

Especialidad - Minas

*Trabajo de Diploma en
opción al título de Ingeniero
en Minas*

EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS
GEOMECÁNICAS DEL MACIZO ROCOSO EN EL
YACIMIENTO DE CALIZA “MOGOTE SAN
NICOLÁS”

Autor: Inocêncio Chipema Daniel Ricai

Curso: 2018-2019

“Año 61 de la Revolución”

Especialidad – Minas

Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero en Minas

Evaluación de las características geomecánicas
del macizo rocoso en el yacimiento de caliza
“Mogote San Nicolás”

Autor: Inocêncio Chipema Daniel Ricai

Tutor: Prof. Tít. Dr.C. Rafael Rolando Noa Monje

Curso: 2018-2019

“Año 61 de la Revolución”

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Inocêncio Chipema Daniel Ricai

Autor de este Trabajo de Diploma y el tutor: **Dr.C. Rafael Rolando Noa Monje**
certificamos la propiedad intelectual a favor de la Universidad de Moa “Dr. Antonio
Núñez Jiménez”, hacer uso del mismo en la finalidad que estime conveniente.

Inocêncio Chipema Daniel Ricai

Diplomante _____

Prof. Tít. Dr.C. Rafael Rolando Noa Monje

Tutor _____

DEDICATORIA

Deseo dedicar mi trabajo de diploma a quienes constituyen en mi vida lo mejor de ella:

- *A mis padres Aldina Marta Daniel, Guilherme Silva Ricai por haberme dado la vida y fomentar en mí el hábito del saber, de los que siempre estaré orgulloso, que han sido mi mayor inspiración y a mis hermanas Justa, Lurdes, Anacleto y Guilhermina por tan especiales e importantes en mi vida, por haberme brindado su apoyo incondicional, su cariño y amor, por darme esperanzas e inspirarme para que hoy logre mis sueños.*
- *A mi esposa amada Daniela Gámez Torres quien me apoyó mucho en todo momento y a mi hijo Thiaguito que está por llegar.*

AGRADECIMIENTOS

- *Primeramente, le agradezco a mi Dios, que me ha preservado la vida en estos años y me ha dado sabiduría, a él sea la gloria.*
- *Le agradezco a mi tutor, Dr. C. Rafael Rolando Noa Monje, por su apoyo y dedicarme su tiempo y su ayuda para el desarrollo y culminación de este trabajo.*
- *Le agradezco a la familia Torres Rodríguez y Gámez Córdoba, en especial a mis a mis suegros Aliuska Torres y Orlando Gámez, por su contribuir y apoyar en la culminación de este trabajo con éxito y que ese sueño se convierta realidad.*
- *Agradecer a todos los trabajadores de la cantera de caliza “Mogote San Nicolás” perteneciente a la empresa UEB Geominera Oriente.*
- *Le agradezco a todos los trabajadores del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa que tanto me han apoyado en estos años y en especial al claustro de profesores de la facultad de Geología y Minería que durante todos estos cinco años me han preparado como ingeniero de minas.*
- *A todos los compañeros del aula y amistades, quien me han dado consejos, ánimos y me ha brindado su amistad sincera durante estos cinco años en especial al Abel Pedro e Edson Correa Soma.*
- *Por ultimo agradecer a la amistad cubana-angolana que me ha permitido conocer, vivir y compartir con el pueblo cubano, precioso, cariñoso y bello.*

PENSAMIENTO



(...) Para estudiar las posibilidades de la vida futura de los hombres, es necesario dominar el conocimiento de las realidades de su vida pasada,

(...) no se puede predecir como progresará el hombre, sin conocer cómo ha progresado. „

José Martí

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó la evaluación de las características geomecánicas del macizo rocoso en el yacimiento de caliza “Mogote San Nicolás”, el mismo se basa en emplear una metodología de investigación que consta de elementos teóricos y prácticos, para su elaboración se efectuó un estudio ingeniero-geológico, así como el levantamiento geológico de campo del agrietamiento según las litologías presentes, se empleó el software Dips V.5 para el procesamiento del agrietamiento y la representación espacial de las familias de grietas, para el cálculo del volumen de los bloques se utilizó el método desarrollado por Palmstrom.

Se empleó el índice RQD de Deere, la clasificación Q de Barton y el RMR de Bieniawski para la obtención de la calidad de las rocas. Como resultados fundamentales se obtuvo que las calizas poseen tres familias de grietas en cada tramo analizado. Según la clasificación RMR, la roca tiene un rango de calidad que varía entre regular a media, alcanzando valores de 50 a 78, y según el sistema Q de Barton las rocas tienen un rango de calidad que varía entre mala a media alcanzando valores de 1.48 a 6.34. A partir de los resultados y el análisis del comportamiento de las rocas en condiciones naturales o in situ, el macizo rocoso se evalúa de regular y los bloques de rocas formados son de tamaño medio, estos resultados lo que significan que los tramos del macizo rocoso del yacimiento estudiado son medianamente estables.

Palabras claves: geomecánica, macizo rocoso, litología, discontinuidades, bloques.

SUMMARY

In the present work came true the evaluation of the characteristics geomechanics of the rocky mountain mass at the limestone deposit Mogote San Nicolás, the same it is been based on using a methodology of investigation that consists of theoretic elements and pilots, for his elaboration the geological engineer, as well as the geological uprising of field of the cracking according to the present lithology's, made a study himself Dips V.5 for the processing used the software himself of the cracking and the space performance of the families of cracks, for the calculation of the volume of the blocks utilized the method developed by Palmstrom itself.

RQD of Deere, the classification used the index itself Q of Barton and Bieniawski RMR for the obtaining of the quality of the rocks. As fundamental results were obtained that three families of cracks at each examined stretch possess limestone's. According to classification RMR, the rock has a range of quality that it varies between regular customer to stocking, catching up with valuables of 50 to 78, and according to the system Barton's Q a range of quality that you vary between mailbag to stocking catching up with valuables of 1,48 to 6,34 has the rocks.

Key words: Geomechanic, rocky mountain mass, lithology, discontinuities, blocks.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA	8
I.1 Introducción.....	8
I.2 Marco teórico conceptual	8
I.2.1 Aspectos a considerar en la caracterización del macizo rocoso	9
I.2.2 Estructura del macizo rocoso	10
I.2.3 Discontinuidades de la masa rocosa.....	10
I.2.4 Propiedades de las discontinuidades	11
I.3 Análisis de los trabajos precedentes en la geomecánica	13
I.4 Estado actual de la temática en el mundo.....	14
I.5 Situación actual de la temática en Cuba	16
CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA REGIÓN	21
II.1 Introducción.....	21
II.2 Ubicación geográfica del yacimiento	21
II.3 Clima	23
II.4 Relieve	24
II.5 Topografía.....	24
II.6 Desarrollo socio-económico e industrial	25
II.7 Geología del yacimiento.....	27
II.7.1 Morfología del yacimiento	28
II.7.2 Carsificación.....	28
II.7.3 Litología.....	29
II.7.4 Mineralización	29
II.7.5 Tectónica.....	30

II.7.6 Hidrogeología del yacimiento	30
II.8 Análisis de las propiedades físico-mecánicas de las rocas.....	31
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LAS CLASIFICACIONES GEOMECAÑICAS	34
III.1 Introducción.....	34
III.2. Métodos de clasificaciones geomecánicas	34
III.3 Elección de clasificaciones geomecánicas que más se adaptan al macizo ...	45
CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICO - ESTRUCTURAL DEL YACIMIENTO	46
IV.1 Introducción	46
IV.2 Estudio del Agrietamiento	46
IV.2.1 Descripciones de los tramos analizados.....	47
IV.2.3 Análisis de las orientaciones de las grietas	49
IV.3 Evaluación de las características del macizo rocoso empleando las clasificaciones	51
IV.3.1 Resultados del índice RQD de (Deere, 1989).....	51
IV.3.2 Resultados según el RMR de Bieniawski, (1989)	52
IV.4.3 Resultados según Barton, (1974)	53
IV.4 Evaluación de los tamaños de bloques	54
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. Coordenadas Lambert del área de la concesión.....	22
Tabla 2.1 Resultados de las propiedades físicos-mecánicas de las rocas.....	33
Tabla 3. Clasificación de las rocas Lauffer.....	36
Tabla 3.1. Calidad del macizo según el coeficiente de fortaleza (f).....	38
Tabla 3.2. Clasificación de las rocas según el índice "RQD".....	39
Tabla 3.3. Rango de variación de los parámetros Q de Barton.....	40
Tabla 2.4. Clasificación del macizo según GSI.....	41
Tabla 2.5. Calidad del macizo rocoso según RMR.....	42
Tabla 2.7. Estabilidad de talud según SMR.....	44
Tabla 2.8. Clasificación de la calidad del macizo según MRMR.....	44
Tabla 4. Cálculo del índice RQD.....	50
Tabla 4.1. Resultados de cálculo del índice RQD.....	51
Tabla 4.2. Resultados de RMR de Bieniawski.....	52
Tabla 4.3. Valoración de la calidad del macizo rocoso según Bieniawski.....	53
Tabla 4.4. Cálculo de los tramos según Q Barton.....	52
Tabla 4.5. Resultados obtenidos por la Q Barton.....	53
Tabla 4.6. Resumen de los resultados de los cálculos geomecánicos.....	54
Tabla 4.7. Definición del tamaño de los bloques según el número de discontinuidades Jv.	56

Tabla 4.9. Tamaño del bloque en dependencia del rango de variación del volumen del bloque según Palmstrom (1995)	57
Tabla 4.10. Cálculo de la cantidad de grietas por m ³ (J _v).....	57
Tabla 4.11. Tamaño de los bloques según J _v	58
Tabla 4.12. Distancias entre grietas de cada familia	58
Tabla 4.13. Angulo entre planos de discontinuidades	59
Tabla 4.14. Resultados de volumen de los bloques V _b	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujograma de la investigación	7
Figura 1.1. Orientación de las discontinuidades	12
Figura 1.2 Propiedades de las discontinuidades.....	13
Figura 2. Ubicación geográfica del yacimiento.....	22
Figura 2.1. Ubicación del área de la concesión.....	23
Figura 2.2. Alto del Mogote de San Nicolás.....	24
Figura 2.3. Área de la concesión	25
Figura 2.4. fragmentos de caliza en Mogote San Nicolás	27
Figura 2.5. Presencia del carso en el yacimiento.....	29
Figura 3. Esquema de Protodyakonov.....	37
Figura 4. Diagrama de polos y rosetas.....	50
Figura 4.1. Ángulos entre los planos de grietas del tramo N.º.....	50
Figura 4.1. Determinación de la forma de los bloques.....	55

INTRODUCCIÓN

La minería desde sus principios es la encargada de explotar los recursos minerales de la corteza terrestre y asegurar el abastecimiento de materias primas como las rocas industriales, ornamentales y áridos con múltiples funcionalidades en la formación de las industrias, creación de proyectos constructivos, convirtiéndose así en una de las principales fuentes de satisfacción de las necesidades de la humanidad.

En Cuba la caliza de alto porcentaje de carbonato de calcio y de gran pureza aparte de ser comercializada como material para la construcción, debido a sus propiedades químicas la Empresa Geominera Oriente, la cual cuenta con varios yacimientos de calizas carbonatadas de gran calidad, es la encargada de explotar y comercializar la materia procedente de estos yacimientos.

La explotación de los yacimientos de materiales de construcción se realiza por el método a cielo abierto, lo que implica un incremento en el nivel de producción, una mejor implementación de las nuevas tecnologías, aparejado a esto se lleva a cabo una adecuada organización de los trabajos y un incremento en la seguridad de las operaciones mineras.

La explotación a cielo abierto, se realiza directamente en la superficie de la tierra e incluye dos tipos de trabajo: destape y extracción. El primero tiene como objetivo asegurar el acceso al mineral útil y crear las condiciones para su extracción, consiste en el traslado del material estéril que rodea al mineral útil. Como resultado de la ejecución de los trabajos de destape y extracción se forma la cantera, que no es más que el conjunto de excavaciones mineras a cielo abierto que permiten la extracción de las materias primas para la industria.

Para una explotación intensa, es necesario caracterizar el macizo rocoso y en base a su comportamiento geomecánico determinar las técnicas para el arranque y explotación más adecuadas. Los métodos empleados actualmente en la caracterización del macizo rocoso, han evolucionado de manera paulatina dando

lugar a un incremento en el desarrollo de esta ciencia y una mayor confiabilidad de los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas.

A nivel mundial las calizas que son rocas carbonatadas, compuestas de calcita, aunque la dolomita puede ser un constituyente importante, son explotadas y extraídas para variados usos como son: agregados para hormigón, concreto, balastros para ferrocarriles, cuyo tamaño comprende entre $\frac{3}{4}$ y $2\frac{1}{2}$ pulgadas de diámetro (7.6 a 63.5 milímetro), también se usa como piedra de relleno, los fragmentos de caliza de tamaños irregulares, que varían entre 15 y 30 centímetros, son utilizados en la construcción de los vertederos de las presas, en la construcción de muelles y para rellenar los puntos bajos en terrenos o carreteras.

Situación problemática

Generalmente los trabajos de explotación de los yacimientos de materiales de construcción y fundamentalmente de calizas, se realiza sin conocer el comportamiento de las rocas, sin evaluar sus características mecánico - estructurales y muchas veces las operaciones que se ejecutan en el proceso minero y que garantizan la explotación de estos recursos, se realizan sin la previa documentación de cómo se evalúan la calidad de esos macizos rocosos.

Es por ello, que todavía persisten problemas de evaluación geomecánica y el yacimiento de caliza “Mogote San Nicolás” no está exento de estas cuestiones, al igual que otras canteras pertenecientes a la Empresa Geominera Santiago de Cuba, por lo que se hace necesario determinar las propiedades de las rocas, su comportamiento, el que permitirá diseñar el método de arranque, evaluar los parámetros que caracterizan las diferentes operaciones del proceso de explotación, a partir de evaluar la bloquidad y las características mecánico-estructurales de este yacimiento.

De lo anteriormente planteado, se puede decir que el **problema** que se pretende resolver con esta investigación es: la necesidad de realizar la evaluación de las características geomecánicas del macizo rocoso en el yacimiento de caliza “Mogote San Nicolás” que permita diseñar las operaciones mineras durante la explotación.

Objeto de estudio

Las características geomecánicas del macizo rocoso en el yacimiento de caliza “Mogote San Nicolás”.

Campo de acción

Macizo rocoso del yacimiento de caliza “Mogote San Nicolás”.

Objetivo general

Evaluar las características geomecánicas del macizo rocoso en el yacimiento de caliza “Mogote San Nicolás” que permita diseñar las operaciones mineras.

Hipótesis

Si se realiza un estudio de estado actual de la temática, se evalúan las características ingeniero-geológicas del macizo rocoso, se analizan las propiedades físico-mecánicas de las rocas, se determina el comportamiento mecánico – estructural y el tamaño de los bloques, se analizan las diferentes clasificaciones geomecánicas y se eligen las que mejor se adapten a este macizo, se podrá realizar la evaluación de las características geomecánicas del macizo rocoso en el yacimiento caliza “Mogote San Nicolás” y tener en cuenta esos resultados para el diseño de las operaciones mineras.

Objetivos específicos

1. Estudio del estado actual de la temática en el mundo.
2. Evaluar las características ingeniero - geológicas del macizo rocoso en el yacimiento de caliza “Mogote San Nicolás”.
3. Análisis de las propiedades físico-mecánicas de las rocas.
4. Determinar el comportamiento mecánico-estructural del macizo rocoso donde se ubica el yacimiento.
5. Evaluar la blocosidad del macizo objeto de estudio.
6. Analizar las diferentes clasificaciones geomecánicas y elegir las que mejor se adapten a este macizo.

PLANIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Para lograr el objetivo planteado, se emplea un flujograma (Ver figura 1), que se basó en los elementos teóricos y prácticos de la investigación científica. (Legrá, 2014).

Primera etapa

En esta etapa se definió el objeto y objetivos de trabajo, donde se realizó un analice bibliográfico (la recopilación de la información), en la que se analiza los trabajos procedentes en la geomecánica, así como los antecedentes del estado actual de la temática en el mundo, los antecedentes y estado actual de la temática en Cuba.

Segunda etapa

En esta etapa se estudian aspectos de vital importancia para el cumplimiento del objetivo planteado como:

1. Se realiza la caracterización general del área donde se realiza el estudio, donde de describen a continuación:
2. Ubicación geográfica del yacimiento de caliza “Mogote San Nicolás”.
3. Estudio de la geología del yacimiento, del cual se analiza la carsificación y la hidrogeología del área de estudio.
4. Se hace los análisis de las propiedades físico-mecánico de las rocas
5. Con el empleo del método geológico, se realizó el estudio del agrietamiento de macizo rocoso, que incluye: las superficies de debilitamiento, la abertura de las discontinuidades, el espaciamiento, rugosidad, alteración, la afluencia de agua, dirección y ángulos de buzamientos.
6. Se determinaron las características y tamaños de los bloques teniendo en cuenta los criterios que mejor resultados dan a este macizo.

Tercera etapa

En esta etapa se realiza una evaluación de las características geomecánicas del macizo rocoso, donde se analizan los diferentes métodos de clasificación

geomecánica, dentro de los cuales se encuentran los métodos cualitativos y cuantitativos y se eligen las que mejor se adecuan a este macizo. Por otra parte, se hace un estudio de las características-mecánico estructural del macizo rocoso, donde se determina los tamaños de los bloques a partir del agrietamiento de macizo rocoso, que incluye parámetros como: la abertura de las discontinuidades, el espaciamiento, rugosidad, alteración, la afluencia de agua, dirección y ángulos de buzamientos.

Métodos de la investigación científica empleados

Los principales métodos de la investigación científica empleados en dar solución al problema de la investigación, se exponen a continuación:

✓ Métodos empíricos

Los métodos empíricos para la investigación tienen el propósito de estudiar las características y relaciones esenciales del objeto que son accesibles directamente desde la percepción sensorial (conocimiento directamente fenosistémicos). En general se emplean en las investigaciones tradicionales en un primer momento durante la etapa de acumulación de datos, hechos y testimonios, donde se genera información empírica que coadyuva al surgimiento del conocimiento sensorial que finalmente contribuye a la comprobación de la hipótesis y a la validación de conocimientos teóricos. (Legrá, 2014).

✓ Compilación

La Compilación se basan en un grupo de procedimientos y técnicas (incluyendo las bibliográficas y la minería digital) que permite reunir y sistematizar un conjunto de datos mediante la revisión profunda y crítica de fuentes bibliográficas, orales, digitales o de otro tipo donde permitió reunir y sistematizar información mediante la revisión de fuentes bibliográficas, orales, digitales o de otro tipo. (Legrá, 2014).

✓ Métodos Teóricos

Los métodos teóricos para la investigación se aplican durante el proceso de explicación, predicción, interpretación y comprensión de la esencia del objeto

(conocimiento racional). Ellos permiten la creación de conceptos a partir de datos conocidos, empíricos y teóricos. (Legrá, 2014).

✓ **La Medición**

Se basa en una técnica que atribuye valores cuantitativos o cualitativos a determinadas propiedades del objeto de estudio. La técnica de medición es la comparación del resultado del estado de una propiedad (obtenido mediante un instrumento que interactúa directamente con el objeto), con una magnitud homogénea adoptada como patrón unitario de comparación mediante escalas prefijadas. (Legrá, 2014).

✓ **Hipotético-deductivo**

Es un método teórico propio de las investigaciones cuantitativas que ha sido empleada con éxito en las ciencias naturales y factuales y que, además, una parte de los investigadores aplica también en las ciencias sociales y del pensamiento.

✓ **Método histórico-lógico**

El método se utilizó para analizar la trayectoria tecnológica de la mina y sobre el tema. se utilizó para la revisión y análisis de los documentos y definir los principales antecedentes investigativos sobre el tema y la cantera “Mogote de San Nicolás”.

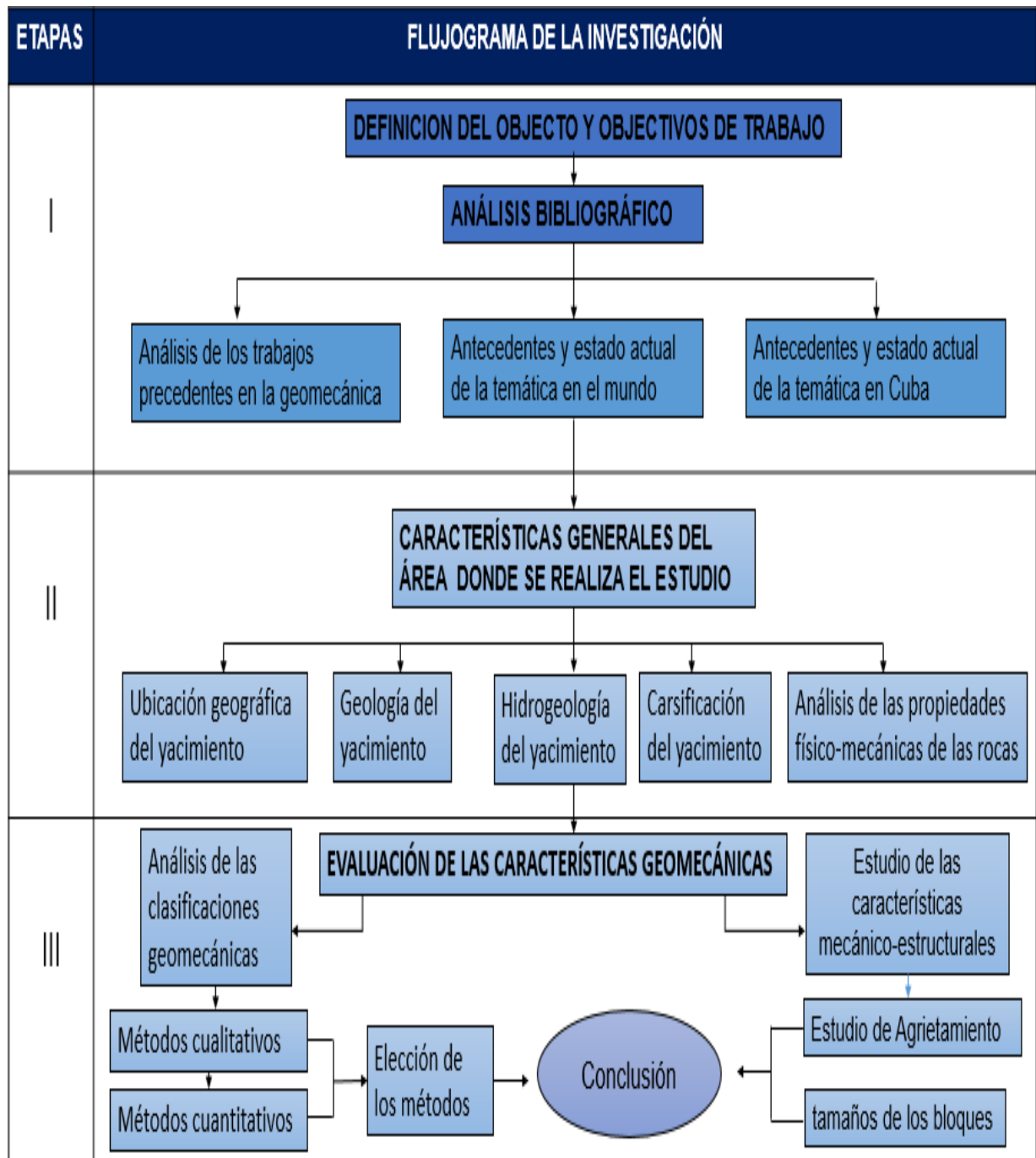


Figura 1. Flujograma de la investigación.

CAPÍTULO I. ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA

I.1 Introducción

La geomecánica, constituye la base científica de la ingeniería minera, donde se dan problemas de diseño, que son únicos en la explotación de minas, en este contexto la geomecánica involucra seguridad y economía. Ya que garantiza la seguridad durante la excavación de las labores mineras, a través del análisis de deformaciones, niveles de presiones, tensiones, etc. Define las aberturas máximas y tiempos de autosoporte de las excavaciones mineras ejecutadas y las futuras a ejecutarse.

Determina la estabilidad estructuralmente controlada de las labores de preparación y explotación, verificando en cada una de ellas la formación de bloques y cuñas inestables. Permite definir las orientaciones más favorables para el minado de las labores de preparación y desarrollo a ejecutarse e establecer las secuencias de explotación, tanto a nivel global como particularmente.

Permite seleccionar y diseñar alternativas de nuevos métodos de explotación en las futuras zonas a minar. Así como establecer algunas variantes en el método de explotación utilizado y por ultimo permite mediante el monitoreo verificar y validar suposiciones adoptadas durante las fases de diseño inicial del laboreo minero.

I.2 Marco teórico conceptual

Se comprende el concepto de geomecánica como la rama de la mecánica de rocas que estudia la deformación de los suelos y las rocas, hasta determinar a veces su falla, en respuesta a los cambios de esfuerzos, presión, temperatura, y otros parámetros mineros y ambientales.

I.2.1 Aspectos a considerar en la caracterización del macizo rocoso

Macizo rocoso: es el medio in-situ que contiene diferentes tipos de discontinuidades como diaclasas, estratos, fallas y otros rasgos estructurales. El macizo rocoso puede estar constituido por diferentes tipos de rocas, con características homogéneas o heterogéneas, (Blanco, 2013).

De acuerdo con las características del enlace, entre las partes componentes se pueden diferenciar:

Rocas fuertes: poseen enlaces elásticos entre las partículas minerales componentes (areniscas, granitos y otras). Estas rocas se caracterizan por su alta resistencia y por su incompresibilidad. Ellas solo permiten el paso del agua a través de los poros, grietas y otros vacíos que posean. Las propiedades de mayor interés, de este tipo de rocas, desde el punto de vista de la mecánica de las rocas son: su resistencia, su estoicidad o tesura y la presencia en ellas de zonas de debilitamiento estructural o fracturación.

Las rocas fuertes en el macizo pueden presentar características preponderantemente elásticas y elastoplásticas siendo este último estado el más representativo. En dependencia del carácter de aplicación de las cargas estas rocas pueden comportarse como un cuerpo frágil o plástico. (Medieta, 2013).

Rocas ligadas: representantes de este tipo de roca son las arcillas, margas, carbón de piedra, turba, esquistos y otros. Estas rocas están compuestas por partículas, cuyos diámetros oscilan desde 0,0001 a 0,05 mm. En las rocas arcillosas las dimensiones de las partículas son menores de 0,005 mm. Las rocas ligadas (las arcillosas) en dependencia de su contenido de agua libre pueden encontrarse en estado sólido, plástico o fluido. (Mendieta, 2013).

Rocas desligadas: la diferencia de las rocas ligadas, en las que existe una gran cohesión entre las partículas componentes, en las rocas desligadas esto no se

observa, sino que este tipo de roca se caracteriza por la acumulación de partículas minerales entre las cuales la fuerza de cohesión es muy pequeña o nula. En este tipo de roca la forma se conserva debido al peso de las partículas componentes y a la fuerza de fricción que existe entre ellas.

Rocas movedizas: durante los trabajos de construcción subterránea se presta una especial atención a este tipo de macizo, por las características que él posee que dificultan en gran medida los trabajos subterráneos. Están conformadas por una fase sólida y otra líquida y poseen la propiedad de moverse. Su movilidad y el empuje del agua, es la causa de que se produzcan grandes afectaciones sobre las obras subterráneas. (Mendieta, 2013).

Los terrenos movedizos se dividen en no desecables (terrenos movedizos típicos) y desecables (pseudomovedizas). Los primeros contienen partículas arcillosas y coloidales además de agua combinada, en tanto que los pseudomovedizos se forman por la mezcla de arenas homogéneas sin partículas arcillosas y es por ello que son fácilmente secables aumentándose con esto su estabilidad.

I.2.2 Estructura del macizo rocoso

El macizo rocoso está determinado por cuerpos de rocas y la estructura geológica (primaria y secundaria). La interacción entre estos elementos constituyentes, dicta el comportamiento y las propiedades del macizo rocoso. El peso de estos factores depende de la escala de la obra a realizar. Las rocas ígneas son resistentes debido al enlace entre los cristales (diferente grado de cristalización y tamaño de los cristales) y mineral es componentes de las mismas. (Mendieta, 2013).

I.2.3 Discontinuidades de la masa rocosa

Los principales tipos de discontinuidades presentes en la masa rocosa son:

- **Planos de estratificación**, dividen en capas o estratos a las rocas sedimentarias.

- **Fallas;** son fracturas que han tenido desplazamiento. Éstas son estructuras menores que se presentan en áreas locales de la mina o estructuras muy importantes que pueden atravesar toda la mina.
- **Zonas de corte;** son bandas de material que pueden ser de varios metros de espesor, en donde ha ocurrido fallamiento de la roca.
- **Diaclasas;** también denominadas juntas, son fracturas que no han tenido desplazamiento y las que más comúnmente se presentan en la masa rocosa.
- **Planos de foliación o esquistosidad;** se forman entre las capas de las rocas metamórficas dando la apariencia de hojas o láminas.
- **Contactos litológicos;** que comúnmente forman, por ejemplo, la caja techo y caja piso de una veta.
- **Venillas;** son rellenos de las fracturas con otros materiales. (Ramírez, 2004).

I.2.4 Propiedades de las discontinuidades

Todas las discontinuidades presentan propiedades geomecánicas importantes que las caracterizan y que influyen en el comportamiento de la masa rocosa (Ver figura 1.2). Estas propiedades son principalmente:

Orientación, es la posición de la discontinuidad en el espacio y comúnmente es descrito por su rumbo y buzamiento. Cuando un grupo de discontinuidades se presentan con similar orientación o en otras palabras son aproximadamente paralelas, se dice que éstas forman un “sistema” o una “familia” de discontinuidades, (Ver la figura 1.1).

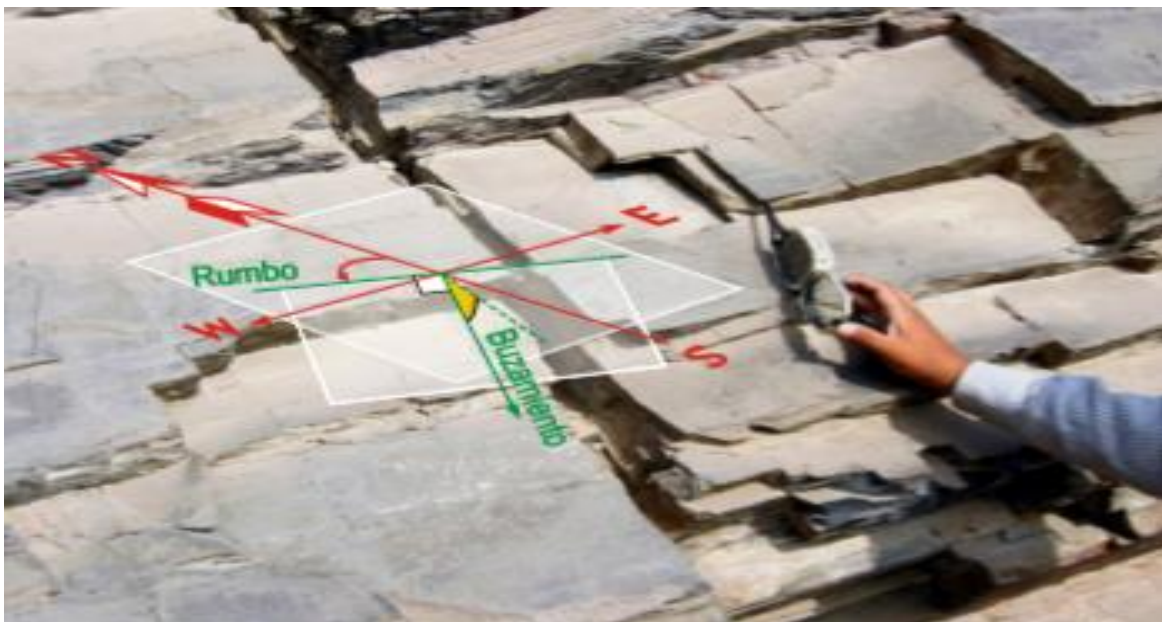


Figura 1.1. Orientación de las discontinuidades (Ramirez, 2004).

Espaciado, es la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes. Éste determina el tamaño de los bloques de roca intacta. Cuanto menos espaciado tengan, los bloques serán más pequeños y cuanto más espaciado tengan, los bloques serán más grandes.

Persistencia, es la extensión en área o tamaño de una discontinuidad. Cuanto menor sea la persistencia, la masa rocosa será más estable y cuanto mayor sea ésta, será menos estable.

Rugosidad, es la aspereza o irregularidad de la superficie de la discontinuidad. Cuanto menor rugosidad tenga una discontinuidad, la masa rocosa será menos competente y cuanto mayor sea ésta, la masa rocosa será más competente.

Apertura, es la separación entre las paredes rocosas de una discontinuidad o el grado de abierto que ésta presenta. A menor apertura, las condiciones de la masa rocosa serán mejores y a mayor apertura, las condiciones serán más desfavorables.

Relleno, son los materiales que se encuentran dentro de la discontinuidad. Cuando los materiales son suaves, la masa rocosa es menos competente y cuando éstos son más duros, ésta es más competente. (Ramírez, 2004).



Figura 1.2. Propiedades de las discontinuidades, (Fuente: Ramírez, 2004).

I.3 Análisis de los trabajos precedentes en la geomecánica

Entre los años de la década del 40 hasta fines del siglo XX los investigadores geomecánicos, como Terzaghi (1946), Deere (1964,1989), Wickham y otros autores (1972), Bieniawski (1973, 1989), Barton et al, (1974), Louis (1974), Palmstrom (1982), Boluchof (1982), Franklin, (1994, 1997) realizaron el análisis de la interacción entre la práctica y las formulaciones hipotéticas para pronosticar el comportamiento de la obra subterránea.

A inicios del siglo XXI, en Cuba, Cartaya y Blanco (2000), Mondéjar (2001), Noa (2003) y otros emplearon los métodos empíricos desarrollados por Barton, Bieniawski y Boluchof para caracterizar macizos rocosos en las minas subterráneas y los túneles. Por otro lado, Martínez (2002, 2011) desarrolló una metodología de pronóstico fundamentada en el criterio de Mohr-Coulomb (Mohr, 1900; Coulomb,

1776) para la evaluación de la estabilidad del macizo rocoso de las minas subterráneas.

I.4 Estado actual de la temática en el mundo

La geomecánica es quizás una de las ramas tecnológicas más antiguas del universo, los griegos y egipcios en sus construcciones emplearon los macizos rocosos para obras. En las pirámides construidas en Egipto se emplearon bloques de caliza dura, todas estas fastuosas obras, contaron con excelentes mineros que desarrollaron una amplia gama de construcciones subterráneas y fortificaciones que hoy se observan y conservan en nuestros días. Sin embargo, la geomecánica como ciencia es a fines de los años 50, que hizo su entrada en el hasta entonces, mundo crítico de las obras subterráneas. (Cartaya, 2001).

Históricamente se conoce que el primer congreso de mecánica de rocas se celebró en Portugal en 1966. (López Jimeno, 1998) Aun cuando la literatura especializada en estas materias se ha expandido y ha acelerado su desarrollo en todo el mundo, con el empleo tanto de revistas especializadas, como el surgimiento de nuevas técnicas y tecnologías computarizadas.

El estado actual del conocimiento en mecánica de rocas, así como la definición y obtención de parámetros y adopción de modelos que representen el comportamiento real de los macizos rocosos, se encuentran en una fase de desarrollo inferior al de otras ramas de la ingeniería como pueden ser la mecánica de suelos, hidráulica, resistencia de materiales, etcétera; bien por la menor antigüedad de la primera, o por una mayor complejidad frente a la simulación del problema real del macizo. (López Jimeno, 1998) Como consecuencia de esto, resulta difícil establecer modelos analíticos del comportamiento del macizo rocoso que sean reflejo fiel de este, cuando se trata de resolver problemas de estabilidad o dimensionamiento de obras a cielo abierto o subterráneas.

En la actualidad, las clasificaciones geomecánicas se emplean de forma generalizada en ingeniería para hacer una primera predicción del comportamiento de los macizos rocosos frente a excavaciones, principalmente subterráneas,

aunque también a cielo abierto. Su utilidad radica en la facilidad de su aplicación y en los buenos resultados conseguidos en muchos casos.

Las clasificaciones geomecánicas han producido notables beneficios a la ingeniería entre los que cabe destacar:

- ✓ Han mejorado la calidad de los estudios de los macizos rocosos por el simple hecho de requerir un mínimo de datos para llevar a cabo la clasificación y han puesto un cierto orden en los trabajos de campo en los que se basan los estudios geotécnicos.
- ✓ Han permitido dividir los macizos rocosos en grupos con características y comportamiento similar, facilitando el diseño de excavaciones al permitir relacionar las experiencias obtenidas en diversos lugares.
- ✓ Han proporcionado una base y un lenguaje común de comunicación entre geólogos y mineros.

Las clasificaciones geomecánicas constituyen una herramienta fundamental en la descripción y caracterización de macizos rocosos. Estas clasificaciones proporcionan una valoración cuantitativa del macizo rocoso o de los taludes rocosos por medio de un algoritmo aritmético simple (Romana, 1997). Algunos de los índices geomecánicos empleados en la caracterización geomecánica de taludes en roca son el RMS (Selby, 1980), el RMR (Bieniawski, 1989), el SPSC (Hack, 1998), el MRMR modificado (Haines y Terbrugge, 1991), el NSM (Shuk, 1994), el SPSC modificado (Lindsay et al., 2001) y el SMR (Romana, 1985). Esta última goza de una gran aceptación a nivel mundial (Romana et al., 2001) desde su aparición en el año 1985, resultando muy útil en cuestiones de ingeniería civil y de minas.

La caracterización geomecánica de los macizos rocosos se convirtió como una herramienta indispensable para pronosticar su comportamiento. Una parte importante, lo constituyen sin dudas, las clasificaciones geomecánicas, que surgieron de la necesidad de parametrizar observaciones y datos empíricos, de forma integrada, para evaluar las medidas de sostenimiento en túneles. Las mismas son un método de ingeniería geológica que permite evaluar el comportamiento

geomecánico de los macizos rocosos, y a partir de estas estimar los parámetros geotécnicos de diseño y el tipo de sostenimiento de un túnel (Palmstrom, 1998). Además de las obras subterráneas, se destacan las aplicaciones en taludes y cimentaciones.

I.5 Situación actual de la temática en Cuba

En Cuba las clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos, tienen pocos seguidores. Han sido empleadas fundamentalmente por las empresas de proyecto y construcción de obras subterráneas del Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias. Durante la década de los 60 y 70, los criterios utilizados en el CAT – FAR para proyecto y ejecución de túneles se basan en la escuela Soviética, que se apoya en los trabajos del profesor Protodiakonov. Según esta teoría, la estabilidad se logra cuando la excavación tiene forma parabólica o cuando alcanza, por derrumbes, dicha forma. (Cartaya, 2001).

Durante esos años la observación y control de infinidad de casos reales (Acosta, 1996), donde se logra la estabilidad con secciones de formas absolutamente arbitrarias, puso en dudas el planteamiento de Protodiakonov. (Cartaya, 2001).

A principios de la década de los 80 se pone en práctica la clasificación de Bieniawski, más tarde modificada por F. Torres. La modificación consistió en sustituir la resistencia a compresión de la roca de Bieniawski por su equivalente dado por el coeficiente de fortaleza de Protodiakonov. Por lo que a partir de este momento se comenzó a evaluar la estabilidad de las rocas según el criterio Bieniawski – Torres, en las investigaciones de los túneles del área CAT – FAR. De acuerdo a esta evaluación, se establecía el tiempo y el avance permisible sin revestir que admitía cada tramo de obra. (Cartaya, 2001).

Al verificar en la práctica que la estabilidad no se afectaba con avances o tiempos sin revestir superiores a los pronosticados, se decidió realizar una minuciosa investigación para establecer criterios más exactos y que permitieran realmente

valorara dicho comportamiento. Esta investigación fue realizada por Augusto A. Cañizares, del departamento de matemáticas aplicadas del CDCM. (Acosta,1996).

En la actualidad el uso de las clasificaciones geomecánicas tanto para trabajos subterráneos como a cielo abierto se ha incrementado en nuestro país. Se debe aclarar que las clasificaciones geomecánicas, si bien se pueden considerar como una parte de la caracterización geomecánica del macizo rocoso, de ningún modo pueden representar por sí solas a esta problemática. Esto se debe a que no incluyen en su análisis una variedad de parámetros que deben ser considerados para tener un pronóstico del comportamiento del macizo rocoso. (Cartaya, 2001).

Estos métodos han sido empleados principalmente para el estudio del macizo en obras con fines hidráulicos y protectoras, en menor cuantía, le siguen el estudio en laderas, taludes, en obras civiles (viaductos, embalses, presas, etcétera) y por último (casi nulo) en canteras, aunque se debe señalar que en los últimos diez años, se ha manifestado un cierto interés, por estas materias; destacándose los esfuerzos realizados, por el grupo de construcción subterránea y geomecánica del ISMMM, apoyándose en los cursantes de las Maestrías de Geomecánica y Construcción Subterránea, que desarrollaron varias tesis en esta línea de investigación.

La Caracterización geomecánica de los macizos rocosos de la Mina Merceditas (Cartaya, 1996), la geometría del agrietamiento de la Mina Merceditas y su estabilidad (Falero, 1996), la acción de la presión minera en las minas de cromo (Mondejar, 1996), la elección del método de arranque a partir de las clasificaciones geomecánica del macizo (Noa,1996), entre otras investigaciones. (Blanco, 1998. Blanco, 2000. Cartaya, 1997. Cartaya, 1999. Cartaya, 2000. Guillermo, 1998. Mondejar,1998. Mondejar,1999. Mondejar, 2000).

J. M. Alfaro, (2000), Aplicó nuevas técnicas en el estudio ingeniero geológico de los macizos rocosos donde realizó un análisis de los trabajos de campo más importantes, utilizados en la evaluación de macizos rocosos a partir de la utilización de métodos de campo no tradicionales utilizados en nuestro país. En el mismo se

hace un análisis y evaluación del agrietamiento del macizo rocoso de varios túneles en las provincias Granma y Santiago de Cuba.

Según (Cartaya, 2001), hace una caracterización geomecánica del macizo rocoso en obras subterráneas de la región oriental del país, la cual se enfoca más en la realización del estudio ingeniero- geológico del macizo rocoso, en determinar los parámetros geomecánicos de los macizos estudiados, en ofrecer los modelos geomecánicos más representativos de los macizos rocosos de las obras estudiadas, en proponer criterios geomecánicos estructurales que permitan un mejor diseño de excavaciones y obras subterráneas.

(Noa, 2013), Este trabajo está relacionado con el proceso de construcción de las excavaciones subterráneas horizontales, en el mismo se realiza una caracterización ingeniero - geológica de varios macizos de la región Oriental de Cuba. El autor realiza una caracterización ingenieril de las rocas, lo que permite hacer una evaluación del agrietamiento, el grado de deterioro y el tamaño de los bloques, utilizando en este último, varios métodos, determinando cuál es el que más se adecua a cada macizo estudiado, teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las características geo-estructurales de estos.

Se realiza la evaluación de las condiciones de estabilidad de los macizos rocosos donde se ubican las excavaciones objeto de estudio, utilizando cuatro de las metodologías de clasificación geomecánica existentes: la clasificación de Deere, la clasificación de Bulichev, la clasificación de Bieniawski y la clasificación de Barton. Por último, se realiza la propuesta de un sistema de indicaciones metodológicas, que posibilitan con su empleo lograr una correcta fundamentación de la elección del método de arranque de la roca a emplear durante el laboreo de excavaciones subterráneas. Pero no realiza un estudio de empleo de método de fortificación.

(Cosella, 2009), En su investigación propone analizar el macizo rocoso donde se laboreo el túnel II del trasvase Sabanalamar-Pozo Azul, es decir, estudiarlo para conocer las características físico- mecánicas de las rocas y realizar la evaluación

geomecánica del macizo rocoso para cada tramo de túnel y así determinar las características del sostenimiento que será utilizado. Pero en diferentes condiciones geológicas.

(Cuesta, 2010), Se caracterizar los factores que influyen en los procesos de infiltración y filtración de agua por los macizos rocosos fuertes poco porosos y agrietados, y hacia el interior de las excavaciones subterráneas, se hace una caracterización de los factores que influyen en el proceso de control del agua que afecta las excavaciones subterráneas y se realiza un estudio de las principales técnicas utilizadas para controlar el agua que afecta una excavación subterránea. Pero no se realiza un estudio de fortificación y estabilidad en este tipo de excavaciones con gran afluencia de agua.

(Rouco, 2015), Este trabajo está relacionado con el proceso de construcción de los túneles del trasvase Este – Oeste, fundamentalmente con el túnel Levisa Mayarí, tramo IV, el objetivo es realizar una evaluación de la estabilidad de las rocas y definir la necesidad o no de fortificar estas excavaciones.

Se realiza una caracterización ingeniero - geológica del macizo donde se construyen estas obras, además se hace una evaluación del agrietamiento y las características estructurales de este, dividiendo el túnel en tres tramos según sus características litológicas, para la evaluación de la estabilidad se utilizan, tres clasificaciones geomecánicas de las existentes: la clasificación de Deere, basada en el índice de calidad del macizo (RQD), la clasificación de Barton, basada en el índice (Q) y la clasificación de Bieniawski, basada en el (RMR), conjuntamente con esto se realiza una propuesta del sostenimiento a emplear en la excavación objeto de estudio.

(Oluwayesi, 2017), Su investigación se basó en establecer criterios geomecánicos que permiten evaluar el comportamiento mecánico estructural del macizo rocoso con el empleo de la modelación numérica por el MEF a partir de la geometría de la excavación, las propiedades de los materiales que constituyen este, el agrietamiento y el soporte de la excavación.

Se realiza el análisis de las características ingeniero – geológicas del macizo rocoso de las minas Descanso y Meloneras con los criterios existentes y se obtuvo como resultado que es de bloques muy entrelazados de tres familias de grietas, sin perturbación y de diferentes formas y tamaños. Basado en el criterio de Hoek-Brown generalizado, se determinan las ecuaciones de estado tensional de la serpentinita masiva y el gabro que permiten la creación de los modelos con el empleo de la modelación numérica por el método de elementos finitos.

Se evalúan los criterios geomecánicos con el empleo de la modelación numérica por elementos finitos, se definen la geometría, las propiedades que constituye el macizo rocoso, la condición de fronteras, las grietas destacadas y el soporte y se crean los modelos A, B y C para las excavaciones de la mina Descanso y el modelo del socavón para la mina Meloneras.

Estudio realizado en el yacimiento

Los estudios geológicos realizados en el yacimiento de caliza “Mogote San Nicolás” hasta la actualidad es la prospección geofísica a través del método de tomografía eléctrica con el objetivo de obtener la resistividad eléctrica (ρ), de manera que se localicen los techos de las cavernas y determinar si las mismas están vacías o llenas de sedimentos. (Cornier, 2017).

CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA REGIÓN

II.1 Introducción

La unidad empresarial de base (UEB) Producciones Mineras Santiago, es una entidad que cuenta con varios yacimientos de materiales de construcción, dentro de ellas se encuentra el “Mogote San Nicolás” que forma parte de la Empresa Geominera Oriente subordinada al grupo empresarial GEOMINSAL del Ministerio de Energía y Minas, la cantera explota caliza con el objetivo producir y comercializar de forma mayorista productos de materia prima de minerales no metálicos (carbonato de calcio) en sus diferentes variedades.

La materia prima (Caliza) del cual se obtiene el carbonato de calcio, cumple con los requisitos para ser utilizadas para la producción de hidrato de cal, losetas hidráulicas, se utiliza para pienso animal, talco, la caliza se utiliza también como áridos que es usado para diferentes tipos de hormigones, para base de fundamento de pavimento y piedras trituradas para otras construcciones.

Según el Informe de rendición de cuentas al comité de prevención y control, la empresa tiene como misión satisfacer las demandas de productos mineros en el territorio oriental y desarrollar la producción y comercialización de productos a partir de recursos minerales, (Rodríguez, 2019).

II.2 Ubicación geográfica del yacimiento

El área de estudio se ubica a unos 10 km al noreste del municipio Mella, en la provincia Santiago de Cuba, y a 2 km al sur oeste del Poblado de Palmarito de Cauto. Ocupa una superficie aproximada de 1.7 hectáreas, dentro del área concesionada (12 h.), se localiza en la hoja cartográfica 5076 - IV a escala: 1: 50 000 de Santiago de Cuba, está delimitada conforme a las coordenadas Lambert, cuyos vértices se presentan en la tabla 2.

El yacimiento se limita al norte y al oeste con la provincia Holguín (municipio Urbano Noris), al este con el municipio San Luís y nuevamente con Holguín (Mayarí), al sur

con los Municipios Palma Soriano y San Luís que está situado en la provincia de Santiago de Cuba, (Ver figura 2).

Tabla 2. Coordenadas Lambert del área de la concesión: 12 ha.

Vértice	x(m)	y(m)
1	597 500	184100
2	597900	184100
3	597900	183800
4	597500	183800
5	597500	184100

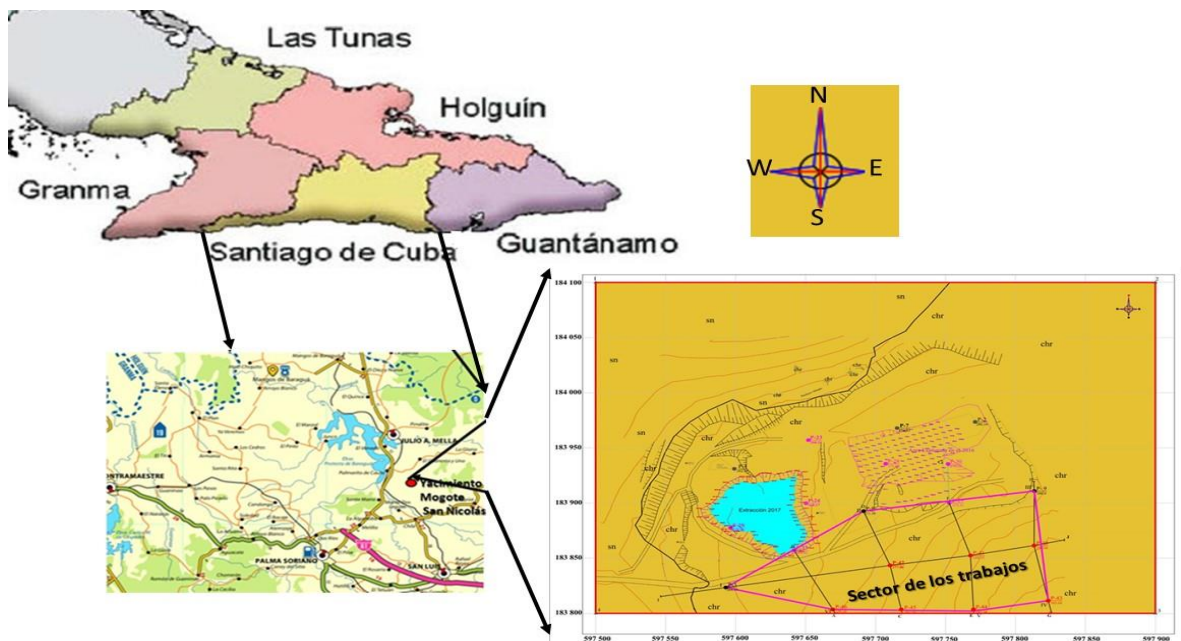


Figura 2. Ubicación geográfica del yacimiento. (Ojeda, 2012)

El área de trabajo se ubica a 4 km. de la UEB Producciones Mineras Santiago, perteneciente al poblado Palmarito de Cauto, Municipio Mella, Provincia Santiago

de Cuba. Por sus características físico geográficas su territorio es llano, al encontrarse ubicado en la llanura fluvial del río Cauto y sólo una pequeña porción al Este y Noreste tiene un relieve montañoso, perteneciente a la parte suroeste de la Sierra de Nipe, como se muestra a continuación la figura 2.1.



Figura 2.1 Ubicación del área de la concesión (www.googlemap.com).

II.3 Clima

La temperatura media anual está cerca de los 26 °C, las oscilaciones térmicas son evidentemente más amplias que la de los litorales y aun que la de los interiores de Cuba, por hecho geográfico de estar dentro del espacio de mayor área continental del país, es decir, a la de mayor distancia de las costas marítimas; esto determina días más calorosos y noches más frías.

Las precipitaciones responden en mayor o menor medida al ritmo anual de los campos centrales y de las llanuras de Cuba, acumulándose un total anual de 1100

milímetros de lluvia, lo que permite debido a la temporada en que caen y su distribución, excelentes cosechas de caña de azúcar y otros cultivos.

II.4 Relieve

El relieve del área está formado por elevaciones en forma de mogotes, con cotas entre 250 m y 300 m sobre el nivel medio del mar, presentando hacia el oeste una ladera abrupta en forma de paredón con más de 30m de altura, mientras que hacia el sureste es menos escarpada y más accesible, aunque presenta gran inclinación. (Ver figura 2.2).



Figura 2.2. Alto del Mogote de San Nicolás.

II.5 Topografía

Para la ejecución de estos trabajos se utilizaron como materiales básicos, datos y área entregada por el proyectista, así como las coordenadas de puntos de la red geodésica nacional creada y certificada por la empresa GEOCUBA. Se amarraron los laboreos a la red nacional, al igual que los puntos de interés, confeccionándose una base topográfica a escala 1: 500, (Ver figura 2.3).

Los trabajos topográficos se realizaron de acuerdo al orden establecido en el cronograma confeccionado a partir de los volúmenes contratados; donde se realizó de la red topogeodésica (red de apoyo), los trazados de los perfiles longitudinales y transversales, el levantamiento topográfico a escala 1:500, los trabajos de gabinete, los dibujos de los planos topográficos y la confección del informe.

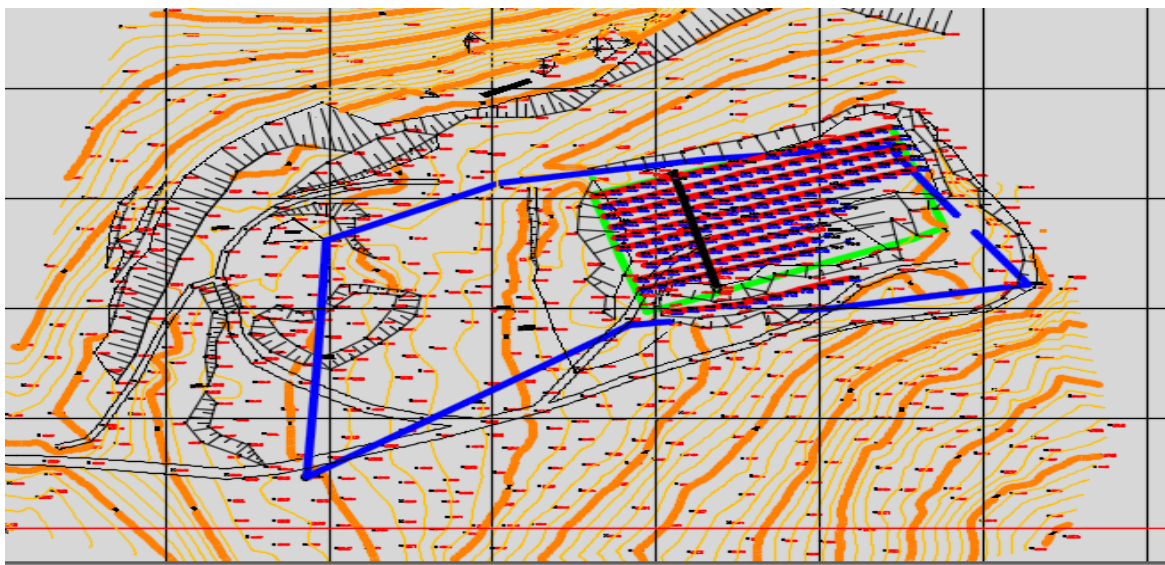


Figura 2.3. Área de la Concesión “Mogote San Nicolás” (Cornier, 2017).

II.6 Desarrollo socio-económico e industrial

La región se caracteriza por una economía basada principalmente en la actividad azucarera en el cultivo, corte manual y mecanizado de la caña de azúcar y agropecuaria. Esta actividad se desarrolla en la Empresa Azucarera Julio Antonio Mella, que posee una norma potencial de 600 000 arrobas diarias, con una planta para refinar el azúcar, además consta con la explotación de los recursos naturales para áridos ligeros y la producción de cal para la construcción en la planta de Palmarito de Cauto del municipio, y una pequeña industria de derivados de la azúcar para la preparación de vinos, vinagres y otros, también con una planta de fabricación de hielo. (Informe geológico, colectivo de autores, 2017).

En la parte agrícola se destaca la producción de viandas y hortalizas como un importante renglón para la alimentación de la población. En la pecuaria se destacan la producción porcina con tres centros de cría; la ganadería vacuna y la producción ovina se desarrolla en menor magnitud.

Muy cerca del depósito caliza San Nicolás en dirección oeste se desarrolla el yacimiento de zeolitas Palmarito de Cauto y en dirección sur este el yacimiento de tobas Puzolánicas Palmarito de Cauto, utilizados como aditivo en la producción de cemento. (Informe geológico, colectivo de autores, 2017).

Población

Los asentamientos poblacionales urbanos, aparte de la cabecera municipal que es Mella, son: Mangos de Baraguá, Palmarito de Cauto, Regina y Veintiuno de Abril, y como asentamientos rurales de mayor importancia: El Diez, El Way de Mella, Pinalito, El Mijal, El 43 y 95. En este municipio se concentra el 3.3 % de la población total de la provincia, con 35 309 habitantes y tiene una densidad poblacional de 106.3 habitantes/km² y un índice de masculinidad de 106 varones por cada 100 hembras.

El desarrollo social del territorio continuó en ascenso, mejoraron los indicadores de Salud, Educación, Deporte, Cultura y en la década de los años 70 fueron superiores, aunque no satisfacían totalmente las necesidades, careciendo aún de unidades de distribución y establecimientos de prestación de servicios para la recreación y el disfrute del tiempo libre de la población. (Informe geológico, colectivo de autores, 2017).

Red de comunicación

La principal vía de comunicación está basada en la carreta que une a la ciudad de Palma soriano con los pueblos de Palmarito de Cauto, Mella, Cueto y el ferrocarril central que pasa cerca de la zona de los trabajos.

Tanto el yacimiento como la planta procesadora de esta materia prima cuentan con una buena red de comunicación, conformada por terraplenes en buen estado hasta

el yacimiento y carreteras pavimentadas de 1^{er} y 2^{do} orden que comunican a la planta con las ciudades de Santiago de Cuba, Palma Soriano, Moa y Holguín, además relativamente cerca transita el ferrocarril central. A través de estas vías de comunicación la materia prima puede ser transportada a otras provincias y hacia el exterior del país por medio del puerto Guillermon Moncada y el aeropuerto Antonio Maceo en la ciudad de Santiago de Cuba, también por el aeropuerto Frank País en la provincia de Holguín. (Informe geológico, colectivo de autores, 2017).

II.7 Geología del yacimiento

Según el informe geológico (2017), explica que el área de estudio está constituida por las formaciones geológicas Charco Redondo (Chr) y Sabaneta de edad (P_1^1 - P_2^2). Que está formada por calizas compactas recristalizadas, órgano detrítico de color blanco crema, perteneciente a la formación geológica Charco Redondo de edad Eoceno Medio (P_{22}), con una estructura masiva y textura organógena - biomorfodetrítica. Su espesor varía entre 5 y 40 m, siendo mayor hacia el Suroeste donde se localiza un corte natural de unos 30 m. (Ver Figura 2.4).



Figura 2.4. Fragmentos de caliza Mogote San Nicolás, (Cornier, 2017).

Por debajo de las calizas yacen discordantemente las rocas vulcanógenas sedimentarias pertenecientes a la formación Sabaneta de edad Paleoceno Inferior - Eoceno Medio (P_1^1 - P_2^2), constituyendo el basamento del depósito, representadas por tobos de color verde, algo alteradas y areniscas tobáceas polimícticas color parduzco.

II.7.1 Morfología del yacimiento

La morfología del depósito se presenta a través de elevaciones en forma de mogotes, de modo irregular, presentando un relieve más suave hacia el Norte, mientras que hacia la parte sur las elevaciones son más abruptas, con cotas que llegan hasta 303 m de altura. El cuerpo es morfológicamente masivo y sencillo, al contar con un solo tipo tecnológico de materia prima que en este caso es las calizas.

No se observan variación por el rumbo, siendo sus elementos de yacencia en el área entre 30 y 55 grado, las intercalaciones estériles están dadas fundamentalmente por el alto grado de carsificación existente, las alteraciones presentes son resultado del proceso de oxidación y lixiviación de las rocas.

La cubierta está poco desarrollada, representada por capa vegetal y arcilla plástica de color pardo rojizo, con abundantes fragmentos de calizas que presentan puntos y vetillas de manganeso, también planos de fracturas manchados de oxidación, dicha cubierta se distribuye en una pequeña franja hacia el oeste del área extendida de Norte a Sur, en potencia de hasta 2.30 m. (Informe geológico, colectivo de autores, 2017).

II.7.2 Carsificación

Existe gran desarrollo de carsificación tanto en superficie como en profundidad, generalmente en forma de cavernas en ocasiones rellenas de material arcilloso mezclado con fragmentos de caliza e a veces vacías; así como de oquedades, bolsones de arcilla rojiza. Estas cavernas constituyen intercalaciones estériles en el depósito que provocarían afectaciones en la minería durante el proceso tecnológico

de la materia prima, independientemente de su calidad en cuanto al quimismo (Ver figura 2.5).

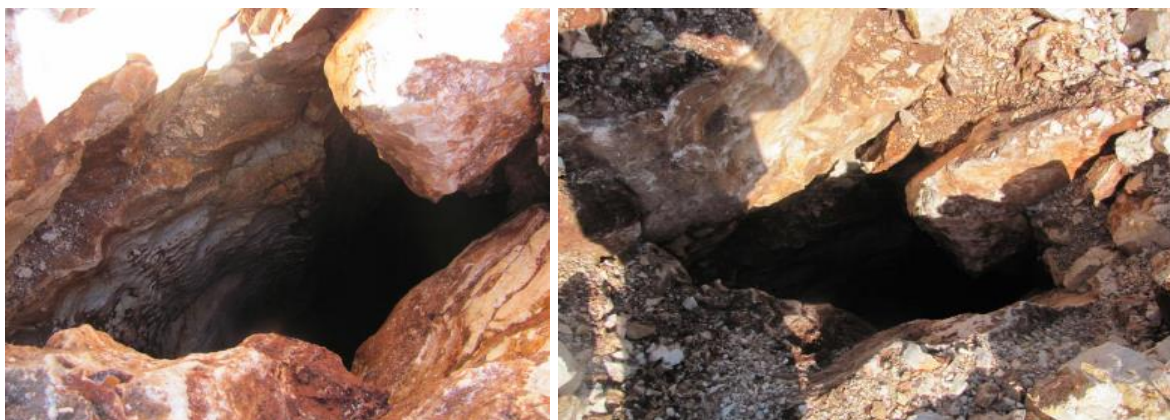


Figura 2.5. Presencia del carso en el yacimiento, (Cornier, 2017).

II.7.3 Litología

Desde el punto de vista ingeniero - geológicos las rocas que forman el mineral útil se clasifican como duras y estables. El yacimiento posee condiciones minero técnica favorable para evaluar y garantizar una explotación minera sencilla y económica, debido al bajo valor promedio de cubierta e intercalaciones estériles presente, los que minimizará el movimiento de material útil en la futura cantera. (Cornier, 2017).

II.7.4 Mineralización

El área está constituida por calizas de alto contenido de carbonato mientras que la presencia de arcilla perjudicial es mínima, estos resultados permiten afirmar que la materia prima estudiada presenta buena calidad minero técnica. Los resultados obtenidos en este trabajo confirman una mineralización muy buena, con contenidos promedios de CaCO_3 de 98.80%. (Cornier, 2017).

II.7.5 Tectónica

Durante los recorridos geológicos efectuados, se observó que el yacimiento desde el punto de vista tectónico no presenta complicaciones relevantes, sino que en la superficie se observa que el agrietamiento principal es generalmente en dirección Norte, existe además agrietamiento paralelo, cubierto con material arcilloso ferroso, que en ocasiones terminan anchos en cavernas. Este agrietamiento debe ser post - mineral, no observándose elementos tectónicos que influyan en la génesis del yacimiento.

La complejidad del yacimiento está en la variabilidad de su potencia, que es de forma algo moderada, con los mayores espesores hacia el S, SE, y los menores espesores hacia el NW. Otro aspecto importante a tener en cuenta es que la potencia del mineral útil pudiera variar debido al carso interior en forma de caverna, así como el desarrollo del carso superficial, el cual limita la explotación de las reservas minerales desde la superficie. (Cornier, 2017).

II.7.6 Hidrogeología del yacimiento

El yacimiento se encuentra cercano a la fuente de abasto del territorio el embalse Protesta de Baraguá que cubre una extensión de 32.4 Km² con una capacidad de embalse de 250 millones de m³ de agua, uno de los de más capacidad en el país y el mismo proporciona la base para una importante actividad Acuícola donde se obtienen niveles de captura de las 500 toneladas de peces al año, además de las potencialidades para el desarrollo de actividades turísticas de la caza y la pesca.

Para valorar las condiciones hidrogeológicas subterráneas del yacimiento se realizaron observaciones durante la perforación donde se comprobó la no existencia de aguas subterráneas a la profundidad de estudio desde 0 hasta 30 m como promedio. (Hechevarría, 2017).

Las condiciones hidrogeológicas del yacimiento son sencillas, hasta la profundidad de investigación (cota 245.0 m), es seco, no se aprecia ninguna corriente hídrica superficial ni subterránea. Todo el volumen de agua se drena por el sistema de

grietas y cavernas existentes, es decir ocurre un drenaje natural en el área hacia canales subterráneos más profundos que la cota de investigación.

II.8 Análisis de las propiedades físico-mecánicas de las rocas

Es conocida la importancia que tiene el conocimiento de las propiedades físico-mecánicas de las rocas, ya que permite valorar una serie de índices necesarios para la correcta realización de los trabajos mineros, entre los cuales se puede citar: el grado de estabilidad de una excavación, la carga sobre una fortificación, la efectividad en el empleo de uno u otro método de laboreo. (Blanco, 1981).

El conocimiento profundo de las propiedades de las rocas, así como los métodos para su determinación, es de gran importancia para el buen aprovechamiento funcional del macizo rocoso. Dentro de las propiedades físico-mecánicas de las rocas se definen las siguientes: densidad, porosidad, absorción, resistencia a compresión y resistencia a tracción. (Quesada R., 2006).

La ecuación para determinar la resistencia a la compresión es la siguiente:

$$R_c = \frac{P_R}{F}$$

Donde:

- P_R - Carga de ruptura de la muestra (Kgf)
- F - Área transversal inicial de la muestra (cm^2)

En caso de las muestras irregulares, la resistencia a la compresión se determina del a siguiente fórmula:

$$R_c = \frac{P}{V^{2/3}} = P \left(\frac{V_v}{g} \right)^{2/3}$$

Donde:

- P - esfuerzo de destrucción (Kg)
- V - volumen de la muestra (cm^3)

- γ_v - peso volumétrico de la roca (g/cm^3)
- g- Peso medio de la muestra (g)

Es conocido que la resistencia de las rocas a compresión es relativamente alta, mientras que la resistencia a tracción, flexión y cizallamiento es comparativamente pequeña. Según datos experimentales se pueden establecer la siguiente expresión:

$$R_c \approx (10 \div 30)R_t$$

Resistencia a la tracción: para determinar la resistencia a la tracción, el método más usado es el método brasileño que consiste en ensayar una muestra cilíndrica con la relación diámetro/longitud, que puede variar de 0,5 a 1,0 aunque en algunos casos suele utilizarse testigos de 40 a 45 mm. Matemáticamente se puede expresar:

$$R_t = \frac{2P}{\pi dL}; M_{pa}$$

Dónde: P- Esfuerzo de destrucción.

d – Diámetro de la muestra.

L – Longitud de la muestra.

También, para muestras irregulares en la determinación de la resistencia a la tracción se sigue la metodología expresada anteriormente y que es ya conocida con expresión:

$$R_T = \frac{P}{V^{2/3}} = \frac{P}{F}$$

Masa volumétrica: la masa volumétrica resulta ser otro parámetro de vital importancia para la evaluación de los áridos, manteniéndose entre las exigencias establecidas para su uso en la construcción de los diferentes hormigones, sobre todo ligeros, según NRIB 884/86. (Quesada, R.,2006).

La revisión de la bibliografía existente (Informe geológico para la elevación de recursos indicados a medidos; 2017), ha evidenciado que los ensayos para la determinación de las propiedades físico-mecánicas de las rocas fueron realizados

en el laboratorio de minerales y rocas Elio Trincado, perteneciente a la Empresa Geominera Oriente, como se muestra en la tabla 2.1, (Ojeda, 2012).

Tabla 2.1. Propiedades físico mecánicas de las rocas (Ojeda, 2012).

Parámetros determinados	U/M	Tipo de roca		Promedio general
		Caliza dura	Caliza blanda	
Resistencia a compresión seca	(Kgf/cm ³)	565.10	275.30	420.2
Resistencia a tracción saturada	(Kgf/cm ³)	307.0	167.20	237.1
Masa volumétrica en estado seco	(g/cm ³)	2.56	2.50	2.53
Masa volumétrica saturada	(g/cm ³)	1.20	1.30	1.25
Abrasión máx.	(%)	37.9	32.88	35.39
Abrasión mín.	(%)	28.0	28.43	28.21

En este trabajo se determinaron algunas propiedades que no han sido evaluadas con anterioridad y que se hace necesaria su evaluación para el cumplimiento del objetivo del mismo. A continuación, se muestran los resultados de las propiedades físicas de las rocas que se utilizan en esta investigación. (Ver tabla 2.2).

Tabla 2.2. Resultados de las propiedades físicas de las rocas.

Parámetros determinados	U/M	Tipo de roca		Promedio general
		Caliza dura	Caliza blanda	
Absorción	(%)	1.26	4.2	2.73
Porosidad	(%)	15.215	6.975	11.09
Peso específico	(g/cm ³)	2,68	1,99	2.33
Peso Volumétrico	(g/cm ³)	2.04	1.62	1.83

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LAS CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS

III.1 Introducción

Los macizos rocosos, debido a su complejidad y variabilidad que presentan fue necesario para el ser humano simplificar de alguna manera las características y propiedades de estos, con este propósito surgieron las clasificaciones geomecánicas, que se derivan para categorizar los macizos rocosos por medio de la observación directa en campo, así como por ensayos sencillos e índices de calidad que se relacionan con los parámetros geomecánicos para su aplicación ya sea en túneles, taludes o excavaciones en rocas.

Las clasificaciones geomecánicas tienen por objeto caracterizar un determinado macizo rocoso en función de una serie de parámetros a los que se les asigna un cierto valor. Por medio de la clasificación se llega a calcular un índice característico de la roca, que permite describir numéricamente la calidad de la misma. Es una herramienta fundamental, pero debe ser usada con cuidado para su correcta aplicación, pues exige conocimientos y experiencia por parte de quien la utiliza, (González, 2009).

Las clasificaciones geomecánicas tiene la gran finalidad de identificar la calidad de un determinado macizo rocoso conforme lo establece en una serie de parámetros los cuales proporcionan en síntesis una puntuación, (Olaya, 2013).

III.2. Métodos de clasificaciones geomecánicas

Para valorar la calidad del macizo rocoso, se emplean diferentes métodos de estudio, actualmente los métodos basados en las clasificación geomecánicas, son los que han tenido gran difusión. Los métodos más utilizados se pueden dividir en dos grupos que son los métodos cuantitativos y cualitativos (Ver tabla 2.3.) a continuación:

Tabla 2.3. Métodos de clasificación de macizos rocosos, (Mendieta, 2013).

Métodos cualitativos	Terzaghi (1946) Lauffer (1958) Deere "RQD" (1963)
Métodos cuantitativos	Wickham et al. "R.S. R" (1972) Bieniawski "R.M. R" (1973, 1989) Barton et al, "Q" (1974) González de Vallejo "SRC" (1982) Romana, (1995) Hoek y Brown, (1995) Palmstrom, (1995) Laubscher, (2000)

Terzaghi, (1946)

(Terzaghi, 1946) clasifica el terreno en diez categorías y proporciona la carga de roca o tensión vertical que proporcionan las cerchas de sostenimiento de un túnel construido por procedimientos tradicionales. Refleja la práctica habitual de los años 1930-1970 en Norteamérica, las críticas de esta clasificación se basan en que es inadecuada cuando se utilizan las técnicas modernas de construcción de túneles en rocas que hacen uso intensivo de hormigón proyectado y bulonado. La clasificación de la roca es poco objetivable. La clasificación original fue modificada por Deere et al (1970). Se considera como la clasificación geomecánica más antigua.

Lauffer (1946)

Baso su clasificación en los trabajos de la "Escuela Austriaca" que condujeron a la introducción del NATM. Introdujo el concepto de tiempo de estabilidad de la

excavación para una luz o dimensión libre sin sostener. La relación entre ambas variables (luz libre y tiempo de estabilidad) la que permite establecer siete categorías de roca. En esta clasificación la roca no se clasifica a partir de datos geológicos o geotécnicos sino a partir de su respuesta frente a la construcción de una excavación subterránea. Requiere, pues, experiencia previa o datos de la propia excavación.

Esta clasificación recoge la experiencia de un estudio sistemático sobre el tiempo que permanecían estables las excavaciones en diferentes tipos de roca, incluso en minas abandonadas, (Terrero, 2018).

La clasificación se efectúa atendiendo a los parámetros:

- ✓ Longitud libre: que es la menor de las dos dimensiones, diámetro o profundidad de la excavación abierta sin revestimiento
- ✓ Tiempo de estabilidad: es el tiempo que permanece sin desmoronarse la longitud libre anteriormente definida.

En función de ambos parámetros clasifica las rocas en 7 tipos, que se muestra a continuación en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de las rocas según Lauffer

Tipo de roca	Longitud libre	Tiempo de estabilidad	Descripción
A	4 m	20 anos	Sana
B	4 m	6 meses	Algo fracturada
C	3 m	1 semana	Fracturada
D	1,5 m	5 horas	Friable
E	0,8 m	20 minutos	Muy friable
F	0,4 m	2 minutos	De empuje inmediato
G	0,15 m	10 segundos	De empuje inmediato fuerte

Protodyakonov, (1962)

Según (Perri, 1996), la clasificación geomecánica de Protodyakonov fue muy utilizada en los antiguos "países del este", y permitía calcular la carga que ejerce el terreno sobre el sostenimiento en función de dos factores únicamente, la anchura del túnel (B) y un parámetro "f", denominado coeficiente de resistencia.

Este coeficiente depende de la resistencia a compresión simple (RCS), el ángulo de rozamiento interno (ϕ) y la cohesión (c) del terreno, de forma que, para rocas, "f" vale una décima parte de la resistencia a compresión simple (en MPa), mientras que para suelos se toma $f = \tan \phi + c/RCS$, (Ver figura 3).

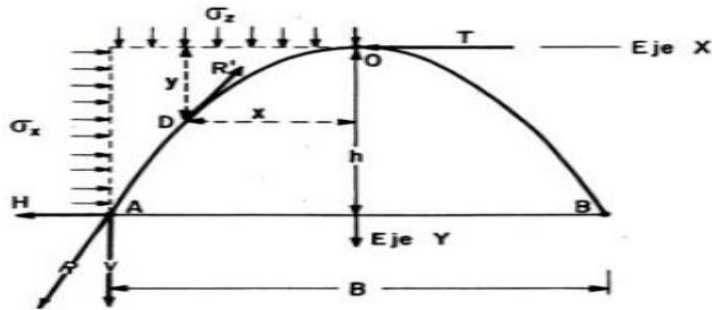


Figura 3. Esquema de Protodyakonov.

A grandes rasgos, lo que hace la clasificación es:

- ✓ Considerar un arco parabólico triarticulado trabajando a compresión.
- ✓ Plantear el equilibrio de fuerzas, compensando las cargas verticales y horizontales mediante el factor "f" (como una especie de coeficiente de rozamiento).
- ✓ Buscar la mayor altura estable "h" que puede desarrollar el terreno, obteniendo: $h = \frac{B}{2f}$

El coeficiente de fortaleza "f", está definido en función de la resistencia a compresión simple, el ángulo de rozamiento interno y la cohesión que está dada por las siguientes expresiones matemática:

Para rocas: $f = \frac{\sigma_c}{10}$

Para suelos: $f = tg\varphi + \frac{c}{\sigma_c}$

Donde:

σ_c = La resistencia a compresión simple de la roca expresada (MPa).

φ = ángulo de rozamiento interno a largo plazo.

c = Cohesión a lo largo plazo (MPa).

En la tabla 3.1 se muestran las categorías de tipos de rocas y su coeficiente de fortaleza.

Tabla 3.1. Calidad del macizo según el coeficiente de fortaleza. (simplificado de SZECHY. 1967)

Categoría	Descripción	"f"
Excepcional	Cuarcita, basalto y rocas de resistencia excepcional	20
Alta resistencia	Granito, areniscas silíceas y calizas muy competentes	15-20
Resistencia media	Calizas, granito algo alterado y areniscas	8-6
	Areniscas medias y pizarras	5
	Lutitas, areniscas flojas y conglomerados friables	4
	Lutitas, esquistos y margas compactas	3
Resistencia baja	Calizas, lutitas blandas, margas, areniscas friables	2
	Gravas, bolos cementados	
	Lutitas fisuradas y rotas, gravas compactas y arcillas preconsolidadas	
Resistencia muy baja	Arcillas y gravas arcillosas	1,0
	Suelos vegetales, turbas y arenas húmedas	0,6
	Arenas y gravas finas	0,5
	Limos y loess	0,3

Deere "RQD" (1968)

La clasificación de Deere o del índice RQD (*RQD=Rock Quality Designation*) se fundamenta en el grado de fracturación de la roca para valorar la calidad del macizo rocoso. Para obtener el índice RQD, se realizan perforaciones con diámetro mínimo de 54 mm, los tramos de testigo obtenidos de la perforación se miden y se contabilizan para aplicarlos en la fórmula 1.1. Para ser contabilizadas la longitud de los tramos debe ser mayor de 10 centímetros.

Es un índice de obtención rápida y forma parte de otras clasificaciones, hay que tener precaución en la calidad del macizo obtenida, debido a que en la perforación influyen factores, como son: la mecánica del sondeo y forma en que se lo ejecutó, que pueden producir roturas en el testigo.

La fórmula a aplicar para determinar el RQD es:

$$RQD = \frac{\text{Longitud recuperada en piezas} > 0,1 \text{ m} \cdot 100}{\text{Longitud del sondeo}} \quad (1.1)$$

Si no se dispone de sondeos, una aproximación del RQD se obtiene por la expresión dada por Palmstrom.

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \quad (1.2)$$

Siendo J_v el número total de juntas que se encuentran en un metro cúbico del macizo rocoso, si hay dificultad en observar, se puede obtener contando las discontinuidades de cada familia que hay en una longitud determinada.

En función del R.Q.D se establece la clasificación de las rocas en los siguientes tipos, ver a continuación en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Clasificación de las rocas según el índice “RQD”.

R.Q.D. (%)	Calidad de roca
90-100	Excelente
75-90	buena
50-75	Regular
25-50	Mala
<25	muy mala

Esta clasificación da resultados válidos en rocas masivas y resistentes, en rocas de baja resistencia o estratificadas, es poco práctica y debe tenerse en cuenta otros factores como: inclinación de los estratos, génesis de las rocas.

Barton et al (1974)

(Barton, 1974). Proponen una clasificación geomecánica de las rocas, mediante el índice de calidad “Q” que se obtiene al sustituir en la fórmula 1.3, los seis parámetros que se observan en el macizo rocoso y se encuentran descritos a continuación. Los parámetros que caracterizan este método aparecen en la, (tabla 1 al 6 del anexo II).

Determinación del índice Q de Barton

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

Siendo:

- RQD: índice de Calidad de la Roca.
- J_r : índice que contempla la continuidad y rugosidad de las superficies de las grietas.
- J_n : índice que se toma según la cantidad de sistemas de grietas.
- J_a : índice que depende del grado de alteración de las grietas y de las características de su relleno.
- J_w : índice que caracteriza la humedad de las rocas.

- SRF: (Stress Reduction Factor) coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional en el macizo rocoso.

Los tres grupos formados con estos parámetros son:

- $\frac{RQD}{J_n}$ Representa el tamaño de los bloques.
- $\frac{J_r}{J_a}$ Representa la resistencia al corte entre los bloques.
- $\frac{J_w}{SRF}$ Representa la influencia del estado tensional.

El rango de variación de los parámetros se muestra en la tabla 3.3

Tabla 3.3. Rango de variación de los parámetros del RQD

<i>RQD</i>	0-100
<i>J_n</i>	0.5-20
<i>J_r</i>	0.5-4
<i>J_a</i>	0.75-20
<i>J_w</i>	0.05-1
<i>SRF</i>	0.5-20

El índice Q varía de 0.001 a 1000 y el macizo rocoso puede ser clasificado en nueve clases.

Hoek y Brown "GSI" (1995)

Hoek et al, (1995) han propuesto un índice geológico de resistencia, GSI (geological Strength index), que evalúa la calidad del macizo rocoso en función del grado y las características de la fracturación, estructura geológica, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades.

Está asociado a macizos de roca dura y equivalente al sistema RMR. El GSI proporciona un sistema para estimar la disminución de la resistencia presentada en un macizo rocoso con variables geológicas diferentes y se obtiene de combinar de parámetros geológicos fundamentales: la estructura del macizo, la condición de sus

discontinuidades y su clasificación se realiza según el siguiente criterio (Ver tabla 3.4).

Tabla 3.4. Clasificación del macizo según GSI

Calidad del macizo	Clase	GSI
Muy mala	V	0-20
Mala	IV	21-40
Regular	III	41-60
Buena	II	61-80
Muy buena	I	81-100

Bieniawski "RMR" (1989)

Esta clasificación fue publicada por su autor en 1973 y ha sido ligeramente modificada en el año 1976 y 1979 si bien, entre estas 2 últimas publicaciones, no existe diferencia en la estructura y valoración de los parámetros. Por esta razón expondremos las dadas en las publicaciones de 1973 y 1979. Para determinar el índice RMR de calidad de la roca se hace uso de seis parámetros del terreno:

- La resistencia a compresión simple del material.
- El RQD (Rock Quality Designation).
- El espaciamiento de las discontinuidades.
- El estado de las discontinuidades.
- La presencia de agua.
- La orientación de las discontinuidades.

Para tener en cuenta la incidencia de estos factores se definen una serie de parámetros, asignándoles una determinada valoración, (Ver tabla 1-6 del anexo II), cuya suma en cada caso, nos dará el índice de calidad RMR; cuyo rango de variación está entre 0 y 100. En función del valor del RMR se clasifican las rocas en 5 categorías diferentes como se muestra a continuación (Ver tabla 3.5).

Tabla 3.5. Calidad del macizo rocoso según RMR

Clase	RMR	Calidad de la roca
I	81 - 100	Muy buena
II	61 - 80	Buena
III	41 - 60	Regular
IV	21 - 40	Mala
V	0 - 20	Muy mala

Romana "SMR" (1985,1993,1995)

(Ruiz, 2001) La clasificación SMR de Romana (1985, 1993, 1995) es una adaptación de la clasificación RMR de Bieniawski (1973, 1979, 1989, 1993) a taludes, mediante la aplicación de los factores de corrección adecuados. El índice SMR, "*Slope Mass Rating*", se obtiene sumando al RMR básico un "factor de ajuste", función de la orientación de las juntas (y producto de tres subfactores, $F1 \cdot F2 \cdot F3$) y un "factor de excavación" ($F4$) que depende del método de excavación. La clasificación se estableció a partir del estudio de 31 taludes con diferentes grados de estabilidad.

El índice SMR para la clasificación de taludes se obtiene del índice RMR básico sumando un "factor de ajuste", que es función de la orientación de las juntas (y producto de tres subfactores) y un "factor de excavación" que depende del método utilizado:

$$SMR = RMR_{\text{básico}} + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

$F1$: depende del paralelismo entre el rumbo de las discontinuidades y de la cara del talud. Varía entre 1,00 (cuando ambos rumbos son paralelos) y 0,15 (cuando el ángulo entre ambos rumbos es mayor de 30° y la probabilidad de rotura es muy baja). Estos valores, establecidos empíricamente, se ajustan aproximadamente a la expresión:

$$F1 = [1 - \text{sen}(ad) - as]1^2$$

Dónde: (ad) y (as) son los valores del buzamiento de la discontinuidad y del talud respectivamente.

F2: depende del buzamiento de la discontinuidad en la rotura plana. En cierto sentido es una medida de probabilidad de la resistencia al esfuerzo de corte. Varía entre 1,00 (para discontinuidades con buzamiento superior a 45°) y 0,15 (para discontinuidades con buzamiento inferior a 20°). Fue establecido empíricamente, pero puede ajustarse aproximadamente según la relación:

$$F2 = [\tan^2(bd)]1^2$$

Donde:

bd: es el buzamiento de la discontinuidad. F2 vale 1,00 para las roturas por vuelco.

F3: refleja la relación entre los buzamientos de la discontinuidad y el talud. Se han mantenido los valores propuestos por Bieniawski en 1976 que son siempre negativos.

F4: se determina dependiendo del método de excavación. El valor asignado queda definido (Tabla 1 del Anexo III).

Para la estabilidad del talud queda definida en la siguiente tabla 3.6.

Tabla 3.6. Estabilidad de talud según SMR

SMR	Estabilidad
100 – 81	Totalmente estable
80 – 61	Medianamente estable
60 – 41	Parcialmente estable
40 – 21	Inestable
<20	Totalmente Inestable

Laubscher "MRMR" (2000)

Laubscher (2000) desarrolló un sistema de clasificación basado en el *RMR* de Bieniawski (*MRMR*, *Modified Rock Mass Rating*) que categorizaba desde 0 (muy mala) a 100 (muy buena), tal como se muestra en la siguiente tabla 3.7.

Tabla 3.7. Clasificación de la calidad del macizo según MRMR.

Calidad del macizo	Clase	MRMR
Muy mala	5	0 – 20
Mala	4	21 – 40
Regular	3	41 – 60
Buena	2	61 – 80
Muy buena	1	81 – 100

El método cambia la valoración de algunos parámetros y altera la determinación del espaciamiento de las discontinuidades con respecto a su predecesor. Además, considera los esfuerzos in situ e inducidos y los efectos en el macizo producto de la tronadura y su alteración por exposición de la roca fresca al ambiente. Cabe destacar que las modificaciones fueron hechas inicialmente para condiciones en minas de *Block Caving*.

III.3 Elección de clasificaciones geomecánicas que más se adaptan al macizo

De acuerdo a la revisión de los diferentes métodos de clasificación del macizo rocoso, resulto necesario aplicar el índice RQD de Deere, la clasificación de Bieniawski y el método de Q Barton, por las siguientes consideraciones:

- La elección de los métodos de clasificación geomecánica, se basó en los resultados y los que más se adapta a la realidad del yacimiento.
- El índice RQD, se utilizó no como un método de clasificación del macizo rocoso, ya que en sí mismo es difícil describir el macizo rocoso, sino como un valor necesario para ayudar a clasificar los métodos propuestos.
- El método de Bieniawski se utilizó ya que el mismo ofrece buenos resultados en este tipo de macizo rocoso, y teniendo en cuenta las bibliografías consultadas esta clasificación ofrece resultados acertados en macizos con características similares analizados en el trabajo, independientemente de que es una de las clasificaciones que más difusión y aplicación tiene en los últimos tiempos.

- La clasificación basada en la Q de Barton, por ser un método óptimo y de mayor utilización en el mundo, para clasificar el macizo rocoso, ya que considera parámetros característicos que se determinan in situ, aunque su aplicación en minería a cielo abierto es muy reducida, ofrece resultados que se acercan con un amplio margen a la realidad del comportamiento de los macizos rocosos evaluado con este método.

CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICO - ESTRUCTURAL DEL YACIMIENTO

IV.1 Introducción

En el área de la cantera, predomina el material suelto areno gravoso de diferentes diámetros y bloques de roca caliza de color blanco, son calizas que presentan dos tipos de estructuras, una son calizas densas, macizas o con estratificación muy gruesa y que se presentan en forma de mogotes o paredones, otras están representadas por calizas muy fracturadas y agrietadas. En la parte superior del talud que se encuentra en los alrededores de la cantera predomina una arcilla rojiza que integra la capa vegetal, en algunos lugares mezclada con el material que se explota en la cantera.

En toda el área que ocupa el yacimiento, predominan numerosas cavernas de varios metros de profundidad que afloran en la superficie. El resto del área está cubierto por abundante vegetación, pero predomina el mismo material arcilloso rojizo y bloques de caliza de color blanco.

IV.2 Estudio del Agrietamiento

El agrietamiento condiciona las propiedades y el comportamiento resistente, así como las deformaciones de los macizos rocosos, por ello es importante definir las características y propiedades de los planos de discontinuidades.

El estudio del agrietamiento se realizó según la diferenciación litológicas de las rocas presentes y se definió por tramos. Se midieron los principales sistemas de discontinuidades (denominados familias) y se contabilizaron las grietas aleatorias.

IV.2.1 Descripciones de los tramos analizados

A partir de la litología existente en el yacimiento “Mogote San Nicolás” se dividió el mismo en seis tramos, obteniendo los siguientes resultados:

El tramo Nº I. La roca característica es caliza densa, la cual aparece con un color blanco crema a marfil, se sitúa a una altitud de 249 m según las coordenadas GPS Data, con latitud 20° 18' 21" y longitud 75° 53' 55", el tramo se extiende a 19 m, presenta tres familias de grietas que son: para la primera familia 72°/270°, segunda 76°/190° y la tercera familia 70°/180°, estas están formadas por separación de bloques con un espaciado que varía de 0,42-2,1 mm, las discontinuidades tiene menor persistencia que varían de 30-45 cm, la superficie es plana, rugosas e irregulares en cuanto a su rugosidad, las grietas con minerales de relleno en pequeño espesor de minerales arcillosos expansivo, el factor de reducción por presencia de agua se caracteriza por excavaciones secas con presión de agua <1 l / min localmente. Las condiciones tensionales de las rocas pertenecen zonas débiles aisladas, con arcilla o rocas descompuesta (cobertura ≤ 50 mm).

El tramo Nº II. La roca característica es la caliza blanda, la cual aparece con un color blanco claro, con pocas intercalaciones de arcillas. se ubica a una altitud con latitud 20° 18' 23" y longitud 75° 53' 53", se extiende a 10 m, presenta tres familia de grietas, donde la orientación de las grietas son: para la primera familia se orienta a 89°/170°, segunda 48°/200°, tercera 70°/208°. El espaciado que varía de 0,37-1,3 mm. El índice de rugosidad de las discontinuidades está caracterizado por diaclasas onduladas, rugosas, el coeficiente de alteración o relleno de las grietas se presenta con ligeras alteraciones, mientras que el factor de reducción por presencia de agua se caracteriza por excavaciones secas con presión de agua <1 l / min localmente y las condiciones de factor de reducción de esfuerzos pertenecen a rocas deformables (flujo plástico de las rocas) con baja presiones.

Tramo Nº III. La roca característica es caliza de granos finos, duras, compacta, de color blanco a blanco crema con presencia intercalaciones de arcillas. Se encuentra a una altitud de 240 m, con latitud 20° 18' 23" y longitud 75° 53' 54", medida por

variación litológica de 12 m, el tramo presenta tres familias de grietas, de ellas discontinuas, donde las orientaciones de estas son: 89°/209°, 70°/199°, 79°/220°, las juntas de paredes sanas (sin minerales de relleno intermedio), el espaciado que varía de 0,46-1,0 mm. El factor de reducción por presencia de agua se caracteriza por excavaciones secas con presión de agua <1 l / min localmente, mientras que las condiciones de factor de reducción de esfuerzos pertenecen a rocas deformables (flujo plástico de las rocas) con baja presiones.

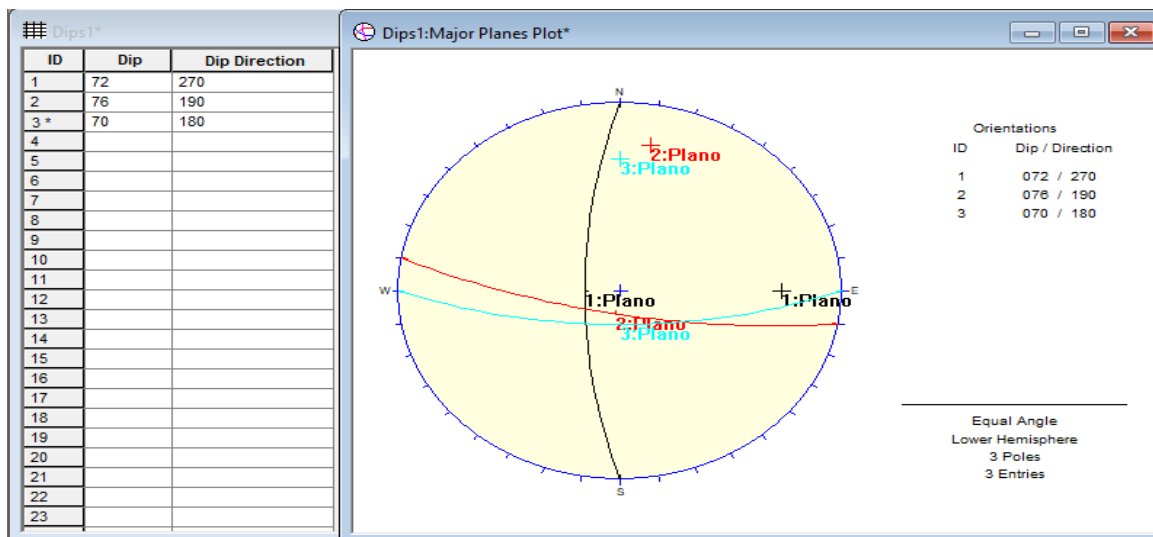
Tramo Nº IV. La roca característica es caliza blanda muy alterada de color blanco platino, rellenas de un material areno arcilloso. Se encuentra a una altitud de 250 m, con latitud 20° 18' 24" y longitud 75° 53' 54", tiene una medida de 17 m, presenta tres familias y algunas grietas aleatorias, la orientación de sus grietas son: para la primera familia 87°/233° para la segunda 82°/232° y tercera 80°/240°, con juntas onduladas, rugosas, el espaciado que varía de 0,64-0,9 mm, el coeficiente de alteración o relleno de la junta se caracteriza con minerales de relleno en pequeño espesor con minerales arcillosos expansivos, mientras que el factor de reducción de esfuerzos se caracteriza rocas deformables con baja presiones y como sucede en toda la cantera el coeficiente de reducción por presencia de agua se caracteriza por excavaciones secas con presión de agua <1 l / min localmente.

Tramo Nº V. Caliza alterada es la roca característica, rellenas de un material areno arcilloso con un color de blanco crema a blanco perla, se sitúa a una altitud de 246 m con latitud 20° 18' 22" y longitud 75° 53' 49", se extiende a 13 m. Presenta tres familia de grietas que son: 89°/210°, para la primera familia, 89°/220° para la segunda y 87°/221° para la tercera. Presenta rocas muy fracturada, planas, rugosas e irregulares, el espaciado que varía de 0,4-2,2 mm y el coeficiente de alteración o relleno de la junta se caracteriza con minerales de relleno en gran espesor, con roca triturada, desintegrada y arcilla, mientras que el factor de reducción de esfuerzos se caracteriza por zonas débiles aisladas con cobertura > 50 mm y como siempre el coeficiente de reducción por presencia de agua se caracteriza por excavaciones secas con presión de agua <1 l / min localmente.

Tramo Nº VI. Caliza muy alterada es la roca característica, rellenas de un material areno arcilloso con un color de blanco crema a blanco arena, se sitúa a una altitud de 245 m con latitud 20° 18' 23" y longitud 75° 53' 48", se extiende a 10 m. Presenta tres familias de juntas que son: para la primera familia 74°/150°, para la segunda 69°/172° y tercera 90°/54°. La rugosidad de las juntas se caracteriza por planas, rugosas e irregulares, el coeficiente de fricción o relleno de la junta se caracteriza con minerales de relleno en pequeño espesor, con minerales arcillosos blandos, mientras que el factor de reducción de esfuerzos se caracteriza por haber problemas tensionales en las rocas en roca competente de poca cobertura ($\frac{\sigma_c}{\sigma_1} = 200$) y el coeficiente de reducción por presencia de agua se caracteriza por excavaciones secas con presión de agua <1 l / min localmente.

IV.2.3 Análisis de las orientaciones de las grietas

Los elementos de yacencia se determinaron in situ, donde se realizaron 18 mediciones correspondientes a los seis tramos analizados, en el cual cada tramo se realizó tres mediciones, donde se midió el acimut y su ángulo de inclinación de las grietas. Para el procesamiento del agrietamiento se utilizó la proyección estereográfica de los elementos de yacencia con el uso del software Dips V.5. A continuación se muestra el diagrama de polos y rosetas del tramo Nº I. (Ver figura 4).



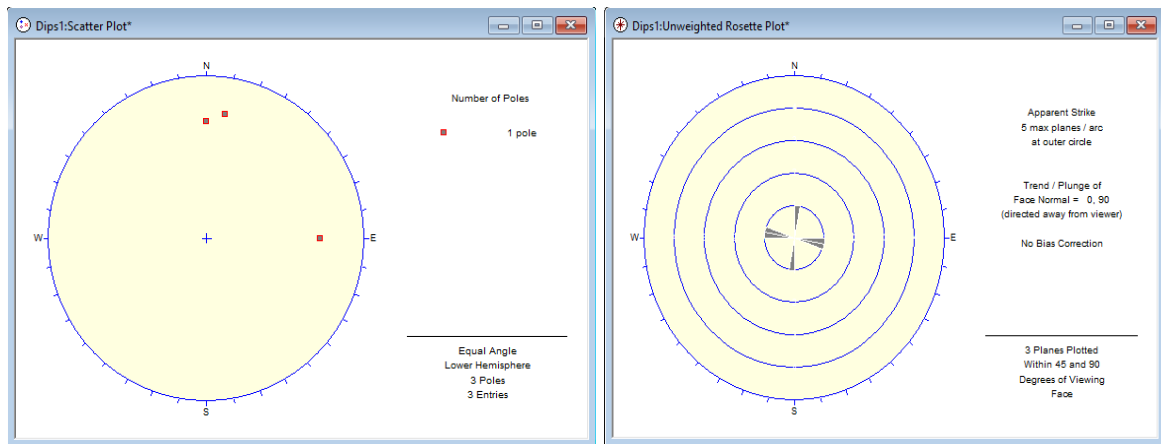


Figura 4. Diagrama de polos y rosetas del tramo N° I, Software Dips v.5

Para el Tramo N° I, como se observa en el diagrama de roseta (figura 4), las principales direcciones de agrietamientos y fallas del macizo, están orientados en las direcciones Noroeste.

A continuación, se representa los ángulos entre los planos de grietas del tramo N° I. (Ver figura 4.1)

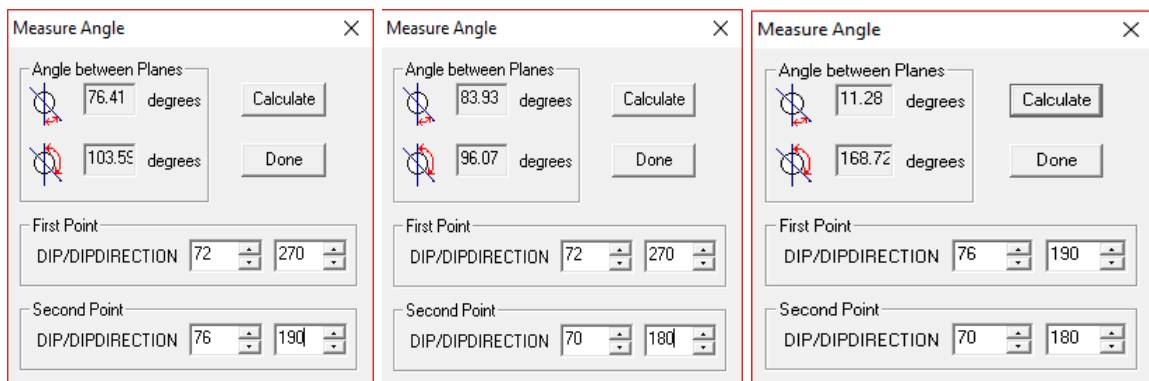


Figura 4.1. Ángulos entre planos de grietas del tramo N° I, Software Dips v.5.

Para la representación estereográfica de todos los tramos analizados, donde la dirección N55°E, es donde se concentra las mayores fracturaciones o roturas del macizo. (Ver Figura 1, del anexo IV).

IV.3 Evaluación de las características del macizo rocoso empleando las clasificaciones

IV.3.1 Resultados del índice RQD de (Deere, 1989)

Se calculó el índice RQD sin tener en cuenta la realización de perforaciones para la obtención de testigos de sondeos, sino que los resultados del índice RQD se obtuvo con una aproximación de la expresión dada por Palmstrom (1998), como se muestra en la siguiente tabla 4.

Tabla 4. Cálculo del índice RQD

Tramo I

$$\begin{aligned} RQD &= 115 - 3.3J_v \\ RQD &= 115 - 3.3 \times 7 \\ RQD &= 91.9\% \end{aligned}$$

Tramo II

$$\begin{aligned} RQD &= 115 - 3.3J_v \\ RQD &= 115 - 3.3 \times 8 \\ RQD &= 88.6\% \end{aligned}$$

Tramo III

$$\begin{aligned} RQD &= 115 - 3.3J_v \\ RQD &= 115 - 3.3 \times 5 \\ RQD &= 98.5\% \end{aligned}$$

Tramo IV

$$\begin{aligned} RQD &= 115 - 3.3J_v \\ RQD &= 115 - 3.3 \times 7 \\ RQD &= 91.9\% \end{aligned}$$

Tramo V

$$\begin{aligned} RQD &= 115 - 3.3J_v \\ RQD &= 115 - 3.3 \times 9 \\ RQD &= 85.3\% \end{aligned}$$

Tramo VI

$$\begin{aligned} RQD &= 115 - 3.3J_v \\ RQD &= 115 - 3.3 \times 6 \\ RQD &= 95.2\% \end{aligned}$$

A partir de los resultados del índice RQD se obtuvo la clasificación de la calidad de las rocas (Deere, 1968) según los tramos establecidos (Ver tabla 4.1)

Tabla 4.1. Resultados de cálculo del índice RQD.

Tramos	<i>RQD</i>	Calidad de la roca
I	91.9%	Excelente
II	88.6%	Buena
III	98.5%	Excelente
IV	91.9%	Excelente
V	85.3%	Buena
VI	95.2%	Excelente

IV.3.2 Resultados según el RMR de Bieniawski, (1989)

Los resultados para la evaluación del macizo rocoso según esta clasificación se tuvieron en cuenta los seis parámetros anteriormente mencionados, los mismos se encuentran en las tablas de 1 a 5 del anexo I.

En la tabla 4.2 se muestran los resultados de los parámetros valorados para la clasificación geomecánica RMR de Bieniawski, (1989).

Tabla 4.2. Resultados de RMR de Bieniawski.

Parámetros		Tramo I	Tramo II	Tramo III	Tramo IV	Tramo V	Tramo VI
1	Resistencia a la compresión simple(σ_c)	15	15	15	15	15	15
2	RQD %	20	17	20	20	17	20
3	Espaciado de discontinuidades	8	5	5	8	8	5
4	Estado de las discontinuidades	25	20	20	10	20	25
5	Presencia de agua	15	15	15	15	15	15
6	Orientaciones de las discontinuidades (para taludes)	-5	-5	-25	-5	-5	-25
RMR= (1) + (2) + (3) + (4) + (5) + (6)		78	67	50	63	70	55

Calidad del macizo rocoso en función de RMR

Se utilizó los criterios y los resultados determinados anteriormente y uso de los parámetros, (Ver tabla 6, Anexo I). A continuación, se muestran los resultados de valoración de la calidad del macizo rocoso según RMR de Bieniawski, (Ver tabla 4.3).

Tabla 4.3 Valoración de la calidad del macizo rocoso según Bieniawski.

Tramos	RMR	Calidad de la roca
I	78	Buena
II	67	Buena
III	50	Regular
IV	63	Buena
V	70	Buena
VI	55	Regular

IV.4.3 Resultados según Barton, (1974)

Los resultados de la clasificación Q de Barton, como se muestra en la tabla 4.4, se tuvieron en cuenta los seis parámetros anteriormente mencionados, los mismos se encuentran en la tabla 1 del anexo II.

Tabla 4.4. Cálculo de los tramos según Q Barton.

<u>Tramo I</u> $Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$ $Q = \frac{91.9\%}{9} \times \frac{3}{4} \times \frac{1}{5}$ $Q = 1.53$	<u>Tramo IV</u> $Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$ $Q = \frac{91.9\%}{9} \times \frac{3}{4} \times \frac{1}{2.5}$ $Q = 3.06$
<u>Tramo II</u> $Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$ $Q = \frac{88.6\%}{9} \times \frac{3}{2} \times \frac{1}{10}$ $Q = 1.48$	<u>Tramo V</u> $Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$ $Q = \frac{85.3\%}{9} \times \frac{3}{4} \times \frac{1}{2.5}$ $Q = 2.84$
<u>Tramo III</u> $Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$	<u>Tramo VI</u> $Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$

$$Q = \frac{98.5\%}{9} \times \frac{4}{1} \times \frac{1}{10}$$

$$Q = 4.37$$

$$Q = \frac{95.2\%}{9} \times \frac{3}{2} \times \frac{1}{2.5}$$

$$Q = 6.34$$

A continuación, en la tabla 4.5 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en el cálculo del índice RQD y de los métodos de clasificación elegidos.

Tabla 4.5. Resumen de los resultados de los cálculos geomecánicos.

Parámetros	Tramo I	Tramo II	Tramo III	Tramo IV	Tramo V	Tramo VI
RQD	91.9%	98.6%	98.5%	91.9%	85.3%	95.2%
Clasificación	Excelente	Buena	Excelente	Excelente	Buena	Excelente
Jn	12	9	9	12	15	9
Jr	1.5	3	4	3	1.5	1.5
Ja	12	2	1	12	12	8
Jw	1	1	1	1	1	1
SRF	15	10	10	10	2.5	2.5
Q	1.53	1.48	4.37	3.06	2.84	6.34
Clasificación	Roca mala	Roca mala	Roca media	Roca mala	Roca mala	Roca media
RMR	78	67	50	63	70	55
Clasificación	Buena	Buena	Regular	Buena	Buena	Regular

IV.4 Evaluación de los tamaños de bloques

Para la evaluación de la blocosidad se utilizó varios métodos, teniendo en cuenta las características y comportamiento estructural del macizo estudiado y otros

parámetros que caracterizan a las rocas. Para llevar a cabo este proceso, se utilizaron los métodos que más se adaptan a las condiciones reales del yacimiento, de los cuales sus resultados se analizan a continuación. Para determinar el tipo y la forma de los bloques, (Ver figura 4.5) y para determinar el volumen de los bloques a partir del número de grietas por m³, según Palmstrøm (1995). (ver tabla 4.13 a 4.14).

– **Volumen de los bloques a partir del tipo y forma de los bloques**

El método para clasificación del volumen de los bloques relacionado con el tamaño de la partícula (Método de Palmstrom) y se debe determinar el tipo y forma de los bloques teniendo en cuenta la distancia entre las grietas de cada familia. A continuación, se muestra la gráfica para la determinación del tipo y forma de los bloques a partir de la distancia entre las grietas.

– **Volumen del bloque a partir del número de grietas por m³**

El método para determinar el volumen del bloque a partir del número de grietas por m³, este se basa en la distancia de grietas de cada familia y el número de grietas aleatorias.

$$Jv = \sum \left(\frac{1}{Si} \right) + \frac{Nr}{5}$$

Donde:

$Si \rightarrow$ Distancia entre las grietas de cada familia.

$Nr \rightarrow$ Número de grietas aleatorias.

Conociendo los valores de Jv y utilizando la tabla 4.6, se puede determinar el tamaño de los bloques.

Tabla 4.6. Definición del tamaño de los bloques según el número de discontinuidades J_v de (Palmstrom, 1995).

Descripción	Número de grietas (J_v)
Bloques muy grandes	Menor de 1
Bloques grandes	1-3
Bloques medios	3-10
Bloques pequeños	10 - 30
Bloques muy pequeños	Mayor de 30

En la siguiente tabla 4.7 se muestra la distancia entre grietas de cada familia y numero de grietas aleatorias obtenidos a partir de la medición y observación in situ.

Tabla 4.7. Valores de S_i y N_r obtenidos.

Tramos	$S_i(cm)$	N_r
I	47	35
II	31	38
III	29	27
IV	28	36
V	20	44
VI	26	31

– **Volumen de los bloques mediante espacios entre grietas**

$$V_b = \frac{S_1 \times S_2 \times S_3}{\sqrt{1 - (\cos\alpha)^2 - (\cos\beta)^2 - (\cos\gamma)^2 - 2\cos\alpha \times \cos\beta \times \cos\gamma}}$$

Donde:

$S_1, S_2, S_3 \rightarrow$ Distancia entre grietas de cada familia.

$\alpha, \beta, \gamma \rightarrow$ Ángulo entre las familias de grietas.

Teniendo los valores de S_1, S_2 y S_3 se puede conformar los círculos de tensiones mediante el DIP y determinar los ángulos α, β, γ para obtener el tamaño de los

bloques. Conociendo el valor de V_b y utilizando la tabla 4.8, se puede determinar el tamaño de los bloques.

Tabla 4.8. Tamaño del bloque en dependencia del rango de variación del volumen del bloque según Palmstrom (1995).

Tamaño del bloque	Volumen del bloque, $V_b(m^3)$
Extremadamente pequeño	< 0.00001
Muy pequeño	0.00001 - 0.00002
Pequeño	0.00002 - 0.01
Medio	0.01 - 0.2
Grande	0.2 – 10
Muy grande	10 – 200
Extremadamente grande	> 200

Tabla 4.9. Cálculo de la cantidad de grietas por m^3 (J_v).

Tramo I

$$J_v = \sum \left(\frac{1}{Si} \right) + \frac{Nr}{5}$$

$$J_v = \frac{1}{47} + \frac{35}{5}$$

$$J_v = 7.02 \approx 7 \text{ grietas}/m^3$$

Tramo II

$$J_v = \sum \left(\frac{1}{Si} \right) + \frac{Nr}{5}$$

$$J_v = \frac{1}{31} + \frac{38}{5}$$

$$J_v = 7.63 \approx 8 \text{ grietas}/m^3$$

Tramo III

$$J_v = \sum \left(\frac{1}{Si} \right) + \frac{Nr}{5}$$

$$J_v = \frac{1}{29} + \frac{27}{5}$$

$$J_v = 5.43 \approx 5 \text{ grietas}/m^3$$

Tramo IV

$$J_v = \sum \left(\frac{1}{Si} \right) + \frac{Nr}{5}$$

$$J_v = \frac{1}{28} + \frac{36}{5}$$

$$J_v = 7.23 \approx 7 \text{ grietas}/m^3$$

Tramo V

$$J_v = \sum \left(\frac{1}{Si} \right) + \frac{Nr}{5}$$

$$J_v = \frac{1}{20} + \frac{44}{5}$$

$$J_v = 8.85 \approx 9 \text{ grietas}/m^3$$

Tramo VI

$$J_v = \sum \left(\frac{1}{Si} \right) + \frac{Nr}{5}$$

$$J_v = \frac{1}{26} + \frac{31}{5}$$

$$J_v = 6.23 \approx 6 \text{ grietas}/m^3$$

Tabla 4.10. Tamaño de los bloques según J_v según, (Palmstrøm 1995).

Tramos	J_v (<i>grietas/m³</i>)	Descripción
I	7	Bloques de tamaño medio
II	8	Bloques de tamaño medio
III	5	Bloques de tamaño medio
IV	7	Bloques de tamaño medio
V	9	Bloques de tamaño medio
VI	6	Bloques de tamaño medio

Resultados del método para determinar el volumen del bloque mediante espacios entre grietas, (Ver tabla 3.14)

El volumen de bloque mediante espacios entre grietas se basó en los resultados determinados en campo de las distancias entre grietas de cada familia (ver tabla 4.11).

Tabla 4.11. Distancias entre grietas de cada familia, (mapeo geomecánico).

Tramos	Espaciado entre grietas de cada familia		
	S_1	S_2	S_3
I	0.7	2.1	0.42
II	1.3	0.8	0.37
III	0.7	1.0	0.46
IV	0.64	0.7	0.9
V	0.5	0.45	2.2
VI	1.6	0.4	0.48

Los ángulos entre planos de discontinuidades y los resultados obtenidos se muestran a continuación, (Ver tabla 4.12 y 4.13 respectivamente).

Tabla 4.12. Ángulos entre planos de discontinuidades, (Dips v5).

Tramos	Ángulos		
	α	β	γ
I	76.41°	83.93°	11.28°
II	58.49°	30.27°	81.59°
III	78.36°	39.64°	59.48°
IV	12.02°	89.82°	83.80°
V	85.73°	67.92°	86.72°
VI	58.82°	85.41°	37.73°

Tabla 4.13. Resultados de volumen de los bloques; (V_b). Palmstrøm (1995).

TRAMOS	$V_b (m^3)$	TAMAÑO DEL BLOQUE
I	0,66	grande
II	2,13	grande
III	3,55	grande
IV	1,82	grande
V	0,53	grande
VI	0,32	grande

CONCLUSIONES

1. Se realizó una evaluación de las características ingeniero geológicas del yacimiento, conjuntamente con el análisis de las propiedades físico-mecánicas de las rocas y el comportamiento mecánico – estructural del macizo, a partir del cual se evaluó la blocosidad y empleando varios métodos, se obtuvo que los bloques son tamaño es medio, con un volumen que esta entre 0,32 a 3,55 m³.
2. Teniendo en cuenta el análisis de los métodos de clasificaciones geomecánicas y el comportamiento del macizo estudiado, se eligió el RMR de Bieniawski y la Q de Barton, como las clasificaciones que mejor se adaptan a este, a partir de sus resultados y utilizando la observación de campo, el macizo se clasifica de regular, definiendo que este se comporta como un macizo medianamente estable.

RECOMENDACIONES

Continuar las investigaciones mediante el estudio de otros indicadores y evaluar las características geomecánicas del macizo rocoso con el empleo de otros criterios geomecánicos, que permitan evaluar con mejor exactitud el comportamiento del macizo rocoso en el yacimiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. Barton. (1974). *A review of the shear strength of filled discontinuities in rock*. Brooch.
2. Barton. (1974). *Engineering clasification of rock masses for the design of tunnel support*. *Rock Mechanics*,.
3. Bieniawski, Z. (1978). *Determining rock mass deformability experience from case history*. *International Journal of Rock Mechanic Geomechanics Abstracts*. Vol 15, No.15.
4. Bieniawski, Z. (1989). *Engineering Classification of Jointed Rock Masses*. *Trans South African Instute of Civil Engineer*.
5. Blanco, R. (1981). *Mecánica de Rocas*. Santiago de Cuba: Oriente.
6. Blanco, R. (2013). *Curso de graduación: Diseño y construcción de obras de minería. Catedra: Propiedades de las rocas y del macizo*. Cuenca, Ecuador: Escuela de Ingeniería.
7. Cartaya, M. (2001). *Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental del país*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Holguín: ISMMM.
8. Cornier, L. (2017). *Prospección geofísica a través del método de tomografía eléctrica en el yacimiento Calizas Mogotes de San Nicolás*. Mella, Santiago de Cuba.

9. Cosella. (2009). *Analice del macizo rocoso del túnel II del trasvase Sabanalar-Pozo Azul*. Moa, Holguín: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Mo, Trabajo de diploma.
10. Cuesta, A. (2010). *Caracterización de los factores que influyen en los procesos de infiltración y filtración de agua por los macizos rocosos poco porosos y agrietados en el interior de las excavaciones subterráneas*. Instituto Superior Minero Metalúrgico , Moa, Holguín.
11. Deere, D. (1989). *Rock Quality Designation (RQD) after Twenty Years*. U.S. . Army Corps of Engineers Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS.
12. Hechevarría, S. (2017). *Informe geológico para la elevación de categoría de recursos indicados a medidos del área correspondiente a la zona sur del yacimiento de Caliza Mogote San Nicolás*. (UEB) Producciones mineras (Palmarito de Cauto), Mella, Santiago de Cuba.
13. Legrá, A. (2014). *Elementos teóricos y prácticos de la investigación científico-tecnológica* (Edición 0,982 para Revisión ed.). La Habana, Cuba.
14. Medieta, V. G. (2013). *Evaluación geomecánica del macizo rocoso en la cantera de materiales de construcción "Las Victorias"*. Trabajo de Diploma, Universidad de Cuenca, Ecuador.
15. Noa, R. (2013). *Indicaciones metodológicas para la elección del método de arranque de las rocas durante el laboreo de excavaciones*

subterráneas horizontales de pequeña y mediana sección en Cuba oriental. Moa, Holguín: Instituto Superior Minero Metalúrgico.

16. Ojeda, S. (2012). *Proyecto de explotación minera del yacimiento de caliza Mogote San Nicolás.* Geominera Oriente, Santiago de Cuba.
Retrieved from oreyes@geominera.co.cu
17. Olaya, C. (2013). *Clasificación geomecánica utilizando el método RMR en el Cerro la Potra del proyecto hidroeléctrico bajo frío.* Trabajo de Diploma, Instituto Tecnológico de Costa Rica (Escuela de Ingeniería en Construcción), República de Panamá.
18. Oluwayesi, A. (2017). *Criterios para la evaluación del comportamiento mecánico-estructural del macizo rocoso con el empleo de la modelación numérica.* Tesis doctoral, Instituto Superior Minero Metalúrgico , Moa, Holguín.
19. Palmstrom. (1995). *Measurement and characterization of rock mass jointing. In-Situ Characterization of Rocks.* Ed: V. M. Sharma & K. 1L Saxena, Balkema, Lisse, 49-98. .
20. Palmstrom, A. (1998). *Caracterización de macizos rocosos mediante el RMI y sus aplicaciones en Mecánica de Rocas.* Madrid: Carlos López Jimeno.
21. Perri, G. (1996). *Caracterización geomecánica de macizos rocosos para el proyecto de túneles. Distribución probabilística.* XIV Seminario

venezolano de Geotecnia y Boletín de la sociedad venezolana de Geotecnia, N.73. Retrieved from WWW.Vdocuments.mx

22. Ramirez, Y. (2004). *Manual de geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caídas de rocas en minería subterránea. Manual I, (Conociendo a la Roca)*. Lima, Perú: La sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía .
23. Rodríguez, D. (2019). *Informe de rendición de cuentas al comité de prevención y control*. UEB Geominera Oriente, Mella, Palmarito de Cauto, Santiago de Cuba.
24. Rouco, I. (2015). *Proceso de construcción de los túneles del trasvase Este-Oeste, Túnel Levisa Mayarí, Tramo IV*. Moa, Holguín.
25. Ruiz, M. R. (2001). *Análisis de la clasificación geomecánica Romana SMR*. Universidad Politécnica de Valencia, Ingeniería del Terrero, España.
26. Terrero, A. (2018). *Evaluación de la estabilidad del túnel Levisa-Mayarí, conexión III-IV, Tramo V y propuesta de sostenimiento*. Trabajo de Diploma, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Minas, Moa, Holguín.
27. Terzaghi, K. (1946). *Rock Defects and Loads on Tunnel Supports. Rock Tunneling with Steel Supports*. Youngstown: R. V. Proctor and T. L. White.

ANEXOS

ANEXO I

Parámetros de la clasificación geomecánica RMR Bieniawski

Tabla 1. Clasificación Geomecánica de Bieniawski.

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Mediana	Mala	Muy mala
RMR	81-100	61-80	41-60	21-40	0-20
Tiempo de estabilidad y longitud de vano	20 años 15 metros	1 año 10 metros	1 semana 5 metros	10 horas 25 metros	30 minutos 1 metro
Cohesión (MPa).	> 0,4	0,3-0,4	0,2-0,3	0,1-0,2	< 0,1
Rozamiento	> 45°	35-45°	25-35°	15-25°	< 15°

Tabla 2. Valoración de los parámetros de cálculo de RMR de Bieniawski.

Resistencia de las rocas sana (MPa)	Ensayo de la capa puntual	>10	4-10	2-4	1-2	-
	Compresión simple	>250	100-250	50-100	25-50	5-25 1-5 <1
Valoración		15	12	7	4	2-1-0
RQD %		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25
Valoración		20	17	13	8	3
Separación Discontinuidades		>2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	6-20 m	< 6 m
Valoración		20	15	10	8	5
Estado de diaclasas		Muy rugosas discontinuas y borde sano y duro	Ligeramente rugosas e < 1 mm borde duro	Ligeramente rugosas e < 1 mm borde blando	Rellenos e <5 mm abiertas y continuas	Rellenos blandos e <5 mm y continuas
Valoración		30	25	20	10	0
Presencia de agua	Caudal en 10m túnel	Nulo	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min.	>125 l/min
	$\sigma W / \sigma_3$	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
	Estado	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo
Valoración		15	10	7	4	0

Tabla 3. Valoración del estado de las discontinuidades según Bieniawski.

Parámetros	Valoración				
Longitud de la discontinuidad (Persistencia).	< 1m	1-3	3-10m	10-20m	> 20m
	6	4	2	1	0
Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1-1.0mm	1-5mm	> 5mm
	6	5	3	1	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave
	6	5	3	1	0
Relleno	Ninguno	Duro	Duro	Blando	Blando
	6	4	2	2	0
Alteración	Inalterado	Ligera	Moderada	Muy alterado	Descompuesto
	6	5	3	1	0

Tabla 4. Orientación de las discontinuidades según Bieniawski.

Dirección Perpendicular al eje del Túnel.				Dirección Paralela al eje del Túnel. (Buzamiento)		Cualquier Dirección. (Buzamiento)
Excavación a favor de Buzamiento		Excavación a favor de Buzamiento				
45°-90°	20°-45°	45°-20°	20°-45°	45°-90°	20°-45°	0°-20°
Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Medio	Muy Desfavorable	Desfavorable

Tabla 5. Corrección por orientación de las discontinuidades según Bieniawski.

Dirección de Buzamiento		Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy Desfavorable
Valoración para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabla 6. Clases de macizos rocosos según RMR de Bieniawski.

Clase de macizos rocosos	Descripción	RMR
I	Macizo rocoso de excelente calidad	81-100
II	Macizo rocoso de buena calidad	61-80
III	Macizo rocoso de calidad regular	41-60
IV	Macizo rocoso de mala calidad	21-40
V	Macizo rocoso de muy mala calidad	0-21

ANEXO II

Parámetros de cálculo del sistema Q de Barton

Tabla 1. Definición de los parámetros del índice Q de calidad de la roca.

<i>RQD</i>	Índice de fracturación.	Medida del tamaño de bloque
<i>J_n</i>	Índice de diaclasado.	
<i>J_r</i>	Índice de rugosidad de la discontinuidad.	Medida del ángulo de fricción entre bloques
<i>J_a</i>	Índice de alteración o relleno de la discontinuidad. fricción	
<i>J_w</i>	Factor de reducción por la presencia de agua o filtraciones a través de las discontinuidades.	Medida de las tensiones efectivas
<i>SRF</i>	Factor representativo de las condiciones tensionales de la roca. Medida	

Tabla 2. Jn

Jn Número de Familias	Valor
✓ Masivo sin o con pocas juntas	0,5-1
✓ Una familia de juntas	2
✓ Una familia y algunas juntas ocasionales	3
✓ Dos familias de juntas	4
✓ Dos familias y algunas juntas	6
✓ Tres familias de juntas	9
✓ Tres familias y algunas juntas	12
✓ Cuatro familias o más, roca muy fracturada	15
✓ Roca triturada terrosa	20

Tabla 3. Jr

Jr numero de rugosidad de las juntas	Valor
Juntas (contacto entre las caras)	
✓ Discontinuas	4
✓ Onduladas, rugosas	3
✓ Onduladas, lisas	2
✓ Onduladas, perfectamente lisas	1,5
✓ Planas, rugosas e irregulares	1,5
✓ Planas lisas	1
✓ Planas y perfectamente lisas	0,5
Juntas rellenas (relleno impide contacto entre dos caras)	
✓ Material arcilloso	1
✓ Material arenoso, de grava o triturado	1

Tabla 4. Ja

Ja Coeficiente de alteración o relleno de la junta (discontinuidad)	Valor
Juntas (sin minerales de relleno intermedio)	
✓ Juntas de paredes sanas	0,75-1
✓ Ligeras alteraciones	2
✓ Alteraciones arcillosas	4

Juntas (minerales de rellenos en pequeño espesor)	
✓ Con partículas arenosas	4
✓ Con minerales arcillosos no blandos	6
✓ Con minerales arcillosos blandos	8
✓ Con minerales arcillosos expansivos	8-12
Juntas (minerales de relleno en gran espesor)	
✓ Con roca triturada/desintegrada y arcilla	6-12
✓ Con zona de arcilla limosa o arenosa	5
✓ Con zonas arcillosos (espesor grueso)	10-20

Tabla 5. Jw

Jw coeficiente reductor por la presencia de agua	Valor	Presión de agua (kg/cm²)
✓ Excavaciones secas con <5l/ min localmente	1	<1
✓ Afluencia media con lavada de algunas juntas	0,66	1-2,5
✓ Afluencia importante por juntas limpias	0,5	2,5-10
✓ Afluencia importante con lavado de juntas	0,33	2,5-10
✓ Afluencia excepcional inicial, decreciente con el tiempo	0,2-0,1	>10
✓ Afluencia excepcional inicial mantenida	0,1-0,05	>10

Tabla 6. SRF

SRF factor de reducción de esfuerzos	Valor
Zonas débiles que interceptan a la excavación	
✓ Multitudes de zonas débiles o milonitos	10
✓ Zonas débiles aisladas, con arcilla o rocas descompuesta (cobertura ≤ 50 m)	15
✓ Zonas débiles aisladas con cobertura > 50 mm	2,5
✓ Abundantes zonas débiles en rocas competentes	7,5
✓ Zonas débiles aisladas en roca competente (cobertura ≤ 50 m)	5
✓ Zonas débiles aisladas con cobertura > 50 mm	2,5
Roca competente (Problemas tensionales en las rocas)	

✓ Pequeña cobertura ($\frac{\sigma_c}{\sigma_1} = 200$)	2,5
✓ Cobertura media ($200 > \frac{\sigma_c}{\sigma_1} > 10$)	1 0,5-2
✓ Gran cobertura ($10 > \frac{\sigma_c}{\sigma_1} > 5$)	
Rocas deformables (flujo plástico de las rocas)	
✓ Con baja presiones	5-10
✓ Con altas presiones	10-20
Rocas expansivas	
✓ Con presión de hinchamiento moderado	5-10
✓ Con presión de hinchamiento alta	10-20

Tabla 7. Rango de variación de los parámetros

<i>RQD</i>	0-100
<i>J_n</i>	0.5-20
<i>J_r</i>	0.5-4
<i>J_a</i>	0.75-20
<i>J_w</i>	0.05-1
<i>SRF</i>	0.5-20

Tabla 8. Clasificación de las rocas según la Q de Barton (1974).

Q	Clasificación
Entre 0,001 y 0,01	Roca excepcionalmente mala
Entre 0,01 y 0,1	Roca extremadamente mala
Entre 0,1 y 1	Roca muy mala
Entre 1 y 4	Roca mala
Entre 4 y 10	Roca media
Entre 10 y 40	Roca buena
Entre 40 y 100	Roca muy buena
Entre 100 y 400	Roca extremadamente buena
Entre 400 y 1000	Roca excepcionalmente buena

ANEXO III

Tabla 1. Definición del tamaño de los bloques según el número de discontinuidades J_v según Palmstrøm, (1998).

Descripción	J_v (discontinuidades / m^3)
Bloques muy grandes.	Una o ninguna
Bloques grandes.	1-3
Bloques de tamaño medio	3-10
Bloques pequeños	10-30
Bloques muy pequeños	Más de 30

Tabla 2. Volumen de bloque por tamaño de partícula, Palmstrøm, (1995).

Densidad de las grietas	Tamaño del bloque	Volumen del bloque	Partículas del suelo	Volumen de la partícula
Extremadamente alta	Extremadamente pequeño	Menor de 10 cm^3	Arena gruesa	$0,1 - 5\text{ mm}^3$
Muy alta	Muy pequeño	$10 - 200\text{ cm}^3$	Gravas finas	$5 - 100\text{ mm}^3$
Alta	Pequeño	$0,2 - 10\text{ dm}^3$	Gravas medias	$0,1 - 5\text{ cm}^3$
Moderada	Medio	$10 - 200\text{ dm}^3$	Gravas gruesas	$5 - 100\text{ cm}^3$
Baja	Grande	$0,2 - 10\text{ m}^3$	Canto rodado	$0,1 - 5\text{ dm}^3$
Muy baja	Muy grande	$10 - 200\text{ m}^3$	Fragmento de gran tamaño	$5 - 100\text{ dm}^3$
Extremadamente baja	Extremadamente alta	Mayor de 200 m^3	Bloques	Mayor de $0,1\text{ m}^3$

ANEXO IV

Representación estereográfica de los planos de grietas en el macizo rocoso del yacimiento de caliza Mogote San Nicolás, para los seis tramos analizados.

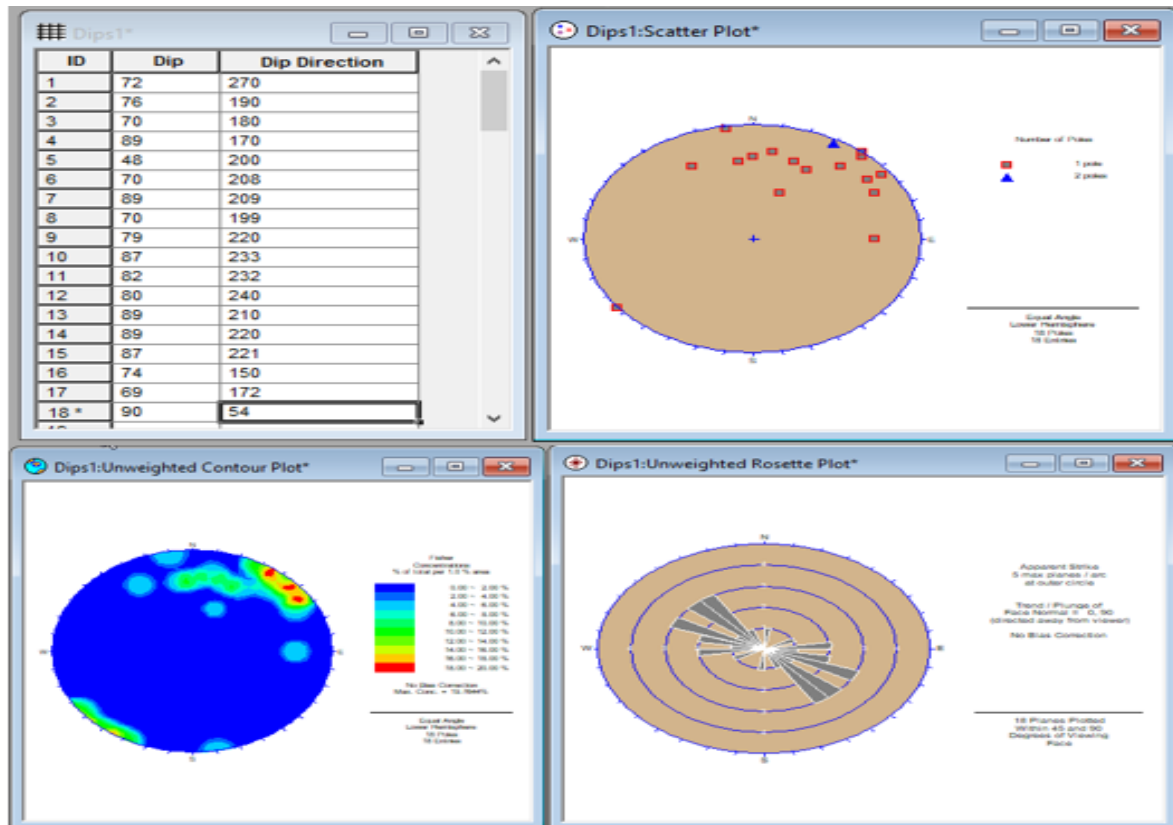


Figura 1. Representación estereográfica de los planos de grietas

ANEXO IV



Figura 2. Estudio y mapeo geomecánico in situ, (foto y montaje del autor).



Figura 3. Panorámica del yacimiento “Mogote San Nicolás” (foto del autor).

