

# Propuesta metodológica para la caracterización geotécnica de un suelo tropical derivado de rocas volcánicas

## Methodological proposal for the geotechnical characterization of a tropical soil derived from volcanic rocks

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.15.2.2019.06>

Artículo de investigación científica. Fecha de Recepción: 31/10/2018. Fecha de Aceptación: 14/05/2019

**Alan Aparicio-Ortubé** 

Universidad Nacional de Colombia. Medellín (Colombia)  
aaparicioo@unal.edu.co

**Lizeth Viviana Camelo-Espinosa** 

Universidad Nacional de Colombia. Medellín (Colombia)  
lcameloe@unal.edu.co

**Carlos Mario Henao-Yepes** 

Universidad Nacional de Colombia. Medellín (Colombia)  
cmhenaoy@unal.edu.co

**Ana María Londoño-Luján** 

Universidad Nacional de Colombia. Medellín (Colombia)  
anmlondonolu@unal.edu.co

**Eileen Carolina Salgado-Correa** 

Universidad Nacional de Colombia. Medellín (Colombia)  
esalgado@unal.edu.co

**María Camila Sierra-Hernández** 

Universidad Nacional de Colombia. Medellín (Colombia)  
mcsierrah@unal.edu.co

**Eduard Danilo Vanegas-Chaverra** 

Universidad Nacional de Colombia. Medellín (Colombia)  
edvanegasc@unal.edu.co

**Yamile Valencia-González** 

Universidad Nacional de Colombia. Medellín (Colombia)  
yvalenc0@unal.edu.co

Para citar este artículo:

A. J. Aparicio-Ortubé, L. Camelo; C. M. Henao-Yepes, et al., "Propuesta metodológica para la caracterización geotécnica de un suelo tropical derivado de rocas volcánicas", INGE CUC, vol. 15, no. 2, pp. 56-65, 2019. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.15.2.2019.06>

### Resumen

**Introducción**– Los suelos que se encuentran en zonas tropicales, al estar sometidos a factores que favorecen el proceso de meteorización química, tienden a presentar propiedades geotécnicas particulares frente a los encontrados en zonas templadas. Aspectos primordiales como el grado de meteorización y génesis del material, que tienden a influenciar las propiedades del suelo, no son tomados en cuenta por las metodologías que pretenden estudiar las características de dichos suelos. En consecuencia, son insuficientes, requiriéndose de procedimientos complementarios para una adecuada descripción de las características geotécnicas del material.

**Objetivo**– Proponer una metodología para la caracterización de un suelo tropical derivado de rocas volcánicas. Esto como un intento para tratar de describir adecuadamente este tipo de suelos y poder extrapolarlo a suelos de regiones tropicales derivados de diferentes rocas. Para tal efecto, se tomó como caso de estudio un suelo tropical situado en un talud al suroccidente del municipio de Caldas en Antioquia (Colombia).

**Metodología**– Se desarrolló un programa experimental para evaluar las propiedades físicas, químicas, mineralógicas e hidro-mecánicas del material de la zona de estudio.

**Resultados**– Se encontró que la relación entre el grado de meteorización y génesis del material tienen una influencia en las propiedades geotécnicas evaluadas.

**Conclusiones**– Con esta propuesta metodológica se pudo evaluar aspectos importantes como el grado de meteorización y génesis del material, lográndose a obtener no sólo parámetros geotécnicos básicos para el análisis, diseño y ejecución de proyectos civiles sino también una mejor descripción del material.

**Palabras clave**– Suelo tropical; roca volcánica; caracterización geotécnica

### Abstract

**Introduction**– Soils found in tropical zones, as they are subject to factors that favour the chemical meteorisation process, tend to have particular geotechnical properties as opposed to those found in temperate zones. Fundamental aspects such as the degree of meteorization and genesis of the material, which tend to influence soil properties, are not taken into account by the methodologies intended to study the characteristics of these soils. Consequently, they are insufficient, requiring complementary procedures for an adequate description of the geotechnical characteristics of the material.

**Objective**– To propose a methodology for the characterization of a tropical soil derived from volcanic rocks. This is an attempt to adequately describe this type of soil and extrapolate it to soils of tropical regions derived from different rocks. For this purpose, a tropical soil located on a slope southwest of the municipality of Caldas in Antioquia (Colombia) was taken as a case study.

**Methodology**– An experimental program was developed to evaluate the physical, chemical, mineralogical and hydro-mechanical properties of the material in the study area.

**Results**– It was found that the relationship between the degree of weathering and the genesis of the material have an influence on the geotechnical properties evaluated.

**Conclusions**– With this methodological proposal it was possible to evaluate important aspects such as the degree of meteorization and genesis of the material, obtaining not only basic geotechnical parameters for the analysis, design and execution of civil projects but also a better description of the material.

**Keywords**– Tropical soil; volcanic rock; geotechnical characterization

## I. INTRODUCCIÓN

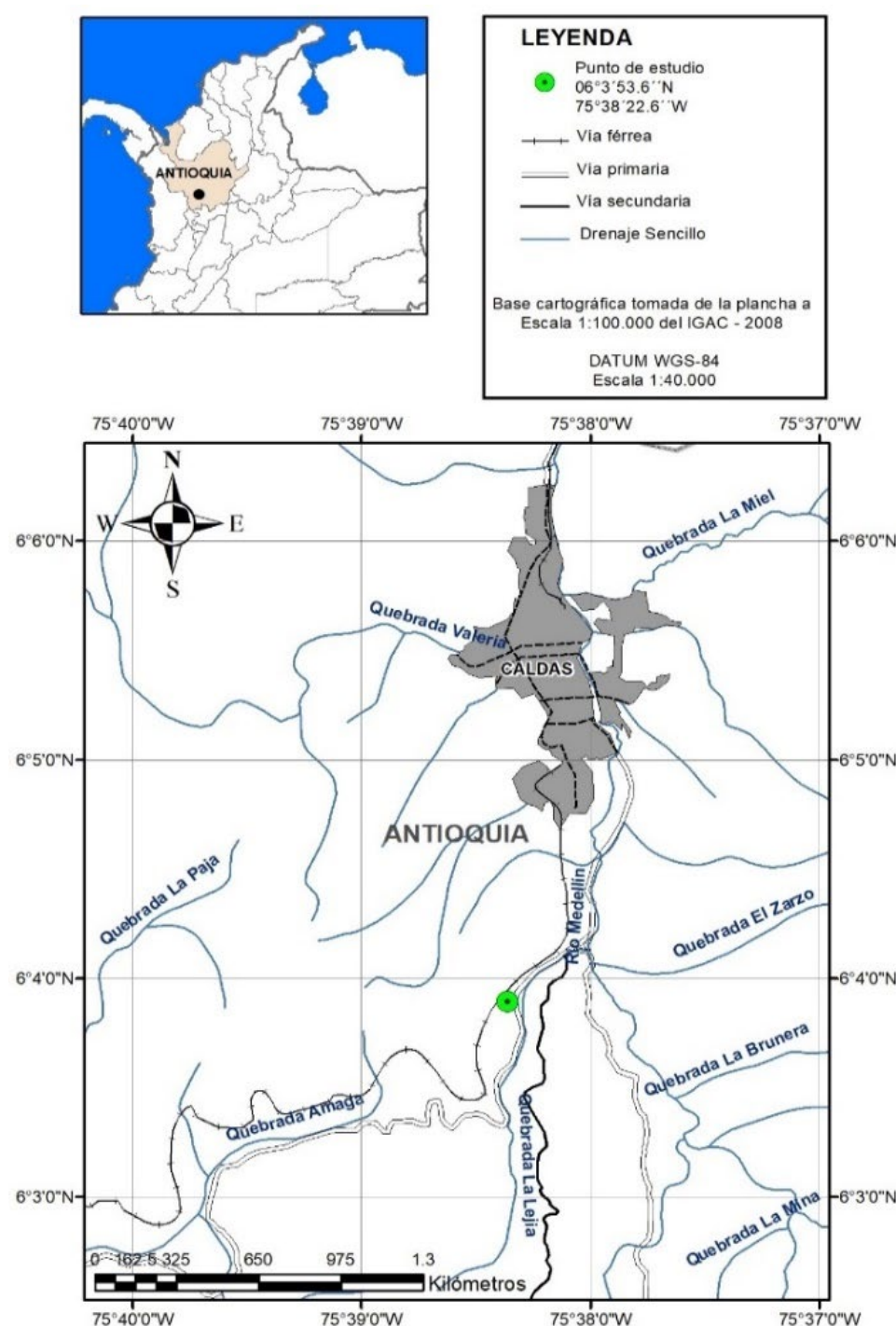
Los suelos localizados entre los paralelos  $30^{\circ}$  N y  $30^{\circ}$  S, es decir entre los trópicos, son denominados suelos tropicales. Estos suelos al estar sometidos a factores que favorecen el proceso de meteorización química, entre ellos la lluvia, la temperatura y el cambio abrupto de éstas durante el día, como los más dominantes [1], tienden a presentar propiedades geotécnicas particulares. Más aún si consideramos el tipo de roca del cual provinieron.

Diferentes investigaciones [2], [3], [4], [5], al observar diferencias entre las propiedades de los suelos tropicales frente a los de zonas templadas sugirieron su estudio bajo enfoques adicionales para intentar describir sus propiedades. Dando paso así a la creación de sistemas de clasificación para suelos tropicales.

La constante demanda de proyectos civiles y la falta de procedimientos experimentales para describir las propiedades de los suelos tropicales ha impulsado el trabajo investigativo [6], [7], [8], [9], para desarrollar técnicas y criterios de análisis en este tipo de suelos.

En la actualidad se disponen de varios procedimientos para describir las propiedades de los suelos tropicales, pero no existe una metodología de caracterización que las reúna, brinde una descripción del material desde varios enfoques y además posibilite obtener parámetros geotécnicos básicos para el análisis, diseño y ejecución de proyectos civiles. Es por esta razón, que la metodología propuesta en este artículo pretende articular el conocimiento existente como un intento para describir adecuadamente las propiedades de un suelo tropical derivado de rocas volcánicas desde un enfoque físico, químico, mineralógico, estructural e hidro-mecánico.

Para este propósito, se han ejecutado ensayos complementarios como granulometría por hidrómetro con y sin defloculante, miniatura compactada tropical (expedita), determinación del , determinación del punto de carga cero, difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido, corte directo, succión por el método de papel filtro, consolidación duplo-edométrica, pinhole test y desagregación, tomando como caso de estudio un suelo tropical situado en un talud al suroccidente del municipio de Caldas (Antioquia, Colombia) (Fig. 1).



**Fig. 1.** Zona de estudio (Caldas, Antioquia-Colombia).  
Fuente: Modificado de IGAC [11].

La zona de estudio se localiza sobre la margen derecha de la vía Caldas-Amagá (6°3'53.6"N 75°38'22.6"W, altitud 1,867 msnm) en el municipio de Caldas (Antioquia, Colombia). Aproximadamente a 25 km desde la ciudad de Medellín en dirección sur (Fig. 1). Regionalmente, se ubica al sur de la cuenca del río Medellín, donde se presenta una temperatura promedio anual de 21°C, un promedio anual de lluvias entre 2.500 y 3.000 mm, una humedad relativa de 77% y una altitud que varía entre 1.000 y 2.000 msnm [10].

El Miembro Volcánico (Kivq) del Complejo Quebradagrande (CQ) localizado en el flanco occidental de la Cordillera Central, es la unidad geológica de interés para el presente caso de estudio. Dicho miembro está conformado por rocas básicas de edad cretácica: basaltos, espilitas, diabasas, gabros y cantidades menores de andesitas, andesitas basálticas, brechas y tobas [12]. Estas rocas se componen principalmente por plagioclasa cálcica, clinopiroxeno, en menor proporción anfíbol y como probables minerales accesorios titanita y opacos. Presentan alteración propilitica, sericitica y deformación dúctil y frágil asociada a la tectónica compleja de la zona, en donde el CQ se encuentra limitado al Este por la Falla de San Jerónimo y al Oeste por la Falla Silvia-Pijao, que lo separa del Complejo Cajamarca y del Complejo Arquía, respectivamente [13].

En un marco geomorfológico, la zona de estudio se localiza en una zona de colinas redondeadas medias a altas, con cimas planas a ligeramente convexas, las cuales hacen parte de la unidad de paisaje Valle de Aburrá Superior. Esta unidad geomorfológica es reconocida como colinas en suelos residuales, ubicándose cerca de los lomos o hacia la base de los mismos, presentando pendientes moderadas y bajo grado de incisión [12].

El perfil de meteorización se presenta en un talud de aproximadamente 15 m de alto, correspondiente a un suelo saprolítico compuesto por limos arcillosos de color amarillo ocre, del cual se extrajeron muestras de suelo a una profundidad de 1.00 m. De acuerdo a los grados de meteorización [5] se clasifica como un Horizonte IC, el cual conserva las estructuras originales de la roca parental. Estas estructuras heredadas incluyen diaclasas, fallas y minerales con orientaciones similares a la masa rocosa. En los planos de debilidad se presentan minerales secundarios producto de la alteración de los minerales primarios que contienen hierro y/o aluminio.

## II. METODOLOGÍA

Las propiedades geotécnicas de los suelos tropicales están principalmente en función del grado de meteorización y de su génesis, por lo tanto, una descripción sobre la presencia de agregaciones, los minerales constituyentes y la estructura del suelo son de gran

importancia no sólo para determinar sus propiedades y clasificación sino también para describir y comprender su comportamiento hidro-mecánico.

En ese sentido, la metodología de caracterización propuesta en este artículo sugiere la descripción del material en cinco etapas: física, química, mineralógica, estructural e hidro-mecánica.

Para la caracterización del suelo tropical, en la zona de estudio se extrajeron del talud a la profundidad de 1.00 m, muestras alteradas para la descripción de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas, y muestras de alta calidad en bloque mediante la técnica de apique para la descripción de su estructura y comportamiento hidro-mecánico.

### A. Caracterización física

De manera convencional, la caracterización física del suelo y su clasificación se determinan a través de ensayos como:

- Contenido de humedad natural [14].
- Gravedad específica de los sólidos [15].
- Límites de consistencia [16].
- Granulometría por tamizado [17].
- Granulometría por hidrómetro con defloculante (CD) [18].

Sin embargo, aspectos como la presencia de agregaciones, la mineralogía y el grado de meteorización en función de sus propiedades físicas no son tomados en cuenta. Por lo tanto, se proponen los siguientes ensayos:

- *Granulometría por hidrómetro sin defloculante (SD)* [19]. Sigue el mismo procedimiento de [18], pero sin el uso de defloculante (hexametafosfato de sodio).
- *Miniatura compactada tropical (expedita)* [20]. Mide la contracción diametral de especímenes de 20 mm de diámetro y 5 mm de altura después de ser secados y la resistencia a la penetración por una punta de acero de 1.25 mm de diámetro y una masa de 10 g después de ser rehumedecidos.

Para evitar cualquier efecto químico a través del secado al horno o aire, los ensayos como límites de consistencia, MCT (expedita) y gradación fueron realizados con muestra en su humedad natural.

### B. Caracterización química

Para determinar el grado de meteorización en función de sus propiedades químicas y clasificar el suelo de acuerdo al predominio de óxidos e hidróxidos de hierro y/o aluminio o arcillominerales se proponen el siguiente ensayo y procedimiento:

- *Determinación del  $\Delta pH$*  [21]. Mide el *ph* del material en dos soluciones, una con cloruro de potasio (KCl) y la otra en agua destilada (H<sub>2</sub>O).
- *Determinación del punto de carga cero (PZC)*. La aplicación de este concepto permite estimar si el material tiende a flocularse o dispersarse.

### C. Caracterización mineralógica

La identificación de los minerales que constituyen el suelo representa una medida adecuada para correlacionar y validar los resultados encontrados en la caracterización física y química. Por lo tanto, se propone el siguiente ensayo:

- *Difracción de rayos X (DRX)*. Consiste en registrar las fases cristalinas del espécimen a través de su exposición a un haz de rayos X.

### D. Caracterización estructural

La visualización de la estructura del suelo posibilita describir con mayor detalle aspectos como la textura, vacíos (presencia de macroporos y/o microporos) y agregaciones, los cuales brindan un indicio sobre comportamiento mecánico del material, además de verificar visualmente los resultados encontrados en la caracterización física, química y mineralógica. Por lo tanto, se propone el siguiente ensayo:

- *Microscopía electrónica de barrido (MEB)*. Consiste en obtener una imagen de alta resolución de zonas microscópicas de la superficie del espécimen a través de su exposición a un haz de electrones.

### E. Caracterización hidro-mecánica

La descripción del comportamiento hidro-mecánico del material en relación con su resistencia y fenómenos asociados, como el colapso y la erodabilidad, son fundamentales para la construcción de modelos numéricos, diseño, ejecución, análisis de riesgo y amenaza de proyectos civiles, entre otros, tanto para un enfoque desde la mecánica de suelos clásica (suelo-agua) como para la mecánica de suelos no saturados (suelo-agua-aire). Por lo tanto, de forma general se proponen los siguientes ensayos:

- *Corte directo* (consolidado drenado) [22]. Se realiza en especímenes en estado sumergido y humedad natural.
- *Succión por el método del papel filtro* [23] y [8]. Consiste en determinar la curva característica suelo-agua mediante una trayectoria mixta a partir de especímenes de 50 mm de diámetro y 20 mm de altura. Éstos se humedecen y secan a partir de la humedad natural para luego ser puestos en contacto con papeles filtro y poder determinar la succión matricial.
- *Consolidación duplo-edométrica* [24]. Se realiza en especímenes en estado sumergido y humedad natural.
- *Pinhole test* [25]. Determina el caudal a diferentes cargas hidráulicas, a través de un orificio perforado de 1 mm en un espécimen cilíndrico de 38 mm de longitud.

- *Desagregación* [26]. Estima cualitativamente la erodabilidad del suelo a través de la inundación total y/o parcial de especímenes cúbicos de 60 mm. Los especímenes son sumergidos gradualmente en intervalos tiempo y se evalúa visualmente su estructura para cada intervalo.

## III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### A. Caracterización física

Las propiedades índice del suelo y su clasificación [27] para el presente caso de estudio son (Tabla 1):

TABLA 1. PROPIEDADES ÍNDICE Y CLASIFICACIÓN.

$e$	$w$ [%]	$G_s$	$LL$ [%]	$IP$ [%]	USCS	MCT
1.93	57	2.68	59	27	MH	NG'

Fuente: Autores.

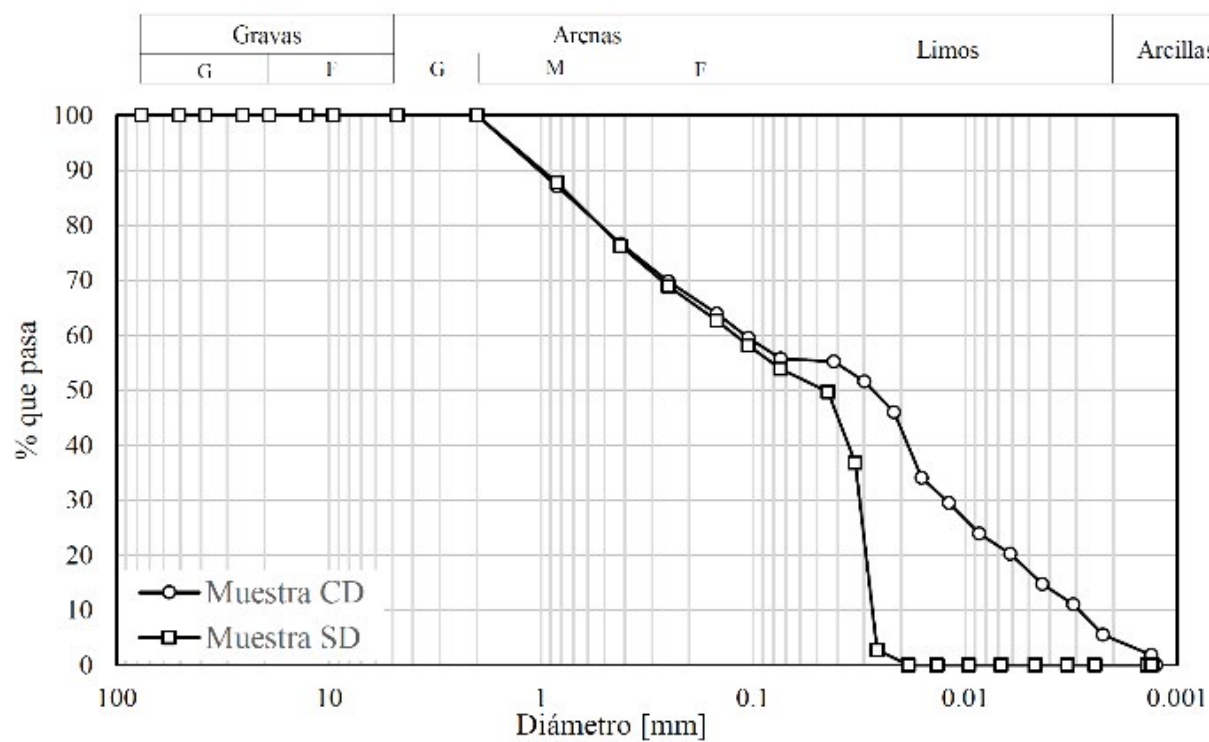
A partir de los resultados obtenidos por ensayos convencionales se puede observar que hay correlación entre el índice de vacíos ( $e$ ) y el contenido de humedad ( $w$ ), puesto que a mayor índice de vacíos ( $e$ ) mayor contenido de humedad ( $w$ ). La proximidad entre el contenido humedad ( $w$ ) y el límite líquido ( $LL$ ) indican que el suelo puede llegar a desarrollar una respuesta dúctil al corte [28]. Dado que el porcentaje del material fino es mayor al 50% (Tabla 2), los límites de consistencia determinan la clasificación, por tanto, el suelo se clasifica como limo de alta plasticidad (MH).

TABLA 2. PORCENTAJE DE MATERIAL CD Y SD.

Material	CD	SD
% arena	44.24	46.15
% limo	50.24	53.85
% arcilla	5.52	0.00

Fuente: Autores.

El ensayo de gradación por tamizado e hidrometría, variando en el último el uso de defloculante, posibilita obtener una estimación de las agregaciones presentes en el suelo a través del contenido de agregación [29], obteniéndose 1 %. Además, de proporcionar un indicio sobre el efecto que puede sufrir el material ante una posible desagregación bajo procesos químicos. Los resultados obtenidos, resumidos en la Fig. 2 y Tabla 2, muestran una tendencia similar, con una variación en la fracción correspondiente a las partículas de limo, con lo que se puede concluir que el suelo presenta un contenido de agregación bajo (1%) y en consecuencia más estable ante posibles procesos químicos de desagregación.



**Fig. 2.** Curva granulométrica.  
Fuente: Autores.

La clasificación del suelo con base en el ensayo MCT (expedita) representa un método práctico para describir el grado de meteorización del suelo, al tomar en cuenta propiedades físicas del material, como la contracción diametral y la resistencia a la penetración. Los resultados obtenidos, contracción diametral de 1.75 mm y penetración de 5 mm, indican la clasificación del suelo como NG'. Este grupo comprende principalmente suelos del tipo saprolítico arcilloso derivado de roca sedimentaria arcillosa o cristalina, pobre en cuarzo y rica en piroxenos y feldespatos cálcicos. Lo cual tiene concordancia con la génesis del material, al ser las rocas volcánicas, rocas cristalinas.

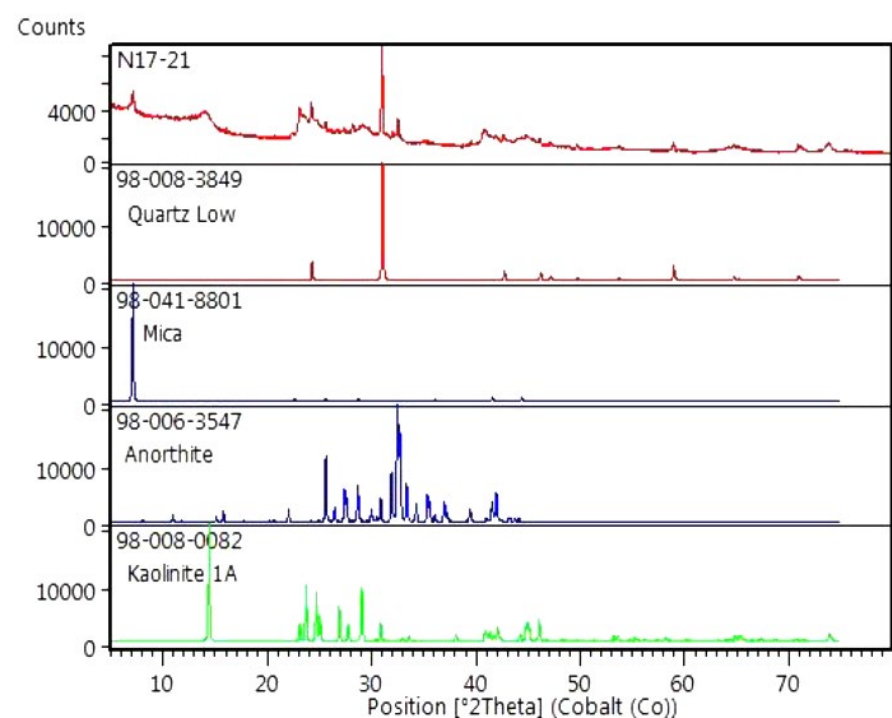
### B. Caracterización química

La determinación del  $\Delta pH$  posibilita estimar la predominancia de arcillominerales o en su defecto óxidos e hidróxidos de hierro y/o aluminio, tomando en cuenta las propiedades químicas del material. El resultado obtenido indica un valor de -0.38, lo cual representa un predominio de arcillominerales. Del mismo modo, mediante la determinación del punto de carga cero (PZC), el resultado indica un valor 3.18 en relación al pH del agua que es 4.19, con lo cual se puede concluir que el material tiende a dispersarse.

### C. Caracterización mineralógica

Dado que la estimación del grado de meteorización es vital para caracterizar y clasificar adecuadamente un suelo tropical, es necesario realizar una prueba de composición mineral para correlacionar y validar los resultados obtenidos a través de procedimientos físicos y químicos. Los resultados del ensayo DRX, representados en la Fig. 3, confirman la composición mineralógica de las rocas básicas que constituyen el Miembro Volcánico del CQ, descrito en la sección de geología. Asimismo, la estimación proporcional de los principales minerales consti-

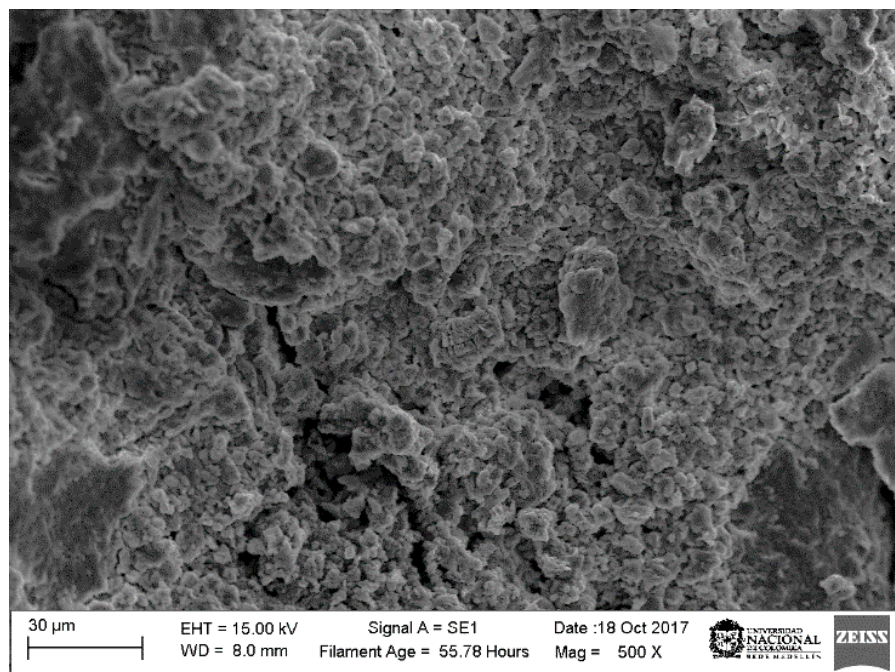
tuyentes en el material como la caolinita (mayor proporción), anortita (menor proporción), cuarzo y mica (baja proporción), los cuales son producto de la alteración de la plagioclasa cálcica (mineral primario predominante) y de alteraciones sericíticas, confirman los resultados obtenidos en la caracterización física y química, por lo tanto, se concluye que el material se clasifica como un suelo tropical saprolítico derivado de rocas volcánicas.



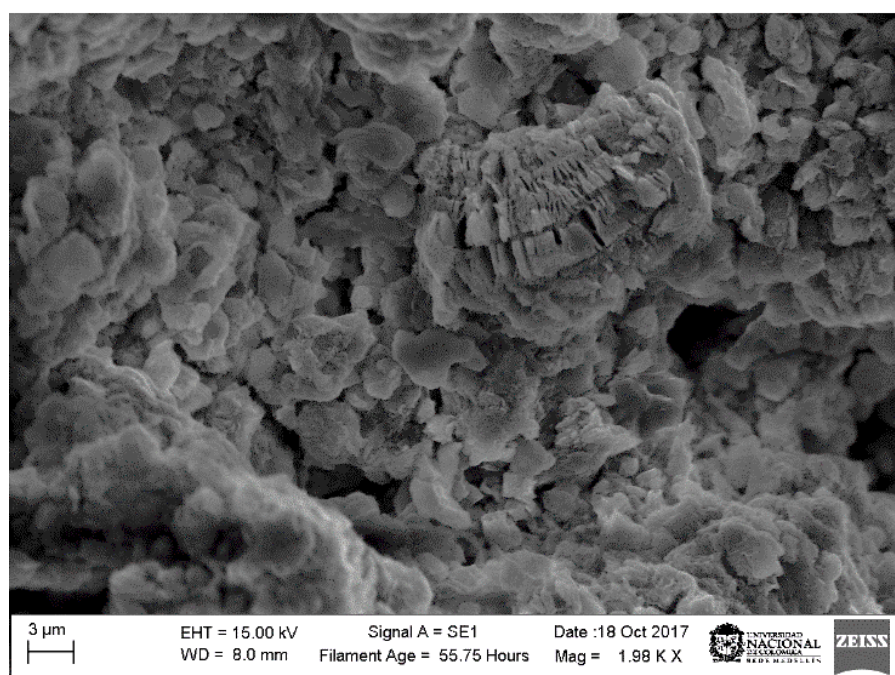
**Fig. 3.** Resultados DRX.  
Fuente: Grupo Catalizadores y Adsorbentes, UdeA.

### D. Caracterización estructural

La visualización de la estructura del material, a través del MEB, posibilita describir con mayor detalle sus características. De acuerdo a Fig. 4 se observa como el material tiene un alto contenido de minerales con morfología laminar, correspondiente principalmente a la caolinita (arcillomineral), lo cual concuerda con el resultado del DRX. De igual forma, la presencia notoria de macroporos en el material, muestra una relación con el índice de vacíos ( $e$ ) reportado en las propiedades índice (Tabla 1).



(a) MEB a 500 X.



(b) MEB a 1.98 K X.

**Fig. 4.** Resultados MEB.  
 Fuente: Grupo ZEISS, UNAL.

La baja presencia de agregaciones y el alto contenido de caolinita (arcillomineral) validan los resultados

expuestos en la caracterización física, química y mineralógica. Por lo tanto, se corrobora que el material se clasifica como un *suelo tropical saprolítico* derivado de rocas volcánicas.

La presencia notoria de macroporos en el material y un contenido de humedad ( $w$ ) muy próximo al estado saturado dan un *indicio* de que la estructura del suelo es estable ante el fenómeno de colapso y erodabilidad.

### E. Caracterización mecánica

#### 1) Corte directo (consolidado drenado)

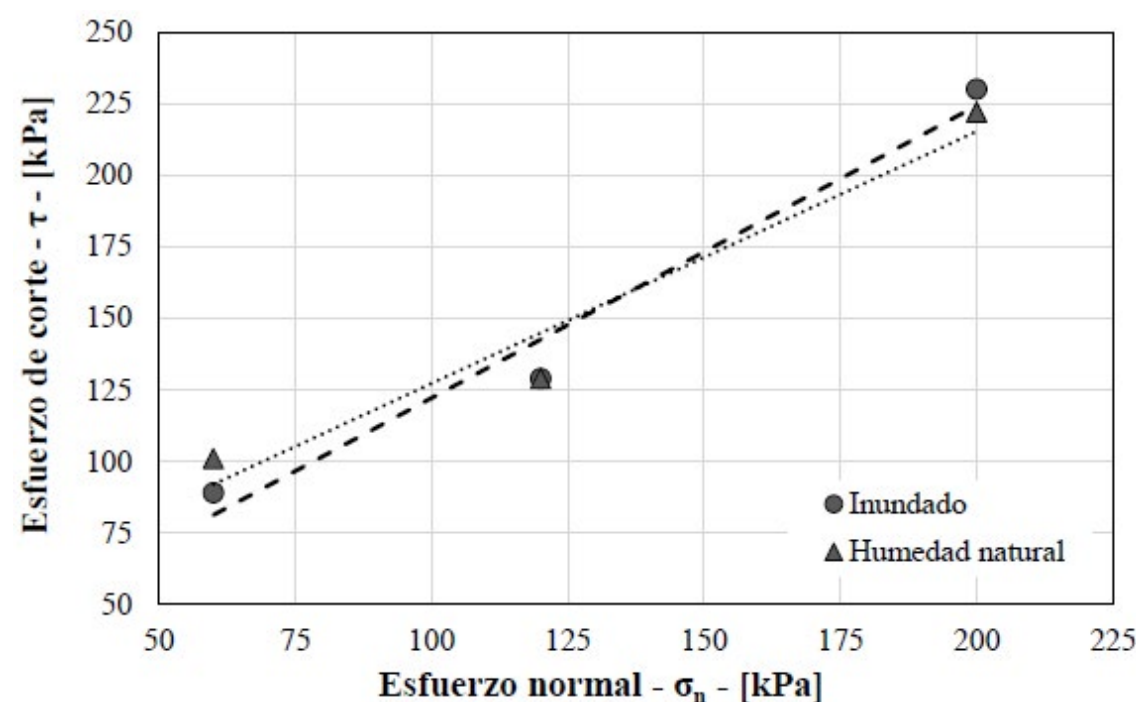
La estimación de los parámetros mecánicos del suelo, intercepto ( $c'$ ) y ángulo de fricción ( $\phi'$ ), se realizó en condiciones de humedad natural e inundada. En la etapa de consolidación, las muestras fueron sometidas a esfuerzos normales de 60, 120 y 200 kPa. En la etapa de corte, las muestras fueron sometidas a una tasa de velocidad de deformación de 0.06 mm/min y se estableció como criterio de falla una deformación unitaria del 15%. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 5 y Tabla 3.

TABLA 3. RESULTADOS CD.

Estado de la muestra	$c'$ [kPa]	$\phi'$ [°]
Inundado	20	46
Humedad natural	39	41

Fuente: Autores.

La diferencia observada en el intercepto ( $c'$ ) es resultado de la contribución de la succión en la resistencia a corte del suelo (muestra en condiciones de humedad natural). Esta variación sólo se puede corroborar a través de este procedimiento de análisis, es decir, en condiciones de humedad natural e inundada.



**Fig. 5.** Resultados CD.  
 Fuente: Autores.

2) *Succión por el método del papel filtro*

La curva característica suelo-agua fue obtenida mediante la técnica del papel filtro con el objetivo de estimar la contribución de la succión en la resistencia a corte del suelo en función de su contenido de humedad ( $w$ ). La estimación de esta propiedad es fundamental para la modelación de fenómenos en suelos no saturados.

Dado que la zona de estudio no está sometida a procesos significativos de concentración de sales, sólo se determinó la componente asociada a la succión matriz, la cual está en función del tipo de partícula y su arreglo estructural (matriz del suelo). La curva característica suelo-agua se muestra en la Fig. 6.

En la Fig. 6 se observa una región amplia de macroporos, en concordancia con lo observado en la caracterización física y estructural. También se puede observar en la zona como a pequeñas variaciones en el contenido de humedad ( $w$ ), la contribución de la succión crece rápidamente.

3) *Consolidación duplo-edométrica*

La colapsabilidad del suelo se estimó a través del Índice de Colapso ( $IC$ ). Este concepto fue investigado [9] para evaluar este fenómeno a través de ensayos de consolidación unidimensional convencionales en condiciones de humedad natural e inundada.

El ( $IC$ ) del material se determinó para esfuerzos verticales de 1, 31, 62, 124, 248 y 496 kPa. Los resultados se muestran en la Tabla 4 y Fig. 7.

TABLA 4. ÍNDICE DE COLAPSO.

Esfuerzo vertical [kPa]	IC[%]	Gravedad
1	0.09	Nula
31	0.08	Nula
62	0.18	Nula
124	0.28	Nula
248	---	Nula
496	---	Nula

Fuente: Autores.

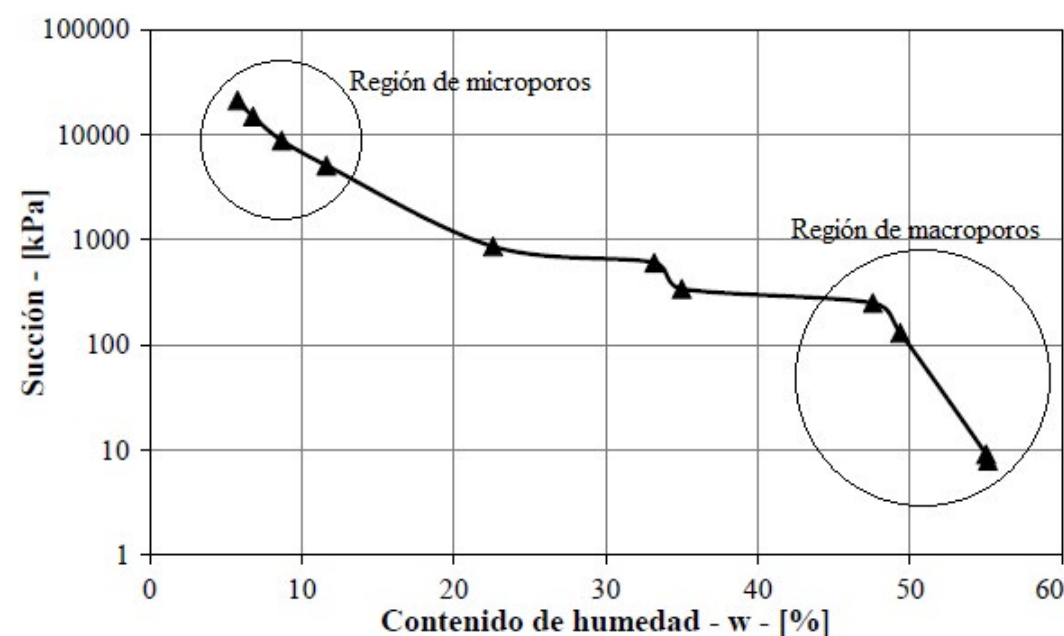


Fig. 6. Curva característica suelo-agua.  
Fuente: Autores.

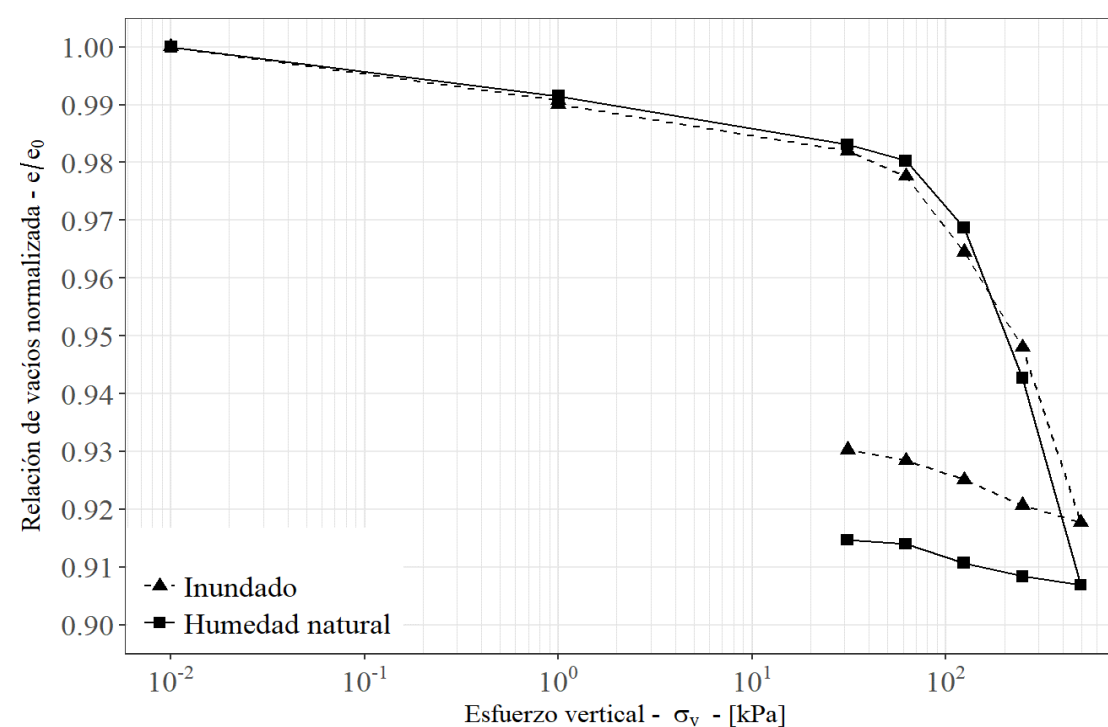
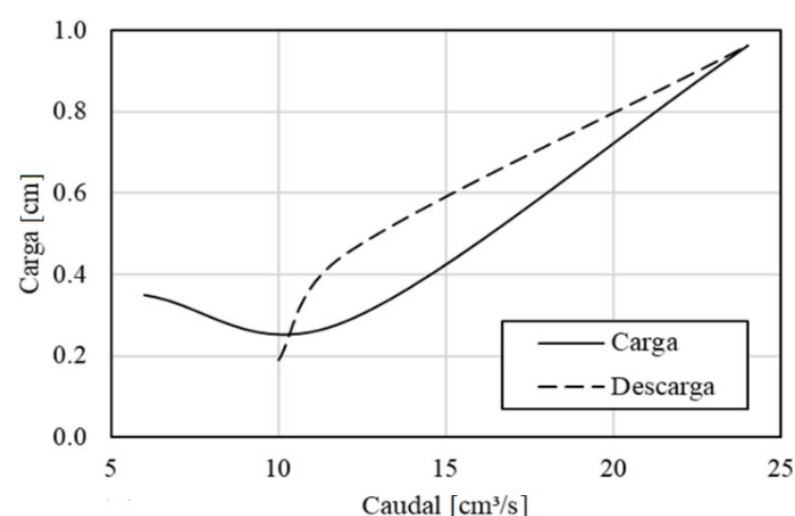


Fig. 7. Resultados duplo-edométrico.  
Fuente: Autores.

En la Fig. 7 se observa un comportamiento similar para las condiciones de humedad natural e inundada. Esto se debe a la proximidad existente entre ambos estados, como se observó en la caracterización física. En consecuencia, se concluye que el suelo presenta una estructura estable y resistente bajo las condiciones de humedad y carga analizadas (Tabla 4).

#### 4) Pinhole test

La resistencia del suelo ante la erosión interna producida por la acción del agua, conocida como *pinning*, se determinó para cargas hidráulicas de 60, 120 y 240 mm con trayectorias de carga y descarga (Fig. 8).



**Fig. 8.** Resultados pinhole.  
 Fuente: Autores.

En la Fig. 8 se observa como para un mismo gradiente hidráulico, la cantidad de fluido drenado fue mayor durante la descarga. Esta diferencia entre las trayectorias indica que el suelo presenta arrastre de partículas coloidales asociado al paso del agua a través del orificio pre-establecido. Adicionalmente durante la descarga, se observó una turbidez, lo cual refleja que el suelo tiende a dispersarse ante la actuación de un flujo en estado saturado, por lo tanto, es susceptible al fenómeno de *pinning*.

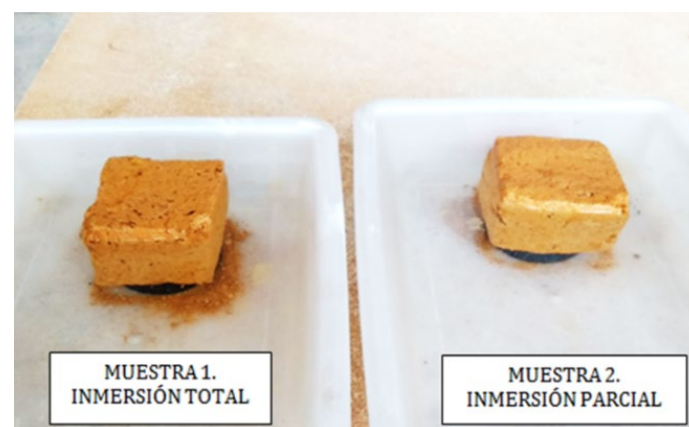
#### 5) Desagregación

La erodabilidad del suelo se estimó de forma cualitativa mediante una simulación física de la fluctuación del nivel freático. El análisis se realizó en diferentes etapas bajo condiciones de inundación parcial y total. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5 y Fig. 9.

TABLA 5. RESULTADOS DESAGREGACIÓN.

Muestra	Altura del agua	Descripción
M1	Base del cuerpo	Intacta
	Inmersión total (24 h)	Intacta
M2	Base del cuerpo	Intacta
	1/3 de la altura	Intacta
	2/3 de la altura	Intacta
	Inmersión total (24 h)	Intacta

Fuente: Autores.



**Fig. 9.** Resultados desagregación.  
 Fuente: Autores.

En la Fig. 9 se observa como la muestra M1, en condiciones de inundación total, presentó un moderado desprendimiento de material coloidal proveniente de las aristas del bloque y de las superficies de diaclasamiento. Adicionalmente, se percibe, después de 24 horas, como la muestra permaneció intacta, sin efectos de expansión, conservando su forma y tamaño original.

Respecto a la muestra M2, en condiciones de inundación parcial, presentó un desprendimiento ligero de material coloidal en menor cantidad a la muestra M1. Del mismo modo se observó, después de 24 horas en condiciones de inundación total, como la muestra permaneció intacta, como era de esperarse.

De manera general se concluye que el suelo no presenta respuesta a fluctuaciones del nivel freático, por lo tanto, *el suelo no es erodable*. Este comportamiento se debe a la baja diferencia entre el contenido de humedad natural y saturado, lo cual reduce el efecto de desaireación en las muestras.

#### IV. CONCLUSIONES

Con la aplicación de esta metodología de caracterización se demuestra la posibilidad de evaluar aspectos importantes de los suelos tropicales, tales como el grado de meteorización, génesis del material, respuesta hidro-mecánica y la relación entre ellos, lográndose de esta manera no sólo obtener parámetros geotécnicos básicos para el análisis, diseño y ejecución de proyectos civiles sino también una mejor descripción del material.

Para el caso de estudio se concluye que el material es un suelo tropical saprolítico derivado de rocas volcánicas, con una baja presencia de agregaciones, un alto contenido de caolinita y una estructura estable para las condiciones mecánicas e hidráulicas de análisis.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín y al Grupo de Geotecnia por el uso de sus instalaciones, licencias y herramientas de análisis.



## REFERENCIAS

- [1] C. D. Ollier, *Weathering*. London: Longman, 1984.
- [2] D. G. Moye, "Engineering geology for the Snowy Mountain scheme," *J. Inst. Eng. Aust.*, no. 27, pp. 287–298, Aug. 1955.
- [3] B. P. Ruxton and L. Berry, "Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong," *Bull. Geol. Soc. Am.*, vol. 68, no. 10, pp. 1263–1292, Oct. 1957. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1957\)68\[1263:WOGAAE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1957)68[1263:WOGAAE]2.0.CO;2)
- [4] A. L. Little, "The engineering classification of residual tropical soils," presented at the *7th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, México D.F., México, 1969, pp. 1–10.
- [5] D. U. Deere and F. D. Patton, "Slope stability in residual soils," presented at the *Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New York, NY, USA, 1971, pp. 87–170.
- [6] J. S. Nogami and D. F. Villibor, "Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias," apresentado no *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia*, Brasil, Set. 21–23, 1981, pp. 30–41.
- [7] J. Camapum, "Étude du comportement mécanique d'une marne compactée," *Tese de doutorado*, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse, França, 1985.
- [8] F. A. M. Marinho, "A técnica do papel filtro para a medição da sucção," apresentado no *Anais do encontro de solos não saturados*, Porto Alegre, RS, Brasil, 1995, pp. 112–125.
- [9] J. E. Jennings and K. Knight, "A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure," presented at the *6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Durban, South Africa, 1975, pp. 99–105.
- [10] "SIAC, Sistema de Información Ambiental Colombia," República de Colombia, Minambiente, 2017. [Online]. Available: <http://www.siac.gov.co/geovisorconsultas>
- [11] "Geoportal Instituto Geográfico Agustín Codazzi," IGAC, 2017. [Online]. Available: <https://geoportal.igac.gov.co/>
- [12] Integral S.A, Universidad EAFIT, Universidad Nacional de Colombia, Inteinsa S.A & Solingral S.A, "Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado," Medellín, Colombia: Consorcio Microzonificación, 2006. <http://hdl.handle.net/20.500.11762/19862>
- [13] G. Rodríguez and L. M. Cetina, "Caracterización petrográfica y química de rocas de corteza oceánica del Complejo Quebradagrande y comparación con rocas de la Unidad Diabasas de San José de Urama," *Boletín Geol.*, vol. 38, no. 3, pp. 15–29, Jul. 2016. <https://doi.org/10.18273/revbol.v38n3-2016001>
- [14] ASTM: D2216-10, "Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010. <https://doi.org/10.1520/D2216-10>
- [15] ASTM: D854-14, "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014. <https://doi.org/10.1520/D0854-14>
- [16] ASTM: D4318-10, "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010. <https://doi.org/10.1520/D4318-10>
- [17] ASTM: D6913-17, "Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis," ASTM International, West Conshohocken, 2017. [https://doi.org/10.1520/D6913\\_D6913M-17](https://doi.org/10.1520/D6913_D6913M-17)
- [18] ASTM: D7928-17, "Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. <https://doi.org/10.1520/D7928-17>
- [19] ABNT: NBR13602-96, "Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo," ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1996.
- [20] J. S. Nogami and D. F. Villibor, *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo, Brasil: Vilibor, 1995.
- [21] M. Lima, "Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas," *Tese Doutorado em Geotécnica*, Fac. de Tecnol. Dept. de Eng. Civ. e Amb., Universidade de Brasília, Brasília, 2003.
- [22] ASTM: D3080/D3080M-11, "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011. [https://doi.org/10.1520/D3080\\_D3080M-11](https://doi.org/10.1520/D3080_D3080M-11)
- [23] ASTM: D5298-16, "Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. <https://doi.org/10.1520/D5298-16>
- [24] ASTM: D2435/D2435M-11, "Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011. [https://doi.org/10.1520/D2435\\_D2435M-11](https://doi.org/10.1520/D2435_D2435M-11)
- [25] ASTM: D4647/D4647M-13, "Standard test methods for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. [https://doi.org/10.1520/D4647\\_D4647M-13](https://doi.org/10.1520/D4647_D4647M-13)
- [26] E. J. Conrado, J. Camapum de Carvalho, F. Bueno da Fonseca, R. M. Macedo, R. Cabral and M. Lima, *Processos erosivos no centro-oeste brasileiro*, FINATEC. Brasília, 2006.
- [27] ASTM: D2487-17, "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. <https://doi.org/10.1520/D2487-17>
- [28] R. D. Holtz, W. D. Kovacs and T. C. Sheahan, *An introduction to geotechnical engineering*. Boston, USA: Pearson Education Inc., 2011.
- [29] M. S. Araki, "Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsáveis do Distrito Federal," *Dissertação de Mestrado*, Dept. de Eng. Civ. e Amb., Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 1997.

**Alan J. Aparicio-Ortubé** es estudiante de Doctorado en Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín). Actualmente es investigador en la Universidad Nacional de Colombia - Grupo de Geotecnia. <https://orcid.org/0000-0003-0114-7779>

**Lizeth Viviana Camelo Espinosa** es Ingeniera Civil de la Universidad de Ibagué (Colombia) y Especialista en Ingeniería Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín). Actualmente es investigadora en la Universidad Nacional de Colombia - Grupo de Geotecnia. <https://orcid.org/0000-0002-4692-5573>

**Carlos Mario Henao Yepes** es Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín) y Especialista en Ingeniería Geotecnia de la misma universidad. Actualmente es investigador en la Universidad Nacional de Colombia - Grupo de Geotecnia. <https://orcid.org/0000-0002-3192-4690>

**Ana María Londoño Luján** es graduada de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín) y Especialista en Ingeniería Geotecnia de la misma universidad. Actualmente es investigadora en la Universidad Nacional de Colombia - Grupo de Geotecnia. <https://orcid.org/0000-0002-8677-9750>

**Eileen Salgado Correa** Ingeniera Civil de la Universidad Cooperativa de Colombia (Sede Medellín) y Especialista en Ingeniería Geotecnia de la misma universidad. Actualmente es investigadora en la Universidad Nacional de Colombia - Grupo de Geotecnia. <https://orcid.org/0000-0002-2558-3519>

**María Camila Sierra Hernandez** es Ingeniera Civil de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín) y Especialista en Ingeniería Geotecnia de la misma universidad. Actualmente, es investigadora en la Universidad Nacional de Colombia - Grupo de Geotecnia. <https://orcid.org/0000-0002-6908-9213>

**Eduard Danilo Vanegas Chaverra** es Ingeniero Civil de la Universidad Cooperativa de Colombia (Sede Medellín) y Especialista en Ingeniería Geotecnia de la misma universidad. Actualmente, es investigador en la Universidad Nacional de Colombia - Grupo de Geotecnia. <https://orcid.org/0000-0002-2721-627X>

**Yamile Valencia González**, recibió BS. en Ingeniería civil y la Maestría en Ingeniería civil y Geotécnica, ambos de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín). Doctora y Posdoctorado en Geotecnia, ambos en la Universidad de Brasilia (Brasil). Actualmente es profesora del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín). <https://orcid.org/0000-0002-4692-5573>.