

Especialidad - Minas

Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero en Minas

Tema: Evaluación de estabilidad de los taludes en la Corta este, Yacimiento Castellanos; Pinar del Rio.

Autor: Yulian Miguel Alemany Driggs

Curso: 2018-2019

“Año 61 de la Revolución”

Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero en Minas

Tema: Evaluación de estabilidad de los taludes en la Corta este, Yacimiento Castellanos; Pinar del Rio.

Autor: Yulian Miguel Alemany Driggs

Tutor: Dr.C. Rafael Rolando Noa Monjes

Curso: 2018-2019

“Año 61 de la Revolución”

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Yulian Miguel Alemany Driggs

Autor de este Trabajo de Diploma y el tutor Dr.C. Rafael Rolando Noa Monjes certificamos la propiedad intelectual a favor de la Universidad de Moa hacer uso del mismo en la finalidad que estime conveniente.

Diplomante

Yulian Miguel Alemany Driggs

Tutor

Dr.C. Rafael Rolando Noa Monjes

DEDICATORIA

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

✓ *A mi madre, por ser tan especial en mi vida, por haberme brindado su apoyo incondicional, su amor y cariño, por darme las fuerzas e inspirarme para que hoy logre mis sueños, y por soportar los malos y disfrutar todo momento bueno de mi vida.*

✓ *A mi tía Nora por ser como mi madre y mi abuela, por cuidarme cuando más lo necesite y por consentir mis malacrianzas, por ser incondicional conmigo.*

✓ *A mi tía Iraelia por tanto apoyo y consejos para tomar buenas decisiones y ser mejor hombre cada día.*

✓ *A mi padre por su ayuda y apoyo.*

✓ *A mis hermanos Julian Alemany Rojas y Noralgis Edita Alemany Driggs, porque aunque no estén en vida conmigo son inspiración para dar lo mejor de mí.*

✓ *A mis hermanos Miguel y Maikel por todo su apoyo.*

✓ *A Ana Iris Blanco Ochandarena y a toda su familia que tanto me han ayudado desde el primer día que llegue a Moa.*

✓ *Carmen Mestre Mestre y a Beatriz Pedroso Mestre por tanto apoyo, ayuda y buenos consejos.*

✓ *Nayalis Almaguer Gonzales por escucharme y darme ánimos y soportarme de manera especial y única.*

✓ *A Héctor Esparraguera por toda su ayuda en el desarrollo como estudiante.*

- ✓ *A todos mis enemigos que tanto me criticaron y trataron de derrumbarme para que no llegara a donde hoy.*
- ✓ *A todos muchas gracias...*

AGRADECIMIENTOS

- ✓ *Agradezco a mi mama, a mi tía Nora e Iraelia, a mi padre, mis hermanos por todo el sacrificio y dedicación para que yo este acá y pueda llegar a la meta final.*
- ✓ *A Ana Iris Blanco Ochandarena y a toda la familia que tanto me ha ayudado de manera incondicional.*
- ✓ *Carmen Mestre Mestre y a Beatriz Pedroso Mestre por estar ahí cuando más lo he necesitado.*
- ✓ *Deseo expresar mi agradecimiento a mi tutor Dr. Rafael Noa Monje por la guía y sugerencias útiles, durante ese tiempo que supieron intercambiar sus vastos conocimientos y a lo largo de toda la carrera.*
- ✓ *Considero imprescindible expresar mis agradecimientos por haberme brindado sus sabios conocimientos a Dr. Julio Montero Martos, Msc. Yurisley Valdez, Msc. Ana Caridad Che Viera y toda la plana docente de la facultad de Geología y Minas y del ISMM en general.*
- ✓ *Nayalis Almaguer Gonzales por ser motivo de inspiración a ser mejor profesional*
- ✓ *A Héctor Esparraguera por ser más que profesor un gran amigo.*
- ✓ *A todos mis amigos, en especial a Carlos Matos, Alvaro, Javier, Ivancini, Indira, Adams, Inocencio, Leober, Cuenca y todos los demás compañeros de aula y de universidad que me dieron apollo para ser mejor.*

PENSAMIENTO

“Nunca es tarde para hacer algo diferente, nunca es tarde para ir un poco más allá; porque siempre queremos más de lo que tenemos y lo que nos pertenece está en otro lugar.”

YMAD

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es la evaluación de la estabilidad de los taludes en la corta este yacimiento Castellanos, Pinar del Río, en el mismo se realiza un análisis de las características ingeniero-geológicas y la evaluación del comportamiento mecánico estructural del macizo, para la evaluación de la calidad de la roca se utilizan cinco clasificaciones geomecánicas de las existentes: la clasificación de Deere, basada en el índice de calidad del macizo (RQD); la clasificación de Bieniawski, basada en el (RMR); la clasificación de Barton, basada en el índice (Q); la clasificación de Romana, basada en el índice SMR, y la clasificación de Hoek y Marinos, basada en el índice GSI; todas ellas nos dan criterios sobre la calidad del macizo objeto de estudio. Se emplean los métodos que más se adaptan a las características del yacimiento para evaluar la estabilidad de los taludes y se emplean tres softwares Dips, RocPlane y Swedge para un resultado final de estabilidad.

ABSTRACT

The main objective of this work is the evaluation of the stability of the slopes in the Castellanos, Pinar del Rio reservoir, in which an analysis of the engineer-geological characteristics and the evaluation of the structural mechanical behavior of the massif is carried out. The evaluation of the quality of the rock uses five geomechanical classifications of the existing ones: the Deere classification, based on the quality index of the massif (RQD); the classification of Bieniawski, based on the (RMR); the Barton classification, based on the index (Q); the Romana classification, based on the SMR index, and the Hoek and Marinos classification, based on the GSI index; all of them give us criteria for the quality of the mass under study. The methods that best adapt to the characteristics of the deposit are used to evaluate the stability of the slopes and three Dips, RocPlane and Swedge softwares are used for a final stability result.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	14
CAPITULO I. ESTADO ACTUAL DE LA TEMATICA	21
1.1 Introducción.....	21
1.2 Marco teórico conceptual	22
1.3 Estado actual de la temática en el mundo	23
1.4 Situación actual de la temática en Cuba	27
CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO	31
2.1. Introducción.....	31
2.2. Ubicación geográfica del yacimiento	31
2.3. Condiciones meteorológicas de la zona.....	32
2.4. Geología regional	32
2.5. Geología del yacimiento.....	34
2.6. Hidrogeología.....	34
2.7. Litología.....	38
2.8. Tectónica.....	40
2.9. Propiedades físico- mecánica de las rocas	41
2.10. Materiales y métodos utilizados	43
CAPITULO III. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICO- ESTRUCTURALES DEL YACIMIENTO CASTELLANOS.....	44
3.1 Introducción.....	44
3.2. Características estructurales del macizo rocoso	44
3.2.1. Espaciado	45
3.2.2. Continuidad	47
3.2.3. Rugosidad	48
3.2.4. Abertura	49
3.2.5. Relleno	50
3.2.6. La Meteorización y la Alteración	51

3.2.7. Estado de las estructuras	52
3.2.8. Filtraciones	53
3.2.9. Orientación de las discontinuidades	54
3.3. Análisis de las clasificaciones geomecánicas	57
3.3.1. Clasificación geomecánica (RQD) Deere (1967)	57
3.3.2. Clasificación geomecánica (RMR) Bieniawski (1989)	59
3.3.3. Clasificación geomecánica (MRMR) Laubscher (2000)	60
3.3.4. Clasificación geomecánica (Q) Barton (1974)	61
3.3.5. Clasificación según GSI	63
3.3.6. Clasificación geomecánica (SMR) Romano (1988)	64
3.4. Determinación de la estabilidad con el empleo de softwares	68
CONCLUSIONES	73
RECOMENDACIONES	74
BIBLIOGRAFIA	75
ANEXOS	79

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Coordenadas geográficas del yacimiento	32
Tabla 2 Propiedades físico-mecánicas de las rocas.	42
Tabla 3 Descripción del espaciado por el ISRM	46

Tabla 4 Descripción de la continuidad ISRM	47
Tabla 5 Rugosidad grado de valoración.....	48
Tabla 6 Valoración de la abertura según ISRM	50
Tabla 7 Tipos de relleno.....	51
Tabla 8 Grado de meteorización en tramos de sondajes de diamantina	52
Tabla 9 Estado de las diaclasas.....	53
Tabla 10 Aguas Subterráneas.....	53
Tabla 11 Relación entre el RQD y la calidad de la roca.....	59
Tabla 12 Calidad del macizo rocoso en función a RMR.....	60
Tabla 13 Clasificación de la calidad del macizo según MRMR	60
Tabla 14 Calidad del macizo rocoso mediante el cálculo de Q.....	63
Tabla 15. Clasificación según GSI de la calidad del macizo	63
Tabla 16 Factores de ajuste para el SMR.....	65
Tabla 17 Estabilidad de talud según SMR	65
Tabla 18 Resultados de la evaluación del macizo rocoso.....	67
Tabla 19 Parámetros geomecánicos del Macizo Rcoso	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Flujo grama de trabajo	19
Figura 2 Partes constructivas de un talud, a) artificial (cortes y terraplenes) y b) natural	22
Figura 3 Ubicación geográfica del yacimiento.....	31
Figura 4 Geología general del área de Pinar del Río, Cuba Occidental.....	33
Figura 5 Tectónica del yacimiento.....	41
Figura 6 Espaciamiento de la discontinuidad	45
Figura 7 Persistencia de las discontinuidades en el yacimiento.....	47
Figura 8 Grado de rugosidad de las discontinuidades	48
Figura 9 Apertura de las discontinuidades	49
Figura 10 Brecha de falla	51
Figura 11 Presentación estereográfica de las familias 1 y 2, talud 1	55
Figura 12 Diagrama de planos principales de estructuras mayores y menores en el talud 1.....	55
Figura 13 Presentación estereográfica de la familia 1, talud 2.....	56
Figura 14 Diagrama de planos principales de estructuras mayores y menores en el talud 2.....	57
Figura 15 Rotura tipo cuña.....	57
Figura 16 Esquema para la determinación del MRMR (Tomada de Laubscher (2000)).....	61
Figura 17 Uso de métodos de clasificación según tipo de minería.	67
Figura 18 Análisis de estabilidad talud 1 condiciones no drenadas	69
Figura 19 Análisis de estabilidad talud 1 condiciones drenadas	69

Figura 20 Análisis de estabilidad talud 2 condiciones no drenadas	70
Figura 21 Análisis de estabilidad talud 2 condiciones drenadas	70
Figura 22 Análisis de estabilidad talud 2 condiciones no drenadas	71
Figura 23 Análisis de estabilidad talud 2 condiciones drenadas	72

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las tecnologías ha provocado que todos estemos conectados desde cualquier parte del mundo, esto ha traído consigo la diversidad de pensamiento, partiendo en muchos casos de la democratización del conocimiento, abaratamiento de tecnologías y el manejo de información.

Cada día las tecnologías hacen y todo va en pos de mejorar, por lo que nos enfocamos los mineros en nuestro caso particular; entre otras cosas en hacer una adecuada clasificación geomecánica, para pronosticar el comportamiento de los materiales frente a la construcción de estructuras y recomendar alternativas de sostenimiento y excavación; todo lo cual ha permitido contar con clasificaciones tales como: GSI de Hoek y Brown (1997) y Marinos and Hoek (2000), RQD de Deere (1967), Q de Barton (1974), RMR de Bieniawski (1979, 1983; 1989), SMR de Romana (1981, 1985, 1988, 1991, 1994, 1995, 1997), SRC de González de Vallejo et al., (2002), RSR de Wickham et al., (1972) que basados en diferentes propiedades de las rocas y del macizo, han determinado la influencia de cada una en la calidad del macizo rocoso y por ende su posterior comportamiento frente a las estructuras que se quieren construir.

Internacionalmente el desarrollo abre grandes posibilidades al estudio del macizo rocoso, esta realidad se proyecta hacia el futuro como una tendencia que apunta hacia mejoras en los rendimientos y en la seguridad de los trabajos. En este sentido la geomecánica como ciencia no está ajena a este proceso y es evidente que las empresas de mayores inversiones y en situaciones casi obligadas, priorizan los estudios de geomecánica en sus operaciones. Ejemplo de ello es la creación de softwares que permiten facilitar los análisis para la estabilidad de una mina subterránea o cantera u otro trabajo que necesite de estudios geomecánicos los cual permite demostrar lo rentable que podría ser en el tiempo la inversión para garantizar la estabilidad del macizo rocoso y de las operaciones mineras. Estos mediante las propiedades de las rocas y el macizo realizan los cálculos para la estabilidad según métodos ya implementados manualmente.

En el estudio de la estabilidad de taludes se abordan fenómenos de estado último o de rotura de masas de suelo. El agente externo responsable de la inestabilidad es una fuerza de masa: el peso y eventualmente los efectos de filtración a los que debe añadirse, generalmente como factor secundario, posibles cargas externas. La preponderancia de las acciones gravitatorias condiciona, sobre todo, la definición de seguridad frente a rotura (Bruce J.1987). La propuesta de un factor de seguridad como cociente entre carga de rotura y carga de servicio, parece una elección razonable para medir cuantitativamente el riesgo de rotura en el talud. Sin embargo, en el caso de la estabilidad ligada a fuerzas de masa tiene quizá poco sentido el cálculo de la “fuerza de masa en rotura”. Existen por supuesto, alternativas, pero conviene apuntar que la cuantificación de la seguridad de taludes frente a rotura es un problema difícil, con abundantes ambigüedades y lejos aún de alcanzar, en la práctica, un status satisfactorio (Cornforth D. 2005).

En ausencia de intervención humana, la frecuencia e importancia de los deslizamientos del terreno suele ir ligada a zonas de relieve montañoso, a la intensidad y duración de precipitaciones y efectos asociados a estas: erosión en cauces y a ciertas formaciones litológicas especialmente sensibles a los movimientos. Como ejemplo, muchas laderas disponen sin duda de un escaso margen de seguridad frente a movimientos, margen que se agotará preferentemente con ocasión de un fenómeno hidrológico extraordinario a consecuencia de la acción simultánea de una erosión de pie y una elevación generalizada de niveles piezométricos (Lavista M & Fernández P. 2013). Por otra parte, áreas de relieve más suave, presentan fenómenos generalizados de deslizamiento asociados a la facies garumnense. Las técnicas de reconocimiento geológico-geomorfológico son en estos casos de gran ayuda para identificar zonas movidas y para estimar cuantitativamente los riesgos de deslizamiento. La determinación cuantitativa de índices de riesgo o seguridad exige sin embargo el empleo de técnicas y modelos propios de la Mecánica del Suelo o de las Rocas.

Tradicionalmente el análisis de la estabilidad de taludes se ha empleado por los ingenieros a la largo de la historia para que los mismos se puedan construir de

manera estable y segura, evitando las fallas por deslizamientos, vuelco, desprendimientos, etc. El problema de la estabilidad de taludes puede ser abordado desde distintos aspectos. Cuando se habla de estabilidad, se trata de encontrar la altura crítica del talud o la carga de colapso aplicada sobre una porción del talud, para una geometría y características de suelo dados. Evaluar la estabilidad de un talud implica un estudio en el cual se debe, entre otros eventos: caracterizar la resistencia del suelo, establecer el perfil del talud así como las condiciones de filtración y agua subterránea, seleccionar una superficie de deslizamiento o falla y calcular su factor de seguridad, finalmente, a partir de este factor de seguridad (el cual se elige en base al destino del talud) se deberá determinar la superficie de falla crítica (Suarez J. 2008).

En Cuba, el desarrollo de la actividad minera, se ha intensificado a partir del triunfo revolucionario, tanto en la explotación de materiales para la construcción como en la explotación de minerales metálicos, producto a la creciente demanda de nuevas obras de construcción desde el punto de vista técnico, infraestructural y social en todo el país. Por lo tanto el análisis de la estabilidad de taludes es de suma importancia para mantener la seguridad en la mina y que no se afecte el proceso productivo imprescindible para que se cumplan los planes de producción de las empresas, necesarios para la contribución al mejoramiento de la economía cubana y el cumplimiento de los Lineamientos 184, 192, 193 y 194 de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución.

En el yacimiento Castellanos, se realiza la caracterización del macizo rocoso a medida que se va avanzando con el minado, lo que permite tener un registro actualizado de la calidad del mismo, a la vez que se identifican las zonas inestables que puedan poner en riesgo el minado, tales como son: estructuras planares, cuñas y toppling; y aunque estas fueron previstas en el estudio inicial del proyecto de explotación.

El Yacimiento está en plena apertura de su diámetro total y aunque ya se está explotando se compone de 6 fases de las cuales está en la número 2 y en su aplicación se mantendrán la altura de 12 metros de los taludes según la estabilidad de los actuales. La presencia de agua en la masa rocosa

desempeña un papel importante en la estabilidad de la misma, ya que esta al circular por el macizo erosiona los materiales blandos que se encuentran rellenando los diferentes tipos de discontinuidades, ejerce una presión sobre la masas de roca disminuyendo la resistencia al corte. Todo esto influye negativamente en la estabilidad del talud., además dificulta drenaje lo que provoca que se debe ser muy preciso a la hora de tomar los datos para la evaluación de las características estructurales. En corta este Castellanos aún no se cuenta con registro de propagación y velocidad de las ondas así como las vibraciones producto a los efectos de la voladura, por lo que no se dispone de esta información para poder dar una opinión sobre la posible influencia de la voladura en la inestabilidad de los taludes. Pero por lo que se puede observar en los taludes ya expuesto no se está haciendo un control de la voladura. Estos muestran señales visibles de daños, se ven taludes de geometría muy irregular con la masa rocosa muy fracturada y localmente inestable. El avance del minado también influye en los procesos de inestabilidad, en el sentido de que la remoción de los materiales de la corta, contribuyen a retirar el sostenimiento natural de las masas deslizantes, dejando expuesto las discontinuidades. La roca está sometida a una presión de confinamiento y al ser retirada parte de esta las discontinuidades tienden a expandir lo que puedes ser un factor importante en la estabilidad. La profundidad total será de más de 200 metros por lo que no se puede permitir ningún error, para salvaguardar las vidas humanas y el buen estado de los equipos; por lo que surge como **problema de la investigación** la necesidad de evaluar la estabilidad de los taludes de 12 metros, para garantizar la seguridad minera; en la sector este, yacimiento castellanos.

Objeto de estudio: Los taludes de 12 metros de la corta este.

Campo de acción: Corta este del Yacimiento Castellanos.

Objetivo General: Evaluar la estabilidad de taludes de 12 metros en la corta este del Yacimiento Castellanos.

Hipótesis: Si se realizan el análisis de las características ingeniero-geológicas del yacimiento, se analiza las propiedades físico-mecánicas de las rocas, se evalúa el comportamiento estructural del macizo rocoso y se estudian y se

aplican los métodos para la clasificación geomecánicas para conocer el comportamiento del macizo rocoso y se aplicara a los softwares RocPlane y Sewdgc es posible realizar una evaluación de la estabilidad de los taludes en la corta este yacimiento castellanos y pronosticar su comportamiento.

Objetivos específicos:

- Realizar el análisis de las características ingeniero-geológico del yacimiento.
- Analizar las propiedades físico-mecánicas de las rocas.
- Evaluar el comportamiento estructural del macizo rocoso.
- Estudiar los métodos para la clasificación geomecánica.
- Aplicar las clasificaciones a los softwares RocPlane y Sewdgc.

Las etapas en las que se desarrolla el presente trabajo son las siguientes:

Primera etapa:

El diseño de la investigación y el análisis bibliográfico del tema.

Segunda etapa:

Estudio ingeniero geológico del macizo.

Que comprende:

- Recopilar y organizar la información existente en el proyecto que comprende el estudio geológico y el sistema de explotación empleado en la Yacimiento y seleccionar la información relacionada con el estudio y valoración general de las principales características ingeniero geológicas del macizo rocoso donde se encuentra enclavada la obra de estudio; que incluye un breve análisis de las particularidades geológicas, hidrogeológicas y tectónicas del macizo rocoso y se ofrecen además las principales propiedades físico – mecánicas de las rocas.

Tercera etapa:

- Análisis mecánico-estructural, y evaluación de los parámetros geomecánicos del macizo rocoso a partir de las clasificaciones que se adaptan a las condiciones reales de la corta este del yacimiento Castellanos.

- Evaluación de las características estructurales de los taludes. Estudio del agrietamiento.
- Aplicar los métodos de las clasificaciones geomecánicas a los softwares para saber el comportamiento de los taludes.

Los principales métodos de investigación científica empleados en el trabajo se exponen a continuación:

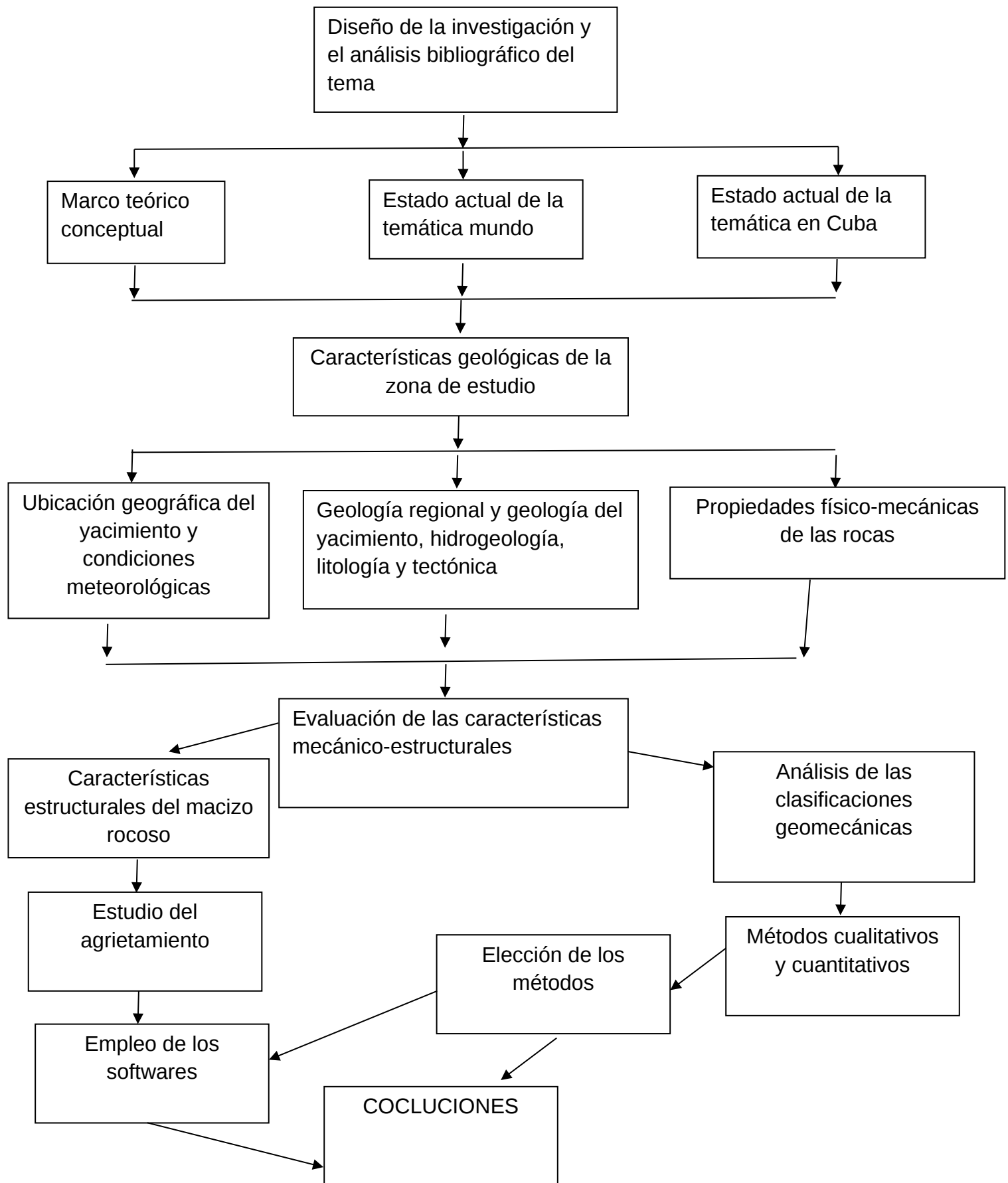
Empíricos:

- Compilación: permite reunir y sistematizar información mediante la revisión de fuentes bibliográficas, orales, digitales o de otro tipo.

Teóricos:

- Deductivo-Inductivo: para la identificación de los principales indicadores que inciden en la evaluación y comportamiento del macizo desde el punto de vista tecnológico.
- Hipotético-Deductivo: para la formulación de la hipótesis y luego, a partir de inferencias lógicas-deductivas, se arriba a conclusiones particulares que posteriormente se pueden comprobar.

Figura 1 Flujo grama de trabajo



CAPITULO I. ESTADO ACTUAL DE LA TEMATICA

1.1 Introducción

En el presente capítulo se exponen los elementos teóricos de la investigación, haciendo un análisis de los elementos más importantes relacionados con la evaluación de la estabilidad de los taludes de un Yacimiento a cielo abierto o de cualquier tipo de obra ingenieril, elementos conceptuales sobre los taludes. También se analiza la bibliografía de la temática en el mundo y en Cuba.

La geomecánica aporta tanto a las labores a cielo abierto como en la construcción de obras subterráneas, un importante soporte científico-técnico que ha encontrado su máximo exponente en los últimos treinta años. Siendo uno de los objetivos, caracterizar los macizos, al constituir estos la base para el estudio integral de los macizos, que incluye tanto el modelo geológico, como geomecánico, abarcando aspectos tales como, estructura, litología, contactos y distribución de litologías, geomorfología, cartografía geológica, estudio hidrogeológico, levantamiento de discontinuidades, técnicas geofísicas, sondeos, ensayos in situ, de laboratorio, clasificaciones geomecánicas, entre otros, convirtiéndose la caracterización geomecánica de los macizos rocosos en una herramienta indispensable para pronosticar su comportamiento.

De esta forma, con la dinámica de las construcciones ingenieriles de las actuales vías de comunicación, tales como: caminos y ferrocarriles, el desenvolvimiento de obras de protección contra la acción de ríos y la explotación de yacimientos minerales, se han presentado problemas de deslizamiento causados por diferentes agentes(naturales y humanos) o debido a varias condiciones como: condiciones climáticas, particularidades geológicas desfavorables, actividad del hombre, sobre peso de las maquinarias, zonas de alta sismicidad, propiedades físico-mecánicas, acuíferos, movimientos tectónicos y geotectónicos, intervenciones antrópicas, entre otros; todo esto aporta desfavorables condiciones de la obra en la cual se trabaja, lo que lleva al diseño y construcción de taludes en un plano de importancia ingenieril de primer orden.

La definición de la geometría del talud minero, es de gran importancia para el método de explotación para lograr el aprovechamiento racional del yacimiento mineral. Un elemento importante y fundamental a tener en cuenta en la extracción de una cantera es la estabilidad de los taludes (bancos) en el frente de la explotación, para lograr el control de movimientos de masas, deslizamientos y hasta derrumbe total del frente, lo que trae consigo la complejidad de las labores mineras, ya que de él depende e incrementa el rendimiento económico.

1.2 Marco teórico conceptual

Se comprende bajo el nombre genérico de talud cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra, ya sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana en una obra de ingeniería. Los taludes se dividen en naturales (laderas) o artificiales (cortes y terraplenes). Las partes de un talud son: escarpe superior, plataforma superior, pendiente predominante, altura, pie de ladera, altura del nivel freático, zanja de coronación, cabeza, pendiente y pie de talud (ver figura 2).

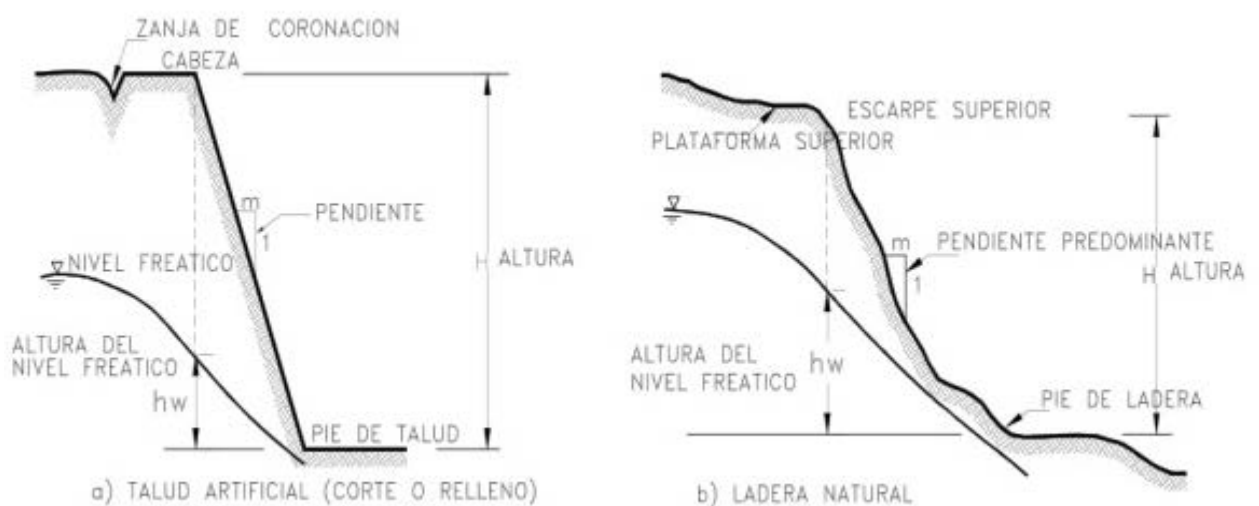


Figura 2 Partes constructivas de un talud, a) artificial (cortes y terraplenes) y b) natural

Definición de los elementos constitutivos de un talud o ladera:

1. **Altura:** Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales pero es complicada de cuantificar en las laderas, debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
2. **Pie:** Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
3. **Cabeza o escarpe:** Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
4. **Altura de nivel freático:** Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza
5. **Pendiente:** Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación $m/1$, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. (Suárez, 1998).

1.3 Estado actual de la temática en el mundo

A fines de la década del 40 comienza el análisis de la interacción entre la práctica y las formulaciones hipotéticas que le permiten a los especialistas pronosticar el comportamiento de una obra subterránea. En los planeamientos mineros, se considera la construcción y ejecución de las labores mineras subterráneas y superficiales, por lo que es necesario, la cuantificación de las características geomecánicas del macizo rocoso, para una explotación racional, segura y rentable. Su utilización estuvo orientada al diseño de las labores constructivas, el diseño del método de explotación, la selección de los equipos, los trabajos de perforación y voladura, así como el sostenimiento, relleno y drenaje.

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.

Así mismo, las clasificaciones geomecánicas además se utilizan preferentemente en las fases de viabilidad y anteproyecto, en zonas donde existen afloramientos rocosos que permiten una buena toma de datos geológicos y geomecánicos, y alcanzan en muchas ocasiones resultados satisfactorios a bajo costo, lo cual es muy importante en los inicios de un proyecto.

La primera clasificación geomecánica de los macizos rocosos, fue propuesta por Terzaghi en 1946 (González de Vallejo, 1998. Moreno, 1998). El método, basado en trabajos experimentales tuvo el objetivo de facilitar el cálculo del sostenimiento en túneles, Terzaghi parte del criterio de que en el macizo se forma una zona de rocas destruidas por el techo de la excavación, considerando la disposición de la estratificación respecto al eje del túnel. Sin embargo consideramos que el método propuesto, carece de un índice cuantitativo mediante el cual se pueda obtener un criterio acertado del comportamiento de las rocas.

Deere (1964) propone una clasificación del macizo (Blanco, 1981,1998, González de Vallejo, 1998 y López Jimeno, 1999). La cual está basada en la recuperación de testigos de perforación, denominada sistema RQD (*Rock Quality Designation*), índice de calidad de las rocas. Este índice se continúa utilizando en la actualidad como parte de muchas de las clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos.

A modo de apreciación, este índice tiene el inconveniente de que su valor se puede afectar, si no se realiza correctamente el sondeo del testigo, ya que durante este proceso pueden ocurrir fracturas y confundirse estas con las inicialmente existentes en las rocas. Los valores de este índice, también se pueden estimar con el empleo de la expresión propuesta por Palmstrom en 1974 (Moreno, 1998), la cual parte del análisis del número de grietas por metro cúbico.

Hagerman en 1966, establece la diferencia de cinco tipos de macizos, según su estabilidad, para llegar a esta definición el autor parte de la valoración del

grado de debilitamiento estructural de los macizos, desde macizos totalmente estables (macizos homogéneos e isótropos) hasta macizos muy inestables, que presentan un gran número de discontinuidades. En este caso la metodología propuesta no cuenta con una valoración cuantitativa de las discontinuidades o grietas, ni se hace una valoración de las orientaciones de las principales superficies de debilitamiento.

Un nuevo método para llevar a cabo una clasificación geomecánica de las rocas, surge en 1972, fue propuesta por Wickham, Tiendemain y Skinner (Blanco 1998), esta clasificación surge con el nombre de RSR (*Rock structure rating*). Para la introducción de esta nueva clasificación se analizaron más de 100 casos de túneles construidos, a partir de estos se estableció una correlación entre el RSR y el espacio con el cual deben colocarse los elementos de fortificación.

En 1973 Bieniawski, propone su clasificación, (su modificación fue concluida en el año 1979), en ella se establece una cuantificación de la calidad del macizo rocoso, mediante el índice RMR. En esta metodología se propone un gráfico para seleccionar el sostenimiento de los túneles en función de los valores RMR (Blanco, 1998 y López Jimeno, 1997,1999).

En el año 1974 fue propuesto un sistema para valorar la calidad del macizo, (Barton, Lien y Lunde, 1974), el cual se fundamenta en la determinación del índice Q. Para la determinación de este índice se parte del empleo del RQD de Deere (1967), conjuntamente con la utilización de otros parámetros del macizo rocoso. A partir de observaciones realizadas, los autores establecieron una correlación entre la calidad del macizo y el sostenimiento necesario, dependiendo este de las dimensiones equivalentes de la excavación (Ramírez y Huerta, 1994; Moreno, 1998; Gonzáles de Vallejo, 1998).

Las clasificaciones antes mencionadas fueron creadas y comprobadas en macizos constituidos en su gran mayoría por granitos, cuyas características son muy diferentes a las que se presentan en la región de estudio, por lo que tanto los valores obtenidos de los parámetros estudiados, como el de los

resultados finales obtenidos con el empleo de estas clasificaciones se han de ajustar a nuestras condiciones concretas.

Bulichev (1970), desarrolló un método para valorar la estabilidad de los macizos dado por el índice de calidad de las rocas (S) (Bulichev, 1982; Martínez, 1999), esta clasificación es bastante completa, en la misma se incorporan nuevos parámetros, como la fortaleza de las rocas. Este criterio se considera, podría ser más completo si en vez de utilizar el parámetro n , el que define el módulo de agrietamiento lineal del macizo, se empleara el módulo volumétrico, debido a que con el parámetro n no se puede precisar el volumen de los bloques.

En conjunto con esta metodología de clasificación del macizo rocoso, surgen otros criterios, como el de Franklin (1970 – 1975) y los de Louis (1974), (Moreno, 1998. Gonzáles de Vallejo, 1998. López Jimeno, 1998), estos métodos han tenido menos seguidores.

En 1985, Vallejo propone una clasificación geomecánica, basada en la determinación del SRC (*Surface Rock Clasiffication*), esta ha alcanzado gran popularidad en España, en ella el autor trata de integrar determinados factores que otras clasificaciones no incluyen o que su valoración no es suficiente, como es la geología, la tectónica, el estado tensional, la sísmica y las condiciones constructivas, pero no logra establecer con claridad la influencia de las tensiones sobre las excavaciones. A nuestro juicio esta clasificación es de gran utilidad y pudiera considerarse en el estudio del macizo en cuestión.

Romana (1988) propone que el índice SMR se presenta como un método óptimo, debido a que considera la orientación de los planos de discontinuidad con respecto a la cara del talud. Este índice se obtiene del índice RMR básico sumando dos "factores de ajuste"; uno en función de la orientación de las discontinuidades (y que es, a su vez, producto de tres subfactores) y otro conocido como "factor de excavación". En este caso valoramos que constituye una clasificación geomecánica de uso muy extendido para la caracterización de taludes en roca, calculado a partir de valores característicos del macizo rocoso.

Acosta (1996) realiza una valoración de los diferentes parámetros del agrietamiento, los que permitieron conjuntamente con otros elementos llevar a cabo la determinación de la estabilidad en estos macizos.

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 de 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.

Todas estas clasificaciones logran en un mayor o menor grado, una caracterización cuantitativa de los macizos rocosos, lo que permite proponer el tipo de sostenimiento a emplear en las excavaciones si es el caso de construcciones subterráneas o la calidad del macizo en labores a cielo abierto. Independientemente de que estas clasificaciones geomecánicas han brindado un aporte significativo en el conocimiento de los macizos rocosos, su comportamiento mecánico-estructural o estabilidad de taludes, ninguna de ellas propone realizar un análisis de los diferentes parámetros del macizo, que permita una evaluación integral del mismo según nuestra consideración del presente trabajo.

1.4 Situación actual de la temática en Cuba

En Cuba, se realiza la caracterización geomecánica de los macizos rocosos en minas subterráneas de la región oriental. Este análisis se basa en las

características geológicas y geomecánicas de los macizos rocosos donde se ubican las minas subterráneas Las Merceditas, Amores y “El Cobre” que explotan yacimientos de cromo y cobre. Este estudio permite definir la pérdida de estabilidad por desprendimientos, por desplazamiento, deformación y destrucción de la roca en el contorno de la excavación y la pérdida de estabilidad por desplazamiento de la roca sin su destrucción. También han sido empleadas 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).

El estudio de taludes en el mundo es ampliamente difundido, en los países en los que su legislación exige un adecuado estudio y diseño, para asegurar el funcionamiento de las obras que protegen los intereses monetarios y beneficios, a partir del cumplimiento adecuado de la función para la cual fueron calculados. (Pesántez, Bernardo, Molina, & Rigoberto, 2013,).

Para el estudio de la estabilidad de los taludes se requiere un conocimiento previo del comportamiento de la geomecánica, que ayuda a la hora del diseño y proyecto de las obras de ingeniería. A continuación se exponen algunos trabajos relacionados con la geomecánica para la evaluación de la estabilidad y calidad de los macizos rocosos.

En el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM), particularmente en los departamentos de Geología y Minas, se han realizado varios trabajos geotécnicos, dirigidos a la caracterización ingeniero-geológica de los suelos lateríticos a partir de las propiedades físico-mecánicas de los mismos y la aplicación de clasificaciones geomecánicas para el análisis de la estabilidad de los taludes.

Guardado R. et al (2000) desarrolla un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permite cartografiar el medio natural y pone de manifiesto las

características geoambientales del territorio, lo que proporciona una imagen global de sus potencialidades, grado de deterioro y vulnerabilidad ante procesos y fenómenos naturales y antrópicos que producen peligros y riesgos geoambientales en un sector de la zona costera y urbana de la ciudad de Moa. Como resultado se obtiene el mapa de riesgo geológico mediante la combinación de los mapas de vulnerabilidad de las obras ingenieriles, inestabilidad tectónica y amenaza geológica, determinándose que las áreas de mayor riesgo coinciden con aquellas donde las estructuras son desfavorables o poco competentes y las amenazas geológicas son altas.

Almaguer Y. (2001), donde se aplican métodos de cálculo de estabilidad de taludes utilizando criterios de rotura a partir del estudio integral del agrietamiento del macizo roca-suelo y de la evaluación geomecánica del macizo rocoso serpentizado. En el 2005, Almaguer realiza una evaluación de los niveles de susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda, empleando las técnicas SIG en la obtención de los mapas de susceptibilidad, lo que permitió establecer criterios de estabilidad de taludes y laderas como base para futuras evaluaciones de riesgos y así prevenir o mitigar los daños derivados de estos fenómenos. Como resultados se presenta una caracterización de los mecanismos y tipologías de deslizamientos desarrollados en el área. Se realiza una valoración de los factores que influyen en las inestabilidades.

(Olajesu, 2017) Establece criterios para la evaluación del comportamiento mecánico-estructural del macizo rocoso donde se laborean las minas subterráneas, con el empleo de la modelación numérica, basada en el método de elementos finitos. Este trabajo se enmarca en dos momentos importantes: primero, el análisis de los criterios geomecánicos con el empleo de la modelación numérica por método de elementos finitos para la evaluación del comportamiento estructural de la masa de rocas y, en segundo lugar, su aplicación en las minas subterráneas, Descanso y Meloneras, ubicadas en Placetas, Villa Clara, Cuba. Para ello se realiza un análisis de las características ingeniero-geológicas, donde se consideran las propiedades físicomecánicas de las rocas intactas y del macizo rocoso, las constantes de materiales que constituye el mismo, sus características estructurales que

permiten establecer las ecuaciones que describen el estado tensional de las principales litologías que componen el medio. Los resultados obtenidos de los modelos confirman la competencia del macizo rocoso de las minas analizadas, por lo tanto no necesitan sostenimiento. No obstante, los resultados de esta investigación permitirá, también, establecer un monitoreo eficaz del macizo por ser quebradizo para evitar el riesgo de la caída de los pedazos de rocas.

(Muachissaco C., 2017) realiza una evaluación de la estabilidad de los taludes en la cantera de calizas “Urbano Noris”, en el mismo se realiza un análisis de las características ingeniero-geológicas y la evaluación del comportamiento mecánico estructural del macizo, para la evaluación de la calidad de la roca se utilizan cinco clasificaciones geomecánicas de las existentes: la clasificación de Deere, basada en el índice de calidad del macizo(RQD); la clasificación de Bieniawski, basada en el (RMR); la clasificación de Barton, basada en el índice (Q); la clasificación de Romana, basada en el índice SMR, y la clasificación de Hoek y Marinos, basada en el índice GSI; todas ellas nos dan criterios sobre la calidad del macizo objeto de estudio. Se emplean los métodos que más se adaptan a las características de la cantera para evaluar la estabilidad de los taludes: el método de equilibrio límite exacto: rotura plana y rotura en cuña, con los cuales se evalúa la estabilidad de los taludes en la cantera estudiada. De los análisis realizados para cada uno de los parámetros, se obtienen los siguientes resultados: con las clasificaciones geomecánicas empleadas y teniendo en cuenta los requerimientos establecidos por la SIMR, se obtiene que la calidad del macizo rocoso para la cantera “Urbano Noris” es buena, y con los métodos para evaluar la estabilidad del talud que más se adaptan a este tipo de macizo, se obtiene que la estabilidad de los taludes de esta son estables, aunque presentan planos de debilitamientos. Para ellos se proponen las medidas de estabilización que permiten evitar inestabilidades en los taludes y garantizar la seguridad de los mismos.

CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. Introducción

El objetivo del presente capítulo es ofrecer una información general sobre la geografía y geología del Yacimiento Castellanos. A partir del conocimiento de los antecedentes ha sido seleccionada y analizada la información más importante, para establecer y aplicar las clasificaciones que permitan determinar el estado geomecánico del macizo.

2.2. Ubicación geográfica del yacimiento

El yacimiento Castellanos se encuentra localizado a 3 km del poblado de Santa Lucía, Cuba, a 200 km al oeste de Habana, al noroeste de Pinar del Río a unos 12 km de la localidad de Minas de Matahambre. El complejo minero se ubica a 3 km de la costa.



Figura 3 Ubicación geográfica del yacimiento.

Tabla 1 Coordenadas geográficas del yacimiento

Latitud N	Longitud W
22° 39' 01.66"	83° 58' 59.64"
22° 39' 02.30"	83° 58' 24.62"
22° 38' 49.30"	83° 58' 24.34"
22° 38' 49.69"	83° 58' 03.33"
22° 38' 50.96"	83° 56' 53.30"
22° 38' 18.46"	83° 56' 52.61"
22° 38' 17.82"	83° 57' 27.63"
22° 38' 11.32"	83° 57' 27.49"
22° 38' 10.84"	83° 57' 53.75"
22° 37' 57.84"	83° 57' 53.47"
22° 37' 57.55"	83° 58' 09.23"
22° 37' 44.55"	83° 58' 08.96"
22° 37' 43.39"	83° 59' 11.98"
22° 37' 49.89"	83° 59' 12.12"
22° 37' 49.63"	83° 59' 26.12"
22° 38' 28.64"	83° 59' 26.96"
22° 38' 29.03"	83° 59' 05.95"
22° 38' 48.53"	83° 59' 06.36"
22° 38' 48.66"	83° 58' 59.36"
22° 39' 01.66"	83° 58' 59.64"

2.3. Condiciones meteorológicas de la zona

La provincia de Santa Lucía presenta un clima de sabana tropical, el cual consiste en temporadas húmedas y secas bien distinguidas, de igual duración. La temporada seca en Santa Lucía ocurre desde diciembre hasta abril. Durante este periodo se presenta muy poca precipitación y las temperaturas se hallan alrededor de los 25 grados Celsius de promedio. Durante la estación húmeda el porcentaje de humedad aumenta y las probabilidades tanto de precipitaciones como de huracanes es mayor.

Los datos de temperatura, precipitación, evaporación, etc., locales calculados en este apartado servirán de base para todos los cálculos de caudales, estudio sobre la gestión de las aguas, etc. Los cálculos de precipitación y evaporación promedio mensual que a continuación se habla se han obtenido del Estudio de Viabilidad. Como temperatura mínima tenemos 20.5 °C y la máxima es de 30 °C, con una precipitación promedio anual de 1450 mm, la humedad relativa de 100 %. (Lauzier 2016)

2.4. Geología regional

El territorio sobre el que se asienta el proyecto corresponde a la parte septentrional de la Provincia de Pinar del Río. Desde el punto de vista

geográfico -geomorfológico diríamos que comprende las unidades geomorfológicas de Alturas de Pizarras del Norte y parte occidental de La Llanura Costera Norte de Pinar del Río, ver en la Figura 4.

Esta región de Cuba presenta un alto grado de complejidad geológica, así como un elevado grado de estudio como resultado de toda una serie de investigaciones geológicas realizadas, tanto para el mapeo geológico-estructural de la región como para la prospección de hidrocarburos y de minerales metálicos y no metálicos.

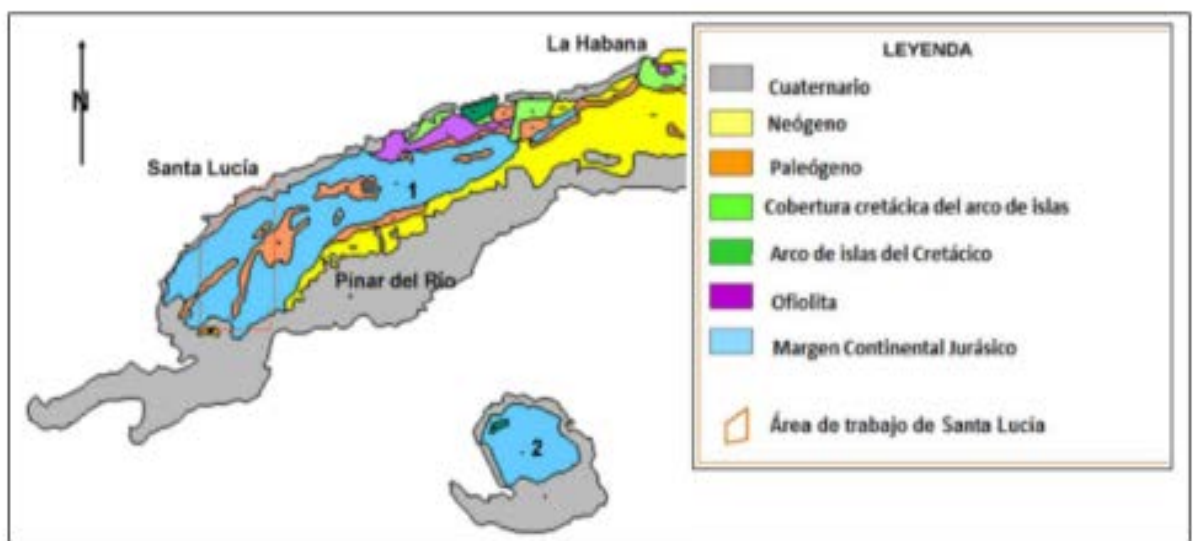


Figura 4 Geología general del área de Pinar del Río, Cuba Occidental

En el marco de la geología regional, en este caso, solo nos referiremos brevemente a las características metalogénicas de esta región sobre la base del conocimiento histórico que se ha ido acumulando. En este sentido se centrará la atención en la reconocida Zona Metalogénica Guaniguanico.

La zona Metalogénica Guaniguanico se extiende desde los municipios Mantua y Guane hasta la parte oriental de la Sierra del Rosario y está compuesta por secuencias terrígenas, terrígeno – carbonatadas y carbonatadas de cuenca intracontinental y margen continental primitivo (Sin-rift), así como de margen continental maduro (Post-rift), con magmatismo toleítico subordinado de tipo distensional en grado variable (desde moderado hasta ausente).

Las mismas cubren un amplio intervalo temporal, desde el Jurásico Inferior hasta el Cretácico Cenomaniano, llegando hasta el Turoniano en algunas localidades de la Sierra del Rosario (Linares, 2003; Cobiella, 2003). Estas secuencias son generalmente ricas en materia orgánica (de 1 hasta 35 % de materia carbonosa y 1 - 9 % de carbono orgánico total), habiéndose acumulado en ambientes predominantemente reductoras. Estos ambientes abarcan facies de posicionales emergidas, costeras, de aguas someras, moderadamente profundas y profundas. (Lauzier 2016)

2.5. Geología del yacimiento

La Yacimiento Castellanos constituye uno de los diversos yacimientos de sulfuros masivos tipo sedimentarios exhalativos (SEDEX) de Pb y Zn localizados al noroeste de Cuba. Estos depósitos se encuentran alojados en la formación geológica San Cayetano perteneciente al Jurásico, que consiste en una alternancia de areniscas, limolitas y argillitas del Jurásico, con intercalaciones de lentejones de pizarras negras y capas de Calizas y Dolomías. Además, se observan varios yacimientos estratificados asociados de barita al suroeste.

Todos los yacimientos de Pb-Zn son estratoligados y estratiformes y se alojan en pizarras negras, que se presentan como lentejones de gran espesor cercados por areniscas cuarzo feldespáticas y limos. El depósito polimetálico estratiforme de la Yacimiento Castellanos mide aproximadamente 800 metros de largo y hasta un máximo de 300m de buzamiento descendiente. El rumbo varía ligeramente, con un azimuth medio de 65° y un buzamiento medio de 50° hacia el noreste. El espesor del depósito puede varían entre 5m y 76 m (con un promedio de 18 m).

El cuerpo mineralizado puede estar compuesto de una simple unidad o de tres unidades controladas estratigráficamente, una encima de otra, separadas por rocas enbloquantes formadas por pizarras negras carbonosas, caliza y dolomita. (Lauzier 2016)

2.6. Hidrogeología

De acuerdo con los trabajos de exploración realizados en el yacimiento (Vologdin N. P. 1975 -1977), por la composición litológica, el carácter de la

yacencia, las propiedades de filtración y físico-mecánicas, se pueden separar seis grupos fundamentales de rocas (de arriba – abajo en el corte):

1. Sedimentos arcillosos y rocas de la parte superior del corte; corteza de intemperismo -zona de oxidación.
2. Paquete supramenífero de limolitas y areniscas.
3. Rocas brechosas de las zonas tectónicas.
4. Paquete de las pizarras carbonosas enbloquantes de las menas polimetálicas.
5. Paquete inframenífero de areniscas, con intercalaciones de limolitas.
6. Zonas de milonitas.

La profundidad máxima de la zona de oxidación se encuentra situada en la parte noreste, reduciéndose hacia la parte suroeste a los 8-13 m. El piso del horizonte sobre el cuerpo menífero varia dentro de los límites de las cotas absolutas + 48 y + 70 m, con un valor medio de + 58 m. Al noroeste, por la pendiente de la elevación que caracteriza al yacimiento, la potencia de la zona de intemperismo se reduce gradualmente llegando a tener unos 6 m al pie de la misma.

Los niveles de las aguas subterráneas yacen a profundidades desde las decenas de centímetros en las partes bajas del relieve hasta los 33 m en las cimas. La zona del sombrero de hierro estaba caracterizada por una alta permeabilidad en las zonas tectónicamente dislocadas.

Como consecuencia del drenaje de este horizonte, los arroyos que se forman tienen un gasto insignificante (décimas y centésimas de litros por segundo). Generalmente, los manantiales revelados se encuentran desde la cota absoluta +35 hasta la +93. Por la abundancia de agua y la disposición con relación al cuerpo menífero se pueden separar cinco zonas acuíferas de la corteza de intemperismo:

- Zona acuífera del paquete superior (supramenífero): Está representada por una interestratificación de limolitas, pizarras arcillosas y areniscas que, según los trabajos exploratorios realizados, se caracteriza por tener gastos específicos entre 0,009 y 0,001 l/seg., coeficiente de filtración de 0,002 m/ día. Es decir, que esta es una zona prácticamente seca.
- Zona acuífera de las brechas: Está representada por fragmentos de areniscas cuarzosas, limolitas, argilitas, pizarras arcillosas, calizas, dolomitas, rocas ultra básicas serpentinizadas, caracterizada por gastos de 0,33 – 0,29 l/seg, abatimientos entre 2,9 y 13,3 m y gastos específicos entre 0,11 y 0,02 l/seg.
- Zona acuífera del paquete enbloquente de mena: Está representada por limolitas y pizarras arcillo carbonosas que se interestratifican con areniscas, calizas, dolomitas y formaciones de sombrero de hierro, que se caracterizan por tener una abundancia de agua relativamente irregular, gastos medidos en sondeos de 0,03 hasta 0,7 l/seg, abatimientos entre 65 y 136 m, gastos específicos de 0,001- 0,5 l/seg, coeficientes de filtración de 0,04 - 3,75 m/día. La abundancia de agua relativamente alta la poseían los depósitos del sombrero de hierro donde el coeficiente de filtración era de 3,75 m/día. Bajo esta zona, se formaba una depresión en el nivel de la corriente de las aguas subterráneas que lo convertían en un receptor.

Las reservas de agua de esta zona eran pequeñas.

- Zona acuífera del paquete inframenífero: Está integrada por areniscas que se interestratifican con estratos poco potentes de limolitas y pizarras. Se caracteriza por gastos específicos de 0,25 – 0,04 l/seg.
- Zona acuífera de las milonitas: Tiene su desarrollo en la parte suroeste del yacimiento y está representada por material arcilloso, donde la irrigación es esporádica y el contenido de agua es pequeño. Los gastos determinados en los sondeos fueron de 0,03 l/seg y menores, con abatimientos de 35 - 62 m; los sondeos eran prácticamente secos. Por los datos de las observaciones de régimen, la amplitud de las oscilaciones de los niveles de las aguas subterráneas medidas durante un año fue de 1,2 – 2,75 m.

- Aguas subterráneas de las zonas de dislocaciones tectónicas: Dentro de la estructura del yacimiento, desempeñan un papel importante las zonas tectónicas subcorcondantes y secantes de buzamiento abrupto, donde de acuerdo a las observaciones hidrogeológicas, se ha establecido que el nivel de inundación de la mayoría de estas zonas es bastante bajo. Al mismo tiempo se han observado algunos casos de zonas tectónicas con elevada abundancia de agua, para lo cual debe consultarse el informe citado (Vologdin; 1975- 1977), donde se plantea además que estas aguas poseen diferentes presiones y el estudio de los gastos por los sondeos, en algunos casos, hablan de una alimentación de estas zonas no vinculadas a las precipitaciones atmosféricas. En general, las aguas de la corteza de intemperismo – zona de oxidación, por su composición química, son dulces, variando su mineralización entre los 187 – 996 mg/l y fueron clasificadas como hidrocarbonadas. Sólo en un caso fueron clasificadas como sulfatadas cálcicas.

Sobre la base de los trabajos realizados en el citado informe de la exploración detallada, se debe esperar la afluencia de las aguas subterráneas por grietas tectónicas, la cual dependerá de la potencia de la zona, su posición en el corte y las propiedades de filtración de las rocas. En las rocas agrietadas duras, las reservas estáticas se desgastarán más rápidamente con la correspondiente reducción de la corriente. En las zonas de limonitización, donde las rocas poseen bajas propiedades de filtración, el desgaste de las reservas de agua ocurrirá más lentamente y regularmente. En general, las reservas estáticas de las aguas subterráneas no son grandes en las zonas tectónicas.

Los cálculos realizados en el informe de la exploración detallada del yacimiento (1975-1977) muestran que, en el balance general de la afluencia de agua a la futura cantera, predominan las precipitaciones atmosféricas. La potencia del equipo de bombeo de la cantera deberá determinarse, ante todo, por la necesidad de evacuar las aguas provenientes de las lluvias en su período correspondiente y en el de la influencia de ciclones tropicales.

A medida que comiencen y progresen las operaciones mineras, se deberán iniciar las investigaciones hidrogeológicas para el estudio de la presión de las aguas subterráneas en las pistas de la Yacimiento a cielo abierto con el fin de

adquirir un mayor conocimiento de las condiciones hidrogeológicas. (Lauzier 2016)

2.7. Litología

A partir de la testificación de sondeos de exploración y geotécnicos y de estudios anteriores se obtuvieron las características litológicas del yacimiento:

- **Capa de Óxido Suprayacente**

Por lo general, se encuentra a una profundidad entre 1 m y 15 m; las unidades de mayor espesor se encuentran en las zonas la elevación topográfica es menor. Se extiende desde el límite donde el material se encuentra completamente y altamente meteorizado y su composición es variable. El macizo rocoso es débil y se clasifica como muy malo, pero en el campo puede observarse que se mantiene razonablemente bien la estructura de los bancos superiores de la cantera existente.

- **Capa Suprayacente de transición**

Su profundidad varía entre 0 m y 35 m y está definida por el límite entre los estratos sólidos alta y moderadamente meteorizados. Contiene diaclasas y foliaciones abiertas, lo cual ha dado lugar a una meteorización preferencial de esta unidad. El macizo rocoso es débil y se clasifica como muy malo, pero en campo se observa que se mantienen estables bancos superiores del bloque subyacente de la Yacimiento existente.

- **Pizarra**

La pizarra presenta resistencia moderada y estructura de grano fino, con una foliación sólida que produce un material anisotrópico. Por lo general, la foliación es plana, con algunas superficies pulidas en las áreas cercanas a las zonas de cizallamiento. Ocasionalmente, la pizarra se encuentra intercalada con material calcáreo y puede tener venas marcadas de calcita. En su estado no meteorizado, el macizo rocoso de pizarra por lo general corresponde a la roca de media.

- **Arenisca**

La arenisca, por lo general presenta resistencia de alta a moderada y una estructura interna de grano fino a grano medio, con lentejones menores de limolita. La influencia de la foliación es menos pronunciada en esta unidad. Estructuralmente, las unidades de arenisca están dominadas por diaclasas y microfracturas y fluctúan entre masivas y altamente diaclasadas. Las vetas de cuarzo son comunes a través de las unidades de arenisca; se observa cierta piritización menor. La calidad del macizo rocoso es de regular a muy buena, dependiendo del grado de diaclasado.

- **Arenisca intercalada**

La arenisca intercalada se encuentra en el bloque suprayacente y está intercalada con espesores variables de limolita y pizarra. La resistencia de este material varía de moderada a débil. Está dominado por una foliación generalizada y es un material anisotrópico. La unidad está próxima a la brecha del bloque suprayacente y alberga a una serie de cizallas de tamaño menor a mediano, acordes con la foliación. La calidad del macizo rocoso de la arenisca intercalada es regular.

- **Brecha suprayacente**

La brecha suprayacente de esta formación es una unidad conformada por el emplazamiento de material oceánico en una masa continental, que hace que esta esté conformada por varios tipos de roca. La arenisca, pizarra y serpentinita son las unidades dominantes, junto con cantidades menores de basalto, gabro y caliza. La composición de la unidad varía desde bloques masivos de los componentes individuales hasta material con alta presencia de brechas, donde los clastos de todos los tipos de roca constituyente se mantienen en una matriz de pizarra de grano fino. La brecha suprayacente alberga a una serie de cizallas que coinciden con las unidades de roca constituyente más blanda. Debe considerarse cuidadosamente la definición de una clasificación del macizo rocoso y el diseño de los taludes para esta unidad, debido a la naturaleza heterogénea del material. Se ha efectuado un análisis de la estructura del macizo rocoso.

Los datos de testificación muestran de manera clara una foliación de buzamiento con dirección norte oeste, presente en la mayoría de las unidades de roca de Castellanos. Cada unidad de roca posee 3 o más conjuntos de diaclasas. Las estructuras de fallas y cizallas concuerdan con la orientación de la foliación. Está claro que estas estructuras no son las principales estructuras que truncan el cuerpo mineral; es más probable que este hecho se atribuya a las fallas y el cizallamiento asociados con el emplazamiento de las unidades oceánicas en la masa continental. (Lauzier 2016)

2.8. Tectónica

El yacimiento se ubica entre fallas de corrimiento que varían de noreste a sureste. Estas fallas repiten la Formación

San Cayetano. La principal zona de corrimiento que afecta el yacimiento es la Falla Norte, que consiste en una estructura estratigráfica subparalela bien desarrollada, que se puede identificar fácilmente entre los testigos, y está compuesta por milonita con serpentinita, gabro, arenisca y clastos de brechas de limonita. No coincide con los principales contactos litológicos al compararla con las areniscas y esquistos del contacto del bloque subyacente, y tiene un buzamiento que oscila entre 25 y 60° hacia el noreste. La Falla Norte tiene las areniscas del bloque suprayacente dentro del contacto con las pizarras del bloque suprayacente.

La Falla Sur que bordea el yacimiento Castellano hacia el sureste no afecta la mineralización, pero podría afectar la zona de stockworks y el afloramiento de la Formación San Cayetano. La fase final de la actividad tectónica asociada al yacimiento Castellano tuvo como resultado una serie de fallas inversas, normales y transversales que han fragmentado la zona mineralizada en una serie de bloques (ver figura 5). (Lauzier 2016)

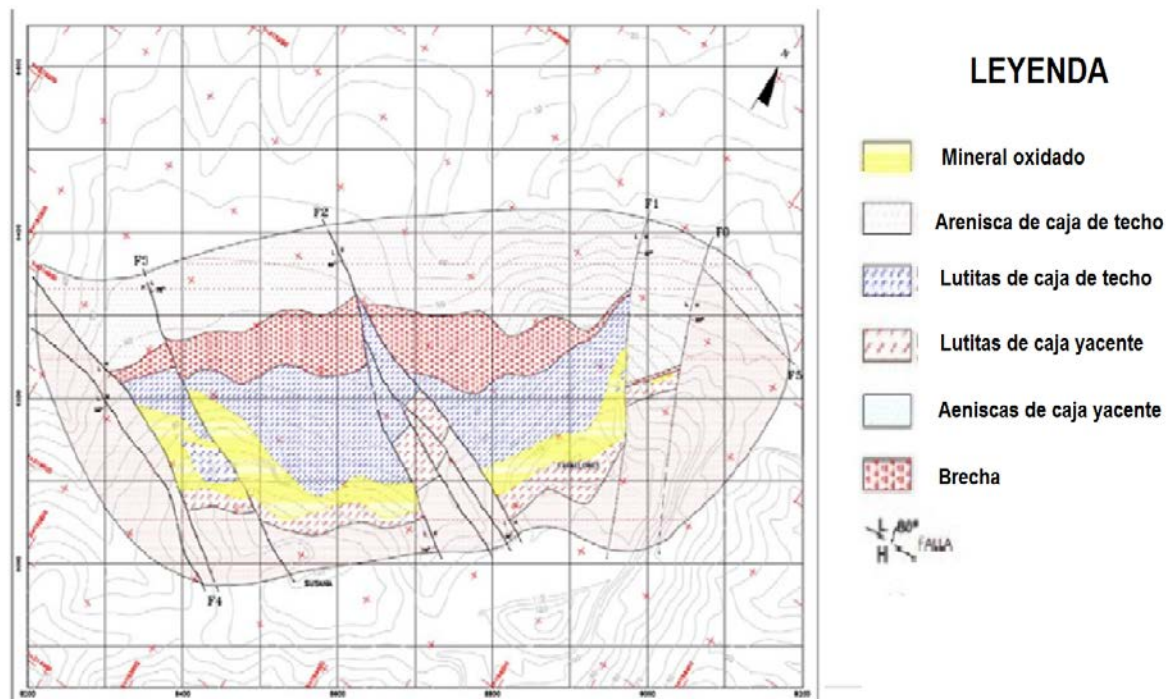


Figura 5 Tectónica del yacimiento

2.9. Propiedades físico- mecánica de las rocas

La determinación de las propiedades físicas se basa, en el establecimiento de los pesos natural, seco y saturado, y el volumen de probetas rocosas y/o minerales.

El peso natural de acuerdo al ISRM (Society International For Rock Mechanic's), de la muestra debe tener como mínimo 50 grs. El peso seco se determina, mediante el secado de las probetas dentro de un horno ventilado a una temperatura promedio entre 105° - 110°C. En tanto que el peso saturado, se obtiene sumergiendo a la probeta en agua destilada, el volumen de la probeta rocosa y/o mineral a ser ensayada se determina mediante probetas simétricas y/o probetas irregulares, mediante el principio de Arquímedes, en el caso particular de probetas irregulares. (Lauzier 2016)

Los resultados de las propiedades que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Propiedades físico-mecánicas de las rocas.

Propiedades			Dominio Geológico					
			Arenisca subyacente	Arenisca suprayacente	Pizarra	Brecha	Caliza	Mudstone/Limolita
Peso unitario	λ	kN/m ³	26,68	26,68	27,57	26,39	26,49	26,68
Resistencia a la compresión no confinada (UCS)	σ_{ci}	MPa	55	55	40	45	30	50
Ángulo de Fricción	ϕ	Deg.	45,3	43,91	31,03	44,81	36,46	37
El módulo de Young	E	GPa	6,70 ¹	6,70 ¹	8,00	13,05	15,00	18,75
Resistencia a la Compresión de macizo rocoso.	σ_{cm}	MPa	13,736	12,376	4,891	11,852	5,705	8,292
Módulo de Deformación	E_r	GPa	2735,48	2058,15	1789,2	5328,06	4607,79	7655,26

2.10. Materiales y métodos utilizados

Como materiales fueron empleados:

Para el estudio del agrietamiento

- Se empleó el uso de la brújula, cinta métrica, regla, lapicero y libreta; estos fueron necesarios para el estudio del agrietamiento.
- Se empleó también computadoras tanto como para la conformación de la tesis y para el análisis de la estabilidad de los taludes con los softwares dips, RocPlane y Swedge.

Los métodos estudiados

- Para la evaluación de la calidad de la roca se utilizan cinco métodos para la clasificaciones geomecánicas de las existentes: la clasificación de Deere, basada en el índice de calidad del macizo (RQD); la clasificación de Bieniawski, basada en el (RMR); la clasificación de Barton, basada en el índice (Q); la clasificación de Romana, basada en el índice SMR, y la clasificación de Hoek y Marinos, basada en el índice GSI. Las cuales están explicadas en el capítulo III, apéndice 3.3.

CAPITULO III. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICO-ESTRUCTURALES DEL YACIMIENTO CASTELLANOS

3.1 Introducción

Debido a la complejidad que presentan los macizos rocosos, diversos autores han intentado establecer sistemas de clasificación que se adecuen a macizos con semejantes características estructurales. Muchos de estos métodos han sido mejorados consecuentemente, sin embargo la mayoría de ellos se basa en observaciones cualitativas y por ello se hace muy importante una interpretación correcta y experta, de las observaciones en terreno. En el presente capítulo se realiza una revisión de las clasificaciones geomecánicas más importantes para minería a cielo abierto: RQD, RMR, MRMR, GSI y SMR con el objetivo de seleccionar la clasificación adecuada para el macizo objeto de estudio.

Las clasificaciones geomecánico-estructurales 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. Las clasificaciones geomecánico-estructurales 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.

3.2. Características estructurales del macizo rocoso

Para cada área de estudio se ha realizado una proyección estereográfica con todas las medidas geométricas de los planos tomadas en campo (dirección de buzamiento y buzamiento) y definiendo los parámetros geométricos más frecuentes para cada familia de discontinuidades atendiendo a densidad de polos. En total se han definido tres familias para el caso del talud 1 y dos familias para el talud 2.

F1: Diaclasas tectónicas. Su dirección de buzamiento media es de 329 y su buzamiento medio es de 51°. En cuanto a su espaciado se clasifican como separadas. Poseen una moderada continuidad.

F2: Diaclasas tectónicas. Su dirección de buzamiento media es de 204 y su buzamiento medio es de 47°. Poseen una baja continuidad y suelen ser de apertura cerrada.

F3: Se trata de estratificación. Su dirección de buzamiento media es de 280 y su buzamiento medio es de 48°.

Se han observado algunas discontinuidades no repetitivas de gran continuidad que pudieran ser zonas de falla con buzamientos medios NW. Dado a que no han sido caracterizadas por su carácter individual no se ha tenido en cuenta en el análisis de estabilidad.

3.2.1. 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. En Castellanos varía entre 40 – 240 mm, en algunos casos pueden pasar los 1000 mm. La figura 6 muestra el espaciamiento de las discontinuidades en la Yacimiento castellanos.



Figura 6 Espaciamiento de la discontinuidad

La descripción del espaciado dado por el ISRM, se muestra en la tabla 3.

Tabla 3 Descripción del espaciado por el ISRM

Descripción	Espaciado (mm)
Extremadamente juntas	< 20
Muy juntas	20 – 60
Juntas	60 – 200
Moderadamente juntas	200 – 600
Separadas	600 – 2000
Muy separadas	2000 – 6000
Extremadamente separadas	> 6000

3.2.2. Continuidad

Continuidad o 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. En Castellanos varía de 40 cm a 9 m. lo cual se muestra ejemplo en la figura 7.



Figura 7 Persistencia de las discontinuidades en el yacimiento

En la tabla 4 se expone la descripción de la continuidad o persistencia a tener presente dado por el ISRM.

Tabla 4 Descripción de la continuidad ISRM

Continuidad	Longitud (m)
Muy baja continuidad	<1
Baja continuidad	1 – 3
Continuidad media	3 – 10
Alta continuidad	10 – 20
Muy alta continuidad	>20

3.2.3. Rugosidad

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

Se determina la rugosidad de las estructuras por medio del sentido del tacto, estas son muy importantes en estabilidad de taludes, pues brindan resistencia al desplazamiento de un bloque de matriz rocosa sobre el plano de la estructura (ver figura 8) y cuyos valores se muestra en la tabla 5).



Figura 8 Grado de rugosidad de las discontinuidades

Tabla 5 Rugosidad grado de valoración

Tipo de rugosidad	Valores
Muy Rugosa	5
Rugosa	4
Ligeramente rugosa	3
Ondulada	1
Suave	0

3.2.4. Abertura

La abertura es la separación entre las paredes rocosas de una discontinuidad o el grado de abierto que ésta presenta, cuando no existe relleno. A menor apertura, las condiciones del macizo rocoso serán mejores y a mayor apertura las condiciones serán más desfavorables (ver figura 9).

En Castellanos se identificó que las aberturas varían de 1 a 7 mm por lo general, aunque en algunos casos es hasta de 60 mm. En la tabla 6 se describe la valoración para la abertura según ISRM.

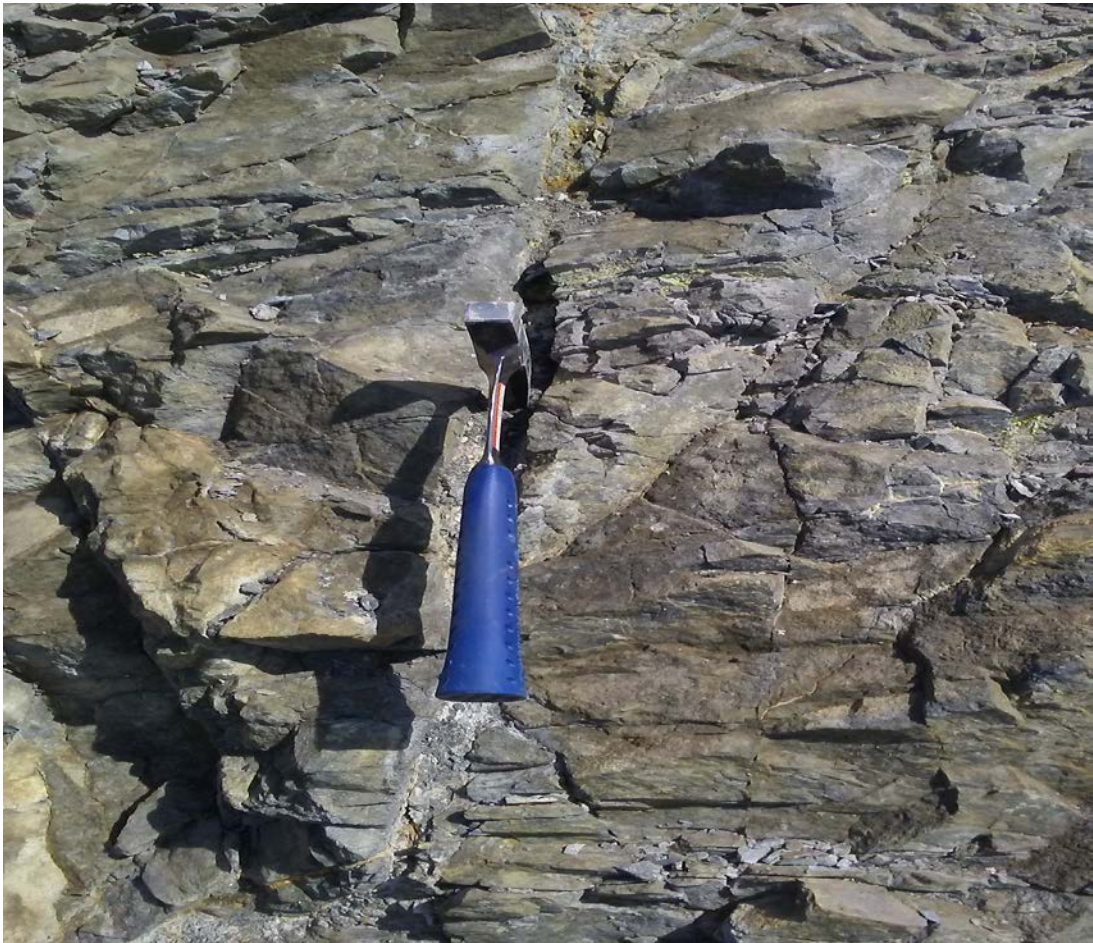


Figura 9 Apertura de las discontinuidades

Tabla 6 Valoración de la abertura según ISRM

Abertura	Descripción
<0.1mm	Muy cerrada
0,1 – 0,25mm	Cerrada
0,25 – 0,5mm	Parcialmente abierta
0,5 – 2,5mm	Abierta
2,5 – 10mm	Moderadamente ancha
>10mm	Ancha
1 -10cm	Muy ancha
10 – 100cm	Extremadamente ancha
>1m	Cavernosa

3.2.5. Relleno

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.

Las discontinuidades pueden tener rellenos de un material de naturaleza distinta a la roca de las paredes de la discontinuidad. Existen una gran variedad de materiales de relleno con propiedades físicas y mecánicas muy variables (Tabla 7). El relleno determina el comportamiento de la discontinuidad, se debe tener en cuenta cuando se trata de materiales blandos o alterados, estos pueden sufrir variaciones en sus propiedades resistentes en un corto plazo, por un cambio en el contenido de humedad o algún movimiento a lo largo de las juntas. Se representa en la figura 10 en una brecha de falla en la Yacimiento Castellanos.

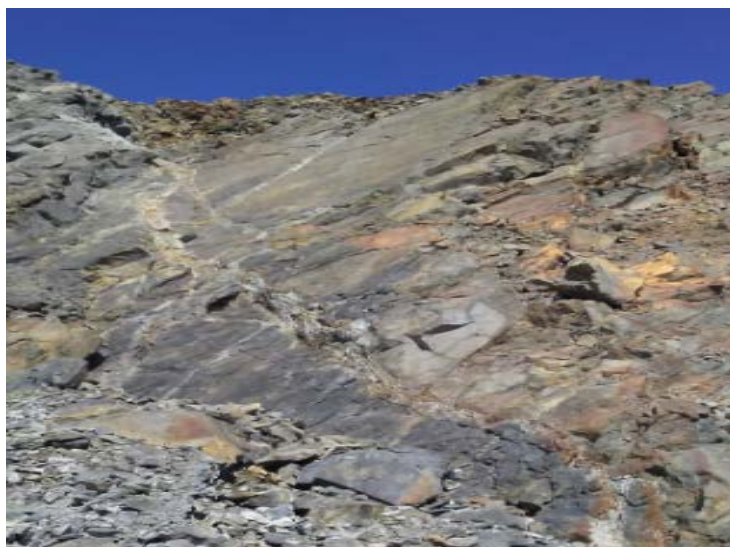


Figura 10 Brecha de falla

Tabla 7 Tipos de relleno

N	Ninguno	X	Oxido	S	Sulfuro
C	Arcilla	Q	Cuarzo	Cc	Calcita
B	Brecha	G	Panizo	Cl	Clorita
V	Varios	O	Otros		

3.2.6. La Meteorización y la Alteración

3.2.7.1. La Meteorización

Aunque el objetivo básico sea analizar las condiciones de del talud a las cuales está sometido al tener un clima húmedo y muy variado. Entre los procesos geológicos que más influyen en las condiciones de resistencia de la roca y que están presentes en todos los yacimientos metálicos, hay dos factores importantes, la meteorización y alteración.

Denominada también intemperización, está relacionada con la modificación que sufre la superficie de la roca o en sus proximidades, debido a la acción de agentes atmosféricos. El grado de la meteorización dependerá de las condiciones climatológicas, morfológicas y la composición de la masa rocosa.

Meteorización

En la zona de estudio existen diferentes existen diferentes tipos de “alteración” o meteorización química, cloritización, venas de cuarzo y calcita, serpentización, etc. La meteorización se ha evaluado con base en los estándares de la ISMR (Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas). Es más intensa en las zonas cercanas a la superficie, en zonas de falla y en determinadas áreas que se encuentran más fracturadas.

3.2.6.2 Alteración

El grado de alteración presente en el sondaje se determina, por medio de la observación visual de los núcleos de perforación, es un parámetro muy importante en cuanto a sus propiedades mecánicas. El área objeto de

estudio presenta ligeramente alterado hasta moderadamente alterado donde se observa en algunas litologías, cuya valoración se representa en la Tabla 8.

Tabla 8 Grado de meteorización en tramos de sondajes de diamantina

Grado de alteración	Tipo	Descripción
I	Inalterado	No aparecen signos de alteración
II	Ligeramente Alterado	La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por alteración.
III	Moderadamente Alterado	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
IV	Altamente Alterado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
V	Completamente Alterado	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo
VI	Suelo Residual	Todo el macizo rocoso se ha transformado en suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material.

3.2.7. Estado de las estructuras

El estado de la pared de una discontinuidad influye en la resistencia al corte, esto depende además del grado de alteración y de la existencia o no de relleno, los procesos de alteración afectan en mayor grado a los planos de

discontinuidad que la matriz rocosa. Para ello existe una clasificación del estado de diaclasas con su respectiva valoración (ver Tabla 9).

Tabla 9 Estado de las diaclasas

Superficies muy rugosas. Sin reparaciones. Relleno duro a muy duro. Bordes sanos y duros	Superficies ligeramente rugosas. Abertura <1mm. Relleno moderadamente consistente a consistente. Bordes duros.	Superficies ligeramente rugosas. Abertura <1mm. Moderadamente alterada. Bordes blandos.	Superficies pulidas o Espejos de Falla. Relleno de panizo <5mm o abiertas de 1- 5 mm. El material de relleno es suave.	Relleno blando > 5mm o abertura >5mm. Roca descompuesta.
25	20	12	6	0

3.2.8. Filtraciones

El agua en el macizo rocoso fluye generalmente por las discontinuidades (permeabilidad secundaria), aunque también se dan filtraciones en rocas permeables a través de la matriz rocosa (permeabilidad primaria). Las filtraciones afectan la estabilidad de las paredes, lavando el relleno que tenga entre las estructuras, disminuyendo su resistencia al corte. En Castellanos se da un valor de 10 (ligeramente húmedo) para agua subterránea, en la tabla 10 se describen los valores.

Tabla 10 Aguas Subterráneas

Estado General	Valoración
Seco	15
Ligeramente húmedo	10
Húmedo	7
Goteado	4
Agua fluyendo	0

3.2.9. Orientación de las discontinuidades

Es la posición de la discontinuidad en el espacio y comúnmente es descrito por el rumbo y buzamiento. En la Yacimiento objeto de estudio se identificaron 3 sistemas de grietas, 1 en el talud y 2 en el talud; número de juntas de 10 - 11, las principales grietas orientadas de NW a SW, con un ángulo de buzamiento de 35 ° a 66 °.

La representación gráfica de la orientación de las diferentes familias de discontinuidades puede realizarse mediante una proyección estereográfica, diagrama de rosetas, bloques de diagrama y símbolos de planos geológicos.

En ambas áreas de estudio se han caracterizado los planos de discontinuidad (estratificación y juntas) más relevantes, que condicionan el comportamiento del macizo. Los parámetros definidos para cada plano han sido: tipo de plano, dirección de buzamiento, buzamiento, espaciado, continuidad, apertura entre otras.

A partir del mapeo realizado en sector del Talud 1 cota 72-60 NE de la yacimiento Castellanos de estructuras mayores (fallas geológicas) y estructuras menores (venillas, fracturas y estratos), las mismas que han sido procesadas con el software DIPS de Rocscience Inc., indicando la presencia de tres sistemas principales. Familia 1 con una dirección de buzamiento 320° y buzamiento 51°, la Familia 2 con dirección de buzamiento 204° y buzamiento 47°, adicionalmente hay otro sistema (estratos S0) que tiene dirección de buzamiento 280° y buzamiento 48°.

La intersección de los sistemas de discontinuidades tanto la familia 1 como familia 2 y las capas (S0) con respecto al talud el cual presenta una dirección de buzamiento 300° y buzamiento 61°, se crean las condiciones para los deslizamientos por falla tipo cuña como se puede observar en la figura 11. Los sistemas de discontinuidades familia 1 y familia 2 en combinación con la orientación del talud crean las condiciones para liberar la masa deslizante de su confinamiento (ver figura 12). Por otro lado, los rellenos blandos de las discontinuidades menores crean también condiciones para la ocurrencia de deslizamientos.

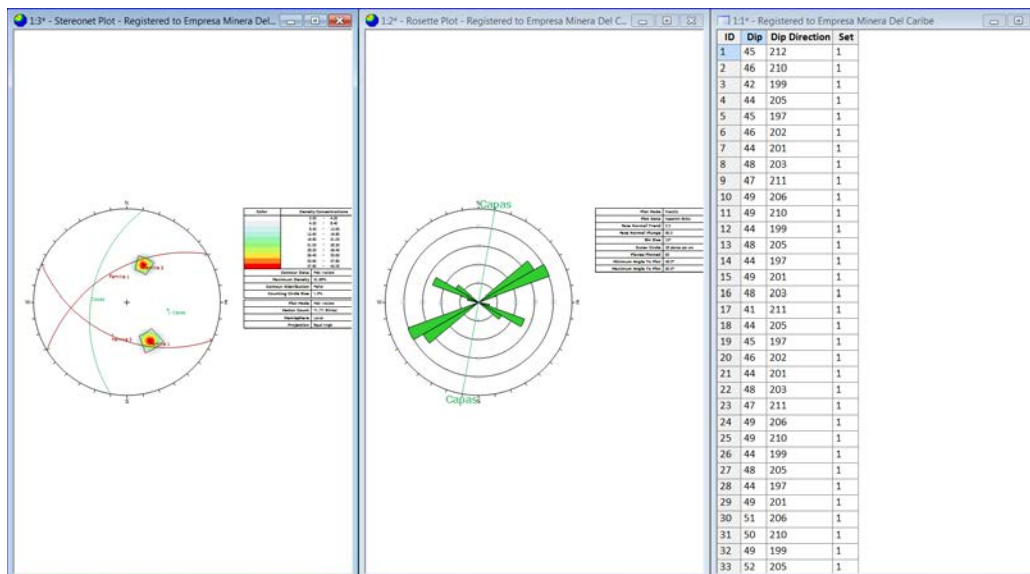


Figura 11 Presentación estereográfica de las familias 1 y 2, talud 1

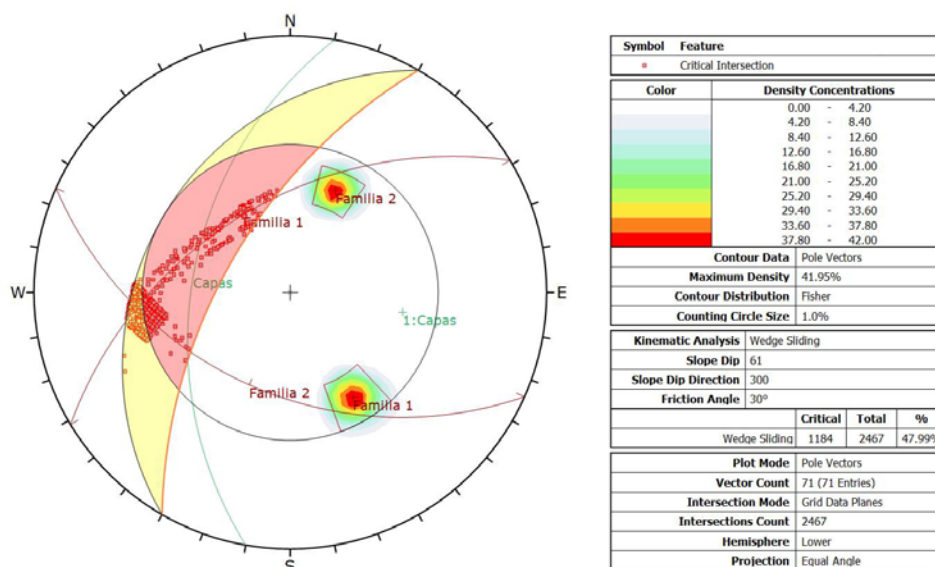


Figura 12 Diagrama de planos principales de estructuras mayores y menores en el talud 1

En el área de estudio para el Talud 2 el cual también se encuentra al NE pero un poco más abajo cota 56-44. Se identificó una sola familia de discontinuidades dominante con dirección de buzamiento 300° y buzamiento 46° y las estratificación de las capas con dirección de buzamiento 347° y buzamiento 50° (ver figura 12).

Teniendo en cuenta la dirección de las capas y la familia identificada con respecto al talud el que tiene dirección de buzamiento 290° y buzamiento 56° se pueden originar fallas tipo planar. Cuando por el progreso del minado sobre las caras de los taludes afloran estas discontinuidades. Los sistemas principales de discontinuidades mayores (fallas) crean las condiciones para liberar la masa deslizante de su confinamiento lateral. Por otro lado, los rellenos blandos de las discontinuidades menores crean también condiciones para la ocurrencia de deslizamientos.

Otro tipo de falla probable que se puede presentar en esta zona es de tipo cuña debido a la intersección de la familia 1, las capas y el talud (ver figura 15).

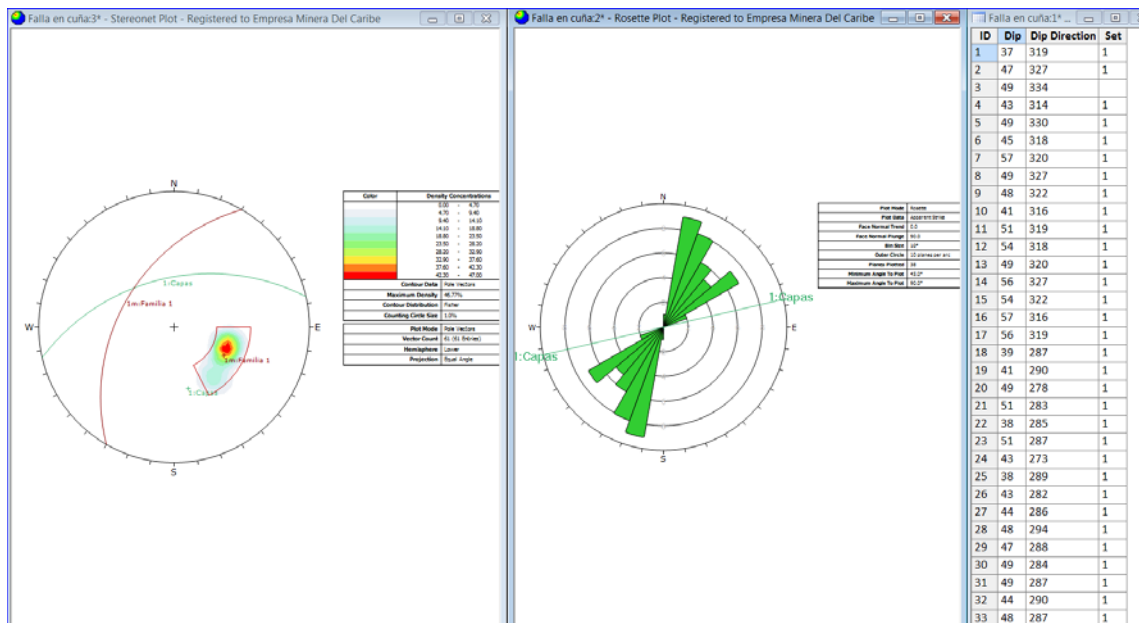


Figura 13 Presentación estereográfica de la familia 1, talud 2

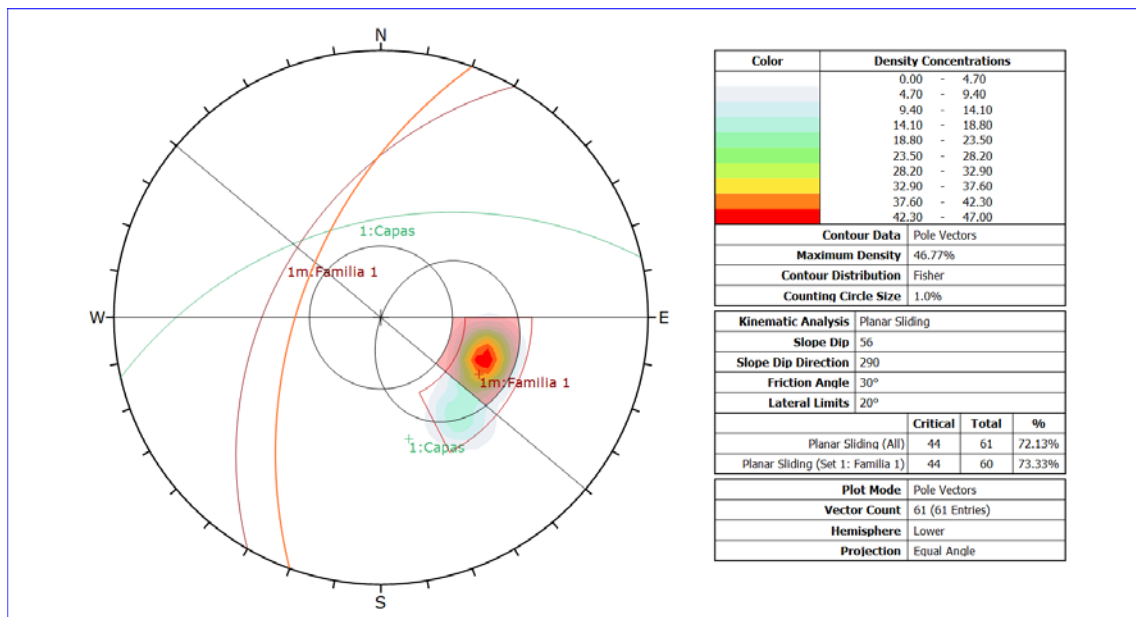


Figura 14 Diagrama de planos principales de estructuras mayores y menores en el talud 2

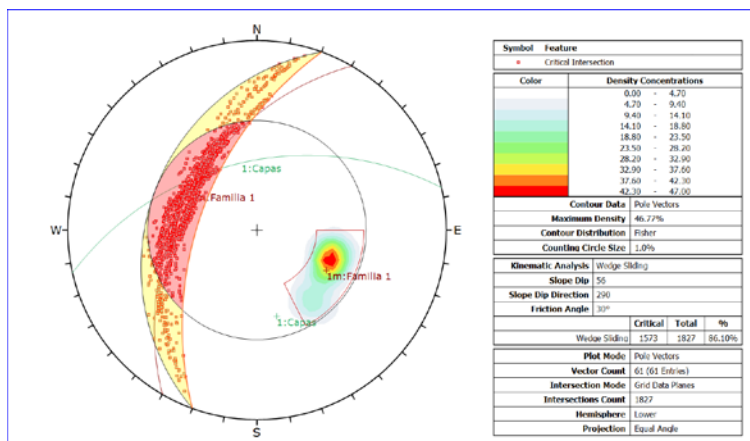


Figura 15 Rotura tipo cuña

3.3. Análisis de las clasificaciones geomecánicas

En el trabajo se realiza el análisis de las principales clasificaciones geomecánicas existentes y teniendo en cuenta el comportamiento del macizo objeto de estudio y la adaptación de estas clasificaciones a este comportamiento.

3.3.1. Clasificación geomecánica (RQD) Deere (1967)

El índice RQD (Rock Quality Designation) se define como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud en su eje, sin tener en

cuenta las roturas frescas del proceso de perforación respecto de la longitud total del sondeo.

Para determinar el RQD en el campo o zona de estudio de una operación minera, existen tres procedimientos de cálculo.

- ✓ A partir de sondajes: se calcula midiendo y sumando el largo de todos los trozos de testigos mayores de 10 cm en el intervalo de testigo de 1.5 m. a partir de los testigos obtenidos en la exploración. Se recomienda utilizar un diámetro de perforación de al menos 54,7 mm.
- ✓ A partir del mapeo de celdas geotécnicas: comprende el cálculo del RQD en función del número de fisuras por metro, determinadas al realizar el levantamiento litológico-estructural (detail line) en el área o zona predeterminada de la operación minera.
- ✓ Tercer procedimiento: se hace el cálculo del RQD en función del número de fisuras por metro cúbico (Jv), determinadas al realizar el levantamiento litológico-estructural en el área o zona predeterminada de la operación minera. Esto se usa para voladura y queda establecido de acuerdo a la relación entre RQD y Jv.

Medición del RQD

El RQD es el grado de calidad del macizo rocoso, y en mapeos geotécnicos se calcula en base al Jv (Número de fracturas por m³). La fórmula matemática:

$$RQD = 115 - 3,3 Jv \quad (8)$$

Siendo:

Jv = Número de juntas por metro cúbico.

En la Tabla 11 se observa la relación propuesta por Deere (1967) entre el valor numérico RQD y la calidad de la roca.

Tabla 11 Relación entre el RQD y la calidad de la roca

RQD	Calidad de roca
0-25 %	Muy Mala
25-50 %	Mala
50-75 %	Regular
75-90 %	Buena
90-100	Muy Buena

3.3.2. Clasificación geomecánica (RMR) Bieniawski (1989)

Bieniawski (1976) publicó una clasificación del macizo rocoso denominada Clasificación Geomecánica o Sistema Rock Mass Rating (*RMR*). Posteriormente este sistema ha sido mejorado hasta llegar a la versión de clasificación de Bieniawski (1989).

Los siguientes 6 parámetros son utilizados para clasificar un macizo rocoso usando el sistema *RMR* de Bieniawski (1989):

1. Resistencia a la compresión uniaxial

- Determinada en laboratorio y ensayos de carga puntual en terreno

2. Valor del RQD

- Se asigna desde puntaje de 20 si este índice es mayor a 90% hasta 3 si es menor a 25%

3. Espaciamiento de discontinuidades

- Se asume que la roca tiene 3 conjuntos de fracturas y se utiliza el sistema más relevante

4. Condición de discontinuidades

- Descripción de “aspereza” de la superficie y del material de relleno. Se usa el más liso y desfavorable

5. Aguas subterráneas

- De acuerdo al flujo de agua en excavación subterránea (si está disponible) o la presión de agua en discontinuidades. Se puede usar también el testigo

6. Orientación de discontinuidades

- Determinada mediante cámaras en sondajes y/o mapeo de piques.

La clasificación final por este método se realiza en intervalos de 20 puntos comenzado por 100 y hasta llegar a 0. Es decir son generalmente usados 5 intervalos, los que también pueden ser denominados con números romanos del I al V en calidad ascendente, para clasificar el macizo rocoso.

Las condiciones de las discontinuidades presentan 5 aspectos a tener en cuenta que son: apertura, rugosidad, persistencia, tipo de relleno y la alteración. En la tabla 12 se muestra la valoración del macizo rocoso según RMR.

Tabla 12 Calidad del macizo rocoso en función a 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

3.3.3. Clasificación geomecánica (MRMR) Laubscher (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 13.

Tabla 13 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. El procedimiento para su determinación puede ser visto en el esquema de la figura 16.

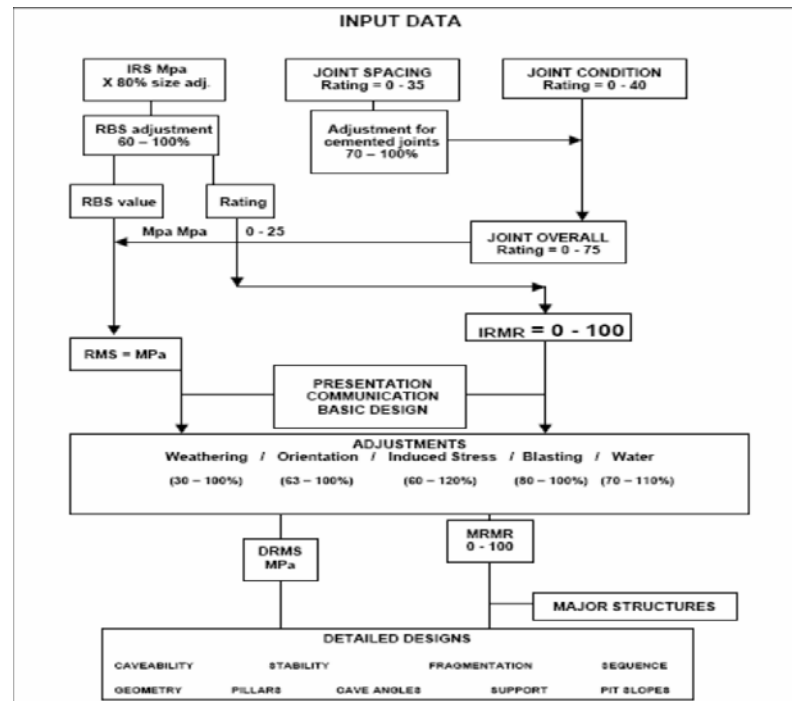


Figura 16 Esquema para la determinación del MRMR (Tomada de Laubscher (2000))

3.3.4. Clasificación geomecánica (Q) Barton (1974)

Barton (1974) del Norwegian Geotechnical Institute, definió el Índice de Calidad de Túneles (Q) para la caracterización geotécnica del macizo rocoso y para la determinación del sostenimiento requerido para túneles. Los valores numéricos del Índice Q varían en escala logarítmica desde 0,001 hasta 1.000, y se obtienen a través de parámetros que se relacionan de la siguiente ecuación:

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

(9)

Dónde:

- RQD: Índice de calidad de roca.

- Jn: Número de sistemas de discontinuidades (Joint Set Number)
- Jr: Número de rugosidad de discontinuidades (Joint Roughness Number)
- Ja: Número de alteración de las discontinuidades (Joint Alteration Number)
- Jw: Factor de reducción por agua (Joint Water Reduction Factor)
- SRF: Factor de reducción por esfuerzos (Stress Reduction Factor)

Para explicar el significado de los parámetros usados y determinar el valor de Q, Barton propone que el primer coeficiente (RQD/J_n), representa la estructura del macizo rocoso, como una medida rudimentaria del tamaño de los bloques o de las partículas; el segundo coeficiente (J_r/J_a), representa la rugosidad y las características de fricción de las paredes de las discontinuidades o de los materiales de relleno y el tercer coeficiente (J_w/SRF) consiste de 2 parámetros de esfuerzos.

El SRF es una medida de la pérdida de carga en el caso en una excavación a través de una zona de falla y de roca con altos contenidos de arcillas, los esfuerzos en roca competente y de las cargas compresivas en rocas plásticas no competentes. El SRF puede ser considerado como un parámetro que considera una corrección por esfuerzos efectivos.

El parámetro Jw es una medida de presión del agua, lo cual tiene un efecto adverso sobre la resistencia al corte de las discontinuidades debido a la reducción del esfuerzo normal (Ver anexos 4).

En la tabla 14 se describe la valoración de la calidad de la roca según Q.

Tabla 14 Calidad del macizo rocoso mediante el cálculo de Q

Q	Calidad
0,001 – 0,01	Extremadamente mala
0,01 – 0,1	Extremadamente mala
0,1 – 1	Muy mala
1 – 4	Mala
4 – 10	Regular
10 – 40	Buena
40 -100	Muy buena
100 – 400	Extremadamente buena
400 – 1000	Excepcionalmente buena

3.3.5. Clasificación según GSI

El índice (GSI) Hoek El Índice de Resistencia Geológica (GSI), y su uso en el criterio de falla de Hoek-Brown ha sido presentado en diversos artículos por Hoek (1994), Hoek et al., (1995) y Hoek-Brown (1997), asociado a macizos de roca dura y equivalente al sistema *RMR*. A partir de 1998 a la fecha se ha desarrollado el sistema GSI con el objetivo de incluir macizos rocosos de mala calidad (Hoek et al., 1998; Marinos y Hoek, 2000 y 2001).

El GSI proporciona un sistema para estimar la disminución de la resistencia que presentaría un macizo rocoso con diferentes condiciones geológicas y se obtiene de la combinación de 2 parámetros geológicos fundamentales, la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades (Ver anexo 9). En la práctica, es usual definir el GSI en rangos de ± 15 puntos. La clasificación se realiza según el siguiente criterio tabla 15.

Tabla 15. Clasificación según GSI de la calidad del macizo

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

Además es posible establecer una relación del GSI con el caso del RMR de 1989, la que ha sido establecida de manera empírica. Si el rating de la condición de aguas es de 15 y el de la orientación de discontinuidades es de 0, se puede observar, siempre de forma aproximada, que se cumple la siguiente igualdad:

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

3.3.6. Clasificación geomecánica (SMR) Romano (1988)

El Índice SMR para la clasificación de taludes se obtiene del índice RMR básico sumando dos "factores de ajuste"; uno que es función de la orientación de las discontinuidades (y que es, a su vez, producto de tres subfactores) y otro conocido como "factor de excavación", el cual depende del método utilizado.

$$SMS = RMR + (F1 + F2 + F3) + F4$$

(11)

- 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:

$$F1 = [1 - \text{sen}(ad) - as]1^2 \quad (12)$$

Donde (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:

$$F2 = [\tan^2(bd)]1^2 \quad (13)$$

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 en la tabla 16.

Tabla 16 Factores de ajuste para el SMR

Caso		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy desfavorable
P	$\alpha_j - \alpha_s$	>30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	<5°
T	$\alpha_j - \alpha_s - 180$					
P/T	F1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
P	β_j	<20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	>45°
	F2	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
T	F2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
P	$\beta_j - \beta_s$	>10°	10°-0°	0°	0°-(-10°)	<-10°
T	$\beta_j + \beta_s$	<110°	110°-120°	>120°	-50	-50
P/T	F3	0,00	-6,00	-25,00		
		Método de Excavación				
	Talud Natural	Precorte	Voladura suave	Voladura normal	Voladura deficiente	Excavación mecánica
F4	15	10	8	0	-8	0

La estabilidad del talud queda definida en la siguiente tabla 17.

Tabla 17 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

Por consideraciones finales tenemos el siguiente resumen:

De acuerdo a la revisión de los diferentes métodos de clasificación del macizo rocoso, podemos establecer las siguientes consideraciones:

- El RQD es un parámetro direccional del grado de fracturamiento de un testigo de roca, por lo tanto no debe ser considerado como una clasificación del macizo, sino como un valor necesario para determinar la clasificación en cualquiera de los cinco métodos propuestos.
- En cuanto al MRMR se puede aseverar que se diseñó específicamente para establecer las condiciones de soporte en excavaciones subterráneas, por lo que entra en cierta ambigüedad cuando se trata de bancos superficiales. Además para macizos de calidad pobre ($MRMR < 40$) la clasificación puede ser altamente influenciada por el espaciamiento de las discontinuidades y la condición de aguas debido a la alta importancia que tienen estos parámetros en su determinación, tal y como se puede apreciar en la figura 16.
- El Q de Barton fue principalmente diseñado con motivo de entregar una recomendación en la construcción de túneles en obras civiles, y su aplicación en minería a cielo abierto es muy reducida. No considera el espaciamiento de las discontinuidades ni la Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de la roca intacta en forma directa, sólo lo hace a través del RQD.
- Respecto al índice SMR, se puede aseverar que para el caso de las labores a cielo abierto es un método óptimo, debido a que considera la orientación de los planos de discontinuidad con respecto a la cara del talud.
- El Índice de Resistencia Geológica (GSI, Hoek (1994), resulta el método de caracterización más adecuado para el macizo objeto de estudio ya que considera eficientemente tanto la estructura del macizo como la condición de las discontinuidades. Además como apoyo se usará el RMR de Bieniawski (1989), el cual será obtenido a partir de los valores entregados por la caracterización geotécnica de tramos de sondajes y de los estimados a partir del GSI.

La figura 17 muestra la frecuencia con la que es utilizado el GSI respecto a las demás clasificaciones por lo que se puede observar que seguido de la clasificación RMR es una de las clasificaciones más usadas en la minería a cielo abierto.

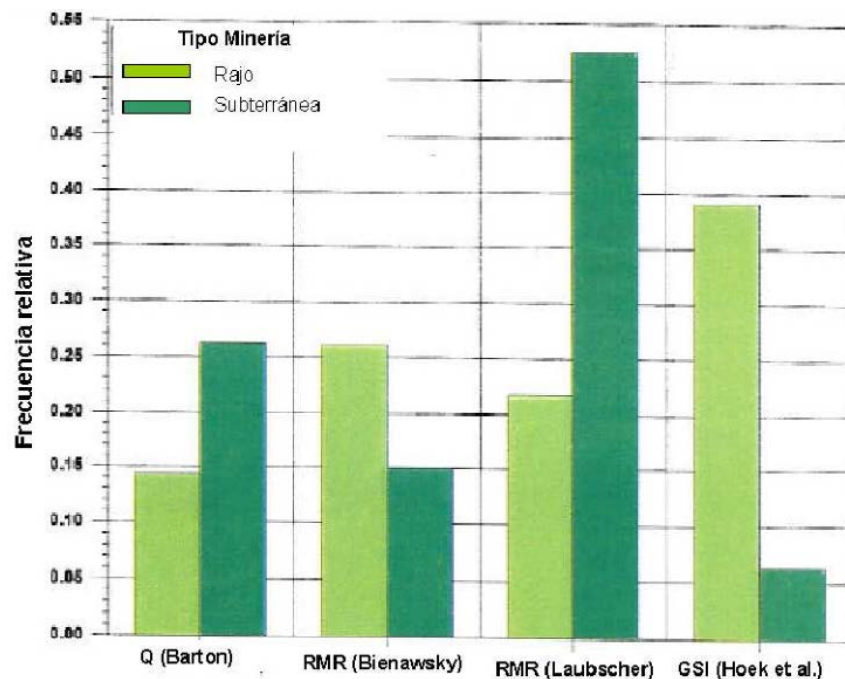


Figura 17 Uso de métodos de clasificación según tipo de minería.

De acuerdo al análisis desarrollado a las diferentes clasificaciones geomecánicas y las características estructurales que presenta el sector este del yacimiento castellanos, se muestran los valores obtenidos de RMR y GSI para los tipos de rocas que conforman el macizo objeto de estudio (tabla 18).

Tabla 18 Resultados de la evaluación del macizo rocoso

Método	Descripción	Resultado
RMR (Bieniawski)	Valoración RMR=52	CALIDAD DEL TALUD 1 Y 2 ES MEDIA
Índice de resistencia geológica	Valoración GSI=52	CALIDAD DEL TALUD 1 Y 2 ES MEDIA

3.4. Determinación de la estabilidad con el empleo de softwares

Tabla 19 Parámetros geomecánicos del Macizo Rocosó

			Dominio Geológico					
Clasificaciones			Arenisca subyacente	Arenisca suprayacente	Pizarra	Brecha	Caliza	Mudstone/ Limolita
Clasificación de macizo rocoso (1976) (CSIR)	RMR	-	55	50	45	55	50	55
Índice de resistencia geológica	GSI	-	55	50	45	55	50	55
Constante de Hock-Brown para roca intacta	m_i	-	17	17	6	19	12	7
Constante de Hoek Brown para macizo rocoso	m_b	-	3,408	2,851	0,842	3,809	2,012	1,403
Constante de HoekBrown	s	-	0,0067	0,0039	0,0022	0,0067	0,0039	0,0067
Cohesión de macizo rocoso	c'	MPa	1,752	1,60	0,967	1,647	1,123	1,385

A partir del análisis hecho en el software DIPS de Rocscience Inc y después de determinar los tipos de fallas probables en ambos casos (talud 1 y talud 2). Se procede a realizar un análisis en el caso del talud 1 ver figura 18 y 19, utilizando el software Sewdge y para el talud 2 se utiliza este software y además del RocPlane, debido que en el talud 2 se identificaron la ocurrencia de fallas tipo planar y en cuña (ver figuras 18 y 21). En ambos casos de estudio se han considerado dos casos condición drenada y no drenado.

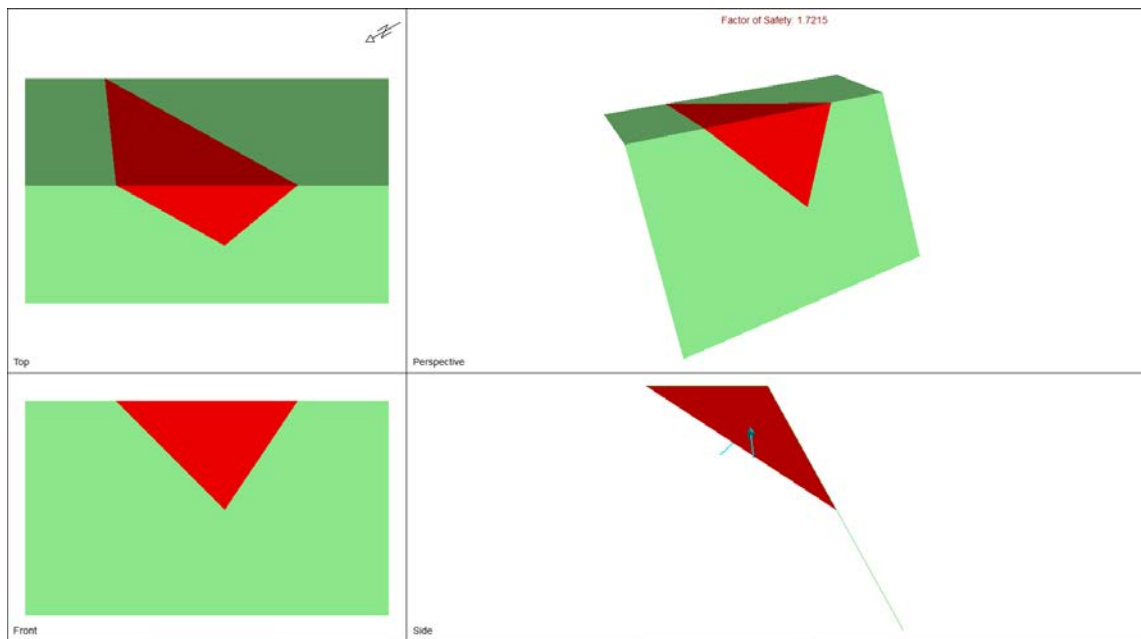


Figura 18 Análisis de estabilidad talud 1 condiciones no drenadas

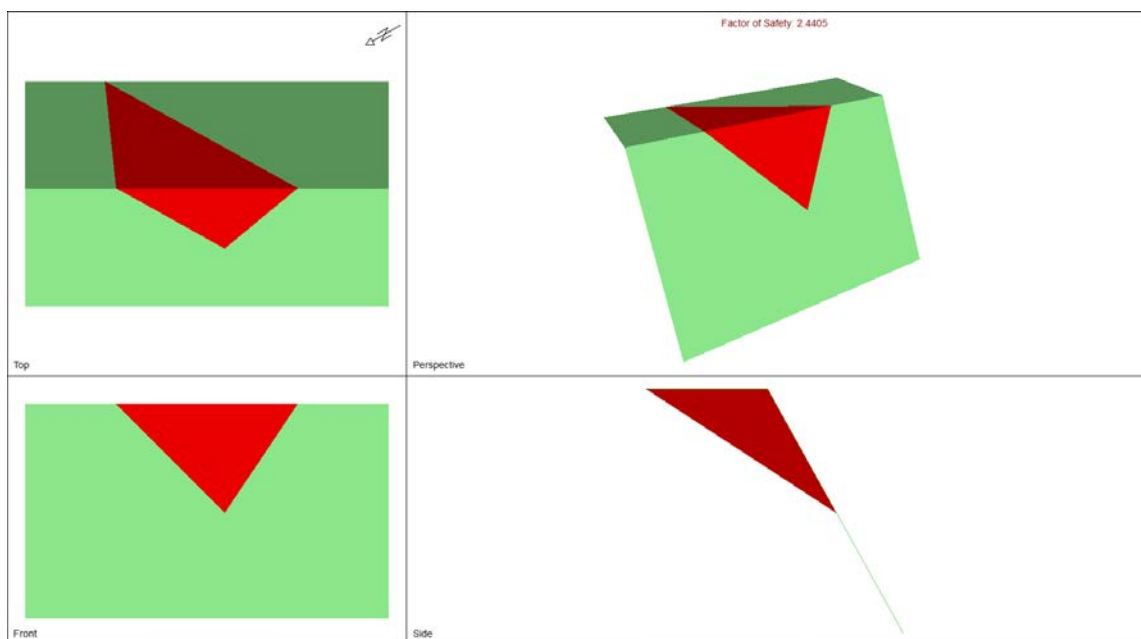


Figura 19 Análisis de estabilidad talud 1 condiciones drenadas

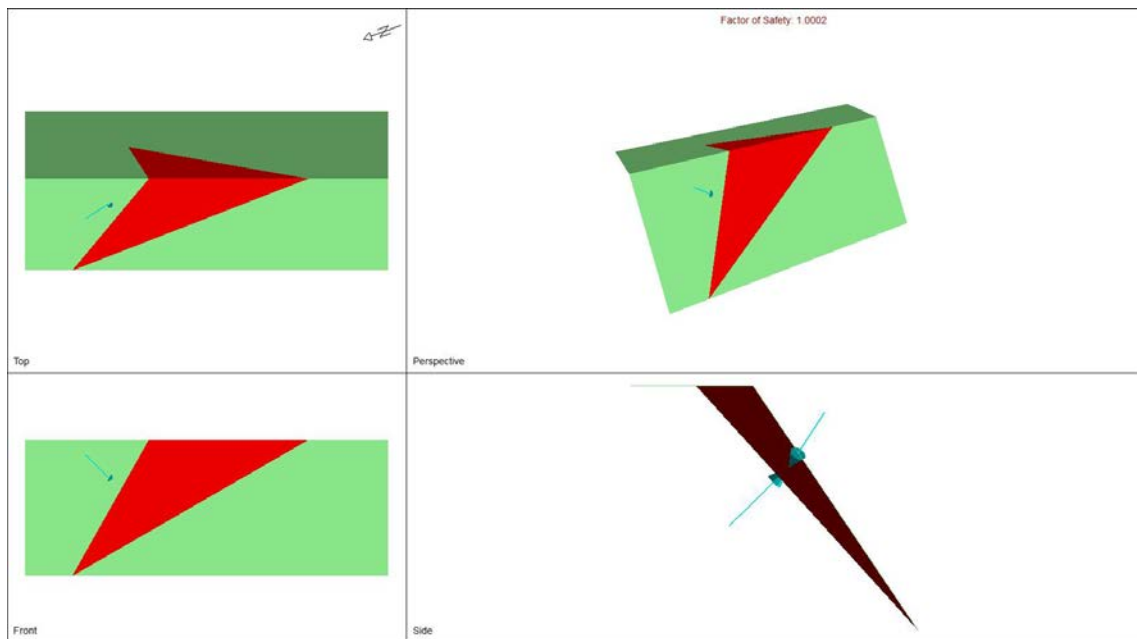


Figura 20 Análisis de estabilidad talud 2 condiciones no drenadas

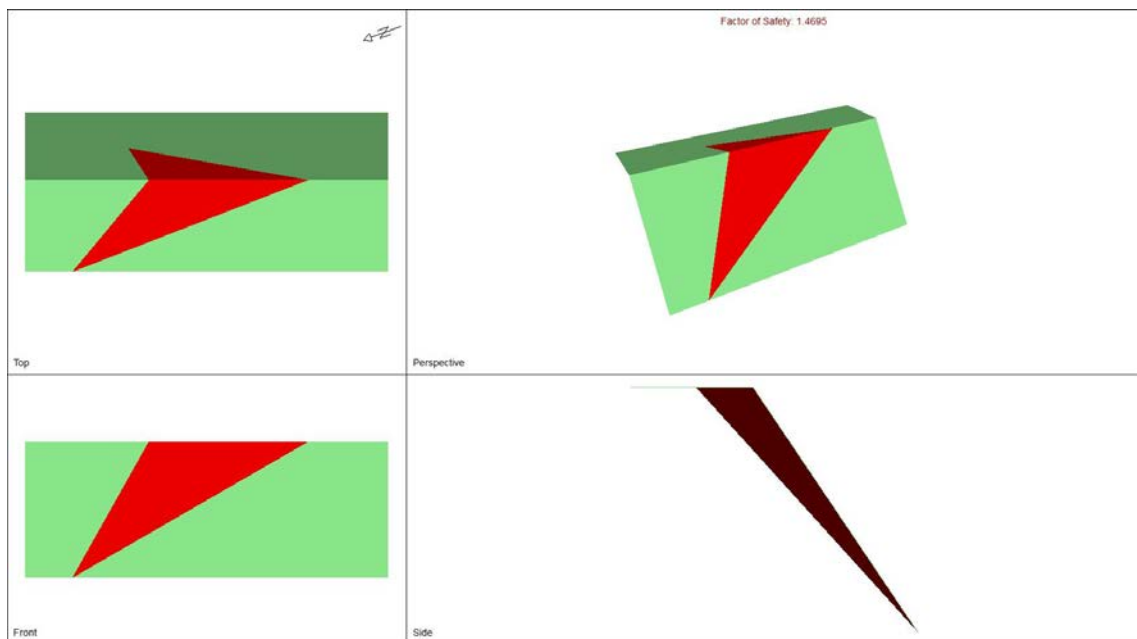


Figura 21 Análisis de estabilidad talud 2 condiciones drenadas

El análisis por deslizamientos tipo cuña, hecho para condiciones no drenadas en un talud 1 de 12 m indica un Fs de 1.75 para una cohesión de 12 kPa y un ángulo de fricción de 30. El resultado del análisis para condiciones cecas son de un Fs de 2.4. En ambos casos el talud presenta un Fs superior a 1.3 lo que nos indica que el mismo es estable. En el talud 2 de 12 m también en estado no drenado con una cohesión de 12 kPa y un ángulo de fricción de 30 el Fs es

1 lo que indica que para este caso la presencia de agua desempeña un factor importante en la inestabilidad del mismo. En condiciones cecas es F_s es de 1.4 por lo que en este caso es estable.

Considerando los elementos geométricos del talud se ha llevado a cabo el análisis de estabilidad utilizando el software ROCPLANE de Rocscience Inc. Se han considerado dos casos: talud 12 m de altura para condiciones secas y para condiciones no drenadas. Los resultados se presentan en las figuras 20 y 21.

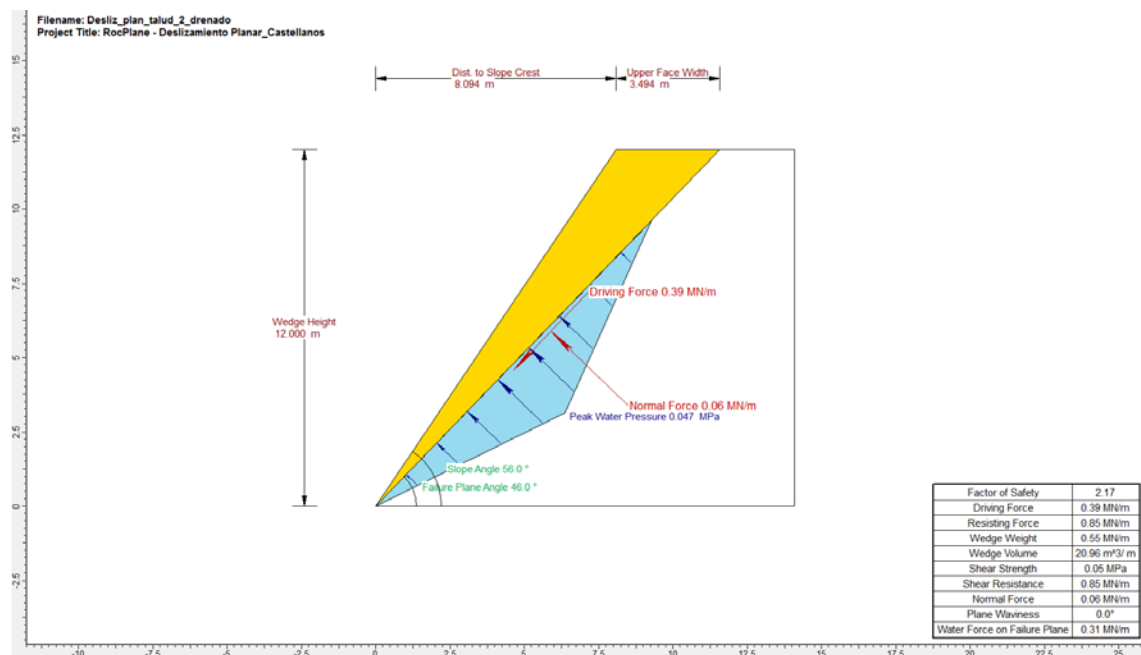


Figura 22 Análisis de estabilidad talud 2 condiciones no drenadas

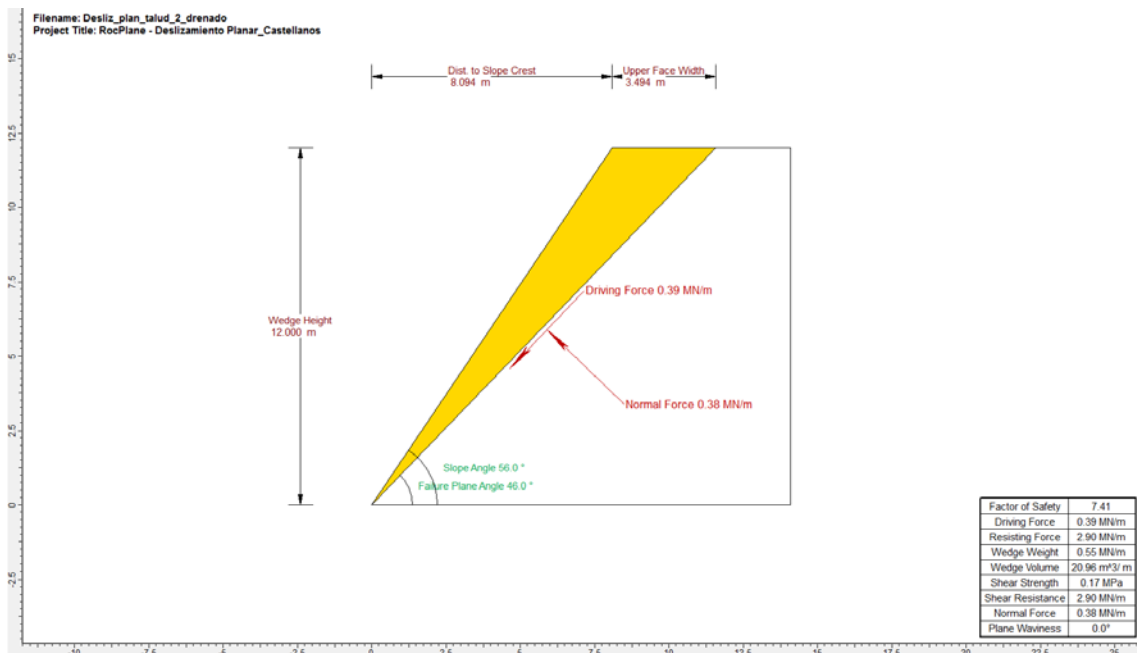


Figura 23 Análisis de estabilidad talud 2 condiciones drenadas

La superficie de falla es 46° , se tuvo en cuenta para esta superficie de falla el buzamiento de la familia 1 identificada en la zona del talud 2 la cual tienen un buzamiento muy similar al que presenta el talud. El resultado del análisis para talud 2 de 12 m de altura, en condiciones secas (Figura), indica un factor de seguridad (FS) de 7.41 y en condiciones no drenadas (Figura 7) 2.17 (equilibrio límite), para una cohesión de 12 kPa y un ángulo de fricción de 30° . En ambos casos los Fs son superiores a 1.3 por lo que el talud es estable.

CONCLUSIONES

1 Se realizó el análisis de las características ingeniero-geológicas y la evaluación del comportamiento mecánico estructural del macizo, empleando las clasificaciones geomecánicas se eligió el método GSI y RMR de Bieniawski de donde se obtiene que la calidad del macizo rocoso de la corta este, yacimiento castellano es de calidad media.

2 Aplicando los softwares RocPlane y Sewdge teniendo en cuenta los métodos para las clasificaciones geomecánicas se obtuvo como resultado:

- Para el talud número 1 el análisis para deslizamientos tipo cuña, hecho para condiciones no drenadas en un talud 1 de 12 m indica un F_s de 1.75. El resultado del análisis para condiciones cecatas son de un F_s de 2.4. En ambos casos el talud presenta un F_s superior a 1.3 que es la exigencia mínima de la empresa, lo que nos indica que el mismo es estable.
- En el talud 2 de 12 m también el análisis para deslizamientos tipo cuña en estado no drenado el F_s es 1 lo que indica que para este caso la presencia de agua desempeña un factor importante en la inestabilidad del mismo y al encontrarse en límite de inestabilidad es necesario su constante monitoreo. En condiciones cecatas F_s es de 1.4 por lo que en este caso es estable al ser superior a 1.3 también es estable.

3 Es importante señalar que a pesar de que en sentido general estos taludes son bastante estables los mismos no son permanentes. En el proceso de explotación hay una fase más (Fase 6) en la cual se pretende ir más atrás en el diseño lo que provocará que estos taludes desaparezcan y esto permitirá corregir algunos parámetros geométricos en el diseño de los nuevos taludes finales; además de que al realizar el proceso de voladura en esta área este estudio ayudara a tener una mejor concesión de la dirección por la cual se realizar la fase 6.

RECOMENDACIONES

Mantener un monitoreo sistemático durante la explotación, de forma tal que se puedan mitigar las posibles manifestaciones de pérdida de estabilidad en los taludes.

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.

BIBLIOGRAFIA

Ágreda, E. A. (2005). *Estabilidad de Taludes*. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya.

Apuntes de Minería a Rajo Abirto. (s.f.). Santiago de Chile: Universidad de Chile.

Bosala, M. E. (2015). Determinación de la precisión del modelo digital del terreno en los yacimientos lateríticos con pendientes mayores de 30 %. Moa, Cuba: ISMMM.

Bruce, J. (1987). *Parámetros para el diseño de taludes*.

Byrne. (1998). *Estructuras para estabilidad de taludes*.

Castro, R. P. (2010). Evaluación de riesgos por deslizamientos en taludes y laderas del sector Oeste del municipio Moa. Moa, Cuba: ISMMM.

Cornforth, D. H. (2005). *Landslides in practice : investigation, analysis, and remedial / preventive options in soils*.

Delgado, V. M. (2015). Evaluación de la vulnerabilidad por deslizamientos de taludes y laderas del municipio Sagua de Tánamo. Moa, Cuba: ISMMM.

Estaire, J., & Olivenza, G. (2013). Factores de seguridad en la estabilidad de taludes de acuerdo con el eurocódigo EC-7 y el anejo nacional español. (E. Alonso, J. Corominas, & M. Hürliemann, Edits.) *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*.

Fredy, A. B., & Valeriano, N. (2015). Caracterización geotécnica y modos de falla estructural en el talud en roca del cerro Espinal Juliaca. Puno, Perú: Universidad nacional del Altiplano.

Ganepola, G. C. (2013). Cálculo de taludes de explotación para préstamos de materiales de construcción en el municipio Pinar del Río, Cuba. *Ciencia & Futuro*.

García, R. r. (2014). Análisis numérico del mecanismo de falla en macizos rocosos fracturados considerando el efecto escala. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

Japón, D. d. (2008). *Pendientes típicas para taludes en corte* . Japón.

Köppen, W. P. (1900). *World Map of the Köppen-Geiger climate classification*. Alemania.

Lacaba, R. G., Carmenate, Y. A., Aguilera, Y. H., Ricardo, J. R., & Yoel, P. G. (2001). Estabilidad de taludes en suelos lateríticos del yacimiento Punta Gorda aplicando criterios de rotura. *Geo.br*.

Lavista, M. M., & Fernández, P. M. (2013). Métodos empírico-mecanista empleados para el cálculo del factor de seguridad para la estabilidad de taludes.

Lauzier, G, 2016. Proyecto de la concesión de explotación y procesamiento polimetálicos castellanos 15001e .

León, R. R. (2018). *Diagnóstico Integral de la cantera de materiales para la construcción Peñas Altas uno de la provincia Santiago de Cuba*.

López, A. R. (2006). Estabilización del talud de la costa verde en la zona del distrito de Barranco. Lima, Perú: Pontífica Universidad Católica del Perú.

López, G. J. (Junio de 2016). *Tipos de Subdrenaje o Drenajes Subterráneos*. Mérida, Venezuela.

Manrique, N. L., & Montiel, C. S. (2016). Comportamiento de parámetros geomecánicos en taludes compuestos por suelos expansivos. Colombia: Universidad la Gran Colombia.

Manual de Drenaje. (2006).

Melentijevic, S. (2005). Estabilidad de taludes en macizos rocosos con criterios de rotura no lineales y leyes de fluencia no asociada. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

Milán, Y. V. (Julio de 2010). Evaluación de riesgos por deslizamientos en taludes y lades del sector este del municipio Moa. Moa, Cuba: ISMMM.

Muachissaco, C. A. (2017). Evaluación de la estabilidad de los taludes en la cantera cantera de calizas Urbano Noris. Moa, Cuba: ISMMM.

Olajesu, O. A. (2017). Criterios para la evaluación del comportamiento mecánico estructural del macizo rocoso con el empleo de la modelación numérica.

Olivera, L. D. (2013). Evaluación de riesgos por deslizamientos en taludes y laderas en el municipio Mayarí. Moa, Cuba: ISMMM.

Orosco, A. M. (Abril de 2009). Confiabilidad en estabilidad de taludes. Ciudad México, Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.

Pomareda, E. S. (2016). Estudio geotécnico y diseño del talud final de una cantera a cielo abierto aplicando modelos numéricos. Lima, Perú.

Pomareda, E. S. (2016). Estudio geotécnico y diseño del talud final de una mina a cielo abierto aplicando modelos numéricos. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Ricardo Valiente Sanz, S. S. (2015). Estabilidad de Taludes: Conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo. *CIVILIZATE*, 7.

Sánchez, L. E. (1995). *Manual de Drenaje*.

Silvestre, J. (2017). Evaluación de las características geomecánicas de la mina Antamina.

Sottorff, N. A. (Marzo de 2016). Diseño sísmico de taludes en arena por medios de métodos basados en desempeño. Santiago de Chile, Chile.

Suarez, J. (2008). *Deslizamientos: Análisis Geotécnico* (Vol. 8).

Suarez, J. (2008). Técnicas de Remediación. Cap. 8.

Suárez, M. H. (2015). Evaluación de la vulnerabilidad por deslizamientos de taludes y laderas en el consejo popular Farallones del municipio Moa. Moa, Cuba: ISMMM.

Torres, J. L. (Octubre de 2014). Creación de una herramienta computacional para el análisis de estabilidad de taludes (Naturales o Artificiales). Loja, Ecuador: Universidad Técnica Particular de Loja.

Yamacho, L. M. (15 de Julio de 2015). evaluación de la susceptibilidad geotécnica en la cantera para áridos Rubén Rodríguez. Moa, Cuba: ISMMM.

ANEXOS

Anexo 1. Vista de los taludes



Anexo 2: Tabla de descripción del Mapeo Geotécnico

Continuidad		GRADO DE ALTERACIÓN		TIPO DE ROCA		MODOS DE RUPTURA	
<1 m	5	Suelo residual	A	HG	Homfels Gris	1	Ruptura en Cuña
1-3 m	4	Completamente alterado	B	HC	Homfels Café	2	Ruptura Planar
3-10 m	2	Altamente alterado	C	HDP	Homfels Diópsida	3	Vuelco (Toppling)
10-20 m	1	Moderadamente alterado	D	IQM	Intr. Cuarzo Monzonítico	4	Ruptura Rotacional
>20 m	0	Ligeramete alterado	E	M	Marmol	5	Desprendimientos
Abertura		Fresca sin intemperismo	F	C	Caliza	6	Step Wedge o Path
Nada	5	DES. MACIZO ROCOSO (RMD)		BH	Brecha Heterolítica	TIPO DE ESTRUCTURA	
< 0.1 mm	4	Frágil y disgregable	10	MDP	Marmol Diópsida	JS	Juego de Diaclasas
0.1-1.0 mm	2	Bloques Preformados	20	NRD	Endo Rosa Diópsido	SJ	Diaclasa Simple
1-5 mm	1	Totalmente Masivo	50	NC	Endo Café	B	Estratificación
> 5 mm	0	ESPACIA. DEL FRAC. (JPS)		NR	Endo Rosa	CT	Contacto
Rugosidad		Poco (<0.1m)	10	XDP	Exo Diópsido	FT	Falla
Muy Rugosa	5	Intermedio (0.1 a 1.0m)	20	XV	Exo verde	CF	Contacto Fallado
Rugosa	4	Alto (>1.0m)	50	XC	Exo café	BZ	Zona de Ruptura
Ligeramente Rugosa	3	ORIEN. FRACTURAS (JPO)		XW	Exo Wollastonita	SZ	Zona de Cizallamiento
Ondulada	1	Horizontal	10	XWC	Exo Wollastonita Café	P	Plegamiento
Suave	0	Buz. hacia la cara del banco	20	SC	Indeterminado Café	JP	Diaclasas Plegadas
Alteración		Dir. normal a la cara del banco	30	VALORES DE JPO			Tipo Relleno
Inalterada	5	Buz dentro de la cara del banco	40	Buz. hacia fuera		Buz. hacia dentro	N Ninguno
Ligeramente alterada	4	CONTROL ESTRUCTURAL		0	20	90	30 X Oxido
Mod alterada	3	1	Ningún Control	10	21	80	31 S Sulfuro
Muy alterada	2	2	Débil: Tres Discontinuidades	20	22	70	32 C Arcilla
Descompuesta	0	3	Moderado: Cuña y Planar	30	23	60	33 Q Cuarzo
Relleno		TIPO DE EXCAVACION		40	24	50	34 Cc Calcita
Ninguno	5	Talud Natural	15	50	26	40	36 B Brecha
Duro <5mm	4	Precorte	10	60	27	30	37 G Panizo
Duro >5mm	2	Voladura Suave	8	70	28	20	38 V Varios
Blando <5mm	1	Voladura o Excavación Mecánica	0	80	29	10	39 O Otros
Blando >5mm	0	Voladura Deficiente	-8	90	30	0	40
RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA					CLASES DE RMR		
Extremadamente Blanda, marcada por la uña				R0 - 0	1.0	I: <20	Muy Pobre
Muy blanda, arañada por la navaja o desmenuzada con golpes de martillo				R1 - 1	2.5	II: 21 - 40	Pobre
Roca blanda, muy difícil de arañar con navaja y marcada con un golpe firme				R2 - 2	4.0	III: 41 - 60	Regular
Moderadamente Resistente, fracturada con un solo golpe firme de martillo				R3 - 4	5.5	IV: 61 - 80	Bueno
Resistente, más de un golpe de martillo para fracturar la roca				R4 - 7	7.0	V: 81 - 100	Muy Bueno
Muy Resistente, muchos golpes de martillo para fracturar la roca				R5 - 12	8.5		
Extremadamente Resistente, solo se puede arañar con el martillo				R6 - 15	10.0		
NIVELES DE DAÑO PRODUCIDOS POR VOLADURA							
CONDICIONES OBSERVADAS EN EL TALUD			NIVEL DE DAÑO	DAÑO DE CRESTA			
Diac. cerradas, relleno no movilizado, >75°, cañas, uñas.			Ligero (1)	1 a 2 metros			
Diac. peque. abiertas por vola. lig. desplazadas, >65°, cañas, uñas			Moderado (2)	2 a 3 metros			
Diac. abiertas y despla. >65°, suave, grie. radiales, excava. forzada			Fuerte (3)	3 a 4 metros			
Frente fract. diac. abiertas, bloq. remov. >55°, sobreexcavación			Severo (4)	4 a 5 metros			
Mat. fino, bloq. movili, 37°>55°, frente irregu, fuerte sobreexcava.			Extremo (5)	Mayor a 5			
COMPAÑÍA MINERA ANTAMINA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MINA							

Anexo 3. Tabla de Índice de resistencia geológica (GSI) para macizos rocosos fracturados (Hoek y Marinos, 2000)

ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		CONDICIONES DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES				
		MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA
		CALIDAD DECRECIENTE DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES →				
	INTACTO O MASIVO Muestras intactas de roca o macizos rocosos masivos con pocas discontinuidades muy espaciadas.	90			N/A	N/A
	FORMADO POR BLOQUES Macizo rocoso consistente en bloques cúbicos delimitados por tres familias de discontinuidades, con los bloques bien encajados.	80	70			
	FORMADO POR MUCHOS BLOQUES Macizo rocoso formado por bloques angulares de muchas caras delimitados por cuatro o más familias de discontinuidades. Los bloques están encajados pero sólo parcialmente.		60	50		
	FORMADO POR MUCHOS BLOQUES, DESTORSIONADO Y BANDEADO Plegado con muchos bloques angulares formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Planos de estratificación o de esquistosidad persistentes.			40	30	
	DESINTEGRADO Macizo rocoso muy fracturado con una mezcla de bloques angulares y redondeados débilmente encajados.				20	
	LAMINADO Y CIZALLADO Debido a la existencia de numerosos planos débiles muy próximos de esquistosidad o de cizalla, no existen bloques.	N/A	N/A			10

↑ ENCAJE DECRECIENTE ENTRE LOS TROZOS DE ROCA ↓

Anexo 5: Tabla para la determinación del GSI de (Hoek y Marinos, 2000)

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA PARA BLOQUES DE ROCA DIACLASADOS A partir de la descripción de la estructura y las condiciones del macizo rocoso, escoger el recuadro más adecuado de la carta adjunta. Estimar el valor promedio del GSI a partir del contorno. No intentar hacerlo con precisión. Por ejemplo, valorizar un rango de 36 a 42 es más realista que valorizarlo por ejemplo GSI=38. Es también importante reconocer el Criterio de Hoek y Brown debería solamente ser aplicado para macizos rocosos donde el tamaño de bloques individuales o fragmentos es pequeño en comparación con el tamaño de la excavación bajo consideración. Cuando los tamaños de bloques individuales son mayores que un cuarto del tamaño de la excavación, la ruptura sería estructuralmente controlada y el Criterio de Ruptura de Hoek y Brown no debería ser utilizado.		DISMINUCIÓN DE LA CALIDAD DE LAS SUPERFICIES →				
ESTRUCTURA		MUY BUENO - Superficies muy rugosas, frescas e intactas.	BUENO - Superficies rugosas, ligera alteración supérficia, en las superficies se observa fierro.	REGULAR - Superficies onduladas, moderado intemperismo y muestras de alteración.	POBRE - Espejo de falla, superficies con fuerte alteración supérficia con una capa compacta o fragmentos angulares.	MUY POBRE - Espejo de falla, superficies fuertemente alteradas con capas de arcilla suave o relento.
DISMINUCIÓN DEL ENTRELAZAMIENTO DE LOS FRAGMENTOS DE ROCA ↓	 INTACTA O MASIVA - Muestra de roca intacta o masiva en roca in situ con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.	90	80	N/A	N/A	N/A
	 BLOQUES - Macizo rocoso bien entrelazado y no perturbado constituido por bloques de roca de forma cúbica formado por tres sistemas de discontinuidades.	70	60			
	 MUCHOS BLOQUES - Entrelazados, el macizo se encuentra parcialmente perturbado, bloques de roca multicara y formados por 4 o más sistemas de discontinuidades.	50	40			
	 BLOQUES / DISTURBADO - Macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formados por muchas intersecciones.	30				
	 DESINTEGRADO - Pobremente entrelazado, macizo rocoso fuertemente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados.	20				
	 FOLIADO Y LAMINADO - Tectónicamente cizallado y plegado. Carece de bloques debido a la esquistosidad prevaleciendo sobre otras discontinuidades.	N/A	N/A			10