

## Analysis and diagnosis of the instability affecting "La Bonita" area, Amagá, Antioquia, Colombia

Yennifer Álvarez-Gutiérrez<sup>a</sup>, Sandra Marcela Montoya-Cañola<sup>b</sup>, Diego Armando Rendón-Giraldo<sup>c</sup>  
& José Humberto Caballero-Acosta<sup>d</sup>.

<sup>a</sup> Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [yalvarezg@unal.edu.co](mailto:yalvarezg@unal.edu.co)

<sup>b</sup> Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [smmontoyac@unal.edu.co](mailto:smmontoyac@unal.edu.co)

<sup>c</sup> Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [darendongir@unal.edu.co](mailto:darendongir@unal.edu.co)

<sup>d</sup> Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [jhcaball@unal.edu](mailto:jhcaball@unal.edu)

Received: May 29<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: November 15<sup>th</sup>, 2014. Accepted: February 25<sup>th</sup>, 2015.

### Abstract

In the "La Bonita" sector (Amagá, Antioquia), between km 3+200 and km 3+500 of the Camilo C. Restrepo (Amagá) – El Cinco (Fredonia) road, which is above the rocks of the upper member of the Amagá formation (conformed mainly by interbedded claystones, sandstones and thin beds of coal), occur many instability processes that seriously affect the infrastructure of the area, and could be the result of the variations of mechanical and mineralogical properties of the claystones by effect of humidity fluctuations in the study area. According to the results obtained after multiple field trips, mapping of morphodynamic processes, subsoil explorations and laboratory tests, was determined that these materials, even as a rock, given their particular characteristics, have the ability to expand (changing their volume by about 10%) upon contact with water, generating expansion pressures up to 700kPa on the overlying materials, leading to the development of multiple slow morphodynamic processes (whose rate is related to winter seasons) that destabilize the ground.

**Keywords:** Amagá, Antioquia, Colombia, claystones, pressure to avoid expansion, expansive clays, morphodynamic processes, geotechnical characterization, X-ray diffraction, slope stability.

## Análisis y diagnóstico de los fenómenos de inestabilidad que afectan el sector "La Bonita", Amagá, Antioquia, Colombia

### Resumen

En el sector La Bonita, entre el km3+200 y el km3+500 de la vía Camilo C. Restrepo (Amagá) – El Cinco (Fredonia), que se encuentra sobre las rocas del Miembro Superior de la Formación Amagá (conformado principalmente por intercalaciones de arcillolitas, areniscas y delgados mantos de carbón), ocurren gran cantidad de procesos de inestabilidad que afectan seriamente la infraestructura de la zona, los cuales podrían ser consecuencia de las variaciones en las propiedades mecánicas y mineralógicas de las arcillolitas ante el efecto de las fluctuaciones de humedad que presenta el terreno. De acuerdo con lo obtenido tras múltiples recorridos de campo, realización de cartografía de procesos morfodinámicos, exploraciones del subsuelo y análisis de laboratorio, se determina que éstos materiales, aún en estado rocoso, dadas sus características particulares, tienen la capacidad de expandirse (cambiando su volumen en alrededor de 10%) al entrar en contacto con agua, generando presiones de expansión de hasta 700kPa sobre los materiales suprayacentes, lo que da lugar al desarrollo de múltiples procesos morfodinámicos lentos, (cuya tasa está relacionada con las épocas invernales) que desestabilizan el terreno.

**Palabras clave:** Amagá, Antioquia, Colombia, arcillolitas, presión para evitar expansión, arcillas expansivas, procesos morfodinámicos, caracterización geotécnica, Difracción de rayos X, estabilidad de laderas.

### 1. Introducción

En el sector La Bonita, ubicado entre los municipios de Amagá y Fredonia, en el departamento de Antioquia (Fig. 1),

desde el km3+200 hasta el km3+500 de la vía Camilo C. Restrepo (Amagá) – El Cinco (Fredonia), se han registrado históricamente gran cantidad de procesos de inestabilidad que afectan la infraestructura de la zona (especialmente el

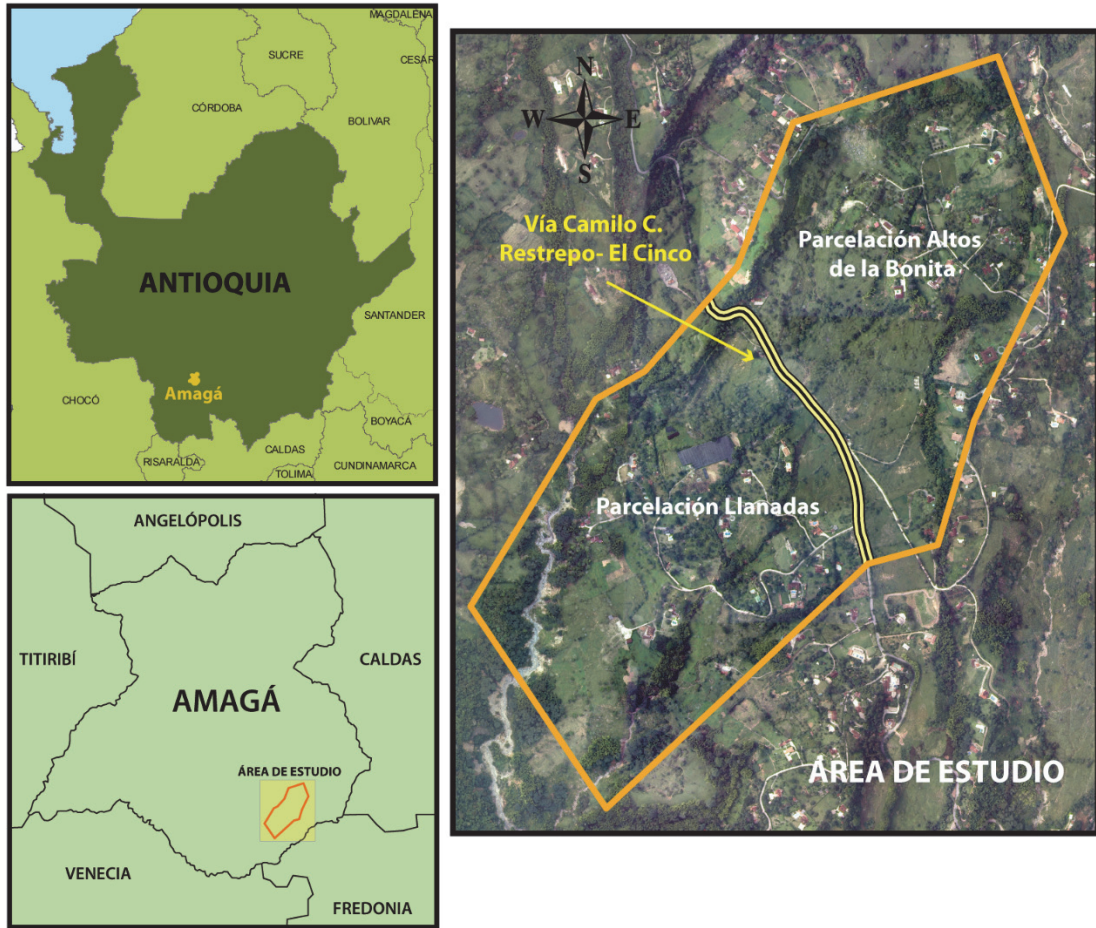


Figura 1. Localización de la zona de estudio.  
Fuente: Montoya-Cañola, S.; Álvarez-Gutiérrez, Y.

corredor vial Medellín – Fredonia), generando una grave problemática cuya mitigación ha implicado cuantiosas inversiones por parte de la Gobernación de Antioquia y el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), sin alcanzar la estabilización definitiva [1,2]. Geológicamente la zona de estudio se encuentra sobre las rocas sedimentarias de la Formación Amagá, cuyas características litológicas, junto con factores como disposición estructural, topografía y grado de evolución de los drenajes, influyen en la configuración de un paisaje donde predomina un relieve originado por procesos morfodinámicos activos (reflejo de la inestabilidad del terreno).

Para el desarrollo de este estudio se realizaron recorridos de campo, cartografía de procesos morfodinámicos, exploraciones del subsuelo y ensayos de laboratorio, a partir de los cuales se pretende analizar las características y diagnosticar las causas de los fenómenos de inestabilidad en el sector mencionado teniendo en cuenta las propiedades mecánicas y mineralógicas de los geomateriales arcillolíticos que conforman el terreno para los cuales, de acuerdo con estudios previos, se estableció un comportamiento expansivo.

Este artículo es el resultado de una investigación realizada como Trabajo de grado (TDG) por Yennifer Álvarez Gutiérrez y

Sandra Marcela Montoya Cañola para optar por el título de Ingenieras geólogas.

## 2. Marco geológico y geomorfológico

El área de interés se encuentra dentro de un contexto geológico regional conformado por las rocas sedimentarias terciarias de la Formación Amagá, una sucesión de rocas siliciclásticas continentales con presencia de mantos de carbón explotables [3-6]. La unidad litológica que aflora en la zona de estudio es el "Miembro Superior" de dicha Formación, el cual está constituido por intercalaciones de areniscas sucias, arcillolitas frágiles y cintillas de carbón no explotables [4,5]. Específicamente el sector es dominado por la presencia de arcillolitas grises azulosas, grises verdosas y pardas (Fig. 2) con diversos grados de fracturamiento, interestratificadas en paquetes de espesores variables (hasta 12 m) e intercaladas con areniscas mediante contactos depositacionales y gradacionales. Se observan también delgados mantos de carbón que actúan como capas permeables (Fig. 3).

Adicionalmente, durante las exploraciones del subsuelo, se observó la presencia de horizontes de suelos tropicales de



Figura 2. Arcillolitas. A) Afloramiento de arcillolitas observado en la Quebrada Cajones, B y C) Afloramientos de arcillolitas observados en ambas márgenes de la Quebrada La Y, suprayacidos por depósitos de vertiente.

Fuente: Montoya-Cañola, S.; Álvarez-Gutiérrez, Y.

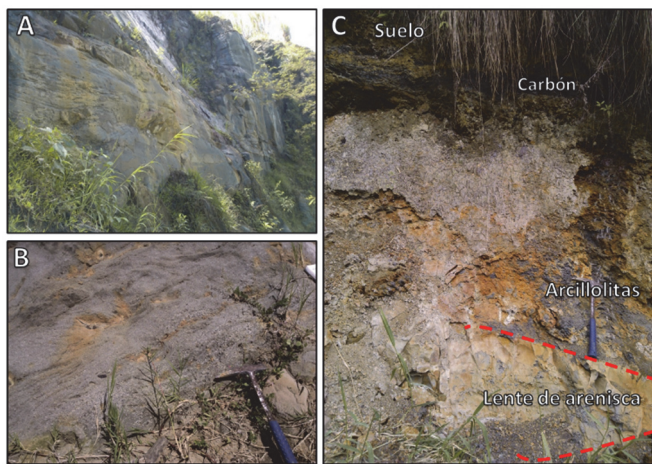


Figura 3. Areniscas. A, B) Afloramientos de areniscas observados en el escarpe que enmarca la zona de estudio. C) Afloramiento encontrado en la Quebrada la Y, en el que se observan estratos de areniscas, arcillolitas y cintillas de carbón, suprayacidos por un horizonte de suelo.

Fuente: Montoya-Cañola, S.; Álvarez-Gutiérrez, Y.

espesores considerables (2 a 5m) derivados de las rocas sedimentarias descritas, los cuales están conformados por material plástico principalmente arcillo-limoso de baja consistencia, que en algunos sectores se encuentran recubiertos a su vez por depósitos de vertiente del tipo flujo de lodos (Fig. 2). Las propiedades mecánicas de las arcillolitas cambian marcadamente por el efecto del agua y su grado de meteorización química [1].

Geomorfológicamente, la zona presenta en general un relieve ondulado e irregular con inclinaciones suaves a moderadas; localmente se observan montículos de diferentes tamaños medianamente incisados, múltiples escarpes de diferentes escalas, algunos lomos y colinas bajas de tope suave a plano; además de zonas de empozamiento producto de contrapendientes, surcos de flujos subsuperficiales y vaguadas secas, característicos de una zona de desplazamiento con un fuerte impacto sobre el sistema de drenaje.

### 3. Materiales y métodos

Para el análisis y diagnóstico de los fenómenos de inestabilidad se realizó una revisión detallada de la litoestratigrafía y la información geológica-geotécnica existente; levantamiento de columnas estratigráficas, construcción de un mapa de procesos morfodinámicos y finalmente la caracterización geotécnica, geológica y mineralógica mediante la toma sistemática de muestras y la realización de los ensayos de laboratorio pertinentes.

Como fase preliminar se realizó una revisión bibliográfica de trabajos previos como estudios geotécnicos, cartografía geológica e informes técnicos sobre las obras de mitigación realizadas. Adicionalmente se llevó a cabo un trabajo de fotointerpretación mediante el cual se pudieron identificar los procesos morfodinámicos más relevantes y se demarcaron con mayor precisión los límites de la zona de estudio.

La realización de diversas campañas de campo y la utilización de herramientas como receptores GPS Hiper Lite+ (de la marca “Topcon Positioning Systems”, facilitados por el Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Colombia) para levantamientos topográficos de alta precisión en tiempo real, permitieron la cartografía de rasgos morfodinámicos tales como grietas, escarpes, movimientos en masa, socavación lateral, reptación, sobrepastoreo y empozamientos; adicionalmente se recolectaron datos sobre la deformación del terreno y la afectación de obras de infraestructura (vía principal, vías secundarias, box culverts, postes, viviendas, entre otras). Así mismo, se describieron varios afloramientos con el objetivo de identificar la litología y características como disposición estructural, grado de meteorización y calidad geomecánica de las rocas (fracturamiento).

Para la exploración del subsuelo se excavaron 7 apiques entre 1,20 y 1,80 m de profundidad y se realizaron 2 perforaciones a percusión (SPT) de 4 y 6 m de profundidad de donde se extrajeron 28 muestras (bolsa, tubos shelby y bloques de roca), las cuales fueron enviadas a los laboratorios de Geotecnia y Pavimentos y Caracterización de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia, y al laboratorio de suelos de la firma INTEGRAL S.A., para la realización de ensayos enfocados en la obtención de propiedades geotécnicas, físicas, mecánicas y composicionales que permitieran la determinación del potencial expansivo de los geomateriales. Las muestras de suelo arcilloso (shelby) y arcillolita fresca (bloque) se enviaron al laboratorio de Caracterización de Materiales para determinar su composición mineralógica mediante Difracción de rayos X (DRX), y al laboratorio de suelos de INTEGRAL S.A para realización de ensayos de *presión para evitar expansión*; estas muestras se tomaron de un mismo sondeo, para garantizar que están relacionadas genéticamente (el suelo muestreado es producto de la meteorización de la roca extraída).

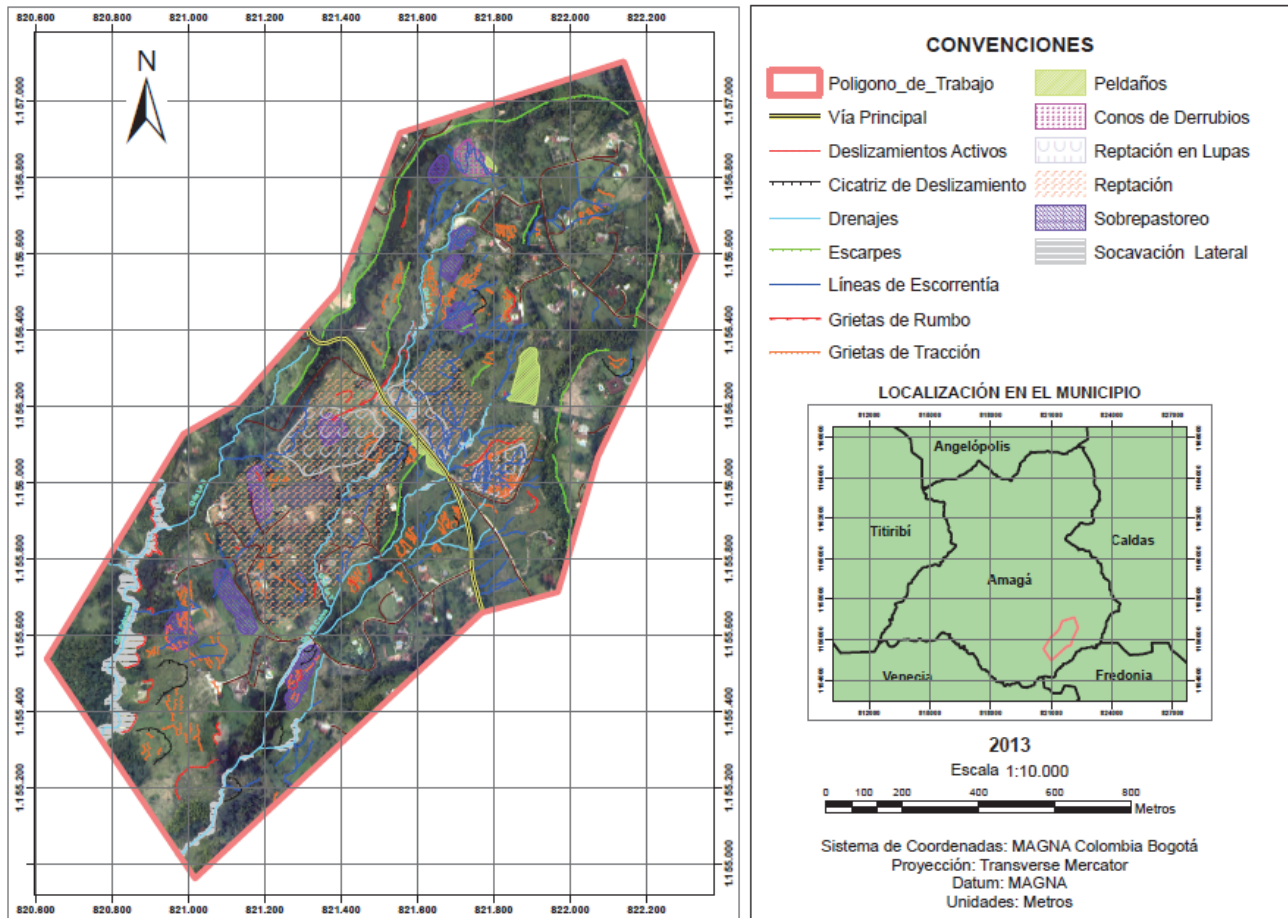


Figura 4. Mapa de procesos morfodinámicos.  
Fuente: Montoya-Cañola, S.; Álvarez-Gutiérrez, Y

## 4. Resultados

### 4.1. Morfodinámica del sector La Bonita

En la zona de estudio se presentan procesos erosivos superficiales y movimientos en masa causados principalmente por la acción del agua (lo cual se evidenció en los cambios morfológicos observados tras periodos de alta pluviosidad) y su influencia sobre las características particulares de la litología predominante (cambios volumétricos y de consistencia). Reptación localizada (movimiento plástico), deslizamientos y socavación lateral son los procesos principales, que se manifiestan a través de grietas de tracción y de rumbo, escarpes, coronas, cicatrices de deslizamiento, peldaños, drenajes inmaduros (sin cauces definidos y múltiples líneas de escorrentía asociadas), contrapendientes, postes y árboles inclinados, viviendas agrietadas y zonas de empozamiento de agua. Dichos procesos morfodinámicos y sus evidencias sobre el terreno fueron cartografiados (Fig. 4) y se describen a continuación los más relevantes:

#### 4.1.1. Reptación

La reptación es un proceso erosivo superficial, lento, imperceptible y constante a favor de una pendiente formada

por suelo o roca [7]. Este fenómeno morfodinámico afecta varios sectores de la zona de estudio a ambos lados de la vía Camilo C. Restrepo – El Cinco, especialmente el sector SW (Parcelación Llanadas), manifestándose como montículos u ondulaciones sobre las cuales se observan árboles y postes inclinados en diferentes direcciones (Fig. 5). Para éste caso en particular se tiene como hipótesis de que dicho fenómeno es consecuencia de una intensa deformación plástica de los suelos arcillolíticos más someros del terreno, causada principalmente por el efecto que ejerce el agua sobre los materiales y sus características particulares, y por el sobrepastoreo. Generalmente, entre los montículos se encuentran zonas anegadas y cauces abandonados.

Entre las zonas afectadas por reptación (deformación plástica), también se observan pequeños deslizamientos activos e inactivos, escarpes, empozamientos y grietas de tracción. Sobre la margen izquierda de la Vía Camilo C. Restrepo – El Cinco, hacia el sector SW (principalmente) y con un área de influencia de aproximadamente 3,4 ha, se observa una serie de abombamientos que corresponden a depósitos en forma de gotas (visto en planta), conformados por suelos tropicales de arcillolitas removidos. La geometría de estas geoformas indica el sentido del movimiento causado por la deformación plástica.



Figura 5. Reptación observada hacia el sector SW de la zona de estudio, dentro de la Parcelación Llanadas.

Fuente: Montoya-Cañola, S.; Álvarez-Gutiérrez, Y.

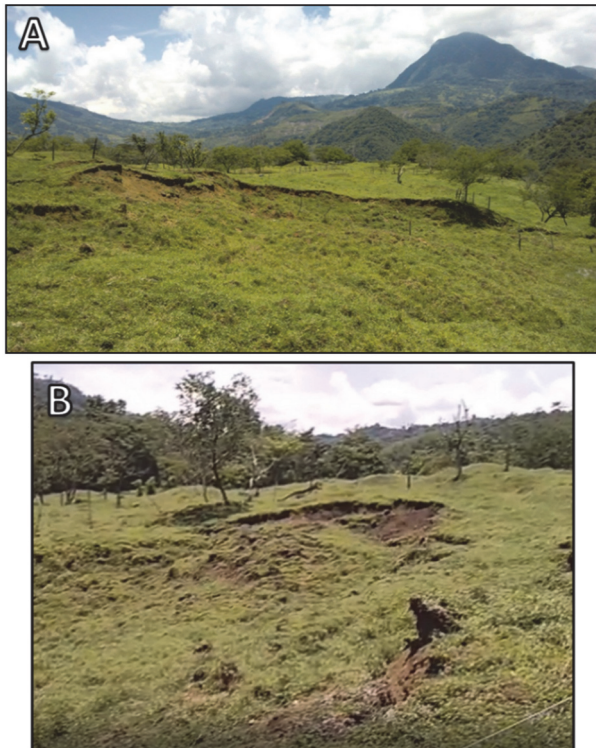


Figura 6. Deslizamientos observados en el sector SW de la zona de estudio, dentro de la Parcelación Llanadas, cerca de la Quebrada Cajones.

Fuente: Montoya-Cañola, S.; Álvarez-Gutiérrez, Y.

#### 4.1.2. Deslizamientos

Los deslizamientos son movimientos en masa con una superficie de ruptura bien definida en donde el material se desplaza ladera abajo por efecto de la gravedad principalmente [9]. En la zona de estudio estos procesos se presentan a lado y lado de la vía, con predominio en el sector SW (Parcelación Llanadas), especialmente en cercanías a la Quebrada Cajones (Fig. 6); exhiben coronas generalmente bien definidas y escarpes asociados de diferentes tamaños; en algunos se observan varios niveles de bloques inclinados y grietas de tracción transversales al sentido del movimiento ubicadas en la corona y hacia el pie del deslizamiento.

De acuerdo con las características mencionadas y las observaciones hechas en campo, se podría inferir que se trata de deslizamientos rotacionales con superficies de ruptura cóncavas que se encuentran a diferentes niveles de profundidad. La mayoría de estos procesos están activos, aunque también se observan deslizamientos inactivos en donde tanto el depósito como el escarpe asociado se encuentran cubiertos de vegetación.

#### 4.1.3. Socavación lateral

La erosión o socavación lateral afecta principalmente drenajes de bajo gradiente cuando se encuentran en una etapa de evolución avanzada y el cauce no tiene pendientes mayores al 2%, es decir, lugares llanos en los cuales la energía se concentra en expandir el canal [10,11]. Aunque en la zona de estudio predominan pendientes de entre 17 y 36%, las características de los materiales que conforman tanto el lecho como los taludes de las quebradas, y las deformaciones del relieve facilitan la ocurrencia de éste proceso morfodinámico. Tanto en la corriente principal (Quebrada Cajones) como en los afluentes que atraviesan la zona de estudio se observan fenómenos de socavación lateral como consecuencia del desgaste y relave que provoca la fuerza abrasiva del agua sobre los estratos de arcillolita que en la mayoría de los casos, se encuentran conformando el lecho (Fig. 7).

En algunos sectores, especialmente hacia el NE del área de estudio (Parcelación Altos de La Bonita), ocurre socavación lateral en varios tramos de los drenajes, y en la mayor parte de su recorrido tienden a ser flujos muy superficiales que frecuentemente abandonan el cauce y originan amplias zonas de empozamientos (Fig. 10).

#### 4.1.4. Escarpes

La zona de estudio se encuentra enmarcada dentro de un gran escarpe (Fig. 8) que sobresale principalmente hacia el sector nororiental (ver Fig. 4), sobrepasando la vía Camilo C. Restrepo – El Cinco en cercanías al km3+200. Este escarpe está esculpido en medio de arcillolitas y areniscas de la Formación Amagá, presenta una forma semicircular (en planta), con evidencia de caída de bloques activa en su extremo norte, además de conos de derrubios asociados.

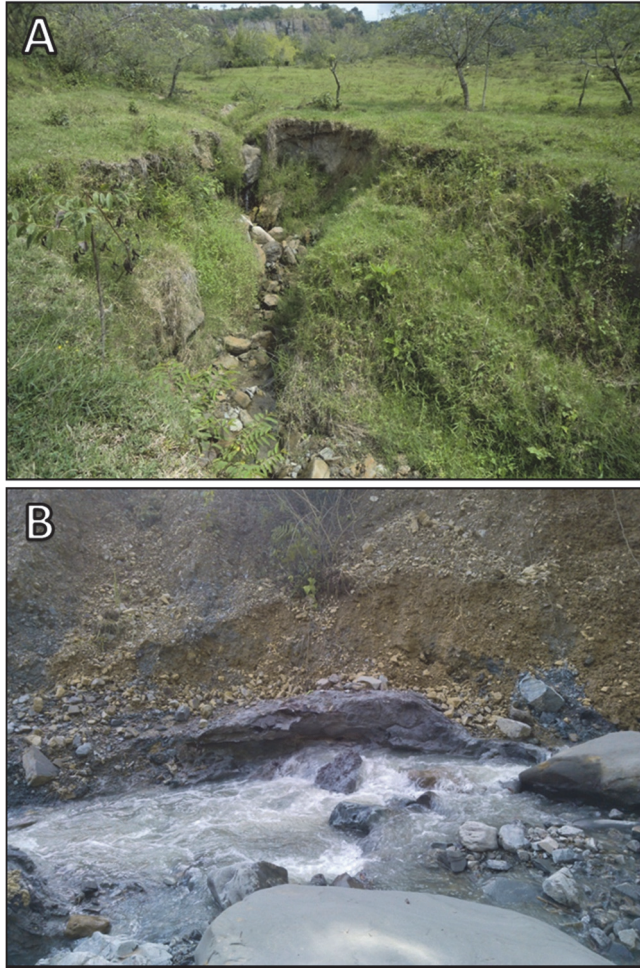


Figura 7. Socavación lateral observada en el sector SW de la zona de estudio. A) Quebrada la Y, B) Quebrada Cajones. Fuente: Montoya-Cañola, S.; Álvarez-Gutiérrez, Y.



Figura 8. Escarpe que enmarca la zona de estudio, en el cual afloran intercalaciones de limolitas, areniscas y arcillolitas. Puede apreciarse el cono de derrubios asociado a dicho escarpe, producto de un fenómeno de caída de rocas. Fuente: Montoya-Cañola, S.; Álvarez-Gutiérrez, Y.

Se asume que esta geoforma es producto de la resistencia diferencial de las rocas ante la erosión. Localmente, se observan escarpes aislados de menores dimensiones y formas semirectas, en los cuales afloran también rocas sedimentarias, perfiles de suelo y depósitos de vertiente. El

origen de estas geoformas puede atribuirse a movimientos en masa con importantes componentes verticales, evolución de grietas y/o erosión diferencial.

#### 4.1.5. Grietas

Se presentan múltiples sistemas de grietas distribuidos por toda el área de interés (Fig. 9), derivados de procesos como reptación y deslizamientos. Los tipos de grietas que predominan son de rumbo y de tracción. Las primeras presentan un movimiento relativo del terreno paralelo a la dirección de la grieta, están asociadas al escarpe principal y se localizan hacia el flanco NW, presentando una cinemática dextral y extensión considerable; las segundas son generadas por efecto de esfuerzos distensivos en el terreno, están distribuidas de forma aleatoria en todo el polígono de trabajo, presentan profundidades de hasta 50 cm y la mayor parte del tiempo se encuentran abiertas, aunque en temporadas de lluvias se observan selladas, lo que se podría asociar a los cambios volumétricos de los geomateriales ante la influencia del agua.

En sectores con predominio de reptación (deformación plástica) se observan grietas de longitud variable, dispuestas caóticamente y con aperturas en diferentes direcciones; por el contrario, cuando están asociadas a zonas de deslizamientos, su longitud depende de la magnitud del movimiento en masa y por lo general exhiben patrones definidos, ya sea siguiendo la forma de las coronas de los mismos o dispuestas transversalmente con respecto al sentido del desplazamiento del material.



Figura 9. Grietas observadas en el sector SW de la zona de estudio (Parcelación llanadas). A) Grieta de rumbo. B) Grieta de tracción. Fuente: Montoya-Cañola, S.; Álvarez-Gutiérrez, Y.



Figura 10. Empozamiento observado en el sector NE de la zona de estudio, dentro de la Parcelación Altos de La Bonita, cerca al escarpe principal. Fuente: Montoya-Cañola, S.; Álvarez-Gutiérrez, Y.

#### 4.1.5. Sistema de drenaje, líneas de escorrentía y zonas de empozamientos de agua

Los principales drenajes que atraviesan la zona de estudio presentan comportamientos variables: en algunos tramos se observan levemente sinuosos, con profundización del cauce, inestabilidad lateral y lecho rocoso; en otros, presentan cauces poco definidos, someros, caóticos e irregulares, con una dinámica de incisión superficial (afectando por lo general el suelo), que en ocasiones se distorsionan anegando zonas planas y conformando cauces abandonados y estrangulados, lo cual puede atribuirse a la intensa deformación del terreno.

En la zona de estudio se observan múltiples cauces antiguos que se concentran en algunos sectores, producto del comportamiento caótico de algunas corrientes o como consecuencia de las obras realizadas por los propietarios de los predios con el fin de evacuar el agua que se acumula en sus terrenos. Por lo general estas líneas de escorrentía siguen la dirección de las pendientes predominantes y desembocan en los afluentes, pero en muchos casos son retenidas en depresiones generadas por las irregularidades del terreno (que se comporta plásticamente), conformando zonas de empozamiento (Fig. 10).

#### 4.1.6. Peldaños

Cerca del escarpe principal (de forma semicircular, localizado en el sector NW, ver Fig. 4) y contiguo a la margen derecha de la vía hacia Fredonia (km3+400), se observan geoformas de tope plano y de dimensiones considerables, las cuales se denominaron como peldaños en el presente trabajo.

Los peldaños localizados cerca a la vía, corresponden a restos del antiguo corredor vial y están conformados por material de lleno y escombros de obras civiles anteriores, además se encuentran agrietados y exhiben evidencias de desplazamiento en el sentido de la pendiente, sobre un plano somero y paralelo a la superficie.

Los demás peldaños, localizados cerca del escarpe principal (sector NE de la zona de estudio) podrían ser atribuidos a movimientos verticales de algunas porciones del

terreno y están conformados principalmente por suelo y algunos estratos de rocas sedimentarias.

En estudios anteriores [1,2] se ejecutaron varias perforaciones y en algunas de ellas se instalaron inclinómetros sobre los sitios más críticos aledaños a la vía Camilo C. Restrepo – El Cinco (entre los km3+200 y 3+500), los cuales registraron movimientos relativos del terreno a diferentes velocidades y profundidades. La lectura de los inclinómetros, en conjunto con los procesos morfodinámicos anteriormente descritos y su distribución en la zona de estudio, sugieren un movimiento en masa de grandes dimensiones enmarcado por el gran escarpe que sobresale hacia el sector nororiental de la zona de estudio (Parcelación Altos de La Bonita), que se mueve lentamente, presentando una superficie de ruptura profunda y múltiples procesos superficiales asociados de menor escala que enmascaran el fenómeno regional.

#### 4.2. Caracterización geotécnica

Los ensayos de laboratorio realizados sobre muestras de arcillolita, enfocados en la obtención de características que permitieran evaluar el potencial expansivo de las mismas, integran diferentes pruebas como son: determinación de la humedad natural del suelo [12], granulometría por hidrómetro [13], límites de Atterberg [14], gravedad específica [15] y presión de expansión en suelo y roca [16]. A continuación se presentan los resultados más relevantes (Tabla 1, Tabla 2):

#### 4.3. Caracterización de materiales constituyentes por difracción de rayos X

Para la identificación de las fases cristalinas que componen los geomateriales presentes en la zona de estudio (tanto roca como los suelos tropicales derivados de la misma), se empleó el método cualitativo de difractografía de rayos X en polvo cristalino. Para su aplicación se reduce el material a analizar a un polvo fino constituido por microcristales con todas las orientaciones posibles y a continuación un estrecho haz de rayos X monocromáticos inciden sobre la superficie de la muestra. Los rayos difractados por un conjunto de planos de espaciado “d” (distancia interatómica o interplanar, que es específica para cada mineral o grupo de minerales), generan conos con ángulos de semiapertura  $2\theta$ , los cuales son detectados y registrados por el difractómetro utilizado [17].

Se analizaron tanto muestras en polvo total (para identificación de todas las fases minerales presentes), como muestras orientadas (para identificación de minerales laminares, en este caso arcillas), con intervalos de barrido ( $2\theta$ ) entre 5 y 70° para polvo total y entre 5 y 15° para muestras orientadas [17,18]. A partir de dichos análisis se obtuvieron 4 difractogramas en función de las distancias interatómicas (“d”) al interior de los cristales analizados (Fig. 11), las cuales son útiles para la identificación de minerales porque producen un único arreglo de difracción característico para cada uno de ellos. En el caso de las esmectitas (arcillas expansivas) estas distancias suelen ser de alrededor de 14Å, pero pueden variar por efecto de la expansión de las capas [17-20]. Los difractogramas fueron elaborados e interpretados a través del software especializado X’Pert Highscore Plus.

Tabla 1. Síntesis de los resultados obtenidos a partir de los ensayos de caracterización geotécnica del suelo.

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA PARA SUELO	
Clasificación	CL-ML
Contenido de humedad	21,53%
Límite plástico	14,00%
Límite líquido	40,00%
Gs	2,85
% de Arcillas	35,64%
Presión de expansión	225,00Pa

Fuente: Los autores

Tabla 2. Síntesis de los resultados obtenidos a partir de los ensayos de presión para evitar expansión en suelo y en roca.

ENSAYOS DE PRESIÓN PARA EVITAR EXPANSIÓN		
	Suelo	Roca
Contenido de humedad	21,53%	13,59%
Cambio de volumen por pérdida de humedad	7,20%	9,24%
Carga aplicada	7,50kg	23,37kg
Presión para evitar expansión	21,15kPa	67,39kPa

Fuente: Los autores

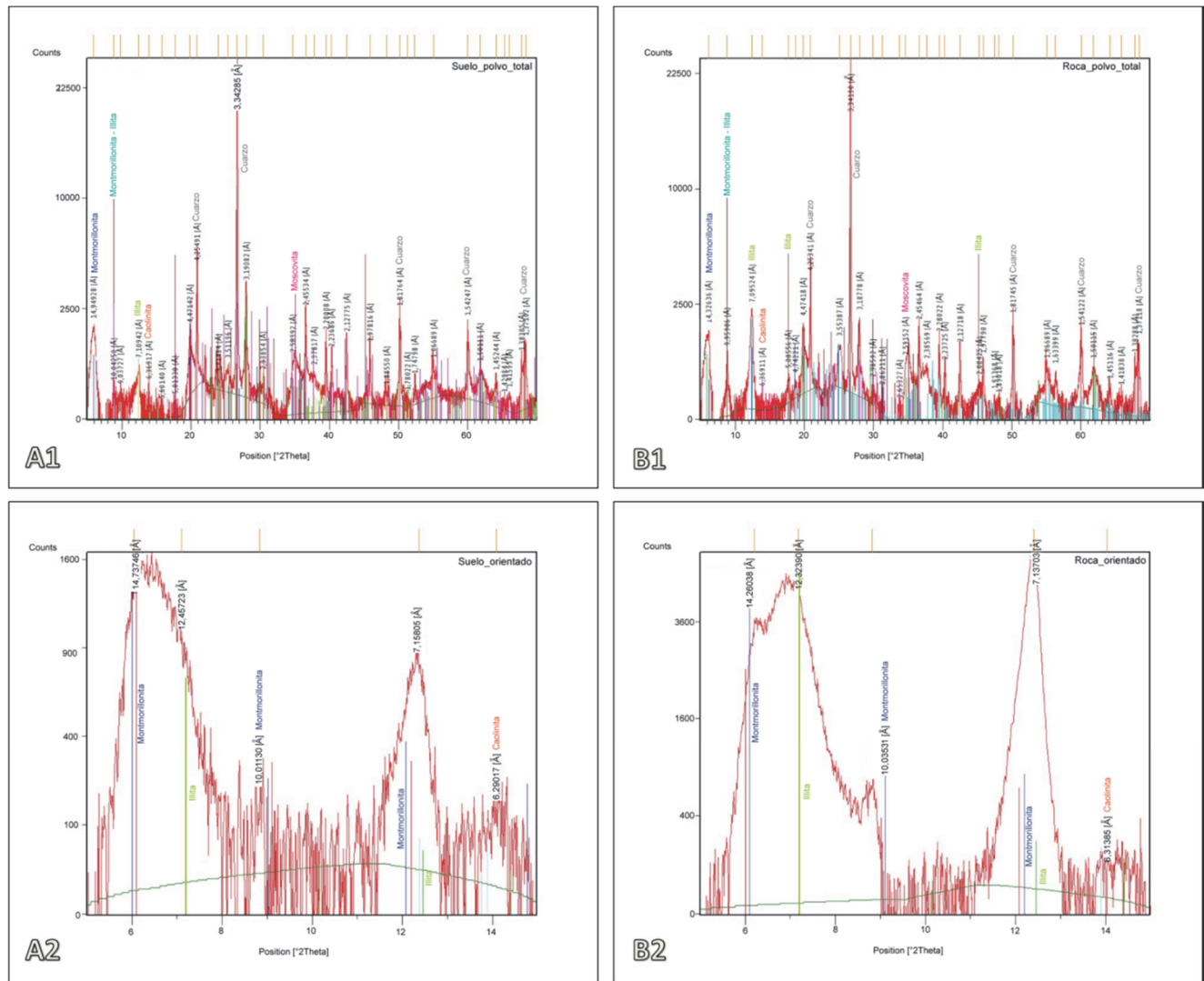


Figura 11. Difractogramas de rayos X para muestras de A) Suelo (A1. Polvo total, A2. Muestra orientada) y B) Roca (B1. Polvo total, B2. Muestra orientada). Fuente: Montoya-Cañola, S.; Álvarez-Gutiérrez, Y. Elaborado en el programa X'Pert Highscore Plus.

Los difractogramas de muestras orientadas evidencian la presencia de minerales arcillosos como illita, montmorillonita y caolinita, mientras que en los difractogramas de polvo total se evidencian también algunos otros componentes como cuarzo y moscovita. Valores de algunos picos de menor intensidad sugieren la presencia de clorita y/o especies de montmorillonita de 15Å (expandida), principalmente en las muestras de suelo.

## 5. Discusión

En la zona de estudio predominan materiales arcillosos y arcillo-limosos que según los resultados obtenidos en los ensayos de Difracción de rayos X se encuentran conformados por arcillas expansivas, en este caso montmorillonitas, las cuales fueron detectadas tanto en los análisis de polvo total como en los análisis de muestras orientadas para suelo y roca.



Adicionalmente, los ensayos de caracterización geotécnica indican que el suelo presenta un comportamiento plástico en general, y que al expandirse puede ejercer presiones de hasta 21,15kPa con cambios volumétricos de hasta 7,2%.

Las rocas arcillolíticas de las cuales se derivan los suelos también se expanden en contacto con agua, incluso más que el suelo, ejerciendo presiones máximas en condiciones de confinamiento absoluto [21]. En efecto, los valores de presión para evitar expansión varían entre 67,39kPa en muestras tomadas a aproximadamente 1,3m de profundidad (ver Tabla 2), hasta 706,9kPa en muestras tomadas a 13m de profundidad [2], con cambios volumétricos asociados de aproximadamente 9,2%; adicionalmente, estas rocas son deleznable y se desintegran fácilmente al estar sumergidas en agua en tan solo unas horas.

A pesar de que los valores de presión contra expansión obtenidos en roca son relativamente bajos en comparación con otros datos reportados en la literatura (hasta 4,5MPa en arcillolitas de la Formación Fómeque [22]), los ciclos de expansión y compresión que experimentan las arcillolitas a raíz de las fluctuaciones de humedad, inducen deformaciones en su interior y conducen a la rotura a través de un mecanismo de fatiga progresiva de la roca [21]. Por otro lado, el suelo tropical derivado fluye y pierde la forma y consistencia tras dichos ciclos, generando grietas de tracción, contrapendientes y reptación (deformación plástica), obstruyendo los cauces de las quebradas (por lo que el sistema de drenaje en general es inmaduro) y formando grandes zonas de empozamiento de agua, la cual puede infiltrarse a través de grietas (en el suelo), zonas fracturadas y/o mantos permeables de carbón (en el macizo rocoso), e impulsar nuevos eventos de expansión-contracción.

Los resultados obtenidos tras la instalación de inclinómetros en anteriores estudios muestran un movimiento complejo constituido por desplazamientos relativos a baja velocidad en medio del macizo rocoso y a una mayor velocidad en los primeros metros que corresponden a suelos residuales y depósitos de vertiente [1,2]. Lo anterior, junto con las expresiones morfodinámicas en superficie, es la principal evidencia para proponer la existencia de un movimiento en masa de escala regional que abarca toda la zona de estudio y presenta movimientos lentos y una superficie de ruptura profunda. Adicionalmente se descubrió que los desplazamientos coinciden con la presencia de mantos de carbón y/o tramos de roca fracturada, que facilitan la filtración y circulación del agua al interior del macizo rocoso.

Evidentemente, el agua y el efecto que ésta tiene sobre los materiales presentes en la zona de estudio (minerales expansivos) y sus propiedades mecánicas particulares son el principal detonante para la inestabilidad del sector. Aunque existen obras para controlarla, en algunas zonas éstas tienden a agravar el fenómeno dado que sólo evacúan el agua en un sector y luego la descargan indiscriminadamente ladera abajo, generando aún más zonas de empozamiento o alimentando aquellas ya existentes.

Por otra parte, a pesar de que ya se han planteado gran cantidad de obras de mitigación para proteger las viviendas y el corredor vial, difícilmente se podrá dar una solución

definitiva al problema de inestabilidad, ya que las características mecánicas y composicionales anteriormente descritas son inherentes a la constitución de la ladera en gran parte del terreno y se extienden hasta profundidades considerables, a las cuales es complicado controlar su comportamiento.

## 6. Conclusiones

En la zona de estudio predominan materiales arcillosos y arcillo-limosos que presentan un comportamiento plástico y según la caracterización por Difracción de rayos X están conformados por arcillas expansivas (montmorillonita), entre otros minerales. Cuando estos materiales se expanden ejercen presiones de hasta 700kPa y experimentan cambios volumétricos de hasta 9%, generando agrietamientos y fracturas, facilitando el desplazamiento lento de grandes porciones de las laderas, a pesar de su baja pendiente.

Para realizar una caracterización cuantitativa de las arcillas expansivas y determinar si existen especies adicionales de esmectitas (además de las identificadas cualitativamente), se recomienda la realización de análisis más detallados, que evalúen los cambios en la estructura mineral ante incrementos de temperatura y mezclas con ciertos compuestos orgánicos.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, es posible concluir que la inestabilidad del terreno se debe en gran parte a las propiedades geomecánicas variables y composición mineralógica de los geomateriales que lo conforman (los cuales efectivamente presentan un comportamiento expansivo), siendo el agua el principal agente detonante. Se debe tener un especial interés en revisar las características del macizo rocoso, el cual parece presentar mayor potencial de expansión que los suelos derivados del mismo por meteorización química.

Como consecuencia de la inestabilidad del terreno, se encontraron múltiples procesos morfodinámicos superficiales y movimientos en masa, tales como reptación (deformación plástica), deslizamientos y socavación lateral, evidenciados en rasgos como grietas de tracción y de rumbo, escarpes, coronas y cicatrices de deslizamiento, peldaños, drenajes inmaduros, contrapendientes y zonas de empozamiento de agua.

Finalmente, es complicado encontrar una solución definitiva al problema de inestabilidad mediante obras de contención únicamente, dado que no es fácil modificar las características mecánicas y composicionales de esta gran masa de material, ni existen obras (económicamente viables) lo suficientemente profundas o resistentes que detengan su movimiento. Se sugiere que adicional a las obras de contención se haga un manejo adecuado de las aguas superficiales y subsuperficiales, que mitigue el fenómeno de expansión de las arcillolitas.

## Referencias

- [1] INTEGRAL, Obras de mitigación vía Camilo C - Fredonia, sector La Bonita. Informe técnico, 2009.

- [2] Sierra, M.C. and Rendón, D.A., Landslides related with expansion in sedimentary rocks, Antioquia province, 2009.
- [3] Grosse, E., Estudio geológico del Terciario carbonífero de Antioquia, en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia, entre el río Arma y Sacaajal. 361 P. 1926.
- [4] Silva, J.C., Sierra, G.M. and Correa, L.G., Tectonic and climate driven fluctuations in the stratigraphic base level of a Cenozoic continental coal basin, northwestern Andes, J. South Am. Earth Sci., 26 (4), pp. 369-382, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2008.02.001>
- [5] González, H., Mapa geológico del Departamento de Antioquia, Memoria explicativa. INGEOMINAS, Bogotá, 2001.
- [6] González, H., Mapa Geológico del Departamento de Antioquia Memoria Explicativa. INGEOMINAS, Bogotá. 2001.
- [7] Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Landslides - Analysis and control: National Research Council, Washington, D.C., Transportation Research Board, Special Report 176. 1996, pp. 11-33.
- [8] Turner, K.A. and Schuster R.L., Landslides - Investigation and mitigation: Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press. 1996.
- [9] Goudie, A., Encyclopedia of geomorphology. Vol. 1, 1156 P., 2004.
- [10] Suárez, J., Erosión en Ríos y Corrientes de Agua, in Control de erosión en zonas tropicales, U. Industrial de Santander, Ed. 2001, 555 P.
- [11] Thomas, M.F., Tropical Geomorphology|a study of weathering and landform development in warm climates. New York, Wiley, 1974, 332 P.
- [12] ASTM D2216-98, Standard test method for laboratory determination of water (Moisture) content of soil and rock by mass. Pennsylvania, USA: ASTM D2216-98, Am. Stand. Test. Mater., 1991.
- [13] ASTM D422-07, Standard test method for particle-size analysis of soils, Am. Stand. Test. Mater., 2007.
- [14] ASTM D4318-05, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, Am. Stand. Test. Mater., 2005.
- [15] ASTM D854-06, Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, Am. Stand. Test. Mater., 2006.
- [16] ASTM D4546, Standard test methods for one-dimensional swell or collapse of cohesive soils, Am. Stand. Test. Mater., 2008.
- [17] Besoain, E., Mineralogía de arcillas de suelos. San José, Costa Rica, 1985, 1205, P.
- [18] Justo, Á. y Morrillo, E., Técnicas de difracción de rayos X para la identificación cualitativa y cuantitativa de minerales de la arcilla, in Ciencia y tecnología de materiales, 2000, pp. 77-86.
- [19] Chipera, S.J. and Bish, D.L., Baseline studies of the Clay Minerals Society source clays: powder X-ray diffraction analyses, Clays Clay Miner., 49 (5), pp. 398-409, 2001. <http://dx.doi.org/10.1346/CCMN.2001.0490507>
- [20] Grim, R.E., Clay Mineralogy. 1953, 398 P.
- [21] Delgado-Rodríguez, J., Evaluación del comportamiento expansivo de las rocas y su interés en conservación., Cons. Super. Investig. Científicas, 51 (c), pp. 183-195, 2001.
- [22] Brattli, B. and Broch, E., Stability problems in water tunnels caused by expandable minerals. Swelling pressure measurements and mineralogical analysis, Eng. Geol., 39 (3-4), pp. 151-169, 1995. [http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952\(95\)00009-5](http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952(95)00009-5)

**D.A. Rendón-Giraldo**, es Ingeniero Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia, con Posgrado en Ciencias e Ingeniería con énfasis en Ciencias de la Tierra de la Universidad de Shimane en Japón. Su experiencia laboral se enfoca en temas como exploración de suelos y sectorizaciones geomorfológicas y geotécnicas de laderas; ha sido consultor en importantes proyectos relacionados con aguas subterráneas, exploración mineral, cimentaciones y grandes obras de infraestructura como la Hidroeléctrica Ituango. Actualmente es docente en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín y ha participado como investigador en diversos proyectos apoyados por instituciones como Colciencias y el Banco de la República, obteniendo resultados de interés local, regional y nacional.

**J.H. Caballero-Acosta**, es Ingeniero Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia y MSc. en Geología del Cuaternario de la Universidad Vrije-Bruselas. Ha trabajado en importantes entidades de orden nacional como INGEOMINAS e INER, en proyectos relacionados con geología ambiental, y recursos minerales. Ha sido invitado en calidad de ponente en importantes seminarios y congresos sobre el tema de riesgos geológicos y geología ambiental. Actualmente es profesor del Departamento de Geociencias y Medio ambiente de la Facultad de Minas, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia. Ha participado en proyectos de investigación relacionados con temas como impacto ambiental, prevención de desastres, reglamentación y planes de ordenamiento. Es autor y co-autor en publicaciones indexadas en múltiples temas de interés, todas ellas realizadas con el apoyo de universidades y entidades de orden regional y nacional.

**Y. Álvarez-Gutiérrez**, graduada como Ingeniera Geóloga en 2014 de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia. Actualmente trabaja como investigadora en la Universidad Nacional de Colombia en convenio con el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en un proyecto de cartografía geomorfológica aplicada a zonificación de amenaza por movimientos en masa.

**S.M. Montoya-Cañola**, graduada como Ingeniera Geóloga en 2014 de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia. Actualmente trabaja como investigadora en la Universidad Nacional de Colombia en convenio con el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en un proyecto de cartografía geomorfológica aplicada a zonificación de amenaza por movimientos en masa.