

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA EN MINERÍA SUPERFICIAL: UN CASO DE  
ESTUDIO**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

**PRESENTADO POR:**

**MANOLO REINARIO MAMANI PONCE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**PUNO, PERÚ**

**2019**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA EN MINERÍA SUPERFICIAL: UN**  
**CASO DE ESTUDIO.**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PRESENTADO POR:**

**BACH. MANOLO REINARIO MAMANI PONCE**

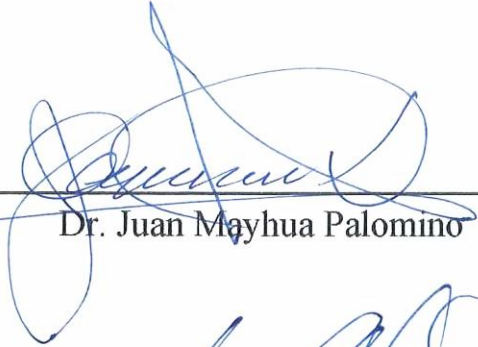
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

APROBADO POR:

PRESIDENTE

:

  
Dr. Juan Mayhua Palomino

PRIMER MIEMBRO

:

  
Ing. David Velásquez Medina

SEGUNDO MIEMBRO

:

  
MSc. Lucio Quea Gutierrez

**TEMA:** Caracterización geomecánica en minería superficial: un caso de estudio.

**AREA:** Ingeniería de Minas.

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 07 de noviembre del 2019.

## DEDICATORIA

A mis padres Facundo Santiago Mamani Villahermosa y Felipa Ponce Enríquez; A mis hermanos, a mí mayor inspiración, Antonela Bermejo Garabito y a mi familia más cercana.

A todos Ustedes es una satisfacción y un privilegio dedicarles, con alegría y entusiasmo personal, profesional y también intelectual, los cientos de horas invertidas en este trabajo de investigación, que no es más que la evidencia de la muestra de mi amor y cariño hacia ustedes.

## AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a mis padres por darme la vida, por los valores y fuerzas para afrontar el día a día, siempre dispuestos a escucharme y a darme su apoyo incondicional, también por el sacrificio que ellos realizaron para que yo culmine la carrera profesional de Ingeniería de Minas.

Agradezco a los docentes de la Facultad de Ingeniería de Minas, que fueron parte de mi formación académica-profesional, y que estuvieron siempre dispuestos a responder mis preguntas y aclarar mis dudas, impartiendo conocimientos y experiencias que fueron vitales en mi aprendizaje.

A la Universidad Nacional del Altiplano Puno, mi Alma Mater que me tuvo entre sus aulas durante los años de mi formación profesional, otorgándome parte del conocimiento que he adquirido y que me servirá en mi desenvolvimiento profesional.

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
TITULO.....	9
AUTORES, AFILIACIÓN Y DIRECCIÓN INSTITUCIONAL.....	9
RESUMEN.....	9
PALABRAS CLAVES.....	9
INTRODUCCIÓN.....	11
MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	21
CONCLUSIONES.....	26
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 01: Ubicación de la mina Cuajone.....	12
Figura 02: Ubicación de las estaciones pluviométrica y meteorológicas en el rio Torata.....	16
Figura 03: Esquema ilustrativo de los parámetros que describen las estructuras presentes en el macizo rocoso.....	18
Figura 04: Posibles formas de realizar el ensayo de carga puntual.....	19
Figura 05: Abaco para la determinación de la compresión uniaxial.....	19
Figura 06: Muestra sometida a compresión uniaxial.....	20
Figura 07: Abaco del GSI.....	21
Figura 08: Histograma del RQD.....	24
Figura 09: Histograma del UCS.....	24
Figura 10: Histograma del $RMR_{89}$ .....	25
Figura 11: Histograma del GSI.....	25

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 01: Distribución de la mineralización.....	14
Tabla 02: Rango de valores del RQD.....	20
Tabla 03: Valoración del macizo rocoso $RMR_{89}$ .....	20
Tabla 04: Datos de entrada para el cálculo de la resistencia del macizo rocoso.....	25
Tabla 05: Parámetros de resistencia.....	25
Tabla 06: Parámetros de resistencia de las estructuras.....	26

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RQD : Designación de la calidad de roca (Rock Quality Designation).

RMR: Valoración del macizo rocoso (Rock Mass Rating).

GSI : Índice de resistencia geológica (Geological Strength Index).

UCS : Resistencia a la compresión uniaxial (Uniaxial Compressive Strength).

Mpa : Mega Pascales.

$m_b$  : Constante de Hoek-Brown del macizo rocoso.

$m_i$  : Constante de Hoek-Brown de la roca intacta.

$s, a$  : Constantes que dependen de las características del macizo rocoso

$\sigma_{cm}$  : Resistencia a la compresión simple del macizo rocoso.

$\sigma_{ct}$  : Resistencia a la tracción del macizo rocoso.

$\sigma_c$  : Resistencia a la compresión simple de la roca intacta.

$\sigma_t$  : Resistencia a la tracción de la roca intacta.

$c$  : Cohesión

$\phi$  : Ángulo de fricción.

N : Norte.

S : Sur.

E : Este.

O : Oeste.



## Caracterización geomecánica en minería superficial: un caso de estudio

### Geomechanical characterization in surface mining: a case study

Manolo Reinario Mamani Ponce.

*Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional del Altiplano, Av. Floral N°*

*1153, Puno, Perú.*

[\*reinariomp@gmail.com\*](mailto:reinariomp@gmail.com)

*CEL: 981- 631457*

#### Resumen

La presente investigación aborda la caracterización del macizo rocoso en minería superficial, en particular del talud Sur - Oeste de la fase 5 de la minera Cuajone, durante el periodo 2018, ubicado en el flanco occidental de los andes del sur del Perú, entre los 2950 y 3880 m.s.n.m., en el distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto, departamento de Moquegua. El objetivo de la presente investigación es caracterizar el macizo rocoso del talud Sur- Oeste de la fase 5 de la minera Cuajone. Para llevarla a cabo, fue necesario realizar la descripción de las características generales del talud, identificar dominios geotécnicos, descripción general de cada dominio, descripción detallada de cada dominio (roca intacta y discontinuidades), descripción de los parámetros del macizo rocoso, caracterización global del macizo rocoso y clasificación geomecánica del macizo rocoso. La recolección de datos se realizó a partir de la caracterización geológica, estructural, geotécnica e hidrogeológica. Para determinar la calidad del macizo rocoso se utilizó las clasificaciones geomecánicas RMR de Bieniawski, 1989 y el GSI de Hoek & Marinos, 2000. Los resultados obtenidos en la presente investigación fueron: un valor medio del UCS de 69.70 Mpa, lo cual es considerada como roca dura, R4 según Brown 1981, un RQD promedio de 50.46% lo que corresponde a una roca de calidad mala según Deere (1967), un RMR promedio de 55, el cual pertenece a una Roca Regular, Tipo III, un GSI medio de 47, el cual corresponde a una estructura muy fracturado y una condición superficial regular.

#### Palabras claves

Macizo rocoso, dominio geotécnico, clasificación geomecánica.

### Abstract

The present investigation approach the characterization of the rock mass in surface mining, in particular the South - West slope of phase 5 of the Cuajone mining company, during the 2018 period, located on the western flank of the southern Andes of Peru between 2,950 and 3,880 m.a.s.l. in the district of Torata, province of Mariscal Nieto, department of Moquegua. The objective of the present investigation is to characterize the rock mass of the South-West slope of phase 5 of the Cuajone mining company. To carry it out, it was necessary to describe the general characteristics of the slope, division into geotechnical controls and general description of each geotechnical control, detailed description of each control (intact rock and discontinuities), description of the parameters of the rock mass, global characterization of the massif Rocky and geomechanical classification of the rock mass. Data collection was carried out based on geological, structural, geotechnical and hydrogeological characterization. To determine the quality of the rock mass it was used the RMR classification system of Bieniawski, 1989 and the GSI of Hoek & Marinos, 2000. The results obtained in the present investigation were: an average value of UCS of 69.70 Mpa, which is considered as hard rock, R4 according to Brown 1981, an average RQD of 50.46% which corresponds to a rock of poor quality according to Deere (1967), an average RMR of 55, which belongs to a Regular Rock, Type III, an average GSI of 47, which corresponds to a very fractured structure and a regular surface condition.

### Keywords

Rock mass, geotechnical control, geomechanical classification.

## 1. Introducción

La caracterización geomecánica y la identificación de los modos de falla más recurrentes contribuirán a un mejor conocimiento de la mecánica de rocas y del comportamiento de las estructuras que constituyen el talud Sur - Oeste de la fase 5 de la minera Cuajone, con la aplicación de teorías, principios y herramientas geotécnicas. Los métodos de caracterización utilizados en la presente investigación contribuirán en el conocimiento de las propiedades físicas, mecánicas, resistentes y de deformación con las cuales podremos tomar decisiones adecuadas frente al comportamiento del macizo rocoso al realizar una obra sobre o dentro de la misma. El objetivo de la presente investigación es caracterizar el macizo rocoso del talud Sur-Oeste de la fase 5 de la minera Cuajone, a partir de la caracterización geológica, estructural, geotécnica e hidrogeológica del macizo rocoso.

Los taludes emplazados en macizos rocosos, especialmente los ubicados en áreas montañosas están propensos a problemas de inestabilidad debido a la de las condiciones del macizo rocosos y factores externos inducidos por agentes ambientales, así como actividades sísmicas y presencia de agua en el macizo rocoso (Pantelidis, 2009).

La caracterización de campo del macizo rocoso es un proceso progresivo que inicia con una descripción general de las condiciones del terreno, y con la identificación y clasificación de los materiales que forman los macizos

(González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, y Oteo, 2002).

En una primera etapa del estudio de una excavación subterránea o a cielo abierto, normalmente no se tiene acceso al macizo rocoso en profundidad. En este caso se deben utilizar los afloramientos en superficie para obtener la máxima información sobre los tipos litológicos y las características estructurales del macizo rocoso. Para realizar la caracterización del macizo rocoso en donde se desarrollará una excavación, se necesita conocer los parámetros básicos de la roca y discontinuidades, así como la estructura del macizo rocoso que incluye aspectos como el número de familias de discontinuidades existentes, el espaciado medio de los planos de discontinuidad, las características geomecánicas básicas de las discontinuidades. Asimismo, será necesario medir o estimar el estado tensional in-situ y en su caso las alteraciones producidas en el macizo por otras excavaciones (Ramírez y Alejano, 2007).

En las etapas de factibilidad y de diseño preliminar de un proyecto, cuando poca información detallada se tiene disponible del macizo rocoso, estado de esfuerzos e hidrogeología; el uso de un sistema de clasificación es muy beneficioso. Una clasificación del macizo rocoso nos proporciona un valor numérico de la calidad del macizo rocoso a partir de sus parámetros de su estructura y su roca matriz, a fin de proporcionarnos estimadas iniciales de los requerimientos de sostenimiento y de las

propiedades de resistencia y deformación del macizo rocoso (Hoek, 2006).

La caracterización del macizo rocoso y las condiciones de las discontinuidades representan la esencia de la mayoría de los métodos empíricos. Estas condiciones pueden ser resumidas en seis categorías, la resistencia a la compresión no confinada (UCS) de la roca intacta, la designación de la calidad de la roca (RQD), espaciamiento entre discontinuidades, condición de las discontinuidades, condición del agua en el terreno y la orientación de las discontinuidades con referencia a la obra. Estos seis parámetros están contenidos en el sistema de clasificación RMR (Bieniawski, 1989).

Estos métodos permiten, de forma sencilla, estimar la calidad del macizo rocoso, mediante la cuantificación de parámetros de fácil medición, los cuales se establecen en el campo de manera rápida y con costos económicos mínimos. (Maureen, Rodríguez, y Zúñiga, 2002).

La clasificación GSI se basa en una observación cuidadosa del macizo rocoso, por consiguiente, es esencialmente cualitativa. Este índice incorpora la estructura del mismo y las características geomecánicas de las superficies de discontinuidad existentes en él y se obtiene a partir de un examen visual del macizo rocoso en afloramientos y sondeos (Ramírez y Alejano, 2007).

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Ubicación

La unidad minera Cuajone se encuentra

ubicada en el flanco Occidental de los Andes del Sur del Perú entre los 2,950 y 3,880 m.s.n.m., aproximadamente a 45 Km al NE de la ciudad de Moquegua, Distrito de Torata, Provincia de Mariscal Nieto, Departamento de Moquegua. El tajo en explotación se encuentra ubicada en la ladera Sur de la Quebrada Torata y atravesada en la parte central por la quebrada Chuntacala con una dirección E-O.

El área de la unidad minera Cuajone está representada por las coordenadas UTM.

**317 685 E – 8 117 350 N**

**319 515 E – 8 115 815 N**

Zona 19, Banda K (Datum WGS-84) las cuales pertenecen a la carta Topográfica Nacional 35-U correspondientes al Cuadrángulo de Moquegua.



Figura 01: Ubicación de la mina Cuajone.

Fuente: Google Maps.

### 2.2. Clima

Las pampas costaneras, es cálido y desértico, sin precipitaciones, sin embargo, raras veces se presentan garuas ligeras a causa de las neblinas. en el flanco andino varía las condiciones, dependiendo de la altitud, con

presencia de condiciones de frío moderado a intenso. Al este de las pampas costaneras, las temperaturas son moderadas. En la zona este de las pampas costaneras, las temperaturas son moderadas, con mayor temperatura durante el día y escasas lluvias. Las lluvias se presentan durante los meses de diciembre a marzo. (Bellido, 1979).

### 2.3. Geología Local

El depósito de pórfidos de cobre Cuajone, como la mayoría de estructuras mineralizadas de pórfidos ha sufrido una intensa alteración hidrotermal ha destruido parcial y totalmente la textura original de las rocas de caja y la agrupación mineralógica en las rocas premineral e intrusivas en Cuajone.

La litología que domina el yacimiento está mayormente conformada por rocas volcánicas que se han depositado a través de los tiempos desde fines del Cretáceo hasta la actualidad, las cuales son las de mayor antigüedad.

#### 2.3.1. Litología

##### 2.3.1.1. Basamento premineral Cuajone

Las rocas más antiguas de la mina son los miembros inferiores de los volcánicos del Grupo Toquepala entre los 80 y 60 Ma. (Cretáceo). La Andesita Basáltica (BA) y la Riolita Porfirítica (RP), la correlación de estos flujos volcánicos con otros miembros del grupo encontrados en Quellaveco y Toquepala.

##### Andesita basáltica (BA)

Secuencia de flujo lávico pertenecientes

probablemente a los Volcánicos Paralaque del Grupo Toquepala, rocas de color gris verdosa a negra, dependiendo del grado de alteración. Su color es debido a la sobreimposición de Biotita Secundaria de origen hidrotermal, presenta una textura que varía de fanerítica holocristalina de grano fino a porfirítica.

##### Andesita intrusiva (IA)

Andesita Intrusiva está compuesta por granos de plagioclasas, biotita, hornblenda y cuarzo, con una coloración gris verdosa, con una textura mayormente equigranular.

##### Rolita porfirítica (RP)

Está compuesta por un flujo ácido porfirítico de textura muy marcada con abundantes fenocristales de cuarzo de diferentes tamaños de hasta 2 mm de diámetro, generalmente sub-redondeados. La matriz es afanítica, densa y dura con una coloración de gris claro a blanquecino, está concordantemente encima la BA (Andesita Basáltica) con un ligero buzamiento hacia el Oeste - Suroeste.

##### Dolerita (DI)

Ubicada en la parte superior de la riolita porfirítica, compuesto por un flujo volcánico, negro, gris, verdoso y marrón, correspondiente a la dolerita de Toquepala.

##### 2.3.1.2. Rocas intrusivas

##### Diorita (DI)

En la zona oeste de la mineralización, alrededor de 1 a 2 km se presenta un stock de diorita de forma irregular, que cuyo eje tiene

una dirección de N-S. El stock atraviesa a la andesita basáltica y a toda la secuencia del grupo Toquepala (Park, 1998).

**Latita porfirítica (LP)**

El cuerpo intrusivo predominante es un stock de latita porfirítica, el cual se emplaza en el fondo de la mina, cuya extensión promedio es de 2.5 km de largo y 0.7 km de ancho con una dirección de NO- SE.

**2.3.1.3. Brechas (Bx)**

En la minera Cuajone se presentan pequeños afloramientos de brechas que se emplazan y bordean las latitas porfiríticas.

**2.3.1.4. Diques (Dk)**

En la minera Cuajone se presentan diques de 800 m de longitud con potencias de 3m en promedio, compuestas por latitas porfiríticas con mineralización de pirita.

**2.3.1.5. Volcánicos posmineral**

**Volcánico Huaylilla (Ts-Vh)**

Esta estructura aflora en la parte sureste de la quebrada Chuntacala y en la parte norte del río Torata; el cual está constituido por conglomerados, tobas, vitrofiros, traquitas y aglomerados (Manrique, Plazoles, 1975).

**Formación Chuntacala (Ts-ch)**

En la parte central de los valles de Chuntacala y Torata se han depositado volcánicos, al cual se le denomina formación Chuntacala y al que se le dota de una edad de 9 a 14 millones de años, perteneciente al mioceno.

La formación Chuntacala se compone de conglomerados, flujos volcánicos, tobas y aglomerados; los cuales se han depositado en forma secuencial y también en forma discordante.

**Alteraciones hidrotermales**

La presentación de estos cambios se manifiesta en un tramo de 3 a 4 km conforme se acerca a la estructura mineralizada y que también está controlada por el fracturamiento y permeabilidad del macizo rocoso.

Las rocas en los cuales predominaban el cuarzo-feldespático se transformó a fílico-argílico y las rocas que contenían ferromagnesianos se convirtieron a biotita y cloritas.

**2.3.2. Mineralización de cobre**

la mineralización está comprendida en una extensión de 1,200 x 950 km<sup>2</sup> en dirección de NO-SE, en forma de embudo conforme se profundiza.

Tabla 01: Distribución de la mineralización.

Tipo de roca	(%)
Andesita basáltica (AB)	51
Latita porfirítica (LP)	47
Riolita porfirítica (RP)	1
Brechas (Bx)	1

Fuente: (Gutierrez Marquez, 2018).

**2.3.2.1. Zona lixiviada**

Su origen es por la intrusión del cobre a partir del ácido sulfúrico, que se formó por la reacción del agua supergena con pirita

(Satchwell, 1982)

El área lixiviada se manifiesta en la riolita porfirítica en la parte sur en donde se aprecia un espesor de hasta 120 m.

#### **2.3.2.2. Zona de óxidos**

El fenómeno está relacionado con la presencia de aguas subterráneas las cuales contienen  $\text{CO}_2$   $\text{O}_2$  y algunas veces compuestos de yoduros, bromuros y cloruros. Estos compuestos son los generadores de sulfatos férricos y el cloruro férrico los que reaccionan formando sustancias sulfatadas  $\text{Cu}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)$ ,  $\text{ZnSO}_4$ ; con un PH ligeramente ácido a moderado, algunas veces alcalino cuando estas circulan a través de carbonatos y feldespatos.

#### **2.3.2.3. Zona enriquecida**

La parte enriquecida está compuesta por sulfuros secundarios sobre otro tipo de mineralización que es económicamente explotable, el cual se traduce en un aumento de la concentración de la ley de cobre y que posee una potencia promedio de 20 m (Stevenson, 1972). Esta zona está representada por minerales como la calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), bornita ( $\text{Cu}_5\text{SFe}_4$ ) y la covelina ( $\text{CuS}$ ); los cuales han reemplazado parcial o total a la calcopirita y de manera parcial a la pirita en forma de un revestimiento.

#### **2.3.2.4. Zona transicional**

Es la zona ubicada entre la zona de enriquecimiento y la zona primaria. Esta zona

se compone de sulfuros de la zona primaria y de los sulfuros de la zona enriquecida, los minerales presentes en esta zona son la pirita y la calcopirita y en menor proporción la calcosina y la bornita.

#### **2.3.2.5. Zona primaria**

Es la zona que se encuentra en la parte más profunda del tajo y la que es predominante mineralógicamente. La mineralogía está constituida por pirita, calcopirita, bornita y ocasionalmente tiene esfalerita, galena y enargita presentados en forma de diseminados dentro del stock principal de latita porfirítica.

#### **2.3.3. Mineralización de molibdeno**

Es un subproducto de la mineralogía presente en el yacimiento de Cuajone, el cual se presenta como molibdenita, el cual se está como diseminado, venillas de cuarzo y en forma de hollín en las fracturas. La ley promedio de molibdenita es de 0.020%.

#### **2.3.4. Geología estructural local**

Conforme la operación avanzaba se fue descubriendo y caracterizando diversas estructuras mayores y menores, las cuales definen el comportamiento estructural del yacimiento. Las estructuras en dirección de NO-SE con azimut de  $130^\circ$  son las que dominan la geología estructural del yacimiento. La falla Botiflaca y la prolongación de la falla Viña Blanca hacia el noreste hacen que la tendencia de la mineralización sea en dicha dirección y con la predominancia del comportamiento estructural en dicha dirección.

Con la intrusión de pulsos magmáticos la latita porfirítica presenta un fracturamiento intenso tipo stockwork ocasionado por las fuertes presiones del magma, fluidos hidrotermales y vapores. El origen del stockwork hizo que haya un intenso fracturamiento y cizallamiento (Satchwell, 1982)

La zona SE del yacimiento presenta unas estructuras en bloques, causadas por la convergencia de las fallas NO-SE con otras tendencias E-O. Las fallas con tendencia E-O están rellenas por latita posmineral, los cuales están constituidos por latita porfirítica, estos diques en gran mayoría carecen de cuarzo a diferencia de la latita porfirítica del stock mineral. En la mina no se han identificado hasta ahora estructuras verticales o subverticales de más de 50 m de persistencia y los cuales presentan estructuras con dirección irregular. Los flujos lávicos como la traquita y el toba cristal tienen un fracturamiento subhorizontal rellenas con arcillas y con persistencia mayores de 50 m.

## 24. Hidrogeología

La mina Cuajone está ubicada en la parte central de la cuenca hidrográfica del río Torata, el cual tiene un flujo en dirección de E-O con un área de 424 km<sup>2</sup> una longitud de 60 km y un ancho de 13 km. La cabecera presenta una cota máxima de 5300 m.s.n.m., la parte baja está en una cota de 1500 m.s.n.m. a una altura de la misma ciudad de Moquegua y en donde se unen los ríos Tumulaca y Torata conformando el río Moquegua.

La cuenca hidrográfica Torata está compuesta por una presa de control de máximas avenidas y un sistema de túnel-canal, por el cual circula agua alrededor de toda la mina y retornando al río Torata. En gran parte del año cuando las lluvias son escasas el río mantenía un caudal de 320 l/s y en el periodo de máximas avenidas llega hasta caudales de 1534.4 l/s.

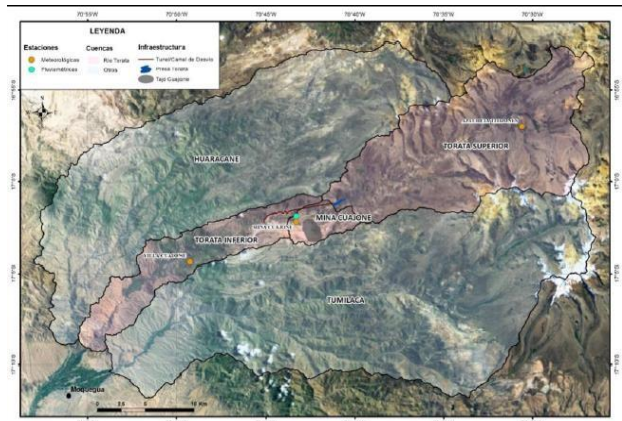


Figura 02: Ubicación de las estaciones pluviométricas y meteorológicas en el río Torata.

Fuente: SRK Consulting, informe-hidrología de la mina Cuajone.

## 25. Métodos de estudio

Para lograr los objetivos planteados en la presente investigación es necesario cumplir con las siguientes etapas:

### 25.1. Revisión, compilación, recopilación y elaboración de informes preliminares

El conocimiento de un fenómeno necesita de la revisión de información, para lo cual se revisó una amplia bibliografía referente a la caracterización del macizo rocoso en minería superficial, la bibliografía consta de artículos, textos, informes, tesis, etc.



## 2.5.2. Caracterización geológica

El propósito de la caracterización geológica es relacionar la geología física regional a los eventos que inician la formación geológica, y requiere una comprensión básica de la geología física (Read & Peter, 2009). Básicamente se describe la litología, meteorización y las alteraciones.

### 2.5.2.1. Litología

Descripción breve de cada tipo de roca, con énfasis en sus características típicas como material pétreo (dureza, degradabilidad, etc.). (Flores & Karzulovic, 2003).

### 2.5.2.2. Meteorización

El grado de meteorización de una roca es una observación importante en cuanto se condiciona de forma definitiva sus propiedades mecánicas. Según se avanza el proceso de meteorización aumenta la porosidad, permeabilidad y deformabilidad del material rocoso, al tiempo que disminuye su resistencia. La identificación del estado o grado de meteorización de la matriz rocosa se puede realizar de forma sistemática a partir de las descripciones (Gonzales de Vallejo et al, 2002).

### 2.5.2.3. Alteraciones

Descripción breve de los tipos de alteración que afectan a las rocas en el área de interés, con énfasis en los efectos sobre las características de estas rocas, por ejemplo, un aumento en el contenido de minerales arcillosos (Flores & Karzulovic, 2003).

## 2.5.3. Caracterización estructural

El análisis estructural procura representar la orientación espacial de las diferentes estructuras geológicas, con el objeto de entender los mecanismos de deformación en el área de estudio y también pudiéndose definir una distribución de tensiones que originan las tensiones (Suarez, 2013).

### 2.5.3.1. Mapeo de estructuras

En los métodos sugeridos por la ISRM para la descripción cuantitativa de discontinuidades en macizos rocosos se reseñan 10 parámetros que es preciso describir para lograr este tipo de caracterización (Brown (1981)). Estos parámetros se ilustran en el esquema de Figura 2.2, y son los siguientes: (Flores & Karzulovic, 2003).

- Número de familias o sistemas de estructuras que aparecen en el macizo rocoso.
- Orientación de cada familia (buzamiento y dirección de buzamiento).
- Espaciamiento entre estructuras de una misma familia o set estructural.
- Persistencia o extensión de las estructuras de cada familia de discontinuidad.
- Rugosidad de las estructuras de cada familia.
- Apertura (estructuras abiertas) o potencia (estructuras selladas) de cada familia.
- Tipo(s) de relleno(s) presente(s) en las estructuras de cada familia.
- Resistencia de la roca de caja para cada set de estructuras.

- Características de la percolación de aguas observada en las estructuras de cada familia.
- Tamaño de los bloques que definen las estructuras en el macizo rocoso.

### Mapeo por línea de detalle

El mapeo por línea de detalle involucra la medida y registro de los atributos, características de todas las estructuras que atraviesa la línea de muestreo (Read & Stacey, 2009).

### Mapeo por celdas

Mediante el mapeo geomecánica por celdas se identifican y cuantifican características del macizo rocoso, las características de las principales familias de discontinuidades (Osinergmin, 2017).

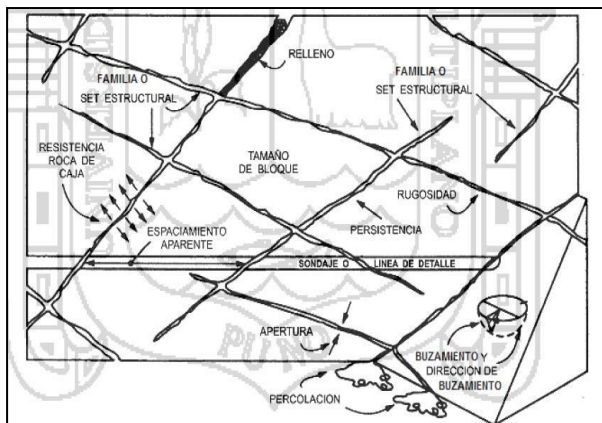


Figura 03: Esquema ilustrativo de los parámetros que describen las estructuras presentes en el macizo rocoso.

Fuente: (Hudson, 1989).

### 2.5.4. Caracterización hidrogeológica

La caracterización hidrogeológica resulta fundamental para definir las posibles infiltraciones de aguas a la cantera, tanto a tajo

abierto como subterránea, y los potenciales requerimientos de drenaje y/o despresurización (Valeriano, 2015).

En la gran mayoría de los casos la conductividad hidráulica de los macizos rocosos queda definida por la presencia de estructuras, las cuales definen lo que comúnmente se denomina “permeabilidad secundaria” y en órdenes de magnitud mayor que la llamada “permeabilidad primaria”, asociada al flujo a través de la roca misma. Por lo mismo, la conductividad hidráulica de los macizos suele ser muy anisotrópica, siendo mucho mayor en la dirección de las estructuras que permiten el flujo de aguas que en la dirección normal a éstas (Ramírez y Alejano, 2007).

### 2.5.5. Caracterización geotécnica

La caracterización geotécnica resulta fundamental para definir las propiedades mecánicas de la roca “intacta”, las estructuras y el macizo rocoso. Para comprender los modos de falla en taludes en roca (Ramírez y Alejano, 2007).

#### 2.5.5.1. Clasificación geomecánica

Las clasificaciones geotécnicas tienen por objeto caracterizar ingenierilmente un determinado macizo rocoso en función de una serie de parámetros a los que se les designa un cierto valor. Clasificar geomecánicamente un macizo rocoso consiste en otorgarle una puntuación según una metodología o criterio establecido (Bordehorde, 2013).

**Propiedades de la roca intacta**

Para definir las propiedades mecánicas de la roca intacta deberán obtenerse probetas de cada unidad geológica básica y someterlas a ensayos de laboratorio, para determinar a lo menos: El peso unitario, la resistencia a la compresión uniaxial, la deformabilidad. Podrán seguirse las recomendaciones de la ISRM (Brown (1981)) y/o las Normas ASTM (1999). (Flores & Karzulovic, 2003).

**Resistencia de la roca intacta**

**Ensayo de carga puntual**

El ensayo de carga puntual tiene como objetivo estimar la resistencia a la compresión simple de manera indirecta, mediante la obtención del índice IS<sub>(50)</sub> en muestras de rocas regulares e irregulares. Es un ensayo muy sencillo de ejecución rápida y bajo costo (Osinergmin, 2017).

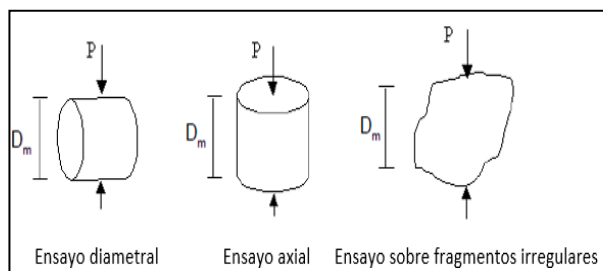


Figura 04: Posibles formas de realizar el ensayo de carga puntual.

Fuente: (Hidalgo, 2002).

**Ensayo con esclerómetro (martillo Schmidt)**

El ensayo con esclerómetro tiene como objetivo estimar, de manera aproximada, la resistencia a la compresión simple mediante una correlación entre el número de rebotes, dirección de aplicación de carga y la densidad

de la muestra. Se puede aplicar tanto a la roca intacta como a las discontinuidades; es un ensayo fácil de realizar, rápido y de uso extendido. (Osinergmin, 2017):

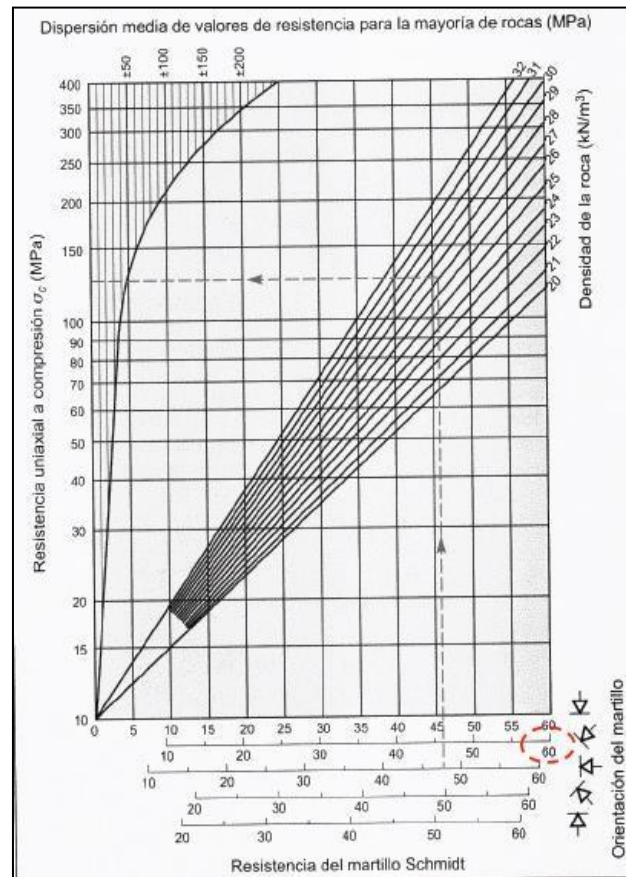


Figura 05: Abaco para la determinación de la compresión uniaxial.

Fuente: (Osinergmin, 2017).

**Ensayo de compresión simple**

La resistencia a la compresión uniaxial de la roca( $\sigma_c$ ), como se muestra en la figura 06, es un esfuerzo máximo que soporta un cuerpo cilíndrico cuya relación entre la altura y el diámetro varía entre 2.5 y 3, cuando es sometido a una carga compresiva axial hasta su rotura (Tejada, 2010).

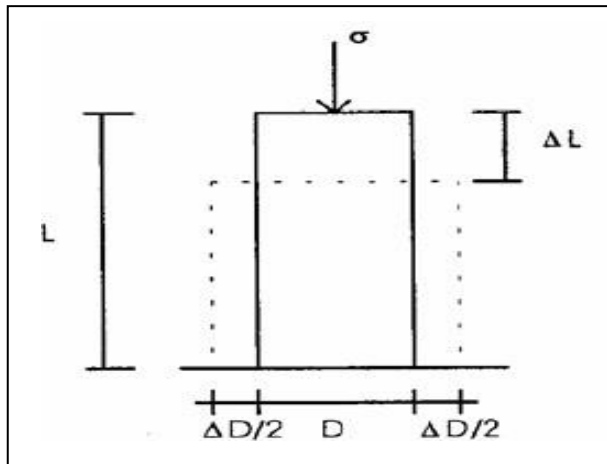


Figura 06: Muestra sometida a compresión uniaxial.

Fuente: (Assis, 2003).

### Índice de calidad de roca (RQD)

Propuesto en 1964 por Deere, este parámetro pretende medir el grado de fracturación en el cual se encuentra un macizo rocoso. Este índice puede ser medido directamente a partir de los sondajes de perforación, sumando trozos de una corrida mayores a 10 cm y dividiendo por la longitud de la corrida y multiplicado este cociente por 100, e indirectamente a través de relaciones de Palmstrom (1982) y los propuestos por Priest y Hudson (1976).

Tabla 02: Rango de valores del RQD.

Descripción	RQD
Muy mala	0-25
Mala	25-50
Regular	50-75
Buena	75-90
Excelente	90-100

Fuente: (Osinermin, 2017).

### Clasificación RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski, 1989.

El sistema Rock Mass Rating (RMR) fue desarrollado por Bieniawski, y clasifica los macizos rocosos de 0 a 100 puntos, siendo 0 para roca muy mala y 100 para roca muy buena, de acuerdo a la Tabla 03, este sistema incorpora la valoración de parámetros como (Osinermin, 2017):

- Resistencia a la compresión simple de la Roca Intacta.
- RQD.
- Espaciamiento de discontinuidades.
- Condición de discontinuidades.
- Agua subterránea.
- Ajuste por orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

Tabla 03: Valoración del macizo rocoso RMR

Descripción	RMR	Clase
Roca muy Buena	81-100	I
Roca Buena	61-80	II
Roca regular	41-60	III
Roca mala	21-40	IV
Roca muy mala	0-20	V

Fuente: (Bieniawski, 1989).

### Clasificación GSI (Geological Strength Index) de Hoek & Marinos, 2000.

El índice de resistencia geológica (GSI) es un índice de caracterización de macizos rocosos que evalúa al macizo rocoso en función a dos criterios: estructura geológica y condición de la superficie de las juntas. Tiene gran

aceptación en el Perú por su facilidad de uso entre el personal de operaciones (Osinergrmin, 2017).

- Martillo de geólogo.
- Tablero.
- Impresora.
- Lupa de geólogo.
- Ácido clorhídrico.

INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICO GSI (Hoek & Marinos, 2000). A partir de la litología, estructura y la condición de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio de GSI. No intente ser muy preciso. Escoger un rango de 33 a 37 es mas realista que fijar GSI=35. Tambien notar que esta tabla no se aplica a mecanismos de falla controlado por estructuras. Donde se presenten planos estructuralmente debiles en una orientación desfavorable con respecto a la cara de la excavación, estos dominaran el comportamiento del macizo rocoso. La resistencia al corte de las superficies en rocas que son propensas a deteriorarse como resultado de cambios en la humedad, se reduira cuando exista presencia de agua. Cuando se trabaje con rocas de categoria regular a muy mala, puede moverse hacia la derecha para condiciones humedas. La presion de poros se maneja con un analisis de esfuerzos efectivos.		CONDICIONES SUPERFICIALES				
ESTRUCTURA		MUY BUENA Muy rugoso. Superficies frescas sin meteorización	BUENO Rugoso, ligeramente meteorizada. superficies con óxido.	REGULAR Lizas, moderadamente meteorizadas y superficies alteradas.	MALA Espejo de falla, altamente meteorizadas con recubrimiento compacto o rellenos o fragmentos	MUY MALA Espejo de falla, superficies altamente meteorizadas con recubrimiento de arcilla suave o rellenos
		DISMINUYE CALIDAD DE SUPERFICIE →				
	Intacta o Masivo: Especimenes de roca intacta o masivo in situ con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.	80			N/A	N/A
	Levemente fracturado: Macizo rocoso no disturbado, muy bien entrelazado, constituido por bloques cubicos formados por tres familias de discontinuidades	80	70			
	Moderadamente Fracturado: Entrelazado, macizo rocoso parcialmente disturbado con bloques angulosos de varias caras formado por 4 o mas familias de discontinuidades		60	50		
	Muy Fracturado/Disturbado/Agrietada: Foleada con bloques angulosos formados por la interseccion de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificación o esquistosidad			40	30	
	Desintegrado: Pobremente entrelazado, macizo altamente fracturado compuesto de una mezcla de pedazos de rocas angulosas y redondeadas				20	
	Foliado/Laminado/Cizallado: Falta de formacion de bloques debido al pequeño espaciamiento o esquistosidad débil o planos de corte	N/A	N/A			10

Figura 07: Abaco del GSI.

Fuente: (Hoek & Marinos, 2000).

## 2.6. Materiales

Los materiales a utilizarse en la presente investigación son las siguientes:

- EPP's.
- Brújula de marca Brunton.
- Peine de Barton.
- Flexómetro.
- Cinta métrica.
- Libreta de notas.
- Útiles de escritorio.
- Martillo Schmidt tipo L.
- Estación total.
- GPS.
- Softwares especializados.
- Laptop.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Caracterización geológica

#### 3.1.1. Litología

Definir la litología y su respectiva alteración por tipo de roca es de total importancia para una correcta elección de muestras para ensayos geotécnicos. Por lo que en la zona se puede evidenciar las siguientes litologías (de arriba hacia abajo): comenzando de la parte superior una Riolita Porfírica Fílica, seguidamente una Andesita Intrusiva Fílica; luego, una Andesita Basáltica Argílica; después, una LP-QS y finalmente se puede observar una BLP-Fresca.

#### 3.1.2. Alteraciones

Los cambios en mineralogía, química y composición textural de las rocas llevados a cabo por factores fisicoquímicos, esencialmente por soluciones hidrotermales, producen la alteración hidrotermal, que es el resultado de un intento de los contactos de las rocas por alcanzar un equilibrio bajo elevadas condiciones de temperatura en un ambiente acuoso.

## 3.2. Caracterización estructural

Se hizo un mapeo a detalle de la zona que comprometía la Cuña 49 del Sector Sur-Oeste de la fase 5 del tajo Cuajone.

Encontrándose una falla de comportamiento deslizante con  $088^{\circ}/38^{\circ}$  NE y una falla de comportamiento cortante con  $011^{\circ}/60^{\circ}$  NE que delimitaba la parte superior de la Cuña 49.

### 3.2.1. Dominios estructurales

Es de vital importancia en toda operación identificar zonas con similar comportamiento para relacionarlo con posibles zonas inestables, diseños y planes de minado a corto, mediano y largo plazo.

#### 3.2.1.1. Dominio estructural 1

Este dominio se encuentra en la parte Norte del tajo en andesita basáltica y andesita intrusiva. Está limitado al Sur y al Suroeste, a través del límite primario-secundario, con el Dominio 2; al Sureste, limita con el Dominio 3 a través de la Falla Chuntacala 6.

#### 3.2.1.2. Dominio estructural 2

Este dominio se encuentra en la parte central-Norte del tajo en andesita basáltica principalmente, y menor proporción, andesita intrusiva hacia el sur del dominio; incluye también, algunos cuerpos de brecha de latita porfirítica y brecha de andesita intrusiva. El dominio está limitado al noreste por el Dominio 1, a través del límite primario-secundario; al Sur con el Dominio 8 (contacto litológico); y al Sureste con la Falla Chuntacala 6, que lo separa del Dominio 4.

#### 3.2.1.3. Dominio estructural 3

Este dominio se encuentra en la parte

Este del tajo, en una franja elongada en dirección NW-SE, compuesta por andesita basáltica; y menor proporción, por andesita intrusiva en el Noreste. El dominio está limitado al Noroeste por el Dominio 1, a través de la Falla Chuntacala 6; al Suroeste con el Dominio 4, a lo largo del límite primario-secundario; y al Sur, con la Zona de Fallas Sur, que lo separa del Dominio 5.

#### 3.2.1.4. Dominio estructural 4

Este dominio se encuentra en la parte central del tajo, en una litología variada, en que la parte más occidental dominan la latita porfirítica y las brechas de latita porfirítica; y en la parte oriental, las andesitas intrusivas y basálticas. El dominio está limitado al Noreste por el Dominio 3, a lo largo del contacto primario-secundario; al Sureste por el Dominio 5, través de la Zona de Fallas Sur; y al Oeste y Sur, por el Dominio 8, a través de la Falla Chuntacala 6.

#### 3.2.1.5. Dominio estructural 5

Este dominio se encuentra en la parte Sur del tajo, principalmente, en riolita porfirítica al Sur y andesita basáltica con andesita intrusiva, al Norte; además de latita porfirítica y brecha de latita porfirítica en menor proporción. El dominio está limitado en el Norte, por los dominios 4 y 3, a lo largo de la Zona de Fallas Sur; por el Oeste, también a lo largo de la Zona de Fallas Sur, por los dominios 6, y 7; y en el Sur, mediante contacto litológico, con el Dominio 10.

### 3.2.1.6. Dominio estructural 6

Este dominio se encuentra en la parte central-Sur del tajo, prácticamente en su totalidad en riolita porfirítica. El dominio está limitado al Norte, mediante contacto primario secundario, por el Dominio 7; al Sur, mediante contacto litológico, por el Dominio 10; y hacia el Este, a lo largo de la Zona de Fallas Sur, por el Dominio 5.

### 3.2.1.7. Dominio estructural 7

Este dominio se encuentra en la parte central-Oeste del tajo, en andesita intrusiva hacia el oeste, y andesita basáltica hacia el norte, más algunos cuerpos de brecha de latita porfirítica, latita porfirítica, latita porfirítica estéril y brecha de andesita basáltica. El dominio está limitado al Norte, mediante contacto litológico, por el Dominio 8; al Sur por el Dominio 6, a lo largo del contacto primario-secundario; y hacia el Este, a lo largo de la Zona de Fallas Sur, por el Dominio 5.

### 3.2.1.8. Dominio estructural 8

Este dominio se encuentra en la parte Oeste del tajo, en latita porfirítica y latita porfirítica estéril, más brechas de latita porfirítica y latita porfirítica estéril; además de una franja occidental de riolita porfirítica. El dominio está limitado al norte, mediante contacto litológico, por el Dominio 2; al Sur, también mediante contacto litológico, por el Dominio 7; y hacia el Este, a lo largo de la Falla Chuntacala 6, por el Dominio 4.

### 3.2.1.9. Dominio estructural 9

Este dominio se encuentra en la parte Noreste del tajo, en rocas volcanoclásticas: conglomerado basal, aglomerado blanco, toba cristal, toba inferior, aglomerado inferior, toba salmón y aglomerado superior. El dominio está limitado al Suroeste, mediante contacto litológico, por el Dominio 3; encontrándose abierto en otras direcciones.

### 3.2.1.10. Dominio estructural 10

Este dominio ocupa la parte Suroeste, Sur y Sureste del tajo, en una secuencia volcanoclástica, que incluye traquitas, toba traquítica, toba café, toba micácea, toba salmón, aglomerado tobáceo, toba blanca, conglomerado riolítico y aglomerado traquítico. El dominio está limitado al Norte, mediante contacto litológico, por los dominios 5 y 6; encontrándose abierto en otras direcciones.

## 3.3. Caracterización Hidrogeológica

La Mina Cuajone se encuentra en el sector intermedio de la cuenca hidrográfica del río Torata, la cual tiene una forma alargada con dirección de flujo general de Este a Oeste, una longitud de unos 60 km, un ancho máximo de unos 13 km y un área total de 424 km<sup>2</sup>. La cabecera de la cuenca presenta cotas máximas del orden de 5,300 msnm, mientras que la parte más baja de la cuenca se encuentra a unos 1,500 msnm. Las precipitaciones son escasas durante el año, y se presentan con mayor frecuencia en el periodo de diciembre a marzo, en forma de garuas. Según los registros de escorrentía del río

Torata de la estación Mina Cuajone antes de la construcción de la Presa Torata, el caudal promedio anual era de 553.4 l/s, pero con una marcada variabilidad anual, aumentando considerablemente en verano como consecuencia del período lluvioso. Aun cuando gran parte del año las precipitaciones son despreciables, el río tendía a mantener un caudal base de unos 320 l/s, sin secarse. En contraste, el mes más tormentoso era febrero con un caudal promedio de 1,634.4 l/s (Gutierrez, 2018).

### 3.3. Caracterización geotécnica

La caracterización Geotécnica comprende básicamente el colocarle un valor ingenieril (número) a la roca para poder estudiarla de mejor manera. Para este caso, la consultora SRK Chile definió que la zona de estudio que comprende el talud Sur-oeste de la fase 5 comprende la UGB 9. Esto fue corroborado por el tipo de roca que comprende la zona la cual fue una Andesita Intrusiva Fílica.

#### 3.3.1. Clasificación geomecánica

##### 3.3.1.1. Índice de calidad de roca (RQD)

Para el área de estudio se obtiene un RQD medio de 50.46% lo que corresponde a una **roca de calidad mala** según Deere (1967).

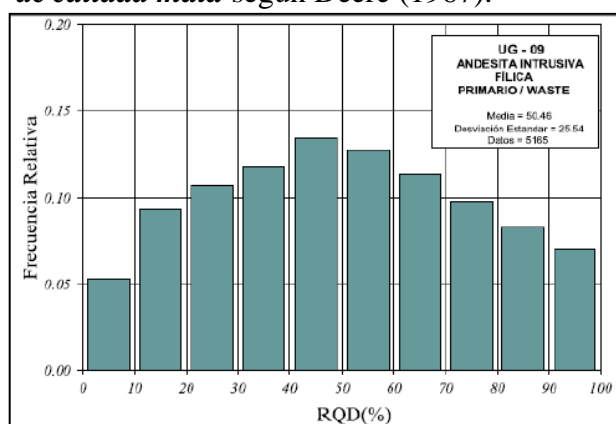


Figura 08: Histograma del RQD.

Fuente: SRK Consulting, Chile.

##### 3.3.1.1. Resistencia a la compresión Simple (UCS)

Para la zona de estudio de interés se ha considerado un valor medio del UCS de 69.70 Mpa, la cual es considerada como **roca dura**, R4 según Brown, 1981.

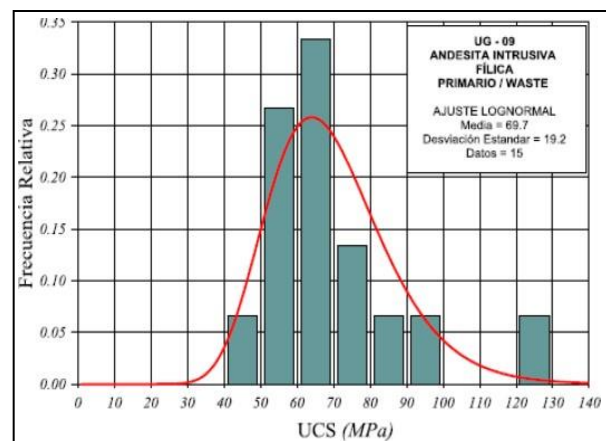


Figura 09: Histograma del UCS.

Fuente: SRK Consulting, Chile.

##### 3.3.1.1. RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski, 1989

Para la determinación del RMR de Bieniawski el cual se hizo por su método publicado en 1989, para este cálculo no se tomó en cuenta los parámetros del agua y tampoco el parámetro de la corrección por orientación, dado a que para los cálculos en programas de modelamiento numérico estos parámetros están incluidos en los esfuerzos efectivos.

El valor medio del RMR<sub>89</sub> para la zona de estudio es 55, el cual pertenece a una **Roca Regular, Tipo III**.



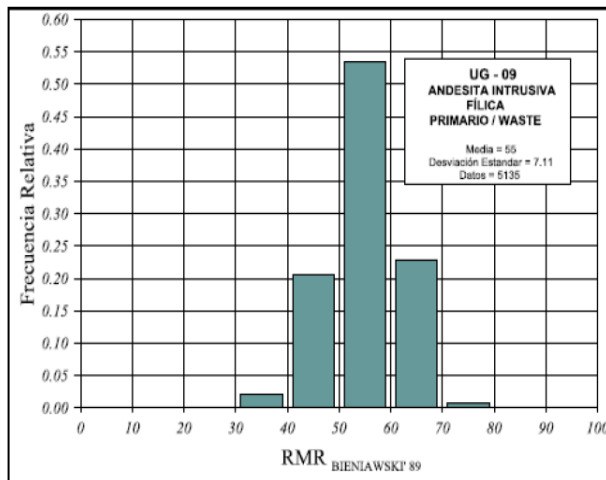


Figura 10: Histograma del RMR<sub>89</sub>.

Fuente: SRK Consulting, Chile.

### 3.3.1.1. GSI (Geological Strength Index) de Hoek & Marinos, 2000.

El valor medio del GSI para la zona de estudio es 47, el cual corresponde a una *estructura muy fracturado y una condición superficial regular*.

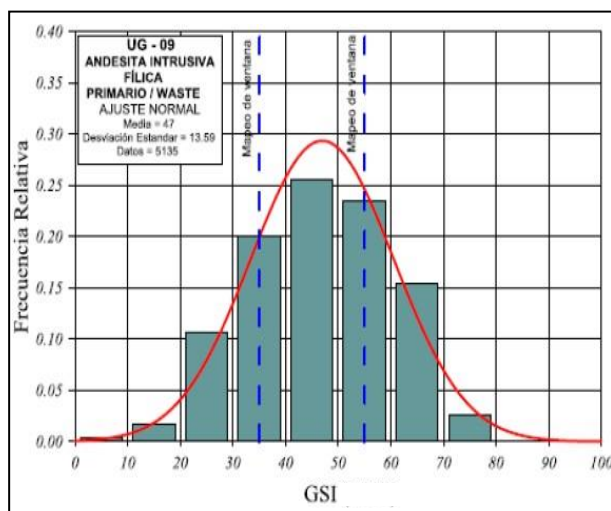


Figura 11: Histograma del GSI.

Fuente: SRK Consulting, Chile.

### 3.3.1.1. Resistencia del macizo rocoso (Hoek-Brown, 2002)

Según el criterio de Hoek-Brown 2002, se calcula los parámetros de resistencia.

Tabla 04: Datos de entrada para el cálculo de la resistencia del macizo rocoso.

UGB9	Espe.	Mín.	Máx.	Und	
$m_i$	13	12.95	8.0	18.0	-
$\sigma_{ci}$	68.2	68.19	29.8	106.6	Mpa
GSI	47.0	47.0	19.8	74.2	-
D	0.70	0.70	1.0	0.70	-
$\gamma$	0.0273	0.0273	0.0267	0.0279	MN/m <sup>3</sup>
$E_i$	28.0	-	-	-	Gpa
H	200	-	-	-	m
Caso 2	1: subterráneo		2: superficial		

Fuente: (Gutierrez, 2018).

Tabla 05: Parámetros de resistencia.

Parámetro	Valor	Unidad
$m_b$	0.704	-
s	0.00046	-
a	0.50705	-
$\sigma_{tm}$	-0.0447	Mpa
$\sigma_{cm}$	1.388	Mpa
$\sigma_{3máx.}$	4.402	Mpa
c	961	Kpa
$\phi$	35.5°	°
v	0.25	-
G	0.99	Gpa

Fuente: (Gutierrez, 2018).

### 3.3.1.1. Resistencia de las estructuras

Para la estimación de resistencia en las estructuras (rellenos) se consideraron los resultados obtenidos en los ensayos de corte directo. Considerando que la zona está afectada por fallas y estructuras rellenas con arcilla, las cuales se presenta la siguiente tabla.

Tabla 06: Parámetros de resistencia de las estructuras.

Estruc.	Talud	Alter.	Cohesión (kpa)	Ángulo fricción (°)
Falla Mayor	Global	no	100-200	20-30°
Falla Mayor	Inter-rampa	no	25-75	25-35°
Fallas	Banco	no	0-25	20-25°
Diaclasa	Banco	no	0-50	30-35°
Diaclasa	Banco	si	25-75	20-30°

Fuente: (Gutierrez, 2018).

#### 4. Conclusiones

Se logró caracterizar geológicamente las litologías, comenzando de la parte superior, una Riolita Porfírica Fílica, seguidamente una Andesita Intrusiva Fílica; luego, una Andesita Basáltica Argílica; después, una LP- QS y finalmente se puede observar una BLP-Fresca.

Se logró caracterizar estructuralmente, a partir del mapeo a detalle de la zona que comprometía la Cuña 49 del Sector Sur-Oeste de la fase 5 del tajo Cuajone, se encontró una falla de comportamiento deslizante con una orientación de 088°/38° NE y una falla de comportamiento cortante con 011°/60° NE que delimitaba la parte superior de la Cuña 49. Se identifico diez dominios estructurales con comportamientos interdependientes.

Se logró caracterizar hidrogeológicamente el macizo rocoso, en el

cual las precipitaciones son escasas durante el año, y se presentan con mayor frecuencia en el periodo de diciembre a marzo, en forma de garuas, sin embargo, de acuerdo a la magnitud del riesgo de deslizamientos en los taludes de la mina, se debe tomar cuidado en la consideración del parámetro agua para el diseño y control de la estabilización del talud.

Se logró caracterizar geotécnicamente, considerando las clasificaciones geomecánicas de RQD, RMR y GSI. Se obtuvieron los siguientes resultados: Se obtuvo un RQD medio de 50.46% lo que corresponde a una *roca de calidad mala* según Deere (1967). Se obtuvo un RMR medio de 55, el cual pertenece a una *Roca Regular, Tipo III*. **GSI:** Se obtuvo un GSI medio de 47, el cual corresponde a una *estructura muy fracturado y una condición superficial regular*. Se obtuvo un valor medio de UCS de 69.70 Mpa, lo cual es considerada como *roca dura*, R4 según Brown 1981. Los parámetros de resistencia según el criterio de Hoek-Brown, 2002 y sus equivalentes a los parámetros de Mohr-Coulomb son: el valor del “*m<sub>b</sub>*” es igual a 0.704, los parámetros de resistencia del macizo rocoso son “*s*” es igual a 0.00046 y “*a*” es igual a 0.50705, la cohesión equivalente “*c*” es igual a 961 Kpa y el ángulo de fricción equivalente “*φ*” es igual a 35.05°; la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso es igual a “*σ<sub>cm</sub>*” es igual a 1.388 Mpa y la Resistencia de a la tracción “*σ<sub>ct</sub>*” es igual a -0.0447 Mpa. Los valores obtenidos de resistencia de las estructuras son:

Las fallas mayores considerando un talud global y sin alteraciones tienen un valor de **cohesión** promedio de 150 kpa y un ángulo promedio de fricción de 25°. Las fallas mayores considerando un talud inter-rampa y sin alteraciones tienen un valor de **cohesión** promedio de 50 kpa y un ángulo promedio de fricción de 30°. Las fallas menores considerando un talud de banco y sin alteraciones tienen un valor de **cohesión** promedio de 12.5 kpa y un ángulo promedio de fricción de 22.5°. Las diaclasas considerando un talud de banco y sin alteraciones tienen un valor de **cohesión** promedio de 25 kpa y un ángulo promedio de fricción de 32.5°. Las diaclasas considerando un talud de banco y con alteraciones argílica o fílica tienen un valor de **cohesión** promedio de 50 kpa y un ángulo promedio de fricción de 25°.

### Futuras propuestas

El presente trabajo pretende contribuir a futuras investigaciones referentes al tema de investigación, en el sentido de constituir una metodología práctica para caracterizar el macizo rocoso en minería superficial, adaptando una secuencia de procesos como: revisión de información existente, realizar un reconocimiento del macizo rocoso, descripción general del macizo rocoso, identificación de dominios geotécnicos, descripción detallada de cada dominio geotécnico, realización de ensayos de campo, realización de ensayos de laboratorio, análisis, procesamiento e interpretación de información.

### 5. Referencias bibliográficas

- Assis, A. P. (2003). *Mecânica das Rochas, Apostila do Curso Básico*. Universidad de Brasilia, Brasilia, Brasil: Departamento de ingeniería Civil y Ambiental.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Toronto, Canada: John Wiley & Sons.
- Bordehorde, J. (2013). *Clasificaciones Geomecánicas y Diseño Empírico de Sostenimiento*. Lima, Perú.
- Flores, G. G., & Karzulovic, L. A. (2003). *Guías Geotécnicas para una Transición desde Rajo Abierto a Minería Subterránea*. Santiago de Chile, Chile: División Chuquicamata de Codelco.
- Gonzáles de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson Education.
- Gutierrez Marquez, A. F. (2018). *Anaálisis y Estabilización del Talud Sur – Oeste Fase 5 del Tajo Cuajone (Tesis de pregrado)*. Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, Perú.
- Hidalgo, C. A. (2002). *Classificação Geomecânica e Simulação Numérica*

- de Estructura (Tesis de maestría).* Universidad de Brasilia, Brasilia, Brasil.
- Hoek, E. (2006). *Practical in Rock Engineering*. Toronto, Canada: British Columbia.
- Hudson, J. A. (1989). *Mechanics Principles in Engineering Practice*. Butterworths, Londres, Inglaterra.
- Manrique, J. & Plazoles, A. (1975). Conversatorio de minería a cielo abierto. Arequipa – Perú. “Algunas consideraciones sobre la geología de Toquepala y Cuajone”. Reporte Interno p.19.
- Maureen Carrillo, L. L., Rodríguez, A., & Zúñiga, H. (2002). Clasificación geomecánica y análisis de estabilidad de taludes del macizo rocoso Coris, Cartago, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 26, 91-96.
- Osinergmin. (2017). *Guía de Criterios Geomecánicos para Diseño, Construcción, Supervisión, y Cierre de Labores Subterráneas*. Lima, Perú: INVERSIONES IAKOB S.A.C.
- Pantelidis, L. (2009). Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(2), 315-25.
- Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. (2007). *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid, España: SEMR.
- Read, J., & Peter, S. (2009). *Guidelines for Open Pit Slope Desing*. Australia: CSIRO PUBLISHING.
- Suarez Burgoa, L. (2013). *Descripción del Macizo Rocosos: Introducción a la Ingeniería de Rocas de Superficie y Subterránea*. Medellin, Colombia: El Autor.
- Tejada Cervantes, L. M. (2010). *Resistencia de Macizos Rocosos Estructuralmente Complejos* (Tesis de doctorado). Universidad de Brasilia, Brasilia, Brasil.
- Valeriano Nina, F. A. (2015). *Caracterización Geotécnica y Modos de Falla Estructural en el Talud en Roca del Cerro Espinal Juliaca* (Tesis de pregrado). Puno, Perú.
- Bellido Bravo, E. (1979). *Geología del Cuadrángulo de Moquegua*. Boletín N°15. Serie A: Carta Geológica Regional. Hoja 35-U.
- Park, G. M. (1998). Petrographic and Lithogeochemical Alteration Study of the Cuajone and Toquepala Porphyry Copper Deposits, Perú.