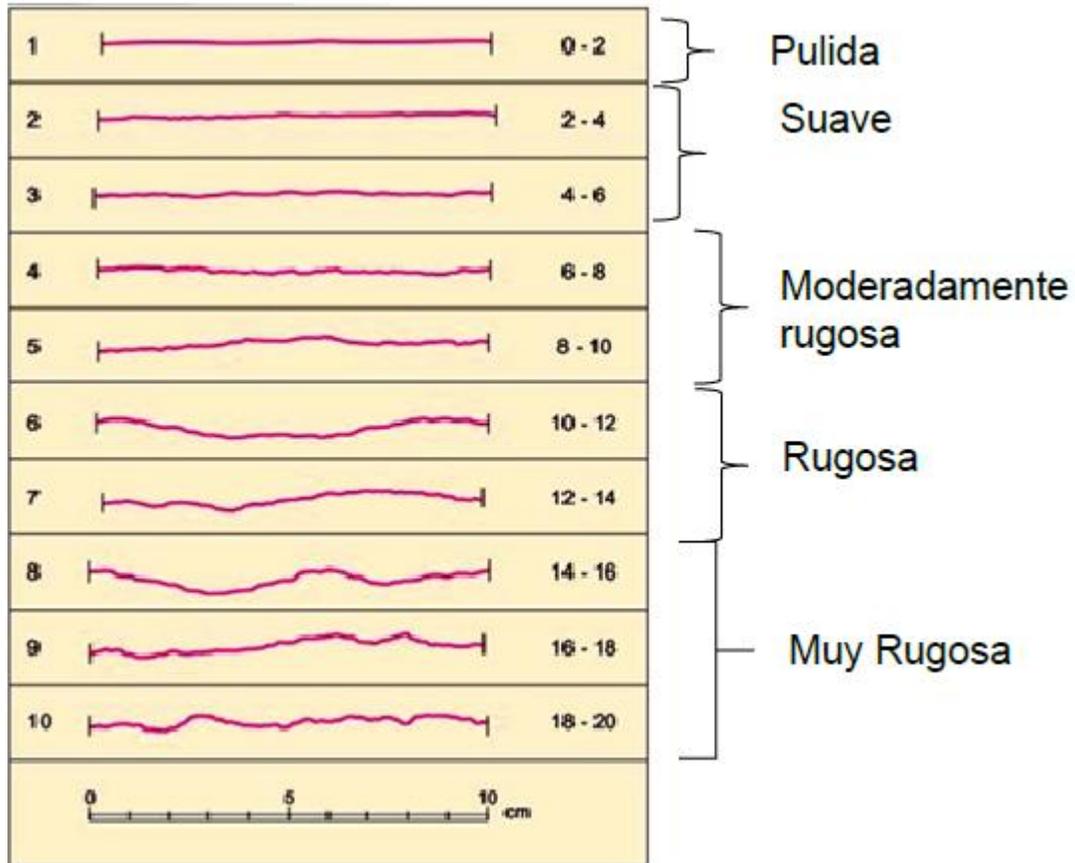


Ilustración 5. Perfiles para estimar el Coeficiente de Rugosidad JRC (González de Vallejo, 2002).

3.4 Macizo rocoso

El comportamiento mecánico del macizo rocoso, su modelo de deformación y sus mecanismos de rotura están condicionados por el número de familias de discontinuidades. La orientación de las diferentes familias con respecto a una obra o instalación sobre el terreno puede determinar, además, la estabilidad de esta. Para la caracterización global del macizo rocoso a partir de datos de afloramientos, además de la descripción de sus componentes, la matriz rocosa y las discontinuidades, deben ser considerados otros factores representativos del conjunto, como son: número y orientación de las familias de discontinuidades, tamaño de bloque e intensidad de fracturación y grado de meteorización (González de Vallejo, 2002).

4. Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de los parámetros geológicos-geotécnicos recopilados de las 41 muestras seleccionadas del laboratorio de Block Caving del Departamento de Ingeniería en Minas. Se encuentra la tabla general de datos (Tabla 6 y 7) y diagramas de dispersión comparando la correlación entre distintos factores de interés, elegidos por su importancia a nivel mecánico y disponibilidad de datos, tanto como para parámetros de roca intacta (Tabla 6 y Tabla 7), como para las muestras ensayadas en la discontinuidad (Tabla 8).

Análisis entre parámetros geomecánicos de roca intacta:

- Litología vs Resistencia a la Compresión Simple (UCS) (Diagrama 1)
- Litología vs Ángulo de Fricción (ϕ) (Diagrama 2)
- Litología vs Cohesión (C) (Diagrama 3)
- Litología vs Módulo de Young (E) (Diagrama 4)
- Litología vs Coeficiente de Poisson (ν) (Diagrama 5)

Análisis entre parámetros geomecánicos de discontinuidades:

- Coeficiente de Rugosidad (JRC) vs Cohesión (C) de discontinuidades (Diagrama 6)
- Coeficiente de Rugosidad (JRC) vs Ángulo de Fricción (ϕ) de discontinuidades (Diagrama 7)

Los valores de resistencia a la compresión simple (UCS) fueron obtenidos en laboratorio mediante el uso del martillo de Schmidt, contra la pared de las probetas. Los valores de cohesión (c), ángulo de fricción (ϕ) (para roca intacta como para discontinuidades), módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν), fueron extraídos de los informes elaborados por personal del laboratorio de Block Caving. Los parámetros asociados a roca intacta fueron obtenidos como se explicó anteriormente mediante ensayos de resistencia a la compresión simple (Capítulo 3.2.1) y ensayo triaxial (Capítulo 3.2.2). Los parámetros resistentes de las mediciones en discontinuidad se obtuvieron mediante el uso de la celda Hoek (Capítulo 3.3.3).

Tabla 6. Tabla de Recopilación de Datos Geológico-Geotécnicos (Parte 1) UCS, meteorización y litología con muestra de mano. Cohesión (C[MPa]), ángulo de fricción (ϕ [°]), módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν) de ensayos anteriores del Block Caving.

Código Roca	Litología	Tipo de roca	UCS [Mpa]	E [Gpa]	ν	ϕ [°]	C [Mpa]	Grado de meteorización
A1	Toba Lítica	Piroclástica	29	18	0,39	44,4	0,14	Roca Fresca
A2	Toba Cristalina	Piroclástica	26,2	12,5	0,45	<>	<>	Levemente Meteorizada
A3	Andesita	Ígnea Extrusiva	84	37,11	0,27	46	25	Roca Fresca
A4	Granodiorita	Ígnea Intrusiva	18	28,9	0,24	51	18,1	Roca Fresca
A5	Brecha	Sedimentaria	191	59,8	0,25			Roca Fresca
A6	Granito	Ígnea Intrusiva	0,4	<>	<>	<>	<>	Roca Fresca
A7	Arenisca	Sedimentaria	58	24,08	0,24	41	2,11	Levemente Meteorizada
A8	Conglomerado	Sedimentaria	20	62,1	0,13	47,2	8	Roca Fresca
A9	Arenisca	Sedimentaria	33	5	0,23	<>	<>	Roca Fresca
A10	Brecha Hidrotermal	Prot: Ígneo	59	41,9	0,21	<>	<>	Moderadamente Meteorizada
A11	Conglomerado	Sedimentaria	182	<>	<>	<>	<>	Levemente Meteorizada
A12	Granito	Ígnea Intrusiva	126	<>	<>	<>	<>	Roca Fresca
A13	Conglomerado	Sedimentaria	152	70	0,27	49	0,42	Levemente Meteorizada
A14	Conglomerado	Sedimentaria	77	20,7	0,19	38	1,9	Roca Fresca
A15	Brecha	Sedimentaria	12	2,9	0,26	<>	<>	Roca Fresca
A16	Andesita	Ígnea Extrusiva	170	60	0,3	<>	<>	Roca Fresca
A17	Granito	Ígnea Intrusiva	196	40,2	0,18	48	17,2	Roca Fresca
A18	Conglomerado	Sedimentaria	92	58,6	0,17	44,3	6,5	Levemente Meteorizada
A19	Brecha	Sedimentaria	35	38	0,12	<>	<>	Roca Fresca
A20	Granodiorita	Ígnea Intrusiva	95	26,2	0,36	42,5	12,1	Moderadamente Meteorizada
A21	Andesita	Ígnea Extrusiva	251	<>	<>	<>	<>	Levemente Meteorizada

Tabla 7. Tabla de Recopilación de Datos Geológico-Geotécnicos (Parte 2) UCS, meteorización y litología con muestra de mano. Cohesión (C[MPa]), ángulo de fricción (ϕ [°]), módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν) de ensayos anteriores del Block Caving.

Código Roca	Litología	Tipo de roca	UCS [Mpa]	E [Gpa]	ν	ϕ [°]	C [Mpa]	Grado de meteorización
A22	Cuarcita?	Metamórfica	184	4,5	1,75	42,9	26,8	Moderada a muy meteorizada
A23	Conglomerado Fino	Sedimentaria	62	54,8	0,14	<>	<>	Roca Fresca
A24	Andesita Porfírica	Ígnea Extrusiva	243	42,1	0,45	42,1	22	Levemente Meteorizada
A25	Toba Lítica	Piroclástica	27	16,8	0,71	36,2	0,91	Roca Fresca
A26	Andesita	Ígnea Extrusiva	205	25,4	0,65	42,2	25	Levemente Meteorizada
A27	Brecha Hidrotermal	Prot: Ígneo	180	36,5	0,74	<>	<>	Levemente Meteorizada
A28	Granodiorita	Ígnea Intrusiva	106	27,1	0,65	48,6	16,5	Moderadamente Meteorizada
A29	Granito	Ígnea Intrusiva	184	39,5	1,3	42,3	14,2	Levemente Meteorizada
A30	Diorita	Ígnea Intrusiva	212	26,5	1,2	52,5	12,3	Roca Fresca
A31	Brecha Hidrotermal	Prot: Ígneo	184	39,5	0,54	<>	<>	Levemente Meteorizada
A32	Caliza Recristalizada	Sedimentaria	102	2,53	0,21	36,5	8,9	Roca Fresca
A33	Diorita	Ígnea Intrusiva	223	32,5	1,4	51,4	9,8	Levemente Meteorizada
A34	Andesita	Ígnea Extrusiva	243	28,4	0,54	35,5	29	Levemente Meteorizada
A35	Diorita	Ígnea Intrusiva	298	24,9	0,9	49,5	11,3	Roca Fresca
A36	Andesita Porfírica	Ígnea Extrusiva	245	<>	<>	<>	<>	Levemente Meteorizada
A37	Toba Lítica	Piroclástica	41	14,1	0,54	44,2	0,87	Moderadamente Meteorizada
A38	Lutita Carbonatada	Sedimentaria	42	<>	<>	<>	<>	Levemente Meteorizada
A39	Diorita	Ígnea Intrusiva	184	28,6	0,89	55,4	9,1	Roca Fresca
A40	Toba Cristalina	Piroclástica	52	22,4	0,58	36,5	1,2	Roca Fresca
A41	Lutita Calcárea	Sedimentaria	36	42,5	<>	13,5	2,7	Levemente Meteorizada

Tabla 8. Tabla de Recopilación de Datos Geológico-Geotécnicos: UCS, JRC obtenidos en laboratorio, espesor (mm), mineralogía, meteorización y litología con muestra de mano. Cohesión (C[Mpa]), ángulo de fricción (ϕ [°]), módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν) de ensayos anteriores del Block Caving. En roca intacta (Amarillo) y en la discontinuidad (Azul) correspondientes a las muestras que poseían ensayo en celda de Hoek.

Código Roca	Litología	Tipo de roca	UCS [Mpa]	E [Gpa]	ν	ϕ [°]	C [Mpa]	Grado de meteorización
A3	Andesita	Ígnea Extrusiva	84	37,11	0,27	46	25	Roca Fresca
A7	Arenisca	Sedimentaria	58	24,08	0,24	41	2,11	Levemente Meteorizada
A13	Conglomerado	Sedimentaria	152	70	0,27	49	0,42	Levemente Meteorizada
A17	Granito	Ígnea Intrusiva	196	40,2	0,18	48	17,2	Roca Fresca

Código Roca	Mineralogía	Espesor	ϕ [°]	C [Mpa]	Rugosidad (JRC)
A3	Cuarzo	2 mm	50,85	0,09	6 a 8
A7	Cuarzo	<1 mm	57,17	0,14	4 a 6
A13	Cuarzo	<<1 mm	41,3	1,4	8 a 10
A17	Cuarzo	<1 mm	46,21	0,89	8 a 10

4.1 Litología vs Resistencia a la Compresión Simple

A continuación, se presenta un diagrama que agrupa las distintas litologías recolectadas en correlación con su índice de resistencia a la compresión simple (UCS). Cada subgrupo de muestras puede poseer un recuadro, el cual corresponde al rango de valores posibles de este parámetro según otros autores, estudios y ensayos.

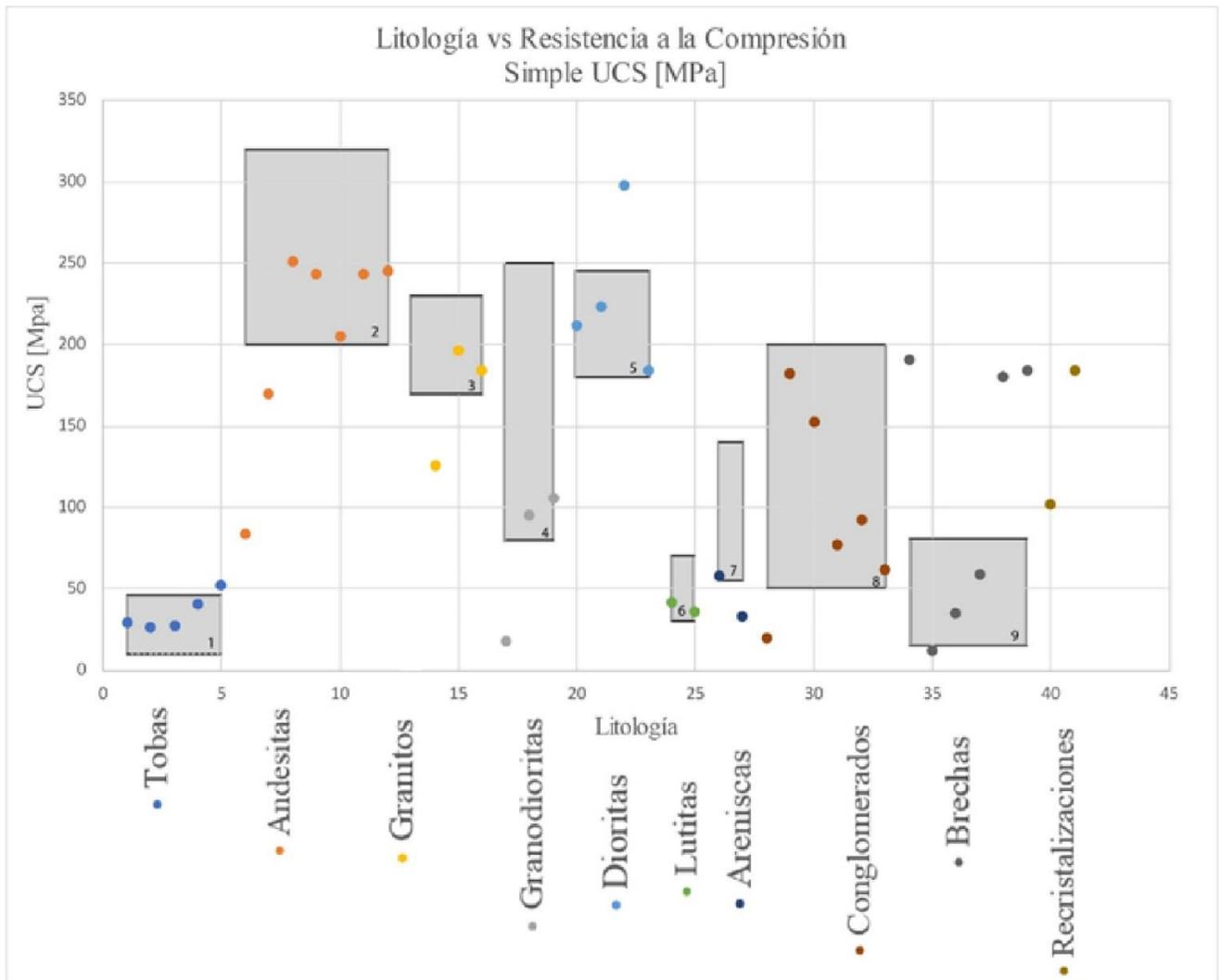


Diagrama 1. Litología vs Resistencia a la Compresión Simple (UCS). Agrupación de parámetros UCS, extraídos del análisis de muestras en laboratorio, seccionados según la litología de cada una de ellas. Los recuadros de color corresponden a los rangos en que se encuentran dichos parámetros, en estudios y recolección de datos de otros autores: González de Vallejo, 2002 (1,2,3,5,6,7); Hoek & Brown, 1997 (4); Kahraman, 2001 (9); CONAMA (8); Chau & Wong, 1996.

De acuerdo con la literatura, los valores de resistencia a la compresión simple de las litologías descritas se encuentran en los rangos a continuación adjuntos:

Tabla 9. Comparación de rangos de resistencia a la compresión simple en roca intacta entre otros autores y este trabajo.

Litología	UCS [Mpa] (Otros Autores) *	UCS [Mpa] (Este Trabajo)
Tobas	10-46	26-52
Andesitas	200-320	84-251
Granitos	170-230	0,4-196
Granodioritas	80-250	18-106
Dioritas	180-245	184-298
Lutitas	30-70	36-42
Areniscas	55-140	33-58
Conglomerados	50-200	20-182
Brechas	15-81	12-191
Recristalizaciones (Cuarcita/Caliza)	100-250/80-140	184/102

*Autores: *González de Vallejo, 2002; Hoek & Brown, 1997; Kahraman, 2001; Chau & Wong, 1996.*

4.1.1 Análisis del Diagrama 1

Los resultados obtenidos en esta sección al ser comparados con rangos propuestos por otros autores siguen una misma tendencia. Para las Tobas, se tiene cuatro de cinco muestras dentro del rango propuesto, y una muestra fuera del rango (superior), correspondiente a la muestra A40, una toba cristalina, a diferencia del resto de las Tobas que son líticas. En las Andesitas, cinco de siete muestras se encuentran dentro del rango propuesto en la literatura, dos de ellas fuera de este rango (A3 y A16), la única diferencia apreciable entre las muestras de este set es el grado de meteorización, con estas últimas dos en el rango de roca fresca y el resto con una leve meteorización. Los Granitos tienen la mitad de sus muestras dentro del rango sugerido por la literatura, fuera de este rango se tiene la muestra A6 y A12, con la primera de estas cerca de cero, resultado de un ensayo fallido en la muestra. En las Granodioritas, la muestra A4 se encuentra fuera de los rangos sugeridos, sin datos que muestren alguna diferencia significativa con el resto de las Granodioritas. De igual manera con las Dioritas, solo la muestra A35 se encuentra fuera del rango sugerido en la literatura, por sobre del rango sugerido. A continuación, las lutitas, ambas muestras se sitúan dentro de los rangos descritos por otros autores. Para las Areniscas, generar rangos para las distintas propiedades geológicas-geotécnicas es más complicado al ser rocas que pueden variar mucho su composición y dependiendo del lugar donde se hayan hecho los estudios, se puede tener un rango de valores distinto a otras zonas, siguiendo el rango sugerido (González de Vallejo, 2002), una de las muestras entra en el margen inferior del rango, pero según Suárez (1998) ambas se encuentran dentro de rango el cual va de 20 MPa a 170 MPa rango muy amplio incluso comparado con el rango propuesto en el diagrama 1 (González de Vallejo, 2002). Los Conglomerados testeados presentaron resultados variados, pero dentro de los rangos propuestos por la literatura, a excepción de la muestra A8, la cual posee características similares a todas las demás muestras, salvo la rugosidad. Para las Brechas se aprecian tres valores dentro del rango propuesto en la literatura y tres valores fuera de este, dos de estos corresponden a Brechas hidrotermales.

4.2 Litología vs Ángulo de Fricción

A continuación, se presenta un diagrama que agrupa las distintas litologías recolectadas en correlación con el ángulo de fricción. Cada subgrupo de muestras puede poseer un recuadro, el cual corresponde al rango de valores posibles de este parámetro según otros autores, estudios y ensayos.

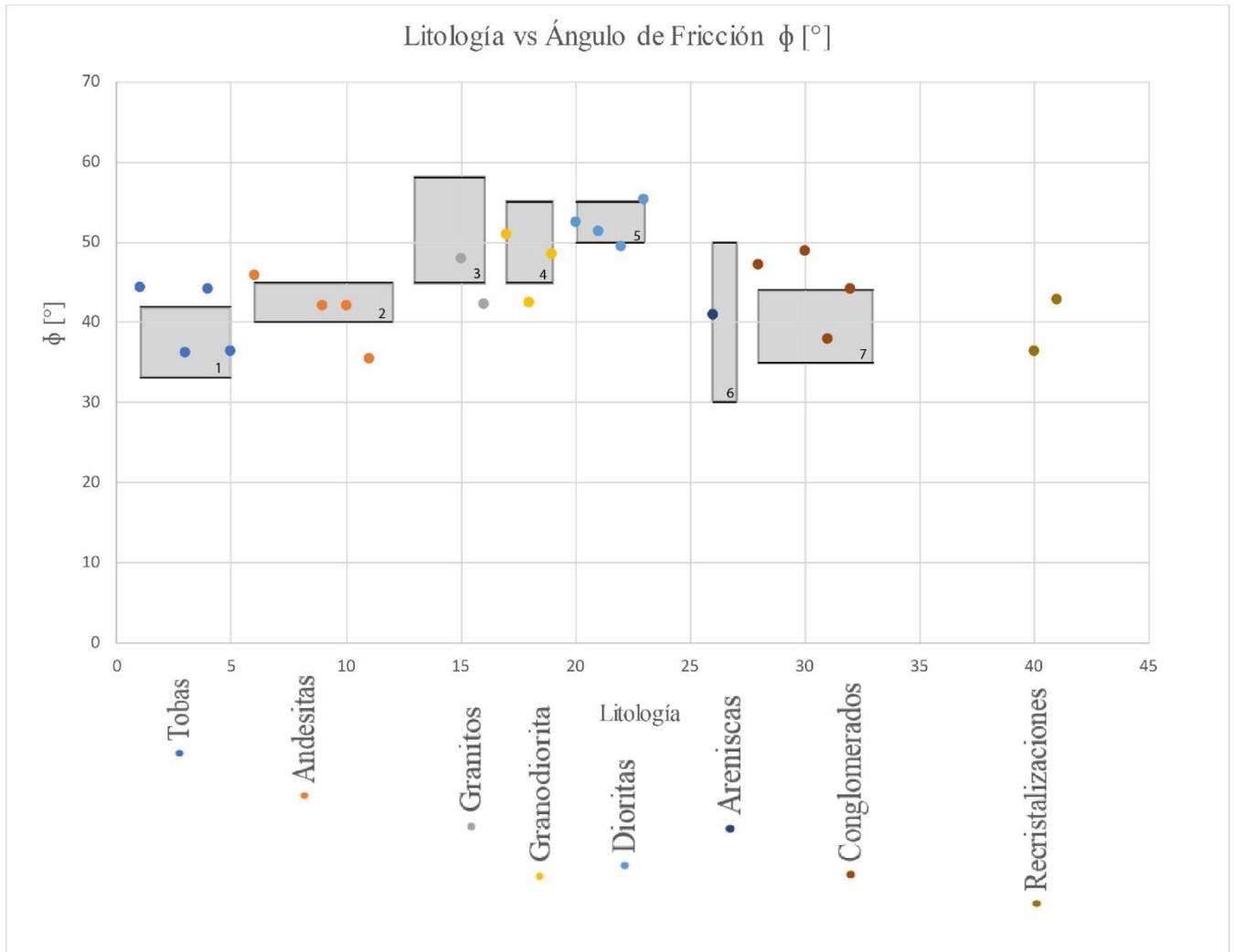


Diagrama 2. Litología vs Ángulo de Fricción (ϕ) Agrupación de parámetros de fricción, extraídos del análisis de muestras en laboratorio, seccionados según la litología de cada una de ellas. Los recuadros de color corresponden a los rangos en que se encuentran dichos parámetros, en estudios y recolección de datos de otros autores: Geo5 FineSoftware (1,7); González de Vallejo, 2002 (2,3,4,5,6,8).

De acuerdo con la literatura, los valores del ángulo de fricción de las litologías descritas se encuentran en los rangos a continuación adjuntos:

Tabla 10. Comparación de rangos de Ángulo de Fricción en roca intacta entre otros autores y este trabajo.

Litología	Ángulo de Fricción [°] (Otros Autores) *	Ángulo de Fricción [°] (Este Trabajo)
Tobas	33-42	36-44
Andesitas	40-45	35,5-46
Granitos	45-58	42-48
Granodioritas	45-55	42,5-51
Dioritas	50-55	49,5-55,4
Areniscas	30-50	41
Conglomerados	35-44	38-49
Recristalizaciones (Cuarcita/Caliza)	40-55°/35-50	42,9°/36,5

**Autores: González de Vallejo, 2002; Geo5 FineSoftware.*

4.2.1 Análisis del Diagrama 2

Los rangos descritos en otros trabajos son bastante ajustados, de todas formas, los datos obtenidos de las muestras se encuentran en los rangos o bien bastante cerca. Para las Tobas dos muestras se encuentran fuera de rango, A1 y A25 con aproximadamente 44°, dos grados fuera del rango lo cual es aceptable. En las Andesitas el rango es solo de cinco grados, haciéndolo muy ceñido y de esta forma la mitad de las muestras terminan fuera de rango, la muestra A34 cinco grados abajo del margen inferior. Para Granitos, Granodioritas y Dioritas, sucede exactamente la misma situación, con todos los datos dentro de rango, pero una muestra fuera de este (las muestras A29, A20 y A39 se encuentran fuera por uno o dos grados). Aun así, resultan ser valores aceptables con respecto a los rangos descritos en la bibliografía. Las Areniscas, poseen un rango muy amplio (más del doble si lo comparamos con los otros grupos). Finalmente, los Conglomerados en su mayoría presentaron resultados por sobre los rangos sugeridos en la literatura, entre uno a cinco grados, específicamente.

4.3 Litología vs Cohesión

A continuación, se presenta un diagrama que agrupa las distintas litologías recolectadas en correlación con el valor de la cohesión (C). Cada subgrupo de muestras puede poseer un recuadro, el cual corresponde al rango de valores posibles de este parámetro según otros autores, estudios y ensayos.

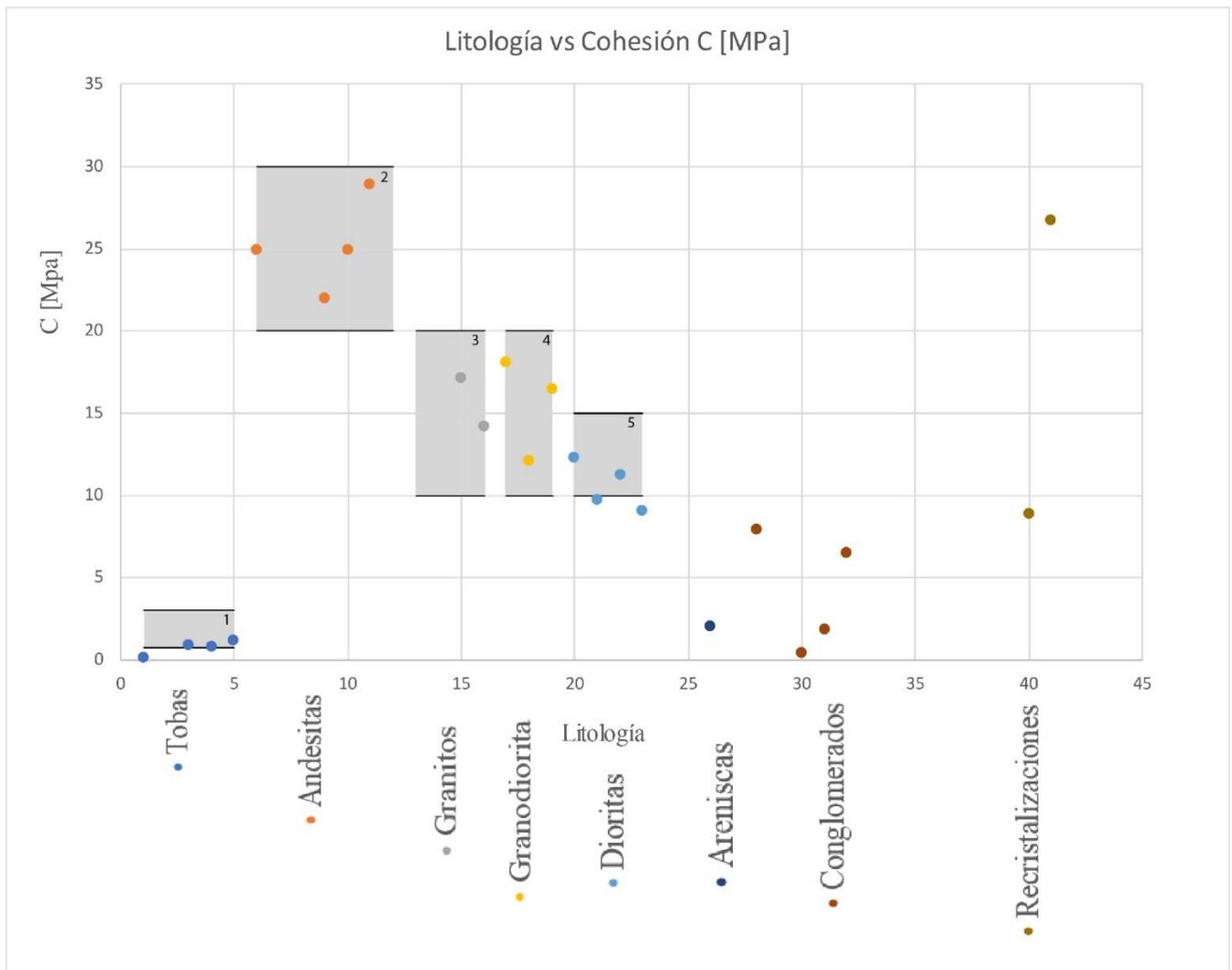


Diagrama 3. Litología vs Cohesión (C) Agrupación de parámetros de cohesión extraídos del análisis de muestras en laboratorio, seccionados según la litología de cada una de ellas. Los recuadros de color corresponden a los rangos en que se encuentran dichos parámetros, en estudios y recolección de datos de otros autores: González de Vallejo, 2002 (1,2,3,4,5).

De acuerdo con la literatura, los valores de la cohesión de las litologías descritas se encuentran en los rangos a continuación adjuntos:

Tabla 11. Comparación de rangos de Cohesión en roca intacta entre *González de Vallejo, 2002 y este trabajo.

Litología	Cohesión [Mpa] (Otros Autores) *	Cohesión [Mpa] (Este Trabajo)
Tobas	0,7- 3	0,14-1,2
Andesitas	20-30	22-29
Granitos	10-20	14,2-17,2
Granodioritas	10-20	12,1-18,1
Dioritas	10-15	9,1-12,3
Areniscas	Muy Variable [3-35]	2,11
Conglomerados	Muy Variable [3-35]	0,42-6,5
Recristalizaciones (Cuarcita/Caliza)	25-70/5-40	26/9

4.3.1 Análisis del Diagrama 3

En esta sección se decidió comparar con otras fuentes en solo cuatro grupos de rocas, debido a que, en algunos grupos los rangos son muy variables (Areniscas y Conglomerados). En cuanto a las Tobas se tiene que todas las muestras se encuentran dentro del rango sugerido, a excepción de la muestra A1 que se encuentra ligeramente por debajo de éste, así esta muestra se encuentra fuera de lo esperado tanto en cohesión como en ángulo de fricción. Avanzando a las Andesitas, el rango descrito según la bibliografía es bastante amplio, de esta manera todas las muestras se encuentran en el rango y no existe inconsistencias a lo esperado. Ya en los siguientes dos grupos, a pesar de poseer rangos un poco más ajustados que en las Andesitas, de igual manera las muestras revelaron valores que se asemejan a lo esperado, con todos los datos dentro del rango. Y finalmente las Dioritas, con un rango bastante aún más ceñido que los grupos anteriores posee dos muestras fuera de rango, las muestras A33 y A39, donde esta última también posee un valor fuera de rango en la sección anterior.

4.4 Litología vs Módulo de Young

A continuación, se presenta un diagrama que agrupa las distintas litologías recolectadas en correlación con su módulo de Young (E). Cada subgrupo de muestras puede poseer un recuadro, el cual corresponde al rango de valores posibles de este parámetro según otros autores, estudios y ensayos.

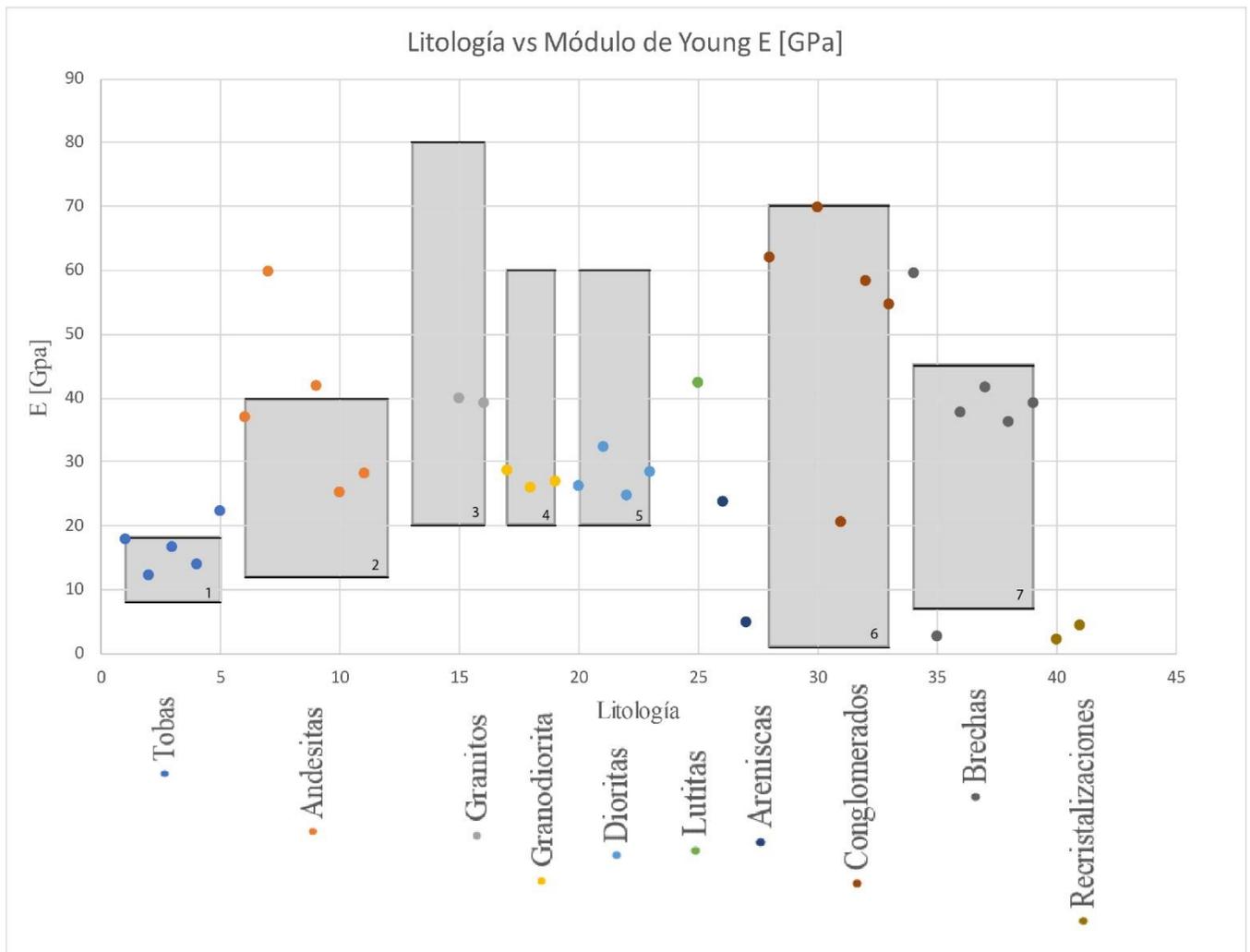


Diagrama 4. Litología vs Módulo de Young (E) Agrupación de parámetros de elasticidad (Módulo de Young) extraídos del análisis de muestras en laboratorio, seccionados según la litología de cada una de ellas. Los recuadros de color corresponden a los rangos en que se encuentran dichos parámetros, en estudios y recolección de datos de otros autores: Minera de Cobre Las Cruces, 2010 (1); Esquivel, 2015 (2,3,4,5); Kahraman, 2001 (6,7); Bieniawski, 1978; Dincer, 2004; Ide, 1936.

De acuerdo con la literatura, los valores del módulo de Young de las litologías descritas se encuentran en los rangos a continuación adjuntos:

Tabla 12. Comparación de rangos del Módulo de Young en roca intacta entre otros autores y este trabajo.

Litología	E [Gpa] (Otros Autores) *	E [Gpa] (Este Trabajo)
Tobas	8-18	12,5-22,4
Andesitas	12-40	25,4-60
Granitos	20-80	39,5-40,2
Granodioritas	20-60	26,2-28,9
Dioritas	20-60	24,9-32,5
Lutitas	-	42,5
Areniscas	-	5-24,8
Conglomerados	Muy Variable [1,5-70]	20,7-70
Brechas	Muy Variable [7-45]	2,9-59,8
Recristalizaciones (Cuarcita/Caliza)	-	4,5/2,5

*Autores: *Esquivel, 2015; Kahraman, 2001.*

4.4.1 Análisis del Diagrama 4

Como se describe anteriormente, el módulo de Young (E) es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza y depende de la energía de unión interatómica de los materiales, de esta forma los rangos posibles en que estos valores pueden estar en cada tipo de roca pueden ser amplios. Inicialmente en las Tobas, se tienen valores que pertenecen a los valores esperados según la bibliografía, a excepción de la muestra A40. De igual manera, la mayor parte de los datos de Andesitas se encuentran dentro del rango, pero se tiene una muestra que escapa notoriamente de este, correspondiente a la muestra A16. A continuación, los tres siguientes grupos, pertenecientes a Granitos, Granodioritas y Dioritas, poseen todos los valores recolectados dentro de los rangos propuestos por la literatura. Ya que estas rocas plutónicas poseen composiciones bastante similares, no es sorpresa notar que todos los datos se encuentran bastante cerca uno del otro. Luego los Conglomerados poseen un rango de valores bastante amplio para el módulo de Young (E), probablemente por el mismo motivo descrito en las secciones anteriores, la gran variación composicional que esta litología puede presentar. Con respecto a los valores obtenidos de los ensayos de laboratorio, todas las muestras se encuentran dentro de este rango. Finalmente, las Brechas, siguiendo una lógica similar a los Conglomerados, también poseen un amplio rango en la literatura. Todas las muestras se encuentran dentro de los rangos esperados, a excepción de la muestra A15.

4.5 Litología vs Coeficiente de Poisson

A continuación, se presenta un diagrama que agrupa las distintas litologías recolectadas en correlación con el coeficiente de Poisson (ν). Cada subgrupo de muestras puede poseer un recuadro, el cual corresponde al rango de valores posibles de este parámetro según otros autores, estudios y ensayos.

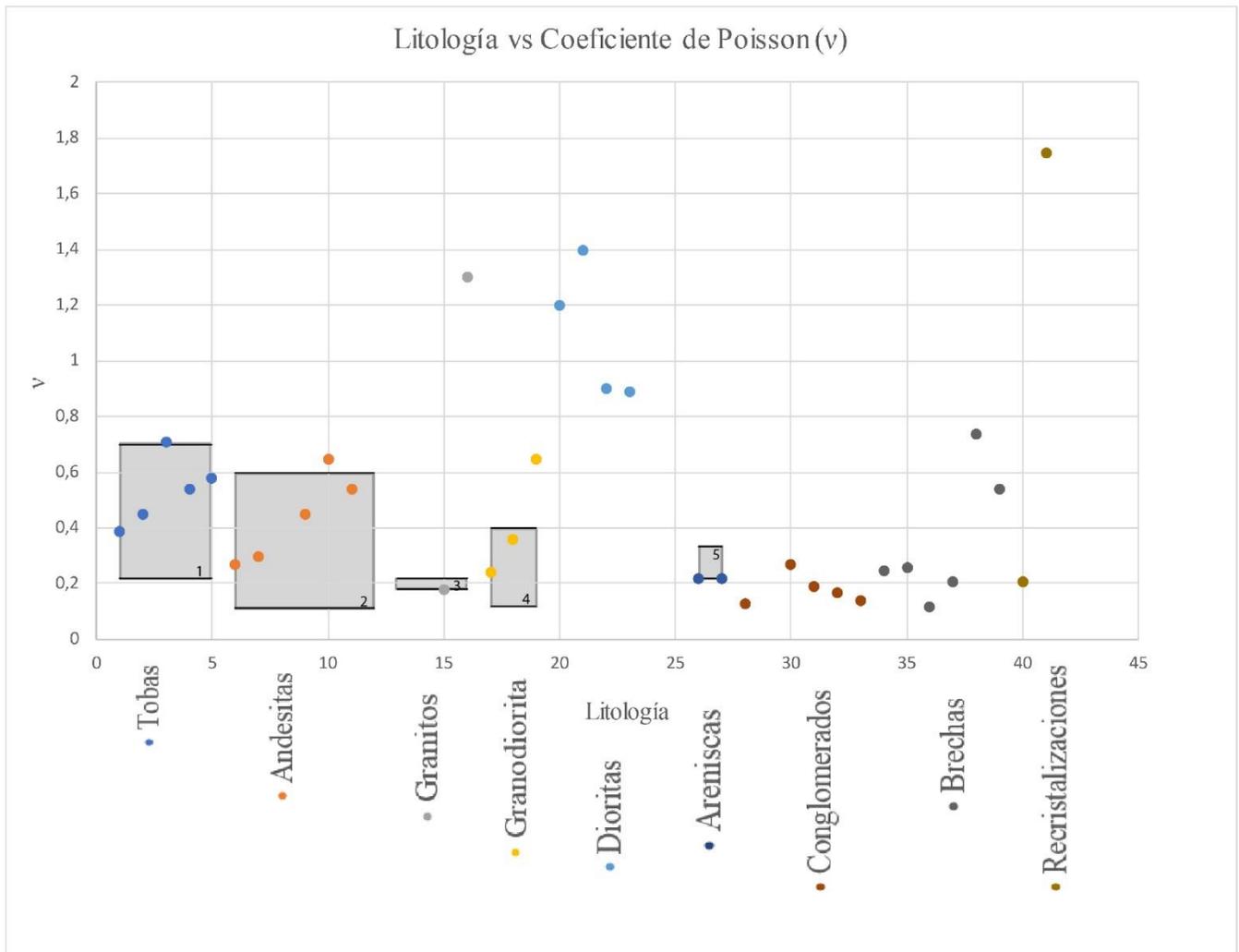


Diagrama 5. Litología vs Coeficiente de Poisson (ν) Agrupación de parámetros de elasticidad (Coef. De Poisson) extraídos del análisis de muestras en laboratorio, seccionados según la litología de cada una de ellas. Los recuadros de color corresponden a los rangos en que se encuentran dichos parámetros, en estudios y recolección de datos de otros autores: González de Vallejo, 2002 (1,2); Goodman, 1989 (3); Esquivel, 2015 (4); Gerceck, 2007 (5).

De acuerdo con la literatura, los valores del coeficiente de Poisson de las litologías descritas se encuentran en los rangos a continuación adjuntos:

Tabla 13. Comparación de rangos del Coeficiente de Poisson en roca intacta entre otros autores y este trabajo.

Litología	Coeficiente de Poisson (Otros Autores) *	Coeficiente de Poisson (Este Trabajo)
Tobas	0,22-0,7	0,39-0,71
Andesitas	0,11-0,6	0,27-0,65
Granitos	0,18-0,22	0,18-1,3
Granodioritas	0,12-0,4	0,24-0,65
Dioritas	-	0,89-1,4
Areniscas	0,22-0,33	0,23-0,24
Conglomerados	-	0,13-0,27
Brechas	-	0,12-0,74
Recristalizaciones (Cuarcita/Caliza)	-	1,75/0,21

* Autores: González de Vallejo, 2002; Goodman, 1989; Esquivel, 2015; Gerceck, 2007.

4.5.1 Análisis del Diagrama 5

Para este parámetro, es mas acotada la información en la bibliografía en cuanto a valores típicos en las rocas, debido a esto, la mitad de los datos recolectados no tiene forma de ser comparado. Para las muestras que si se hallaron mediciones comparativas, los valores de este estudio se encuentran muy cercanos a los propuestos bibliográficamente. Para Tobas, se tiene solo una muestra fuera de rango, correspondiente a la muestra A25, que se encuentra ligeramente por sobre este. De igual manera las Andesitas poseen todos sus datos dentro del rango propuesto en la literatura, a excepción de la muestra A26. Para los Granitos, el rango propuesto es muy ajustado, y una de las dos muestras posee un valor dentro de este, la muestra A29 se encuentra muy por sobre de lo esperado. En cuanto a las Granodioritas, también se tiene una muestra que se escapa del rango propuesto, correspondiente a la muestra A28. Finalmente, a pesar que las Areniscas poseen un rango bastante ceñido según la literatura, ambas muestras se encuentran dentro de éste.

4.6 Coeficiente de Rugosidad vs Cohesión de discontinuidades

A continuación, se presenta un diagrama que agrupa en el eje de las abscisas, coeficientes de rugosidad (JRC). Y por el otro lado en las ordenadas el valor de la cohesión (C) de las discontinuidades ensayadas. Las muestras utilizadas en esta descripción tienen la misma mineralogía en el relleno, correspondiente a cuarzo (Espesores de 1 – 2 mm), por lo que realizar un diagrama comparativo de Mineralogía vs Cohesión no aplica.

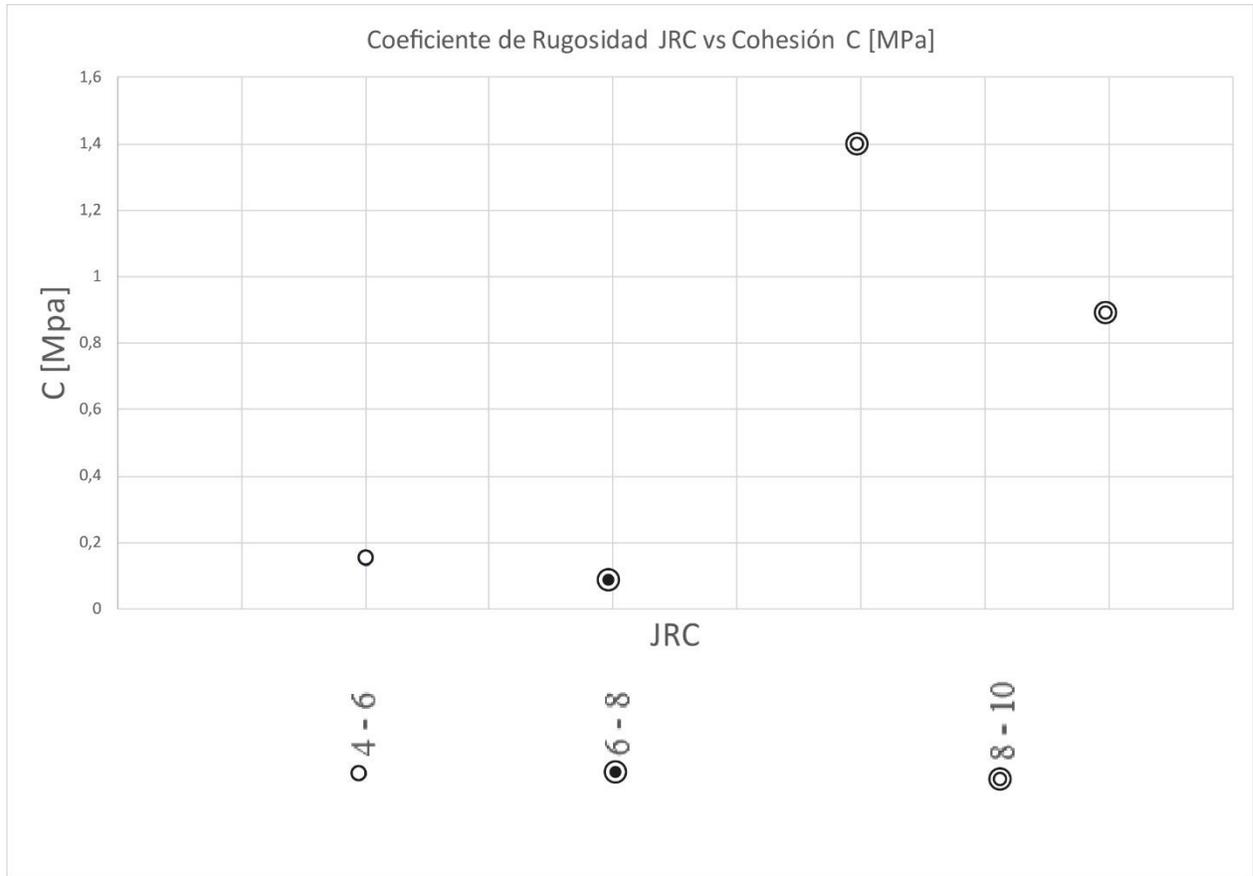


Diagrama 6. Coeficiente de Rugosidad (JRC) vs Cohesión (C) Distribución de valores de la cohesión de las muestras, luego del reordenamiento de los datos respecto a su parámetro de rugosidad.

A partir de las mediciones realizadas en laboratorio, se correlaciona el coeficiente de rugosidad (JRC) con la cohesión y se obtienen los siguientes valores:

Tabla 14. Valores de cohesión respecto a la rugosidad en muestras ensayadas en la discontinuidad (Este trabajo).

Rugosidad (JRC)	Cohesión [Mpa]
4 – 6	0,14
6 – 8	0,09
8 – 10	0,89 – 1,4

4.6.1 Análisis del Diagrama 6

En esta sección se reordenaron los datos, según su coeficiente de rugosidad (JRC) en las discontinuidades que fueron ensayadas, las cuales son comparadas en este caso con los resultados de la cohesión (C) de cada discontinuidad. Al ver el diagrama, se observa que los valores correspondientes a los coeficientes de rugosidad (JRC) menores poseen una cohesión menor en comparación con las de mayor rugosidad. Todas las muestras poseen un relleno de cuarzo en las discontinuidades, y solo la muestra que se encuentra en el rango de JRC de “4 – 6” se diferencia al resto con respecto al espesor del relleno, siendo este de 2 mm (versus < 1 mm de las otras muestras).

4.7 Coeficiente de Rugosidad vs Ángulo de Fricción de discontinuidades

A continuación, se presenta un diagrama que agrupa en el eje de las abscisas, coeficientes de rugosidad (JRC). Y por el otro lado en las ordenadas el valor del ángulo de fricción (ϕ) de las discontinuidades ensayadas. Las muestras utilizadas en esta descripción tienen la misma mineralogía en el relleno, correspondiente a cuarzo (Espesores de 1 – 2 mm), por lo que realizar un diagrama comparativo de Mineralogía vs Ángulo de fricción no aplica.

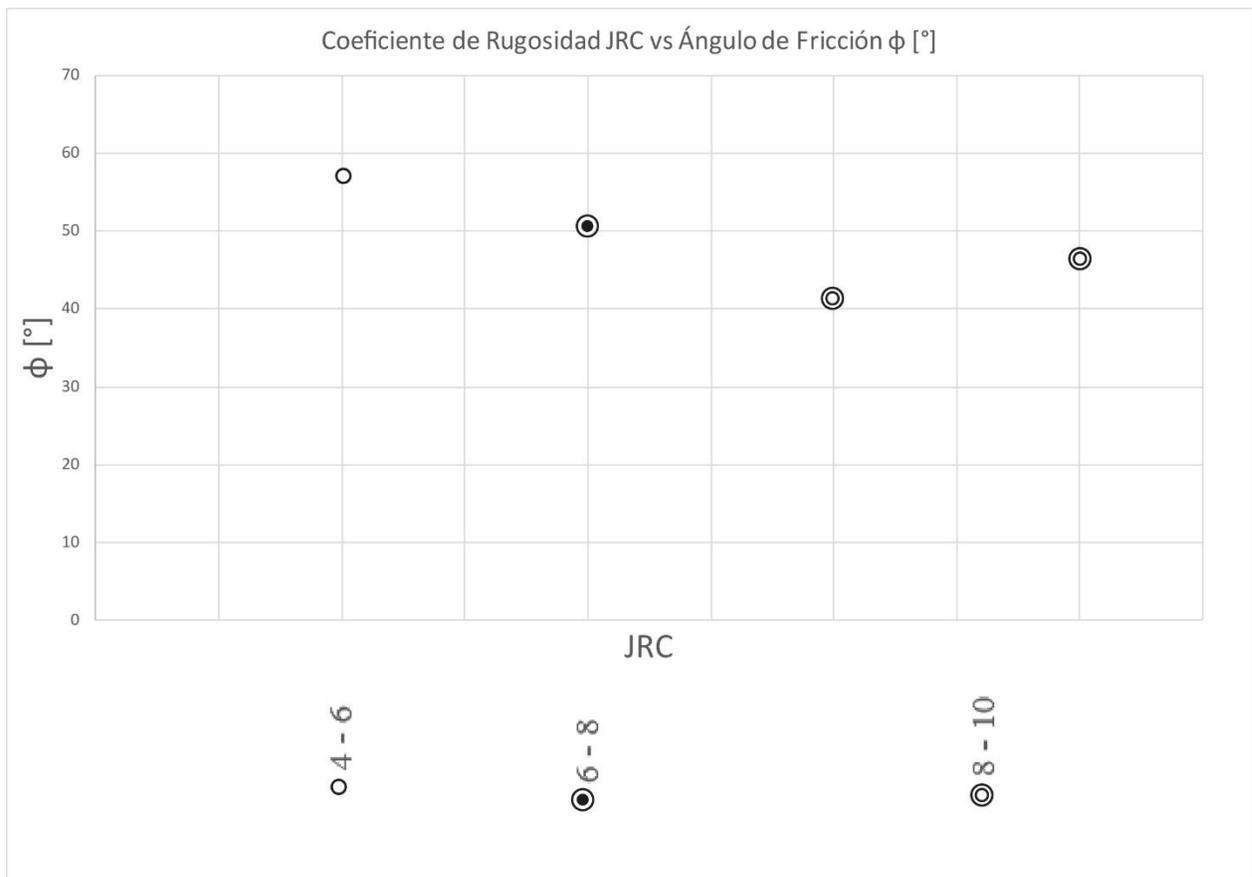


Diagrama 7. Coeficiente de Rugosidad (JRC) vs Ángulo de Fricción (ϕ) Distribución de valores del ángulo de fricción de las muestras, luego del reordenamiento de los datos respecto a su parámetro de rugosidad.

A partir de las mediciones realizadas en laboratorio, se correlaciona el coeficiente de rugosidad (JRC) con el ángulo de fricción y se obtienen los siguientes valores:

Tabla 15. Valores del ángulo de fricción respecto a la rugosidad en muestras ensayadas en la discontinuidad (Este trabajo).

Rugosidad (JRC)	Ángulo de Fricción [°]
4 – 6	57
6 – 8	50
8 – 10	41 – 46

4.7.1 Análisis del Diagrama 7

En esta sección, al igual que la anterior los datos se reordenaron según el coeficiente de rugosidad (JRC) de las discontinuidades ensayadas, las cuales son comparadas en este caso con los resultados del ángulo de fricción de las discontinuidades. Al ver el diagrama, se observa que los valores de los coeficientes de rugosidad menores poseen un ángulo de fricción ligeramente mayor a las de mayor rugosidad. Todas las muestras poseen un relleno de cuarzo en las discontinuidades, y solo la muestra que se encuentra en el rango de JRC de “4 – 6” se diferencia al resto con respecto al espesor del relleno, siendo este de 2 mm (versus < 1 mm de las otras muestras).

5. Discusiones

El propósito es realizar un análisis geotécnico de las rocas ensayadas en laboratorio, desde la recolección de variados parámetros geológicos-geotécnicos al posterior análisis del comportamiento geomecánico a partir de correlaciones entre estos parámetros. Para empezar, la literatura respecto al tema aporta rangos en los cuales estos parámetros pueden encontrarse para las distintas litologías, y así poder hacer un contraste de lo encontrado por otros autores, con los valores obtenidos de los ensayos realizados a las probetas del laboratorio. Dentro de los principales contribuyentes a la bibliografía se encuentran González de Vallejo, 2002; Hoek & Brown, 1980; Goodman, 1989.

En cuanto a los resultados obtenidos en este trabajo, se analizan 41 probetas facilitadas por el laboratorio de Block Caving del departamento de Ingeniería en Minas (Ilustración 6), las cuales fueron seleccionadas de un depósito de muestras de trabajos y ensayos anteriormente hechos en el laboratorio.



Ilustración 6 Porción de las probetas de trabajos y estudios anteriormente realizados, almacenadas en el laboratorio de Block Caving del departamento de Ingeniería en Minas de la Universidad de Chile.

Al comparar la litología con los parámetros elegidos para analizar, empezando por la resistencia a la compresión simple (UCS) se concluye que la mayoría de las muestras siguen un comportamiento como el descrito en la bibliografía, y las muestras que se encuentran fuera de estos rangos poseen como característica común una diferencia mineralógica y meteorización.

A continuación, para el ángulo de fricción (ϕ), donde los resultados obtenidos se encuentran dentro de los rangos descritos por otros autores, a excepción de algunas muestras con valores de uno o dos grados afuera del rango. En cuanto a la cohesión (C), de igual manera se poseen las muestras en rangos descritos por otros autores y en cuanto a las muestras fuera de rango, corresponden a las mismas que se encontraban fuera de rango en la sección anterior (ángulo de fricción). A continuación, se analizó los valores para el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν), que denotan el comportamiento elástico de las muestras. Para el módulo las muestras poseen valores que encajan en los rangos establecidos en la literatura, ya que estos son bastante amplios, en particular para Conglomerados y Brechas, teniendo un número reducido de muestras ubicadas levemente fuera del rango propuesto. Por otro lado, para los resultados del coeficiente de Poisson (ν) existe poca literatura, y en los rangos propuestos hubo muestras que en cada litología quedaron “fuera de rango”. En la Tabla 17 se resume para cada parámetro el código de muestra que no se encuentra dentro de los rangos propuestos en la bibliografía estudiada.

Tabla 16 Muestras fuera de los rangos descritos en bibliografía.

Litología	UCS [MPa]	Ángulo de Fricción [°]	Cohesión [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Coefficiente de Poisson
Tobas	A40	A1 - A25	A1	A40	A25
Andesitas	A3 - A16	A34	-	A16	A26
Granitos	A12	A29	-	-	A29
Granodioritas	A4	A20	-	-	A28
Dioritas	A35	A39	A33 - A39	-	-
Lutitas	-	-	-	-	-
Areniscas	-	-	-	-	-
Conglomerados	A8	A8 - A13 - A18	-	-	-
Brechas	-	-	-	A5 - A15	-

En la resistencia a la compresión simple (UCS), se tienen valores que salen de rango, entre ellos las tobas se encuentran dentro de lo propuesto en la literatura, a excepción de la muestra A40, que corresponde a una de las dos tobas cristalinas (a diferencia del resto de tobas, las cuales son tobas líticas), que no presenta alteraciones visibles, ni signos de meteorización. Este alejamiento de los rangos se debe netamente a la litología/composición de la toba, ya que al ser una toba cristalina posee un tamaño de grano menor, lo cual implica una mayor resistencia (Morgenstern & Eigenbrod, 1974).

La otra toba cristalina sí se encuentra en el rango descrito y la principal diferencia es que esta toba está levemente meteorizada y presenta una alteración visible (cloritización), factores que influyen en la resistencia a la compresión de ésta, disminuyéndola (Pappalardo, 2017). Luego, en las andesitas, se tienen dos muestras que se alejan de los rangos descritos en la literatura. Estas corresponden a las muestras A3 y A16, ambas no presentan alteraciones ni signos visibles de meteorización a diferencia del resto de andesitas que presentan una leve meteorización. Para los granitos, la muestra A12 se encuentra fuera de rango, no presenta alteraciones, rasgos de meteorización, ni estructuras a diferencia de los otros granitos. De esto se desprende que, para andesitas, las muestras meteorizadas se podrían ajustar mejor a los rangos descritos en la literatura.

Para las granodioritas se tiene únicamente una muestra fuera de rango, correspondiente a la muestra A4 que posee una leve cloritización y no presenta signos visibles de meteorización, a diferencia de las otras granodioritas las cuales si presentan una meteorización moderada. Para las dioritas, al igual que las granodioritas se tienen todas las muestras dentro de rango a excepción de la muestra A35, la cual no posee signos visibles de meteorización. En cuanto a las lutitas y areniscas, se tiene que las pocas muestras reunidas se encuentran dentro de los rangos descritos por otros autores. Llegando a la misma conclusión del párrafo anterior.

Para conglomerados, solo se tiene la muestra A8 fuera de rango. Acá hay un rango bastante amplio sugerido en la literatura, debido a la naturaleza composicional de los conglomerados (Chang, 2006), de esta forma el rango descrito ronda de los 50 a 200 MPa y aun así debido a la composición variable de los conglomerados, puede haber resistencias a la compresión simple (UCS) fuera de estos rangos y ser resultados aceptables, al igual que en brechas. Las brechas que se encuentran fuera del rango en el diagrama corresponden a brechas hidrotermales.

Al analizar la distribución general de los resultados en el Diagrama 1, se puede notar que las tobas poseen los rangos menores de resistencia a la compresión simple (UCS), debido a cualidades particulares tales como: porosidad, textura, tamaño de grano, etc. (Morgenstern & Eigenbrod, 1974), por otro lado, las rocas sedimentarias en el extremo derecho del diagrama, con resistencias variables, pero de todas maneras bajas al ser comparadas directamente con las resistencias de las rocas ígneas, debido a factores texturales, composicionales y meteorización (Pappalardo, 2017).

Luego al analizar los valores que se escapan de los rangos descritos en la bibliografía para el ángulo de fricción (ϕ) en roca intacta, se puede notar de partida que estos datos se encuentran muy cerca de los rangos, lo que significa que a pesar de no estar específicamente dentro de estos rangos se asemejan mucho a lo esperado. Para empezar las tobas poseen dos datos que no se encuentran dentro del rango, correspondientes a las muestras A1 y A25, ambas sin presencia de signos visibles de meteorización y ligeramente alteradas, en condiciones bastante similares a las demás tobas.

Para las andesitas, la muestra A34 se encuentra fuera del rango esperado, posee una alteración potásica y una leve meteorización, al igual que la mitad del resto de las andesitas que se encuentran en rango con las andesitas que no presentan meteorización alguna ni alteraciones, replicando la situación descrita arriba. Luego para granitos, granodioritas y dioritas se tiene una muestra fuera de rango para cada tipo de roca, todas por debajo de los rangos esperados, siendo estas las muestras A29 (alteración potásica, levemente meteorizada), A20 (alteración calcosódica, moderadamente meteorizada) y A39 (Cloritización, sin signos de meteorización), habiendo muestras que se encuentran dentro de los rangos que poseen meteorizaciones/alteraciones y otras que no.

En cuanto a las areniscas, la muestra analizada se presenta dentro del rango esperado. Y finalmente en los conglomerados, tres muestras se encuentran fuera del rango esperado de uno a cinco grados específicamente, teniendo como posible explicación probable la alta variación composicional de esta litología.

Para los valores de cohesión (C) en roca intacta, pocas muestras están fuera de rango. Para las tobas se tiene la muestra A1, que no presenta signos visibles de meteorización y una leve cloritización. En comparación a las otras tobas, no existe una mayor diferenciación ya que dentro del rango hay muestras tanto meteorizadas como no. Andesitas, granitos y dioritas poseen resultados que se encuentran dentro de los rangos esperados. Luego las dioritas poseen dos muestras que se encuentran fuera de los rangos esperados, cabe notar que el rango descrito en la literatura para las dioritas es mucho más acotado que granitos y granodioritas, siendo rocas que poseen una composición similar a esta. Las muestras de dioritas A33 y A39 que se encuentran fuera de rango, presentan alteración (cloritización), la primera levemente meteorizada a diferencia de la segunda que no posee signos visibles de meteorización, las demás dioritas tanto poseen como no poseen alteración y meteorización. Areniscas y conglomerados no están presentes en esta sección debido a falta de bibliografía o estudios para comparar los resultados. Se puede notar al analizar el Diagrama 3 que las litologías de los extremos (tobas y rocas sedimentarias) presentan una cohesión menor que las litologías del centro (ígneas), debido a las propiedades descritas anteriormente por Morgenstern & Eigenbrod (1974), González de Vallejo (2002) y Pappalardo (2017).

En cuanto a los parámetros de deformabilidad, en el módulo de Young (E), los rangos que se tienen de la bibliografía son bastantes amplios, de esta manera la mayoría de los datos se encuentran dentro de estos. Para las tobas, la muestra A40 nuevamente se encuentra fuera de rango, la cual corresponde a una de las dos tobas cristalinas (a diferencia del resto de tobas, las cuales son tobas líticas), que no presenta alteraciones visibles, ni signos de meteorización. Luego la muestra A16 nuevamente, de las andesitas (sin signos de meteorización ni alteración). Las probetas correspondientes a granitos, granodioritas, dioritas y conglomerados se encuentran dentro de los rangos esperados según la literatura.

Finalmente, para las brechas, las muestra A5 y A15 se encuentran fuera de rango, con ambas rocas sin presencia de alteración ni signos visibles de meteorización, a diferencia de estas dentro del rango se mantienen todas las brechas hidrotermales. Como determinó Pappalardo et al. (2017) “*Los especímenes vesiculares se caracterizan por una mayor deformación debido al papel que juegan los vacíos durante la falla. De hecho, favorecen la propagación de grietas, como ya se destacó, aumentando la deformación de la roca hasta la falla final*” lo que se puede ver reflejado en los valores que se tienen para este parámetro en las tobas.

En cuanto al coeficiente de Poisson (ν), los rangos y la literatura al respecto son bastante ajustados; dioritas, conglomerados, areniscas, lutitas y brechas no poseen información de rangos en que se encuentren. De las muestras que si poseen rangos descritos en literatura, una muestra escapaba de los rangos para cada litología, para tobas la muestra A25 se encuentra fuera de rango, sin presencia de alteración ni meteorización, para las andesitas la muestra A26, con alteración potásica y levemente meteorizada se encuentra fuera de los rangos descritos en la literatura, las muestras que no poseen alteración ni meteorización se poseen coeficientes de Poisson menores que las meteorizadas, esto se puede notar al ver las otras dos muestras de andesitas que reúnen estas cualidades, en el Diagrama 5 están a cada lado de la muestra A26, fuera de rango (muestras A24 y A34).

Finalmente, para granodioritas se tiene una muestra fuera del rango descrito en la literatura, correspondiente a la muestra A28, la cual posee una alteración sericítica y está moderadamente meteorizada, las otras probetas que sí están dentro del rango descrito poseen de igual manera alteraciones sin dejar una clara diferencia entre las muestras dentro y fuera del rango.

Distintos tipos de rocas responden de diferente forma a la meteorización dependiendo según su composición mineralógica (Tabla 17). En cuanto a las rocas volcánicas, la reacción con agua convierte el vidrio volcánico en arcilla y esto causa cambios volumétricos, lo cual generará cambios físicos y mecánicos en las estructuras intergranulares (Yokota & Iwamatsu, 1999). Chigira & Sone (1991) estudiaron el perfil de meteorización de areniscas jóvenes y conglomerados, identificando zonas de meteorización, donde las propiedades mecánicas de las rocas varían sistemáticamente.

Tabla 17 Estabilidad general y meteorización de minerales formadores de roca (Cabria, 2015).

Meteorización más rápida	Mineral	Menos Estable
	Halita Calcita Olivino Plagioclasa (Ca) Piroxeno Anfíbola Plagioclasa (Na) Biotita Feldespato (K) Moscovita Arcillas Cuarzo Hematita	
Meteorización más lenta		Más Estable

Para granitos, la pérdida de resistencia desde un granito fresco a uno moderadamente meteorizado alcanza un 80% (Gupta & Rao, 2000). En lutitas la resistencia se ve disminuida en un 75% de una roca fresca a una ligeramente meteorizada, debido al incremento de microfracturas. Resultados de análisis petrográficos sugieren que, las microfracturas, poros y vesículas, son los factores predominantes que controlan la resistencia de una roca fresca y no la mineralogía, además que el UCS (Martillo de Schmidt) disminuye mientras la porosidad y absorción de agua aumenta, cuando el grado de meteorización es mayor (Gurocak & Kilic, 2005).

En general la meteorización lleva a la destrucción de la unión entre grano a grano de la roca, creando microfracturas y nuevos minerales, lo cual resulta en modificaciones en las propiedades geotécnicas de esta (Gupta & Rao, 2000). Estos cambios incluyen una disminución en resistencia del macizo rocoso y en roca intacta, aumento en la deformabilidad de la roca, cambios en la permeabilidad dependiendo de la naturaleza de la roca y su etapa de meteorización (Hencher & McNicholl, 1995).

Los parámetros que son altamente afectados por la meteorización debido a su buena correlación con el mismo grado de meteorización incluyen: resistencia a la tracción (Arikan et al., 2007), resistencia a la compresión y módulo de elasticidad (Heidari et al., 2013). Propiedades índices que varían durante la meteorización incluyen: densidad, contenido de arcillas, cantidad de vesículas (Ceryan, 2007). Estos cambios ocurren únicamente después que las rocas alcanzan cierto estadio de meteorización (Arikan et al., 2007).

Varios estudios han mostrado que las características petrográficas de las rocas poseen una influencia intrínseca en los valores de la resistencia de estas. La correlación entre el tamaño de grano y la resistencia de la roca ha sido estudiada por varios autores (Olsson, 1974; Onodera & Kumara, 1980; etc) para granitos, granodioritas, areniscas y varias litologías más. A mayor cantidad de contenido de cuarzo (Bell & Lindsay, 1999), mayor contacto entre granos (Dobereiner and De Freitas, 1986) y mayor densidad del “empaquetado” (Bell, 1978) resulta generalmente en una mayor resistencia. Además, una textura más densa (menos porosidad) o fina (granos de menor tamaño) resultan generalmente en una mayor resistencia (Hatzor and Palchik, 1997, 1998). Este incremento en la resistencia se debe mayormente a minerales granulares como el cuarzo, que se convierten en el esqueleto que soporta el stress siendo capaces de acumular grandes cantidades de este.

Luego de analizar la relación entre litologías y los parámetros obtenidos en roca intacta, se buscan las discontinuidades que fueron sometidas al ensayo en celda de Hoek, para así poder ver alguna correlación en discontinuidades, desafortunadamente solo existen 4 muestras ensayadas, de todas maneras viendo en la Tabla 18, en la sección de cohesión se puede apreciar que a menor coeficiente de rugosidad (medido después del ensayo), específicamente en los rangos de JRC de suave a moderadamente rugosa (4 – 6 / 6 – 8) se posee una cohesión significativamente menor que las dos probetas que se encuentran en el rango de JRC moderadamente rugosa (8 – 10). Por otro lado, al analizar la sección de coeficiente de rugosidad (JRC) versus ángulo de fricción (ϕ), se puede notar que a menor JRC mayor es el ángulo de fricción.

Tabla 18 Tablas de rugosidad versus cohesión y ángulo de fricción.

Rugosidad (JRC)	Cohesión [Mpa]
4 – 6	0,14
6 – 8	0,09
8 – 10	0,89 – 1,4

Rugosidad (JRC)	Ángulo de Fricción [°]
4 – 6	57
6 – 8	50
8 – 10	41 – 46

6. Conclusiones

La finalidad global de este trabajo consiste en realizar un análisis de las propiedades geotécnicas de rocas comunes en Chile, a partir de correlaciones entre los parámetros geotécnicos de las rocas ensayadas en el Laboratorio de Block Caving del Departamento de Minas de la Universidad de Chile, mediante descripciones y recopilación de parámetros geológicos-geotécnicos de las probetas.

Entre los resultados de este trabajo, se logró comparar la litología con los parámetros elegidos para analizar (de roca intacta), empezando por la resistencia a la compresión simple (UCS), donde la mayoría de las muestras siguen un comportamiento como el descrito en la bibliografía, y las muestras que se encuentran fuera de estos rangos poseen como característica común una diferencia mineralógica y menor meteorización que aquellas que se encuentran dentro de los rangos propuestos. A continuación, para el ángulo de fricción (ϕ) en roca intacta, donde los resultados obtenidos se encuentran dentro de los rangos descritos por otros autores, algunas muestras se alejan del rango por uno o dos grados. En cuanto a la cohesión (C) en roca intacta, de igual manera las muestras se ubican dentro de los rangos descritos por otros autores y en cuanto a las muestras fuera de rango, corresponden a muestras meteorizadas y alteradas. A continuación, se analizó los valores para el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν), que denotan el comportamiento elástico de las muestras, para el módulo las muestras poseen valores que encajan en los rangos establecidos en la literatura, ya que estos son bastante amplios, en particular para Conglomerados y Brechas, teniendo un número reducido de muestras fuera de rango. Por otro lado, para los resultados del coeficiente de Poisson existe acotada literatura al respecto, y en los rangos establecidos hubo muestras que en cada litología quedaron fuera de rango.

Para las muestras ensayadas en la discontinuidad, se compara el coeficiente de rugosidad (medido después del ensayo) y la mineralogía (al ser cuarzo el relleno de las cuatro muestras), con la cohesión y el ángulo de fricción, obteniendo una relación entre estos parámetros. Hay que mencionar que solamente se tiene 4 muestras analizadas, razón por la cual no se puede concluir alguna relación entre los parámetros correlacionados para las discontinuidades.

Las principales limitantes, al realizar la recopilación de datos fueron no haber tenido una procedencia de las probetas, por lo que no se podía realizar una contextualización geológica de la proveniencia de estas muestras, así como tener que apoyarse en datos obtenidos por terceros por no poder realizar por cuenta propia los ensayos.

7. Bibliografía

- Arıkan, F., Ulusay, R., & Aydın, N. (2007). Characterization of weathered acidic volcanic rocks and a weathering classification based on a rating system. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(4), 415.
- Attewell, P. B., & Farmer, I. W. (2012). *Principles of engineering geology*. Springer Science & Business Media.
- Bell, F.G., Lindsay, P., 1999. The petrographic and geomechanical properties of sandstones from the Newspaper Member of the Natal Group near Durban, South Africa. *Eng. Geol.* 53, 57–81
- Bieniawski, Z. T. (1978, October). Determining rock mass deformability: experience from case histories. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(5), 237-247.
- Brown, E. T. (1981). Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods.
- Cabria, X. A. (2015). *Effects of Weatherin in the Rock and Rock Mass Properties and the Influence of Salts in the Coastal Roadcuts in Saint Vincent and Dominica*. University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC).
- Ceryan, S., Tudes, S., & Ceryan, N. (2008). A new quantitative weathering classification for igneous rocks. *Environmental geology*, 55(6), 1319.
- Chang, C., Zoback, M. D., & Khaksar, A. (2006). Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 51(3-4), 223-237.
- Chau, K. T., & Wong, R. H. C. (1996, February). Uniaxial compressive strength and point load strength of rocks. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 33(2), 183-188.
- Chigira, M., & Sone, K. (1991). Chemical weathering mechanisms and their effects on engineering properties of soft sandstone and conglomerate cemented by zeolite in a mountainous area. *Engineering Geology*, 30(2), 195-219.
- Civil Engineer Software, F. (2018). *geotechnical software*. [online] finesoftware. Available at: <https://www.finesoftware.eu/geotechnical-software/> [Accessed 12 Dec. 2018].
- Dinçer, I., Acar, A., Çobanoğlu, I., & Uras, Y. (2004). Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 63(2), 141-148.

- Gercek, H. (2007). Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(1), 1-13.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics*, 2. New York: Wiley.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- Gupta, A. S., & Rao, K. S. (2000). Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Engineering Geology*, 56(3-4), 257-274.
- Gurocak, Z., & Kilic, R. (2005). Effect of weathering on the geomechanical properties of the Miocene basalts in Malatya, Eastern Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(4), 373-381.
- Hatzor, Y.H., Palchik, V., 1997. The influence of grain size and porosity on crack initiation stress and critical flaw length in dolomites. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 34 (5), 805–816.
- Heidari, M., Momeni, A. A., & Naseri, F. (2013). New weathering classifications for granitic rocks based on geomechanical parameters. *Engineering geology*, 166, 65-73.
- Hencher, S. R., & McNicholl, D. P. (1995). Engineering in weathered rock. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 28(3), 253-266.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 106(ASCE 15715).
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 34(8), 1165-1186.
- Ide, J. M. (1936). Comparison of statically and dynamically determined Young's modulus of rocks. *Proceedings of the national academy of sciences*, 22(2), 81-92.
- Kahraman, S. (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), 981-994.
- Morgenstern, N. R., & Eigenbrod, K. D. (1974). CLASSIFICATION OF AGRILLACEOUS SOILS AND ROCKS. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 100.
- Olsson, W.A., 1974. Grain size dependence of yield stress in marble. *J. Geophys. Res.* 79 (32), 4859–4862.

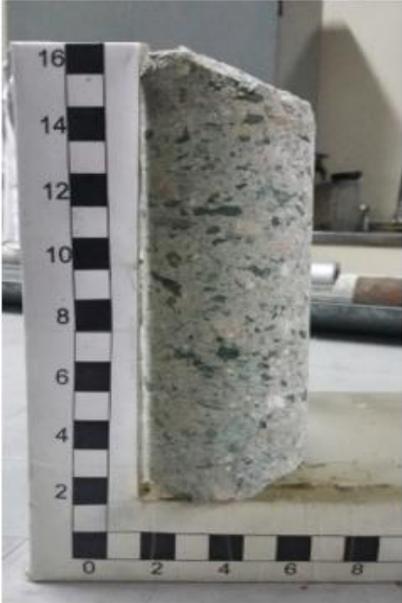
Onodera, T.F., Kumara, H.M., 1980. Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks. *Bull. Assoc. Eng. Geol.* 22, 173–177.

Pappalardo, G., Punturo, R., Mineo, S., & Contrafatto, L. (2017). The role of porosity on the engineering geological properties of 1669 lavas from Mount Etna. *Engineering geology*, 221, 16-28.

Yokota, S., & Iwamatsu, A. (2000). Weathering distribution in a steep slope of soft pyroclastic rocks as an indicator of slope instability. *Engineering Geology*, 55(1-2), 57-68.

ANEXO

Tabla 19. Descripción muestra A1

	Código Roca	A1
	Litología	Toba Lítica
Fracturas/Vetillas	SIN ESTRUCTURAS	
Mineralogía	<>	
Espesor	<>	
Resistencia al Corte	4,03	
Alteración Visible	Cloritización	
UCS [Mpa]	29	
E [Gpa]	18	
ν	0,39	
ϕ [°]	44,4	
C [Mpa]	0,14	
Espaciamiento de discontinuidades	<>	
Rugosidad (JRC)	<>	
Grado de Meteorización	Roca Fresca	
Tipo de Roca	Piroclástica	
Granularidad	<>	
Tamaño del Grano	Ceniza Gruesa (1/16 - 2 mm)	
Estructura	<>	

Código Muestra A1

Tabla 20. Descripción muestra A2

	Código Roca	A2
	Litología	Toba Cristalina
Fracturas/Vetillas	SIN ESTRUCTURAS	
Mineralogía	<>	
Espesor	<>	
Resistencia al Corte	<>	
Alteración Visible	Cloritización	
UCS [Mpa]	26,2	
E [Gpa]	12,5	
ν	0,45	
ϕ [°]	<>	
C [Mpa]	<>	
Espaciamiento de discontinuidades	<>	
Rugosidad (JRC)	<>	
Grado de Meteorización	Levemente Meteorizada	
Tipo de Roca	Piroclástica	
Granularidad	<>	
Tamaño del Grano	Ceniza Gruesa (1/16 - 2 mm)	
Estructura	<>	

Código Muestra A2

Tabla 21. Descripción muestra A3

 <p>Código Muestra A3</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A3 Andesita Vetillas de Cuarzo Cuarzo 2 mm 1,55 Sin Alteración 84 37,11 0,27 46 25 2 - 4 cm 6 a 8 Roca Fresca Ígnea Extrusiva Porfídica Grano Fino (<2 mm) Homogénea</p>
--	---	---

Tabla 22. Descripción muestra A4

 <p>Código Muestra A4</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A4 Granodiorita Vetillas de Cuarzo Cuarzo 1-2 mm <> Leve Cloritización 18 28,9 0,24 51 18,1 5 cm 8 a 10 Roca Fresca Ígnea Intrusiva Fanerítica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
--	---	---

Tabla 23. Descripción muestra A5

 <p style="text-align: center;">Código Muestra A5</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A5 Brecha Vetillas de Ceolita Ceolita <1 mm <> No presenta 191 59,8 0,25 5 - 10 cm 6 a 8 Roca Fresca Sedimentaria <> 5 mm a 1 cm <></p>
--	---	--

Tabla 24. Descripción muestra A6

 <p style="text-align: center;">Código Muestra A6</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A6 Granito SIN ESTRUCTURAS <> <> <> No presenta 0,4 (triaxial) <> <> <> <> <> <> Roca Fresca Ígnea Intrusiva Fanerítica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
--	---	--

Tabla 25. Descripción muestra A7

 <p style="text-align: center;">Código Muestra A7</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A7 Arenisca Vetillas de Cuarzo Cuarzo <1 mm 2,11 Albitización 58 24,08 0,24 41 2,11 2 - 4 cm 8 a 10 Levemente Meteorizada Sedimentaria <> Arenisca Fina a Media <></p>
--	---	---

Tabla 26. Descripción muestra A8

 <p style="text-align: center;">Código Muestra A8</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A8 Conglomerado Vetillas de Cuarzo Cuarzo <1 mm <> No presenta 20 62,1 0,13 47,2 8 2 - 4 cm 6 a 8 Roca Fresca Sedimentaria <> Conglomerado muy Fino <></p>
--	---	---

Tabla 27. Descripción muestra A9

 <p>Código Muestra A9</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A9 Arenisca SIN ESTRUCTURAS <> <> <> No Presenta 33 5 0,23 <> <> <> <> Roca Fresca Sedimentaria <> Arenisca Fina a Media <></p>
--	---	---

Tabla 28. Descripción muestra A10

 <p>Código Muestra A10</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A10 Brecha Hidrotermal Vetillas de Cuarzo Cuarzo 2-5 mm <> Hidrotermal 59 41,9 0,21 <> <> 3 - 5 cm 8 a 10 Moderadamente Meteorizada Prot: Ígneo <> 1 - 3 cm <></p>
---	---	--

Tabla 29. Descripción muestra A11

 <p>Código Muestra A11</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] v ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A11 Conglomerado SIN ESTRUCTURAS <> <> <> No presenta 182 <> <> <> <> <> <> Levemente Meteorizada Sedimentaria <> Conglomerado muy Fino <></p>
---	--	--

Tabla 30. Descripción muestra A12

 <p>Código Muestra A12</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] v ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A12 Granito SIN ESTRUCTURAS <> <> <> No presenta 126 <> <> <> <> <> <> Roca Fresca Ígnea Intrusiva Fanerítica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
---	--	--

Tabla 31. Descripción muestra A13

 <p>Código Muestra A13</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A13 Conglomerado Vetillas de Qz Cuarzo <<1 mm 0,61 Cloritización 152 70 0,27 49 0,42 3 - 5 cm 0 a 2 Levemente Meteorizada Sedimentaria <> Conglomerado muy Fino <></p>
---	---	--

Tabla 32. Descripción muestra A14

 <p>Código Muestra A14</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A14 Conglomerado Vetillas de Calcita Calcita <<1 mm <> No presenta 77 20,7 0,19 38 1,9 5 cm 2 a 4 Roca Fresca Sedimentaria <> Conglomerado muy Fino <></p>
---	---	--

Tabla 33. Descripción muestra A15

 <p style="text-align: center;">Código Muestra A15</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A15 Brecha SIN ESTRUCTURAS <> <> <> No presenta 12 2,9 0,26 <> <> <> <> <> Roca Fresca Sedimentaria <> 1 - 3 cm <></p>
---	---	--

Tabla 34. Descripción muestra A16

 <p style="text-align: center;">Código Muestra A16</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A16 Andesita SIN ESTRUCTURAS <> <> <> No presenta 170 60 0,3 <> <> <> <> <> Roca Fresca Ígnea Extrusiva Porfídica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
---	---	--

Tabla 35. Descripción muestra A17

 <p>Código Muestra A17</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A17 Granito Vetillas de Cuarzo Cuarzo <1 mm <> No presenta 196 40,2 0,18 48 17,2 5 cm 0 a 2 Roca Fresca Ígnea Intrusiva Fanerítica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
---	---	--

Tabla 36. Descripción muestra A18

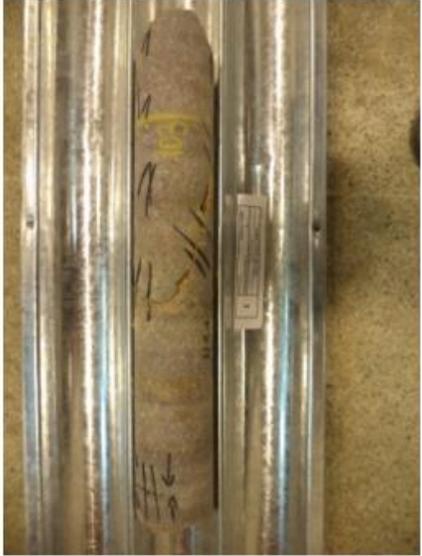
 <p>Código Muestra A18</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A18 Conglomerado Vetillas de Calcita y Cuarzo Calcita y Cuarzo <1 mm <> Cloritización 92 58,6 0,17 44,3 6,5 5 cm 2 a 4 Levemente Meteorizada Sedimentaria <> Conglomerado muy Fino <></p>
---	---	--

Tabla 37. Descripción muestra A19

 <p style="text-align: center;">Código Muestra A19</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A19 Brecha SIN ESTRUCTURAS $\langle \rangle$ $\langle \rangle$ $\langle \rangle$ No presenta 35 38 0,12 $\langle \rangle$ $\langle \rangle$ $\langle \rangle$ Roca Fresca Sedimentaria $\langle \rangle$ 5 mm a 1 cm $\langle \rangle$</p>
---	---	--

Tabla 38. Descripción muestra A20

 <p style="text-align: center;">Código Muestra A20</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A20 Granodiorita Vetillas de Calcopirita Calcopirita 2 mm $\langle \rangle$ Alteración Calcosódica 95 26,2 0,36 42,5 12,1 1 - 5 cm 4 a 6 Moderadamente Meteorizada Ígnea Intrusiva Fanerítica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
---	---	---

Tabla 39. Descripción muestra A21

 <p>Código Muestra A21</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A21 Andesita SIN ESTRUCTURAS <> <> <> Cloritización 251 <> <> <> <> <> Levemente Meteorizada Ígnea Extrusiva Porfídica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
---	---	--

Tabla 40. Descripción muestra A22

 <p>Código Muestra A22</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A22 Cuarzita Vetillas de sericita Sericita 2-3 mm <> Alteración argílica 184 4,5 1,75 42,9 26,8 1 - 3 cm 2 a 4 Moderada a muy meteorizada Metamórfica <> <> <></p>
---	---	--

Tabla 41. Descripción muestra A23

 <p>Código Muestra A23</p>	Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura	A23 Conglomerado Fino SIN ESTRUCTURAS <> <> <> No presenta 62 54,8 0,14 <> <> <> Roca Fresca Sedimentaria <> Conglomerado muy Fino <>
---	--	---

Tabla 42. Descripción muestra A24

 <p>Código Muestra A24</p>	Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura	A24 Andesita Porfírica Vetillas de Cuarzo y Epidota Cuarzo y Epidota 1- 2 mm <> Cloritización 243 42,1 0,45 42,1 22 5 cm 2 a 4 Levemente Meteorizada Ígnea Extrusiva Porfídica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea
---	--	--

Tabla 43. Descripción muestra A25

 <p>Código Muestra A25</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A25 Toba Lítica Vetillas de Calcita Calcita 1 mm <> No presenta 27 16,8 0,71 36,2 0,91 5 cm 4 a 6 Roca Fresca Piroclástica <> 5 mm a 1 cm <></p>
---	---	--

Tabla 44. Descripción muestra A26

 <p>Código Muestra A26</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A26 Andesita Vetillas de Cuarzo y Anhidrita Cuarzo y Anhidrita 5 mm / 5 mm a 1 cm <> Alteración Potásica 205 25,4 0,65 42,2 25 2 cm 2 a 4 Levemente Meteorizada Ígnea Extrusiva Porfídica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
---	---	--

Tabla 45. Descripción muestra A27

 <p>Código Muestra A27</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A27 Brecha Hidrotermal Vetillas de Calcopirita y Cuarzo Calcopirita y Cuarzo 1 mm / 1 cm <> Alteración Propilítica 180 36,5 0,74 <> <> 1 cm 4 a 6 Levemente Meteorizada Prot: Ígneo <> 1 - 3 cm <></p>
---	---	--

Tabla 46. Descripción muestra A28

 <p>Código Muestra A28</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A28 Granodiorita Vetillas de Turmalina Turmalina 1 mm <> Alteración Sericítica 106 27,1 0,65 48,6 16,5 5 cm 6 a 8 Moderadamente Meteorizada Ígnea Intrusiva Fanerítica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
---	---	---

Tabla 47. Descripción muestra A29

 <p>Código Muestra A29</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A29 Granito Vetillas de Cuarzo Cuarzo 1 cm <> Alteración Potásica 184 39,5 1,3 42,3 14,2 3 a 5 cm 8 a 10 Levemente Meteorizada Ígnea Intrusiva Fanerítica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
---	---	--

Tabla 48. Descripción muestra A30

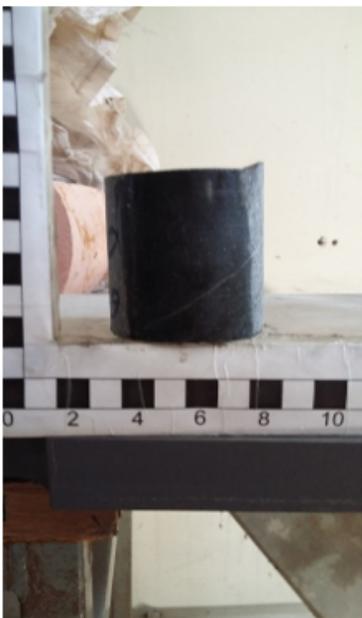
 <p>Código Muestra A30</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A30 Diorita Vetillas de Ceolita Ceolita 1 mm <> No presenta 212 26,5 1,2 52,5 12,3 5 cm 2 a 4 Roca Fresca Ígnea Intrusiva Fanerítica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
---	---	---

Tabla 49. Descripción muestra A31

 <p>Código Muestra A31</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A31 Brecha Hidrotermal Vetillas de Cuarzo Cuarzo 1 - 5 mm <> Alteración Propilítica 184 39,5 0,54 <> <> 1 cm 2 a 4 Levemente Meteorizada Prot: Ígneo <> 5 mm a 2 cm <></p>
---	---	--

Tabla 50. Descripción muestra A32

 <p>Código Muestra A32</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A32 Caliza Recristalizada Vetillas de Calcita Calcita 1 mm <> Dolomitización 102 2,53 0,21 36,5 8,9 1 - 2 cm 2 a 4 Roca Fresca Sedimentaria <> <> <></p>
---	---	--

Tabla 51. Descripción muestra A33

 <p>Código Muestra A33</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A33 Diorita Vetillas de Calcita Calcita <1 mm <> Cloritización 223 32,5 1,4 51,4 9,8 5 cm 2 a 4 Levemente Meteorizada Ígnea Intrusiva Fanerítica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
---	---	--

Tabla 52. Descripción muestra A34

 <p>Código Muestra A34</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A34 Andesita Vetillas de Cuarzo Cuarzo 2 - 5 mm <> Alteración Potásica 243 28,4 0,54 35,5 29 1 - 2 cm 4 a 6 Levemente Meteorizada Ígnea Extrusiva Porfídica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
---	---	--

Tabla 53. Descripción muestra A35

 <p>Código Muestra A35</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A35 Diorita Vetillas de Cuarzo Cuarzo 1 - 3 mm <> Alteración Propilítica 298 24,9 0,9 49,5 11,3 >10cm 2 a 4 Roca Fresca Ígnea Intrusiva Fanerítica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
---	---	--

Tabla 54. Descripción muestra A36

 <p>Código Muestra A36</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A36 Andesita Porfírica SIN ESTRUCTURAS <> <> <> Cloritización 245 <> <> <> <> <> <> Levemente Meteorizada Ígnea Extrusiva Porfídica Grano Medio (2 - 5 mm) Homogénea</p>
---	---	--

Tabla 55. Descripción muestra A37

 <p>Código Muestra A37</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A37 Toba Lítica Vetillas de Cuarzo Cuarzo 5 mm <> Cloritización 41 14,1 0,54 44,2 0,87 5 cm 6 a 8 Moderadamente Meteorizada Piroclástica <> Ceniza Gruesa (1/16 - 2 mm) <></p>
---	---	--

Tabla 56. Descripción muestra A38

<p>Sin Foto</p> <p>Código Muestra A38</p>	<p>Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p>A38 Lutita Carbonatada SIN ESTRUCTURAS <> <> <> No presenta 42 <> <> <> <> <> <> <> Levemente Meteorizada Sedimentaria <> Limolita a Arenisca muy Fina <></p>
---	---	---

Tabla 57. Descripción muestra A39

Sin Foto	Código Roca	A39
	Litología	Diorita
	Fracturas/Vetillas	Vetillas de Cuarzo y Calcita
	Mineralogía	Cuarzo y Calcita
	Espesor	1 - 5 mm / 1mm
	Resistencia al Corte	<>
	Alteración Visible	Cloritización
	UCS [Mpa]	184
	E [Gpa]	28,6
	v	0,89
	ϕ [°]	55,4
	C [Mpa]	9,1
	Espaciamiento de discontinuidades	1 - 2 cm
	Rugosidad (JRC)	4 a 6
	Grado de Meteorización	Roca Fresca
	Tipo de Roca	Ígnea Intrusiva
	Granularidad	Fanerítica
Tamaño del Grano	Grano Medio (2 - 5 mm)	
Código Muestra A39	Estructura	Homogénea

Tabla 58. Descripción muestra A40

Sin Foto	Código Roca	A40
	Litología	Toba Cristalina
	Fracturas/Vetillas	Vetillas de Calcita
	Mineralogía	Calcita
	Espesor	1 mm
	Resistencia al Corte	<>
	Alteración Visible	No presenta
	UCS [Mpa]	52
	E [Gpa]	22,4
	v	0,58
	ϕ [°]	36,5
	C [Mpa]	1,2
	Espaciamiento de discontinuidades	1 - 2 cm
	Rugosidad (JRC)	4 a 6
	Grado de Meteorización	Roca Fresca
	Tipo de Roca	Piroclástica
	Granularidad	<>
Tamaño del Grano	Ceniza Gruesa (1/16 - 2 mm)	
Código Muestra A40	Estructura	<>

Tabla 59. Descripción muestra A41

<p style="text-align: center;">Sin Foto</p> <p style="text-align: center;">Código Muestra A41</p>	<p style="text-align: center;">Código Roca Litología Fracturas/Vetillas Mineralogía Espesor Resistencia al Corte Alteración Visible UCS [Mpa] E [Gpa] ν ϕ [°] C [Mpa] Espaciamiento de discontinuidades Rugosidad (JRC) Grado de Meteorización Tipo de Roca Granularidad Tamaño del Grano Estructura</p>	<p style="text-align: center;">A41 Lutita Calcárea Vetillas de Calcita Calcita 1 - 5 mm <> No presenta 36 42,5 <> <> <> 1 - 2 cm 2 a 4 Levemente Meteorizada Sedimentaria <> Limolita a Arenisca muy Fina <></p>
---	---	---