

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOMECÁNICA DE LOS  
MACIZOS ROCOSOS DE LA SECCIÓN GUATIRE-  
CAUCAGUA DE LA AUTOPISTA RÓMULO BETANCOURT,  
ESTADO MIRANDA**

Trabajo especial de Grado  
Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
para optar al Título de Ingeniero Geólogo  
Por el Br. Daniel Azuarte Mendoza

Caracas, junio 2004

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOMECÁNICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS DE LA SECCIÓN GUATIRE- CAUCAGUA DE LA AUTOPISTA RÓMULO BETANCOURT, ESTADO MIRANDA**

TUTOR ACADEMICO: Prof. Franco Urbani

COTUTOR ACADÉMICO: Prof. Feliciano De Santis

Trabajo Especial de Grado  
Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
para optar al Título de Ingeniero Geólogo  
Por el Br. Daniel Azuarte Mendoza

Caracas, junio 2004

Caracas, junio de 2004

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Daniel Alfredo Azuarte Mendoza, titulado:

**“Caracterización geológica y geomecánica de los macizos rocosos  
de la sección Guatire – Caucagua de la Autopista Rómulo  
Betancourt, estado Miranda”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geólogo, y sin que ello signifique que se hacen solidario con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Ing. Víctor León  
Jurado

Prof. Ing. Omar Márquez  
Jurado

Dr. Franco Urbani  
Tutor Académico

Prof. Ing. Feliciano De Santis  
Cotutor Académico

*L*e dedico muy especialmente este trabajo a Dios primero, por permitir que este logro sea parte de un plan de vida que gracias a su misericordia, he podido llevar a cabo de la manera que he deseado. Lo he querido y así lo he logrado.

*También le dedico este trabajo amorosamente a mis padres, Adriana y Tirso,...qué se puede decir de ellos, que me han dado de todo cuanto han podido, hasta el don de ver el sol cada día desde mi ventana. No se puede pedir más que eso.*

*Entre ellos, he podido disfrutar de la mejor excursión geológica de toda una existencia: la vida misma en la Tierra.*

*Daniel*

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera Expresar mis más profundos agradecimientos a:

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, Alma Mater que me a acogido durante todos los años de mi formación académica profesional, enseñándome aspectos de la vida que ninguna clase formal pudiera enseñar.

A la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, que se a convertido en una de mis casas adoptivas, y en la que he pasado momentos tan gratos y he conocido a gente tan valiosa a la cual poder llamar “amigo (a)”. Es allí, en esa escuela que considero propia, donde aumentó mi pasión por la geología, y el encanto que le tengo a la naturaleza y a su sabiduría.

A mi tutor académico, el Dr. Franco Urbani, que me dio siempre su sabio consejo y guía para que este trabajo cumpliera su objetivo. Él que siempre estuvo dispuesto a atenderme sin importar la hora, el día ni el momento. Gracias por su gran ayuda, siempre lo tendré presente como ejemplo del investigador nato que trabaja para mejorar el conocimiento de nuestra ciencia. De veras, muchas gracias.

A mi cotutor académico, el Ing. Feliciano De Santis, que me ha tenido siempre presente y me ha tendido la mano cuando lo he necesitado. Él ha sido la ventana que me ha mostrado como se realiza el trabajo real, en el mundo real y me ha enseñado que el primer recurso natural que hay que cuidar, es la gente. Siempre ha creído en mí y espero nunca defraudarle.

A toda la familia de Ingenieros De Santis, C.A., que me ha acogido y que siempre me han prestado su incondicional colaboración en todos los aspectos. Muchas gracias al Ing. Pedro De Santis por permitirme ganarme su confianza, A la Sra. Mariellys De Santis por sus charlas en el automóvil, A Iris, William, Johana, Daniel con sus charlas

y críticas asertivas que lo impulsan a uno a mejorar. A Jorge y a Raquel por ser modelos del profesional contemporáneo. A Milena por su simpatía. Realmente muchas gracias a todos por permitirme ser parte de su equipo.

Muy especialmente le doy las gracias a la persona que desde muy joven a moldeado al profesional en que me he convertido: al “Sargento” Leandro Montes, quien desde temprana edad me ha mostrado el mundo de la geología y se convirtió en mi principal mentor. Para ti “siempre listo” sargento.

También tengo que agradecer enormemente a mi primera “jefa”, la Ing. Leonor Montilva, a quien bajo su auspicio he aprendido mucho tanto de la vida como del mundo profesional. Gracias por creer en mí y darme la oportunidad que me brindaste. Espero que siempre tengas tus shakras alineados. Te tengo gran admiración, respeto y siempre te contaré como una de mis mejores amigas.

Al personal que labora en la Autopista de Oriente. A todos los muchachos que me dieron su colaboración: A Sairi por su ayuda, y a su tía Reina por sus almuerzos. A los topógrafos que siempre me tendieron su mano colaboradora, así como al Ing. Julio Romero.

Durante mi paso por la escuela básica, le agradezco a todos los profesores que aparte de la formación académica, de alguna u otra manera me suministraron lecciones de la forma de ver al mundo. Entre ellos, y muy especialmente, al Arq. Bronislaw Miller, al cual le profeso el mayor de mis admiraciones y respeto, tanto como profesor, como de ser humano. A todos ellos, muchas gracias.

Al Departamento de dibujo de la Facultad de Ingeniería, que me permitió desde muy temprano ejercer una labor docente durante gran parte de mi carrera, y especialmente a aquellos profesores que me sirvieron de “jefes” durante varios semestres: Al Ing. Peter Wozechowski (que Dios lo tenga en su gloria), a la Ing.

Lourdes de Moncada, la Ing. Ariadna Gonzáles, a la Ing. Yuri Medina, a la Ing. Cristina Mejías, y al Ing. Hermann Lago.

A los profesores de la Escuela de Geología, que nos han impartido sus conocimientos, experiencias, y que estuvieron siempre dispuestos a aclarar mis dudas y responder mis preguntas, especialmente a Ricardo Alezones. A todos ellos, una y mil gracias.

A mis preparadores, todos ellos mil gracias por compartir su experiencia y servir de guía. Gracias Leticia Ortega. Siempre creíste en mí.

A Eunice por sacarme de apuros cuando siempre lo necesité.

A todos mis compañeros, con la cual he formado una gran amistad y fraternidad durante toda mi carrera, tanto en la básica como en la escuela profesional: gracias por ser tan buenos amigos, con Uds conocí el significado de la palabra “pana”. Gracias Horacio García, Glenn Pérez, Francisco Romero, Julio Ascanio, Carlos Angarita, Helder De Acevedo, Adriana “cotufa” Barrios, Aried Lozano, Deiby “el maracucho” Gómez, Mónica Pereira, Marisela Navarro, José Ramón “Moncho” Pérez, a las mangostas Yulner Romero y Roger Salas, Juan Umérez, Vanessa Machado, Vanessa Ojeda, a mamá Milagros Mayora, a Armando Agostini por mostrarme toda la península de Paraguaná!, Leo Rivas, Alejandra Villalón, Daniel Pérez, Maripili Mesa, Alberto Varela, Leomar López. Muy especialmente a Sayury Sánchez que ya la considero una hermana. Si hubo alguien que no mencioné, igualmente gracias a ellos, ya que todos formaron parte de mi experiencia por la Universidad. Lástima que no tuve más tiempo de compartir con ustedes.

A mis amigos de toda la vida, que siempre han estado conmigo, tanto en las buenas como en las no tan buenas: Jesús, Oriana, Manuel y Solsired.

A ti especialmente, que llegaste a mi vida de una manera inesperada, gracias por existir Deysa, has sido mi mejor amiga y compañera. Me too.

A mi familia, que siempre ha estado allí para apoyarme y darme animo cuando las fuerzas desfallecen.

Y a cualquier persona que directa o indirectamente haya colaborado con la realización de esta investigación, y el logro de esta meta que fue graduarme.

Si hubiesen personas, a las cual no agradecí explícitamente el haber compartido conmigo esta experiencia tan maravillosa que significa la vida, disculpen, gracias enormemente. Tendría que escribir otra tesis para nombrar a todos aquellos allegados que se merecen el aprecio de una amistad. A todos ellos y a los que he nombrado, espero agradecerles no sólo con palabras sino con mis acciones.

Daniel Azuarte Mendoza



**Azuarte M. Daniel A.**

## **CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOMECÁNICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS DE LA SECCIÓN GUATIRE- CAUCAGUA DE LA AUTOPISTA RÓMULO BETANCOURT, ESTADO MIRANDA**

**Tutores: Franco Urbani y Feliciano De Santis. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geología. Año 2004, 185 p**

**Palabras Claves:** Cordillera de la Costa, Geotécnica, Mecánica de rocas, Parámetros de resistencia al corte Venezuela

### **Resumen**

Por motivo de la exposición de nuevos afloramientos provocado por la construcción del Tramo III de la Autopista Rómulo Betancourt, así como de la ambigüedad en cuanto a las características y límites de las unidades que en la sección completa de la Autopista afloran, surge la necesidad de una caracterización, en primer lugar, geológica para determinar si existen las diferencias litológicas que allí se reportan, y en segundo lugar, es necesaria una caracterización geomecánica de los macizos rocosos de la zona en construcción (Tramo III).

En base a la descripción de estaciones seleccionadas, se realizó una descripción de las litologías, principalmente en cuanto a su tipología, proporción y forma de ocurrencia. Se realizaron descripciones en 44 estaciones a todo lo largo de la Autopista, con lo cual se logró establecer cuatro unidades diferenciadas de acuerdo a su proporción de litologías calcáreas vs. Terrígenas, así como en la forma en que estas litologías estaban dispuestas espacialmente. Las unidades informales establecidas en campo, denominadas Unidad A, B, C y D; correspondieron con las unidades formales Esquisto de Las Mercedes, Esquisto de Chuspita, Filita de Urape y Filita de Muruguata respectivamente. Los límites de estas formaciones fueron refinados de acuerdo a la establecida por estudios previos en la zona. Estas formaciones

En cuanto a los macizos rocosos del tramo en construcción, se le realizó un levantamiento de discontinuidades, para modelar cinemática y mecánicamente la estabilidad de dichos taludes. Se emplearon para el análisis de estabilidad mecánica, dos metodologías numéricas alternas ( de Ucar y de Hoek) que permiten determinar parámetros de resistencia al corte equivalentes, basado en el parámetro GSI de caracterización ingenieril implementado por Hoek. De allí se obtuvieron parámetros de resistencia al corte ( $\phi$  y  $c$ ) que reflejaban un estado de estabilidad mecánica de acuerdo al factor de seguridad obtenido por el método de Bishop. Este estado de estabilidad no concuerda con las observaciones realizadas en campo. Dada la naturaleza no predicativa del modelo geomecánico, se restringe su uso como metodología alterna a ensayos de resistencia al corte.

**ÍNDICE**

	Página
1. Introducción	
1.1. Alcances del trabajo	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Objetivo General	1
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Área de estudio	2
1.4. Antecedentes y trabajos previos	3
2. Metodología	
2.1.1. Trabajo de campo	6
2.1.2. Trabajo de laboratorio	13
2.1.3. Trabajo de oficina	18
3. Geografía física	
3.1. Relieve	22
3.2. Drenaje	22
3.3. Clima y vegetación	23
3.4. Geomorfología	23
4. Aspectos Geológicos	
4.1. Marco tectónico regional	25
4.2. Geología regional	26
4.2.1. Napa Caracas	
Esquisto de Las Mercedes	26
Esquisto de Chuspita	27
4.2.2. Napa Caucagua – El Tinaco	
Filita de Urape	27
Filita de Muruguata	27
4.3. Geología local.	31
4.3.1. Unidad A.	34
4.3.2. Unidad B.	37
4.3.3. Unidad C.	39
4.3.4. Unidad D.	43

4.4. Metamorfismo	47
4.5. Discusiones generales geológicas	47
5. Aspectos geomecánicos o geotécnicos	52
5.1. Ubicación de los taludes del tramo III de la Autopista Rómulo Betancourt	
5.1.1. Características del talud ubicado entre las progresivas 1+420 a la 2+060	53
5.1.2. Características del talud ubicado entre las progresivas 2+180 a la 2+860	55
5.1.3. Características del talud ubicado entre las progresivas 3+300 a la 3+500	61
5.1.4. Características del talud ubicado entre las progresivas 3+900 a la 4+100	65
5.1.5. Características del talud ubicado entre las progresivas 4+380 a la 4+480	71
5.1.6. Características del talud ubicado entre las progresivas 4+820 a la 5+040	74
5.2. Clasificación geomecánica o ingenieril de los macizos rocosos.	
5.2.1. Clasificación de Hoek de parámetro GSI (Geological Strenght Index)	79
5.2.2. Clasificación de Barton de parámetro Q.	80
5.2.3. Clasificación de Bieniawski de parámetro RMR (Rock Mass Rating)	81
5.3. Cálculo de parámetros de resistencia al corte	
5.3.1. Método de Ucar- GSI	83
5.3.2. Método de Hoek- software RocLab	87
5.4. Análisis de estabilidad	
5.4.1. Estabilidad cinemática	94
5.4.2. Estabilidad mecánica	103
5.5. Discusiones generales geotécnicas.	105
6. Conclusiones y recomendaciones	109
7. Bibliografía	113
8. Anexos	
8.1. Marco teórico	
8.1.1. Método de las discontinuidades sobre estereogramas.	116
8.1.2. Método propuesto por UCAR (2004) para la estimación de parámetros de resistencia al corte.	119
8.1.3. Metodología empleada por el programa <i>RocLab 1.0</i> para el cálculo de parámetros de resistencia al corte.	124

---

8.1.4. Método de BISHOP (1955) empleado para el cálculo de la estabilidad mecánica de círculos teóricos de falla (método de las dovelas).	129
8.1.5. Sistemas de clasificación geomecánicas o ingenieriles.	134
8.2. Datos de campo	
8.2.1. Datos geotécnicos	142
8.2.2. Ventanas de medición geológica	149
8.3. Datos de laboratorio	
8.3.1. Laboratorio de mecánica de rocas	168
8.3.2. Laboratorio petrográfico	172

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Alcances del trabajo

El estudio de la geología de la Cordillera de la Costa, iniciado en 1937 por AGUERREVERE & ZULOAGA, ha avanzado mucho en especial con estudios de las últimas tres décadas, con algunas controversias que apuntan algunos autores como GONZÁLEZ DE JUANA, *et al.* (1980) que entre otras opiniones prefieren agrupar los esquistos y filitas de tipo grafitoso del área metropolitana y de Miranda central en una sola denominación, y el trabajo de SEIDERS (1965), que separa las litologías esquistosas en diversas unidades como comenta: “Las formaciones se diferencian entre sí principalmente por las proporciones relativas de tipos de rocas antes que por litologías distintas”

Sumado a esto, está el hecho que significa el actual proceso de construcción del tercer tramo de la Autopista Rómulo Betancourt Guatire – Caucaagua, en el estado Miranda, lo que se traduce en el aprovechamiento de afloramientos frescos a lo largo de la zona, que entre otras condiciones, son muy escasos debido a espesos mantos de regolitos y la vegetación.

A su vez, allí se presenta una oportunidad de aplicar conceptos y técnicas de la geotecnia, útil a otras ramas de la ingeniería como lo es la civil, para la predicción y comportamiento de los macizos rocosos en los movimientos de tierra que se ejecuten en la obra.

### 1.2 Objetivos

#### 1.2.1. Objetivos generales

✓ Describir y caracterizar geológicamente, las litologías presentes a lo largo de la sección Guatire - Caucaagua de la Autopista Rómulo Betancourt, en busca de

diferencias o similitudes entre las unidades ya cartografiadas que ameriten o no distintas denominaciones.

✓ Describir y caracterizar, con criterios ingenieriles y geotécnicos, los macizos rocosos en los taludes contenidos en el tramo tres de la Autopista Rómulo Betancourt.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- ✓ Corroborar la información geológica existente de la zona.
- ✓ Describir las relaciones entre los grupos litológicos existentes en la zona.
- ✓ Caracterizar petrográficamente las rocas aflorantes.
- ✓ Realizar la cartografía de los taludes a fin de ser utilizados en los diseños de la obra.
- ✓ Determinar y analizar los modos de deslizamientos que pueden presentar los taludes del tramo tres de la Autopista Rómulo Betancourt.

### **1.3. Área de estudio**

Comprende a la sección de la Autopista Rómulo Betancourt, la cual comienza en las cercanías de la Urbanización Villa Heroica, en Guatire, Municipio Zamora (km 33 de la progresiva nacional) y finaliza en las cercanías de la localidad de Caucagua, Municipio Acevedo (específicamente km 61), ambos en el estado Miranda.

Esta vía de comunicación, sigue el curso aproximado del Río Grande o Río Caucagua, desde Guatire, hasta Caucagua, por un valle estrecho y encajado. La Figura 1 presenta un mapa de ubicación relativa de la zona de estudio.

La Autopista Rómulo Betancourt, en su diseño actual, está dividida en tres tramos o secciones que son las siguientes:

- Tramo I (km 33-45): Comienza en la Urbanización Villa Heroica y finaliza tres kilómetros después del Distribuidor Kempis.
- Tramo II (km 45- 53): este es el último sector de la autopista que está operativo actualmente. Finaliza en el Distribuidor Chuspita: El Banqueo.
- Tramo III (km 53-61): es el tramo actualmente en construcción. Finalizará en el distribuidor Caucagua Norte.

Es importante recalcar, que el levantamiento geológico se realizó a lo largo de los tres tramos antes mencionados, en base a afloramientos seleccionados aproximadamente cada kilómetro y cada 500 m en las zonas donde fue necesario una mayor densidad de datos. Por su parte, el estudio geomecánico fue realizado solamente en el tramo III, en la que se escogieron seis taludes de interés para la obra. En consecuencia, se estudiaron aproximadamente 40 estaciones a lo largo de toda la autopista.

#### **1.4 Antecedentes y trabajos previos**

Fueron AGUERREVERE & ZULOAGA (1937) quienes hicieron el primer estudio sistemático de la Cordillera de la Costa, donde se introdujo la nomenclatura que sirvió de base para estudios posteriores, algunos válidos hoy en día, como la primera referencia a lo que se conoce actualmente como Esquisto de Las Mercedes.

Luego DENGÓ (1951), fue el primero en reconocer, delimitar y cartografiar las unidades descritas por AGUERREVERE & ZULOAGA, al publicar el primer mapa geológico de Caracas y sus alrededores.

Sin embargo, el único trabajo específico de la zona de estudio es el de SEIDERS (1965), la cual continúa el trabajo de DENGÓ (1951) hacia el este de la región Capital.

En su trabajo, SEIDERS (1965) realiza una descripción muy detallada de las litologías presentes y propone una serie de nombres formacionales, así como la naturaleza de sus contactos, de las cuales cuatro unidades son de interés para la investigación. En este trabajo se describe los tipos litológicos contenidos en cada unidad, analizando su composición mineralógica, y estableciendo las posibles condiciones del protolito.

Posteriormente, WEHRMANN (1972) cartografía la zona de la Colonia Tovar hasta Guatire, incluyendo parte de la cuenca del Río Grande o Caucagua, sitio por donde pasa la autopista.

También ASUAJE (1972), realiza un trabajo sobre la geología de la zona Guatire-Cabo Codera, en la cual continúa la cartografía hacia el este del Esquisto de Chuspita de SEIDERS (1965). En ella encuentra una localidad con amonites del Cretácico Temprano, que son estudiados por MACSOTAY (1972).

URBANI (2002), establece una nueva nomenclatura de las unidades de rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera de la Costa, adaptada a la norma internacional para unidades litodémicas, eliminando las denominaciones de Grupo, Formación o Miembro, que deben ser utilizadas exclusivamente para rocas sedimentarias

Más recientemente, OTERO & SAN MARTÍN (2002), realizaron una actualización geológica de la zona comprendida entre la quebrada Conoropa y Guacarapa de Caucagua. En este estudio se constata que el Complejo de Conoropa corresponde a una unidad bien definida y cartografiable.



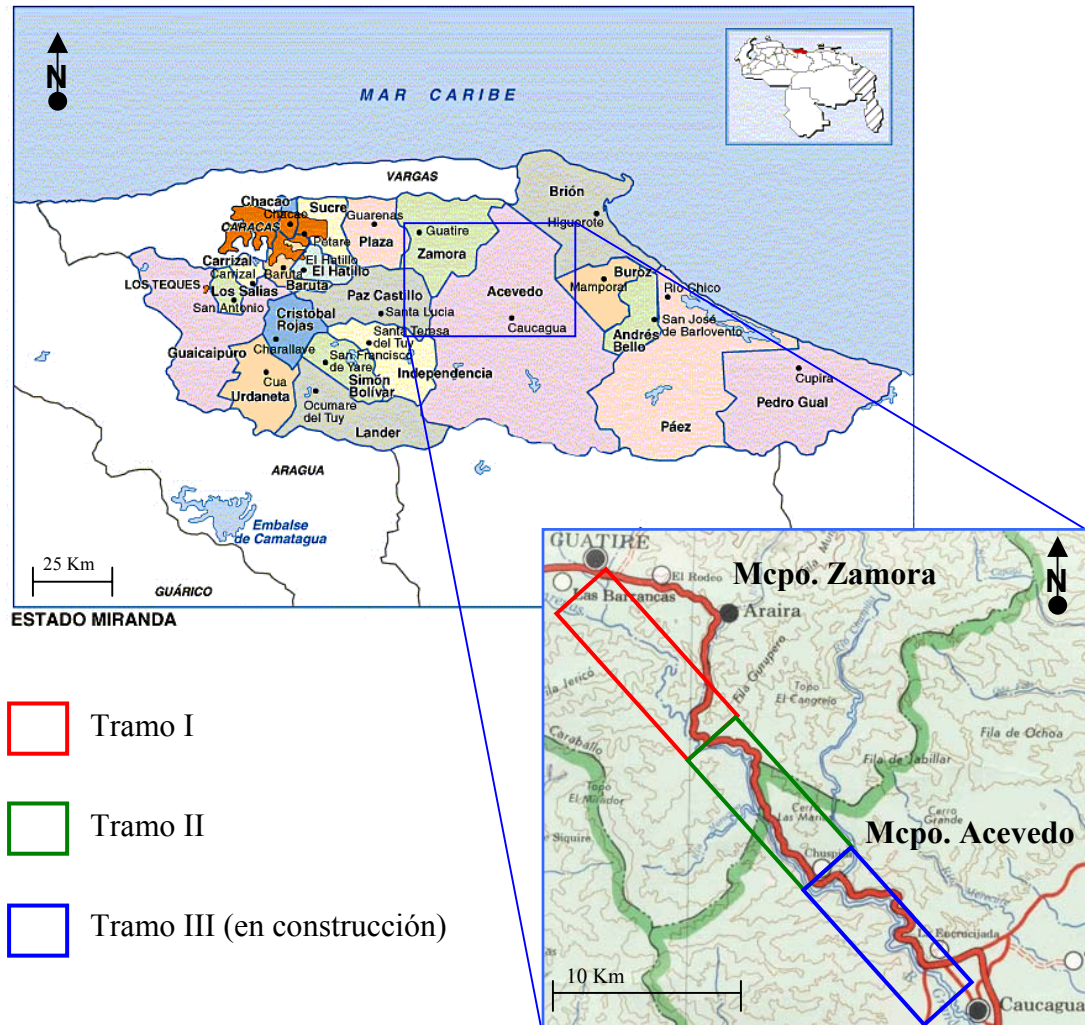


Fig. 1 Mapas de la ubicación relativa de la zona de estudio (El Nacional 2002).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Trabajo de campo

#### 2.1.1. Materiales empleados

Para el levantamiento geológico, se utilizaron los siguientes implementos: Martillo geológico o piqueta, solución de ácido clorhídrico (HCl) al 10%, brújula con clinómetro, cinta métrica de 3 m, tirro., lápices y marcadores, libreta de campo, cámara fotográfica, base cartográfica, equipo de Sistema de Posicionamiento Global o GPS (opcional).

#### 2.1.2. Recolección de datos

La técnica empleada para el levantamiento geológico, varió ligeramente de acuerdo a la necesidad de los objetivos. Para la caracterización geológica se estudiaron afloramientos seleccionados cada kilómetro a lo largo de la Autopista Rómulo Betancourt y cada 500 m en las zonas de dudoso contraste litológico. En cada uno de estos afloramientos, se recolectó información sistemática basada en estaciones descriptivas, cuya información extraída está constituida por:

- Un código denominativo de la estación a fin de facilitar la toma de datos, que está formado por las iniciales de la entidad (para el caso de este estudio corresponde a las siglas MI). Los distintos afloramientos se denotaron con números (1, 2, 3...) cuyos valores son ascendentes de sur a norte.
- Ubicación de la estación en base a las coordenadas reticulares UTM (Proyección Mercator Transversal o Universal Transversal Mercator por sus siglas en inglés) en base al huso 19.

- La orientación y descripción de las estructuras de foliación, fallas y pliegues que estén presentes.
- Composición litológica aproximada, proporción, tipo y modo de distribución. A modo de facilitar la notación y distinguir las litologías registradas, se les denominó los litotipos con letras (A, B, C...) para cada uno de los casos.
- Reconocimiento de indicadores microtectónicos para establecer orientación de esfuerzos.
- Recolección de muestras de mano. Para esta labor, se utilizó una codificación para denominar las muestras en base al código de la estación y el litotipo muestreado, por ejemplo, la muestra MI-12-B, se refiere a la litología tipo “B” recolectada en la estación MI-12.
- Fotografiado general y en detalle del afloramiento. La misma debe incluir la escala y el rumbo para considerar la orientación de las estructuras observadas. A modo de reforzar o complementar esta información gráfica, se dibujó un croquis con los detalles más relevantes del afloramiento, con el fin de facilitar la interpretación o análisis de la misma.

A su vez, para la caracterización geomecánica de los taludes de corte del Tramo III, se procedió de forma ligeramente distinta, según lineamientos de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, ISRM (1981). Para este caso, es prioritario conocer las orientaciones de todas las discontinuidades presentes en los taludes como lo son:

- Diaclasas, las cuales se agrupan en familias cuando son paralelas entre sí, y en sistemas al tratarse de diaclasas intersecadas. También estas se pueden catalogar en primarias y secundarias según su relativa frecuencia y tamaño.

- Fallas.
- Grietas, la cual es un término empleado en geotecnia para definir una fractura pequeña.
- Estratificación, la cual corresponde a una discontinuidad exclusiva de rocas sedimentarias que separa capas de igual o diferente litología.
- Foliación o esquistosidad, las cuales corresponde a superficies penetrativas desarrolladas por la orientación de minerales durante el metamorfismo y son generalmente perpendiculares a la dirección de esfuerzos máximo.

Estas discontinuidades fueron registradas de manera masiva en pequeños intervalos de distancia en los taludes del tramo III, a fin de poder establecer criterios estadísticos para su posterior análisis. Su denominación en el registro está dada por las iniciales del tipo de discontinuidad y el orden en la que fueron medidas, por ejemplo: FA, FO y D corresponden a fallas, foliación y diaclasas respectivamente. Entre las características que se tomaron en cuenta están:

- La *orientación* de las discontinuidades definiendo el rumbo y el buzamiento respectivo.
- El *espaciamiento*, la cual controla el tamaño el tamaño de bloques individuales de roca intacta. El espaciamiento de discontinuidades individuales tiene una gran influencia en la permeabilidad y características de flujo del macizo rocoso.
- La *persistencia*. Este término describe la extensión areal o el tamaño de la discontinuidad. Puede ser cuantificada de forma muy grosera observando las longitudes de las trazas en la superficie expuesta. Se considera como uno de los parámetros más importantes del macizo, pero uno de los más difícil de cuantificar. (Ver Tabla 1).

**Tabla 1.** Terminología relacionada con la persistencia de las discontinuidades  
(Modificada de ISRM 1981)

DESCRIPCIÓN	PERSISTENCIA
Muy persistente	<1 m
Baja persistencia	1-3 m
Persistencia media	3-10 m
Alta persistencia	10-20 m
Muy alta persistencia	>20 m

- La *rugosidad* de las discontinuidades, las cuales se denominan “ondulaciones” a las de mayor escala, y son consideradas que tienen una dimensión tal que es poco probable que sean cizalladas. Las de segundo orden se les denomina “asperezas” y sí podrían ser cizalladas durante el movimiento. La manera más simple de medir la rugosidad de escala pequeña, es por medio de un “copiador de formas” o medidor de rugosidad. Este implemento es muy utilizado entre personas que colocan pisos y papel tapiz, encontrándose a la venta en ferreterías comunes.
- El *grado de meteorización* de las paredes de las discontinuidades individuales o de un sistema en particular
- La *separación* o tamaño de abertura, medida perpendicularmente entre las paredes de la discontinuidad. Para su clasificación ver Tabla 2.

**Tabla 2** Terminología relacionada con la apertura de las discontinuidades  
(Modificada de ISRM 1981)

DESCRIPCIÓN		APERTURA
CERRADAS	Muy cerradas	<0,1 mm
	Cerradas	0,1 - 0,25 mm
	Parcialmente abiertas	0,25 - 0,5 mm
ESPACIADAS	Abiertas	0,5 - 2,5 mm
	Moderadamente ancha	2,5 - 10 mm
	Ancha	10 mm
ABIERTAS	Muy ancha	1 - 10 cm
	Extremadamente ancha	10 - 100 cm
	Cavernosa	>1 m

La ISRM (1981), restringe el término apertura a discontinuidades abiertas en donde el espacio relleno es aire o agua; cuando este espacio está relleno por otro material este espacio se denomina ancho.

- Implícito a lo anterior es el determinar la presencia o no de algún tipo de *relleno* con una descripción aproximada del tamaño de partícula.
- La presencia de *flujos* de líquidos a través de las discontinuidades, lo que se denomina “permeabilidad secundaria” del macizo rocoso.
- El *grado de meteorización del macizo rocoso* en general. En la Tabla 3 se propone los niveles cualitativos de esta característica tan importante.

**Tabla 3.** Terminología relacionada con el grado de meteorización del macizo rocoso  
(Modificada de ISRM 1981)

TÉRMINO	DESCRIPCIÓN	GRADO
Fresco	No hay señales visibles de meteorización: tal vez una leve decoloración en las superficies de las discontinuidades más desarrolladas	I
Levemente meteorizado	La decoloración indica meteorización de la roca y de superficies de discontinuidad. Toda la roca puede estar decolorada por meteorización, así como más débil que en condiciones frescas.	II
Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada a suelo. La roca se puede presentar fresca o decolorada tanto como una estructura como un núcleo.	III
Altamente meteorizado	Más de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada a suelo. La roca se puede presentar fresca o decolorada tanto como una estructura como un núcleo.	IV
Completamente meteorizado	Toda la roca está descompuesta y/o desintegrada a suelo. La estructura original del macizo se mantiene prácticamente intacta.	V
Suelo residual	Toda la roca se ha convertido en suelo. La estructura original y su fábrica ha sido destruida. Hay un gran cambio de volumen, pero el suelo no ha sufrido un transporte significativo.	VI

### 2.1.3. Mapas y fotografías aéreas

Los mapas que se utilizaron para este estudio, son bases topográficas a escala 1:25.000, que según la clasificación propuesta por BARNES (1981 en MCCLAY 1987), corresponde a un “mapa de contacto”, y son los siguientes:

**Tabla 4.** Mapas a escala 1:25.000 empleados

1	Guarenas	6847-II-NE	
2	El Placer de Siquire	6847-II-SE	
3	Chuspita	6947-III-SO	
4	La Fila	6946-IV-NO	

Estas cartas topográficas fueron utilizados para representar la información geológica recolectada a lo largo de toda la Autopista Rómulo Betancourt.

Por su parte, para el asentamiento de la información geotécnica recopilada en el Tramo III, se empleó un mapa base de la vialidad proyectada cedido por la empresa constructora de la misma. Este mapa de escala 1:50.000, es empleado para representar la ubicación de los taludes evaluados, así como las condiciones geomecánicas de los mismos, tomando como apoyo el sistema de referencia basado en el progresivado cuyo inicio se encuentra al comienzo de la obra, la cual a su vez, está referenciado al sistema de coordenadas reticulares UTM en base al huso 19.

Igualmente, como material de referencia visual, se utilizó un grupo de fotografías aéreas que cubren el trayecto de toda la vía de comunicación que representa la zona de estudio, ya que a partir de éstas se pueden obtener datos de las macro estructuras que pudiesen estar presentes, como límites de afloramiento, ejes mayores de pliegues y trazas de fallas, para luego ser transcritos a los mapas base. Sin embargo esta herramienta presenta una gran limitación producto del espeso manto vegetal presente en la región. (ver apartado 3.3. Clima y vegetación de la sección Geología física). La denominación y distribución de las fotografías utilizadas se ilustra en la Tabla 5.



**Tabla 5** Listado de fotografías aéreas utilizadas en la zona de estudio

<b>Zona de estudio:</b> Curso del Río Grande desde Guatire hasta Caucagua, Estado Miranda	
<b>Misión:</b> 030198 Abril de 1976	<b>Escala</b> 1:25.000
<b>Total de fotos:</b> 22	<b>Fuente</b> Instituto Geográfico Simón Bolívar
EL SIGUIENTE LISTADO SE PRESENTA DISTRIBUIDO DE NORTE A SUR Y DE ESTE A OESTE	
Banda 1	3311- 3310- 3309- 3308- 3307
Banda 2	3317- 3318- 3319- 3320
Banda 3	3372- 3371- 3370- 3369
Banda 4	3375- 3376- 3377- 3378- 3379
Banda 5	4079- 4078- 4077- 4076

## 2.2. Trabajo de laboratorio

### 2.2.1. Proyecciones hemisféricas o estereográficas y análisis estadístico de discontinuidades

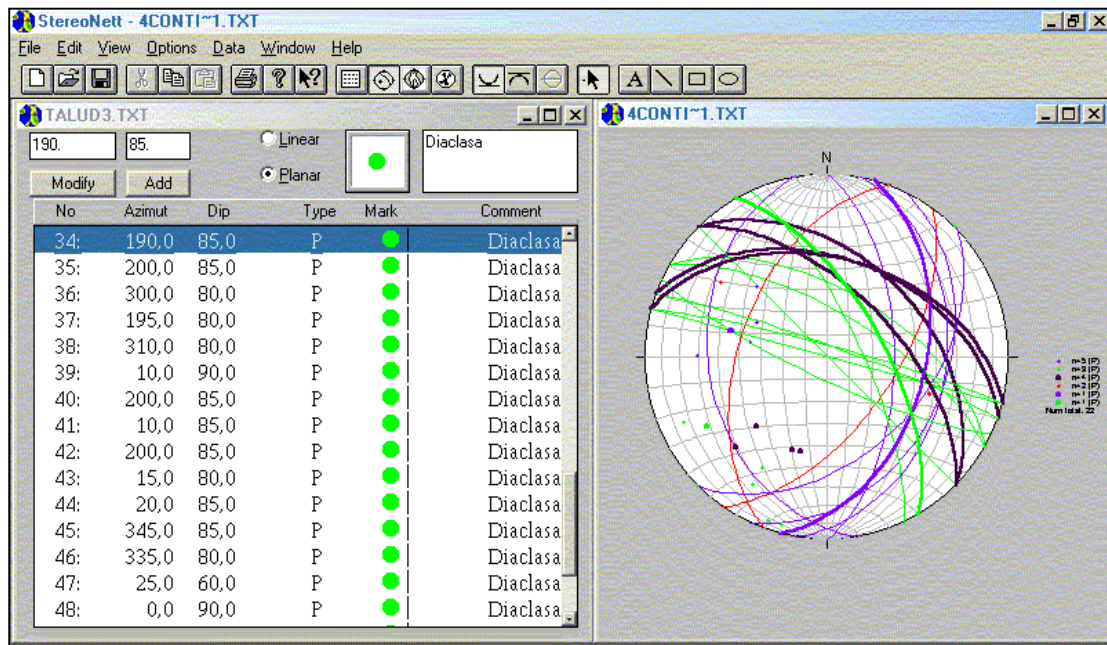
Las proyecciones hemisféricas o estereográficas, son un método muy eficaz para la representación gráfica de estructuras planas y tridimensionales, a partir de su orientación geográfica y disposición angular.

Existen dos tipos de proyecciones de este tipo, la de Wulff y la de Schmidt. La primera, también llamada equiangular, es empleada para resolver relaciones angulares, particularmente cuando las construcciones geométricas son hechas sobre la misma red. El segundo tipo de proyección, conocido también como equiareal, ya que no distorsiona las áreas, es práctica para realizar gráficos estadísticos en base a las concentraciones de los polos de los planos graficados. Para este estudio se empleó el tipo de proyección equiareal o red de Schmidt.

Es conveniente recordar que en las proyecciones estereográficas, las estructuras planas se grafican como grandes líneas circulares, pero pueden ser comúnmente representadas por polos (o la recta normal del plano); estos polos se grafican como puntos en la proyección y no deben ser confundidos con las estructuras lineales representadas también por puntos.

Los datos de las estructuras fueron dibujados digitalmente utilizando el software *StereoNet v.2.46* (DUYSTER 2000) de distribución gratuita, la cual emplea como método de ingreso de datos la nomenclatura buzamiento-dirección de buzamiento (dip-dip direction, como se conoce en inglés) a diferencia de la nomenclatura azimutal utilizada regularmente (ver Figura 2).

Para la medición de discontinuidades en los taludes del Tramo III de la autopista, dado la abundancia de datos recolectados, fue necesario realizar un tratamiento estadístico que facilitara el diagnóstico de los mismos. Existen numerosos métodos matemáticos para procesar la data de este tipo, sin embargo, para este estudio se realizó el cálculo convencional de promedios o media aritmética y desviación estándar de los rumbos y buzamientos de cada tipo de discontinuidades, cuidando incluir aquellos datos que se encontraban cerca del rumbo cero o norte. Con estos resultados se logró diagramar planos con orientaciones “representativas” de cada familia de discontinuidad.



**Fig. 2** Interfaz del programa *StereoNet* utilizado para la diagramación de los estereogramas mostrados en este trabajo.

### 2.2.2. Descripción de secciones finas

Para la descripción de una sección fina no existe una única metodología a seguir, sin embargo, en el área de petrografía ígneo metamórfica se pueden hacer algunas recomendaciones para mejorar la eficiencia de esta actividad.

Pasos recomendados a seguir:

- 1) Observación general de la sección fina, identificando y anotando los minerales que se hallan identificado con facilidad.
- 2) Seguidamente se debe observar de nuevo la sección por un lapso no mayor de cinco minutos, identificando y anotando esta vez los minerales de difícil reconocimiento, que constituyan parte de los minerales mayoritarios de la roca.

- 3) Descripción detallada de cada mineral. Esta descripción no debe hacerse con un grano mineral en particular, por el contrario, se debe tomar en consideración todos los granos posibles de la especie mineral que se esté describiendo
- 4) Identificación de los minerales accesorios de la sección con ayuda de manuales de mineralogía óptica y petrología.
- 5) Determinación del porcentaje que ocupa en la sección cada mineral con ayuda de la tabla comparativa de apreciación visual. Este paso se recomienda en este momento debido a que después que se ha observado una sección por algún rato, la vista ya se a adaptado a la cantidad de minerales que se han reconocido, para así realizar comparaciones más fácilmente con la tabla.
- 6) Como paso final se realiza el recálculo de los porcentajes que definen los extremos de los diferentes triángulos de clasificación.

### **2.2.3. Ensayo de compresión uniaxial**

A modo de determinar los parámetros necesarios para la clasificación geomecánica de los macizos rocosos y analizar la estabilidad de los mismos, fue necesario realizar el ensayo de compresión uniaxial o sin confinamiento, para núcleos de roca intacta.

El método utilizado para la realización de dicho ensayo está normalizado por la *American Society for Testing and Materials* (A.S.T.M. por sus siglas en inglés), en su designación D-2938-95 (ASTM 2002), último número que indica el año de la última revisión de la misma. A continuación se presenta una sinopsis del contenido de dicha norma:

Significado y uso:

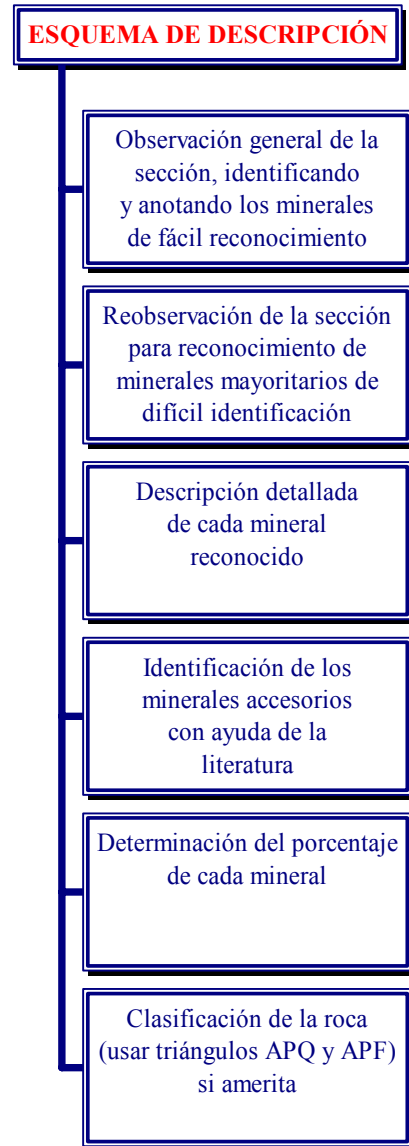
El esfuerzo compresivo sin confinar de rocas es usado en muchas fórmulas de diseño, y en algunos casos una propiedad índice para seleccionar la técnica apropiada de excavación. Es importante destacar que esta medición hecha en el laboratorio usualmente no refleja la misma propiedad in situ ni a gran escala, debido a la influencia de las discontinuidades del macizo y otros factores.

Aparatos:

- Prensa de carga.
- Discos de acero para transmisión de la carga de espesor igual a 15 mm.

Requerimientos de la muestra:

- La muestra debe ser completamente cilíndrica, representativa del tipo de roca, y tener una altura de dos a dos veces y media el diámetro del cilindro. De no ser así, se le puede aplicar una corrección.
- Los extremos de la muestra deben ser perpendiculares al eje del cilindro, paralelos entre sí y libres de irregularidades. De no ser así, se aplica un recubrimiento o *capping* de yeso de resistencia  $562.96 \text{ kg/cm}^2$



**Fig. 3** Esquema de pasos a seguir para la descripción de una sección fina

Procedimiento del ensayo:

- Medir el diámetro del cilindro , así como su altura con precisión de 1mm.
- Aplicar la carga axial constantemente a una rata de 30 Kg/seg hasta que ocurra la falla.
- Anotar la máxima carga aplicada justo cuando ocurrió la falla (P).

Cálculos:

- Para determinar la compresión sin confinar de la muestra ensayada, se divide la carga máxima aplicada (P) entre el área de la sección del cilindro, es decir:

$$\sigma_c = P/A = 4 P/\pi D^2$$

## 2.3. Trabajo de oficina

### 2.3.1. Cálculo de parámetros de resistencia al corte equivalentes (método de UCAR (2004))

El conocimiento de los parámetros de resistencia al corte de un macizo, son datos de gran valor, ya que son fundamentales en el análisis mecánico de la estabilidad y clasificación geomecánica del mismo. Por esto se ensayó con una metodología numérica que permitiese obtener dichos valores de manera alternativa, utilizando como base la descripción geológica. El principal método numérico utilizado es el propuesto por UCAR (2004), cuyo detalles y fórmulas están explicadas en los anexos, en el apartado de marco teórico número 8.1.2

A modo de facilitar el cálculo en dicho procedimiento, se computó las expresiones algebraicas en una hoja de cálculo (Excel v.2000). Esto permitió comprender de mayor manera la filosofía del procedimiento persé, así como de obtener resultados

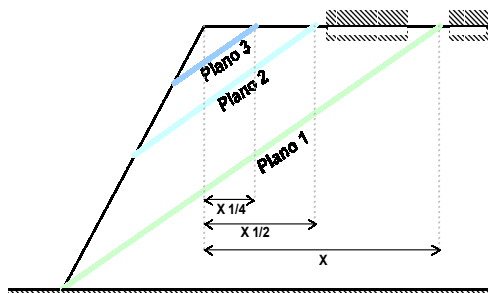
rápidos que pudiesen compararse con otros métodos de cálculo alternos, como el utilizado por el programa *RocLab*.

### 2.3.2. Programa *RocLab 1.0* (ROCSIENCE INC. 2003) para el cálculo de cohesión y fricción interna equivalente

Este método alternativo, utilizado como comparación a los resultados obtenidos con el método de UCAR (2004), está explicado en sus fundamentos en los anexos, específicamente en el apartado 9.1.3.

Este programa, que funciona bajo ambiente Windows (Figura 5), necesita como datos principales la compresión uniaxial de la roca intacta, la densidad de la roca y su índice de resistencia geológica (GSI), dando como resultado los parámetros del criterio de falla de Hoek & Brown y de Mohr – Coulomb, así como sus diferentes gráficos.

### 2.3.3. Programa *Slope Stability 7.9* (GEOSTRU 2000) para cálculo de la estabilidad mecánica de los taludes según BISHOP (1955)



**Fig. 4** Diagramas de ubicación de los planos de falla evaluados con el *Slope Stability 7.9*

Este programa de la casa GeoStru se utilizó para determinar el factor de seguridad (FS) de los círculos teóricos de falla que pasaban al pie del talud (estabilidad global, plano 1, Figura 4) y a la mitad y cuarta parte de la distancia de corte del primer círculo con la berma o topografía (plano 2 y 3 respectivamente

de la figura 4). Esto permite evaluar la posibilidad de fallas en cuñas de menores dimensiones.

Este programa de entorno gráfico (figura 6), presenta múltiples métodos de cálculo de estabilidad, sin embargo, el utilizado para esta evaluación fue el método de BISHOP (1955), explicado en el punto 9.1.4 de los anexos, en el marco teórico.

El mismo, fue aplicado a vetiún (21) secciones de los taludes de corte que están contenidos en el Tramo III de la Autopista, cuyo criterio de selección se basó en la máxima altura, y en secciones aproximadamente equidistantes entre ellas a lo largo de la distancia horizontal que cubre cada uno de ellos.

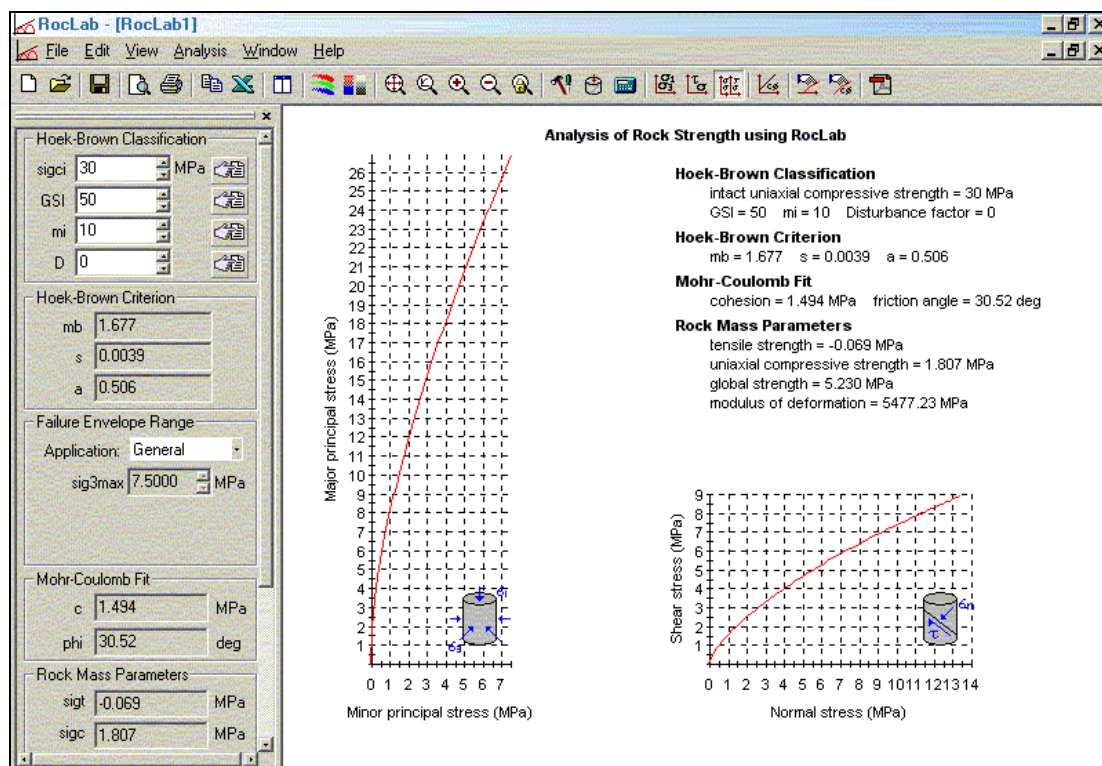
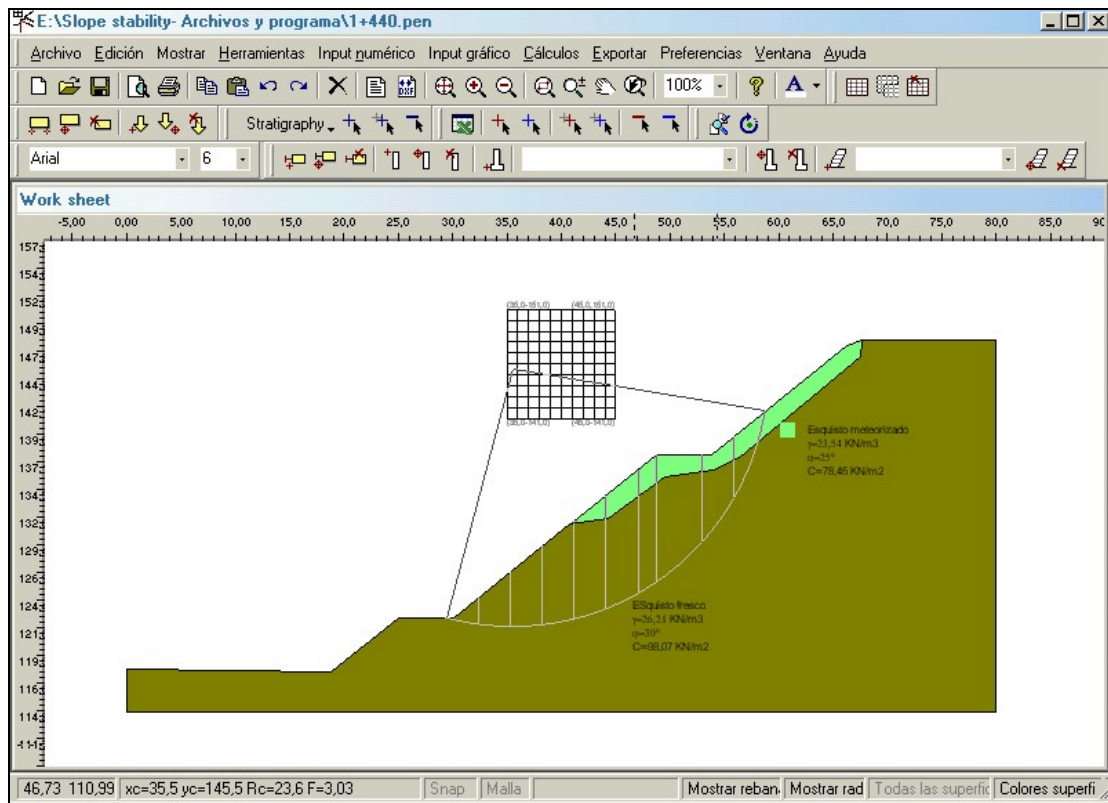


Fig. 5 Interfaz del programa *RocLab* 1.0 utilizado para el cálculo de parámetros de resistencia al corte, tanto para el criterio de falla de Hoek & Brown, como el de Mohr – Coulomb.





**Fig. 6** Interfaz del programa *Slope Stability 7.9* utilizado para el cálculo del factor de seguridad de las secciones de los taludes del tramo III.

### 3. GEOGRAFÍA FÍSICA

#### 3.1. Relieve

La zona de estudio se encuentra entre dos unidades orográficas principales: la Serranía de Interior y la depresión de Barlovento. La primera es topográficamente más baja que la Serranía del Litoral, llegando a alcanzar los 500 m. El relieve cuenta con fuertes pendientes que llegan hasta 70%. La segunda corresponde a planicie de origen sedimentario donde se identifican paisajes bajos y planos: valles, planicies de explayamiento y litoral marino sujeto a una constante deposición de sedimentos, pues se trata de una cuenca sedimentaria que se está colmatando actualmente.

#### 3.2. Drenaje

La cuenca del Río Grande o Río Caucagua se encuentra entre los paralelos 10° 18' y 10° 35' de latitud norte, y entre los meridianos 66° 23' y 66° 49' de longitud oeste. Hidrológicamente la cuenca pertenece a la cuenca del Río Tuy, el cual fluye sus aguas hacia el mar Caribe.

Esta cuenca fluvial, tiene una superficie de 725 km<sup>2</sup> (BÁEZ 2001) y su forma es un tanto alargada y redondeada. El cauce principal tiene una longitud de 70 km, y nace en la Fila de Ayala, muy cerca del Pico Naiguatá a 2.000 msnm.

El drenaje es de tipo dendrítico bien integrado, formado por una corriente principal con sus tributarios primarios y secundarios uniéndose libremente en todas las direcciones. Posee un perfil longitudinal irregular.

El cauce del Río Grande está compuesto fundamentalmente por arena y grava, predominando en algunos tramos los cantos rodados de diámetros de hasta 40 cm, mientras que en otros tramos se consiguen arenas de diferentes tamaños, pero en

general la distribución de los sedimentos es bastante uniforme y guarda una estrecha relación con la historia de crecidas que se registran en el lecho.

En el cono de deyección del río, ubicado aguas abajo del puente Aragüita, predominan arena y grava media, mientras que aguas arriba la distribución de los tamaños de los sedimentos se presentan en forma atípica, esto obedece principalmente a la mezcla de sedimentos producido por los afluentes directos desde la ladera.

### **3.3. Clima y vegetación**

En la zona oriental del estado Miranda y la depresión de Barlovento, existe un clima de selva (Af) muy lluvioso todo el año (El Nacional 2002), con una pluviosidad promedio anual de 1.400 mm en una estación que llega a durar hasta nueve meses, producto de los vientos alisios húmedos que entran por Barlovento. La temperatura es cálida, con promedio en las depresiones de hasta 26 °C.

En las áreas montañosas y en los valles interiores predomina la selva tropófila, muy densa en Barlovento y menos espesa en las demás zonas más secas. Se caracteriza por una gran diversidad de especies de árboles, arbustos y plantas epifitas muy espesas. Esta vegetación cubre el ambiente e impide que lleguen los rayos de sol al suelo, produciendo un ambiente umbrío y húmedo en las que las plantas higrófilas prosperan sin cesar. Estos bosques están situados sobre los paisajes accidentados que abundan en la zona.

### **3.4. Geomorfología**

La sección que corresponde a zona de estudio, pasa a través de un sistema montañoso de cumbres amesetadas, la cual está compuesto por una sucesión de filas subparalelas con un rumbo aproximado de N 65° E, separados entre ellos por valles

angostos, que alojan una serie de drenajes secundarios que sirven de afluente al cuerpo de agua principal, correspondiente al Río Grande o Cauagua.

Este drenaje principal, con rumbo general de N 45° W, presenta un cauce inadecuado formando a lo largo de su recorrido una garganta epigénica que une a las poblaciones de Guatire y Cauagua, ubicado cada una en sus correspondientes valles. Esta garganta, fue formada por antecedencia, causado por el levantamiento de la topografía como consecuencia de la deformación del borde septentrional de Venezuela con el paso de la placa Caribe por la región centro-norte del país. Aguas abajo, el drenaje del Río Grande finalmente sale de la garganta epigénica, para recorrer las planicies de la depresión de Barlovento.

## 4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

### 4.1. Marco tectónico regional

La zona de estudio, está contenida geográficamente dentro de la región de la Cordillera de la Costa, ubicada al norte de Venezuela. La misma es una provincia geológica de rocas meta-ígneas y meta-sedimentarias que corresponde a rocas de origen precámbrico, paleozoico y mesozoico, posteriormente metamorfizada y ubicada en posición alóctona en contacto tectónico con unidades del mismo período sedimentadas a borde del continente.

El ordenamiento geológico de la Cordillera de la Costa, ha variado en cuanto a su clasificación nominal, fundamentalmente una variación mejorada de la clasificación tectono-estratigráfica propuesta por MENÉNDEZ (1966). La clasificación actual, resultado del trabajo interinstitucional de la Universidad Central de Venezuela (UCV), la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS); y centralizada por la Oficina de Riesgo del Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB-MARN), arroja el siguiente ordenamiento basada en napas tectónicas:

#### 1. Napas de la Serranía del Litoral

1.1.- Napa Costera

1.2.- Napa Ávila

1.3.- Napa Caracas

#### 2. Napas de la Serranía del Interior (antes denominada “Napas de Aragua” por BECK 1985)

2.1.- Napa Cauagua - El Tinaco

2.2.- Napa Loma de Hierro (BECK 1985 incluye a Paracotos en esta Napa)

2.3.- Napa Villa de Cura

A su vez, se ha producido un cambio en la nomenclatura de las unidades litológicas para adaptarlas a las normativas internacionalmente utilizadas para unidades litodémicas de rocas ígneas y metamórficas (NACSN 1983).

Las unidades de la Napa Caracas incluidas en este estudio, forman parte de la denominada por URBANI (2000) como Asociación Metasedimentaria Caracas, estudiada originalmente por AGUERREVERE & ZULOAGA (1938), mientras que las consideradas como parte de la Napa Cauçagua – El Tinaco, son definidas e incluidas por SEIDERS (1965) en un conjunto llamado Post Grupo Caracas, término actualmente considerado inválido.

## **4.2. Geología Regional**

Para los efectos de esta investigación, se estudiaron las siguientes unidades litodémicas:

### **4.2.1 Napa Caracas:**

#### Esquisto de Las Mercedes:

Esta unidad fue descrita por AGUERREVERE & ZULOAGA (1938), con localidad tipo en la antigua Hacienda Las Mercedes en Caracas (actualmente urbanización Las Mercedes y Valle Arriba). Estos autores establecieron el tope de la unidad por debajo del Metaconglomerado de Charallave.

Dicha unidad posee una gran extensión en la parte central de la Cordillera de la Costa, básicamente en la región de Caracas, sin embargo, debido al creciente urbanismo de la zona metropolitana, WEHRMANN (1972) propone como sección de referencia a la carretera Petare - Santa Lucía, donde está expuesta una sección casi

continua hasta su transición con el Esquisto de Chuspita. Igualmente hay secciones bien expuestas en la autopista Caracas - Valencia, en el tramo Hoyo de la Puerta - Charallave, así como en la Quebrada Las Canoas, al sureste de Hoyo de La Puerta.

#### Esquisto de Chuspita:

De acuerdo a la opinión de diversos autores, esta unidad representa la transición a clásticos más gruesos por encima del Esquisto de Las Mercedes. Esta unidad toma su nombre del Río Chuspita, estado Miranda, donde aflora una buena sección parcial. Otros afloramientos de importancia se observan en las quebradas Onoto y Morocopo, y en cortes de la carretera Guatire-Caucagua.

#### **4.2.2. Napa Caucaagua – El Tinaco**

##### Filita de Urape:

Al noreste de Caucaagua, aflora un conjunto de rocas metasedimentarias, llamadas Filita de Urape por presentar buenos afloramientos en la quebrada del mismo nombre. También aflora e el río Merecure y en el curso superior de la quebrada Siquire.

Los fósiles encontrados dentro de esta unidad son aparentemente radiolarios recristalizados de difícil identificación, así como la *Globigerina cretácica* y *Bulimina proxila*, que se extienden desde el Cenomaniense a Maastrichtiense y Turoniense a Maastrichtiense respectivamente.

##### Filita de Muruguata:

Este término, en la actualidad informal, se aplica para definir una faja de roca predominantemente filíticas, que aparece por encima de la Filita de Urape en la Quebrada Muruguata al noreste de Caucaagua y que aflora además en el río Merecure

y la quebrada Aragüita al noreste de Santa Lucía, ambas localidades en el estado Miranda.

A continuación se presentan unas tablas comparativas de la litología general que presentan cada una de las unidades antes mencionadas:



Tabla 6. Tabla comparativa de la geología regional de las unidades pertenecientes a la Napa Caracas

Napas Regionales	Napas Locales	Asociación Litológica	Unidad Litodérmica	Composición Litológica	Contactos
Serranía del Litoral	Napa Caracas	Asociación Metasedimentaria Caracas (Jurásico-Cretácico)	Esquistos de Las Mercedes	<p>Según WEHRMANN (1972) y la revisión de GONZÁLEZ DE JUANA <i>et al.</i> (1980, p. 3-17) la litología predominante consiste en esquistos cuarzo - muscovítico - calcítico - grafitoso (70%), con intercalaciones de mármol grafitoso en forma de lentes de laminación delgada (15%) y una pequeña variedad de rocas arenosas y rudáceas (15%). Éstas últimas son en su mayoría metamórficas puras feldespáticas y metamórficas de cuarzo con estratificación delgada. La mayoría de las rocas de la unidad son carbonáticas, una de las metamórficas contiene dolomita. La pirita es un mineral accesorio común en todos los tipos de rocas. El tope de la unidad se hace más cuarzosa y menos carbonática en su transición hacia el Esquistos de Chuspita.</p>	<p>El contacto entre el Esquistos de Las Mercedes y el Esquistos de Chuspita es una falla y no se puede demostrar directamente una secuencia concordante</p>
			Esquistos de Chuspita	<p>SEIDERS (1965), considera, que el tipo de roca más común son las metamórficas de color gris claro a gris oscuro, localmente grafitosas y micáceas, cuyo constituyente principal es el cuarzo, con cantidad mucho menor de feldespato (45%). Estas rocas se hacen conglomeráticas con fragmentos líticos como guijarros y peñas de hasta 25 cm de diámetro, constituidos por filita, mármol y metamórfica carbonática. El resto consiste en filita de color gris oscuro, carbonática y grafitosa (50%). También mármol calcítico (5%) que se presentan en dos tipos: uno de tipo litográfico formando capas delgadas de color gris oscuro a negro, con vetas de calcita, mientras que el otro tipo es argiláceo, con cantidades secundarias de dolomita negra y argilita negra pirítica en capas delgadas y cortados por vetas de cuarzo y calcita.</p>	<p>Se considera actualmente que en el tope, el Esquistos de Chuspita está también en contacto de falla con la Filita de Urape, aunque SEIDERS (1965) sugiere la posibilidad de "una gran discordancia no angular" entre ambas formaciones.</p>

**Tabla 7..** Tabla comparativa de la geología regional de las unidades pertenecientes a la Napa Caucaagua – El Tinaco

Ubicación Geográfica	Napas Tectónicas	Asociación Litológica	Unidad Litodémica	Composición Litológica	Contactos
Serranía del Interior	Napa Caucaagua-El Tinaco (Paleozoico-Precámbrico)	No asociadas	Filita de Urape	<p>SEIDERS (1965) le asignó el nombre a un conjunto de filita de color gris oscuro a negro, no carbonática, localmente limolítica y arenosa (80%). Sus componentes minerales son sericita y clorita, en una matriz cuarzo-feldespática de grano muy fino. Metarenítica de grano fino a medio, formada por cuarzo y fñanita, con algunos fragmentos volcánicos y metamórficos (25%). También están presentes metaconglomerado lítico de fñanita gris a negra, volcánica, arenisca, cuarcita y esquistos grafitosos (5%). El mármol (5%) es negro, en capas de 2 a 20 cm, que forman secuencias de 1 a 3 m de espesor. Está formado por una matriz finamente cristalina o litográfica, con parches irregulares de calcita, que pueden corresponder a conchas recristalizadas de foraminíferos. También hay presencia de rocas metavolcánica ferromagnesiana (5%), y proporciones menores de fñanita y argilita.</p>	<p>En el tope, el contacto de la Filita de Urape es "concordante" con la Filita de Muruguata. En su parte inferior, está en contacto de falla con el Esquistos de Chuspita, aunque SEIDERS (op. cit.) sugiere una posible discordancia</p>
			Filita de Muruguata	<p>SEIDERS (1965) considera que consiste principalmente de filita oscura y no carbonática, con cantidades menores de filita de color verde claro y gris verdoso; mármol grafitoso finamente laminado, foliado, de color gris oscuro a negro; metarenítica feldespática - calcárea, de color gris claro, así como algunas rocas metavolcánicas intercaladas. En este sentido, GONZÁLEZ DE JUANA <i>et al.</i> (1980, p. 340) dice que este conjunto de rocas puede corresponder a varias unidades anteriormente definidas.</p>	<p>Se considera que esta unidad es concordante en su base con la Filita de Urape; mientras que su contacto superior es de falla con otras unidades, o cubierta discordantemente por sedimentos del Neógeno.</p>

## 4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

### 4.3. Geología local.

A continuación se presentan los aspectos geológicos locales identificados en campo, lo cual permitió definir una serie de unidades informales, cada una con propiedades intrínsecas que permite su diferenciación.

Básicamente, las diferencias existentes entre las unidades por la que pasa la sección de la Autopista Rómulo Betancourt, son variaciones, en primer grado, en la proporción en la que se encuentran presentes los diversos litotipos, así como también la forma en que se manifiesten, bien sea en capas o cuerpos aislados.

Lo anterior es muy importante, ya que se tiene una idea de las litologías y sus cantidades porcentuales, pero no de cómo se encuentran distribuidas en el espacio. Es decir, al mencionar un determinado porcentaje, generalmente no se aclara como está expuesta la litología en cuestión, bien sea como una gran capa o bloque que no presenta frecuencia, o bien en pequeñas partes distribuidas a todo lo largo de la unidad, que al estimar una cantidad general de la presencia litológica, se obtiene el porcentaje reportado.

En cuanto a la proporción litológica, cabe destacar que las proporciones que se reportarán a continuación para cada unidad establecida, son producto de la apreciación hecha visualmente en los afloramientos a escala mesoscópica, y que no necesariamente reflejan una proporción a nivel mineralógico, que solamente es posible afinar a través del estudio petrográfico de secciones finas.

En vista de que la litología regional es bastante similar, es difícil establecer límites muy específicos al momento de delimitar las unidades, ya que las variaciones ocurren

de manera aparentemente gradacional y no de manera brusca y tan evidente como ocurre al presentarse litologías contrastantes.

Sin embargo, a lo largo de la sección de la Autopista Rómulo Betancourt, en su sección Guatire – Caucagua, fue posible establecer cuatro unidades litológicas informales mencionadas de norte a sur, las cuales se denominaron: Unidad A, Unidad B, Unidad C y Unidad D.

Una vez que se han podido establecer las unidades, de acuerdo a características bien diferenciables, es posible tratar de comparar estas características, con las unidades descritas por la literatura para esta zona. Es así como se obtienen las siguientes correlaciones:

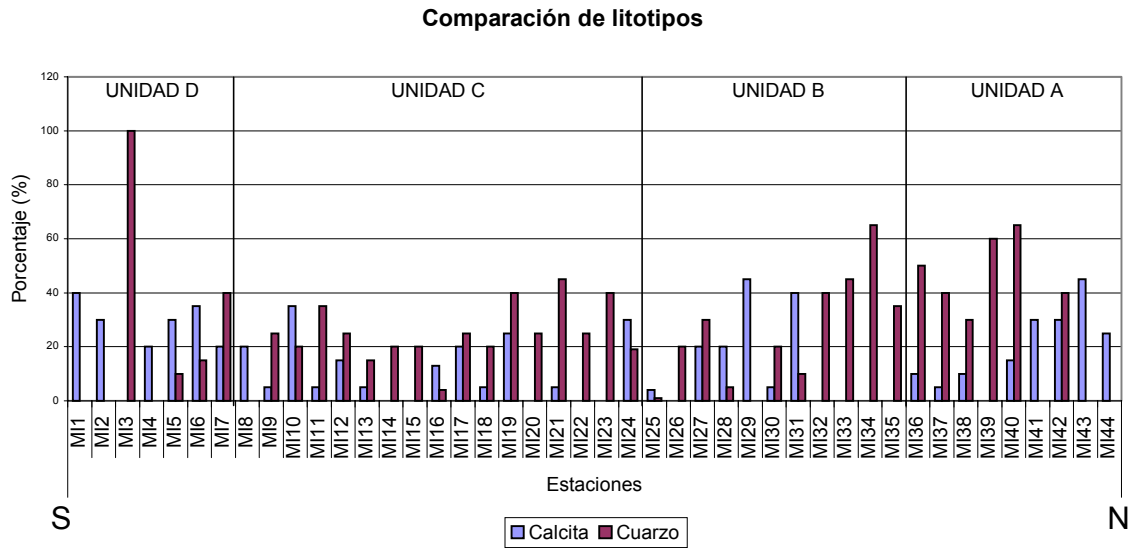
- La Unidad A correspondería con los Esquistos de Las Mercedes.
- La Unidad B corresponde al Esquisto de Chuspita.
- La Unidad C corresponde la Filita de Urape.
- La Unidad D corresponde a la Filita de Muruguata.

Estas unidades, como se mencionó anteriormente, fueron diferenciadas en base a, en primer lugar, las variaciones en componentes mineralógicos principales como el cuarzo y la calcita. Estas variaciones son observables a través del gráfico de la figura 7, y en segundo lugar e interrelacionado con el primer criterio, está la forma en la que se presente la proporción de dicho mineral, bien sea en capas, budines o niveles enriquecidos. Las características macroscópicas que diferencian a estas unidades se presentan resumidas en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Comparación entre las características y tipo de ocurrencia de las litologías observadas en la sección Guatire- Cauagua.

Foliación	Litología	Características	Unidades establecidas en campo					
			Unidad A	Unidad B	Unidad C	Unidad D		
Foliada	Filita - esquistos	Constituyentes interfoliados en la matriz	Niveles ricos en cuarzo	Continuos	F-H	F-O		
			Continuos	F-H	F-O			
			Espesor	5 mm	4 cm			
			Discontinuos			H	F-O	
			Espesor			2 cm	2mm	
			Niveles ricos en carbonato	Continuos	F-O			H
			Continuos	F-O				
			Espesor	7 cm			1- 1,5 cm	
			Discontinuos		H			
		Espesor		1 cm				
		Niveles verdes (volcánico)	Discontinuos				H	
		Discontinuos						
		Espesor				3 cm		
Presencia de micas	O	H						
Presencia de pirita		H						
Material grafitoso	O	O	F-O	O				
Color		Negro	Negro	Gris a negro	Negro			
Proporción general (%)		40	70	55	60			
No foliada	Metarenisca	Presencia de micas	O					
		Presencia de pirita	H					
		Vetas transversales	Cuarzo					
		Calcita	O	H				
		Budines grandes			PF-H			
		Budines pequeños		H	PF-H			
		Capas gruesas	Continuas		H			
		Continuas		H				
		Espesor		4 cm				
		Capas delgadas	Discontinuas	F-O		H		
		Discontinuas	F-O					
		Espesor	3 cm		2 cm			
		Color	Gr. Oscuro	Gris	Gris			
	Proporción (%)	35	20	35	0			
	Mármol	Capas gruesas	Continuas		H			
			Continuas		H			
			Espesor		70 cm			
			Discontinuas	H				
		Espesor	7 cm					
		Capas delgadas	Continuas			F-H	H	
Continuas					5 cm	2 cm		
Espesor								
Color		Blanco	Gris claro	Gris oscuro - gris claro	Blanco - gris claro			
Proporción (%)		25	10	5	14			
Meta conglomerado	Budines grandes							
	Budines pequeños			H	H			
	Color			Gris oscuro	Gris oscuro			
	Proporción (%)	0	0	5	1			

Abreviaturas  
 F= frecuente  
 PF= poco frecuente  
 O= distribución homogénea  
 H= distribución heterogénea

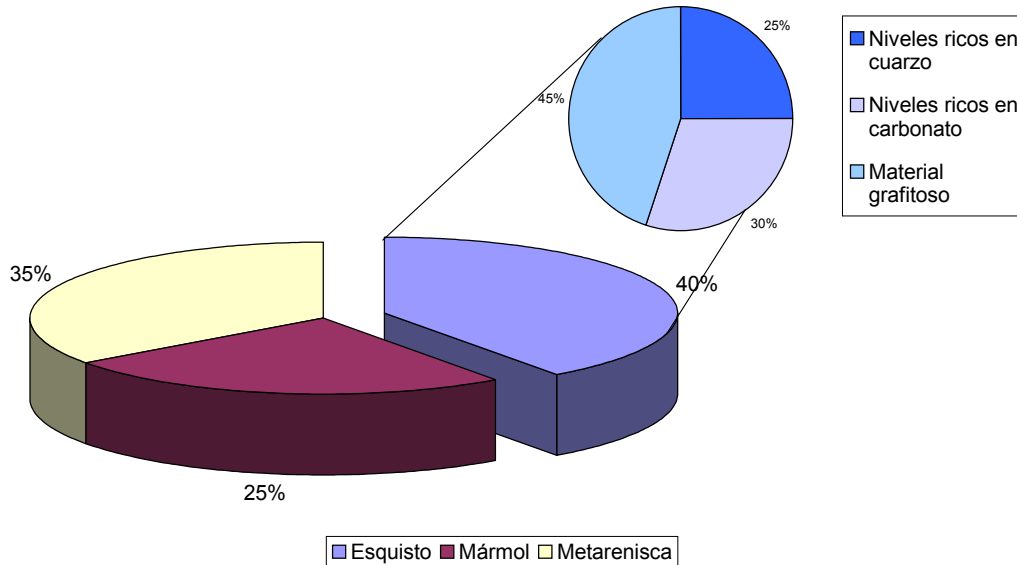


**Fig 7.** Comparación del contenido de cuarzo y de calcita en las litologías descritas en cada estación.(ver explicación en sección 4.3)

Una vez observado las características que distinguen a las unidades establecidas, se procede a mostrar gráficos comparativos para cada unidad, de las proporciones estimadas en campo de los litotipos, ya que una de las diferencias principales, radica en la proporción litológica.

### **Unidad A (Esquisto de Las Mercedes)**

Esta unidad, se distingue por poseer una importante cantidad de material carbonático, casi a la par del material silíceo, la mayoría de ellos presentes en forma de capas bien definidas y continuas, con ausencia de budines. la litología cuyo predominio está compartido por esquisto grafitoso no calcáreo, que en la generalidad se encuentran finamente interfoliado con vetas de cuarzo y de calcita de pocos milímetros de espesor, en la que pocas llegan al orden del decímetro. Sin embargo el espesor no es uniforme a lo largo de la foliación. Dichas vetas de cuarzo presentan una longitud continua y una alta frecuencia, así como una tintura color naranja posiblemente producto de algún proceso de oxidación.



**Fig. 8.** Proporciones de litotipos presentes en la Unidad A – Esquisto de Las Mercedes

También embebido en el esquisto se encuentra una gran proporción de material calcáreo distribuido homogéneamente con poca frecuencia en forma de finas vetas (de milímetros de espesor), distinguible por su color completamente blanco. Dichas vetas también son largas, están muy deformadas y en algunos casos perpendiculares a la foliación. El resto del esquisto está compuesto por material grafitoso de color negro.

Otra litología presente está compuestas por metarenisca gris oscuro a negro, de grano fino, micácea con contenido de pirita. Están dispuestos en cuerpos delgados de hasta 3 cm, discontinuos de 30 cm de longitud, interfoliados sin llegar a formar capas completas, ni tampoco budines. De hecho, en esta unidad la presencia de budines es casi nula. Algunas de estas metarenisca presentan vetas de calcita alojadas en sus diaclasas que no cortan la foliación circundante. La distribución de las metareniscas es homogénea con una alta frecuencia de ocurrencia que logra llegar hasta cada centímetro en algunos afloramientos. Una característica importante en esta unidad, es la presencia de micas en las capas de metarenisca y en los esquistos

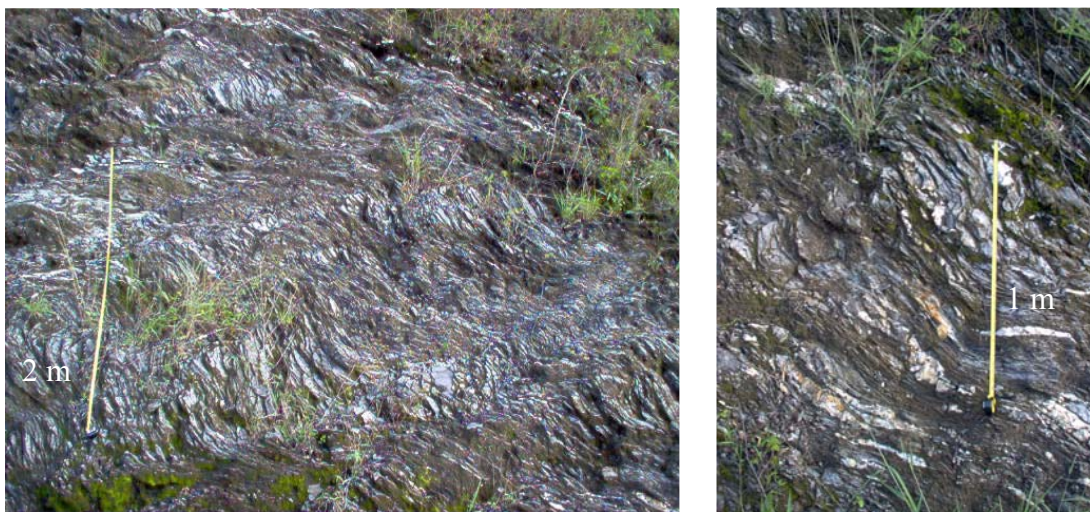
Finalmente están los cuerpos de mármol de color rosa pálido a gris azulado, en algunos casos grafitoso. Dichos cuerpos de forma alargada, muy deformados, alcanzan decenas de centímetros de espesor irregular, de disposición interfoliada y discontinuos, llegando a varios metros. Presentan una distribución algo heterogénea con abundancia local.



**Fig. 9.** Forma de plegamiento de la Unidad A – Esquisto de Las Mercedes

En esta unidad las estructuras presentes son básicamente pliegues isoclinales, moderadamente inclinados al norte con respecto a su plano axial y suavemente inclinado con respecto a su eje.

Esta unidad fue delimitada entre la estación MI- 36 y MI-44.

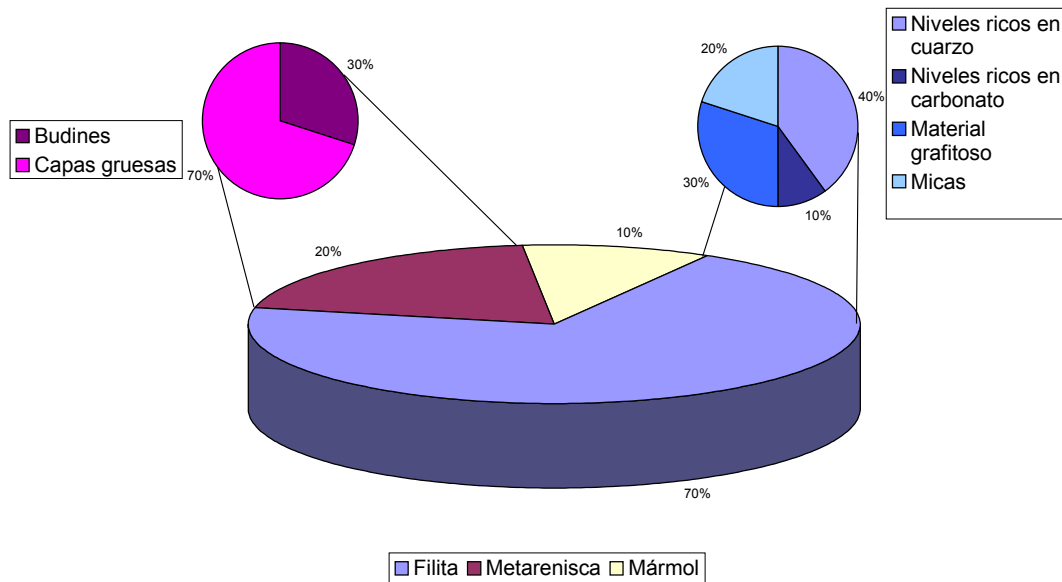


**Fig. 10.** Litología característica de la Unidad A – Esquisto de Las Mercedes



### Unidad B (Esquisto de Chuspita)

Esta unidad presenta como litología dominante a una filita grafitosa y micácea, de color negro a gris muy oscuro, y en este caso con una textura más suave al tacto, que en su interior se encuentra interfoliada una gran cantidad de niveles mineralógicos que se describen a continuación:



**Fig. 11.** Proporciones de litotipos presentes en la Unidad B – Esquisto de Chuspita

Vetas de cuarzo de color blanco, de forma irregular o constreñidas con espesores de 5 mm, que están interfoliadas de manera abundante y frecuente, lo que hace que aumente su proporción global. A su vez están presentes vetas de calcita menos frecuentes que las anteriores, de color beige o blanco, de forma alargada y discontinua con longitudes de unas pocas decenas de centímetros y espesores que van desde 5 mm hasta 1,5 cm la más ancha. Son más frecuentes en algunas zonas que en otras, por lo que su distribución no es homogénea.

A estos componentes mineralógicos de la filita caja, se les adiciona algunos niveles de mica (moscovita) menos abundante, así como de piritita, también escasa y localizada.

La siguiente litología presente en esta unidad, y que comparte importancia con la filita, es una metarenisca gris clara de grano medio, que en su mayoría presentan vetas de calcita en su interior que no llegan a cortar a la foliación, es decir, que no comparten el proceso de cizallamiento de la filita. Estas metareniscas están presentes de dos maneras: como capas continuas y gruesas de espesor variable (hasta 4 cm, en la Figura 12 se observan unas más delgadas) paralelas a la foliación, cuya distribución es bastante heterogénea; y también como budines elipsoidales o alargados, la mayoría simétricos sin sombras de presión, de variados tamaños (desde pocos centímetros, hasta algunos decímetros). Su distribución es dispersa y en algunos sitios tienen una abundancia relativa.



**Fig. 12.** Litología característica de la Unidad B – Esquisto de Chuspita. Los niveles más claros corresponden a metareniscas.

Finalmente se registra la existencia de capas gruesas de mármoles color gris, con espesores de 70 cm hasta de 3 m. Sin embargo, esta abundancia es local, por lo que comparando las proporciones de litología presentadas en la Figura 7, se muestra que existe en esta unidad una mayor proporción de material silíceo con respecto a los carbonatos.

En la Unidad B, la deformación de la roca es menor que en la unidad anterior, sin embargo se aprecian pliegues isoclinales recostados (Figura 13).



**Fig. 13.** Forma de plegamiento isoclinal y recostado presente en la Unidad B – Esquisto de Chuspita.

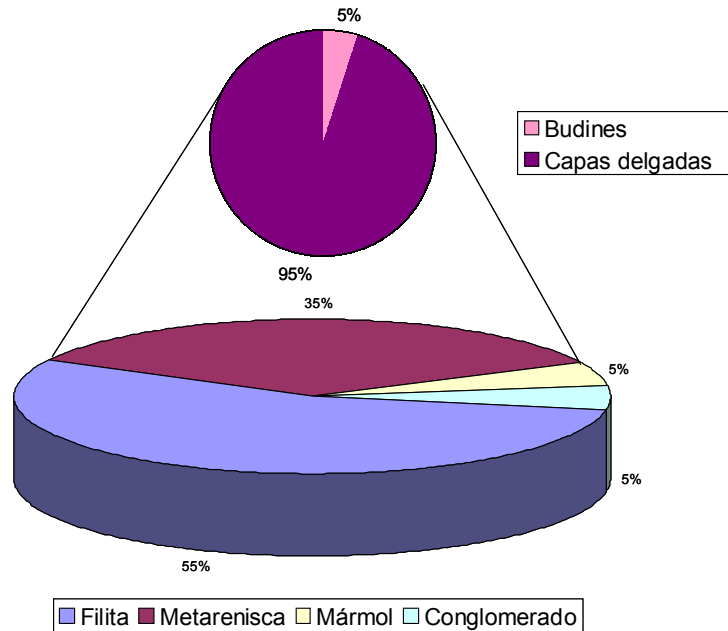
Igualmente esta unidad fue delimitada entre la estación MI-35 por el norte, y por la MI- 25 en el sur.

Petrográficamente se pudo distinguir la presencia de meta conglomerados formado por rocas sedimentarias (arenisca y chert sedimentario), así como otros especímenes que contenían fragmentos de rocas volcánicas, como vidrio o cuarzo desvitrificado. Este hecho es muy importante, ya que aproxima una idea del entorno en la cual se formó el protolito de esta unidad (Ver descripciones petrográficas en 8.3.1).

### **Unidad C (Filita de Urape)**

La Unidad C está definida por un enriquecimiento aún mayor de material silíceo, en donde la presencia de capas delgadas discontinuas, casi sin formar budines alargados, es muy frecuente, así como en esta unidad está la mayor presencia de mega

budines de metarenisca. La roca caja está bien diferenciada por ser bastante homogénea, con pocas intercalaciones de niveles delgados.



**Fig. 14.** Proporciones de litotipos presentes en la Unidad C – Filita de Urape

Entre las litologías presentes en esta unidad, tenemos las siguientes:

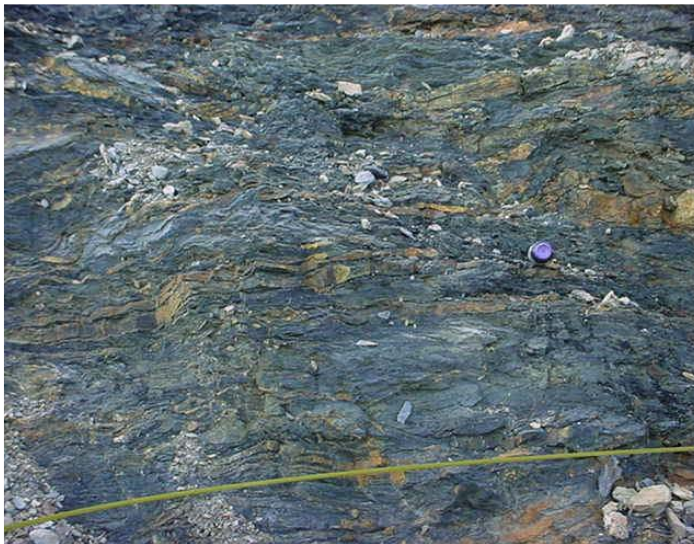
Una filita grafitosa de color negro a gris oscuro, con marcada foliación, y suave al tacto. En su interior, se encuentran algunos niveles mineralógicos interfoliados abundantes localmente. En primer lugar se hallan los niveles de cuarzo en forma discontinua y con espesores de hasta 2 cm. Estos niveles no se encuentran siempre, sino de manera localizada y heterogénea.

En cuanto a la metarenisca, se presenta en forma de budines y elipsoidales de mediano tamaño en su mayoría (17 x 5 cm como promedio)



**Fig. 15.** Litología característica de la Unidad C – Filita de Urape. Se observan los niveles de metarenisca color gris. Este afloramiento muy fresco es poco frecuente

que en su interior alojan algunas vetas de calcita que no llegan a cortar la foliación, sin embargo, en esta unidad existe la presencia de grandes budines del mismo materia arenoso que presenta abundancias muy localizadas generalmente hacia el centro de la unidad (Figura 17) Estos budines son generalmente de color gris, en algunos casos gris oscuro. Son bastante comunes y están distribuidas heterogéneamente, en la que



**Fig. 16.** Litología característica de la Unidad C – Filita de Urape. Se observan las capas de metarenisca color naranja a ocre, producto de la meteorización. Este aspecto de los afloramientos es más común en comparación que la que se muestra en la Figura 15 que está muy fresca y sin meteorización.

existen sitios donde su presencia es mayor. Otra forma de ocurrencia de la metarenisca, que es más abundante, es en forma de capas delgadas de 2 cm de espesor de relativa continuidad. Estas metareniscas se hallan bastante dispersas en lugares de relativa abundancia (Figura 15 y 16), pero son menos comunes que los budines.

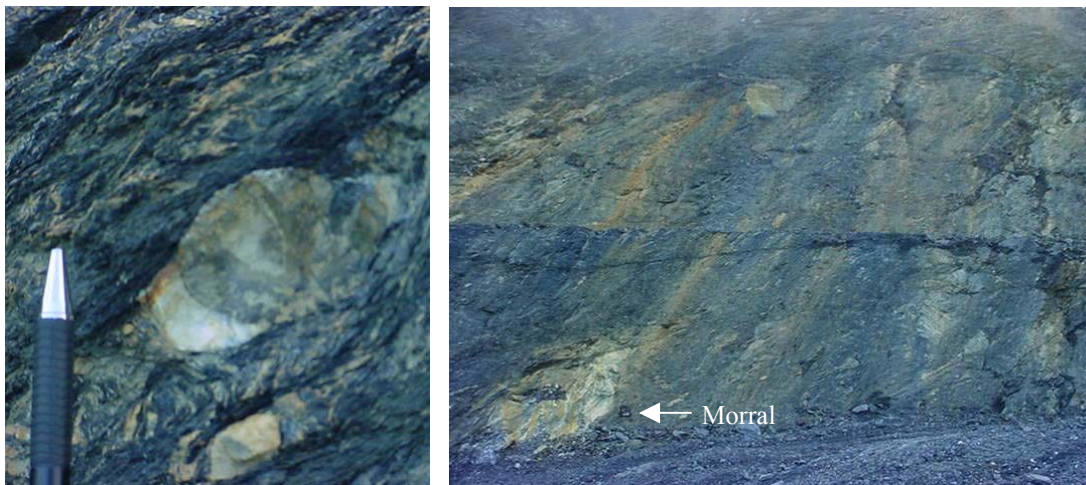
Existe por parte de los materiales carbonáticos una abundancia local, en su mayoría en capas delgadas, en forma continua de hasta 5 cm de espesor, con colores que van desde el gris claro al gris oscuro. Estas capas se pueden apreciar más fácilmente en la medida que el afloramiento esté más fresco, como se observa en la Figura 15. a pesar que presentan una alta frecuencia, su distribución es heterogénea a lo largo de la unidad.

Finalmente, como litología minoritaria y distribuida heterogéneamente, comienzan a aparecer en esta unidad los meta conglomerados, con inclusiones de rocas verdosas como se observa en la Figura 18. Petrográficamente, estas rocas representan a meta

conglomerados epiclásticos constituidos por fragmentos de rocas sedimentarias como arenisca y chert, así como de fragmentos de rocas volcánicas como cuarzo desvitrificado. A su vez, algunos casos de estos meta conglomerados analizados petrográficamente, tienen un origen exclusivamente piroclástico con algunos fragmentos de rocas ígneas como diabasas.

Estructuralmente esta unidad es mucho menos compleja que las anteriores, con una casi ausencia de plegamiento. En su mayoría muy abiertos y provocado por la perturbación que provocan los budines sobre la foliación. Sin embargo son muy frecuente los clivajes crenulados que se perciben muy finamente a través del tacto. En algunos casos se observan hasta dos direcciones que se cruzan. Este aspecto se detallará más adelante

A partir de las características que sirvieron para discriminar esta unidad de las demás, se considera que los límites de la misma son: la estación MI-24 en el norte con la Unidad B – Esquisto de Chuspita, y la estación MI-8 hacia el sureste con la Unidad D – Filita de Muruguata.



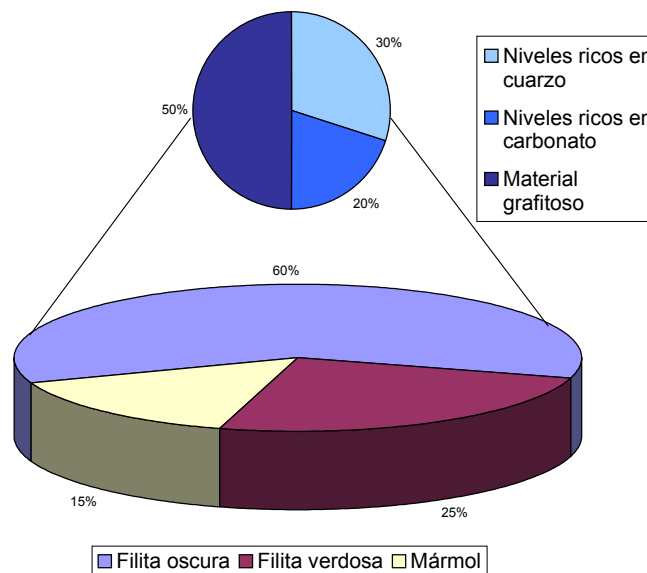
**Fig. 17** Variedad de budines de metarenisca presentes en la Unidad C – Filita de Urape. La imagen de la izquierda muestra un pequeño budín de tamaño muy común a lo largo de la unidad. La imagen derecha por su parte, muestra la disposición de los mega budines también de metarenisca. Este budinaje es muy característico de esta unidad.



**Fig. 18** Muestra de un meta conglomerado de la Unidad C – Filita de Urape con inclusiones de rocas color verdosas. Petrográficamente se determinó que dichos fragmentos de roca tienen un origen ígneo volcánico.

### Unidad D (Filita de Muruguata)

A continuación la Figura 19 muestra las proporciones de los litotipos presentes en esta unidad y su abundancia determinada en campo.



**Fig. 19.** Proporciones de litotipos presentes en la Unidad D – Filita de Muruguata

Para esta unidad, se aprecia un enriquecimiento en material carbonático comparado con la anterior unidad, esto debido a la presencia de niveles enriquecidos en calcita embebidos en una roca caja mayoritaria de filita grafitosa de color oscuro. Estos niveles de calcita, de 1 a 1,5 cm de espesor se encuentra distribuido heterogéneamente en la unidad en la forma de laminaciones pequeñas, de alta frecuencia, siendo escasas las capas gruesas. Existen también niveles de material silíceo, distinguibles por su color blanco embebidos en la roca caja, la cual se presentan también en forma de delgados niveles ( de hasta 2 mm), en su mayoría discontinuos y de abundancia muy local. Petrográficamente, mucho de esta filita se encuentra conformado por microcristales de calcita, lo que produce la reacción de la roca ante el ácido clorhídrico, y que al considerar la proporción petrográfica de este mineral, resulta que la roca corresponde a mármoles grafitosos muy oscuros.



**Fig. 19.** Litología característica de la Unidad D – Filita de Muruguata. Se llegan a distinguir unos niveles más claros que representan los niveles enriquecidos en cuarzo y en calcita.



La siguiente litología presente en esta unidad, y que tiene el segundo lugar en abundancia, lo constituye la presencia de unos niveles verdosos de hasta 3 cm de espesor que se encuentran interfoliados de manera discontinua con la filita grafitosa o roca caja y que se distribuyen de manera heterogénea a lo largo de la unidad (Figura 20). A su vez, este material forma algunos lentes de rocas verdes, lo cual petrográficamente constituyen metalavas máficas y meta diabasas, constituidos principalmente por anfíbol, piroxeno y plagioclasa sódica. Estas rocas constituirían las lavas expulsadas por los volcanes pertenecientes a una inicial cuenca retro arco antes del metamorfismo. Estas rocas meta volcánicas constituyen una de las principales características que distinguen a esta unidad.



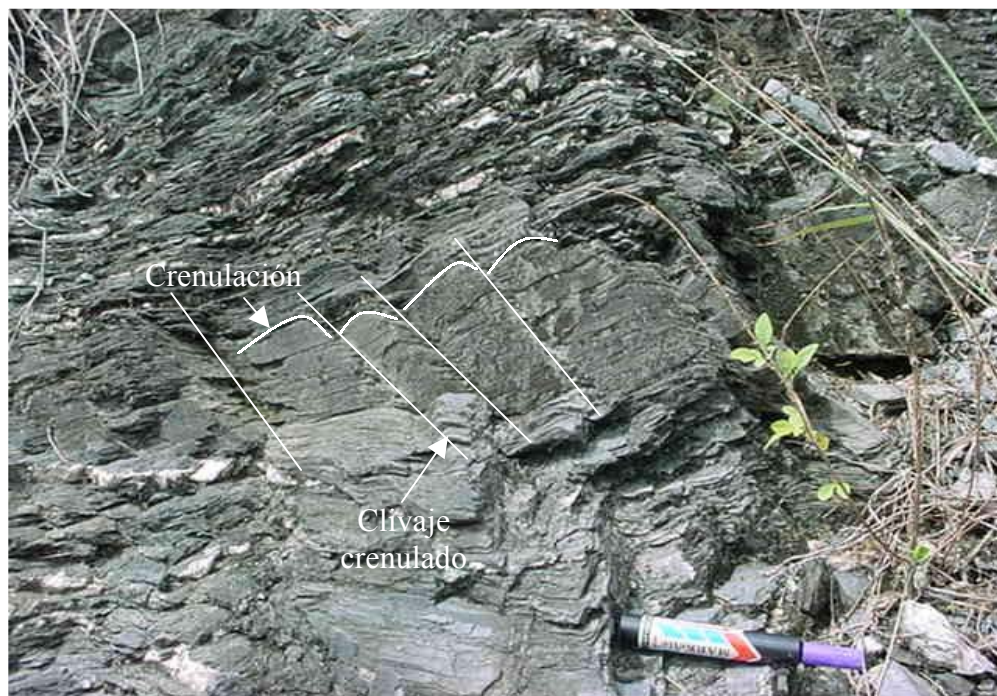
**Fig. 20.** Detalle de los niveles de filita verdosa presentes en la Unidad D – Filita de Muruguata. Se observan también algunos niveles de cuarzo color blanco y de filita oscura (mármoles grafitosos)

Finalmente se tienen los mármoles que se distinguen debido a su color gris claro a blanco. Este material forma capas delgadas continuas de hasta 2 cm de espesor que se encuentran distribuidas heterogéneamente. Casi todos son afaníticas y embebidos en la foliación de manera concordante. En general, mucha de esta litología se llega a subestimar porcentualmente, debido a que existen mármoles con alto contenido de material grafitoso que antes de una descripción petrográfica, se considerarían como filitas grafitosas calcáreas.

En cuanto a la presencia de budines, en esta unidad la abundancia de los mismos se restringe hacia la parte noroeste de la unidad, donde existe una abundancia

localizada siendo bastante escaso su ocurrencia en toda sección. La mayoría de estos son de mármol

Estructuralmente, esta unidad es la que presenta el menor grado de deformación de todas, siendo la estructura más abundante la cantidad de mega crenulaciones que se forman sobre la foliación, la cual forma planos de discontinuidades que cortan casi perpendicular a la misma (clivaje crenulado), como se aprecia en la Figura 21



**Fig. 21.** Detalle de las mega crenulaciones que se forman sobre la foliación, y que producen planos de discontinuidades conocidos como clivaje crenulado. Este tipo de plegamiento de muy baja escala es la que se encuentra presente en la Unidad D – Filita de Muruguata.

Finalmente se considera que esta unidad está limitada por las estaciones MI-7 hacia el norte, y por MI-1, aunque esta estación corresponde al límite de la zona de estudio, no se descarta la continuidad de la unidad más hacia el sur.

#### 4.4 Metamorfismo

Una vez realizado los análisis petrográficos que permiten conocer más detalladamente la mineralogía de las rocas que competen a este estudio, se pudo determinar la facies metamórfica a la cual pertenecen según las asociaciones mineralógicas.

Las unidades estudiadas presentan con mayor frecuencia es siguiente conjunto mineralógico para las rocas grafitosas (meta sedimentarias).

- Cuarzo –albita – clorita – sericita – calcita.

Para las rocas de color verdoso (material volcánico)

- Cuarzo – albita – clorita – leucoxeno – calcita.

Estas rocas han sufrido un metamorfismo no más alto que la subfacies de cuarzo – albita –muscovita – clorita de la facies de los esquistos verdes de metamorfismo regional.

Estas asociaciones mineralógicas e interpretaciones de metamorfismo concuerdan con Seiders (1965), DENG (1953) y WEHRMANN (1972).

#### 4.5 Discusiones generales

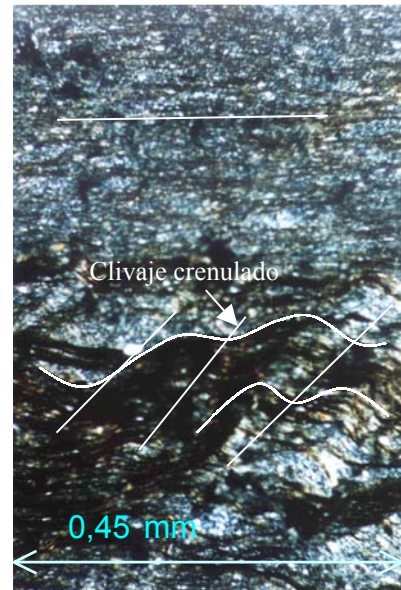
Como se ha podido comprobar, existen criterios suficientes que permiten establecer para esta región, diferentes unidades litológicas, bien diferenciadas y cartografiables, por lo que sí cabe separar los macizos en grupos litológicos petrológicamente distintos.

En base al estudio petrográfico se puede interpretar el protolito de las rocas estudiadas:

- Filita grafitosa → lutita rica en materia orgánica.
- Mármol → niveles de caliza u horizontes de microfauna
- Metaconglomerado lítico → conglomerado de fragmentos de roca, básicamente también sedimentarias.
- Metaconglomerado epiclástico → conglomerado con fragmentos de rocas sedimentarias y volcánicas.
- Metaconglomerado piroclástico → conglomerado de fragmentos volcánicos, como vidrio, cenizas y escorias.
- Meta diabasa → diabasa y lava máfica

Estas litologías pudieron asociarse a través de un modelo de cuenca retroarco, de aguas profundas y restringidas para casi todas las unidades, con lugares donde existía una importante influencia volcánica y piroclástica como en las unidades de Urape y Muruguata.

Una vez que se han metamorfizado las litologías originales, se encontraron evidencias de dos períodos de deformación, al analizar las estructuras presentes en los afloramientos (ver Figura 21) y en secciones finas (Figura 22), como son los plegamientos, el clivaje crenulado y la foliación. En estas imágenes se logran apreciar las diferentes superficies de discontinuidades y los períodos de deformación que las originaron, como

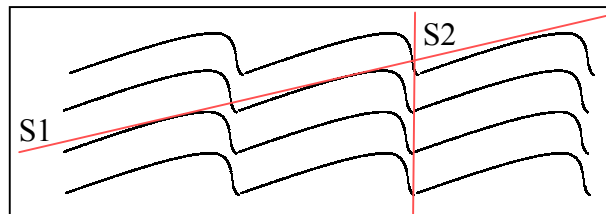


**Fig. 22.** imagen de una sección fina de una filita de la Unidad B – Esquistos de Chuspita que muestra dos períodos de deformación

se detalla en la Tabla 9

**Tabla 9.** Superfies encontradas en las rocas y los períodos de deformación que las originan

SUPERFICIE		PERÍODO DE DEFORMACIÓN	
S0	Estratificación original		
S1	Foliación predominante	D1	Régimen dúctil en cuyo clímax se produce el metamorfismo
S2	Clivaje crenulado	D2	Régimen frágil, con la formación de nuevos planos de discontinuidades



Una vez que se ha podido diferenciar la litología en varias unidades, y luego correlacionarlas con las unidades formales, los contactos que se tienen actualmente establecidos (como se aprecia en la Figura 23), se pueden refinar en base a la nueva información adquirida en campo, proponiendo los contactos que se presentan en la Figura 24.

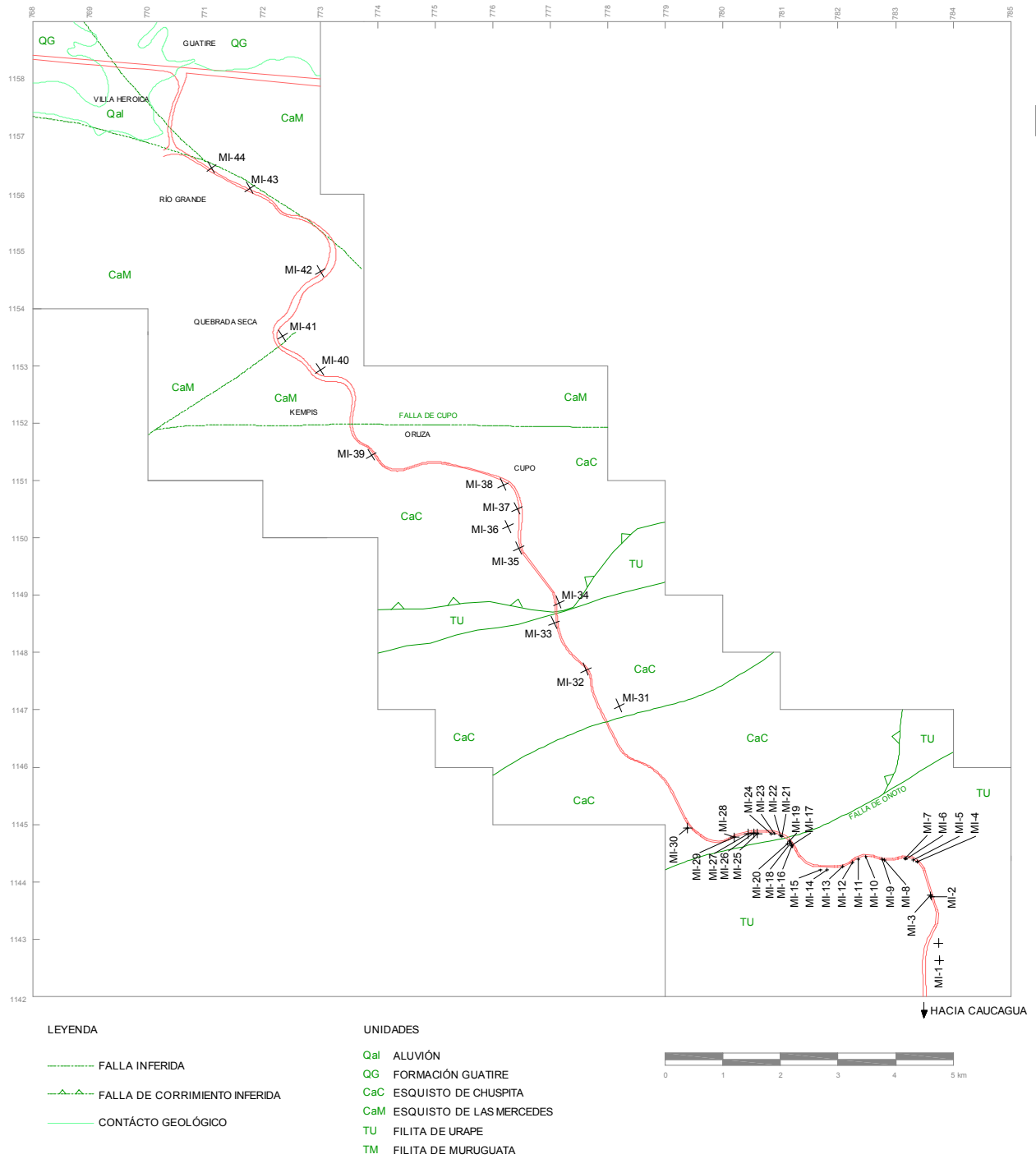
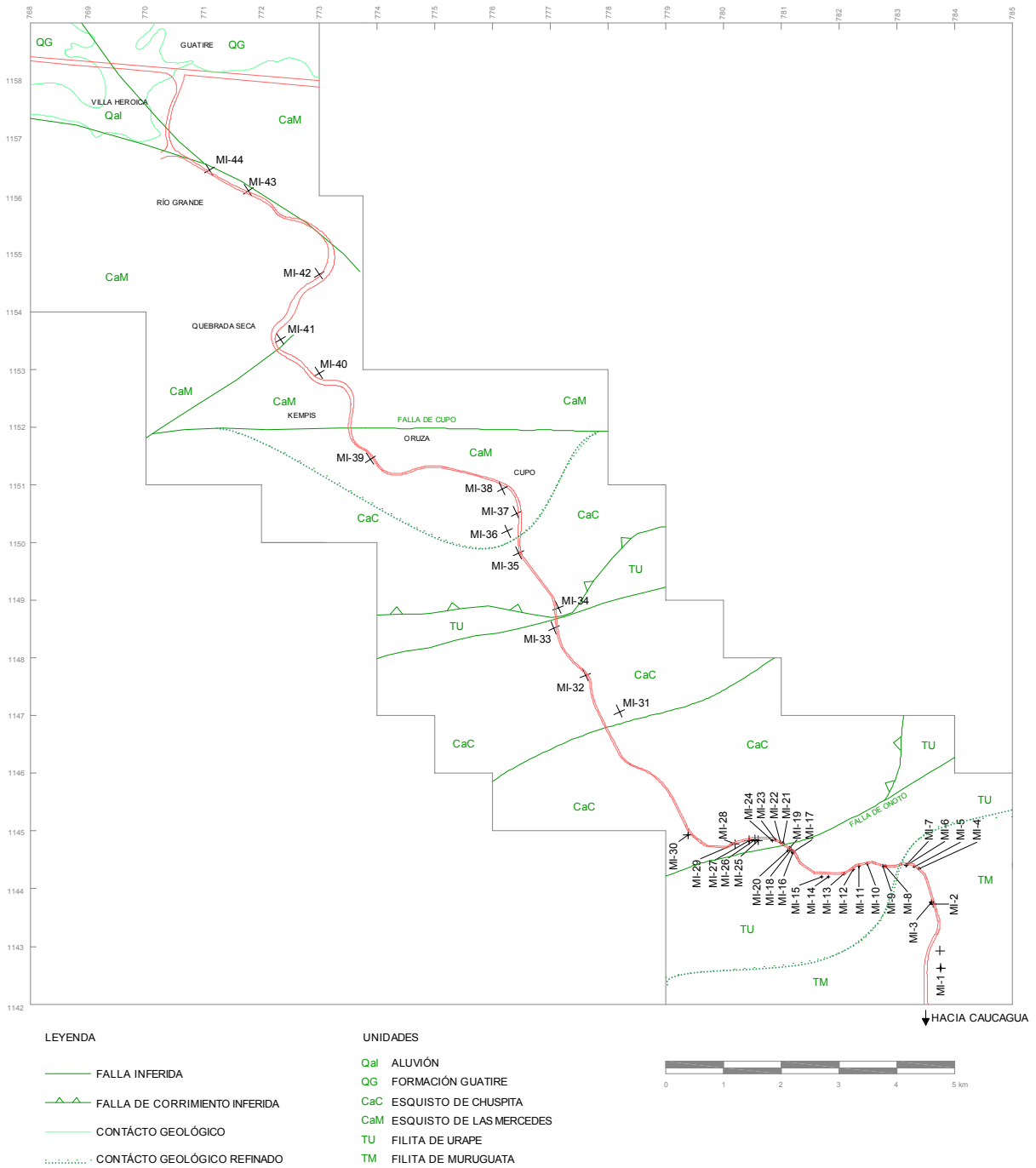


Fig. 23 Geología regional según recopilación de ORTA 2003 y ANDRADE 2004

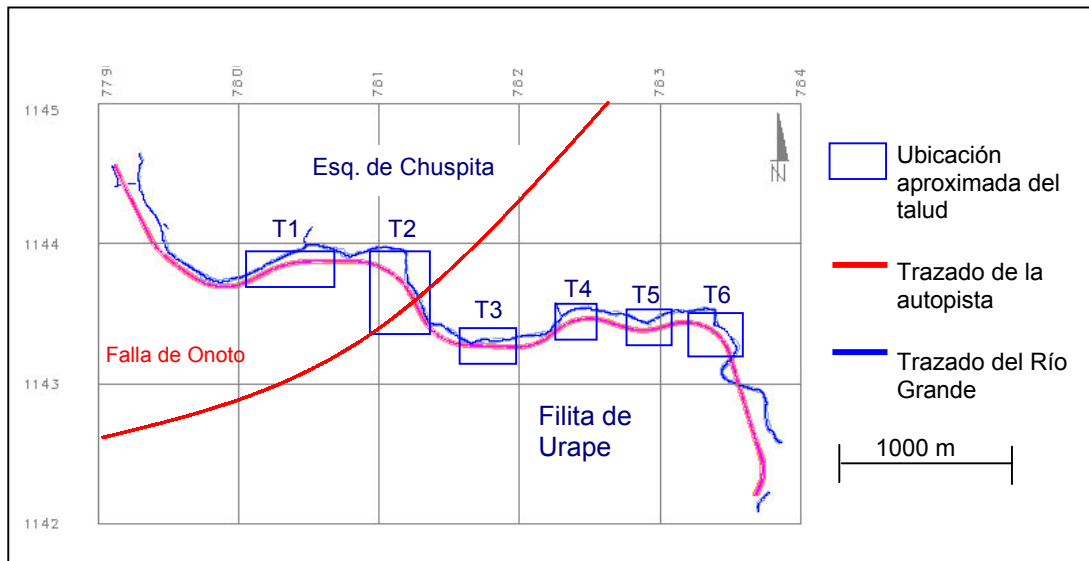


**Fig. 24** Geología regional refinada según esta investigación

## 5. ASPECTOS GEOMECÁNICOS O GEOTÉCNICOS

### 5.1. Ubicación de los taludes del tramo III de la Autopista Rómulo Betancourt

El estudio geomecánico o geotécnico se llevó a cabo solamente en los macizos rocosos de los taludes de corte a lo largo del tramo III de la autopista de oriente. Esto corresponde a seis taludes ubicados en diversos sitios como se muestra en la Figura 25.



**Fig. 25.** Mapa simplificado del tramo III de la Autopista Rómulo Betancourt donde se ubican relativamente los seis taludes de corte evaluados geotécnicamente

Para su descripción se utilizó el sistema de ubicación basado en las progresivas que cubre cada talud, crecientes hacia el este y propias de la obra, cuyo 0+000 está al inicio de la construcción y no se rige por el progresivado nacional. Así los taludes tendrán la siguiente nomenclatura:

- Talud 1: entre las progresivas 1+420 a la 2+060
- Talud 2: entre las progresivas 2+180 a la 2+860
- Talud 3: entre las progresivas 3+300 a la 3+500
- Talud 4: entre las progresivas 3+900 a la 4+100
- Talud 5: entre las progresivas 4+380 a la 4+480



- Talud 6: entre las progresivas 4+820 a la 5+160

Como convención, se usará en los estereogramas presentados, el color violeta para representar la foliación, el verde para las diaclasas, el rojo para las fallas y el negro para los planos del talud.

A continuación se describe las condiciones de cada talud por separado en los siguientes aspectos: morfología de la cresta, litologías presentes y las condiciones de las discontinuidades.

#### **5.1.1. Talud ubicado entre las progresivas 1+420 a la 2+060**

Ubicado más hacia el oeste, este talud al sur del Río Grande, presenta una orientación este - oeste, con una pendiente 1:1, con exposición norte. Tiene una longitud aproximada de 60 m, y está compuesta por dos bermas de igual pendiente.

##### Morfología del talud:

El talud presenta una morfología bastante simple, debido a su poca extensión. Su tope está definido por una curva parabólica de forma suave, lo que no sugiere paleo-deslizamientos laterales. Es importante mencionar que en la segunda berma, son abundantes y grandes y cárcavas de erosión, lo que indica un importante proceso de meteorización y un importante manto regolítico, la cual está constituido por material rocoso incoherente cerca de la superficie, donde se aloja el suelo residual.

##### Litología:

La litología expuesta en el talud, está conformada en su mayoría por esquistos grafitosos, de color negro, que a su vez sirve de roca caja a pequeños budines de 10cm aproximadamente, constituido por metarenisca color gris interfoliados, que no

llegan a cortar la foliación, así como a vetas de mármoles de forma alargada, siendo estas de poca longitud y menor proporción.

Esta composición litológica sólo es bien apreciable hacia la parte baja y este del talud, donde la misma es más fresca y es posible apreciar algunas estructuras, ya que aproximadamente un 75% del talud, está altamente meteorizado, de color naranja claro a beige, en la se observan algunos tonos oscuros por óxidos. Esto implica que la presencia de material suelto es muy abundante, formando cantos angulosos y de forma laminar de aproximadamente 2 cm de longitud. Este contraste de meteorización es de forma gradual y transicional.

#### Discontinuidades:

En lo concerniente a la foliación (violeta), ésta presenta una orientación promedio de alta frecuencia y muy homogénea de N 36° W 20° N en la que se puede apreciar que no existe variaciones producto de plegamientos megascópicos.

Las diaclasas (verdes) por su parte, presentan básicamente tres familias: una de orientación general N 76° W 81° N; N 72° W 82 °S, y otra de N 35° E 80 N. En los dos primeros casos, las diaclasas son muy frecuentes (Hasta cada 5 cm) y muy persistentes (hasta 2m). La mayoría cerradas, pero las que se encontraban abiertas, presentaban en su mayoría relleno de calcita y algunas de cuarzo.

En cuanto a las fallas presentes, son muy pocas, llegándose a observar dos en todo el afloramiento. Son muy persistentes, abiertas y presentan material triturado en su interior. A ellas se encuentran asociadas las principales vetas de cuarzo, y sólo en una hay presencia de precolación de agua.

A continuación se presenta un cuadro que muestra los planos promedios obtenidos luego de agruparlos estadísticamente:

**Tabla 10.** Estadística de las discontinuidades presentes en el talud entre las progresivas 1+420 a la 2+060

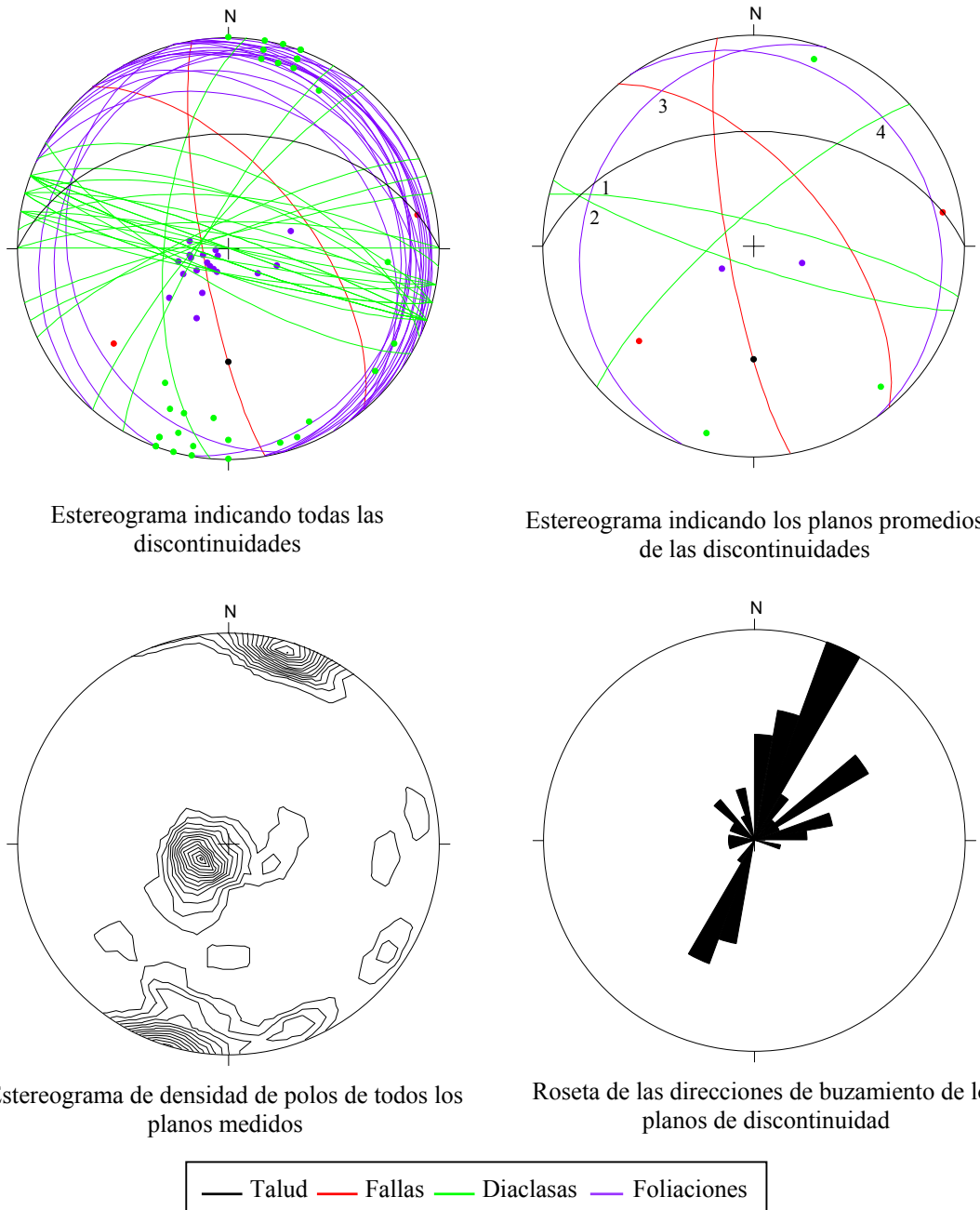
Talud	Discontinuidad	Orientación	Desv. Estándar		No de datos
			Rumbo	Buzamiento	
Prog. 1+420 al 2+060	Foliación 1	N 25 E 20 N	10,8	4,08	3
	Foliación 2	N 36 W 15 N	19,16	7,52	15
	Diaclasa 1	N 48 E 79 N	24,95	6,71	6
	Diaclasa 2	N 76 W 81 N	7,6	9,48	14
	Diaclasa 3	N 72 W 82 S	5,56	3,31	10

### 5.1.2. Talud ubicado entre las progresivas 2+180 al 2+860

Segundo talud de corte realizado, y el de mayor longitud con aproximadamente 700m está ubicado en una curva, por lo que el rumbo del talud es variable. También es variable el buzamiento desde aproximadamente la progresiva 2+610, por lo que se realizó el levantamiento por secciones. Este talud tiene cuatro bermas, de las cuales las que mejor exponen la roca fresca es la segunda.

Para el estudio de este talud, el mismo fue dividido en tres secciones:

- 1° sección: al este de un derrumbe importante que corta las dos bermas expuestas.
- 2° sección: desde el derrumbe, incluyendo la parte más alta del talud, hasta otro derrumbe donde ocurre el cambio de pendiente. Dicho derrumbe no corta la primera berma y ocurre aproximadamente en la progresiva 2+610.
- 3° sección: desde el último derrumbe donde ocurre el cambio de pendiente, hasta el final del talud.



**Fig. 26.** Estereogramas de discontinuidades medidas en el talud ubicado entre las progresivas 1+420 a la 2+060

### Morfología del talud:

La morfología que presenta una línea de cresta es muy irregular. De este a oeste, lo primero que se aprecia es un pequeño derrumbe que ha ido aumentando de proporción, con un cono coluvial algo importante. En el tope de dicho derrumbe se halla una pequeña quebrada colgada con un débil flujo de agua. Esta quebrada deja bien marcada su huella en la línea del tope del talud.

El siguiente derrumbe, a pocos metros del primero, es uno de los más críticos para la obra, ya que el desprendimiento de material, así como su anchura, son de tamaños importantes. Es también producido por una quebrada colgada, que cuando ocurren altas precipitaciones, crea un fuerte torrente de agua que cae desde lo alto. Por lo crítico de su influencia sobre la seguridad de la obra, está diseñado la construcción de una torrentera que controle el flujo de agua de la quebrada.

Seguidamente la línea del tope se hace más suave y continua, hasta la mitad del talud, donde aparentemente hay una importante depresión en esta línea, lo que sugiere la presencia de alguna ensilladura de falla, sin embargo, y a pesar de que la literatura apunta a un contacto entre unidades en esta zona, producida por la Falla de Onoto, no se observa una traza o conjunto de fallas que así lo indiquen. A pesar de la falta de evidencia directa, es importante considerar esta morfología.

A partir de este punto, lo único que es notable, es un derrumbe producido en el cambio de pendiente del talud, aparentemente producido por la inestabilidad del material y no por drenajes colgados.

Un detalle importante de mencionar, que será desarrollado más adelante, es la morfología “aserrada” que adopta el borde de la primera berma, evidencia de cuñas que han sido desprendidas del macizo. Este tipo de morfología no es observado en ningún otro tipo de talud, y es remarcado por lo fresco que está expuesto la roca.

Litología:

El tipo de roca que aflora en este talud, corresponde en su mayoría a esquistos y filitas grafitosas color negro, algunas moscovíticas, y escasa presencia de pirita, lo que produce grandes manchas color naranja, producto del óxido. A su vez son muy comunes los budines de metareniscas, de color gris claro, de tamaños megascópicos y en su mayoría de grano medio. Estos budines se encuentran interfoliados de manera discordante, sin sombras de presión. En su mayoría corresponden a cuerpos alargados y ovoides, discontinuos, que presentan una amplia gama de tamaños, desde casi 5 m de longitud, hasta pequeños de 10 cm. Existe otra variedad de metareniscas de color negro de grano fino, también interfoliadas que forman pequeños cuerpos muy alongados, casi como capas, que en su mayoría se aprecian con un cuidadoso detalle del afloramiento. Casi todas las metareniscas presentan en su interior, vetas de calcita que no llegan a cortar la foliación. La presencia de las metareniscas, sobre todo las de color negro, ofrecen al macizo cierta competencia, ya que están muy distribuidas a lo largo del talud.

Existen además cuerpos de mármoles de color gris oscuro en forma de capas gruesas o en vetas subparalelas a la foliación. Estas vetas tienen sus zonas de relativa abundancia a lo largo del talud, sin embargo la presencia de pequeñas vetas de calcita es bastante abundante, algunas de ellas producto de los esfuerzos de tracción causados por el cizallamiento.

Finalmente, existen escasos cuerpos de meta conglomerados, en su mayoría silíceos, pero con una composición exacta todavía sin determinar. Estos cuerpos alargados y de mediano tamaño, están generalmente asociados con los budines de metareniscas de color gris claro.

Discontinuidades:

Las principales estructuras medidas para el interés de la obra las constituyen los planos de discontinuidades (foliación, diaclasas y fallas) las cuales fueron medidos y representados en estereogramas. Los mismos fueron agrupados en familias o planos promedios obteniendo los siguientes grupos:

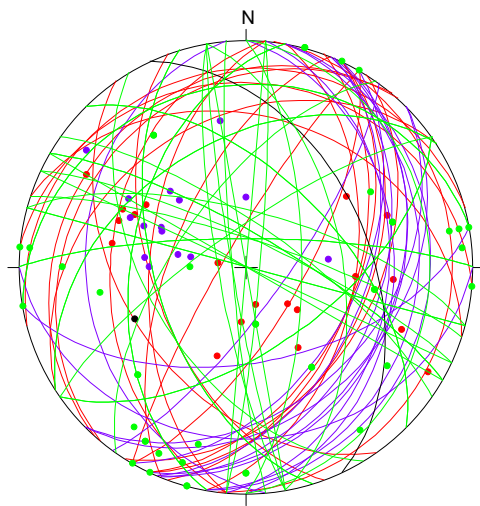
**Tabla 11.** Estadística de las discontinuidades presentes en el talud entre las progresivas 2+180 a la 2+860

Talud	Discontinuidad	Orientación	Desv. Estándar		No de datos
			Rumbo	Buzamiento	
<i>Prog. 2+180 al 2+860</i>	Foliación 1	N 23 E 39 S	14,08	13,54	12
	Diaclasa 1	N 65 W 75 N	12,77	16,38	17
	Diaclasa 2	N 18 W 71 S	15,06	14,07	13
	Falla 1	N 21 E 45 S	8,87	16,59	7
	Falla 2	N 20 W 52 S	13,78	19,35	5
	Falla 3	N 56 E 31 N	22,13	16,22	6

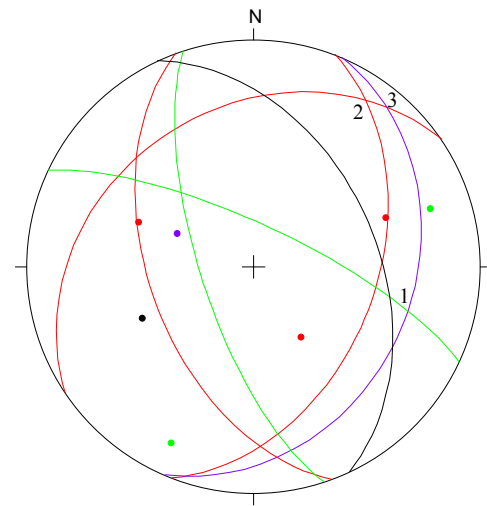
Además de estas estructuras, como se mencionó anteriormente, está la presencia de los budines de metareniscas, y aunque no existen grandes estructuras plegadas, si existe alguna variación en las orientaciones de la foliación, además de plegamiento monoclinar, en echelon y ptgmáticos de pequeña escala, estas últimas sobre todo en las vetas de calcita transversales a la foliación, lo que da una idea del grado de cizallamiento que sufrió la zona, en un estado algo dúctil

El talud al encontrarse ubicado en una zona de contraste geológico producido por la falla de Onoto, la cual tiene carácter regional, se encuentra relativamente fallado. Esto produce tres familias de fallas conjugadas entre sí, en su mayoría muy persistentes y abiertas, con algunas arcillas de falla las más grandes.

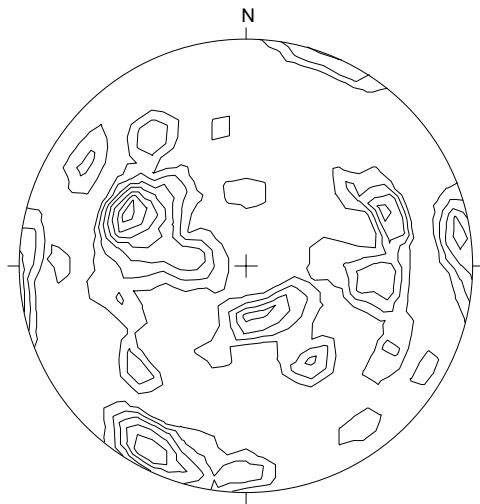
En cuanto a las diaclasas, existe marcada tendencia a dos familias, que se hacen más notables en las zonas de budinaje o contraste litológico.



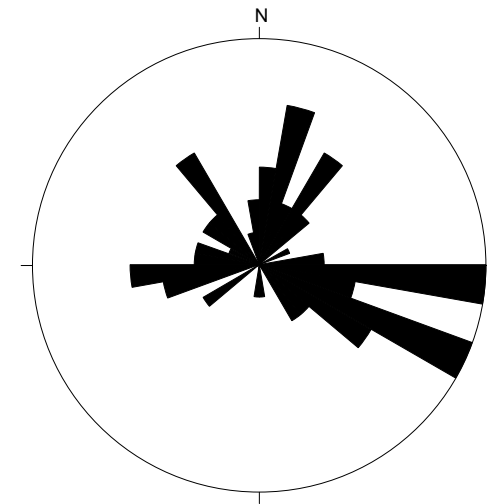
Estereograma indicando todas las discontinuidades



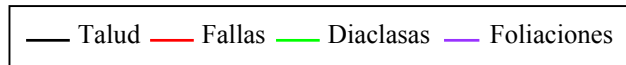
Estereograma indicando los planos promedios de las discontinuidades



Estereograma de densidad de polos de todos los planos medidos



Roseta de las direcciones de buzamiento de los planos de discontinuidad



**Fig. 27.** Estereogramas de discontinuidades medidas en el talud ubicado entre las progresivas 2+180 a la 2+860



### 5.1.3. Talud ubicado entre las progresivas 3+300 al 3+500

El talud evaluado, está ubicado al sur en la progresiva 3+500, y tiene una orientación Este - Oeste, con una pendiente 1:1, con exposición norte. El mismo tiene una extensión aproximada de 50m de longitud, y está compuesto por dos bermas, siendo el nivel inferior, la rasante con el nivel de la autopista proyectada. Este talud presenta una importante grieta que fractura todo el plano expuesto, la cual representa una preocupación para el diseño de la obra y la seguridad de los trabajadores que allí laboran.

#### Morfología del talud:

Al realizarse las actividades de corte del talud, quedó expuesto hacia la ladera Este, una morfología en forma de escalones descendentes (específicamente 6 escalones) y que tiene vergencia hacia una quebrada que quedó colgada (por encima del nivel). Esta morfología en forma de escalones, es señal diagnóstica de una historia de deslizamientos hacia la quebrada colgada que han ocurrido en tiempos pasados.



**Fig. 28.** Morfología del talud ubicado entre las progresivas 3+300 a la 3+500. Nótese la forma de escalones típico de paleodeslizamientos que ocurrieron hacia la quebrada colgada ubicada hacia la izquierda.

El plano del talud presenta a su vez, huellas de deslizamientos ocurridos por la remoción actual del material. Entre estas huellas, están pequeños conos coluviales de no más de 2 m de ancho a lo largo de las bermas. Recientemente y producto de

fuertes aguaceros ocurridos en la zona, se produjo un deslizamiento que dejó en su haber la típica huella en forma de herradura sobre el plano de talud.

A su vez, el talud se encuentra afectado por una falla que atraviesa todo el talud y cuya traza se expone con un ángulo aproximado de 40° hacia el este, lo que separa dos bloques, en la cual el superior aparenta sobresalir con respecto al inferior. Las características de esta falla de carácter regional se detallarán más adelante.

Los deslizamientos laterales ocurridos hacia la quebrada colgada, como se mencionó anteriormente, son producto del reaprovechamiento de la falla principal, dado que en esta zona los esfuerzos de corte del macizo han sido vencidos. Una muestra de la incesante y contemporánea actividad del proceso de deslizamiento, se evidencia en la torrentera que fue construida para canalizar la quebrada colgada.

Esta torrentera fue comprimida como consecuencia de los esfuerzos transmitidos por el deslizamiento, la cual produjo un agrietamiento en la canalización. Es interesante mencionar, que el agrietamiento se muestra como un conjunto de fallas conjugadas, similar a las que se pudieran observar en un ensayo de compresión uniaxial. Sin embargo, a pesar que dicha estructura de hormigón, logró soportar el empuje, el deslizamiento comienza a reptar ascendentemente debido a la falta de confinamiento subaéreo. Muestra de ello son las grietas de tracción subparalelas a la torrentera, así como también una falla lítrica que funciona como “despegue“ de la masa en movimiento.

#### Litología:

La litología expuesta en el talud está constituida casi exclusivamente por esquistos grafitosos con comunes vetas de cuarzo embebidas dentro de su foliación. Esporádicamente se encuentran budines con otra litología, como mármoles y meta-conglomerados.

Es importante mencionar que a pesar de la homogeneidad litológica, existe un fuerte contraste en cuanto al grado de meteorización. El núcleo de roca fresca, con un color negro intenso a gris muy oscuro, está ubicado en la parte media a baja y hacia el Oeste. A partir de aquí, y hacia las partes altas del talud, el esquisto adquiere una coloración gris oscuro, y se va haciendo más claro, hasta formar un espeso manto de regolito y suelo en la parte superior.

A su vez, de Oeste a Este, la roca va adquiriendo diferentes tonalidades que parten de gris a gris cada vez más claro. Es a partir de la falla principal, donde existe el mayor contraste litológico, ya que aquí está el contraste entre la roca levemente meteorizada, y la roca muy meteorizada; de color gris y color beige (o pardo) respectivamente, la última con abundantes manchas rojizas producto de la oxidación de la pirita que esté presente. Más al Este el color se hace cada vez más parduzco, ocre y al estar cerca de la capa vegetal, ya convertido en suelo, adquiere una tonalidad naranja oscuro a marrón rojizo.

Es decir, existen dos mundos litológicos distintos que separa la grieta: uno hacia el Oeste de esquisto grafitoso en su mayoría gris, con estructuras distinguibles; y otro hacia el Este formado por el mismo esquisto altamente meteorizado, fracturado y con pocas estructuras originales apreciables. Es en esta parte donde se observan la mayor cantidad de micro derrumbes y la huella en forma de herradura, debido a lo suelto e inestable del material.

Aparentemente, por el alto grado de meteorización, pareciera que esta zona hubiese pertenecido a niveles más superiores o superficiales que se desplazó a lo largo de la grieta hasta alcanzar su nivel actual.

Discontinuidades:

En la parte Oeste, donde la roca expone ciertas estructuras, se puede decir que el plegamiento de la roca es suave y simétrico, a su vez, al medir la foliación cuyo buzamiento varía verticalmente, (no tanto su rumbo) se puede decir que el plano del talud corta cercano a los  $90^\circ$  con los planos axiales de los pliegues de la foliación, no observándose casi el estilo de plegamiento de la zona. Sin embargo, debido a evidencias recolectadas por el lugar, se recogieron muestras con pliegues cuyo ángulo interlimbar no supera los  $60^\circ$ .

Existen en general tres sistemas de diaclasas, la cual son en general de poca persistencia (alrededor de 20 cm) y cortan la foliación, en su mayoría, perpendicularmente. La mayoría de los planos de debilidad, forman entre sí ángulos de  $120^\circ$ .

La estructura primordial lo representa la falla regional de gran extensión que corta todo el plano del talud, y posee buzamiento al sur. Es en ésta donde se logra apreciar el fuerte contraste de meteorización que se mencionó anteriormente.

Esta falla debe es de relativa importancia, ya que dentro de la discontinuidad, existe una brecha de 30 a 40 cm de espesor aproximadamente, compuesto de fragmentos de rocas de distribución y tamaño caótico, con un color gris oscuro. Este material triturado, debido a su mineralogía grafitosa, es muy pastoso y de poca resistencia al corte. A su vez, a ambos lados de la brecha, está la presencia de un material arcilloso de alta plasticidad y de color ocre claro, denominado “gouge” o arcilla de falla, que posee un espesor de aproximadamente 10cm en la zona observada. Es importante señalar que las foliaciones adyacentes a la falla principal, están desplazadas y muy plegadas.

Existen en la segunda berma, una serie de fallas dispuestas en forma de “cola de caballo”, de menor magnitud que afectan la roca fresca y corresponden a una familia de fallas asociadas, producto de la liberación de presión que sufre el macizo al estar cerca de la superficie. En ellas se observa desplazamiento en la foliación, las vetas de cuarzo, y relleno de material triturado en su interior, lo cual corresponde a brechas que no superan los tres centímetros de espesor.

Una vez realizado el tratamiento estadístico a los datos recolectados, se obtuvo los siguientes planos promedios que fueron tabulados a continuación, y graficados independientemente para tener una visión más clara de la disposición de las estructuras descritas anteriormente:

**Tabla 12.** Estadística de las discontinuidades presentes en el talud entre las progresivas 3+300 a la 3+500

Talud	Discontinuidad	Orientación	Desv. Estándar		No de datos
			Rumbo	Buzamiento	
<i>Prog. 3+300 al 3+500</i>	Foliación 1	N 69 E 77 S	11,65	14,9	9
	Foliación 2	N 76 E 45 N	4,15	15,01	9
	Foliación 3	N 43 E 43 N	2,5	2,5	2
	Foliación 4	N 19 E 37 N	4,78	11,6	3
	Diaclasa 1	N 32 W 60 S	15,92	6,37	3
	Diaclasa 2	N 15 W 72 N	4,08	20,88	3
	Diaclasa 3	N 48 E 62 N	7,5	8	2
	Falla 1	N 39 W 56 S	13,96	4,33	4
	Falla 2	N 13 W 65 N	8,49	19,77	3
	Falla 3	N 41 E 48 N	1	6	2
	Falla 4	N 12 E 45 S	7,88	4,77	5

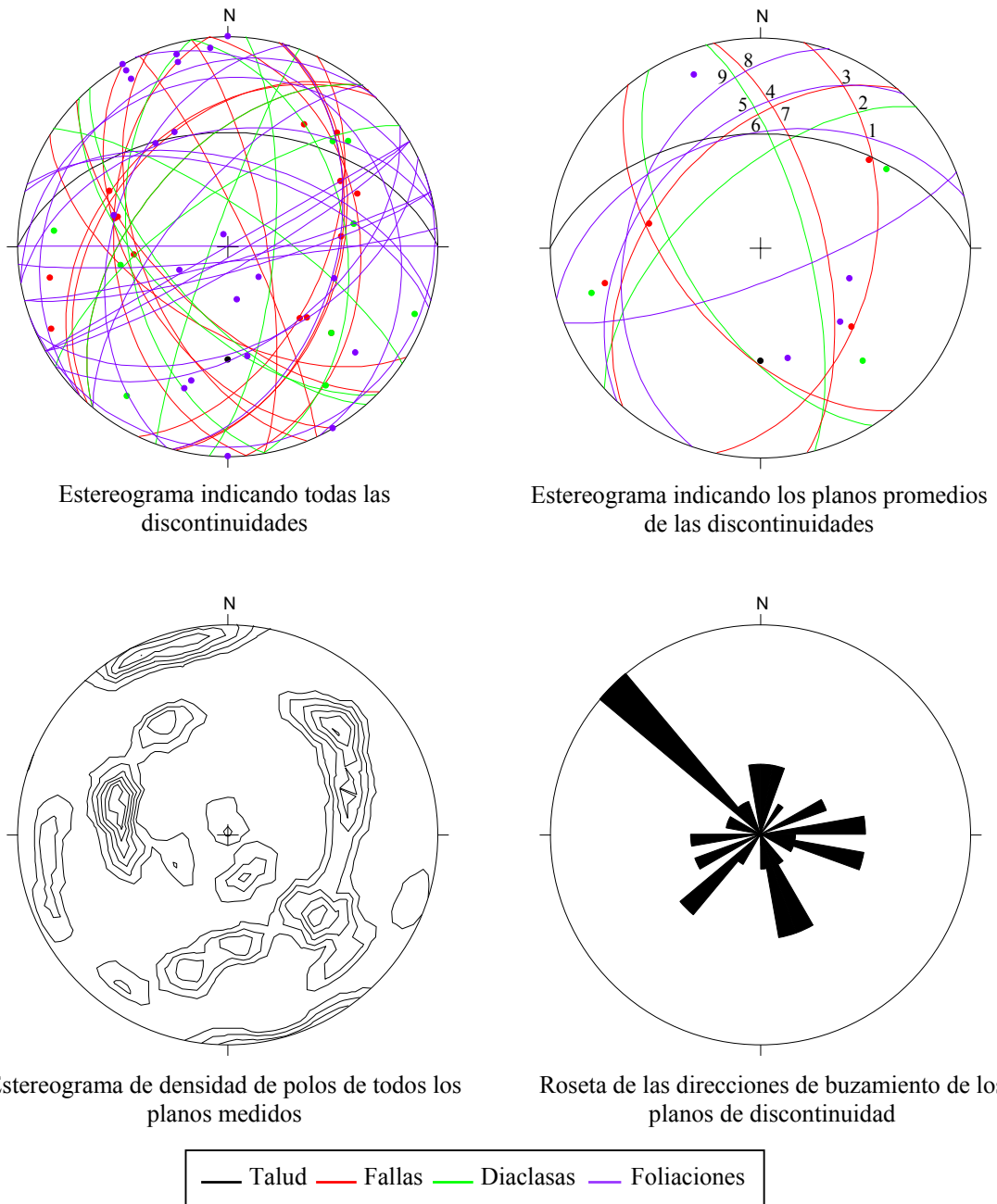
#### 5.1.4. Talud ubicado entre las progresivas 3+900 a la 4+100

Este talud, ubicado cerca del talud anterior, hacia el este, se encuentra actualmente en el proceso de movimiento de tierra, por lo que aún se está perfilando su morfología. Está siendo cortado en dos bermas y tendrá una orientación aproximada N 70° E 45° N. La longitud será de unos 200 m, y ha sido objeto de varias voladuras debido a lo duro de la litología.

Morfología del talud:

Como se mencionó anteriormente, todavía se encuentra en proceso de corte, por lo que aún no está definida su morfología definitiva, sin embargo, por lo que se vislumbra, será un talud con una línea de cresta suave y parabólica.

Resalta en la morfología un núcleo de roca dura que quedó como relieve residual y que será removido posteriormente utilizando voladuras.



**Fig. 29.** Estereogramas de discontinuidades medidas en el talud ubicado entre las progresivas 3+300 a la 3+500

### Litología:

La composición litológica como en la mayoría de los taludes, está compuesto por filitas grafitosas de marcada esquistosidad, de textura lisa y de color negro, en la cual no se llagan a observar otros minerales.

A su vez, también está constituido por grandes budines y algunas capas de metareniscas de tonos oscuros a grisáceos. Estos budines son alargados y simétricos, con presencia de vetas de calcita. La distribución de dichos budines grandes es heterogénea a lo largo del afloramiento, lo que indica que su abundancia es relativa al área de observación, haciéndose más escasos hacia el este del talud, y son sustituidos por pequeños blastos interfoliados de menor tamaño.

También están presentes niveles de mármoles en formas de capas delgadas y no continuas subparalelas a la foliación. El mayor porcentaje de material carbonático lo hacen vetas de calcita de poco espesor que cortan la foliación, que llegan a alcanzar altas frecuencias en determinadas zonas.

De manera general, existe una disminución de los niveles arenosos y carbonáticos en el centro del talud, aumentando de nuevo su proporción hacia el extremo este del mismo.

Es interesante mencionar la composición del núcleo residual ubicado en la segunda berma, la cual representa una curiosidad geológica, ya que este esquisto presenta características de meta conglomerado en la cual se observan en su interior fragmentos de inclusiones de rocas volcánicas de color verde (desde tonos oscuros, hasta algunos más pálidos). Este bloque se caracteriza por una gran dureza y resistencia.



La roca expuesta en el talud está en su mayoría bastante fresca, existiendo sólo vestigios de alta meteorización en los niveles superiores, lo que se traduce en una roca de alta competencia.

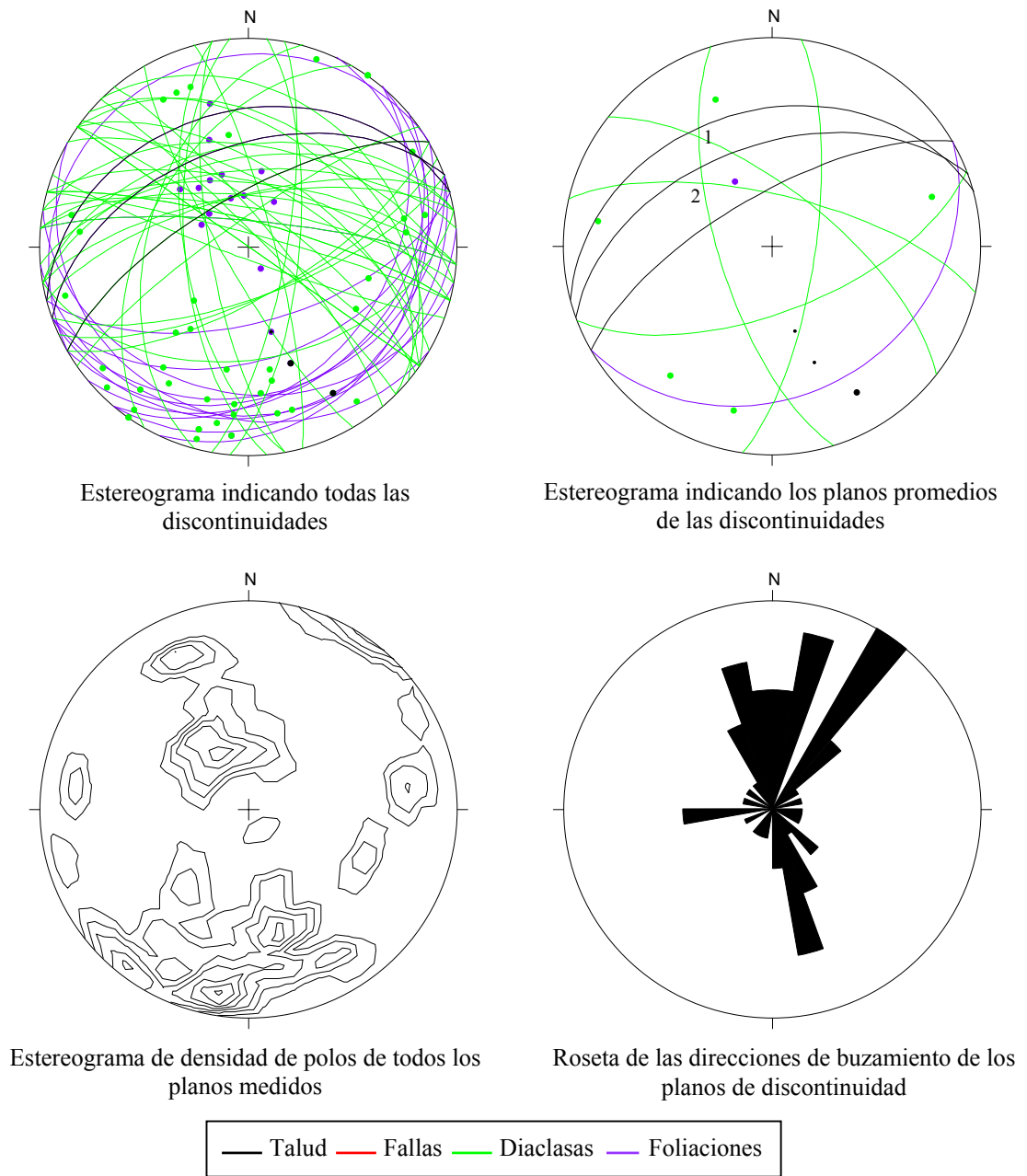
#### Discontinuidades:

En cuanto a las discontinuidades medidas, hay que prestar especial interés a las diaclasas. Estas discontinuidades forman cinco familias principales, que afectan notablemente el macizo por su altísima frecuencia y poca persistencia, ya que crean “prismas” sueltos con planos muy bien definidos, sobre todo en la parte central del talud, donde la presencia de budines y vetas es relativamente menor. Este diaclasamiento tan marcado, es notable a todo lo largo del afloramiento, en la que en muchos casos, dichos planos son utilizados por vetas de calcita para alojarse.

En cuanto a la foliación, esta presenta una tendencia en una sola dirección, aproximadamente N 50° E 30° S. La foliación está muy bien marcada debido a lo fino de los granos. No se observan pliegues, sólo las irregularidades que producen las inclusiones dentro de la roca caja. Tampoco se observaron fallas a lo largo del afloramiento. El siguiente cuadro presenta los planos promedios de cada una de las discontinuidades medidas:

**Tabla 13.** Estadística de las discontinuidades presentes en el talud entre las progresivas 3+900 a la 4+100

Talud	Discontinuidad	Orientación	Desv. Estándar		No de datos
			Rumbo	Buzamiento	
Prog. 3+900 al 4+100	Foliación 1	N 60 E 29 S	17,46	12,01	14
	Diaclasa 1	N 8 E 73 S	2,5	2,5	2
	Diaclasa 2	N 17 W 69 S	9,2	9,89	7
	Diaclasa 3	N 69 E 64 S	7,39	10,82	4
	Diaclasa 4	N 52 W 68 N	5,74	20,37	11
	Diaclasa 5	N 77 W 70 N	7,9	10,73	18



**Fig. 30.** Estereogramas de discontinuidades medidas en el talud ubicado entre las progresivas 3+900 a la 4+100

### **5.1.5. Talud ubicado entre las progresivas 4+380 al 4+480**

Este talud lo constituye en realidad dos pequeños taludes separados por el cajón ubicado en la progresiva 4+500. El talud de interés es el ubicado hacia el oeste, ya que es el que expone de mejor manera la litología presente. Estos taludes tienen una sola orientación de N 75° W 45° N y son de los más pequeños de toda la obra.

#### Morfología del talud:

Estos taludes están constituidos por dos bermas de poca altura, con una línea de tope algo difusa, ya que se encuentra cubierta por una espesa vegetación. De interés es mencionar que se encuentra seccionado por una quebrada, en la cual se ha construido un cajón de drenaje para controlar el caudal de agua que pueda producir derrumbes o desprendimientos de material.

También es importante resaltar que no existen derrumbes importantes a lo largo del talud, a tal grado que a nivel de la rasante con el terraplén de la autopista, la línea de contacto está muy bien definida, sin material coluvial, lo que evidencia la ausencia de derrumbes o deslizamientos.

#### Litología:

El talud está constituido en su mayoría por material suelto de variado tamaño, en la que se observan muchas cárcavas de erosión, sobre todo en los niveles superiores, en la que casi no se observan estructuras, compuesto de regolito producto de la cercanía del manto vegetal. Hacia el oeste la roca está muy descompuesta, por lo que no aflora roca fresca, sin embargo, la meteorización disminuye progresivamente hacia el este, hasta una roca medianamente meteorizada.

A pesar de lo descompuesto de la roca, es posible distinguir en alguna zona (de mediana meteorización) una composición litológica de filita grafitosa gris oscuro, de textura áspera y muy compacta.

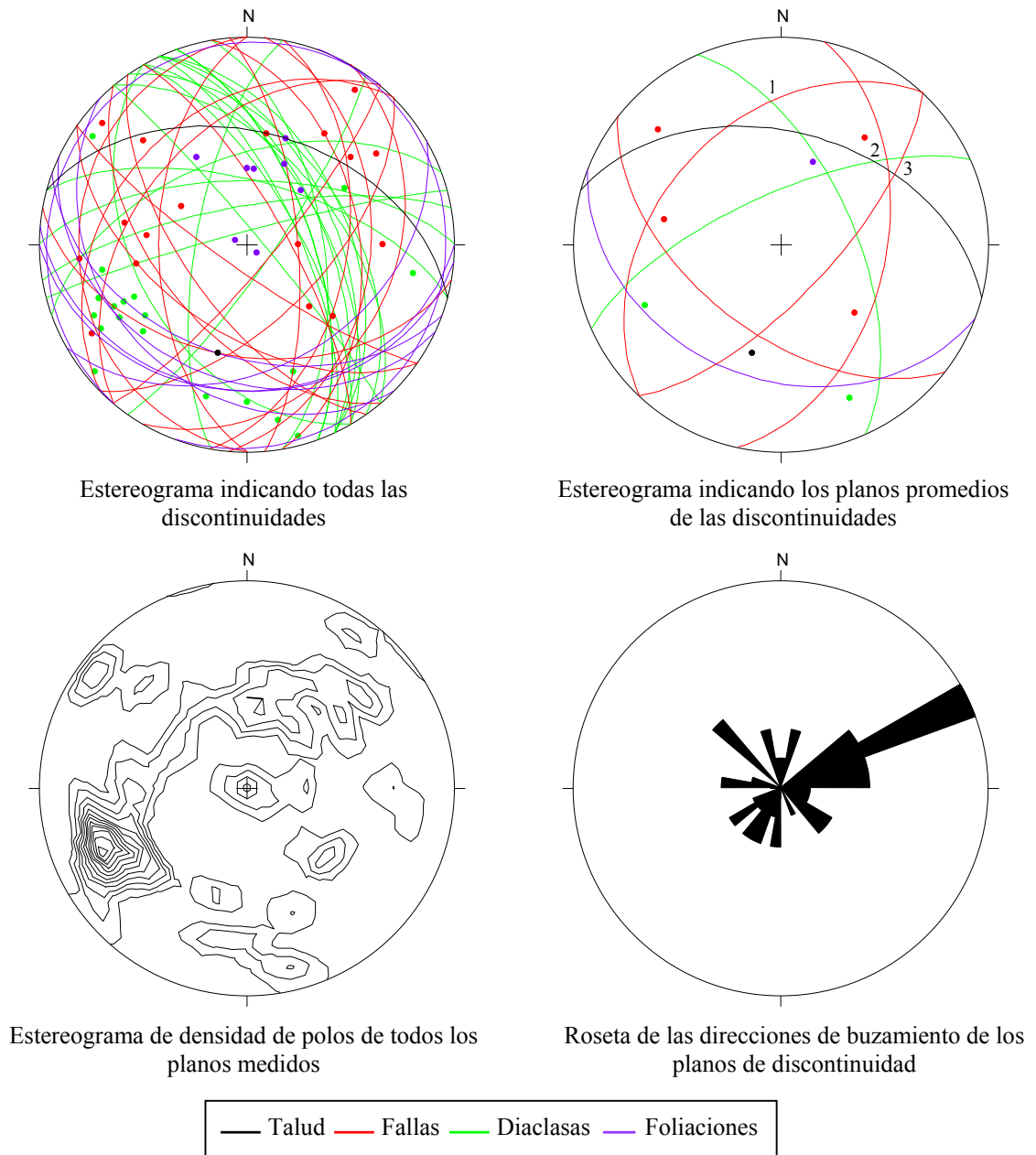
Incluida en la filita, están presentes budines de tamaño mediano y forma oval compuestos de metarenisca de grano medio, color gris con finas vetas de calcita que cortan la foliación. Estas vetas son bastantes escasas, de poca longitud, siendo las más gruesas (1 cm) subparalelas a la foliación. Con esto se quiere decir que disminuye considerablemente los niveles carbonáticos y aumentan los silíceos con respecto al talud anterior.

#### Discontinuidades:

En cuanto a las discontinuidades observadas, la foliación mantiene una orientación bastante uniforme de N 85° W 55 S, sin cambios bruscos de dirección. Sin embargo, se pudo observar en el lateral del talud, la existencia de un plegamiento muy suave, de amplio ángulo interlimbar, simétricos y de poco buzamiento.

Este plegamiento aparentemente no afecta de ninguna manera la disposición de la foliación, y como ocurre casi con un eje este – oeste, aumenta la fricción en el macizo.

En cuanto al diaclasamiento, se pueden distinguir dos familias de diaclasas, de poca persistencia (apenas unos centímetros) y de relativa frecuencia. Dicho sistemas de diaclasas que forman cuñas, se aprecian mejor en los budines de metareniscas.



**Fig. 31.** Estereogramas de discontinuidades medidas en el talud ubicado entre las progresivas 4+380 a la 4+480

Finalmente y no menos importante, es un marcado sistema de fallas compuesto por cuatro familias, conjugadas en pares. La orientación aproximada de estas familias conjugadas son: N 12° E 48° S y N 43° E 40° N el primer, y N 53° W 55° S y N 43° W

70° S el segundo par conjugado. Este sistema de fallas conjugadas es posible apreciarlo a simple vista, ya que las trazas de dichas fallas, forman aproximadamente 60° una con respecto a la otra. La mayoría de estas fallas son medianamente persistentes (1 m) y cerradas, sin embargo, dos de ellas, las más persistentes, están abiertas hasta 20 cm y rellenas con material triturado. El siguiente cuadro presenta el resumen de los planos promediados estadísticamente:

**Tabla 14.** Estadística de las discontinuidades presentes en el talud entre las progresivas 4+380 a la 4+480

Talud	Discontinuidad	Orientación	Desv. Estándar		No de datos
			Rumbo	Buzamiento	
Prog. 4+380 al 4+480	Foliación 1	N 69 W 35 S	15,11	5,77	8
	Diaclasa 1	N 24 W 61 N	6,33	6,68	11
	Diaclasa 2	N 66 E 70 N	19,23	12,58	6
	Falla 1	N 12 E 48 S	9,27	14,79	5
	Falla 2	N 53 W 55 S	17,5	7,07	5
	Falla 3	N 43 E 40 N	2,5	5	2
	Falla 4	N 43 E 70 S	2,5	10	2

#### 5.1.6. Talud ubicado entre las progresivas 4+820 al 5+040

Este ultimo talud de corte, es el segundo más grande de la obra, y está ubicado en una curva por lo que su rumbo es variable. Está conformado por tres bermas, de las cuales la que mejor expone la litología es la segunda. La primera berma es la que tiene una mayor pendiente con 60° de vergencia norte y la siguiente disminuye el buzamiento a 45°. Se realizaron cuatro secciones con los siguientes rumbos:

- 1° Sección de la progresiva 4+820 a la 4+940: orientación del talud: N85W40N
- 2° Sección de la progresiva 4+940 a la 4+980: orientación del talud: N75W40N
- 3° Sección de la progresiva 4+980 a la 5+010: orientación del talud: N65W45N
- 4° Sección de la progresiva 5+010 a la 5+040: orientación del talud: N50W40N

### Morfología del talud:

La morfología que expone el talud es bastante simple, a pesar de unos pocos derrumbes de material suelto, algo meteorizado hacia el extremo noroeste del corte. Este talud es bastante alto, y como representa un estribo completo de la topografía, el corte se ve ajustado a una curva suave parabólica, típica de la morfología de clima tropical húmedo de abundante vegetación.

### Litología:

La litología expuesta es bastante compleja en este corte, en cuanto a su variación porcentual de composición. En primera instancia, hacia el extremo noroeste, se halla una litología mixta compuesta por tres litotipos distintos que se encuentran finamente interfoliados, dando la apariencia de secuencia sedimentaria. Estos litotipos están compuestos por:

- Filita grafitosa de color negro, marcada esquistosidad, de tacto áspero y apariencia aterciopelada. No se encuentra en tan altas proporciones como en los taludes anteriormente registrados, sino interfoliados en delgados niveles. En algunas zonas toma una apariencia más arenácea y menos foliada. Dicho cambio de textura es transicional y sin límites bien definidos.
- Metareniscas de tonos gris a gris oscuro, con límites bien definidos, presenta una estructura interna algo laminada. Forma niveles continuos, de poco espesor, a lo largo de la foliación. Algunas presentan en su interior vetas de calcita de forma irregular, en su mayoría sin cortar la foliación
- Delgados niveles de mármoles interfoliados, de colores veteados que van del blanco al gris. Forman cuerpos alargados y continuos.

Esta disposición en forma de micro “secuencia estratigráfica” va desapareciendo a lo medida que se adentra en el talud, aumentando los espesores de los mármoles, pero disminuyendo su frecuencia, al igual que las metareniscas.

En la parte media y en el resto del talud, la roca toma una composición mayoritariamente filítica grafitosa, con muy pocos budines elipsoidales de pequeño tamaño compuestos por metarenisca. Una excepción lo constituye un budín interfoliado, de forma oval, que alcanza a medir .los 4 metros de longitud.

En el resto del corte, la presencia de material carbonático se restringe a pequeñas vetas discontinuas e interfoliadas de calcita de poco espesor. En la zona baja, extremo sur, llegan a tener una alta frecuencia de cada 4 cm.

#### Discontinuidades:

En relación a este tópico, se observa que la foliación adopta tres orientaciones principales a lo largo del corte, como lo muestra el estereograma: N 38° E 50 S; N 81° W 71° S y N 35° W 25° S.

A su vez existen alrededor de seis familias de diaclasas, en su gran mayoría cerradas, de alta frecuencia y poca persistencia. Estas diaclasas son más notorias en las zonas superficiales, donde la roca está más meteorizada, y llegan a formar mosaicos de cuñas o bloques de pequeño tamaño, en su mayoría no adheridos al macizo.

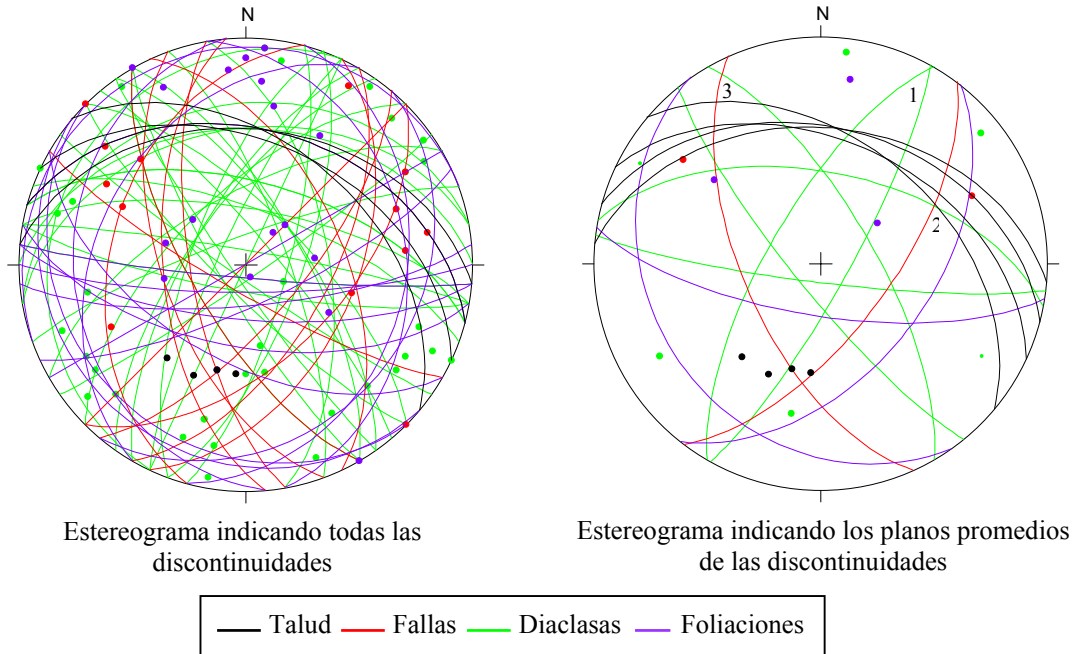
La presencia de dos familias de fallas, conjugadas entre sí, en su mayoría cerradas y de cierta persistencia. Se hacen más grandes y notorias hacia el este del talud, de las cuales una de ellas tiene una separación de 20 cm, rellenada con material triturado. La traza de esta falla atraviesa todo el talud, y por ella drena agua. El siguiente cuadro



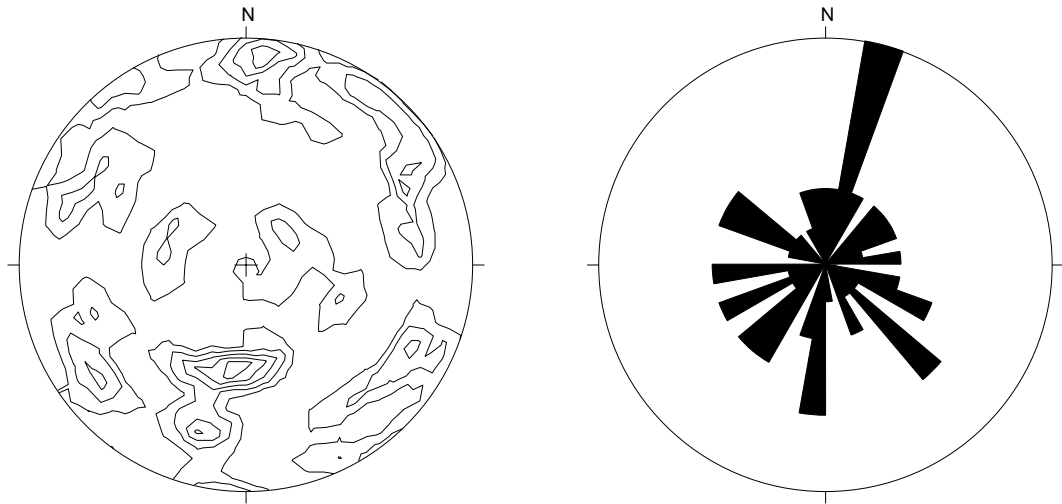
muestra las orientaciones principales de los grupos de discontinuidades identificadas en este talud:

**Tabla 15.** Estadística de las discontinuidades presentes en el talud entre las progresivas 4+820 a la 5+160

Talud	Discontinuidad	Orientación	Desv. Estándar		No de datos
			Rumbo	Buzamiento	
Prog. 4+820 al 5+040	Foliación 1	N 38 E 50 S	22,49	27,01	5
	Foliación 2	N 81 W 71 S	9,75	10,57	6
	Foliación 3	N 35 W 25 S	14,71	6,45	6
	Diaclasa 1	N 30 E 71 N	8,16	4,89	6
	Diaclasa 2	N 29 E 80 S	4,08	7,9	4
	Diaclasa 3	N 30 W 71 N	11,9	6,06	6
	Diaclasa 4	N 39 W 80 S	9,69	5,47	5
	Diaclasa 5	N 79 W 57 N	5,4	17,48	8
	Diaclasa 6	N 83 W 83 S	2,5	2,5	2
	Falla 1	N 24 W 62 S	16,84	11,9	7
	Falla 2	N 37 E 65 S	8,12	14,14	5



**Fig. 32.** Estereogramas de discontinuidades medidas en el talud ubicado entre las progresivas 4+820 a la 5+160



Estereograma de densidad de polos de todos los planos medidos

Roseta de las direcciones de buzamiento de los planos de discontinuidad

**Fig. 32 (Cont.).** Estereogramas de discontinuidades medidas en el talud ubicado entre las progresivas 4+820 a la 5+160

## 5.2. Clasificación geomecánica o ingenieril de los macizos rocosos

Dada la homogeneidad de características geológicas que presentan los taludes del tramo III de la Autopista de Oriente, como lo son litología, mineralogía, textura y estado, se consideró para la clasificación geomecánica el talud ubicado entre las progresivas 2+180 y 2+860 por ser el de mayor extensión, y cuya ubicación se puede observar en la Figura 25 señalado como T2.

Se aplicaron tres criterios de clasificación propuestos por distintos autores, en la que cada uno toma en consideración parámetros y características diferentes, aunque, a modo global, están basadas en las características de las discontinuidades y en la resistencia de las rocas.

En este capítulo se procederá a exponer directamente los resultados de dichas clasificaciones. Los argumentos tomados en consideración en cada una de ellas, se muestran con más detalles en los anexos, específicamente en el apartado del marco teórico – 8.1.5. *Sistemas de clasificación geomecánicas o ingenieriles.*

### 5.2.1. Clasificación de Hoek de parámetro GSI (Geological Strength Index)

En general este parámetro, el Índice de Resistencia Geológica o GSI, es el más utilizado en este estudio, debido que es la fuente de datos para los métodos numéricos utilizados para determinar los parámetros de resistencia al corte ( $\phi$  y  $c$ ) equivalentes de los macizos, que a la vez se utilizaron para el cálculo de la estabilidad mecánica de los mismos.

El GSI de los taludes es bastante homogéneo, variando en un rango de  $40\pm 4$ , correspondiente a rocas predominantemente foliadas, con ocasionales intercalaciones de rocas no foliadas, muy fracturado, en la que las discontinuidades presentan

condiciones medias, referentes a ligera rugosidad, meteorización moderada, aperturas de 1 a 5 mm, y en los casos que ocurra, presencia de rellenos blandos.

Como fue necesario establecerle un valor específico de GSI a cada talud para efectos de los cálculos, se presenta la siguiente tabla con los valores asignados:

**Tabla 16** Valores de Índice de Resistencia Geológica-GSI estimados a cada uno de los taludes del tramo III

TALUD		GSI ESTIMADO
T1	Prog. 1+420 a la 2+060	39
T2	Prog. 2+180 a la 2+860	42
T3	Prog. 3+300 a la 3+500	27
T4	Prog. 3+900 a la 4+100	40
T5	Prog. 4+ 380 a la 4+480	41
T6	Prog. 4+820 a la 5+160	52

### 5.2.2. Clasificación de Barton de parámetro Q (Rock Mass Quality)

Esta clasificación, como se explica en el apartado 8.1.5 de este trabajo, es el resultado del producto de varios cocientes que abarcan aspectos relacionados a las discontinuidades. En la tabla que se presenta a continuación, están las características consideradas para la clasificación final y su respectiva valuación, para así determinar el valor de Q correspondiente al macizo rocoso.

**Tabla 17.** Valuación de las propiedades observadas en los taludes del tramo III, en base a los criterios utilizados por Barton para la obtención del índice Q de calidad del macizo rocoso (Rock Mass Quality)

PARÁMETRO		VALOR	PUNTAJE ASIGNADO
<b>RQD*</b>	Designación de calidad de roca	19.3%	<b>19.3</b>
<b>Jn</b>	Índice de diaclasado	Tres familias de diaclasas con otras diaclasas ocasionales	<b>12</b>
<b>Jr</b>	Índice de rugosidad	Diaclasas limpias, onduladas, rugosas	<b>3</b>
<b>Ja</b>	Índice de alteración	Ligera alteración	<b>2</b>
<b>Jw</b>	Factor de reducción por la presencia de agua	Excavaciones secas o con < 5 l/min localmente	<b>1</b>
<b>SRF</b>	Factor de reducción de esfuerzos	Roca competente con pequeña cobertura	<b>2.5</b>
$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \Rightarrow Q=1.28$			<b>Clasificación</b> <span style="color: red;">Calidad pobre</span>

### 5.2.3. Clasificación de Bieniawski de parámetro RMR (Rock Mass Rating)

A partir de los datos obtenidos en campo y con el valor de resistencia a la compresión obtenido de los ensayos de laboratorio, se clasificó la roca mediante la clasificación propuesta en la norma ASTM 5878-95.

A continuación se muestra en la Tabla 18, las diversas valuaciones para los parámetros que permiten clasificar la roca según este sistema.

\* El RQD fue estimado utilizando el Índice de Control Volumétrico de Diaclasas (Jv), explicado en 8.1.5

**Tabla 18.** Valuación de los parámetros de clasificación, en base a los criterios utilizados para la estimación del RMR (Rock Mass Rating).

PARÁMETRO		VALOR	PUNTAJE ASIGNADO
Resistencia a la compresión simple de la roca sana		Entre 250 – 500 Kg/cm <sup>2</sup>	4
RQD o designación de calidad de roca		19,3% ⇒ < 25%	3
Separación entre diaclasas		Entre cada 0,06 – 0,2 m	8
Estado de las diaclasas	Persistencia	La mayoría son < 1 m	6
	Abertura	0,1 – 1 mm	4
	Rugosidad	Ligeramente rugosas	3
	Relleno	Duro < 5 mm (se presentan como vetillas de cuarzo y calcitas muy finas)	4
	Meteorización	Moderadamente meteorizadas	3
Agua freática		Ligeramente húmedo – presión < 10 l/min	10
RMR = Σ del puntaje de cada parámetro			Total =45
<b>Corrección por orientación de las diaclasas</b>		Diaclasas con dirección perpendicular al rumbo del talud, y en sentido contrario al buzamiento del corte > 45°	-5
<i>RMR corregido = 40</i>		<i>RMR seco corregido = 45</i>	
<b>CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS</b>			
<i>Clase</i>	<i>Calidad</i>	<i>Angulo de fricción</i>	<i>Cohesión</i>
<b>III - IV</b>	<b>Media a mala</b>	<b>25° - 35°</b>	<b>2 -3 Kg/ cm<sup>2</sup></b>

Llegado a este punto, es importante mencionar que existe una correlación aproximada entre el parámetro de Hoek (GSI) y el de Bieniawski (RMR), que permite evaluar la coherencia entre los resultados obtenidos para ambos casos. Dicha correlación es la siguiente:

$$GSI \approx RMR_{seco} - 5 \Rightarrow GSI = 40; \text{ y } RMR_{seco} - 5 = 40$$

Esto confirma la congruencia entre los distintos criterios utilizados para la caracterización geomecánica de los taludes del tramo III de la Autopista Rómulo Betancourt.

### 5.3. Cálculo de parámetros de resistencia al corte

Para poder realizar un cálculo sobre la estabilidad mecánica de un macizo, es necesario conocer los parámetros que determinan la resistencia al corte del mismo, como lo son el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y la cohesión ( $c$ ). Los mismos se pueden determinar experimentalmente con un ensayo de corte directo, sin embargo, los valores obtenidos representarían las características de la roca intacta, y no de un macizo más heterogéneo y complejo.

Por esto, es de interés de este estudio introducir metodologías alternas desarrolladas por investigadores, que permiten calcular parámetros “equivalentes” de resistencia al corte de macizos rocosos, basándose en algoritmos matemáticos, y utilizando como datos iniciales las descripciones que se obtienen de la observación en campo y el esfuerzo a la compresión uniaxial de la roca.

La explicación de los principios y algoritmos de cada método, se describe en la sección 8.1.2.- *Método propuesto por UCAR (2004) para la estimación de parámetros de resistencia al corte*; y 8.1.3.- *Metodología empleada por el programa RocLab 1.0 para el cálculo de parámetros de resistencia al corte*, ubicada en el marco teórico anexo a este trabajo. En este capítulo sólo se presentarán los resultados obtenidos en cada caso.

#### 5.3.1. Método de Ucar- GSI

Para el cálculo de los parámetros de resistencia al corte utilizando el método propuesto por UCAR (2004), es necesario tener un conocimiento de la geometría del talud analizado y de la cuña o plano de posible falla.

Es por esto que en este caso, se calcularon los parámetros en base a tres cuñas por sección transversal, correspondientes a la que pasa por el pie del talud (estabilidad

global), otra cuña ubicada a la mitad y a un cuarto respectivamente de la distancia horizontal de la intersección de la discontinuidad con la topografía. Para determinar el buzamiento de la cuña, se estimó un promedio de buzamiento de las cuñas descritas en el análisis de estabilidad cinemático realizado a partir de los estereogramas.

La Tabla 19 muestra los datos topográficos utilizados para cada sección que fueron necesarios para el cálculo de los parámetros equivalentes. Estos datos son referenciales al centro del cuerpo de vía y a su razante en metros.

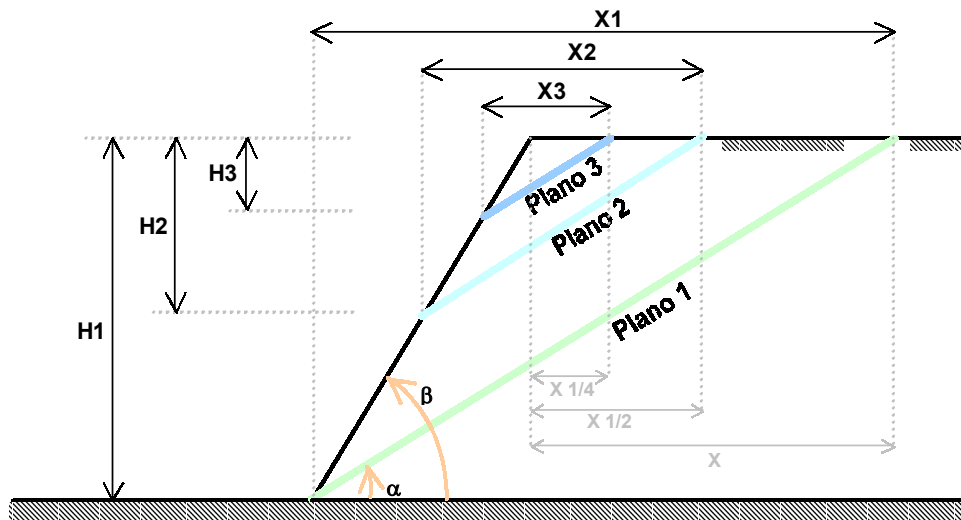


Fig. 33 Diagrama representativo de los datos topográficos considerados para cada cuña.

Una vez establecido la geometría de la cuña y del talud, la Tabla 20 muestra los valores de  $\phi$  y  $c$  equivalente, así como de  $\sigma_n$  estimado:

Los primeros datos corresponden a la sobrecarga ( $q$ ), la densidad de la roca ( $\gamma$ ), y a parámetros de efecto sísmico ( $\varepsilon$  y  $K$ )



Tabla 19. Datos topográficos de las cuñas evaluadas

Talud	Sección	GSI	Alfa	Beta	Plano 1 (Base del talud)			Plano 2 (1/2 X)			Plano 3 (1/4 X)									
					H1	P sup	X2	H2	P inf	P sup	X3	H3	P inf	P sup						
Talud 1	1+440	39	14	40	30,43	140,8	59,72	14,89	42,44	132,6	102,2	147,5	26,22	6,53	57,89	141	84,09	147,5		
	1+500				61,4	265,1	178,6	115,9	28,88	69,43	149,7	185,3	178,6	178,6	57,93	14,44	87,48	164,2	146,4	178,6
	1+600				54,01	235,4	170,5	108,5	27,06	62,49	143,4	171	170,5	170,5	57,73	14,39	78,12	115,9	135,9	170,3
Talud 2	2+240*	42	30	45	18,46	50,77	133,1	10,07	5,81	36,44	127,2	46,51	133,1	5,03	2,9	39,35	130,1	44,38	133,1	
	2+420				51,44	107,9	184,8	44,54	25,72	49,62	139,1	94,06	164,8	16,35	9,44	70,79	155,4	87,15	164,8	
	2+540				86,16	188	188,7	62,89	36,31	78,68	162,4	141,6	198,7	31,44	18,15	96,9	180,5	128,3	198,7	
Talud 3	2+640	27	20	45	40	88,08	151,8	45,03	26	30,85	125,9	75,89	151,9	36,33	20,97	33,37	131	69,7	151,9	
	2+740				31	72,47	142,2	22,8	13,16	41,62	129,1	64,42	142,2	13,28	7,66	47,12	134,6	60,4	142,2	
	3+320				53	166,9	162,4	65,95	23,88	58,8	138,5	124,8	162,4	33,07	12,03	70,64	180,3	103,7	162,4	
Talud 4	3+360	40	37	63**	64,16	195,1	172,2	80,38	29,31	63,74	148	144	172,2	40,14	14,61	78,36	157,6	118,5	172,2	
	3+460				32,32	107,6	104	40,47	14,73	41,39	125,3	81,86	140	20,23	7,36	48,75	132,7	68,99	140	
	3+920				41,43	19,23	73,77	148,9	8,75	6,59	30,41	120,3	38,87	126,7	4,37	3,29	31,76	123,4	36,14	126,7
Talud 5	3+980	41	15	45	54,39	18,88	43,85	124,4	8,61	6,41	30,03	118	38,54	124,4	4,25	3,2	31,63	121,2	36,89	124,4
	4+020				58,31	25,09	52,09	130,4	12,63	9,52	31,58	120,9	44,21	130,4	6,48	4,89	33,89	125,6	40,38	130,4
	4+400				32,24	139,1	136,5	57,16	15,14	40,83	120,3	97,58	136,5	28,37	7,6	48,43	127,9	76,81	136,5	
Talud 6	4+420	52	30	45	24,88	111,7	128,3	43,01	11,52	37,15	116,8	80,16	128,3	21,5	5,78	42,91	122,5	64,42	128,3	
	4+480				11,68	62,39	115,4	25,21	6,75	23,72	108,7	48,93	115,4	16,02	4,29	26,18	111,1	42,2	115,4	
	4+880				66,84	33,18	84,41	139,3	31,07	17,93	42,29	119,1	73,36	137	9,62	5,55	59	130,8	68,62	136,3
Talud 6	4+960	52	30	45	72,45	52,5	146,2	175	67,13	38,77	63,93	136,3	130,3	174,1	42,44	24,5	79,82	149	122,3	173,5
	5+060				66,82	136	188,8	48,25	27,86	67,64	140,3	115,9	168,2	24,37	14,03	79,88	152,6	104,4	166,7	
	5+120				60,13	27,83	116,3	157,8	32,64	18,84	42,16	119,8	74,8	138,7	22,46	12,96	36,06	119,9	70,39	138,6

\* Se consideró la berma superior

\*\* el terreno tiene una pendiente de 35°

\*\*\* No se tomó en cuenta la razante natural del terreno, sino el corte realizado

Altura del talud considerando solamente la topografía modificada

**Tabla. 20** Cálculo del esfuerzo  $\sigma_n$  y parámetros de resistencia al corte para cada cuña propuesta

Talud	Sección	Datos					Plano 1 (base del talud)				Plano 2 (1/2 X)				Plano 3 (1/4 X)							
		Alfa	Beta	q	$\gamma$	$\epsilon$	K	H1	$\sigma_n$	$\sigma_n/H$	$\sigma_n/H$	Ceq	H2	$\sigma_n$	$\sigma_n/H$	$\sigma_n/H$	Ceq	H3	$\sigma_n$	$\sigma_n/H$	$\sigma_n/H$	Ceq
Talud 1	1+440	14	40	0	0,02673	0	1	30,43	0,2691	0,331	57,07	0,1261	14,89	0,1317	0,331	60,08	0,1068	6,53	0,05775	0,331	62,57	0,0949
	1+500	14	40	0	0,02673	0	1	61,4	0,543	0,331	53,26	0,1578	28,88	0,2554	0,331	57,32	0,1243	14,44	0,12771	0,331	60,19	0,1062
	1+600	14	40	0	0,02673	0	1	54,01	0,4777	0,331	54,02	0,1508	27,05	0,2392	0,331	57,62	0,1222	14,39	0,12726	0,331	60,20	0,1062
Talud 2	2+240*	30	45	0	0,02641	0	1	18,46	0,0773	0,158	63,34	0,1465	5,81	0,0243	0,158	65,17	0,1371	2,9	0,01214	0,158	65,73	0,1361
	2+420	30	45	0	0,02641	0	1	51,44	0,2153	0,158	60,34	0,1632	25,72	0,1077	0,158	62,53	0,1518	9,44	0,03951	0,158	64,57	0,1398
	2+540	30	45	0	0,02641	0	1	86,16	0,3607	0,158	58,23	0,1902	36,31	0,152	0,158	61,53	0,1532	18,15	0,07597	0,158	63,38	0,1463
Talud 3	2+640	30	60	0	0,02641	0	1	40	0,2641	0,25	59,56	0,1765	26	0,1717	0,25	61,13	0,1624	20,97	0,13845	0,25	61,82	0,1570
	2+740	30	45	0	0,02641	0	1	31	0,1298	0,158	62,01	0,1555	13,16	0,0551	0,158	64,02	0,1426	7,66	0,03206	0,158	64,85	0,1386
	3+320	20	45	0	0,02645	0	1	53	0,3937	0,281	53,53	0,1379	23,88	0,1774	0,281	57,44	0,1116	12,03	0,08935	0,281	59,95	0,0987
Talud 4	3+360	20	45	0	0,02645	0	1	64,16	0,4766	0,281	52,42	0,1489	29,31	0,2177	0,281	56,54	0,1189	14,61	0,10852	0,281	59,31	0,1016
	3+460	20	45	0	0,02645	0	1	32,32	0,2401	0,281	56,09	0,1197	14,73	0,1094	0,281	59,29	0,1017	7,36	0,05467	0,281	61,30	0,0932
	3+920	37	63	0	0,02631	0	1	41,43	0,2141	0,196	60,31	0,1933	6,59	0,0341	0,196	64,37	0,1634	3,29	0,01701	0,196	65,00	0,1606
Talud 5	3+980	37	63	0	0,02631	0	1	54,39	0,2811	0,196	59,32	0,2034	6,41	0,0331	0,196	64,40	0,1632	3,2	0,01654	0,196	65,02	0,1606
	4+020	37	63	0	0,02631	0	1	58,31	0,3014	0,196	59,05	0,2064	9,52	0,0492	0,196	63,87	0,1660	4,89	0,02528	0,196	64,68	0,1619
	4+400	15	45	0	0,02674	0	1	32,24	0,2944	0,342	54,4	0,1997	15,14	0,1383	0,342	57,06	0,1788	7,6	0,0694	0,342	58,72	0,1691
Talud 6	4+420	15	45	0	0,02674	0	1	24,88	0,2272	0,342	55,42	0,1911	11,52	0,1052	0,342	57,80	0,1742	5,76	0,0526	0,342	59,21	0,1657
	4+480	15	45	0	0,02674	0	1	11,68	0,1067	0,342	57,77	0,1744	6,75	0,0616	0,342	58,94	0,1680	4,29	0,03918	0,342	59,64	0,1648
	4+880	30	45	0	0,02622	0	1	66,84	0,2778	0,158	58,48	0,3257	17,93	0,0745	0,158	61,30	0,2948	5,65	0,02306	0,158	62,36	0,2873
Talud 6	4+960	30	45	0	0,02622	0	1	72,45	0,3011	0,158	58,23	0,3291	38,77	0,1611	0,158	59,92	0,3081	24,5	0,10181	0,158	60,83	0,2989
	5+060	30	45	0	0,02622	0	1	66,82	0,2777	0,158	58,48	0,3256	27,86	0,1168	0,158	60,60	0,3011	14,03	0,05683	0,158	61,61	0,2923
	5+120	30	45	0	0,02622	0	1	60,13	0,2499	0,158	58,79	0,3215	18,84	0,0783	0,158	61,24	0,2963	12,96	0,05386	0,158	61,70	0,2917

### 5.3.2. Método de Hoek- software RocLab

Los valores presentados en la Tabla 21, se tomaron básicamente como punto de comparación a los obtenidos por el método de UCAR (2004). Estos valores bastante conservadores, son muy sensibles a los cambios que se haga en factor de perturbación (D) introducido, así como al uso que se aplique (se puede seleccionar en el programa entre general, túneles y taludes, el cual el último fue el seleccionado).

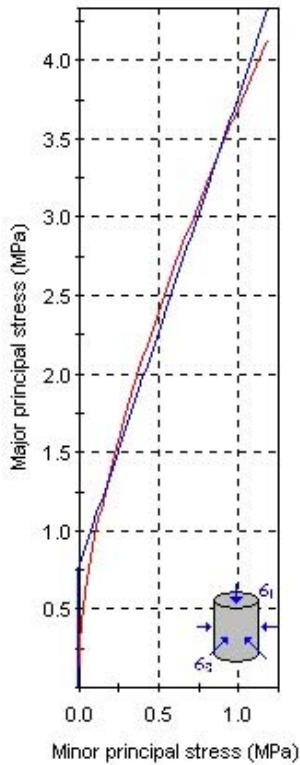
Dada la alta sensibilidad que se obtiene a partir del parámetro D, cuya explicación es muy somera por parte de los creadores de la metodología programada, crea cierta incertidumbre sobre la veracidad de los resultados, ya que un talud de corte no presenta tan alta perturbación como puede que indique los valores propuestos en la tabla 9.1 ubicada en los anexos.

De ser así, esa perturbación se produciría en un rango de acción bastante reducido, y por ello, sería impropio decir que la perturbación causada por voladuras es generalizada en todo el macizo, ya que el efecto de la onda expansiva de la detonación se disiparía a pocos metros de donde ocurrió la explosión.

El programa arroja una serie de gráficos que con las distintas formas de representar los estados de esfuerzos según el criterio de falla a aplicar ( $\sigma_1$  vs.  $\sigma_3$ ; y  $\sigma_n$  vs.  $\tau$ ), así como la envolventes de falla de Hoek & Brown (azul) y el segmento de la envolvente de Mohr – Coulomb (rojo) que ha sido ajustada o aproximada a la anterior.

**Tabla 21** Parámetros de resistencia al corte ( $c$  y  $\phi$ ) y esfuerzo principal menor ( $\sigma_{3max}$ ) obtenidos con el programa RocLab para cada talud

Ubicación del talud (progresivas)	Datos de la roca		Parámetros del Criterio de Hoek & Brown				$\sigma_{3max}$ (Mpa) estimado por el programa	Parámetros de Mohr-Coulomb	
	GSI estimado	Compresión sin confinar (Kg/cm2)	mi	mb	s	a		c (Mpa)	$\phi$
1+420 a la 2+060	39	230	10	1,306	0,0018	0,509	5,75	0,224	30,01
2+180 a la 2+860	42	310	11	1,599	0,0025	0,508	7,75	0,344	32,04
3+300 a la 3+500	27	420	7	0,516	0,0003	0,527	10,50	0,175	25,04
3+900 a la 4+100	40	400	10	1,353	0,0020	0,509	10,00	0,278	35,20
4+380 a la 4+480	41	320	7	0,982	0,0022	0,508	8,00	0,172	35,17
4+820 a la 5+040	52	330	10	1,801	0,0048	0,505	8,25	0,408	37,74



**Hoek-Brown Classification**

intact uniaxial compressive strength = 23 MPa  
 GSI = 39 mi = 10 Disturbance factor = 0.7

**Hoek-Brown Criterion**

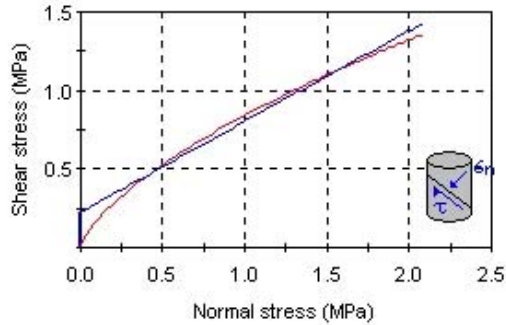
mb = 0.350 s = 0.0001 a = 0.512

**Mohr-Coulomb Fit**

cohesion = 0.224 MPa friction angle = 30.01 deg

**Rock Mass Parameters**

tensile strength = -0.010 MPa  
 uniaxial compressive strength = 0.248 MPa  
 global strength = 1.707 MPa  
 modulus of deformation = 1654.92 MPa



**Fig. 34.** Hoja de resultados arrojado por el programa RocLab para el análisis del talud ubicado entre las progresivas 1+420 a la 2+060

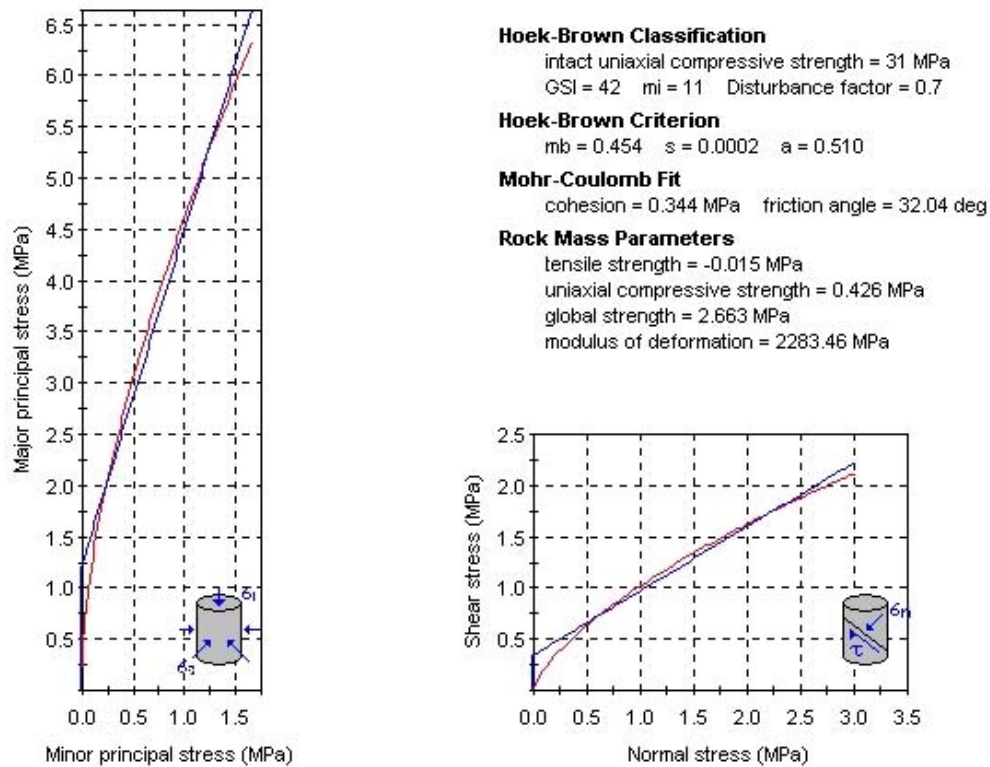


Fig. 35. Hoja de resultados arrojado por el programa RocLab para el análisis del talud ubicado entre las progresivas 2+180 a la 2+860

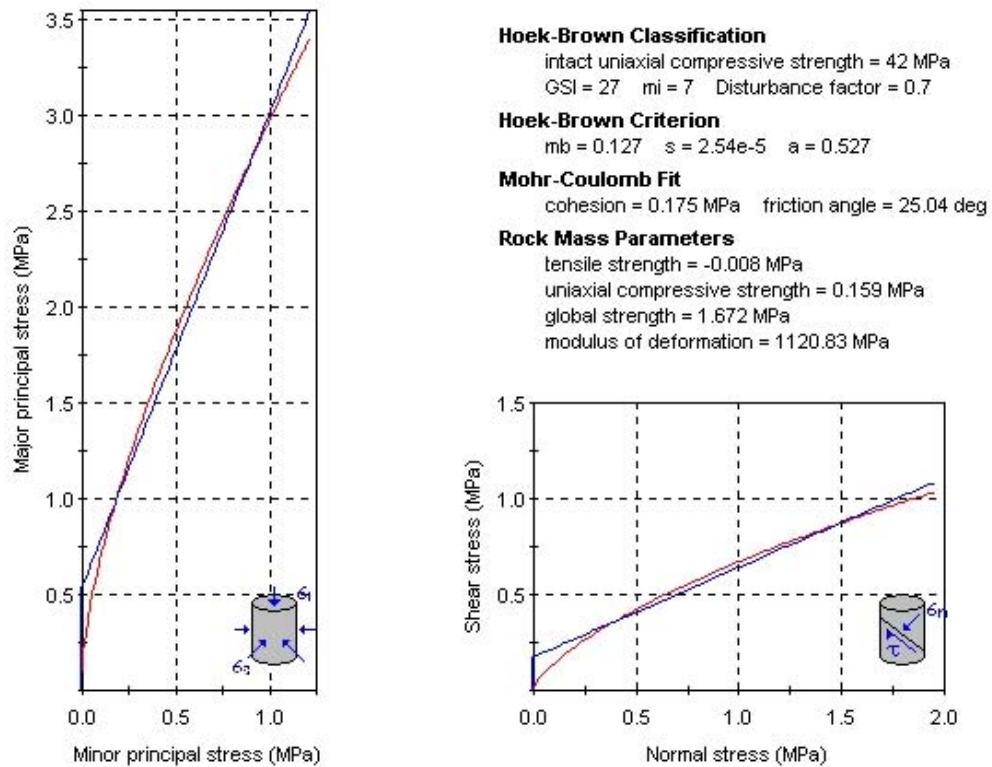


Fig. 36. Hoja de resultados arrojado por el programa RocLab para el análisis del talud ubicado entre las progresivas 3+300 a la 3+500

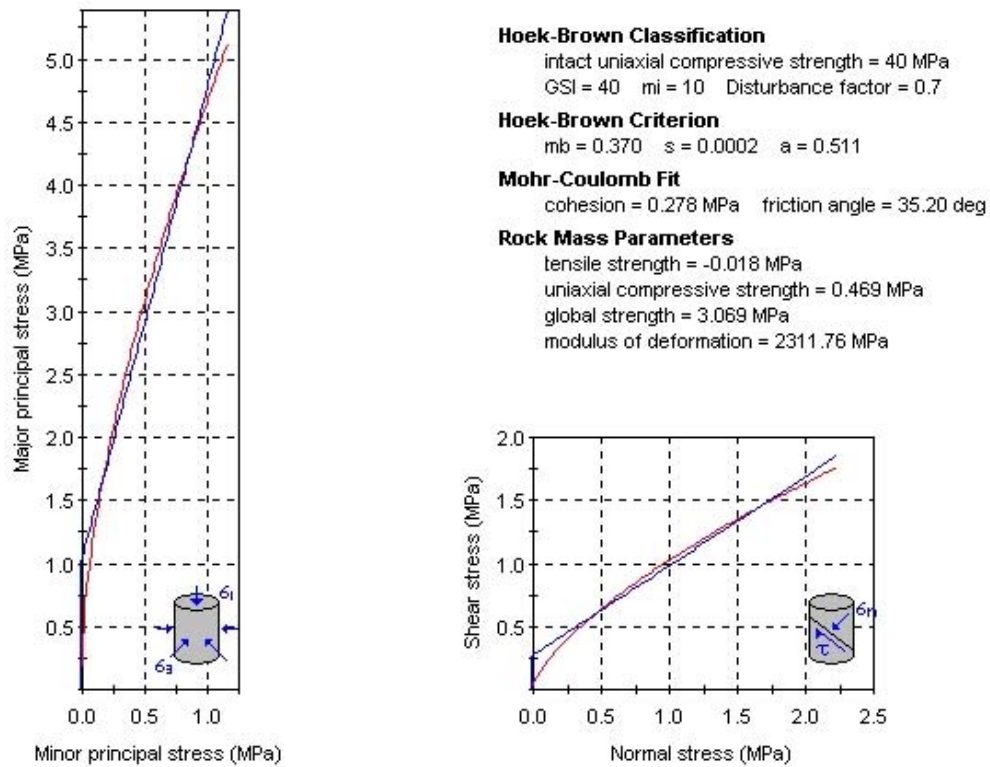
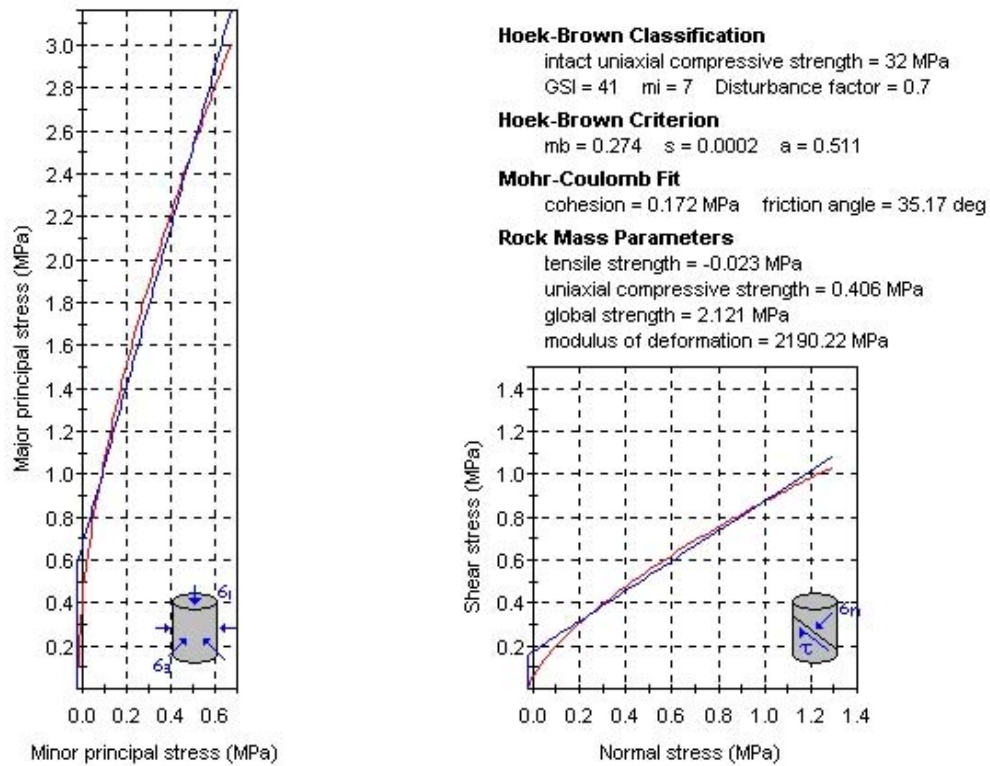
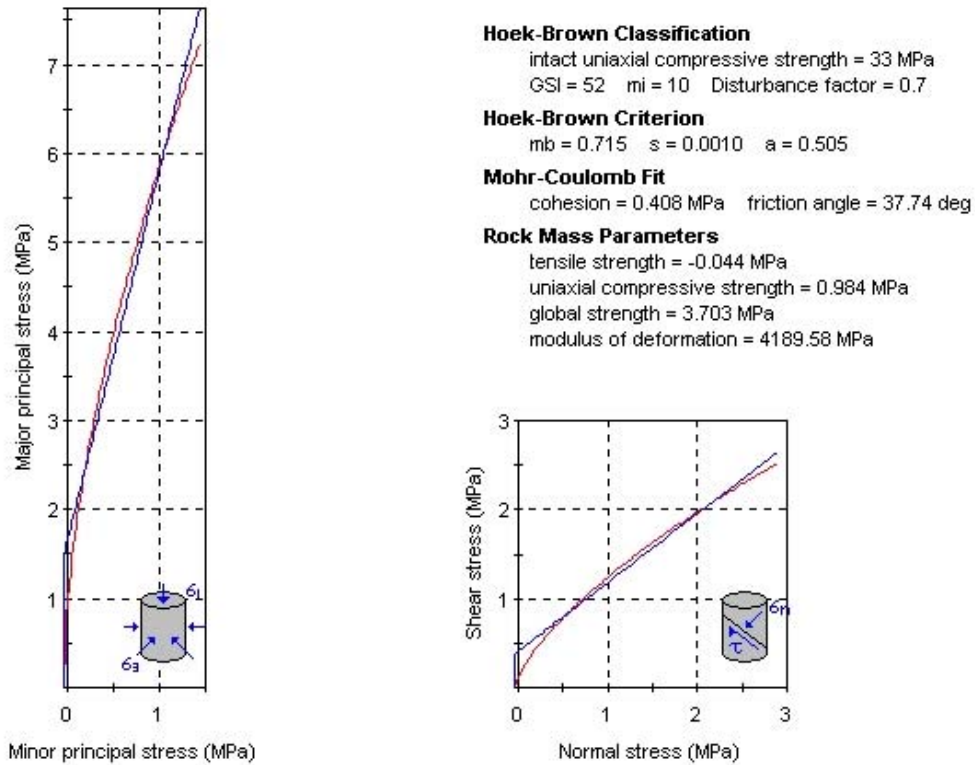


Fig. 37 Hoja de resultados arrojado por el programa RocLab para el análisis del talud ubicado entre las progresivas 3+900 a la 4+100



**Fig. 38.** Hoja de resultados arrojado por el programa RocLab para el análisis del talud ubicado entre las progresivas 4+380 a la 4+480





**Fig. 39.** Hoja de resultados arrojado por el programa RocLab para el análisis del talud ubicado entre las progresivas 4+820 a la 5+040

## 5.4. Análisis de estabilidad

### 5.4.1. Estabilidad cinemática

A continuación se presenta un análisis descriptivo de las condiciones cinemáticas o geométricas que existen en cada talud, y que pueden representar una amenaza de falla.

Dichas condiciones geométricas, entre los planos de discontinuidades y del talud, son evaluados directamente sobre los estereogramas de cada uno de ellos, siguiendo los criterios empleados para cada tipo de falla en el método de las discontinuidades, explicado en el punto 8.1.1. *Método de las discontinuidades sobre estereogramas* ubicado en los anexos de este trabajo.

#### **Talud entre las progresivas 1+420 a la 2+060:**

Observando el estereograma de este talud (Figura 26), existen algunos modos de falla que puedan representar una amenaza para la estabilidad del talud. Solo se consideraron aquellos casos que presentaban algún tipo de inestabilidad cinemática.

Hay que poner especial atención a la gran cantidad de material suelto o no consistente que hay aflorando. Este material es el causante de varios micro derrumbes que ocurren desde niveles superiores donde la roca está más descompuesta que arrastran el material de niveles inferiores. A continuación el análisis a cada tipo de falla:

Falla plana: en el estereograma se aprecia que no existe plano de discontinuidad que cumpla la condición de falla plana, por lo tanto es cinemática y mecánicamente estable.

Falla en cuña: existen una importante cantidad de fallas en cuña que se aprecian en el estereograma de todas las discontinuidades. A modo general, se puede decir que las cuñas son el resultado de los siguientes planos promedios o familias de discontinuidades:

- Cuña 1: Foliación 1  $\cap$  Diaclasa 2: poca ocurrencia o frecuencia.
- Cuña 2: Foliación 1  $\cap$  Diaclasa 3: poca ocurrencia o frecuencia .
- Cuña 3: Foliación 1  $\cap$  Falla: muy poca ocurrencia debido al carácter exclusivo de la falla.
- Cuña 4: Foliación 2  $\cap$  Diaclasa 1: de alta ocurrencia o frecuencia debido a que esta familia de diaclasa interseca a la principal orientación de foliación presente en el talud.

Falla de volcamiento: la familia de diaclasa que posee orientación N 72° 82° S es una un potencial grupo de discontinuidades a presentar fallas de volcamiento, por lo que está latente una inestabilidad cinemática. Sin embargo no hay una fuerte alineación entre los rumbos de los planos.

### **Talud entre las progresivas 2+180 a la 2+860:**

Aunque la roca es bastante fresca y competente debido a la abundancia de blastos y budines de metareniscas y mármoles, además de la abundancia de vetas de calcita y cuarzo a lo largo del afloramiento, la presencia de cuñas de deslizamiento son muy frecuentes.

Dichas cuñas están controladas en su mayoría por los sistemas de diaclasa en los laterales, y por la foliación en la base. Este último hecho es muy importante ya que esta discontinuidad es la que presenta el menor ángulo de fricción de todos, causado por el grafito y su hábito micáceo.

Las evidencias de este tipo de cuñas se pueden observar a lo largo de todo el talud, principalmente donde existe importante contraste litológico (budines- foliación) en las paredes, y a todo lo largo del borde de la berma, donde el desprendimiento de dichas cuñas a dado una apariencia de borde “aserrado”. A continuación el análisis de los principales modos de falla derivado del estereograma correspondiente (Figura 27):

Falla plana: no existen planos que cumplan los criterios de falla plana. Los planos con rumbo sub paralelos al talud, presentan buzamientos contrarios. Por consiguiente, para este caso de falla existe una estabilidad cinemática y mecánica.

Falla en cuña: existen muchísimas cuñas entre los planos como se mencionó anteriormente, sin embargo, aquellas que presentan una mayor potencialidad de desprendimiento son las que forman las siguientes familias:

- Cuña 1: Foliación 1  $\cap$  Diaclasa 1: es la que presenta una mayor recurrencia. Esta es la que se observa en los bordes del talud y en muchos otros casos como se mencionó anteriormente.
- Cuña 2: Falla 1  $\cap$  Falla 3: es bastante frecuente su aparición tomando en cuenta que existen varias fallas con esa orientación.
- Cuña 3: Foliación 1  $\cap$  Falla 3: también de alta ocurrencia, aumenta la presencia de cuñas para esta zona junto con la cuña 2, sin embargo, debido al poco ángulo de buzamiento que presenta las intersecciones, puede ser la de menor incidencia de aparecer en el talud.

Falla de volcamiento: la presencia de la familia de diaclasas de orientación promedio N 18° W 71° S (Diaclasa 2), presenta una inestabilidad cinemática para este tipo de falla, ya que cumple las condiciones de los criterios mencionados con anterioridad para que la misma se produzca.

Habiendo evaluado cada uno de los casos de inestabilidad que pudiesen ocurrir en el talud, es importante hacer mención a los causantes de los actuales derrumbes, las cuales se producen fundamentalmente por dos motivos:

1.- La escorrentía de las quebradas colgadas que se encuentran en el extremo sureste del talud. Esto produce un fuerte transporte de material, así como una saturación de agua, lo que aumenta los niveles de inestabilidad en esta zona.

2.- Los derrumbes ocurridos hacia el noroeste del talud son producido por cuñas formadas entre la foliación y las diaclasas, potencializadas por la alta tasa de meteorización, fracturamiento y diaclasamiento de la roca.

#### **Talud entre las progresivas 3+300 a la 3+500:**

El que posiblemente sea el principal factor de inestabilidad, es la falla principal que produce un fracturamiento en el macizo. A su vez está el alto grado de meteorización que presenta la roca, haciendo al talud vulnerable a deslizamientos y derrumbes. A modo más específico, se procederá a evaluar todos los casos posibles de falla que pudiesen ocurrir, a partir del análisis del estereograma (Figura 29).

Falla plana: para este tipo de falla no existe ningún plano que de acuerdo a los criterios de ocurrencia, cumpla las condiciones para que ésta ocurra, por lo tanto existe una estabilidad cinemática y mecánica para fallas planas.

Fallas en cuña: existe en este talud una gran cantidad de cuñas de posible desprendimiento, en la que las condiciones cinemáticas para que esto ocurra están dadas. En base a los planos promedios determinados se consideran las siguientes cuñas como inestables cinemáticamente:

- Cuña 1: Foliación 2  $\cap$  Falla 4

- Cuña 2: Diaclasa 3  $\cap$  Falla 4
- Cuña 3: Foliación 3  $\cap$  Falla 4
- Cuña 4: Foliación 3  $\cap$  Falla 2
- Cuña 5: Foliación 3  $\cap$  Diaclasa 2
- Cuña 6: Falla 3  $\cap$  Diaclasa 2
- Cuña 7: Falla 3  $\cap$  Falla 2
- Cuña 8: Falla 2  $\cap$  Foliación 4
- Cuña 9: Diaclasa 2  $\cap$  Foliación 4

Sin embargo, y a pesar de que estos planos representan la mayoría de las discontinuidades medidas en campo, existen algunas otras que al graficarse en conjunto no cumplen con los criterios de falla en cuña, pero que al considerarse a manera individual, si los cumplen. Tal es el caso de algunas cuñas formadas en la zona NEE del talud, entre diaclasas y foliaciones. Estos planos están cubiertos con la familia de Falla 1, Diaclasa 1, Foliación 2 y Foliación 4.

En resumen, aunque se determinaron nueve cuñas de posible falla según las intersecciones de los planos promedio, no se descartan la presencia de muchas otras fallas de este tipo si se consideran los planos de manera individual.

Falla de volcamiento: existen algunos planos de foliación individuales que presentan las condiciones para la ocurrencia de este tipo de falla, rumbo subparalelo al talud y alta pendiente contraria a la vergencia del corte. Sin embargo, los mismos no representan un riesgo importante debido a que se trata de mediciones puntuales en la que el rumbo de la foliación cambia en relación a un poco distancia.

Lo que sí representa un riesgo a la estabilidad del talud, son los derrumbes producidos por la falta de confinamiento de una roca altamente meteorizada, que ha sido fracturada producto de una zona de falla y que debido a la escorrentía superficial

de la quebrada colgada y deficiencia en el drenaje, aumenta el proceso erosivo y de transporte de material hacia el pie del corte. Esto se evidencia con la persistente presencia de deslizamientos con huellas de herraduras, así como conos coluviales en las rasantes de las bermas superiores e inferior.

### **Talud entre las progresivas 3+900 a la 4+100:**

Igualmente que con los taludes anteriores, se procederá a evaluar la factibilidad de ocurrencia de cada uno de los tipos de falla según el estereograma resultante (Figura 30).

Falla plana: no existe posibilidad de la presencia de fallas plana debido a que ningún plano cumple las condiciones para que esto ocurriese. Por lo tanto el macizo presenta estabilidad cinemática y mecánica para este tipo de falla.

Falla en cuña: la presencia de cuñas va a depender del buzamiento que tenga el plano del talud, por ello hay que tomar las siguientes consideraciones:

- El talud en general presenta una orientación de  $N 75^\circ E 35^\circ N$ . Para este caso y tomando en cuenta los planos promedios, no se presentan cuñas inestables. Si se consideran los planos individualmente, las diaclasas forman pequeñas cuñas que debido al bajo ángulo que presentan, representan poco riesgo a grandes desprendimientos. Sin embargo, hay que decir que existe una inestabilidad cinemática de poca potencialidad.
- La parte alta del talud mantiene aproximadamente el mismo rumbo anterior, pero con una mayor pendiente ( $N 70^\circ E 50^\circ N$ ). En esta parte del mismo, aumenta la ocurrencia de cuñas inestables, tal es el caso de las familia Diaclasa 2 intersecada con su homónima Diaclasa 4, formando la Cuña 1. Esto representa una alta frecuencia de intersecciones entre planos medidos individualmente, que sumado a las ya reportadas

en el caso anterior, aumenta considerablemente la probabilidad de fallas de este tipo. De allí una potencial inestabilidad cinemática. Sin embargo, estas cuñas, causadas por el fuerte diaclasamiento, solo representan pequeños desprendimientos de bloques que no representan un alto riesgo.

- Algunas partes del corte realizado presentan una pendiente mayor aún (N 60° E 70° N) lo que incrementa aún más la presencia de cuñas inestables representadas por la intersección entre las familias Diaclasa 4 y Diaclasa 5 (Cuña 2), sin contar otra gran cantidad de intersecciones entre planos individuales que no se vislumbran en el estereograma promedio. Sin embargo, aunque la ocurrencia de estas cuñas es alta, no lo es así los sitios que presentan esta pendiente, por lo que aún existiendo inestabilidad cinemática, la factibilidad de que ocurran fallas importantes de este tipo en planos con esta pendiente, es muy baja.

Fallas de volcamiento: no existen planos que cumplan las condiciones de ocurrencia de fallas de volcamiento, por lo que existe una estabilidad cinemática y mecánica al respecto.

Ayuda a la estabilidad, lo fresca y dura que representa la roca, disminuyendo el riesgo de derrumbes y deslizamientos causados por material suelto y meteorizado, como ocurre en taludes anteriormente descritos.

#### **Talud entre las progresivas 4+380 a la 4+480:**

A continuación se presenta una evaluación de factibilidad de ocurrencia de los distintos tipos de falla posible analizando el estereograma correspondiente a este talud (Figura 31):

Falla plana: observando las orientaciones graficadas en el estereograma de las distintas discontinuidades medidas, es posible afirmar que no existe plano alguno que



cumpla las condiciones de falla plana, por lo que el macizo es cinemática y mecánicamente estable para este tipo de falla.

Falla en cuña: se presentan tres cuñas principales producto de la intersección de planos generados estadísticamente. Estas son:

- Cuña 1: Diaclasa 1  $\cap$  Falla 3: es de alta frecuencia debido a que la orientación de la familia de diaclasa es muy recurrente a lo largo del talud.
- Cuña 2: Diaclasa 2  $\cap$  Falla 1: de menor recurrencia que la anterior debido a que pocos planos de diaclasa presentan esta orientación.
- Cuña 3: Diaclasa 2  $\cap$  Falla 4: igual que el caso anterior presenta poca recurrencia, de allí que no represente un gran riesgo para la estabilidad general del macizo.

Falla de volcamiento: la foliación del macizo presenta un rumbo subparalelo al del talud, sin embargo el buzamiento promedio no excede los  $60^\circ$ , de allí que es cinemática y mecánicamente imposible que se generen fallas por volcamiento, confiriendo una estabilidad al macizo para fallas de este tipo.

En lo que si hay que prestar especial atención es en la posibilidad de desprendimiento de material suelto del regolito, ya que no presenta ningún vínculo directo con el macizo, sólo que representa una capa de material incoherente producido por la alta tasa de meteorización de la roca. Aparentemente, este hecho representa poco riesgo, ya que en el talud al este del cajón de drenaje 4+500, cuya litología está muy meteorizada, no muestra evidencia de derrumbes recientes a pesar de las lluvias a la que ha estado expuesta.

**Talud entre las progresivas 4+820 a la 5+160:**

Al igual que a los taludes anteriores, y en base al estereograma de la Figura 32, se realizó la evaluación para cada uno de los tipos de fallas geotécnicas que pudiesen ocurrir en el macizo. Los resultados son los siguientes:

Falla plana: cinemáticamente no es posible la ocurrencia de este tipo de falla en el talud, debido a que los planos que presentan rumbo sub paralelos al mismo (familia de Diaclasa 5), tienen un buzamiento algo mayor, lo que le confiere estabilidad al macizo para fallas de tipo plana.

Falla en cuña: al momento de determinar posibles cuñas inestable intersecando los planos promedios obtenidos estadísticamente, no fue posible determinar situaciones de inestabilidad, sin embargo, al evaluar los planos individuales, se reconocieron varias cuñas entre planos que pertenecerían a las siguientes familias:

- Grupo de cuñas 1: formado por Diaclasa 1  $\cap$  Diaclasa 2.
- Grupo de cuñas 2: formado por Diaclasa 1  $\cap$  Falla2.
- Grupo de cuñas 3: formado por Falla 1  $\cap$  Diaclasa 3.

Estas cuñas presentes están formadas por intersección de varios planos individuales y que tienen cierta recurrencia, sin embargo, están representadas por esos pequeños bloques que caen en coluvión producto de la meteorización y la alta exposición de los planos de diaclasas. Este modo de falla, no intrínseco del macizo, se ve reflejado por un derrumbe de material coluvial en la segunda berma, la cual marca un contraste en entre la roca fresca y la roca meteorizada.

Falla de volcamiento: existen condiciones cinemáticas para que se produzcan fallas de volcamiento en el talud. Estas condiciones están presentes en dos familias de discontinuidades, Foliación 2 y Diaclasa 6. En ambos casos el rumbo es subparalelo

al del talud y el buzamiento es contrario al mismo, con un ángulo que supera los 60°. Ambas familias de discontinuidades son bastante recurrentes aunque no persistentes, sin embargo se ha de estar atento a esta inestabilidad en el macizo.

#### **5.4.1. Estabilidad mecánica**

Una vez establecidas las condiciones geométricas que pueden producir algún tipo de falla, se procede a analizar si las condiciones reológicas del macizo permitirá el desprendimiento teórico de bloques. Los principales datos considerados para un análisis de estabilidad mecánica son la densidad, el ángulo de fricción y la cohesión de la roca, estos últimos establecidos a partir de las metodologías numéricas implementadas.

La potencialidad a que ocurra una falla de tipo plana o en cuña, que son previamente anticipadas a partir del análisis cinemático, están cuantificadas a partir de un factor de seguridad, valor que arroja el programa Slope Stability 7.9 a partir del método de BISHOP (1955). A continuación se presentan los valores de los factores de seguridad obtenidos para cada uno de las cuñas propuestas como se explicó en 5.3.1.

**Tabla 22.** Factores de seguridad de cada cuña propuesta analizadas en las secciones de los taludes de corte, según BISHOP (1955).

Talud	Sección	Plano 1 (base del talud)	Plano 2 (1/2X)	Plano 3 (1/4X)
Talud 1	1+440	12,73	7,84	3,76
	1+500	11,85	7,48	3,62
	1+600	12,02	7,52	3,62
Talud 2	2+240	14,10	8,50	3,95
	2+420	13,43	8,16	3,88
	2+540	12,96	8,03	3,81
	2+640	13,26	7,98	3,71
	2+740	13,80	8,35	3,90
Talud 3	3+320	11,91	7,50	3,60
	3+360	11,67	7,38	3,56
	3+460	12,48	7,74	3,68
Talud 4	3+920	13,42	8,40	3,91
	3+980	13,20	8,40	3,91
	4+020	13,14	8,33	3,89
Talud 5	4+400	12,11	7,45	3,53
	4+420	12,33	7,54	3,56
	4+480	12,86	7,69	3,58
Talud 6	4+880	13,02	8,00	3,75
	4+960	12,96	7,82	3,66
	5+060	13,02	7,91	3,70
	5+120	13,09	7,99	3,71

Como se puede observar, estos valores de seguridad son elevadamente conservadores, dando como resultado de que es casi imposible que exista algún tipo de fallas como las anticipadas en el modelo cinemático, hecho que resulta falso al observar que existen cierta cantidad de pequeñas cuñas desprendidas en los taludes más grandes, así como cuñas mucho más grandes producidas por la disposición desfavorable de discontinuidades como la foliación y las diaclasas.

El principal factor que influye en estos valores de factores de seguridad, radica en que los ángulos de fricción obtenidos con el método propuesto por Ucar (2004), que fueron utilizados para el análisis de estabilidad mecánica, resultan también bastante elevados, lo que influye notablemente en los cálculos.

### 5.5. Discusiones generales geotécnicas

Existen varios puntos que sobre el aspecto geomecánico son importantes puntualizar. Al realizar la clasificación y caracterización de los macizos rocosos contenidos en el tramo III de la autopista, todos los criterios aplicados (GSI, Q, RMR) coinciden que se está ante una roca de calidad pobre a media, lo que se traduce a que existe una alta vulnerabilidad a que ocurran procesos de inestabilidad o falla en los cortes realizados.

Además de estos resultados que arrojan los sistemas de clasificaciones ingenieriles, al realizar el análisis cinemático del comportamiento geométrico de las discontinuidades, también se prevén la ocurrencias de fallas y deslizamientos de cuñas como resultado de la intersección de las discontinuidades medidas en campo. Esto se corrobora al observar las siguientes inestabilidades:

- En el talud entre las progresivas 1+420 a la 2+060, presenta altos niveles de meteorización, llegando incluso a formarse cárcavas de erosión en los niveles superiores, estando la roca fresca está poca expuesta. Este intenso proceso erosivo intensifica la presencia de material suelto o poco consolidado, lo que propicia la aparición de micro derrumbes en forma de conos de deyección
- Por su parte, el talud entre las progresivas 2+180 al 2+860, presenta hacia su extremo oeste importantes evidencias de fallas en cuña a todo lo largo del talud, principalmente de tres, controlado por familias de diaclasas y la foliación general. Estas cuñas son de influencia localizada en el talud, debido a que en el mismo, está aflorando un importante y mayoritario porcentaje de roca fresca, disminuyendo los problemas de deslizamiento por unidad de longitud. Sin embargo no hay que desestimar que el talud está fuertemente influenciado por una zona de falla producido por la Falla de Onoto, contacto entre el Esquisto de Chuspita y la Filita de Urape.

Esto se traduce en cantidad de fallas, de alta persistencia, abiertas y rellenas con arcillas de falla en la mayoría de los casos. Esto da como resultado un debilitamiento en el macizo a escala global.

- En cuanto al; talud ubicado entre las progresivas 3+300 al 3+500, la grieta que corta el talud, corresponde a la traza de una falla de origen tectónico, producida por esfuerzos regionales que afectan el macizo rocoso. Dicha falla fue reaprovechada por deslizamientos hacia la quebrada colgada ubicada hacia el este del talud (evidenciados por la morfología de la ladera). El desplazamiento del bloque del techo respecto al piso, cuyas estrías indican un movimiento de orientación N 22 E y buzamiento 15° al norte, puede ser consecuencia de la falta de confinamiento causado por la realización del corte del talud, pudiendo provocar una componente de rotación hacia el norte que produce el desplazamiento del techo; o bien, que probablemente ya existiera una componente hacia ese sentido del movimiento original de la falla.
- Finalmente, para el talud entre las progresivas 4+820 al 5+160, los casos de falla en cuña son el resultado de la separación de las diaclasas muy meteorizadas en los niveles superiores del corte, fracturando el macizo en pequeños bloques que se desprenden del mismo producto de la dinámica superficial.

Sin embargo, y ante todos los casos mencionados anteriormente, el modelo de estabilidad mecánica contradice los estados de inestabilidad, al obtenerse mediante cálculos, factores de seguridad lo suficientemente elevados para que ninguno de estos casos de cuñas tuviera presencia. Y Esto ocurre fundamentalmente, por los resultados obtenidos con las metodologías de estimación de parámetros de resistencia al corte ( $\phi$  y  $c$ ), como el propuesto por UCAR (2004) como el de HOEK & BROWN (1987) con su programa RocLab.

Previamente es importante mencionar las diferencias que existen entre los dos métodos:

1. El método de UCAR (2004) es muy cuidadosos al considerar aspectos geométricos de la morfología del talud, como el ángulo de las discontinuidades, el ángulo del talud, y la altura de los mismos. La razón estriba en que la tensión normal varía notablemente en función tanto de la inclinación del talud, como del plano potencial de falla, y en el caso en que se estimen discontinuidades potenciales a falla de muy bajo ángulo (como ocurre en la mayoría de los casos evaluados en este trabajo), los esfuerzos normales que actúan sobre este plano se hacen máximos, haciendo que el ángulo de fricción interna  $\phi$  (definido como el ángulo de fricción básico  $\phi_b$  que corresponde a una superficie suave aparente; más al ángulo de rugosidad  $i$ , el cual depende de las irregularidades que exhiba la masa rocosa, es decir  $\phi = \phi_b + i$ ) aumente muy considerablemente, ya que en estas condiciones, será necesario romper los puentes de roca que definen la rugosidad, en vez de ser sobreimpuestos. Es por esto que esta metodología presentará mejores resultados en situaciones en la que sobre los planos de discontinuidad actúan tensiones normales bajas (lo que es decir, en planos potenciales de fallas más inclinados).

En base a este análisis de la naturaleza del ángulo de fricción interna  $\phi$  y de su relación con la geometría del talud, el programa RocLab no realiza ninguna consideración al respecto, sólo en cuanto a la altura del talud, lo que desestima la veracidad de los resultados que él programa proporciona.

2. El factor de perturbación  $D$  introducido en el método de HOEK & BROWN (1987), resulta ser bastante falto de alegatos por parte de los autores que expliquen su naturaleza y por ende su aplicación. Como se explicó anteriormente en 5.3.2. *Método de Hoek- software RocLab*, en el caso de una voladura convencional la perturbación de la roca solo ocurrirá a un rango local. Esto es muy importante si se considera que los valores obtenidos a través de este programa son muy sensibles a las variaciones de ingreso de este parámetro. Es por esta falta de fundamentos que el método de UCAR (2004) no incluye dicho parámetro.

3. A pesar de que ambos métodos propuestos tienen una aplicación teórica para cualquier caso de falla plana o en cuña, el programa RocLab discrimina la aplicación a túneles, taludes y general. Esto es materia de discusión, ya que al variar estas aplicaciones en el programa, bajo un mismo ingreso de datos, los valores de resultado varían considerablemente; e inclusive, al seleccionar la aplicación para taludes, el programa da un valor de  $\sigma_{3\max}$  que no suministra en cualquiera de los otros casos. Es por esto que se tiene un bajo grado de confiabilidad a los resultados obtenidos con este programa.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Geológicas:

Una vez descritas las litologías aflorantes a través de la sección, se pudo distinguir cuatro unidades de rocas en base a los criterios de proporción litológica (cuarzo vs. calcita), la forma en como están dispuestas estas litologías (capas, budines o niveles enriquecidos), y la intensidad de la deformación.

Estas unidades establecidas informalmente, pudieron ser correlacionadas con las unidades formales que menciona la literatura, estando muy cerca de los límites que ésta señala. A continuación una tabla que muestra las unidades establecidas y su correlación:

**Tabla 23.** Unidades establecidas en campo y su correlación con unidades formales que señala los trabajos previos

UNIDADES INFORMALES	UNIDADES FORMALES
Unidad A	Esquisto de Las Mercedes
Unidad B	Esquisto de Chuspita
Unidad C	Filita de Urape
Unidad D	Filita de Muruguata

En base a toda esta nueva información geológica recopilada, se pudo refinar la cartografía de los contactos entre estas unidades como se puede apreciar en la Figura 24, la cual constituiría el principal aporte de este estudio al conocimiento de la geología de esta zona.

Este aporte se potencializa, si se considera que la caracterización geológica se realizó a partir de una sección transversal a los contactos de las unidades estudiadas, a

diferencia de haberse realizado en los cauces de las quebradas que transitan paralelo a dichos contactos.

Geomecánicas:

- Los macizos rocosos de este tramo se clasifican ingenierilmente como:
  - a) Roca de calidad pobre (según el valor Q de BARTON (1974))
  - b) Clase III-IV con calidad media a mala y ángulos de fricción estimados de 25° - 35° (según el valor RMR de BIENIAWSKI (1976))
  - c) Roca con GSI promedio de 40 (según GSI de HOEK 1997 y adaptado por TRUZMAN (1999) a las rocas metamórficas).

Todas estas clasificaciones son congruentes entre sí sobre el tipo de macizo que se ha caracterizado, evitándose incongruencias y variedad de criterios al momento de clasificarlos por uno u otro sistema.

- Los modelos cinemáticos, utilizados tradicionalmente (diagramación de discontinuidades en proyección estereográfica) para la predicción de ocurrencia de fallas siguen siendo certeros.
- Los modelos de estabilidad mecánica de los taludes no fueron predictivos, debido a que los valores utilizados de  $\phi$  y  $c$ , que provienen de la metodología numérica propuesta por UCAR (2004), son valores sobreestimados. Esta metodología presentan ciertas restricciones de aplicabilidad:
  1. El método de UCAR (2004) debe ser aplicado cuando los planos potenciales de falla son bastantes inclinados, en un rango que permita una aproximación de los esfuerzos normales actuantes sobre el plano de falla a curvas de fácil modelaje matemático (lineal, parabólico, logarítmico, exponencial, etc).

2. Este sería el primer caso de aplicación en rocas metamórficas bastante frescas, sin embargo según DE SANTIS F. (comunicación personal), al aplicar la metodología sobre rocas altamente meteorizadas, los resultados fueron bastante satisfactorios.

- Existen diferencias entre los métodos propuestos por UCAR (2004) y por HOEK & BROWN (1987) entre los cuales están:

1. La inclusión de los aspectos geométricos del talud, que afectan sustancialmente los esfuerzos cortantes, en el método de UCAR (2004). El programa RocLab desestima estos datos.

2. El programa RocLab introduce el factor de perturbación D, lo cual tiene muy poco fundamento teórico y relevancia práctica.

3. A si mismo, el programa RocLab condiciona los resultados según la aplicación a ser utilizados (bien sea túneles, taludes o general), existiendo diferencias muy marcadas en los valores obtenidos a partir de un mismo ingreso de datos, según la aplicación seleccionada.

Una vez llegado a estas conclusiones, también cabe mencionar unas recomendaciones importantes:

- Refinar el trabajo geológico en la zona en la medida que la exposición de los afloramientos lo permita.

- Es importante para cualquier metodología que implique el uso de GSI como parámetro numérico de información geológica, una buena descripción en campo de las características de las discontinuidades, como rugosidad, meteorización, abertura y rellenos presentes.

- En cuanto al conocimiento de los parámetros de resistencia al corte de una roca, se recomienda en caso de aplicar una metodología numérica, corroborar los resultados con la ayuda de ensayos de campo y laboratorio, como el tilt test, determinación de coeficiente de rugosidad JRC, y el ensayo de corte directo, determinando así la resistencia al corte pico y residual.
- Para los casos de inestabilidad, propiciado por cuñas deslizadas, se recomienda la elaboración de pantallas localizadas y amoldadas al terreno sujetadas con perfos de 6 m de longitud, a fin de poder acorazar la zona de influencia de las discontinuidades. Esta solución es aplicable para los caso de cuñas más grandes, el resto puede ser solucionado con una reforestación del macizo.
- Se recomienda seguir probando estas metodologías de cálculo de parámetros de resistencia al corte en variados proyectos, para así poder crear límites más específicos en cuanto a las restricciones y aplicabilidad práctica que estos poseen.

**7. BIBLIOGRAFÍA**

- AGUERREVERE S. E. & G. ZULOAGA. 1937-a. Observaciones geológicas en la parte central de la Cordillera de la Costa, Venezuela. *Bol. Geol. y Min.*, Caracas, 1(2-4): 3-22.
- AMERICAN STANDARD FOR TESTING AND MATERIALS. 2002. Soil & Rock. Washington, USA. Vol 4.
- ASUAJE L. 1972. Geología de la región de Guatire - Cabo Codera (Resumen). *Bol. Geol.*, Caracas, *Public. esp.* 5, 3: 1289.
- BAÉZ X. 2001. *Estudio hidráulico fluvial y drenaje superficial de la Autopista de Oriente, Tramo III entre el distribuidos Chuspita y Caucagua, progresivas 52+000 y 58+400, incluye los puentes de las progresivas 57+320 y 57+500 Estado Miranda*. Ministerio de Infraestructura. Dirección General del cuerpo de Ingenieros. Dirección de Estudios y Proyectos. Inédito.
- BARNES J. 1981. *Basic Geological Mapping*. Geological Society of London. Handbook
- BARTON N., R. LIEN & J. LUNDE. 1974. Engineering classification of rock masses for the desing of túnel support. *Rock Mechanics* 6. 186-236
- BECK C. 1985. *La chaîne Caraïbe au merdien de Caracas: geologie, tectogenese, place dans l'evolution geodynamique Mesozoique-Cenozoique des Caraïbes Meridionales*. Soc. Geol. de Nord, Villeneuve s'Ascq, Francia, Public. 14, 462 pp.
- BIENIAWSKI Z.T. 1976. Rock mass classification in rock engineering. *Exploration for Rock Engineering, Proc. of the Symp.*, (ed. Z.T. BIENIAWSKI) 1, 97-106. Cape Town, Balkema.
- BISHOP A.W. 1955. The use of slipe circle in the estability analysis of slope. *Geotechnique*, Vol 10 (4), 129-150.
- DENGO G. 1951. Geología de la región de Caracas. *Bol. Geol.*, Caracas, 1(1): 39-116.
- EL NACIONAL 2002. Miranda. *Atlas práctico de Venezuela*, Caracas, número 16
- GONZÁLEZ DE JUANA C., J. M. ITURRALDE & X. PICARD. 1980. *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas*. Edic. Foninves, Caracas, 2 vols., 1031 p.
- GONZALEZ DE VALLEJO, F., M. FERRER, L. ORTUÑO Y L. OTEO. 2002. *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall, 715 p.

- HOEK, E. & E.T. BROWN. 1988. The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update. *Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp.* (ed. J.C. CURRAN), 31-38. Toronto, Dept. Civil Engineering, University of Toronto.
- HOEK, E. & E.T. BROWN. 1997. Practical estimates of rock mass strength. *Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts*. 34(8), 1165-1186.
- I.S.R.M. 1981. *Rock characterization. Testing and Monitoring. Suggested Methods*. E.T. BROWN. Pergamon Press.
- MACSOTAY O. 1972. Significado cronológico y paleoecológico de los amonites desenrollados de la Formación Chuspita del Grupo Caracas. *Bol. Geol.*, Caracas, Public. esp. 5: 1703-1710.
- MENÉNDEZ V. DE V. A. 1966. Tectónica de la parte central de la montañas occidentales del Caribe, Venezuela. *Bol. Geol.*, Caracas, 8(15): 116-139
- NACSN – NORTH AMERICAN COMMISSION ON STRATIGRAPHIC NOMENCLATURE. 1983. North American Stratigraphic Code. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 67(5): 841-875.
- OTERO P. & A. SAN MARTÍN. 2002. *Geología de la zona de Conoropa, Caucagua, Estado Miranda*. U.C.V.- Facultad de Ingeniería-Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo especial de Grado.
- SALCEDO D. 1978. *El uso de proyecciones hemisféricas como técnica de predicción y análisis de problemas relativos a estabilidad de taludes en macizos rocosos..* U.C.V. - Facultad de Ingeniería-Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo de ascenso a Profesor Agregado. p. 78
- SEIDERS V. M. 1965. Geología de Miranda central, Venezuela. *Bol. Geol.*, Caracas, 6(12):289-416.
- SOWERS G & SOWERS G. 1970. *Introductory soil mechanics and foundation*. Mac Millan Publishing Co. Inc., 556 p.
- SUDGEN T. 1987. Kinematic indicators: structures that record the sense of movement in mountain chains. *Geology Today*, 93-44.
- UCAR R. 2004. *Manual de anclajes en obras de tierra*. Entorno Gráfico, Madrid, España.
- URBANI F. 1982. Comentarios sobre algunas edades de las rocas de la parte central de la Cordillera de la Costa. *Geos*, U.C.V., Caracas, 27: 77-84.

URBANI F. 2002. Nomenclatura de las Unidades de Rocas Ígneas y Metamórficas de la Cordillera de la Costa. *Geos*, U.C.V., Caracas., 35 (2002). pp. 107.

WEHRMANN M. 1972. Geología de la región de Guatire - Colonia Tovar. *Bol. Geol.*, Caracas, *Public. esp.* 5, 4: 2093-2121.

## 8. ANEXOS

### 8.1. Marco teórico

#### 8.1.1. Método de las discontinuidades sobre estereogramas

El método de las discontinuidades permite analizar la estabilidad del macizo rocoso asumiendo como hipótesis principal que los modos de falla se generan a través de las discontinuidades preexistentes; es decir, no se producen fallas a través de la roca sana. En este sentido la presencia de discontinuidades en la roca tales como planos de foliación o estratificación, fracturas o diaclasas representan planos que en forma aislada o por la intersección de ellos entre sí, pueden generar fallas en forma plana, por cuñas o por volcamiento.

En los dos primeros casos, estos modos de fallas están controlados por el ángulo de fricción interno de la roca y la cohesión o puentes de roca presentes en las discontinuidades. En este sentido tenemos dos formas para describir la estabilidad: de una discontinuidad aislada o por la intersección de dos o más planos estructurales.

Existe una categoría de estabilidad denominada mecánica la cual es garantizada por una geometría o arreglo de las discontinuidades que no permite el movimiento de bloques por fuerzas gravitatorias sin que haya ruptura de roca sana; por otra parte, se denomina estabilidad cinemática aquella que habiendo los mecanismos geométricos para el movimiento de algún bloque, éste sea impedido por fuerzas friccionantes o de cohesión en la roca.

Para aplicar el método de las discontinuidades, es necesario graficar las mismas en una red estereográfica equiareal y analizar separadamente cada uno de los casos posibles de inestabilidad, aplicando los criterios correspondientes para cada uno de ellos. Los modos de falla y criterios de evaluación para cada caso son los siguientes:



Criterios para ocurrencia de falla plana:

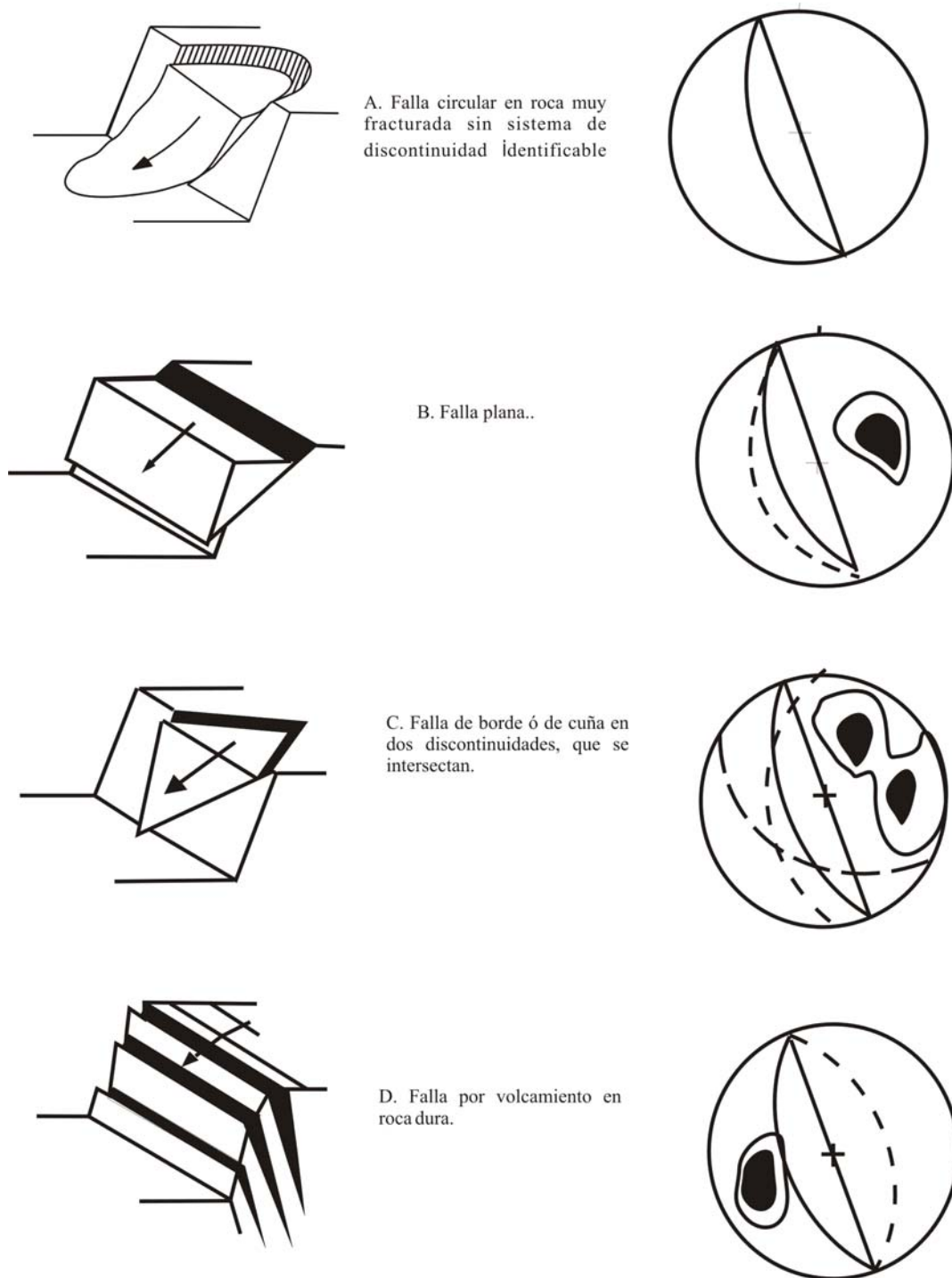
- Una o más discontinuidades tienen rumbo subparalelo al talud.
- El buzamiento de la discontinuidad debe ser menor que la pendiente del talud y en el mismo sentido.
- El ángulo de fricción de la discontinuidad, debe ser menor al buzamiento de la discontinuidad.

Criterios para ocurrencia de falla en cuña:

- La recta intersección entre dos discontinuidades debe tener pendiente hacia la cara del talud y debe ser de ángulo menor al mismo.
- El ángulo de fricción de las discontinuidades debe ser menor que el ángulo de la recta intersección.

Criterios para ocurrencia de falla de volcamiento:

- El rumbo de la discontinuidad debe ser subparalelo al rumbo del talud.
- El buzamiento de la discontinuidad debe ser contrario a la pendiente del talud y mayor de 60° de buzamiento.



**Fig. 40** Tipos de fallas en macizos rocosos y su apariencia en protecciones hemisféricas (Tomado de SALCEDO 1978)

### **8.1.2. Método propuesto por UCAR (2004) para la estimación de parámetros de resistencia al corte**

El siguiente apartado explicará la metodología para el cálculo de los parámetros de resistencia al corte “equivalentes”, ángulo de fricción interna ( $\phi_e$ ) y la cohesión ( $C_e$ ) de macizos rocosos, necesarios para realizar el análisis de estabilidad mecánica de taludes realizados en obras de construcción.

En primer lugar, este método está basado en el criterio de rotura de HOEK & BROWN (1980) que es aplicable tanto en roca intacta como en macizos rocosos, en la cual se desarrolló empíricamente una relación matemática que relaciona el esfuerzo principal mayor ( $\sigma_1$ ) con el esfuerzo principal menor ( $\sigma_3$ ). A partir de esta relación, todo el detalle matemático para dar lugar a las ecuaciones que se presentarán a continuación, se expone en el trabajo de UCAR (2004.).

El objetivo principal de la metodología propuesta por UCAR (2004), consiste en poder estimar unos parámetros de fricción interna y cohesión “equivalentes” o “promedios” de un macizo rocoso fracturado y/o cizallado, bajo un estado de esfuerzo estimado según la geometría del talud, y considerando las características de la litología según la clasificación ingenieril de macizos propuesta por HOEK & BROWN (1997), que arroja como resultado un índice de calidad de la roca conocido como *índice de resistencia geológica* o GSI por sus siglas en inglés (Geological Strength Index). A su vez se extrapola el resultado de los ensayos de compresión sin confinar de la roca intacta, al del macizo de la cual fue extraída la probeta ensayada.

Este procedimiento fue automatizado a través de una hoja de cálculo que computa cada uno de los parámetros necesarios a fin de obtener el ángulo de fricción ( $\phi_e$ ) y cohesión equivalente ( $C_e$ ) del macizo a partir de la roca intacta.

En primer lugar, la descripción de campo de la roca debe estar enfatizada en las condiciones de las diaclasas, como abertura, rugosidad, meteorización y rellenos presentes, así como de la abundancia de fracturas, y en el caso de las rocas metamórficas, la abundancia de rocas foliadas con respecto a las no foliadas. Con todos estos parámetros bien definidos, será posible tener una muy buena estimación del valor del GSI, que aunque se recomienda tomar intervalos como parámetro descriptivo de la condición del macizo, será necesario en el caso de esta metodología, considerar un valor numérico específico.

Obviamente, para el momento del ensayo de compresión simple o sin confinar, será necesario registrar las dimensiones de la probeta, así como su peso, todo esto con la intención de conocer la densidad de la roca con la que se está tratando.

Una vez clasificado el macizo con un valor de GSI, lo cual dará la información de la condición general del mismo, se procede a relacionar dicho valor con las variables “m” y “s” que corresponden a las características de la curva de rotura del criterio de HOEK & BROWN (1980). El parámetro “m” controla la curvatura entre los esfuerzos principales, mientras que “s” regula la ubicación de la curva entre  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ . Estos parámetros se calculan con las siguientes expresiones:

$$m = m_i * \exp\left[\frac{GSI - 100}{28}\right]$$

$$s = \exp\left[\frac{GSI - 100}{9}\right]$$

El valor de “m<sub>i</sub>” corresponde al valor “m” pero en la condición “intacta”, la cual va a depender exclusivamente del tipo litológico con la cual se esté trabajando. Estos valores para las rocas intactas están registrados en la tabla de GONZÁLEZ DE VALLEJO, *et al* (2002).

Seguidamente y dada la naturaleza discontinua y heterogénea del macizo, habrá que calcular el ángulo de fricción interna tanto en la cresta del talud, como en el pie del mismo, ya que dicho valor está íntimamente relacionado con los esfuerzos normales a los que esté sometido la roca, es decir, para la cresta del talud prácticamente no existen esfuerzos normales de confinamiento, por lo que el valor de  $\phi$  deberá ser mayor que en el pie de talud, donde existe un esfuerzo normal aplicado por la columna de roca suprayacente. Así que considerando que no hay confinamiento en la parte superior del talud (Sin embargo hay que mantener presente que es posible hallar esfuerzos de tracción en esta zona), el ángulo  $\phi$ , denominado  $\phi_1$  para este caso, se calcula con la expresión:

$$\text{sen}\phi_1 = \frac{m}{4\sqrt{s} + m}$$

A continuación se procede a hallar el ángulo de fricción correspondiente al pie del talud, denominado  $\phi_2$ , para ello es necesario considerar la relación  $\sigma_n/\sigma_c$  que se ajuste lo mejor posible al verdadero campo de esfuerzos al cuales está sometido el macizo, lo cual va a depender de la columna de roca presente. Para hallar esto, UCAR (2004) considera la siguiente relación entre el esfuerzo normal con la densidad de la roca y la altura del talud:

$$\sigma_n = 0.40 * \text{densidad de la roca} * \text{altura del talud}$$

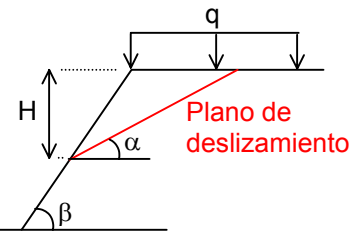
Esta ecuación sólo es valida para el plano de falla que pasa por el pie del talud. Para cualquier otro caso será necesario conocer la relación  $(\sigma_n/\gamma H)$  de manera independiente. Para tal fin se aplica la ecuación que calcula la relación de la tensión normal media como sigue:

$$\left(\frac{\sigma_n}{\gamma H}\right) = \frac{\text{sen}(\beta - \alpha)}{\text{sen}\beta} \left(0.5 + \frac{q}{\gamma H}\right) \cdot K \cdot \cos(\alpha + \varepsilon)$$

Donde

$$\tan \varepsilon = \left(\frac{K_h}{1 + K_v}\right)$$

$$K = \sqrt{K_h^2 + (1 + K_v^2)}$$



Siendo  $K_v$  y  $K_h$  las aceleraciones sísmicas verticales y horizontales respectivamente

Seguidamente se obtiene la relación  $(\sigma_n/\sigma_c)$  con la compresión sin confinar obtenida en el laboratorio y expresada en MPa.

Una vez obtenida esta relación, se aplica la ecuación general para el ángulo de fricción instantánea ( $\phi_i$ ) o inclinación de la envolvente de falla, válida para cualquier punto conocido de la superficie potencial de deslizamiento del talud investigado, que para este caso corresponde al pie del mismo, es decir,  $\phi_i = \phi_2$ .

$$\text{sen}\phi_i = \text{sen}\phi_2 = \frac{\lambda}{3} \left( 2 * \cos \left\{ \frac{1}{3} \arccos \left[ \left( 1 - \frac{27}{4\lambda^3} \right) \right] + 240^\circ \right\} + 1 \right)$$

Donde,

$$\lambda = \frac{8}{m^2} \left[ m \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right) + s \right] + \frac{3}{2}$$

Hasta este punto ya es conocida la relación  $(\sigma_n/\sigma_c)$ , pero ahora es necesario conocer la relación del esfuerzo principal menor en este punto del talud con la compresión sin confinar, la cual se determina en función del estado tensional existente en el macizo rocoso, es decir,  $(\sigma_3/\sigma_c)$ , la cual requiere el valor de  $\phi_2$  determinado anteriormente, y es calculada con la siguiente expresión:

$$\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c}\right) = \xi = \frac{1}{m} \left\{ \left[ \frac{m}{4} \left( \frac{1}{\text{sen}\phi_2} - 1 \right) \right]^2 - s \right\}$$

Hallado dicho valor, la cual se llamará ( $\xi$ ), se procede finalmente a calcular el ángulo de fricción “equivalente” de todo el macizo ( $\phi_e$ ), habiendo considerando los dos estados de esfuerzos extremos que hay tanto en la cresta como al pie del talud. Para ello se emplea la siguiente ecuación:

$$\tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi_e}{2}\right) = \left\{1 + \frac{\sqrt{s}}{\xi} \left[ \sqrt{1 + \frac{m}{s} \xi} - 1 \right] \right\}$$

Igualmente, con los parámetros calculados hasta entonces, es posible determinar la cohesión “equivalente” del macizo con la fórmula:

$$\left(\frac{C_e}{\sigma_c}\right) = \frac{180^\circ}{\pi(\phi_2 - \phi_1)} \left\{ \frac{m}{16} * \ln \left[ \frac{\tan \phi_2 * \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi_1}{2}\right)}{\tan \phi_1 * \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi_2}{2}\right)} \right] - \left(\frac{s}{m} + \frac{m}{16}\right) \ln \left( \frac{\cos \phi_2}{\cos \phi_1} \right) \right\}$$

Con esto se trata de unificar en valores determinados, parámetro que represente al medio discontinuo y heterogéneo que representa un macizo rocoso, y así con ellos poder realizar análisis de estabilidad mecánica para casos de falla plana.

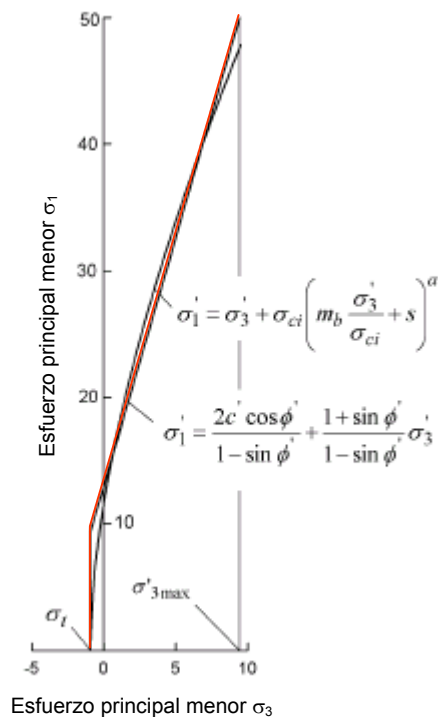
Sin embargo, la aplicación de la metodología descrita anteriormente, da como resultado valores estimados que acercan a la comprensión del comportamiento mecánico del macizo, y facilita la realización de los análisis de estabilidad, pero esto no debe representar excusas para realizar ensayos de laboratorio más específicos sobre la roca, que permita afinar dichos valores y por ende, acercarse más a la realidad geológica.

### 8.1.3. Metodología empleada por el programa *RocLab 1.0* para el cálculo de parámetros de resistencia al corte

Se ha utilizado este software como modo alternativo en el cálculo de los parámetros de resistencia al corte ( $c$  y  $\phi$ ) a modo de comparar sus resultados con los obtenidos con el método propuesto por UCAR (2004).

El método utilizado por el programa RocLab, disponible gratuitamente en la página [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com), está basado en la última revisión que han hecho los investigadores sobre el criterio de falla de HOEK & BROWN (1988). En base a estos estudios, los autores consideran que el parámetro GSI (Geological Strength Index) se acercaba más a la descripción geológica realizada en campo, particularmente en macizos muy diaclasados, en comparación con la clasificación de macizos propuesta por BIENIAWSKI (1976) dado por el índice RMR (Rock Mass Rating).

El fundamento principal del método expuesto a continuación, trata del ajuste o aproximación que se ha hecho a la envolvente de Mohr-Coulomb, al gráfico  $\sigma_1$  vs.  $\sigma_3$  del



**Fig. 41** Relación entre los esfuerzos principales mayor y menor de Hoek & Brown y su equivalente con el criterio de Mohr-Coulomb



criterio de falla de HOEK & BROWN (1988)\*.

El primer paso consiste en determinar las constantes (m), (s) y (a) que son propias de las características intrínsecas de cada macizo y litología correspondiente. En el caso particular de una roca intacta,  $s = 1$ . Estos valores están expresados en función del parámetro GSI de la clasificación ingenieril.

$$m = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

El valor de (D) es llamado factor de perturbación de la roca, y se refiere al grado de afectación que pudo sufrir la roca según el proceso de excavación, bien sea con maquinaria o por el uso de explosivos. Los valores se estiman a partir de los métodos de excavación empleados en una tabla comparativa (ver Tabla 24) y van desde  $D=0$  para rocas imperturbadas, hasta  $D=1$  para rocas que han sido expuestas a importantes voladuras a cielo abierto.

Una vez obtenido estos parámetros, es necesario conocer el estado de esfuerzo que esté actuando en la roca. Para este caso, se considerará un estado de esfuerzo global de todo el macizo ( $\sigma_{cm}$ ) en función de la compresión sin confinar de la roca intacta ( $\sigma_c$ ), valor obtenido a través del ensayo de laboratorio respectivo. Al estimar este valor, ( $\sigma_{cm}$ ), se ha considerado un rango entre los esfuerzos cortantes, y de confinamiento con respecto a la compresión simple de  $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_c/4$ , ya que en este

---

\* Recordar que el criterio de Mohr- Coulomb relaciona los esfuerzos cortantes ( $\tau$ ) con los normales ( $\sigma$ ) en función del ángulo de fricción interna de la roca o macizo ( $\phi$ ) y la cohesión ( $c$ ). Por su parte el criterio de HOEK & BROWN (1988) relaciona el esfuerzo principal mayor ( $\sigma_1$ ), con el esfuerzo principal menor ( $\sigma_3$ ) del estado de esfuerzos actuante en el macizo.

intervalo es donde se puede ajustar linealmente la envolvente de Mohr-Coulomb con el criterio de HOEK & BROWN (1988), cuyo límite superior está dado por ( $\sigma_{3\text{máx}}$ ) que se determinará más adelante para cada macizo. Entonces, el valor de ( $\sigma_{\text{cm}}$ ) se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma_{\text{cm}} = \sigma_c * \frac{(m + 4s - a(m - 8s)) * (m/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$$

Con el valor de ( $\sigma_{\text{cm}}$ ), es necesario calcular ( $\sigma_{3\text{máx}}$ ) como se mencionó anteriormente. Dicho valor variará dependiendo de la aplicación específica que se esté investigando y depende de la densidad de la roca ( $\gamma$ ) y la profundidad del túnel o altura del talud (H). Para el caso de túneles se calcula con:

$$\frac{\sigma_{3\text{máx}}}{\sigma_{\text{cm}}} = 0.47 \left( \frac{\sigma_{\text{cm}}}{\gamma H} \right)^{-0.94}$$

Y para el caso de estudio en taludes, usando el análisis de falla circular de Bishop, se tiene:

$$\frac{\sigma_{3\text{máx}}}{\sigma_{\text{cm}}} = 0.72 \left( \frac{\sigma_{\text{cm}}}{\gamma H} \right)^{-0.91}$$

Llegado a este punto, y estimado el estado de esfuerzo actuante, se procede a calcular los parámetros de fricción interna ( $\phi_e$ ) y cohesión equivalentes ( $c_e$ ) del macizo para el criterio de Mohr- Coulomb, los cuales son dependientes para cada macizo rocoso y rango de esfuerzo. Este cálculo resulta, como se mencionó anteriormente, de ajustar linealmente la curva del criterio de Mohr- Coulomb para un rango de esfuerzo principal menor definido entre  $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_{3\text{máx}}$ , de manera que balanceada la curva, dicho proceso resultó en las siguientes ecuaciones:

$$\phi_e = \arccos \left[ \frac{6 * a * m (s + m \sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6 * a * m (s + m \sigma_{3n})^{a-1}} \right]$$

$$c_e = \frac{\sigma_c [(1+2a)s + (1-a)m\sigma_{3n}] (s + m\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + (6am(s + m\sigma_{3n})^{a-1}) / ((1+a)(2+a))}}$$






Donde  $\sigma_{3n} = \sigma_{3m\acute{a}x} / \sigma_c$

Finalmente, el programa RocLab, también calcula el módulo de deformación del macizo roca, la cual es determinado a partir de las siguientes ecuaciones:

$$E_m \text{ (GPa)} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} * 10^{((GSI-10)/40)} \quad ; \quad \text{si } \sigma_c \leq 100 \text{ MPa, o bien}$$

$$E_m \text{ (GPa)} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) * 10^{((GSI-10)/40)} \quad ; \quad \text{si } \sigma_c > 100 \text{ Mpa.}$$

Tabla 24. Guía para la estimación del factor de perturbación D

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor sugerido de D
	Excelente calidad controlada por voladura o excavación con máquina perforadora de túneles resultando en una mínima perturbación del macizo rocoso confinado en los alrededores del túnel.	D = 0
	Excavación manual o mecánica en macizos rocosos de baja calidad (sin voladuras), produciendo mínima perturbación al macizo circundante.	D=0
	Donde resultan problemas de compresión como elevación significativa del suelo y las paredes, la perturbación puede ser severa a menos que se use una forma temporal de invertir el efecto, como se muestra en la imagen.	D=0,5 Sin invertir el efecto de compresión
	Túnel por voladura en roca dura de muy poca calidad, produce daños de perturbación local severa con influencia de 2 o 3 m en el macizo circundante..	D = 0.8
	Voladura a pequeña escala en taludes de ingeniería civil, produce un modesto daño al macizo rocoso. También la falta de confinamiento produce cierta perturbación.	D= 0.7 Voladura fuerte  D = 1.0 Voladura débil
	Grandes taludes de minas a cielo abierto sufren una significativa perturbación debido a la gran cantidad de voladuras y también debido a la falta de esfuerzos producido por la remoción de sobrecarga.	D= 1.0 Voladuras de producción (frecuentes)
	En algunas rocas más blandas la excavación puede ser hecha por rasgadura y carga del material, por lo que el grado de daño al talud es mínimo.	D= 0.7 Excavación mecánica

#### 8.1.4. Método de BISHOP (1955) empleado para el cálculo de la estabilidad mecánica de círculos teóricos de falla (método de las dovelas)

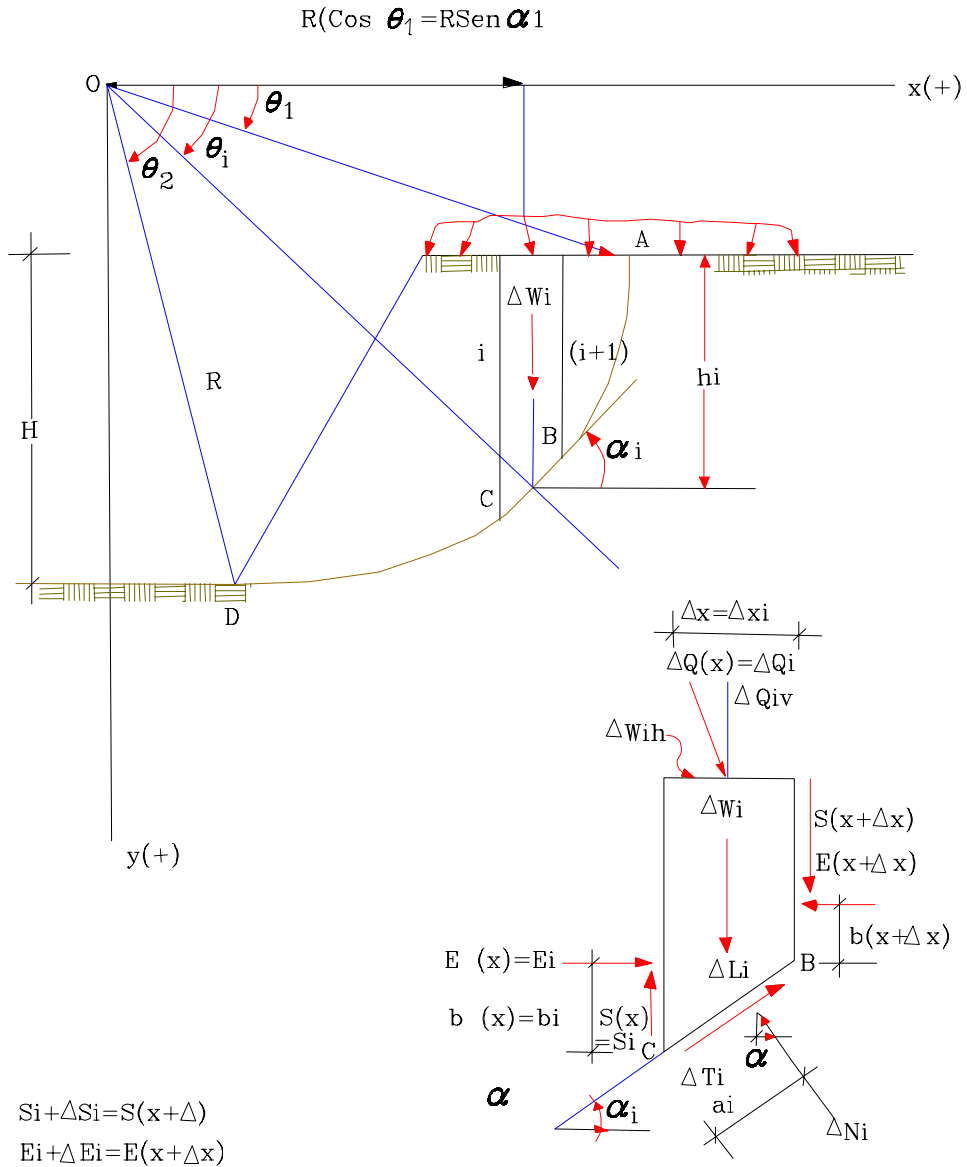
Este método de cálculo, también llamado de rebanadas, dovelas o sueco; consiste en dividir la superficie de deslizamiento en varios segmentos de ancho ( $\Delta x$ ) y analizar las condiciones de equilibrio de cada rebanada vertical (ver Figura 42) mediante un diagrama de cuerpo libre, en el cual debe cumplirse que la sumatoria de las fuerzas horizontales y verticales, conjuntamente con la de momentos deben ser cero, es decir:  $\sum F_h = \sum F_v = \sum M = 0$ .

Este procedimiento, el cual ha sido utilizado con bastante éxito, supone que por ser:

$$\sum_{i=1}^n [S_{i+1}(x + \Delta x) - S_i(x)] = 0$$

Es también:

$$\sum_{i=1}^n \left\{ [S_{i+1}(x + \Delta x) - S_i(x)] \frac{\tan \phi_i \sec \alpha_i}{1 + \frac{\tan \phi_i - \tan \alpha_i}{FS}} \right\} \cong 0$$



**Fig. 42** denominación de variables para la condición de equilibrio para cada rebanada vertical

La última ecuación arriba indicada sería estrictamente correcta para:

$\phi_i = \text{constante}$

$\alpha_i = \text{constante}$

Estando tanto más alejado de la realidad cuando mayor es la variación de estos dos ángulos.

Como el coeficiente de seguridad está contenido de forma implícita, es necesario dar valores a FS, hasta lograr el correcto valor. Generalmente es suficiente con dos tanteos.

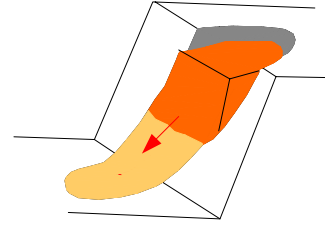


Fig. 43 Rotura o falla circular

A través de la Figura 44 se aprecia el arco ABCD de la posible falla potencial conjuntamente con la dovela mostrada, donde actúan las fuerzas siguientes:

$$\left. \begin{array}{l} S(x) = S_i \\ S(x + \Delta x) = S_i + \Delta S_i \end{array} \right\} \text{Fuerzas verticales tangenciales}$$

$$\left. \begin{array}{l} E(x) \\ E(x + \Delta x) = E_i + \Delta E_i \end{array} \right\} \text{Representan las resultantes de las fuerzas horizontales sobre las caras } i \text{ e } (i+1) \text{ de la rebanada considerada.}$$

$\Delta W_i$  = Peso total de la rebanada

$\Delta Q_i$  = sobrecarga

$\Delta N_i$  = reacción normal del terreno

$\Delta T_i$  = fracción de la resistencia al corte movilizada

La relación entre  $\Delta N_i$  y  $\Delta T_i$ , aplicando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb es:

$$\Delta T_i = \frac{1}{FS} [C_1 \cdot \Delta X_i \sec \alpha_i + \Delta N_i \tan \phi_i]$$

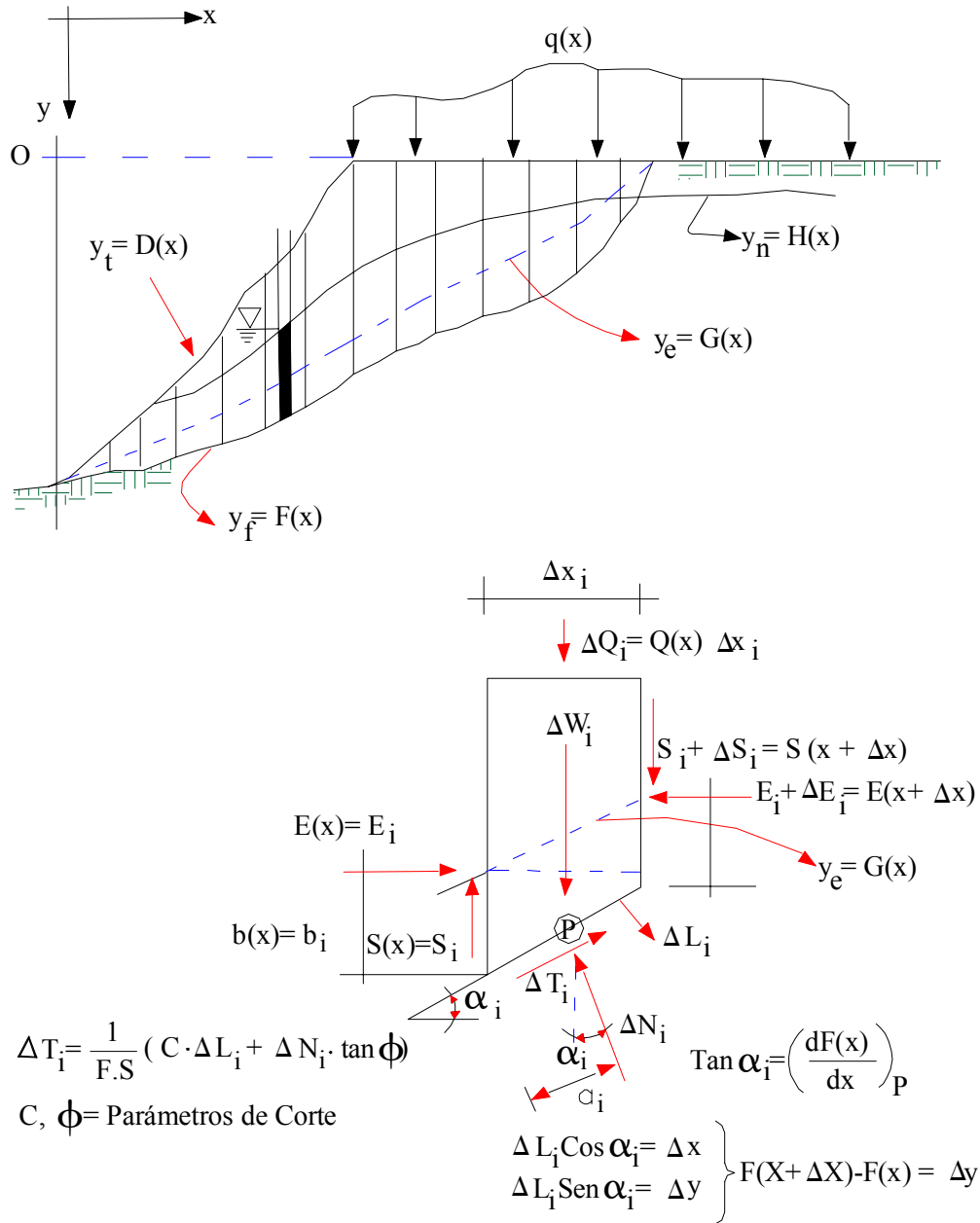


Fig. 44 Detalle de la rebanada analizada y las denominaciones algebraicas utilizadas

Siendo:

FS = Coeficiente de seguridad correspondiente al círculo de deslizamiento, el cual se considera constante en todas las rebanadas.

$\Delta X_i \text{ sen } \alpha_i = \Delta l_i =$  longitud BC (tomando como una línea recta)



Igualmente se aprecia que:

$\Delta X_i$  = ancho de la rebanada

$h_i$  = altura de la rebanada

Considerando el conjunto de fuerzas de la rebanada mostrada y tomando las condiciones de equilibrio al simplificar resulta:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{C_i \cdot \Delta X_i + (\Delta W_i + \Delta Q_{iv}) \tan \phi_i}{\cos \alpha_i + \frac{\text{sen} \alpha_i \cdot \tan \phi_i}{FS}} \right]}{\sum_{i=1}^n \left[ (\Delta W_i + \Delta Q_{iv}) \cdot \text{sen} \alpha_i - \Delta Q_{ih} \frac{d_i}{R} \right]}$$

R = radio del círculo crítico

$d_i$  = es el brazo de palanca de  $\Delta Q_{ih}$  con respecto al centro del círculo crítico

Al incorporar el efecto de la presión de poros ( $u$ ), conjuntamente con la cohesión y el ángulo de fricción interna en términos de la presión efectiva,  $\sigma'$ ,  $\phi'$ , la última ecuación se transforma:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{C'_i \cdot \Delta X_i + (\Delta W_i + \Delta Q_{iv} - U_i \Delta X_i) \tan \phi'_i}{\cos \alpha_i + \frac{\text{sen} \alpha_i \cdot \tan \phi'_i}{FS}} \right]}{\sum_{i=1}^n \left[ (\Delta W_i + \Delta Q_{iv}) \cdot \text{sen} \alpha_i - \Delta Q_{ih} \frac{d_i}{R} \right]}$$

De acuerdo a SOWERS & SOWERS (1970) el rango del factor de seguridad en taludes es el siguiente:

**Tabla 25.** Rangos de factores de seguridad en taludes

FACTOR DE SEGURIDAD	SIGNIFICADO
< 1	Inseguro
1,00 – 1,20	Seguridad cuestionable
1,30-1,40	Satisfactorio para cortes y terraplenes, cuestionable para presas.
≥ 1,50	Seguro para presas

Finalmente, es importante considerar que el método de las dovelas propuesto por BISHOP (1955) explicado anteriormente, genera errores del 2%, no pasando nunca del 7% al determinar el coeficiente o factor de seguridad FS. Adicionalmente facilita el diseño de la fuerza requerida en el tirante anclado, por cuanto se conoce la sumatoria

de las fuerzas normales  $N = \sum_{i=1}^n \Delta N_i$ , y tangenciales  $T = \sum_{i=1}^n \Delta T_i$  que actúan sobre la superficie potencial de deslizamiento.

### 8.1.5. Sistemas de clasificación geomecánicas o ingenieriles

Como en todo sistema natural tan complejo, es necesario clasificar los macizos rocosos de acuerdo a sus propiedades mecánicas, independientemente del litotipo al que pertenezcan, ya que esta denominación provee información útil para las áreas de la mecánica de rocas y a la geotecnia, permitiendo establecer parámetros necesarios para el diseño de obras como túneles y taludes.

Es por esto, que se han creado varios sistemas de clasificación de macizos rocosos, a fin de establecer patrones para la denominación de los mismos, basados en las características geomecánicas de la roca y en las condiciones de las discontinuidades como potenciales superficies de falla.

Entre los principales sistemas de clasificación, y utilizados en este estudio, se encuentran los siguientes:

- Clasificación de Hoek de parámetro GSI (Geological Strenght Index)
- Clasificación de Barton de parámetro Q.
- Clasificación de Bieniawski de parámetro RMR (Rock Mass Rating)

A continuación se procede a explicar los criterios utilizados por cada uno de estos sistemas de clasificación geomecánicas.

#### Clasificación de Hoek de parámetro GSI (Geological Strenght Index)

Este sistema de clasificación, creado por HOEK (1997), se basa en las características observadas en campo, y por ende es de naturaleza eminentemente descriptiva.

El parámetro resultante es el denominado Índice de Resistencia Geológica (GSI por sus siglas en inglés) y es consecuencia de la evaluación de las condiciones de las superficies de discontinuidades (rugosidad, grado de meteorización), así como del nivel de fracturamiento o foliación que presente la roca.

Esta evaluación se hace con una tabla comparativa, que para efectos de este estudio, se utilizó la modificada por TRUZMAN (1999), la cual está adaptada a las rocas metamórficas de la Cordillera de la Costa (ver Figura 45). De dicha tabla, se selecciona un intervalo congruente con lo observado en campo.

Es recomendable obtener rango de valores, aunque en este caso se utilizó el promedio entre dicho intervalo numérico. El GSI es un valor comprendido entre 0 y 100, lo cual indica un aumento respectivo en la calidad de la roca.

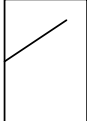
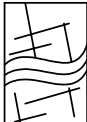

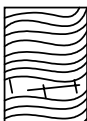
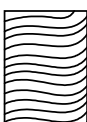

ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI) PARA LAS ROCAS METAMÓRFICAS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA		CONDICIONES DE LA SUPERFICIE				
<p>A partir de la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, seleccionar el intervalo apropiado de esta gráfica. Estimar el valor promedio del Índice de Resistencia Geológica (GSI) de dicho intervalo. No intentar ser tan preciso. Escoger un rango de GSI de 36 a 42, es más aceptable que fijar un GSI = 38. También es importante reconocer que el criterio de Hoek-Brown debería ser aplicado solamente en macizos rocosos donde el tamaño de los bloques individuales es aproximadamente mayor a un cuarto de la dimensión de la excavación, generalmente la falla estaría controlada por la estructura y el criterio de Hoek-Brown no debería ser utilizado.</p>		MUY BUENA Rugosa, superficies cerradas sin meteorización.	BUENA Rugosa, ligeramente meteorizada, abertura < 1 mm, rellenos duros.	MEDIA Plana, moderadamente meteorizada, abertura 1-5 mm, rellenos duros y blandos	MALA Espejos de falla, superficies muy meteorizadas con abertura > 5 mm, predominan los rellenos blandos	MUY MALA Espejos de falla, superficies muy meteorizadas y abiertas con rellenos blandos
		DISMINUCIÓN EN CALIDAD DE SUPERFICIE →				
ESTRUCTURA	AUMENTO EN LA PRESENCIA DE ROCAS FOLIADAS ↓					
 <p>INTACTA O MASIVA - macizo rocoso con pocas discontinuidades, carentes de planos de foliación. Ej.: Cuarzitas, anfíbolitas o mármoles.</p>	90	80	N / A	N / A	N / A	
 <p>POCO FOLIADA - macizo rocoso parcialmente fracturado con hasta tres sistemas de discontinuidades. Puede contener intercalaciones delgadas de rocas foliadas. Ej.: Cuarzita fracturada intercalada ocasionalmente con esquistos y/o filitas.</p>	70	60	N / A	N / A	N / A	
 <p>MODERADAMENTE FOLIADA - macizo rocoso fracturado constituido por intercalaciones de rocas foliadas y no foliadas en proporciones semejantes. Ej.: Intercalaciones de esquistos y/o filitas con mármoles fracturados en proporción similar.</p>	50	40	N / A	N / A	N / A	
 <p>FOLIADA - macizo rocoso plegado y/o fallado, muy fracturado, donde predominan las rocas foliadas, con ocasionales intercalaciones de rocas no foliadas. Ej.: Esquistos y/o filitas muy fracturadas intercaladas ocasionalmente con mármoles lenticulares.</p>	30	20	N / A	N / A	N / A	
 <p>MUY FOLIADA - macizo rocoso plegado, altamente fracturado, constituido únicamente por rocas muy foliadas. Ej.: Esquistos y/o filitas muy fracturadas sin la presencia de mármoles, gneises o cuarzitas.</p>	10	5	N / A	N / A	N / A	
 <p>BRECHADA/CIZALLADA - macizo rocoso muy plegado, alterado tectónicamente, con aspecto brechoide. Ej.: BBrecha de falla o zona influenciada por fallas cercanas.</p>	N / A	N / A	N / A	N / A	N / A	

Fig 45 Clasificación según el índice de resistencia geológica, GSI (modificado de TRUZMAN, 1999)

### Clasificación de Barton de parámetro Q

El parámetro Q o calidad de macizo rocoso (Rock Mass Quality), es el resultado del sistema de clasificación propuesto por Barton y otros investigadores en 1974, y está definido por la siguiente expresión algebraica:

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

En la que cada uno de esos valores corresponden a los siguientes parámetros necesarios para la clasificación:

- Designación de calidad de roca o RQD (Rock Quality Designation). Este es uno de los parámetros de mayor importancia en cualquier clasificación geomecánica, la cual según la norma ASTM 6032-96 se determina de la siguiente manera:

$$RQD = \frac{\sum \text{Longitud de los núcleos de roca recuperados de tamaños } > 10 \text{ cm}}{\text{Longitud total de la perforación}} \times 100$$

Esta ecuación se toma para los casos en que es posible recuperar núcleos de roca mediante perforaciones, lo cual no fue posible durante este estudio, por lo que se recurrió como medida alterna a calcularlo a partir del índice de control volumétrico de diaclasas ( $J_v$ ), definido como la suma del número de diaclasas por metro cúbico, para cada sistema presente en el macizo, es decir:  $J_v = \sum J_v S_i$ , donde  $i=1, 2, 3, \dots$ , que representa el número de discontinuidades presentes por metro cúbico para cada sistema de diaclasas presentes en el macizo. La fórmula que relaciona este parámetro con el RQD es la siguiente:

$$RQD = 115 - 3,3 \times (J_v)$$

Si bien este es un valor menos directo que cualquier estimado a partir de perforaciones, es totalmente válido para servir de dato de entrada de los sistemas de clasificaciones explicadas.

- Índice de diaclasado ( $J_n$ )
- Índice de rugosidad ( $J_r$ )
- Índice de alteración ( $J_a$ )
- Factor de reducción por presencia de agua ( $J_w$ )
- Factor de reducción de esfuerzos o SRF (Stress Reduction Factor)

Cada uno de estos parámetros se determina a partir de las descripciones que se ajusten a los datos tomados en campo que están relacionados con un valor específico. Dichos valores se desglosan en la Tabla 26

#### Clasificación geomecánica de Bieniawski de parámetro RMR (Rock Mass Rating):

Esta sistema de catalogación, desarrollado en 1973 y luego modificado en 1989, define al RMR o clasificación de macizo rocoso, como la sumatoria de puntos obtenidos a partir de seis parámetros a ser evaluados:

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta o índice de carga puntual.
- El valor del RQD o designación de calidad de roca, que puede ser calculado como se explicó anteriormente.
- El espaciamiento entre las discontinuidades.
- Las características de esas mismas discontinuidades.
- La condición de aguas subterráneas.
- Finalmente se realiza una corrección en base a la orientación de las discontinuidades.

**Tabla 26** Estimación de parámetros que intervienen en el índice Q

Índice de diaclasado (Jv)		Índice de rugosidad (Jr)		
Roca masiva	0,5 - 1,0	Diaclasas rellenas		1
una familia de diaclasas	2	Diaclasa limpias		
Id. Con otras diaclasas ocasionales	3	- Discontinuas		4
Dos familias de diaclasas	4	- Onduladas, rugosas		3
Id. Con otras diaclasas ocasionales	6	- Onduladas, lisas		2
Tres familias de diaclasas	9	- Planas, rugosas		1,5
Id. Con otras diaclasas ocasionales	12	- Planas, lisas		1
Cuatro o más familias, roca muy fracturada	15	Lisos o espejos de falla		
Roca triturada	20	- Ondulados		1,5
		- Planos		0,5
Índice de alteración (Ja)		Coeficiente reductor de la presencia de agua (Jw)		Presión de agua (Kg/cm <sup>2</sup> )
Diaclasas de paredes sanas	0,75 - 1	Excavaciones secas o con <5 l/min localmente	1	<1
Ligera alteración	2	Afluencia media con lavado de algunas diaclasas	0,66	1 - 2,5
Alteraciones arcillosas	4		0,5	2,5 - 10
Con detritus arenosos	4	Afluencia importante por diaclasas limpias		
Con detritus arcillosos preconsolidados	6	Id. Con deslavado de diaclasas	0,33	2,5 - 10
Id. Poco consolidados	8	Afluencia excepcional inicial, decreciente con el tiempo	0,2 - 0,1	>10
Id. Expansivos	8 - 12	Id. Mantenido	0,1 - 0,05	>10
Milonitos de roca y arcilla	6 - 12			
Milonitos de arcilla limosa	5			
Milonitos arcillosos gruesos	10 - 12			
Parámetro SRF				
<i>Zonas débiles:</i>				
Multitud de zonas débiles o milonitos				10
Zonas débiles aisladas, con arcilla o roca descompuesta (cobertura <50 m)				5
Id. Con coberturas >50 m				2,5
Abundantes zonas débiles en roca competente				7,5
Zonas débiles aisladas en roca competente (c. <50 m)				5
Id. Con coberturas >50 m				2,5
Terreno en bloques muy fracturados				5
<i>Roca competente:</i>				
Pequeña cobertura				2,5
Cobertura media				1
Gran cobertura				0,5 - 2
<i>Terreno fluyente:</i>				
Con bajas presiones				5 - 10
Con altas presiones				10 - 20
<i>Terreno expansivo:</i>				
Con presión de de hinchamiento moderada				5 - 10
Con presión de hinchamiento alta				10 - 15

Esta clasificación tiene un rango de valores que van de 3 a 100 puntos, que han sido agrupados en cinco calidades de macizos rocosos y necesidades de sostenimiento para cada caso, así como también provee información general de valores aproximados de los ángulos de fricción de la roca, como de la cohesión. A continuación se presenta la Tabla 27 donde están descritos los parámetros y el puntaje correspondiente a cada característica.

Es importante mencionar que se ha propuesto una equivalencia entre el sistema de clasificación de Hoek (GSI) y el de Bieniawski (RMR), al considerar este último en su condición seca y sustrayéndole cinco (5) puntos, es decir:  $GSI \cong RMR_{seco} - 5$

Esta expresión permite comparar los resultados de los sistemas de clasificación para coherencia de los resultados obtenidos. A su vez, existe una correlación gráfica entre el RMR y el parámetro Q como lo muestra la Figura 46. En ella se selecciona la línea central, pero en el caso de disponer de los dos valores, se considera la recta más cercana a los mismos.



**Fig 46** Correlación entre el parámetro Q y el RMR



**Tabla 27.** Clasificación según el RMR (modificado de ASTM 2002)

A- CLASIFICACION DE LOS PARAMETROS Y SU EVALUACION									
Parámetro		Escala de valores							
1	Resistencia a la compresión de la roca intacta	Índice de carga puntual	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Para esta escala tan baja se prefiere el ensayo de resistencia a la compresión uniaxial		
		Resistencia a la compresión uniaxial	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
Valuación		15	12	7	4	2	1	0	
2	Índice de calidad de la roca, RQD		90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25 %		
		Valuación	20	17	13	8	3		
3	Espaciamientos de las discontinuidades		> 2 m	0,6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
		Valuación	20	15	10	8	5		
4	Condición de las discontinuidades		Superficies muy rugosas. Sin continuidad. Sin separación. Paredes de roca no meteorizadas.	Superficies ligeramente rugosas. Separación < 1 mm. Paredes de roca ligeramente meteorizadas.	Superficies ligeramente rugosas. Separación < 1 mm. Paredes de roca fuertemente meteorizadas.	Superficies pulidas o, relleno < 5 mm o, separación entre 1 - 5 mm. Superficies continuas.	Relleno blando de espesor > 5 mm o, Separación > 5 mm. Superficies continuas.		
		Valuación	30	25	20	10	0		
5	Agua subterránea	Flujo interno por cada 10 m de longitud de la excavación	Ninguna	< 10 lt/min	10 - 25 lt/min	25 - 125 lt/min	> 125 lt/min		
		Relación $\frac{\text{Presión de agua en la discontinuidad}}{\text{Esfuerzo principal (mejor)}}$	0	0,0 - 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
	Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteando	Fluyendo			
	Valuación	15	10	7	4	0			
B- AJUSTE EN LA EVALUACION POR ORIENTACION DE LAS DISCONTINUIDADES									
Rumbo y buzamiento de las discontinuidades		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable			
Valuación	Túneles	0	- 2	- 5	- 10	- 12			
	Fundaciones	0	- 2	- 7	- 15	- 25			
	Taludes	0	- 5	- 25	- 50	- 60			
C- CLASIFICACION DE LA ROCA SEGUN EL TOTAL DE LA VALUACION									
Valuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20				
Número de Clasificación	I	II	III	IV	V				
Descripción	Roca muy buena	Roca buena	Roca regular	Roca mala	Roca muy mala				
D- SIGNIFICADO DE LA CLASIFICACION DE LA ROCA									
Número de Clasificación	I	II	III	IV	V				
Tiempo de medio de sostenimiento	10 años para un claro de 5 m	6 meses para un claro de 5 m	1 semana para un claro de 5 m	10 horas para un claro de 2,5 m	30 minutos para un claro de 1 m				
Cohesión de la roca	> 400 kPa	300 - 400 kPa	200 - 300 kPa	100 - 200 kPa	< 100 kPa				
Ángulo de fricción de la roca	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°				
EFECTO DEL RUMBO Y BUZAMIENTO DE LAS DISCONTINUIDADES									
Rumbo perpendicular al eje del tunel									
Penetración en el sentido del buzamiento				Penetración en el sentido contrario del buzamiento					
Buzamiento entre 45° - 90°		Buzamiento entre 20° - 45°		Buzamiento entre 45° - 90°		Buzamiento entre 20° - 45°			
Muy favorable		Favorable		Regular		Desfavorable			
Rumbo paralelo al eje del tunel									
Buzamiento entre 20° - 45°		Buzamiento entre 45° - 90°		Rumbo independiente					
Regular		Muy desfavorable		Buzamiento entre 0° - 20°					
				Regular					

## 8.2. Datos de campo

### 8.2.1. Datos geomecánicos o geotécnicos

A continuación se presenta una serie de tablas con los datos recolectados en campo a fin de ser utilizados en la caracterización geomecánica. Cada tabla reporta las discontinuidades medidas, en cada talud ubicado en el tramo III de la Autopista de Rómulo Betancourt.

**Tabla 28** Discontinuidades medidas en el talud entre las progresiva 1+420 a la 2+060

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
<b>TALUD</b>		<b>W E 45 N</b>
Foliación	FO1	N 45 W 10 N
Diaclasa	D1	N 60 W 75 S
Foliación	FO2	N 60 W 20 N
Diaclasa	D2	N 70 W 85 S
Foliación	FO3	N 55 W 10 N
Diaclasa	D3	N 80 W 85 N
Diaclasa	D4	N 70 W 85 S
Foliación	FO4	N 65 W 10 N
Foliación	FO5	N 10 W 5 N
Diaclasa	D5	N 80 W 90 N
Diaclasa	D6	N 40 E 80 N
Diaclasa	D7	N 75 W 80 S
Diaclasa	D8	N 30 E 80 N
Foliación	FO6	N 10 W 15 N
Foliación	FO7	N 40 E 15 N
Diaclasa	D9	N 70 W 85 S
Foliación	FO8	N 15 W 20 N
Diaclasa	D10	N 5 E 65 N
Diaclasa	D11	N 75 W 70 N
Foliación	FO9	N 30 W 20 N
Falla	FA1	N 10 W 80 S
Diaclasa	D12	E W 90
Foliación	FO10	N 15 W 15 N
Foliación	FO11	N 10 E 15 S
Foliación	FO12	N 15 W 10 N
Diaclasa	D13	N 65 W 60 N
Diaclasa	D14	N 65 E 80 N
Diaclasa	D15	N 75 E 85 N
Foliación	FO13	N 20 E 20 N
Foliación	FO14	N 15 W 25 S
Foliación	FO15	N 35 W 15 N
Diaclasa	D16	N 70 W 85 N
Diaclasa	D17	N 75 W 80 N
Foliación	FO16	N 40 W 5 N
Foliación	FO17	N 35 W 10 N
Diaclasa	D18	N 80 W 85 S
Diaclasa	D19	N 75 W 90
Diaclasa	D20	N 80 W 80 S
Diaclasa	D21	N 70 W 85 S
Diaclasa	D22	N 75 W 80 S
Diaclasa	D23	N 70 W 80 S
Diaclasa	D24	E W 80 N
Diaclasa	D25	N 70 W 90
Foliación	FO18	N 40 W 30 N
Falla	Fa2	N 40 W 60 N
Foliación	FO19	N 66 W 30 N
Diaclasa	D26	N 70 W 70 N

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
Diaclasa	D27	N 85 W 70 N
Diaclasa	D28	N 70 E 85 N

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
Diaclasa	D29	N 70 W 85 N
Diaclasa	D30	N 70 W 90

**Tabla 29** Discontinuidades medidas en el talud entre las progresiva 2+180 a la 2+860  
(Levantamiento desde el este-2+8609)

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
Foliación	Fo1	N25E34S
Foliación	Fo2	N30E50S
Foliación	Fo3	N45E39S
Falla	Fa1	Horizontal
Falla	Fa2	N30E70S
Foliación	Fo4	N36E76S
Falla	Fa3	N30E82N
Falla	Fa4	N10E50S
Foliación	Fo5	N45E34S
Falla	Fa5	N40E24N
Falla	Fa6	N5E55N
Falla	Fa7	N85W20N
Foliación	Fo6	N5E37S
Budín	B3	N32E15S
Foliación	Fo7	N10E25S
Foliación	Fo8	N5W30S
Diaclasa	D1	N45W57N
Diaclasa	D2	N80E21N
Falla	Fa8	N7E10S
Diaclasa	D3	N60W78N
Falla	Fa9	N5E40N
Foliación	Fo9	E-W25S
Foliación	Fo10	N23E33S
Diaclasa	D4	N10E48N
Diaclasa	D5	E-W80N
Falla	Fa10	N22E63N
Falla	Fa11	N57E35N
Foliación	Fo11	N22E40S
Falla	Fa12	N20W56S
<b>2° Berma al este y parte alta del talud 3° y 4° berma</b>		
<b>TALUD</b>		<b>N30W45N</b>
Falla	Fa13	N20E50S
Falla	Fa14	N75E14N

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
Foliación	Fo12	N23E46S
Falla	Fa15	N72W34N
Falla	Fa16	N25E45S
Foliación	Fo13	N-S35E
Falla	Fa17	N25E50S
Falla	Fa18	N42E20N
Diaclasa	D6	N31W54S N17W57S N55E60S
Diaclasa	D7	N75W 90 N57E44N
Foliación	Fo14	N10E20S
Foliación	Fo15	N80E55S
Falla	Fa20	N32E43S
<b>2° Berma al norte del derrumbe</b>		
Hasta este punto, el talud tiene orientación N25W55N		
Diaclasa	D8	N5E 90
Foliación	Fo16	N30E32S
Falla	Fa21	N20W85S
Estría de falla		45S
Falla	Fa21'	N-S55 E
Foliación	Fo17	N55E44S
Falla	Fa22	N42E40S
Falla	Fa23	N25E72S
Falla	Fa24	N25W35S
Falla	Fa25	N36E60S
Foliación	Fo18	N17E41S
Falla	Fa26	N10W42S
Falla	Fa27	N15E50S
Falla	Fa28	N14E54S
Foliación	Fo19	N35E21S
Diaclasa	D9	N55E77N

E	N	O
Falla	Fa30	N15W40S
Talud		N37W55N
Falla	Fa31	N27E63S
Diaclasa	D10	N65W90
Diaclasa	D11	N75W80N
Diaclasa	D12	N65W80N
Diaclasa	D13	N75W70N
Diaclasa	D14	N55W75N
Foliación	Fo20	N-S20E
Diaclasa	D15	N60W90
Diaclasa	D16	N80W70N
Diaclasa	D17	N10W85S
Diaclasa	D17'	N10W80S
Diaclasa	D18	N5W85S
Diaclasa	D19	N36W65N
Diaclasa	D20	N5E85S
Diaclasa	D18'	N-S70E

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
Diaclasa	D21	N10W55N
Diaclasa	D22	N10W90
Diaclasa	D23	N75W90
Diaclasa	D24	N70W85N
Diaclasa	D25	N75W85N
Foliación	Fo21	N45E45S
Falla	Fa32	N20E50N
Foliación	Fo22	N10W35S
Diaclasa	D26	N65W80S
<b>TALUD</b>		<b>N45W60N</b>
Diaclasa	D27	N45W90
Foliación	Fo23	N10E35S
Foliación	Fo24	N10E35S
Diaclasa	D28	N65W75N
Falla	Fa33	N36E60S
<b>TALUD</b>		<b>N45W45N</b>
Diaclasa	D29	N60W60N

**Tabla 30** Discontinuidades medidas en el talud entre las progresiva 3+300 a la 3+500

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
<b>TALUD</b>		<b>W-E 45 N</b>
Falla	FA1	N30W52S
Falla	FA2	N22W56S
Diaclasa	D1	N55E70N
Foliación	FO1	N80E44N
Diaclasa	D2	N41W65S
Falla	FA3	N03W45S
Foliación	FO2	N75E84S
Falla	FA4	N46W64S
Diaclasa	D3	Subparalela a FA4
Falla	FA5	N40E54N

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
Diaclasa	D4	Paralela a FA5
Falla	FA6	N10W75N
Diaclasa	D5	N5E72S
Foliación	FO3	N70E5S
Foliación	FO4	N75E80S
Falla	FA7	N42E42N
Falla	FA8	Subparalela FA7
Foliación	FO5	N65E50S
Diaclasa	D6	N20E84N
Foliación	FO6	N85E84S
Foliación	FO7	N55E50S

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
Foliación	FO8	N45E17N
Diaclasa	D7	N56W75N
Falla	FA9	N25E52S
Falla	FA10	N5W37N
Foliación	FO9	E-W90
Diaclasa	D8	N10W43N
Foliación	FO10	N80E21N
Foliación	FO11	N75W59N
Foliación	FO12	Subparalelo a FO11
Falla	FA11	N14E46S
Falla	FA12	N15E45S
Falla	FA13	N20W

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
Falla	FA14	N58W58S
Foliación	FO13	N60E81S
Foliación	FO14	N60E90
Foliación	FO15	N40E68N
Foliación	FO16	N26W21N
Foliación	FO17	N17E44N
Foliación	FO18	N10W45S
Diaclasa	D9	N10W51S
Falla	FA15	N25W82N
Foliación	FO19	N60E86S
Foliación	FO20	N15E47S

**Tabla 31** Discontinuidades medidas en el talud entre las progresiva 3+900 a la 4+100

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
<b>TALUD</b>		<b>N 75 E 50 N</b>
Foliación	FO1	N 60 W 20 S
Diaclasa	D1	N 5 E 70 S
Diaclasa	D2	N 80 E 45 S
Diaclasa	D3	N 20 W 65 S
Diaclasa	D4	N 45 W 30 N
Foliación	FO2	N 80 W 30 S
Diaclasa	D5	N 80 E 55 N
Diaclasa	D6	N 75 W 65 N
Foliación	FO3	N 85 E 20 S
Diaclasa	D7	N 15 E 50 N
Diaclasa	D8	N 80 E 50 N
Diaclasa	D10	N 75 W 80 N

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
Foliación	FO4	N 50 E 30 S
Diaclasa	D11	N 75 W 80 N
Foliación	FO5	N 40 E 20 S
Diaclasa	D12	N 75 W 85 N
Foliación	FO6	N 25 E 20 S
Diaclasa	D13	N 85 W 65 N
Diaclasa	D14	N 55 W 90 N
Foliación	FO7	N 40 E 35 S
Diaclasa	D15	N 80 E 70 N
Diaclasa	D16	N 70 E 70 S
Foliación	Fo8	N 70 E 45 S
Diaclasa	D17	N 85 W 70 N
Diaclasa	D18	N 55 W 90

E	N	O
Diaclasa	D19	N 55 W 75 N
Foliación	Fo9	N 60 E 10 N
Diaclasa	D20	N 15 W 80 N
Diaclasa	D21	N 85 E 60 N
Diaclasa	D22	N 10 W 65 S
Foliación	Fo10	N 75 E 60 S
Diaclasa	D23	N 80 W 50 N
Diaclasa	D24	N 45 W 85 N
Diaclasa	D25	N 55 W 85 N
Diaclasa	D26	N 75 E 70 N
Diaclasa	D27	N 60 E 70 N
Foliación	Fo11	N 60 E 30 S
Diaclasa	D28	N 80 W 75 N
Diaclasa	D29	N 5 E 80 N
Foliación	Fo12	N 70 E 20 S
Diaclasa	D30	N 80 W 75 N
Diaclasa	D31	N 85 W 80 N
Foliación	Fo13	N 85 W 80 N

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
Diaclasa	D32	N 5 W 65 S
Diaclasa	D33	N 50 W 45 N
<b>TALUD ALTO</b>		<b>N 70 E 50 N</b>
Foliación	Fo14	N 70 E 30 S
Diaclasa	D34	N 65 E 70 S
Diaclasa	D35	N 30 W 80 S
Diaclasa	D36	N 10 E 75 S
Diaclasa	D37	N 55 W 40 N
Diaclasa	D38	N 55 W 60 N
Diaclasa	D39	N 30 E 50 N
Diaclasa	D40	N 60 W 65 N
Diaclasa	D41	N 55 E 80 N
Diaclasa	D42	N 60 E 70 S
Diaclasa	D43	N 40 W 80 N
Diaclasa	D44	N 70 W 85 S
Diaclasa	D45	N 10 W 75 S

**Tabla 32** Discontinuidades medidas en el talud entre las progresiva 4+380 a la 4+480

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
<b>TALUD</b>		<b>N 75 W 45 N</b>
Falla	FA1	N 40 E 45 N
Diaclasa	D1	N 75 E 85 N
Foliación	FO1	N 60 E 40 S
Diaclasa	D2	N 20 W 65 N
Diaclasa	D3	E W 65 N
Foliación	FO2	N 65 W 35 S
Diaclasa	D4	N 25 W 55 N
Diaclasa	D5	N 30 W 60 N
Falla	FA2	N 40 W 55 S
Falla	FA3	N 30 W 75 N
Diaclasa	D6	N 35 W 50 N
Diaclasa	D7	N 30 W 70 N
Diaclasa	D8	N 80 E 75 N
Diaclasa	D9	N 30 W 45 S
Falla	FA4	N S 20 W
Diaclasa	D10	N 75 W 65 N
Diaclasa	D11	N 10 W 60 N

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
Diaclasa	D12	N 20 W 65 N
Falla	FA5	N 5 E 40 S
Falla	FA6	N 45 E 60 S
Foliación	FO3	N 40 E 5 N
Falla	FA7	N 55 W 55 S
Falla	FA8	N 5 W 70 N
Falla	FA9	N 10 W 45 N
Foliación	FO4	N 20 E 5 S
Diaclasa	D12	N 10 E 70 N
Diaclasa	D13	N 25 W 70 N
Falla	FA10	N S 55 W
Falla	FA11	N 30 E 30 S
Falla	FA12	N 45 E 35 N
Foliación	FO5	N 85 W 30 S
Foliación	FO6	N 70 W 45 S
Diaclasa	D14	N 25 W 50 N
Diaclasa	D15	N 70 E 55 N
Falla	FA13	N 10 E 50 S

E	N	O
Diaclasa	D16	N 20 W 65 N
Diaclasa	D17	N 40 W 85 N
Falla	FA14	N 35 W 65 S
Foliación	FO7	E W 30 S
Falla	FA15	N 80 W 45 S
Falla	FA16	N 40 E 80 S

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
Falla	FA17	N 55 W 80 S
Foliación	FO8	N 45 W 30 S
Diaclasa	D18	N 35 E 80 S
Diaclasa	D19	N 25 W 60 N
Diaclasa	D20	N 40 W 55 N

**Tabla 33** Discontinuidades medidas en el talud entre las progresiva 4+820 a la 5+160

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
<b>1° Sección. Orientación del talud: N85W40N</b>		
Foliación	Fo1	N 60 E 90 S
Falla	Fa1	N 60 W 80 S
Foliación	Fo2	E W 80 S
Foliación	Fo3	N 80 W 60 S
Falla	Fa2	N 5 W 60 S
Falla	Fa3	N 10 W 70 S
Falla	Fa4	N 30 W 70 S
Foliación	Fo4	N 85 E 75 S
Pliegue	P1	N 25 W 70 S
Pliege	P2	N 10 E 15 S
Foliación	Fo5	N 85 W 85 S
Pliegue	P3	N 75 W 10 S
Foliación	Fo6	N 5 W 25 S
Diaclasa	D1	N 30 W 80 S
Diaclasa	D2	N 55 E 85 S
Falla	Fa5	N 25 E 50 S
Diaclasa	D3	N 40 W 80 N
Diaclasa	D4	N 85 W 85 S
Diaclasa	D5	N 55 W 85 S
Diaclasa	D7	N 45 W 70 N
Foliación	Fo7	N 75 W 40 N
Foliación	Fo8	N 15 E 30 S
Diaclasa	D8	N 20 W 75 N
Falla	Fa6	N 40 E 70 S
Foliación	Fo9	N 65 E 75 S
<b>2° Sección. Orientación del talud: N75W40N</b>		
Falla	Fa7	N 20 W 60 S
Foliación	Fo10	N 10 W 30 N

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN
Foliación	Fo11	N 70 E 5 N
Foliación	Fo12	N 45 W 20 S
Foliación	Fo13	N 50 W 15 S
Diaclasa	D9	N 80 W 85 N
Diaclasa	D10	N 35 W 70 N
Diaclasa	D11	N 35 E 70 N
Diaclasa	D12	N 75 W 60 N
Diaclasa	D13	N 30 E 70 N
Diaclasa	D14	N 30 W 70 N
Diaclasa	D15	N 80 W 70 N
Foliación	Fo14	N 40 E 25 S
Diaclasa	D16	N 45 E 65 N
Diaclasa	D17	N 20 E 70 N
Falla	Fa8	N 45 E 90 S
Falla	Fa9	N 45 E 55 S
Diaclasa	D18	N 70 E 80 N
Diaclasa	D19	N 75 W 60 N
Diaclasa	D20	N 80 W 80 S
Diaclasa	D21	N 25 E 90 S
Diaclasa	D22	N 60 E 65 N
Diaclasa	D23	N 25 E 80 N
Foliación	Fo15	N 40 E 30 N
Foliación	Fo16	N 30 E 35 N
Diaclasa	D24	N 15 E 75 S
<b>3° Sección. Orientación del talud: N65W45N</b>		
Foliación	Fo17	N 60 W 55 S
Falla	Fa10	N 15 E 40 N
Diaclasa	D25	N 70 W 70 N
Falla	Fa11	N 25 W 55 N

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN				
Diaclasa	D26	N	25	E	15	N
Diaclasa	D27	N	20	E	70	S
<b>4° Sección. Orientación del talud: N50W45N</b>						
Falla	Fa12	N	30	E	60	S
Foliación	Fo18	N	85	W	70	S

ESTRUCTURA	NOMENCLATURA	ORIENTACIÓN				
Diaclasa	D28	N	30	W	70	S
Diaclasa	D29		E	W	40	N
Diaclasa	D30	N	80	E	30	N
Diaclasa	D31	N	35	W	85	S
Diaclasa	D32	N	45	W	80	S
Diaclasa	D33	N	10	W	60	N



### 8.2.2. Ventanas de descripción geológica

A continuación se presenta cuadros que contienen la información registrada en campo para cada una de las estaciones. En la versión digital de este trabajo se incluye todas las fotos tomadas en cada estación.

<b>ESTACIÓN: MI-1</b>	COORDENADAS 1141629N 783761 E	UNIDAD: D
Plano de observación: Sub- horizontal		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: no se determinó		PLIEGUES: No se observa
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Filita grafitosa con pequeños niveles de calcita o mármol de muy poco espesor.		60%(filita)+20%(niveles de calcita)
B: Vetas de calcita que cortan perpendicularmente a la foliación, y otras embebidas lenticularmente en la foliación. Orientación de las vetas (N 20 E 85 S). Estas vetas están desplazadas 2 cm en sentido sinextral hacia el S 70 E.		20%
MUESTRAS:		
FOTOS: General (N 70 W 80 S)		

<b>ESTACIÓN: MI-2</b>	COORDENADAS 1142736N 783628 E	UNIDAD: D
Plano de observación: N 35 W 75 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: E-W 85 S (limbo 1), N 20 W 15 S (limbo 2).		PLIEGUES: un pliegue bastante grande que condiciona las orientaciones principales de la foliación, simétrico, AIL (40 -35°), eje (N50 W 45 NW). Megacrenulaciones (N 85 E SW).
DIACLASAS: N-S 90, N 10 E 75 S, N 5 E 40 S		FALLAS: ubicadas perpendicularmente a la foliación (E-W 50 N)
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso de color negro, con megacrenulaciones. (HCl +)		70%
B: Vetas abundantes de calcita.		30%
MUESTRAS: MI 6B (Core drill), MI 6C (en el galpón)		
FOTOS: General (N 80 E- SW), detalle de megacrenulaciones (N 85 E SW)		

<b>ESTACIÓN: MI-3</b>	COORDENADAS 1142767N 783603 E	UNIDAD: D
Plano de observación: N 30 W 25 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 65 W 60 N		PLIEGUES: No se observan
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>

A: Esquisto grafitoso color negro, de textura lisa, aunque a veces es más áspera. Tiene marcada foliación, aunque no tan fina como se ha reportado anteriormente en otros casos. No micas. (HCl+).	80%
B: Niveles de cuarzo embebidas en la foliación, alargadas y discontinuas, de alta frecuencia, distribución heterogénea. De espesor variable. (desde los 5 cm a los 2 mm). (HCl-)	10%
C: Budín de metarenisca gruesa de granos visibles, color gris a blanco. Interfoliado sin vetas ni estructuras internas. Es el único. (HCl-)	5%
D: Budín alargado de color negro con minerales blancos adentro. Pareciera un budín de esquisto dentro del esquisto. (HCl-). Unico.	1%
E: Metarenisca color negro, a veces asociado con vetas de cuarzo. Forman pequeños budines alargados y discontinuos.	4%
MUESTRAS:	
FOTOS: General (S 40 W 40 SW), detalle de D (S 45 W 60 SW), detalle de E (S 30 W 70 SW).	

<b>ESTACIÓN: MI-4</b>	COORDENADAS 1143353N 783384 E	UNIDAD: D
Plano de observación: N 45 W 50 N		
ESTRUCTURAS		
FOLIACIÓN: N 65 W 45 S	PLIEGUES: No se observan	
LITOLOGÍAS		PROPORCIÓN
A: Filita grafitosa color negro, de textura algo áspera, marcada foliación. Sin presencia de budines.	80%	
B: Niveles de calcita interfoliados de capas finas que llegan hasta 1– 1,5 cm de espesor. Su frecuencia es alta (cada 4 cm ) y en algunas zonas donde son más delgadas, cada centímetro. Tienen forma continua sin formar budines	20%	
MUESTRAS:		
FOTOS: General (S 30 W)		

<b>ESTACIÓN: MI-5</b>	COORDENADAS 1143385N 783304 E	UNIDAD: D
Plano de observación: N 75 W 45 N		
ESTRUCTURAS		
FOLIACIÓN:	PLIEGUES: No se observan	
LITOLOGÍAS		PROPORCIÓN
A: Esquisto grafitoso de color negro (HCl+). No tiene una foliación muy marcada, de textura áspera. Aumenta la proporción y deja de tener esa apariencia de secuencia estratigráfica. Poco deformado.	60%	
B: Cuerpo de mármol en forma ovoide o alargados, discontinuos y muy distribuidos a lo largo de la sección. interfoliados	30%	
C: Metarenisca de color negro, (HCl-) con vetas de calcita que no cortan la foliación. Distribución minoritariamente en budines elipsoidales interfoliados de tamaño 5 x 3 cm.	10%	
MUESTRAS:		
FOTOS: General (S 20 W), detalle (S 10 W)		

<b>ESTACIÓN: MI-6</b>	COORDENADAS 1143402N 783174 E	UNIDAD: D
Plano de observación: E - W 45 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: E - W 60 S	PLIEGUES: No se observan.	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Filita esquistosa color negro, de marcada foliación, tacto áspero y apariencia aterciopelada. (HCl+). Se encuentra no en tan altas proporciones como en registros anteriores, sino interfoliada en cortos intervalos o niveles de 3cm de espesor con las otras litologías, dando la impresión de sucesión sedimentaria antes de su deformación. En algunas zonas toma una apariencia más arenácea y menos foliada, dicho cambio de textura es transicional, sin límites definidos.		50%
B: Delgados niveles de mármol , interfoliados, de colores veteados que van del blanco al gris claro. Son cuerpos alargados y discontinuos. Son algo comunes		10%
C: Nivel de mármol de 20 cm de espesor, continuo, y paralelo a la foliación, con vetas internas de calcita que no cortan la foliación.		25%
D: Escasos niveles de metarenisca de color negro, (HCl+), con vetas de calcita de forma transversal a la foliación. Su presencia es muy baja y forma budines pequeños de 5 x 10 cm los más grandes y alargados. Se encuentran dispuesto interfoliadamente.		15%
MUESTRAS:		
FOTOS: General (S 10 W), detalle de la interacción de lo niveles litológicos (S 56)		

<b>ESTACIÓN: MI-7</b>	COORDENADAS 1143408N 783162 E	UNIDAD: D
Plano de observación: N 75 E 40 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: Fo1: N 75 W 80 S Fo2: N 60 E 82 S Fo3: N 85 E 60 S	PLIEGUES: Se observa una deformación media en la roca, sobre todo en los niveles de mármoles, tanto los independientes, como los interfoliados.	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Filita esquistosa color negro, de marcada foliación, tacto áspero y apariencia aterciopelada. (HCl+). Se encuentra no en tan altas proporciones como en registros anteriores, sino interfoliada en cortos intervalos o niveles de 3cm de espesor con las otras litologías, dando la impresión de sucesión sedimentaria antes de su deformación. En algunas zonas toma una apariencia más arenácea y menos foliada, dicho cambio de textura es transicional, sin límites definidos.		50%

B: Metarenisca gris a gris oscuro, compacta con límites bien definidos, presentan una estructura interna algo laminada (o foliada?). Forman niveles continuos a lo largo de la foliación, de poco espesor (3 – 4 cm). Algunos presentan en su interior vetas de calcita, de forma irregular, la mayoría sin cortar la foliación y otras si lo hacen. (HCl+).	40%
C: Delgados niveles de mármol , interfoliados, de colores veteados que van del blanco al gris claro. Son cuerpos alargados y continuos. Son algo comunes	10%
MUESTRAS:	
FOTOS: General (S 15 E), se tomó otra perpendicular al plano de observación que no cubre toda la ventana (S 15 E 55 SE).	

<b>ESTACIÓN: MI-8</b>	COORDENADAS 1143386N 782805E	UNIDAD: C
Plano de observación: N-S 50 E		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: dirección variante. Viene dada por la orientación de los limbos del pliegue.	PLIEGUES: se observa plegamientos muy suaves, simétricos, suavemente inclinados. Dado lo difícil de medir el eje, se midieron los planos de los limbos: L1:N 15 E 17 S L2:N 30 W 26 N L3:N 52 E 65 S. Se observan crenulaciones con buzamiento 12 NE. Otro pliegue presente al frente del afloramiento, de eje N 80 W 10 (SW) y limbos L1:N 75 W 10 S L2:N 85 W 80 S.	
FALLAS: se observan fallas que cortan los planos de los pliegues. Orientación de N 80 E 80 S		
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Filita esquistosa de color negro, de textura un poco áspera al tacto, pero manteniendo cierta suavidad, existen niveles de calcita embebidos a la foliación.		80%(filita)+20% (niveles de calcita)
MUESTRAS:		
FOTOS: General (S 85 W)		

<b>ESTACIÓN: MI-9</b>	COORDENADAS 1143394N 782764 E	UNIDAD: C
Plano de observación: N 75 W 40 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 85 W 55 S	PLIEGUES: no se observa, tampoco crenulaciones	
FALLAS: existen dos fallas cuyas trazas tienen respectivamente 50° con respecto a la horizontal. Están cerradas y presentan la siguiente orientación: falla 1 (N 25 E 55 S); falla 2 (N 40 W 50 S)		
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Filitas grafitosas color gris oscuro, áspera al tacto, en estado ligeramente meteorizada. El budín presenta en su interior vetas de calcita que cortan la foliación (HCl-).		70%
B: Budín de metarenisca color gris, de grano medio con vetas de calcita que cortan la foliación. (HCl-). Forma oval.		25%

C: Vetas de calcita, de espesor muy fino, cortando la foliación perpendicularmente. Existen otras vetas, algo más gruesas (1cm), embebidas en la foliación, pero mucho más escasas que las primeras mencionadas. Son poco frecuentes y de poca longitud.	5%
MUESTRAS:	
FOTOS: General (S 5 W)	

<b>ESTACIÓN: MI-10</b>	COORDENADAS 1143433N 782485 E	UNIDAD: C
Plano de observación: W - E 60 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 80 E 33 S	PLIEGUES: No se observan	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Filita grafitosa con una textura lisa. Marcada foliación, de color negro. Diaclasado (HCl-)	45%	
B: Metarenisca de color negro con vetas de calcita interfoliadas. De espesor 3 cm. Forman capas alargadas y continuas algo frecuentes (2:30 cm) con distribución homogénea. En muy escasos casos forman budines de gran tamaño, también interfoliados (40 cm x 1,5 m). Son más frecuentes los budines medianos (17 x 5 cm) también interfoliados.	20%	
C: Niveles de mármol interfoliados de espesor 5 mm y algunos transversales en las roca (1 mm). De alta frecuencia (cada 3 – 4 cm). Son de poca longitud (4 cm)	35%	
MUESTRAS:		
FOTOS:		

<b>ESTACIÓN: MI-11</b>	COORDENADAS 1143397N 782346 E	UNIDAD: C
Plano de observación: N 55 E 65 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 80 E 25 S	PLIEGUES: No se observan	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Filita grafitosa con una textura más foliada y más lisa	60%	
B: Metarenisca. Los budines grandes se hacen más escasos, en su lugar se convierten en pequeños “ojos” interfoliados, frecuentes.	35%	
C: Niveles de mármol que se encuentran alojados en las diaclasas de la filita	5%	
MUESTRAS:		
FOTOS:		

<b>ESTACIÓN: MI-12</b>	COORDENADAS 1143336N 782248 E	UNIDAD: C
Plano de observación: N 60 E 35 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 15 E 50 S	PLIEGUES: No se observan	

LITOLÓGÍAS	PROPORCIÓN
A: Filita grafitosa con marcada foliación. Color negro. Constituye la mayoría de la roca caja. Son muy marcados los planos de diaclasa donde se alojan la mayoría de las vetas de calcita transversales a la foliación. Lisa ala tacto (HCl-)	60%
B: Metarenisca de color negro a gris oscuro, formando budines grandes y algunas capas. Los budines son alargados y simétricos. Tienen vetas de calcita que no cortan la foliación. Distribución heterogénea.	25%
C: Niveles de mármol de espesores máximos de 5 cm. Capas de poca longitud, interfoliados, no continuos, aunque mantienen cierta linealidad. Son frecuentes	15%
MUESTRAS:	
FOTOS:	

<b>ESTACIÓN: MI-13</b>	COORDENADAS 1143270N 782080 E	UNIDAD: C
Plano de observación: N 80 E 80 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 75 E 65 S	PLIEGUES: No se observan	
LITOLÓGÍAS	PROPORCIÓN	
A: Esquisto grafitoso de color negro de textura áspera, foliación gruesa (HCl-).existen pequeños niveles interfoliados de calcita (2 mm) de baja frecuencia.	85%	
B: Budín de metarenisca, color gris oscuro a negro. A simple vista es algo masiva. En su interior existen vetas de calcita, sin orientación preferencial, que no corta la foliación. Tiene una forma alargada interfoliada, junto con pequeños budines. El budín principal tiene un tamaño de 17 x 50 cm.	15%	
MUESTRAS:		
FOTOS:		

<b>ESTACIÓN: MI-14</b>	COORDENADAS 1143212N 781811 E	UNIDAD: C
Plano de observación: En el suelo		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 70 E 77 S	PLIEGUES: No se observan	
LITOLÓGÍAS	PROPORCIÓN	
A: Esquisto grafitoso de color negro de textura áspera, se encuentra muy homogéneo sin presencia de budines o algún cuerpo interfoliado. (HCl-)	80%	
B: Metaconglomerado con inclusiones de rocas verdes	20%	
MUESTRAS:		
FOTOS: General hacia el piso.		

<b>ESTACIÓN: MI-15</b>	COORDENADAS 1143203N 781699 E	UNIDAD: C
Plano de observación: E - W 55 N		

ESTRUCTURAS	
FOLIACIÓN: N 70 E 45 S	PLIEGUES: No se observan
LITOLOGÍAS	PROPORCIÓN
A: Esquisto grafitoso de color negro de textura áspera, se encuentra muy homogéneo sin presencia de budines o algún cuerpo interfoliado. (HCl-)	80%
B: Metarenisca compacta y masiva de color negro a gris oscuro. (HCl-). Interfoliada en capas delgadas (2 cm) de relativa continuidad. Están distribuidas heterogéneamente, en secciones de relativa abundancia.	19%
C: Delgadas vetas de cuarzo que cortan la foliación. Poco espesor (hasta 5 mm) y de hasta 30 cm de largo	1%
MUESTRAS:	
FOTOS: General (Sur franco)	

ESTACIÓN: MI-16	COORDENADAS	UNIDAD: C
Plano de observación: N 22 W 55 N		
ESTRUCTURAS		
FOLIACIÓN: N 80 E 55 S	PLIEGUES: No se observan	
LITOLOGÍAS	PROPORCIÓN	
A: Budín de mármol , color fresco gris oscuro, grano medio con vetas de calcita perpendicular a la foliación circundante y está limitada por la foliación (no la corta). HCl+	13%	
B: Esquisto grafitoso color negro de marcada esquistosidad. Áspero al tacto. No hay presencia de pirita. HCl-	83%	
C: Metarenisca de grano fino color negro. Los granos no se observan a simple vista.	4%	
MUESTRAS		
FOTOS: General (N 70 E SW), budín, detalle (C)		

ESTACIÓN: MI-17	COORDENADAS	UNIDAD: C
Plano de observación: N 35 W 75 N		
ESTRUCTURAS		
FOLIACIÓN: N 70 E 30 S	PLIEGUES:	
LITOLOGÍAS	PROPORCIÓN	
A: Esquisto grafitoso de color negro, con marcada foliación que corta al budín. (HCl -). Existen gran cantidad de niveles de calcita interfoliadas.	55%	
B: Budín de metarenisca de color negro y grano fino (HCl+).	20%	
C: Budín de metarenisca con vetillas de calcita que no corta la foliación circundante y ubicadas perpendicularmente a la misma. De color gris, masiva sin granos observables a simple vista. Los budines forman cuerpos ovoides y discontinuos entre sí, siendo los más grandes escasos, pero los de tamaño medio (30 x 10 cm) más abundantes. Todos los budines son secantes con la foliación en sus extremos	5%	

D: Niveles de calcita embebidas en la foliación, de alta frecuencia (7:5 cm), delgadas (las más finas llegan a medir 1 mm o menos). Otra cantidad de niveles mucho menor, son discordantes a la foliación (aproximadamente a 45°), buzando en sentido contrario de la foliación, todas subparalelas entre ellas.	20%
MUESTRAS: MI 6B (Core drill), MI 6C (en el galpón)	
FOTOS: General (N 55 W -SW)	

<b>ESTACIÓN: MI-18</b>	COORDENADAS 1143677N 781175 E	UNIDAD: C
Plano de observación: N 40 W 60 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 35 E 20 S	PLIEGUES: solo micro pliegues disarmónicos de vetas de calcita	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Filitas grafitosas color negro (HCl-), marcada foliación, áspera al tacto. No se observa presencia de piritita.	75%	
B: Budín de metarenisca (o cuarcita) de color gris y grano medio, que corta la foliación circundante. (HCl+). Su interés es como posible indicador de cizalla, no como porcentaje de composición, ya que forma parte de un cuerpo de características minoritarias.	20%	
C: Vetas de calcita abundantes embebidas en la foliación de (A), la cuales tienen forma irregular (pliegues disarmónicos), con manchas de oxidación color naranja	5%	
MUESTRAS:		
FOTOS: General (S 10 W)		

<b>ESTACIÓN: MI-18'</b>	COORDENADAS 1143673N 781174 E	UNIDAD: C
Plano de observación: N 35 W 65 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 45 W 30 S	PLIEGUES: Crenulación sobre la foliación E-W 80 S	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso de color negro, con marcada esquistosidad con niveles de calcitas embebidas en la foliación. No se observan sombras de presión (HCl -)..	35%	
B: Metarenisca gruesa gris con vetas de calcita (HCl+) que no cortan la foliación y el meta conglomerado. Está constituida por budines transcisionales con el esquisto, sin embargo, si se marca la diferencia entre las dos litologías. Estos bloques forman cuerpos aislados, de mediano tamaño, distinguibles por sus vetas transversales y algo disarmónicas con respecto a la foliación. Son relativamente abundantes.	40%	



C: Niveles de calcita interfoliados. Color blanco. Estos niveles aunque forman unidades muy delgadas, de 3 a 5 mm de espesor, tienen una alta frecuencia dentro del afloramiento, llegando a haber aproximadamente 15 en 10 cm, lo que representa un alto porcentaje dentro del afloramiento. Mayormente son cuerpos alargados y discontinuos de 5 a 10 cm de longitud. Una muy pequeña proporción corta la foliación de forma disarmónica	25%
MUESTRAS:	
FOTOS: General (N 55 E -SW)	

<b>ESTACIÓN: MI-19</b>	COORDENADAS 1143703N 781146 E	UNIDAD: C
Plano de observación: N 22 W 55 N		
ESTRUCTURAS		
FOLIACIÓN: N 25 E 15 N	PLIEGUES: No se observan	
LITOLOGÍAS		PROPORCIÓN
A: Budines de metarenisca de grano fino color negro. forma lenticular uno y ovalado el otro (sección de 11 x 15 cm). HCl-. No se observan sombras de presión.	25%	
B: Esquistos grafitosos de color negro, de textura más lisa. Marcada foliación.	75%	
MUESTRAS		
FOTOS: General (N 70 E SW), detalle paralelo al cuerpo alargado (S 20 E 10 S)		

<b>ESTACIÓN: MI-20</b>	COORDENADAS 1143668N 781117 E	UNIDAD: C
Plano de observación: En el piso de una de las bermas		
ESTRUCTURAS		
FOLIACIÓN: no se pudo medir.	PLIEGUES: no se observa. Tampoco crenulaciones.	
LITOLOGÍAS		PROPORCIÓN
A: Esquisto grafitoso color negro. De foliación media (no se notan tanto los folios, es más masiva). Áspero al tacto. No se observan micas o algún otro mineral. (HCl-). No hay interfoliación de niveles de calcita, sin embargo alguna minoría de vetas de calcita llegan a cortar la foliación (son muy pocas, no se observan a simple vista).	65%	

B: Metarenisca a metaconglomerado? Color gris claro. (HCl-). Se observan algunos granos a simple vista, tanto de color blanco, como negros. Tiene algunas vetas de cuarzo que no cortan la foliación. Se dispone en un budín aislado que no forma parte de alguna capa de gran extensión. Sin embargo, tiene cierta frecuencia en variados tamaños, desde 30 cm, hasta 2 cm de ancho. Son alargados, no redondeados. En la parte superior es concordante con la foliación y en la inferior es discordante. Todos los demás budines más pequeños, son discordantes. En la parte superior, se distingue interestratificada y discordante con la foliación, pequeños niveles de arenisca, de espesores milimétricos distinguibles por su color (negro y gris).	20%
C: Metaconglomerado, de color oscuro, se pueden ver algunos granos.	10%
D: Metarenisca de grano muy fino color negro. No se observan los granos a simple vista. (HCl-). Se encuentra muy disperso en pequeños budines de no más de 2 cm de espeso, de forma alargada, interfoliada con el esquisto. Suelen distinguirse por la presencia de muy finas vetillas de cuarzo que no llegan a cortar la foliación. Se confunden mucho con la roca caja.	±15%
MUESTRAS: MI 18 B, MI 18C	
FOTOS: General (oeste), budines pequeños- general (S 50 W), budín más grande (S 10 W), budín más pequeño (S 85 W)	

<b>ESTACIÓN: MI-21</b>	COORDENADAS 1143788N 781024 E	UNIDAD: C
Plano de observación: N 65 W 45 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 45 W 20 S	PLIEGUES: Se observan ondulaciones sobre los planos de foliación correspondientes a crenulaciones. Su orientación es S 65 E.	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Metarenisca de grano medio color gris claro con vetas de calcita que no cortan la foliación. La metarenisca no efervece al HCl.	25%	
B: Esquisto grafitoso de color gris oscuro, poco micáceo. HCl-	75%	
MUESTRAS: MI 3A, MI 3B		
FOTOS: General (S 20 W -SW).		

<b>ESTACIÓN: MI-22</b>	COORDENADAS 1143803N 780988 E	UNIDAD: C
Plano de observación: N 70 W 45 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 55 E 40 S	PLIEGUES: No se observan.	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Meta conglomerado color gris con granos de hasta 5 m. Contacto abrupto entre conglomerado y la metarenisca gruesa (B) ubicada arriba. HCl+	5%	

B: Metarenisca gruesa gris con vetas de calcita (HCl+) que no cortan la foliación y el meta conglomerado.	35%
C: Esquistos grafitosos de color negro.	60%
MUESTRAS:	
FOTOS: General (N 10 E -SW)	

<b>ESTACIÓN: MI-23</b>	COORDENADAS 1143834N 780897 E	UNIDAD: C
Plano de observación: N 30 W 60 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 65 W 35 S.	PLIEGUES: no se observa. Tampoco crenulaciones.	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso de color negro, tacto áspero, (HCl-) que sirve de roca caja a multitud de niveles de calcita.	50%	
B: Niveles de calcita interfoliado, de color naranja por la meteorización, que presentan una variedad de formas y longitudes: algunas son alargadas, como pequeñas capas muy finas, y otras son de forma lenticular. Presentan gran irregularidad en su forma, pero el tipo general es alargado y discontinuo. Algunas pocas cortan la foliación. Por su alta frecuencia. Pareciera formar una secuencia calcita – esquisto.	30%	
C: Cuerpo de aproximadamente 3 cm de diámetro compuesto casi exclusivamente por piritita, dentro de un forro de calcita. Es discordante con la foliación y su eje mayor paralelo a la foliación.	1%	
D: Metarenisca de grano fino, color gris verdoso oscuro (color meteorizado, negro es su color fresco) con interestratificaciones muy finas color negro, subparalelas a la foliación, de granulosis visible, forman lentes alargados e 2,5 x 17 cm concordantes con la foliación. (HCl+). Son de poca abundancia con respecto al afloramiento. Presenta vetas de calcita	9%	
E: Existe un conjunto de metareniscas negras, masivas, sin distinción entre granos, (HCl-), que están presentes como lentes interfoliados en la roca caja. Su proporción es confusa. Llegan a distinguirse porque crean irregularidades en la forma de las vetas de calcita.	10%	
MUESTRAS:		
FOTOS: General (S 55 W)		

<b>ESTACIÓN: MI-24</b>	COORDENADAS 1143835N 780838 E	UNIDAD: C
Plano de observación: N 70 W 45 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 15 W 35 N	FALLAS: el afloramiento está cizallado por dos sistemas de fallas principales: falla 1 (N 40 W 25 S), falla 2 ( N 25 W 50 N)	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Filitas grafitosas color gris oscuro (HCl-).	95%	

B: Vetas de calcita muy frecuentes que cortan sub-perpendicularmente a la foliación, de espesor general de 5 mm. Estas son vetas de tracción de orientación N 60 W sub veticales a aproximadamente 45° con respecto a la falla.	4%
C: veta de cuarzo sub paralela a las de calcita, pero de mayor espesor (3 cm)	1%
MUESTRAS:	
FOTOS: General (S 35 E), detalle de (B) ( S 60 E 85), detalle de más vetas de calcita paralelas a las de (B), que están en el bloque inferior (S 25 W 55 SW)	

<b>ESTACIÓN: MI-25</b>	COORDENADAS 1143839N 780596 E	UNIDAD: B
Plano de observación: N 80 E 70 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 20 E 20 S	PLIEGUES: No se observa	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso de color gris oscuro a negro, con menor marcación en la foliación, y algunos budines embebidos (HCl-)	80%	
B: Budín de metarenisca gris embebido en la foliación, cortando esta. Sin huellas presión (HCl-). Existen vetas de calcita dentro del budín.	20%	
MUESTRAS:		
FOTOS: General (N 10 W, mirando al sur), detalle de la elongación del budín (S 40 W)		

<b>ESTACIÓN: MI-26</b>	COORDENADAS 1143851N 780539 E	UNIDAD: B
Plano de observación: N 80 E 45 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 5 W 24 N.	PLIEGUES: no se observa. Tampoco crenulaciones.	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Filita esquistosa de color negro, con marcada foliación y algo diaclasada. De textura lisa. No se observan micas. (HCl-). Nota: en algunos cantos frente a la ventana, se encontraron vetas de pirita de poco desarrollo. Este mineral está muy disperso y localizado.	50%	
B: Metarenisca de grano medio. Presenta en su interior algún tipo de mica (probable muscovita). En su interior hay vetas de calcita de 5 mm, sin patrón definido, sin embargo en líneas generales son perpendiculares a la foliación, sin llegar a cortarlas. Color de gris a gris oscuro. Forma una capa gruesa con constricciones (espesor medio de 45 cm), y está muy fracturada. Es concordante con la foliación.	30%	
C: Niveles de calcita embebidos en la foliación. Son de pequeño tamaño, pero están muy frecuentes. Algunas forman budines escasos sin orientación de cizalla	20% dentro de la filita	
MUESTRAS: MI 17 B		
FOTOS: General (S 5 E), detalle (S 30E).		

<b>ESTACIÓN: MI-27</b>	COORDENADAS 1143837N 780442 E	UNIDAD: B
Plano de observación: S 25 E		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 30 W 28 N.	PLIEGUES: no se observa. Tampoco crenulaciones.	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso de grano fino, color negro. Presenta una marcada foliación. De tacto liso. No se observan micas ni otros minerales. (HCl-)		75%
B: Niveles ricos en carbonatos. Algunos interfoliadas de poco espesor (llegan a medir 1,5 la más grande). Las demás son de 5 mm y se hallan con una frecuencia relativamente alta (cada 4 cm). La distribución no es homogénea. Son más frecuentes en algunas zonas que otras.		17%
C: Vetas de calcita. En menor proporción. Constituyen grupos aislados que cortan la foliación		3%
D: Metarenisca de grano medio con cristales alargados. Color gris azulado a verdoso. Algunas de ellas son masivas. Se presentan en budines muy alargados e interfoliados, con dimensiones aproximadas de 4 cm X 17 cm. De ubicación dispersa. Algunas tienen finas vetas de calcita en su interior que no cortan la foliación.		5%
MUESTRAS:		
FOTOS: General (S 25 E), detalle (S 55 E 20 SE)		

<b>ESTACIÓN: MI-28</b>	COORDENADAS 1143776N 780199 E	UNIDAD: B
Plano de observación: E-W 45 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 20 W 20 N	PLIEGUES: No se observa	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso, de color gris oscuro a negro, en algunas partes más filíticas. Liso al tacto. Presenta intercalados abundantes niveles de (B). (HCl+)		55%
B: Vetas de calcita o lineaciones de mármol, color blanco a beige claro con zonas de manchas color gris claro, embebidas en la foliación. Estos niveles de calcita son muy abundantes en esta zona y llegan a alcanzar 1 cm de espesor. Rara vez forman budines		40%
C: Vetas de calcita que cortan la foliación a 45°, de espesor muy delgado (5 mm) y rumbo promedio (N 50 W)		5%
MUESTRAS:		
FOTOS: General (mirando al sur, inclinación 10° S), detalle de vetas transversales (S 30 E 10 SE), con plano de observación N 60 E 65 N.		

<b>ESTACIÓN: MI-29</b>	COORDENADAS 1143776N 780199 E	UNIDAD: B
Plano de observación: E-W 45 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 40 E 20 S	PLIEGUES: No se observa	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>

A: Filita grafitosa color negro, contiene crenulaciones sobre la foliación, de textura lisa al tacto. (HCl +)	75%
B: Budín de metarenisca de color gris con vetas de calcita que no cortan la foliación.No se observan sombras de presión (HCl-)	20%
C: Vetas de mármol embebido en la foliación, de forma alargada y si sombras de presión. Budín de metarenisca con vetillas de calcita que no corta la foliación circundante y ubicadas perpendicularmente a la misma.	5%
MUESTRAS:	
FOTOS: General (N 5 E), detalle de (B) mirando al sur con buzamiento de 5°. Otra imagen con buzamiento 60°, más arriba de (B), con detalle de uno de los budines. Detalle de (C) S 20 E 35 SE	

<b>ESTACIÓN: MI-30</b>	COORDENADAS 1143937N 779382 E	UNIDAD: B
Plano de observación: N 25 E 50 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N – S 20 W	PLIEGUES: pliegue isoclinal, recumbente, eje ( N 70 W 15 NW)	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Filita grafitosa color negro, áspera al tacto. (HCl-). La roca está compuesta por una interfoliación de niveles continuos de poco espesor (3 cm), cizallada.	45%	
B: Metarenisca muy fina, de color gris oscuro. (HCl-). Dispuesto en capas delgadas y continuas, distinguibles de las demás litologías. Estas capas son paralelas a la foliación.	50%	
C: Metarenisca de color negro con vetas de cuarzo sin dirección definida. (HCl-)	5%	
MUESTRAS:		
FOTOS: General (S 65 W)		

<b>ESTACIÓN: MI-31</b>	COORDENADAS 1143937N Carretera prog. 779382 E 50+000	UNIDAD: B
Plano de observación:		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 65 E 30 N	PLIEGUES: no se observan	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso de color gris a negro con alto contenido de muscovita. Muy foliado. De tacto suave. Forman pequeñas capas de 50 cm. Existen vetas transversales de calcita de pocos milímetros de espesor.(HCl-)	50%	
B: Mármol de color gris dispuesto en capas muy gruesas (70 cm a 3 m) de apariencia granuda, y con vetas finas de calcita no paralelas a la foliación. Esta distribución es local, luego se abren espesos paquetes de esquistos con potentes capas de arenisca color gris claro.	40%	
C: Pequeños budines de metarenisca interfoliados de color gris, de poca frecuencia (HCl-)	10%	
MUESTRAS: MI 34 A, MI 34 C		
FOTOS: General (S 65 W)		

<b>ESTACIÓN: MI-32</b>	COORDENADAS Comienzo del viaducto	1143937N 779382 E	UNIDAD: B
Plano de observación: N 30 W 65 N			
<b>ESTRUCTURAS</b>			
FOLIACIÓN: N 15 W 20 N		PLIEGUES: no se observan	
<b>LITOLOGÍAS</b>			<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso de color negro. Posee marcada foliación. No se observan la misma proporción de micas. (HCl-)			60%
B: Metarenisca de color negro interfoliada en pequeños niveles poco frecuentes			10%
C: Niveles de cuarzo interfoliados, algo discontinuos de aproximadamente 8 cm de espesor. No forman cuerpos uniformes sino constreñidos. Son muy abundantes y frecuentes.			30%

<b>ESTACIÓN: MI-33</b>	COORDENADAS Antes del viaducto	1143937N 2° 779382 E 48 +200	UNIDAD: B
Plano de observación: N 10 W 36 N			
<b>ESTRUCTURAS</b>			
FOLIACIÓN: N 80 E 50 N		PLIEGUES: con las areniscas se observa un plegamiento isoclinal, recostado, con eje el rumbo de la foliación.	
<b>LITOLOGÍAS</b>			<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso de color negro. Posee marcada foliación. De tacto liso aunque con aspecto arenoso. No se observan micas. (HCl-).			55%
B: Niveles de metarenisca color negro, interfoliados de muy poco espesor (5 mm) y alta frecuencia (5:7 cm). Los límites con el esquisto están bien definidos. A veces contienen pirita			40%
C: Metareniscas de color gris que forman capas de 4 cm de espesor, continuas. (HCl-). De poca frecuencia			5%

<b>ESTACIÓN: MI-34</b>	COORDENADAS 49+800	1143937N 779382 E	UNIDAD: B
Plano de observación: N 10 E 35 N			
<b>ESTRUCTURAS</b>			
FOLIACIÓN: Fo1: N 50 E 30 N, crenulaciones Fo2: N 85 E 20 N		PLIEGUES: Crenulaciones sobre Fo1 (15 ° NW) Macroscópicamente, el afloramiento tiene un suave plegamiento con eje paralelo a las vetas de cuarzo.	
<b>LITOLOGÍAS</b>			<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso de color negro de aspecto áspero. (HCl-).			35%
B: Niveles de metarenisca color negro, interfoliados, muy frecuentes, continuos de poco espesor.			45%
C: Metarenisca de color gris oscuro, presentes como pequeños budines (30 x 6 cm) secantes a la foliación. Son muy poco frecuentes.			5%
D: Vetas de cuarzo que aprovechan el diaclasamiento perpendicular del esquisto . De alta persistencia (3 m), frecuencia cada 40 cm.			15%

<b>ESTACIÓN: MI-35</b>	COORDENADAS 1143937N 45+500 779382 E	UNIDAD: B
Plano de observación: N 5 W 35 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 60 E 40 N	PLIEGUES: Crenulaciones sobre Fo1 (15 ° NW) Macrosópicamente, el afloramiento tiene un suave plegamiento con eje paralelo a las vetas de cuarzo.	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso de color negro de aspecto áspero. Marcada foliación . no se observan otros minerales, ni vetas que corten la foliación (HCl-). La disposición es muy simple y sin estructuras complejas. Consta de una roca caja con niveles de espesor uniforme.		65%
B: Metarenisca de color gris, (HCl-), algunos con contenido calcáreo. Se disponen en capas bien definidas, de espesor uniforme (4 cm). Su frecuencia es alta (8:20 cm), de distribución homogénea.		35%

<b>ESTACIÓN: MI-36</b>	COORDENADAS 1143937N Cerca donde tomé 779382 E avena	UNIDAD: A
Plano de observación: N 45 W		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: Fo1: N 70 E 30 S Fo2: N 50 E 70 N (está más generalizado)	PLIEGUES: está levemente deformada, pero en mayor proporción que en estaciones anteriores. Los pliegues son abiertos, en secuencia armónica de sin y anticlinales . se observan crenulaciones (S 65 W 5 S) .	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso de grano fino, casi filítico, de marcada foliación. Áspero al tacto presenta algunas micas brillantes. Está finamente foliada, sin presencia de budines. No expone vetas, solo algunas finas y muy escasas vetas de cuarzo interdiaclasas. (HCl-)		40%
B: Metarenisca de color gris a gris oscuro, (HCl-), constituyen delgados niveles interfoliados de mucha continuidad. Los espesores son de pocos milímetros. Presencia de muscovita.		35%
C: Metarenisca de color negro, grano fino. Está dispuesta en forma de capas discontinuas, asociadas a unas vetas de calcita subparalelas a la foliación. (HCl-). Distribución heterogénea		15%
D: Niveles de calcita, de forma irregular y constreñidas. Se distingue por los tintes de meteorización		10%



<b>ESTACIÓN: MI-37</b>	COORDENADAS 1143937N 46+000 779382 E	UNIDAD: A
Plano de observación: N 5 W 40 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 75 W 40 N	PLIEGUES: en general se observó un plegamiento disarmónico y rizado, sin variar notablemente la dirección de foliación. Megaplegamiento recumbente y abierto de eje S 60 W 30, y ápice hacia el sur.	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso muscovítico, sin budines, dispuesto en capas. (HCl-)		55%
B: Metarenisca de color gris con muscovita. Dispuesta en capas delgadas (no mas de 5 cm), continuas y de distribución homogénea. Alta frecuencia (6:30 cm solo las más grandes, ya que hay muy finas interfoliadas).		40%
C: Capas de calcita de 5 cm de espesor. Muy poco frecuentes.		5%

<b>ESTACIÓN: MI-38</b>	COORDENADAS 1143937N 45+800 779382 E	UNIDAD: A
Plano de observación: N 10 W 45 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 75 W 40 N	PLIEGUES: muy deformado, aumenta la cantidad de pliegues monoclinales y disarmónicos. Ejes S 60 W 40. algunos son más cerrados y verticales.	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso muscovítico, sin budines, dispuesto en capas delgadas. (HCl-)		60%
B: Metarenisca de color gris con muscovita. Dispuesta en capas delgadas (no mas de 5 cm), continuas y de distribución homogénea. Alta frecuencia (6:30 cm solo las más grandes, ya que hay muy finas interfoliadas).		30%
C: Capas de calcita de espesor homogéneo (la más gruesa de 10 cm). Poco frecuentes (cada 60 cm).		10%

<b>ESTACIÓN: MI-39</b>	COORDENADAS 1143937N 42+900 779382 E	UNIDAD: A
Plano de observación: N 20 W 45 N		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: variante debido a la fuerte deformación Fo1: N65 W 23 N Fo2: N 60 E 40 N Fo3: N 50 W 50 N, crenulación 1 y 2	PLIEGUES: muy deformado, pliegue simétrico de AIL 40° y eje (N 80 W 20 SE). Pliegues en caja, pliegues cerrados con rotación del plano axial. Crenulación 1: 20 NW Crenulación 2: 30 SE	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso muscovítico, suave al tacto, sin budines, dispuesto en capas delgadas. (HCl-)		40%
B: Metarenisca de color gris a gris oscuro, grano fino con muscovita. Dispuesta en capas delgadas uniformes, continuas, de distribución homogénea e interfoliadas. Algunas contienen mucha pirita.		40%

C: Capas de cuarzo de color blanco, dispuestas en forma interfoliadas y de espesor irregular	20%
--	-----

<b>ESTACIÓN: MI-40</b>	COORDENADAS 1143937N Después de 779382 E terrazas de kempis	UNIDAD: A
Plano de observación: N 60 W 70 S		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 50 E 30 N	PLIEGUES: pliegues armónicos eje S 65 W 25, muy frecuentes, con amplitudes de 10 cm.	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso de color negro, de aspecto rugoso. Poco marcada la foliación (HCl+)	20%	
B: Metarenisca de color gris a gris oscuro, grano fino con muscovita. Dispuesta en cuerpos delgados (hasta 3 cm de ancho y 30 cm de largo), discontinuos e interfoliados, no en capas. (HCl-). Estos cuerpos presentan vetas de calcita en su interior, de forma irregular y que no cortan la foliación. La frecuencia de la metarenisca es de cada centímetro y de distribución homogénea	45%	
C: Niveles de calcita blanca, interfoliadas, pero corresponden a finos cuerpos asociados con (B) y a sus planos de diaclasas. Distribución heterogénea	15%	
D: Niveles de cuarzo de hasta 15 cm de espesor irregular, y longitudes que superan el metro. De disposición interfoliado y de frecuencia cada 23 cm máximo y distribución heterogénea.	20	

<b>ESTACIÓN: MI-41</b>	COORDENADAS 1143937N 39+600 779382 E	UNIDAD: A
Plano de observación: N 60 W 70 S		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 80 W 45 N	PLIEGUES: muy cerrado, rectos y muy frecuentes, con eje S 75 W 5.	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso de color negro, de aspecto rugoso. Poco marcada la foliación (HCl+). No hay presencia de budines.	70%	
B: Mármol blanco en forma de capas largas, discontinuas e interfoliadas. Los espesores van desde milimétricas a algunas más gruesas (decenas de centímetros)	30%	

<b>ESTACIÓN: MI-42</b>	COORDENADAS 1143937N Entrando al túnel 779382 E vía cau	UNIDAD: A
Plano de observación: N 10 E 90		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: variable Fo1: N 70 E 53 S Fo2: N 73 E 75 N Fo3: N 80 E 50 N	PLIEGUES: cerrado, casi isoclinal, de eje N 70 E 20 NE.	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Filita grafitosa de color negro, con arcada foliación y textura áspera. No se observan micas. (HCl+)	30%	

B: Niveles de cuarzo blanco de espesores milimétricos, interfoliados en alta frecuencia (8:5 cm), algo deformadas. Las más gruesas (hasta el decímetro) presentan espesor desuniforme. Continuas	40%
C: Niveles de calcita interfoliadas de 3 cm de espesor. Menos abundantes que en la estación anterior.	30%

<b>ESTACIÓN: MI-43</b>	COORDENADAS 1143937N 35+800 779382 E	UNIDAD: A
Plano de observación: N 70 W 45 S		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: variable Fo1 y limbo 1: N 37 E 25 N (general) Fo2 y limbo 2: N 83 E 75 S	PLIEGUES: Muy deformado, pliegues cerrados, de vertical a horizontal, de eje S 70 W 30. Crenulación en el sentido del eje del pliegue.	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Filita grafitosa de color negro, con arcada foliación y textura áspera. Poca mica muscovita. (HCl+). Interfoliada finamente con niveles de calcita de espesor milimétrico		55%
B: Vetas de calcita blanca en capas largas, muy deformadas. Algunas dispuestas perpendicularmente y otras paralelas a la foliación. De espesor uniforme de 7 cm. Distribución homogénea y poco frecuentes.		45%

<b>ESTACIÓN: MI-44</b>	COORDENADAS 1143937N 34+900 779382 E	UNIDAD: A
Plano de observación: N 75 W 60 S		
<b>ESTRUCTURAS</b>		
FOLIACIÓN: N 10 E 25 N	PLIEGUES: Muy deformado, pliegues cerrados a isoclinales inclinados con volcamiento hacia el sur. Eje general (S 55 W 30S)	
<b>LITOLOGÍAS</b>		<b>PROPORCIÓN</b>
A: Esquisto grafitoso de color azulado, de foliación marcada, intercalado en capas milimétricas con los niveles de mármol, forma capas continuas y de distribución homogénea.. Presencia de micas.		75%
C: Mármol de color blanco en forma de capas delgadas interfoliadas.		25%

### 8.3.1. Laboratorio de mecánica de rocas

En el laboratorio de mecánica de rocas, se realizaron ensayos de compresión uniaxial a seis cilindros de roca representativos de los seis taludes de corte evaluados. La litología de estos cilindros de muestreos es básicamente de esquisto y filita esquistosa con vetas de cuarzo y calcita, que están presentes como litología fundamental en los macizos.

Los pasos seguidos durante el ensayo, son explicados en el apartado 2.2.3.- *Ensayo de compresión uniaxial* ubicado en el capítulo de metodología, ceñida bajo la normativa A.S.T.M. D-2938-95.

Para cada caso se midió la orientación de la foliación en los sitios perforados, se cortaron los cilindros, midieron y pesaron, así como también se les aplicó una cobertura de yeso de resistencia 562,96 kg/cm<sup>2</sup> de la cual se obtuvo los siguientes datos antes del ensayo:

**Tabla 34.** Dimensiones de los cilindros de rocas antes del ensayo

Muestra	Talud	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Peso (gr)	Den gr/cm <sup>3</sup>
Mi A	1+420 a la 2+060	9,4	7,6	1140	2,673
Mi B	2+180 a la 2+860	11,2	7,6	1342	2,641
Mi C	3+300 a la 3+500	14,3	7,6	1716	2,645
Mi D	3+900 a la 4+100	12,0	7,6	1432	2,631
Mi F	4+380 a la 4+480	15,1	8,2	2132	2,674
Mi G	4+820 a la 5+040	9,3	8,2	1288	2,622

La denominación de las muestras no representa extracciones hechas en las ventanas de observación geológica, sino en sitios donde aflora la litología representativa de cada talud de corte.



**Fig. 47.** Estado de los cilindros de roca muestreados antes del ensayo

#### Resultados del ensayo:

El ensayo se realizó a una velocidad de 30 kg/seg. A los cilindros de menor altura, se le aplicó un factor de corrección a la resistencia obtenida en la lectura

**Tabla 35.** Resultados obtenidos del ensayo de compresión uniaxial

Muestra	Area (cm <sup>2</sup> )	Carga (kg)	Corrección	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo
Mi A	45,36	17120	0,9225	<b>348,14</b>	Medianamente resistente
Mi B	45,36	3470	0,9408	<b>71,96</b>	Muy débil
Mi C	45,36	16000	1,0528	<b>371,32</b>	Medianamente resistente
Mi D	45,36	9230	1,0112	<b>205,74</b>	Medianamente resistente
Mi E	52,81	20380	1,0304	<b>397,64</b>	Medianamente resistente
Mi F	54,11	29910	0,9744	<b>538,65</b>	Medianamente resistente

Se utilizó como criterio de clasificación la propuesta por FRANKLIN (1989) para catalogar la resistencia de la roca según los siguientes parámetros:

**Tabla 36.** Clasificación de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca según FRANKLIN (1989)

CLASIFICACIÓN	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )
Extremadamente débil	<20
Muy débil (roca blanda)	20 – 60
Débil	60 – 200
Medianamente resistente	200 – 600
Muy resistente (roca dura)	600 – 2000
Extremadamente resistente	>2000

La roca de los macizos, en forma general, está catalogada como medianamente resistente, con una resistencia promedio de 330,71 kg/cm<sup>2</sup>, y una resistencia máxima de 538.65 kg/cm<sup>2</sup> cuando la foliación es perpendicular al esfuerzo, la cual no es el caso preponderante en los taludes.

Los modos de falla son de tipo plana, todas influenciadas por los planos de foliación o alguna veta de cambio litológico. Algunas fracturas perpendiculares a foliación ocurren, sin embargo no es el caso común en todos los cilindros ensayados.

Luego de los ensayos, los modos de falla que ocurrieron son como ilustra las fotografías, en el mismo orden presentados anteriormente:



**Fig. 48** Estado de los cilindros de roca muestreados después del ensayo



**Fig. 49** Detalle de la falla del cilindro Mi C



**Fig. 50** Detalle de la falla del cilindro Mi G