

# Influencia de la degradabilidad de las rocas en los parámetros de resistencia de los materiales de la formación Guaduas, al noroccidente de Bogotá\*

## Influence of rock degradability in shear strength parameters of the materials at Guaduas formation, Northwest Bogotá

JOHANA PAOLA ROZO<sup>1</sup> - JOSÉ VICENTE AMÓRTEGUI GIL<sup>2</sup>

1. Maestría en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Profesor asociado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

johana.rozo@mail.escuelaing.edu.co - jose.amortegui@escuelaing.edu.co

Recibido: 25/02/2017 Aceptado: 02/05/2017

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

### Resumen

El proceso de meteorización de las rocas genera cambios en sus características y propiedades, representados en una disminución de la resistencia del material. Las rocas de la formación Guaduas se encuentran constituidas por lodolitas de color gris oscuro con algunos mantos de carbón, las cuales toman gradualmente el aspecto de arcillolitas abigarradas con intercalaciones de arenisca de espesor muy variable. Estos materiales son, por naturaleza, propensos a degradarse o deteriorarse en cuanto a su estructura, por procesos de meteorización física o química, presentando un comportamiento inestable que pueden ocasionar suficiente pérdida de resistencia y conducir a su posterior falla.

Por la abundancia de este tipo de materiales en el territorio colombiano, en la presente investigación se estudia la influencia que tiene la degradabilidad de las rocas en los parámetros de resistencia de los materiales de la formación Guaduas, analizando un talud rocoso de esta formación, ubicado en el costado norte del parque Mirador de los Nevados, hacia el sector noroccidental de Bogotá, en los cerros de Suba, donde actualmente se están presentando procesos de inestabilidad. Se realizan correlaciones entre la resistencia y las pruebas índice de los materiales; se evalúa la estabilidad del talud, considerando el grado de meteorización de la roca, donde se evidencian amplias reducciones del factor de seguridad a medida que la roca pasa de un estado intacto a

totalmente meteorizado. Se proponen las obras de mitigación de los procesos de inestabilidad que se están presentando en el talud, producto de los acelerados procesos de degradación de la roca, al encontrarse expuesta a la intemperie.

**Palabras claves:** roca, formación Guaduas, meteorización, resistencia, talud, estabilidad y degradación.

### Abstract

The process of rock weathering generates changes in its characteristics and properties, represented in a reduced resistance of the material. The Guaduas Formation rocks are formed by dark gray mudstones with numerous coal seams, which gradually take on the appearance of motley claystone with varied interbedded sandstone thickness. These materials are naturally susceptible to degrade or deteriorate in terms of its structure, due to physical and/or chemical weathering processes, presenting an unstable behavior which may cause loss of enough strength leading to subsequent failure.

Due to the abundance of such materials in Colombian soil, this research examines the influence of rock degradability in the strength parameters of Guaduas Formation materials, analyzing a rocky slope of this line located on the north side of Mirador de Los Nevados park, Northwest Bogotá on the hills of Suba, which show instability processes. Correlations are made between the resistance and index testing of materials; slope stability is evaluated considering the degree of rock weathering, which shows large reductions of the safety factor as the rock changes from intact to fully weathered. Works are proposed

\* Tomado del trabajo de grado para obtener el título de maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia, dirigido por el ingeniero José Vicente Amórtégui.

to mitigate the instability processes that are currently occurring on the slope, due to the rapid degradation processes of the rock by direct exposition to weather.

**Keywords:** rock, Guaduas Formation, weathering, resistance, slope, stability and degradation.

## INTRODUCCIÓN

Los procesos de meteorización conducen a la alteración de las propiedades, ya sea desde el punto de vista físico o químico, modificando el comportamiento tipo roca hasta convertirlo en uno tipo suelo, producto de factores como el clima, la topografía y la actividad biológica. Estos procesos afectan las rocas y modifican su resistencia, al tiempo que dificultan el diseño y la construcción de las obras de ingeniería del país.

El alcance del estudio involucra el análisis del comportamiento de las rocas de la formación Guaduas con respecto a su resistencia, en varios estados de meteorización, correlacionándolo con resultados de pruebas índice y con la estabilidad de un talud localizado en el costado norte del parque Mirador de los Nevados; además, se incluye la propuesta de las obras de mitigación al problema de inestabilidad presentado en dicho talud, donde hay actualmente desprendimiento de materiales desde la corona.

## ANTECEDENTES

Existen dos tipos de meteorización: el primero consiste en la destrucción de la roca *in situ* mediante la alteración física conocida como “desintegración o meteorización física”, y el segundo involucra la alteración química denominada “descomposición o meteorización química”. Se han efectuado algunas investigaciones relacionadas con los efectos de la meteorización en las propiedades geotécnicas de la roca, entre las que se destacan las realizadas por investigadores del Reino Unido, como Spears y Taylor (1972), y Chandler (1972); de Turquía, como Tungal y Zarif (2000), Tugrul y Gürpınar (1997); de Hong Kong, Irfan (1999), y en Colombia se destaca el trabajo de Mario Camilo Torres (2010).

Spears y Taylor (1972) realizaron un estudio sobre la influencia de la meteorización física y química en la resistencia al corte en una gran cantidad de muestras de rocas lodosas, arrojando como resultado la reducción de los parámetros de resistencia y la variación en la forma de la envolvente de Mohr, de acuerdo con el grado de

meteorización. Chandler (1972) hizo un estudio sobre una arcilla altamente sobreconsolidada del Reino Unido, la cual fue sujeta a procesos de meteorización natural; como resultado de su investigación se presentó una relación esquemática entre el contenido de agua y la resistencia al corte en términos de la envolvente de falla, donde la reducción progresiva de la resistencia se debe a la meteorización en una profundidad dada, representando el efecto de meteorización inducido por la erosión continua.

Tungal & Zarif (2000) llevaron a cabo una investigación sobre calizas meteorizadas de Turquía, en la que se identificó una relación lineal positiva entre la resistencia a la compresión uniaxial y la resistencia a la carga puntual, velocidad de ondas  $P$ , peso unitario, módulo de elasticidad y resistencia a la tensión indirecta, y se desarrolló una relación lineal negativa entre la resistencia a la compresión simple y porosidad.

Tugrul & Gürpınar (1997) investigaron la clasificación de los estados de meteorización y las propiedades ingenieriles de basaltos de la región Nıksar, al este de Turquía, donde se obtuvo una relación exponencial entre la resistencia a la compresión simple y la densidad, y una disminución de ambas propiedades con el aumento en el grado de meteorización. La permeabilidad de los materiales rocosos aumenta en la medida en que la porosidad se incrementa con el grado de meteorización.

Irfan (1999) realizó un estudio en rocas volcánicas meteorizadas en Hong Kong, en el que se determinó que no es posible la comparación directa de una prueba índice en un grado particular de meteorización para la misma roca volcánica en diferentes formaciones.

Torres (2010) hizo una investigación sobre las rocas lodosas de los Andes colombianos, a través de técnicas de laboratorio para simular acciones del medio ambiente sobre muestras rocosas y monitorear cambios en propiedades físicas y mecánicas, evaluando los efectos reales que dichas acciones pueden tener en la competencia del material. Como resultado de esto, se determinaron los principales mecanismos de falla de rocas lodosas, que se desarrollan inicialmente en la escala microscópica, exhibiendo tanto degradación física como química, y se comprobó la reducción progresiva en resistencia y rigidez.

Este estudio se lleva a cabo sobre un talud rocoso ubicado en el costado norte del parque Mirador de los Nevados, el cual es el resultado de un proyecto de

recuperación morfológica y ambiental de una antigua cantera ubicada en el sector. En la actualidad, se está presentando desprendimiento de materiales de la parte alta del talud, debido a que éste queda expuesto directamente a la acción de procesos de meteorización, que se ven favorecidos por los cambios climáticos que se puedan presentar (intensas jornadas de sol o repentinas lluvias). Además de la exposición directa del talud a estos procesos, la naturaleza propia de las rocas sedimentarias por las que está constituido el talud hace que éstas sean más vulnerables a los procesos de meteorización (fotografía 1).



**Fotografía 1.** Talud norte del parque Mirador de los Nevados.

### CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

Se llevó a cabo la caracterización del macizo rocoso mediante el levantamiento de los datos estructurales existentes, el cual incluyó la posición y dirección de los estratos, la determinación de diaclasas y toma de un número representativo de datos relacionados con dirección y buzamiento, rugosidad, espaciamiento, continuidad, alteración de las paredes, relleno, infiltración y apertura de discontinuidades, entre otros. Posteriormente, se realizó el muestreo de bloques rocosos del talud, para determinar la resistencia del material mediante ensayos de compresión simple e índice de carga puntual, los cuales arrojaron como resultado que la roca presenta bajos valores de resistencia. De las muestras rocosas ensayadas se obtuvieron valores de resistencia a la compresión simple menores de 6 Mpa y bajos índices de resistencia a la carga puntual, con  $I_{50}$  inferiores a 1 Mpa.

Se realizó el levantamiento estructural de 51 datos de discontinuidades y éstos se representaron en el programa Dips 5.0, donde se generó el diagrama de densidad

de polos en proyección equiareal, identificándose la presencia de cuatro familias de discontinuidades en el macizo rocoso (tabla 2).

**Tabla 1**  
Familias identificadas en el macizo rocoso

Familia N.º	Azimut de buzamiento ( $\alpha$ )	Buzamiento ( $\delta$ )
1	49	86
2	349	68
3	309	80
4	136	42

Se efectuó la clasificación del macizo rocoso por tres metodologías: RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski, Q de Barton y GSI (Geological Strength Index), según lo propuesto por Marinos y Hoek; se obtuvo como resultado que el macizo rocoso es de mala calidad.

De acuerdo con la clasificación RMR, se obtuvo un puntaje de 26, que corresponde a un macizo de mala calidad (clase IV); los valores aproximados para la cohesión y el ángulo de fricción interna del macizo rocoso, según su calidad, son de 130 Kpa y  $18^\circ$ , respectivamente. Según la clasificación Q de Barton, se obtuvo un puntaje de 1,65, que corresponde a un macizo de mala calidad. Por otra parte, teniendo en cuenta el grado y las características de fracturación, estructura geológica, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades, y acorde con lo observado en campo en cuanto a litología y datos estructurales del macizo, se considera un macizo de clase E, según la clasificación GSI, el cual corresponde a limolita débil o lutita arcillosa con capas de arenisca.

### INFLUENCIA DE LA DEGRADABILIDAD DE LAS ROCAS EN LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA

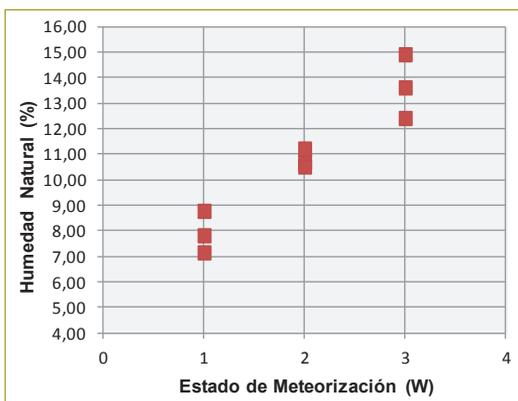
Para el presente estudio se combinó la clasificación propuesta por Deere y Patton (1971) y Annon (1981), para reflejar los niveles de meteorización del material rocoso expuesto en el talud norte del parque Mirador de los Nevados y analizar el impacto en el comportamiento geotécnico en la transición de niveles de degradación de la roca. Los términos empleados para diferenciar los horizontes son roca en estado intacto (W1), roca en

estado parcialmente meteorizado (W2) y roca en estado completamente meteorizado (W3).

Para evaluar la afectación de las pruebas índice y de resistencia con el grado de meteorización de la roca, se efectuaron ensayos de laboratorio para los tres estados de meteorización definidos anteriormente. A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos.

### Humedad natural

Se presentan humedades entre 7,13 y 14,90 %, correspondiendo los valores más bajos a la roca en estado intacto (W1). En términos generales, la humedad muestra una tendencia a incrementarse con el aumento en el grado de meteorización de las rocas (figura 1). Se identifica un aumento del 73 % entre el estado intacto (W1) y totalmente meteorizado (W3).



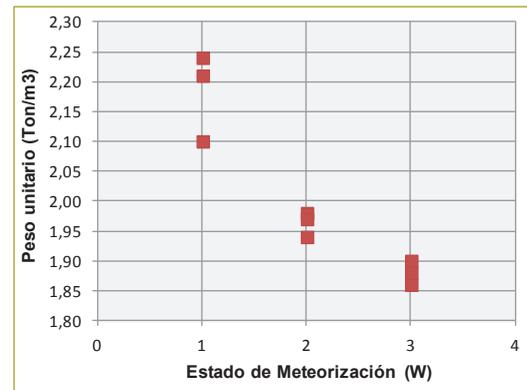
**Figura 1.** Comparación entre la humedad y el grado de meteorización.

### Peso unitario

El peso unitario se reduce a medida que aumenta el grado de meteorización (figura 2). Sin embargo, los valores de peso unitario no presentan una alta variación entre estados de meteorización, donde se registra una reducción del 14 % entre el estado intacto (W1) y totalmente meteorizado (W3).

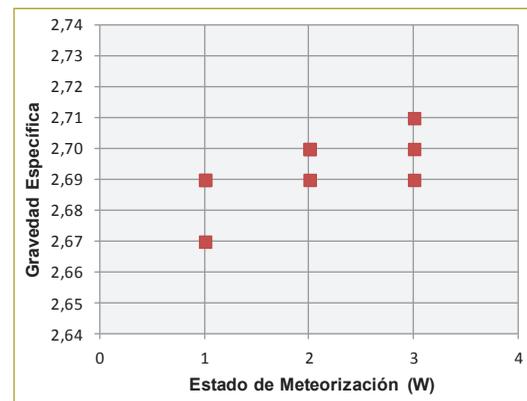
### Gravedad específica

Los rangos de Gs variaron entre 2,67 y 2,71, con un valor promedio de 2,69. No se aprecian altas variaciones en los valores de gravedad específica a medida que se



**Figura 2.** Comparación entre el peso unitario y el grado de meteorización

incrementa el grado de meteorización (figura 3). En general, no se presenta una tendencia clara en cuanto al comportamiento de la gravedad específica con el grado de meteorización.



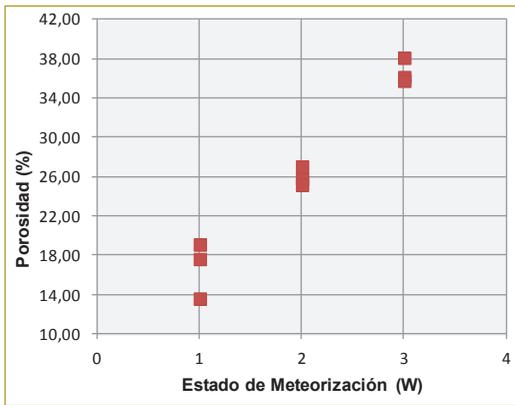
**Figura 3.** Comparación entre la gravedad específica y el grado de meteorización.

### Porosidad

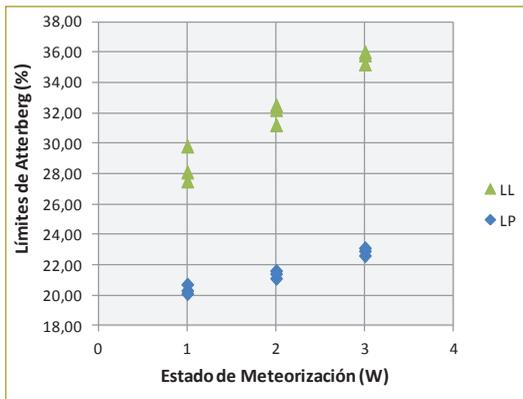
Se identifica un alto aumento de la porosidad a medida que se incrementa el grado de meteorización (figura 4), pasando de un porcentaje del 16,7 % para las rocas en estado intacto (W1) a un 36,6 % para rocas en estado totalmente meteorizado (W3).

### Límites de Atterberg e índice de plasticidad

Los límites de Atterberg y el índice de plasticidad se incrementan a medida que aumenta el grado de meteorización de la roca (figura 5 e índice de liquidez).



**Figura 4.** Comparación entre la porosidad y el grado de meteorización.



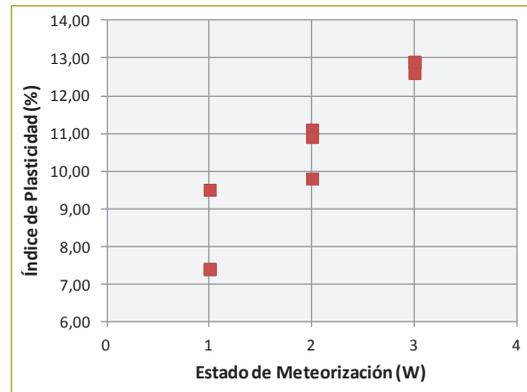
**Figura 5.** Comparación entre límites de Atterberg y el grado de meteorización.

El índice de liquidez correlaciona la humedad del material con el límite plástico y su índice de plasticidad. De acuerdo con los resultados obtenidos, el índice de liquidez se eleva a medida que aumenta el grado de meteorización de los materiales (figura 7), incrementándose en un 84 % al pasar del estado intacto (W1) a totalmente meteorizado (W3). El índice de liquidez negativo señala que el material se encuentra en una condición sólida, preconsolidada (figura 6). Se aprecian incrementos del 25,3 y 58,% en el límite líquido y en el índice de plasticidad, respectivamente, pasando del estado intacto (W1) a totalmente meteorizado (W3).

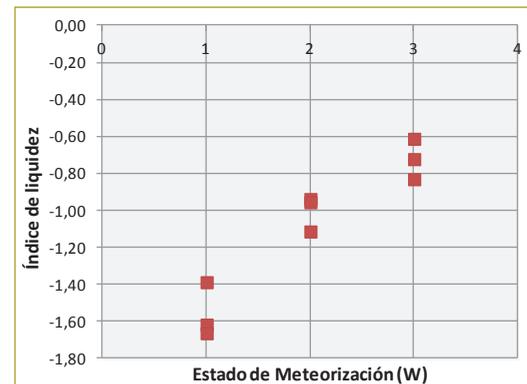
### Índice de liquidez

El índice de liquidez correlaciona la humedad del material con el límite plástico y su índice de plasticidad. De acuerdo con los resultados obtenidos, el índice de

liquidez se incrementa a medida que aumenta el grado de meteorización de los materiales (figura 7), incrementándose en un 84 % al pasar del estado intacto (W1) a totalmente meteorizado (W3). El índice de liquidez negativo señala que el material se encuentra en una condición sólida, preconsolidada.



**Figura 6.** Comparación entre el índice de plasticidad y el grado de meteorización.



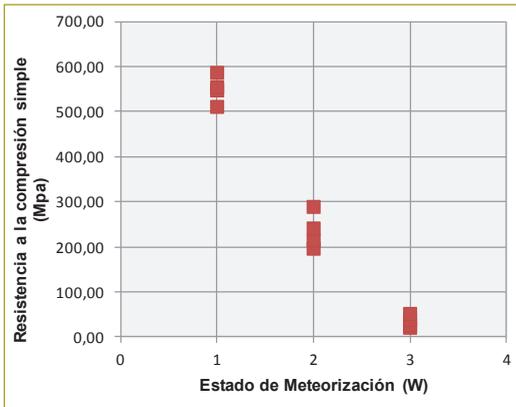
**Figura 7.** Comparación entre el índice de liquidez y el grado de meteorización.

### Resistencia a la compresión simple

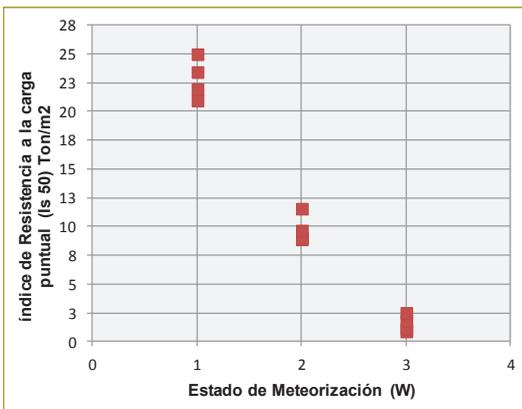
Se presentan resistencias a la compresión simple entre 20,60 y 586,4 t/m<sup>2</sup> (0,20-5,75 Mpa). Se advierte una notable reducción de la resistencia a la compresión simple a medida que aumenta el grado de meteorización.

### Resistencia a la carga puntual

Se presentan índice de resistencia a la carga puntual hasta de 25 t/m<sup>2</sup>. En general, los valores de resistencia a la carga puntual decrecen con el grado de meteorización, con reducciones hasta del 93 % entre el estado intacto (W1) y el totalmente meteorizado (W3).



**Figura 8.** Comparación entre la resistencia a la compresión simple y el grado de meteorización.



**Figura 9.** Comparación entre la resistencia a la carga puntual y el grado de meteorización.

### Resistencia al corte

La resistencia al corte disminuye con el aumento en el grado de meteorización; se redujo en un 90 % la resistencia del estado intacto (W1) al totalmente meteorizado (W3).

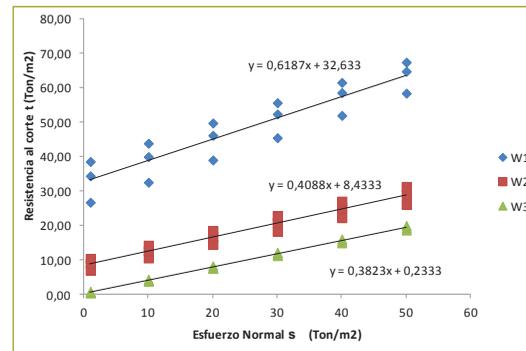
La cohesión se redujo drásticamente con el incremento en el grado de meteorización, al pasar de 38 a 0,5 t/m<sup>2</sup> en el estado W1 al W3.

El ángulo de fricción se redujo de 32° a 20°.

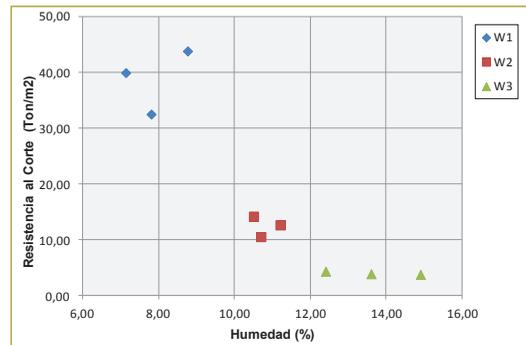
### Comparación de la resistencia con la humedad natural y el grado de meteorización de la roca

La resistencia de las rocas disminuye con un incremento en el contenido de humedad natural y en el grado de meteorización (figura 11). Las muestras en estado intacto presentan una mayor variación de la resistencia que las

muestras en estado parcial y totalmente meteorizado, para un bajo incremento de la humedad.



**Figura 10.** Comparación entre la resistencia al corte y el grado de meteorización.



**Figura 11.** Comparación entre la resistencia al corte y la humedad.

### Comparación de la resistencia con la gravedad específica y el grado de meteorización de la roca

No se presenta una tendencia clara entre la resistencia y la gravedad específica, ya que no se aprecian grandes incrementos de este parámetro entre niveles de meteorización. El valor promedio Gs es de 2,70.

### Comparación de la resistencia con el peso unitario y el grado de meteorización de la roca

Se presenta una relación lineal entre el peso unitario y la resistencia del material rocoso. La resistencia de la roca se incrementa a medida que se aumenta el peso unitario y disminuye el grado de meteorización (figura 12). Las rocas en el estado totalmente meteorizado (W3) presentan pesos unitarios más bajos que las rocas en estado intacto (W1).

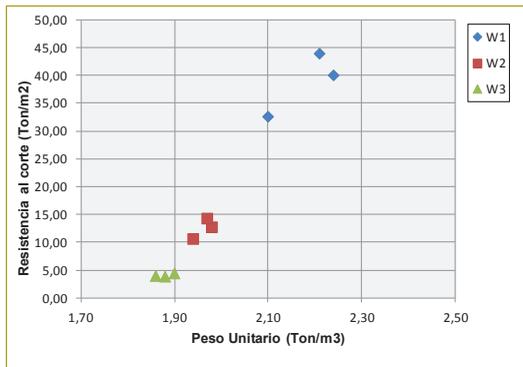


Figura 12. Comparación entre la resistencia al corte y el peso unitario.

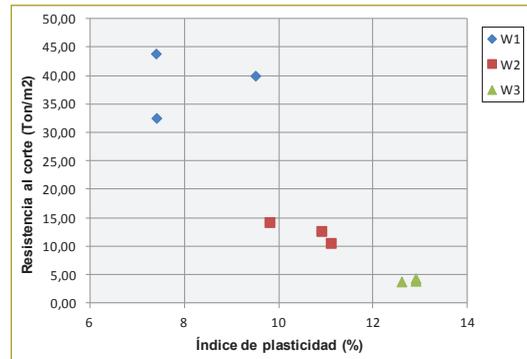


Figura 14. Comparación entre la resistencia al corte y el índice de plasticidad.

### Comparación de la resistencia con la porosidad y el grado de meteorización de la roca

Se presenta una contundente disminución de la resistencia de la roca con el incremento de la porosidad y del grado de meteorización (figura 13), pasando de valores de porosidad del 16,7 al 36,6 %, del estado intacto a totalmente meteorizado.

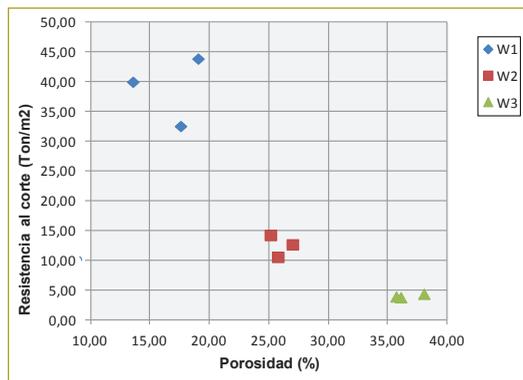


Figura 13. Comparación entre la resistencia al corte y la porosidad.

### Comparación de la resistencia con los índices de plasticidad y el grado de meteorización de la roca

Se presenta un incremento de la resistencia con la reducción del índice de plasticidad y el estado de meteorización de las rocas (figura 14), pasando de índices de plasticidad promedio de 8,10 a 12,8 %, del estado intacto (W1) a totalmente meteorizado (W3).

### Ensayo de azul de metileno

Se realizaron tres ensayos para cada estado de la roca: intacto, parcialmente meteorizado y totalmente meteorizado, donde se aprecian bajos valores de azul de metileno, los cuales oscilaron entre 1 y 1,6 mg/g, lo que indica que las muestras contienen limitadas cantidades de arcilla, siendo coherente con los resultados de los índices de plasticidad obtenidos, los cuales variaron entre 8,10 y 12,80 %, representando baja plasticidad en los materiales analizados.

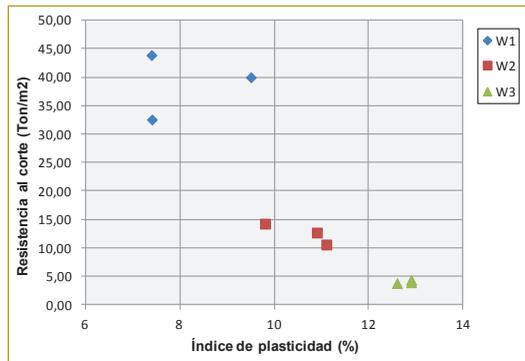
### Comparación de la resistencia con el índice de liquidez y el grado de meteorización de la roca

El índice de liquidez es la relación expresada en porcentajes de contenido de muestra natural de un material menos su límite plástico a su índice de plasticidad. Se obtuvieron índices de liquidez negativos, los cuales representan que el material se encuentra en estado sólido; a medida que el índice de liquidez aumenta, así como el grado de meteorización de la roca, se reduce la resistencia (figura 15).

Se encontró una correlación entre la resistencia y el índice de liquidez, con un coeficiente de determinación R2 de 0,90:

$$\tau = 0,8716e^{-2,436IL}$$

Esta correlación se podrá emplear para taludes de la formación Guaduas en condiciones similares.



**Figura 15.** Comparación entre la resistencia al corte y el índice de liquidez.

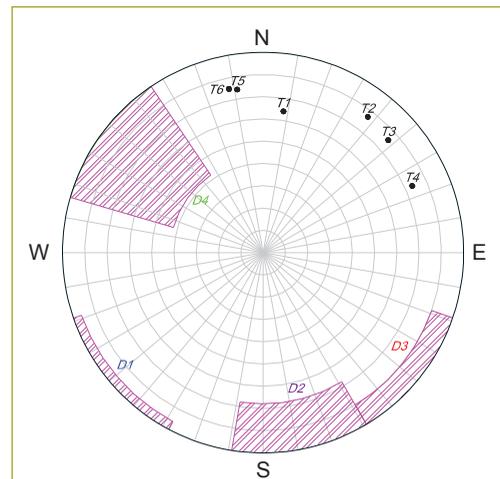
### ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD

En el talud norte del parque Mirador de los Nevados se están presentando procesos de inestabilidad, reflejados en el desprendimiento de materiales, producto de un acelerado proceso de meteorización, que se ve favorecido por la localización del talud, el cual queda expuesto directamente a la acción de cambios climáticos, la falta de cobertura vegetal, el aporte de aguas de las viviendas localizadas aguas arriba, la pendiente del talud y el tipo de materiales por el que está constituido, el cual es propenso a la degradación.

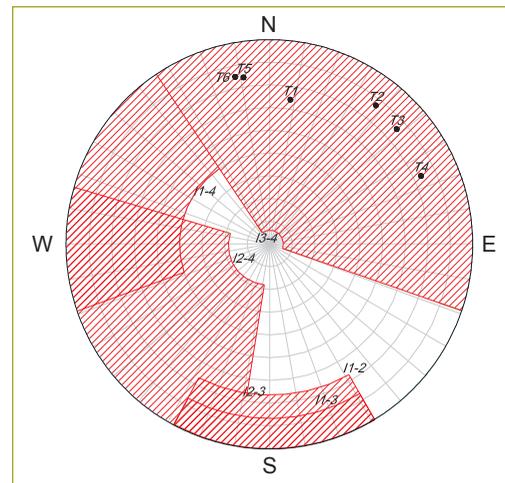
Debido a que se están presentando procesos de inestabilidad, se realizaron los correspondientes análisis de estabilidad para seis secciones a lo largo del talud, considerando las cuatro familias de discontinuidades presentes en el macizo rocoso y tomando como referencia los ángulos de fricción obtenidos en el ensayo de corte directo, los cuales variaron entre  $20^\circ$  y  $31^\circ$  para el estado intacto y completamente meteorizado, respectivamente.

Se hizo el correspondiente análisis cinemático de roturas en roca, para los tres tipos de falla existentes: planar, en cuña y por volteo (figuras 16 - 18). No se identifica posibilidad cinemática por falla planar; en el caso de falla en cuña, por la intersección de las familias de discontinuidades se genera la formación de cinco cuñas, pero no se presenta su posibilidad cinemática. Por el contrario, se identificó que se produce la posibilidad cinemática de falla por volteo, debido a que se presentan bloques de gran buzamiento y con rumbo aproximadamente paralelo a la superficie del talud, en el que el bloque de roca rota alrededor de un punto cerca de su base. La familia que origina la falla al volteo es la

número dos, la cual es la familia que presenta el mayor buzamiento ( $77^\circ$ ); las secciones donde se identificó este tipo de falla son las que se nombraron como taludes 1, 4 y 8.



**Figura 16.** Análisis cinemático falla planar.



**Figura 17.** Análisis cinemático falla en cuña.

En el caso de falla al volteo, se establece únicamente la posibilidad cinemática de falla. En el caso de falla por cuña, también se determina el factor de seguridad. Por tal razón, se calculó el factor de seguridad en cuña siguiendo la metodología de Hoek y Bray (1981). De acuerdo con la figura 17, todos los taludes considerados en el análisis se encuentran incluidos en la cuña generada por las familias de discontinuidades 3 y 4, por lo que sólo se involucran estas dos familias para los análisis realizados.

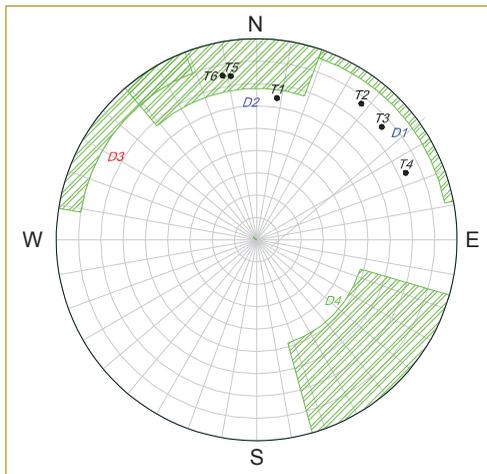


Figura 18. Análisis cinemático falla por volteo.

Se calcularon los factores de seguridad para las seis secciones definidas a lo largo del talud, las cuales presentaban buzamientos entre  $64^\circ$  y  $77^\circ$ , siendo la sección dos la de mayor buzamiento ( $77^\circ$ ). En la modelación se representaron los tres estados de meteorización de la roca evaluados a lo largo del estudio: intacto (W1), parcialmente meteorizado (W2) y completamente meteorizado (W3), con ángulos de fricción de  $31^\circ$ ,  $22^\circ$  y  $20^\circ$ , en ese orden, considerando que entre las discontinuidades no hay cohesión. Los pesos unitarios empleados en los análisis fueron de 2,18, 1,96 y 1,88 t/m<sup>3</sup>, para los estados W1, W2 y W3, respectivamente; se modeló el talud para dos condiciones: seca o saturada. Los factores de seguridad obtenidos en todos los casos siempre fueron mayores que 1, lo que indica que no se presenta falla por cuña (tabla 2).

Tabla 2  
Factores de seguridad falla en cuña

Talud	Condición estática, $\phi=31^\circ$		Condición estática, $\phi=22^\circ$		Condición estática, $\phi=20^\circ$	
	FS sin agua	FS con agua	FS sin agua	FS con agua	FS sin agua	FS con agua
1	11,57	5,67	7,78	3,37	7,01	2,87
2	11,57	4,54	7,78	2,02	7,01	1,60
3	11,57	4,07	7,78	2,17	7,01	1,74
4	11,57	5,04	7,78	2,90	7,01	2,42
5	11,57	7,31	7,78	4,59	7,01	4,01
6	11,57	7,50	7,78	4,73	7,01	4,15

## ANÁLISIS DE CAÍDA DE ROCAS

Debido a que se están presentando caídas de bloques de la parte alta del talud norte del parque Mirador de los Nevados, antes de proponer cualquier obra de estabilidad, se analizó la caída de rocas, lo que permitió obtener una probable trayectoria de la roca desde su desprendimiento hasta su ubicación final, realizando la aplicación de principios y fórmulas de caída libre, así como la teoría de colisiones o choques.

La modelación de caída de rocas se hizo con el programa Rocfall 4.0 de la firma Rocscience, el cual requiere como datos de entrada la topografía del talud, los materiales por los que está constituido, la velocidad de caída de los bloques y el peso de éstos.

En total, se modelaron tres secciones a lo largo del talud. Inicialmente, se realizó una primera modelación, asignándole al talud dos tipos de material: talud rocoso y roca meteorizada. En la modelación se consideraron varias velocidades, desde 0 m/s hasta 3,5 m/s, y diferentes pesos de bloques (hasta de 20 kg). Como resultado de esta modelación, cuando se asignó el material talud rocoso, se obtuvieron recorridos de la roca desde la pata del talud en distancias hasta de 8,7 m, a una baja velocidad (0,1 m/s), y distancias hasta de 12,5 m para una velocidad de caída de la roca de 3 m/s. Estas distancias disminuyeron cuando se asignó al talud el material roca meteorizada, donde para velocidades bajas la distancia de recorrido de la roca desde la pata del talud es de máximo 0,5 m; para velocidades superiores a 2 m/s, la roca recorrió hasta 7,5 m desde la base del talud (figura 19). En todos los casos, la altura máxima a la que rebota la roca es inferior a 1 m.

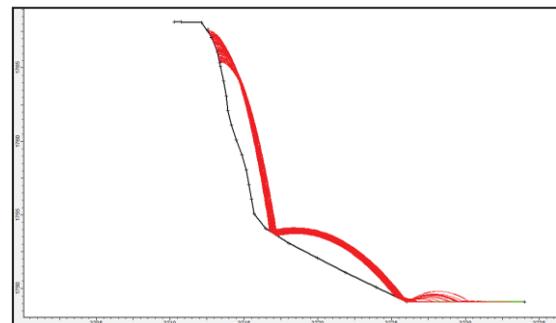


Figura 19. Análisis cinemático falla por volteo.

En virtud de que el macizo rocoso del talud analizado no se encuentra en estado intacto, sin ningún tipo de alteración, no se consideró este tipo de material en el análisis de Rocfall 4.0. Por tal razón, se realizó la modelación de tres secciones a lo largo del talud, asignándole el material roca meteorizada, y considerando ángulos de fricción de  $20^\circ$  y  $31^\circ$ . En las tres secciones analizadas, para velocidades inferiores a 1 m/s, el recorrido de los bloques rocosos alcanza distancias hasta de 0,5 m desde la pata del talud, donde la altura máxima a la que rebota la roca es menor de 0,18 m; para velocidades superiores a 1 m/s (las cuales rara vez se presentan) los bloques recorren distancias entre 2,5 m ( $v=1,5$  m/s) y 8 m ( $v=3,5$  m/s) desde la pata del talud. En todos los casos, para el talud con un ángulo de  $31^\circ$ , las rocas quedan separadas de la base del talud a menores distancias en comparación con el caso de cuando se asigna un ángulo de  $20^\circ$ , lo que conduce a considerar que el grado de meteorización de los materiales, representados en dos ángulos de fricción diferentes, influye en el análisis de caída de rocas.

### PROPUESTA DE OBRAS DE MITIGACIÓN

En el talud norte del parque Mirador de los Nevados se están presentando procesos de inestabilidad que producen desprendimiento de materiales desde la parte alta del talud, como resultado de acelerados procesos de meteorización que conducen a la falla por volteo.

Se analizó la caída de rocas mediante la modelación de tres secciones del talud, y se asignó un material de roca meteorizada para ángulos de fricción de  $20^\circ$  y  $31^\circ$ . De acuerdo con los resultados obtenidos en la modelación, para velocidades hasta de 1 m/s, aproximadamente, cuando cae la roca queda separada máximo 0,5 m desde la pata del talud; para casos extremos, donde se alcanzaran velocidades superiores ( $v=1,5$  m/s), la roca recorre distancias hasta de 2,5 m desde la pata del talud. En todos los casos, la altura máxima a la que rebota la roca es inferior a 1 m.

La recomendación principal para mitigar el proceso de inestabilidad que se presenta en el talud consiste en la implementación de obras de revegetalización, entre las que se incluye la siembra de enredaderas en la corona y base del talud (285 ml), así como la siembra de árboles por toda la pata (23 un); estas obras se proponen con el fin de generar una cobertura vegetal que proteja el talud

de la exposición directa a cambios climáticos que originan procesos de meteorización. Complementariamente, se proponen obras de drenaje a través de una cuneta de coronación (139 ml) para manejo de la escorrentía, ya que por la topografía y el régimen de lluvias, el agua puede discurrir por la cara del talud. Entre las obras de protección para poder habilitar el sendero peatonal existente se propone una barrera de contención de los bloques rocosos que se están desprendiendo, mediante la construcción de gaviones en piedra colocados hacia la pata del talud ( $216 \text{ m}^3$ ).

A continuación se hace una breve descripción de las obras propuestas:

- Siembra de enredaderas (tipo curubos *passiflora*, por ejemplo) hacia la corona y la base del talud; las enredaderas son plantas que, bien ubicadas y seleccionadas, cumplen la función de dar sombra y frutos. Estas plantas también contribuirán a mitigar el proceso de meteorización del talud, y preservarán las condiciones paisajísticas del entorno.
- Muro de gaviones en piedra, de dos niveles de altura, cimentado a 0,3 m de profundidad, ubicado por la pata del talud. La longitud total de esta obra es de 72 m. La función del muro consiste en generar una barrera de protección, limitando la trayectoria de caída de bloques, los cuales quedarían acumulados hacia el trasdós de la obra, actuando como relleno.
- Se recomienda colocar geotextil no tejido por el trasdós de la estructura, para asegurar la retención de partículas finas. Para poder habilitar el sendero peatonal existente, será necesario remover parte del material desprendido, el cual está acumulado hacia la pata del talud.
- Barrera arbórea bordeando el muro de gavión proyectado, mediante siembra de árboles de bajo porte, de raíces poco profundas, separados cada 3 m; en total se requieren unos 26 árboles, los cuales cubrirán los gaviones propuestos para disminuir el impacto visual de estas obras con el paisaje del parque. Complementariamente, la barrera arbórea actuará como método de protección contra los procesos de meteorización presentes en el macizo rocoso. Para la arborización, se recomiendan especies nativas tipo laurel de cera (*Myrica pubescens*) u otras especies de rápido crecimiento y una profundidad radicular moderada, tipo arbustos.

- Cuneta de coronación en concreto de 1,4 m de base y de 139 m de longitud, bordeando la corona del talud, hasta descolar en una caja recolectora en concreto (1,4 m x 1,2 m x 0,9 m) con control de sólidos flotantes, la cual se ubicará antes de cruzar unas viviendas existentes en el sector; de esta caja, el agua será conducida por una tubería de PVC de 6", la cual conectará aguas abajo, con una estructura de drenaje existente. Se propone construir la cuneta de forma escalonada, la cual podrá servir de sendero peatonal, ya que se ubicará en el actual camino por donde transitan los habitantes del sector.

## CONCLUSIONES

- Las rocas arcillosas se encuentran comúnmente en las obras de ingeniería de Colombia, entre las que sobresalen las lutitas y arcillolitas, las cuales, en la mayoría de los casos, exhiben un cambio continuo en sus propiedades mecánicas. Estas rocas son muy vulnerables a los efectos ambientales por la acción climática, en la que se producen ciclos de humedecimiento y secado por la exposición a la acción atmosférica, conduciendo a la degradación de los materiales y a reducciones de la resistencia.
- Para estudiar la influencia de la degradabilidad de las rocas en los parámetros de resistencia de los materiales de la formación Guaduas, al noroccidente de Bogotá, se analizó el talud rocoso del costado norte del parque Mirador de los Nevados, el cual está constituido por intercalaciones de arcillolitas y areniscas. Se estudió la roca arcillolita en tres estados: intacto, parcialmente meteorizado y completamente meteorizado, obteniéndose como resultado reducciones hasta del 94 % en la resistencia de los materiales con un incremento en el grado de meteorización, alterando drásticamente sus condiciones originales.
- El parámetro de resistencia que en mayor medida se ve afectado con el grado de meteorización es la cohesión, la cual en estado intacto presenta valores promedio de 32,6 t/m<sup>2</sup>, reduciéndose a valores promedio de 0,23 t/m<sup>2</sup> en el estado totalmente meteorizado; el ángulo de fricción se reduce de 31° a 20° para los estados de la roca intacto y totalmente meteorizado, respectivamente.
- En el talud norte del parque Mirador de los Nevados se presenta el desprendimiento de materiales y caída de bloques, debido a la ocurrencia de procesos de meteorización física del macizo rocoso que ocasiona la falla por volteo, lo cual se refleja en un deterioro acelerado de la calidad de los materiales
- Se realizaron pruebas índice y de resistencia, y se encontraron relaciones entre éstas para tres niveles de meteorización. Se obtuvieron los siguientes resultados: existe una relación inversamente proporcional entre la resistencia y los resultados de contenido de la humedad, porosidad, límites de Atterberg e índice de liquidez, en la que se evidencia una reducción de la resistencia con el aumento en estos parámetros, así como con el grado de meteorización de la roca. Por otra parte, la resistencia de la roca se incrementa con la disminución del grado de meteorización y con el aumento en parámetros como el peso unitario del material; la resistencia tiende a reducirse a medida que se incrementa la gravedad específica, pero no se presenta una tendencia clara de la variación de este parámetro entre niveles de meteorización.
- Se correlacionaron los resultados de humedad con los límites de Atterberg a través del índice de liquidez, el cual es un indicativo de la historia de esfuerzos al que ha estado sometido el material, para los tres estados de la roca: intacto, parcialmente meteorizado y completamente meteorizado. La correlación obtenida con un buen coeficiente de calibración (R2 de 0,90) puede usarse para taludes de la formación Guaduas en condiciones similares, donde se presenta algún grado de meteorización:
 
$$\tau = 0,8716e^{-2,436IL}$$
- Se efectuaron análisis de estabilidad para tres estados de meteorización de los materiales del talud, donde se obtiene una amplia reducción en el factor de seguridad a medida que aumenta el grado de meteorización, disminuyendo hasta en un 65 % este valor cuando se pasa del estado intacto de la roca a totalmente meteorizado, modelando el talud en condiciones saturadas.
- Debido a la situación actual de desprendimiento de materiales y caída de bloques rocosos, producto de la falla al volteo que se está presentando en el talud y por las condiciones de meteorización a la que se encuentra sometido, se representó la trayectoria de caída de bloques rocosos, modelando dos condiciones del macizo: en estado intacto y en estado meteorizado.

- Se propusieron medidas correctivas del problema de inestabilidad que actualmente presenta el talud norte del parque Mirador de los Nevados. La principal recomendación está enfocada hacia obras de revegetalización, entre las que se incluyen siembra de enredaderas en la corona y base del talud, así como la siembra de árboles de bajo porte hacia la pata del talud. De manera complementaria, se propone la construcción de una cuneta de coronación en concreto y de una barrera de contención de los bloques desprendidos, mediante la construcción de un muro en gaviones hacia la pata del talud.
- En la mayoría de los proyectos en los que se involucra la roca como material de construcción o existe la presencia de taludes rocosos no se tiene en cuenta su grado de meteorización, el cual altera sus propiedades, reduciendo su resistencia y potenciando las probabilidades de que el material falle y no se comporte como una roca sino como suelo.
- Para control de procesos de meteorización tradicionalmente se emplean las coberturas, las cuales pueden ser vegetales, con mortero o con biomantos. Para la situación del parque se recomienda una cobertura vegetal, siguiendo la sucesión natural vegetal.
- Para reflejar una condición real del análisis de meteorización de las rocas y su influencia en el comportamiento de los materiales, es recomendable comparar los resultados obtenidos en el laboratorio con los que realmente se somete la roca *in situ*, evaluando la velocidad de meteorización.
- Se recomienda ejecutar estudios de meteorización para materiales de otras formaciones, como la Bogotá y el Cacho, o aquellas en las cuales predominan las lutitas.

## RECOMENDACIONES

- La formación Guaduas se encuentra en la cordillera Oriental del país y aflora en muchas localidades. Las obras de ingeniería que se van a desarrollar necesariamente tendrán que involucrarse con los materiales de esta formación, los cuales podrían tener procesos de meteorización. Estas correlaciones representan el comportamiento de dicha formación. Para otras formaciones habrá que hacerse un análisis similar.

## REFERENCIAS

- DAMA & Universidad Nacional de Colombia (1997). Recuperación morfológica y ambiental de la cantera de Suba. Convenio 025/96. Bogotá.
- Farah, R. (2011). Correlations between index properties and unconfined compressive strength of weathered Ocala limestone. University of North Florida.
- García, M. & Moya, J.E. (1998). *Manual de estabilidad de taludes*, Invías (1.ª ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Hoek, E. & Bray, J.W. (1974). *Rock Slope Engineering* (revised 3rd ed.).
- Torres, M.C. (2010). Síntesis del estado del conocimiento sobre el comportamiento esfuerzo - deformación y degradabilidad de rocas lodosas. Bogotá: Colciencias y Universidad Nacional de Colombia.