

Geotechnical characterization of the silt from the terrace of the municipality of Olaya in Antioquia, Colombia

Óscar Echeverri-Ramírez^a

^a Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. oecheve@unal.edu.co

Received: September 21th, 2015. Received in revised form: October 30th, 2015. Accepted: December 9th, 2015.

Abstract

In April of 2014 arose a movement mass of soils which make up the terrace of the municipality of Olaya (Department of Antioquia). This document presents the results of characterization physical, mechanical and hydro-mechanical behavior of silty soils in such training, in order to evaluate the possible causes of the movement. Were confronted the hypothesis raised by the competent entities that once evaluated the problem and was determined from this research that the soil, for the conditions on the ground, experiences an apparent cohesion as a result of the generation of pore pressures negative, however, when the material comes in contact with water, this cohesion is lost quickly leads to the shear resistance of the material only depend on the angle of internal friction.

Keywords: pore pressure; suction; shear strength; slope stability; Olaya terrace; mass movement.

Caracterización geotécnica de los limos de la terraza del municipio de Olaya, Antioquia, Colombia

Resumen

En el mes de abril del 2014 se presentó un movimiento en masa de los suelos que conforman la terraza del municipio de Olaya (departamento de Antioquia). En este documento se presentan los resultados de la caracterización física, mecánica y del comportamiento hidromecánico de los suelos limosos de dicha formación, con el fin de evaluar las posibles causas del movimiento. Se confrontaron las hipótesis planteadas por las entidades competentes que en su momento evaluaron la problemática y se determinó a partir de esta investigación que el suelo, para las condiciones *in situ*, experimenta una cohesión aparente como resultado de la generación de presiones de poros negativas, no obstante, cuando el material se pone en contacto con agua, dicha cohesión se pierde rápidamente, conllevando a que la resistencia al corte del material dependa solo del ángulo de fricción interna.

Palabras clave: presión de poros; succión; resistencia al corte; estabilidad de taludes; terraza Olaya; movimiento en masa.

1. Introducción

El martes 22 de abril de 2014 en el municipio de Olaya se presentó un fenómeno de movimiento en masa del terreno que compone el talud izquierdo del cauce de la quebrada La Barbuda, como resultado del movimiento 13 casas que se localizaban en la corona del talud sufrieron destrucción total y varias edificaciones quedaron con serios problemas estructurales. El municipio de Olaya es un municipio que hace parte del occidente antioqueño. Se encuentra localizado geomorfológicamente en una terraza aluvial, la cual se caracteriza por presentar una altura aproximada de 50 metros con respecto al nivel del río Cauca.

En este artículo se presentan los resultados de la caracterización física, mineralógica, mecánica e hidromecánica

de los materiales limosos que conforman la terraza de Olaya, así como la caracterización geológica del sitio, con el propósito de determinar posibles causas del deslizamiento ocurrido en la zona. Se dan a conocer los resultados de los ensayos de laboratorio del material que compone la terraza Olaya y finalmente se realiza un análisis en conjunto de los ensayos de laboratorio para validar las hipótesis planteadas.

2. Generalidades de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra localizada en el casco urbano del municipio de Olaya, ubicado al occidente del departamento de Antioquia, a unos 100 km de la ciudad de Medellín. El municipio se encuentra sobre la margen derecha

del río Cauca, en la cota 500 msnm, con coordenadas N=1.225.008 y E=808.080 (Datum Bogotá), Fig.1.

El sitio de estudio corresponde a un talud vertical, Fig. 2, resultado de un movimiento en masa ocurrido en la cabecera municipal del municipio de Olaya en el mes de abril de 2014. Las coordenadas de la parte baja donde ocurrió el movimiento son: N=1.225.081 y E=808.024, en la cota 475 msnm, [1].

La zona posee un clima semiárido, con humedad relativa, precipitaciones y temperaturas promedio de 74 %, 967 mm/año y 27°C, respectivamente. En la zona se presentan dos periodos climáticos correspondientes a la época húmeda (marzo a mayo y septiembre a noviembre) y a la época seca (junio a agosto y diciembre a febrero) [4-6]. En cuanto a las zonas de vida o formaciones vegetales del área de estudio corresponden principalmente a un Bosque Seco Tropical (Bs-T) [2]. El principal drenaje corresponde a la quebrada La Barbuda.

3. Antecedentes

La cabecera municipal de Olaya se apoya sobre una terraza fruto del depósito de materiales por la acción del río Cauca luego de la formación del embalse generado por el deslizamiento El Guásimo [4,5].

El día 22 de abril de 2014, alrededor de las 7:00 p.m., se presentó en la zona urbana del municipio de Olaya un movimiento en masa que afectó el costado norte de la calle 10 de este municipio, Fig. 2, resultando la destrucción total de 13 viviendas y la edificación donde funcionaba la Registraduría del municipio. Además, dicho movimiento en masa, dejó en condiciones críticas de estabilidad el antiguo edificio de la Alcaldía Municipal y todas las viviendas ubicadas al frente del Palacio Municipal entre la calle 10 y la quebrada La Barbuda [1].

El movimiento en masa se generó por un hundimiento súbito del terreno sobre la margen izquierda de la quebrada La Barbuda, presentándose un desplazamiento vertical de aproximadamente 16 metros de altura y dejando como huella una pared vertical, Fig. 2. El grupo de trabajo que atendió la emergencia, por parte de la Gobernación de Antioquia, estimó un volumen de material desplazado por el movimiento de aproximadamente 90.000 metros cúbicos, además la diferencia de altura entre la quebrada La Barbuda y la calle 10 donde se ubica la Alcaldía es de 26 metros [1].

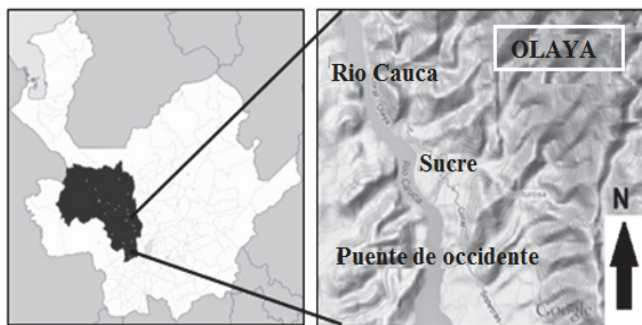


Figura 1. Ubicación del municipio de Olaya, Antioquia, Colombia
Fuente: modificado por el autor [1] [2]



Figura 2. Movimiento en masa en el municipio de Olaya, Antioquia, Colombia
Fuente: [1]

La anterior situación no es la primera vez que ocurre en la zona, puesto que diferentes eventos de movimientos en masa han ocurrido en el municipio de Olaya, el 29 de abril de 2008 y el 10 de junio de 2009 [1].

4 Aspectos geológicos y geomorfológicos

Regionalmente en la zona de estudio se presentan las unidades geológicas denominadas como: Esquistos verdes (Pev), Anfíbolitas de Sucre (Pzas), Diorita de Heliconia (Kdhb-Kdha), Batolito de Sabanalarga (Kdhs-Kdhsc-Khs), Rocas ultramáficas de Sucre (Jus), Depósitos Aluviales (Qal) y Depósitos de vertiente (Qd) [6].

En la zona de estudio se tienen principalmente depósitos aluviales asociados al río Cauca, y a las quebradas La Tunala y La Barbuda. El material concerniente a la terraza Olaya se caracteriza por presentar intercalaciones de materiales de limos y arenas finas, con algunos lentes de grava. Dentro del material limoso se aprecian además costras ferruginosas de color naranja. El material limoso, sobre el cual se centra la atención del presente artículo, presenta una coloración amarillo-naranja, se encuentra levemente húmedo y presenta consistencia firme a dura. En las zonas donde se encuentra en contacto con el material arenoso se observan óxidos de hierro de color naranja.

De otro lado, en la zona de estudio se tienen las siguientes unidades geomorfológicas [6]:

Terraza la Barbuda: esta terraza se encuentra asociada a la quebrada la Barbuda localizada en su margen derecha, en todo el frente de la terraza Olaya. Se caracteriza por presentar material gravo-arenoso, su tope es plano a levemente colinado, cubierto de vegetación.

Terraza Olaya: se caracteriza por presentar tope plano, con aproximadamente 50 m de altura con respecto al río Cauca, presentan escarpes verticales, sin embargo ha sido intervenida debido al movimiento en masa ocurrido en abril de 2014 en el municipio de Olaya, por lo cual actualmente se

observa un conjunto de bermas. Estas geoformas presentan inclinaciones menores de 5 grados, i.e., de llanas a suaves.

Abanicos aluviales: Asociados a la quebrada La Barbuda ubicada en la margen derecha del río Cauca y La Tunala en la margen izquierda. El abanico asociado a la quebrada La Barbuda, se encuentra ubicado en el piso de la terraza Olaya, donde actualmente se tiene actividad antrópica como la siembra de cultivos. Estas geoformas presentan inclinaciones menores de 5 grados, i.e., de llanos a suaves.

5. Hipótesis de trabajo y plan de ensayos de laboratorio

Entre las hipótesis de las causas del movimiento manejadas por las diferentes entidades competentes, en su momento, se encuentra en primer lugar que los materiales objeto de estudio no presentan parámetro de cohesión, por lo tanto su grado de estabilidad depende exclusivamente del parámetro de ángulo de fricción interna.

En segundo lugar, la causa del movimiento presentado estaría asociada a la sensibilidad del terreno a la generación de procesos erosivos y movimientos en masa. Durante las visitas de campo no fue posible verificar la incidencia directa de factores tales como: socavación de la margen izquierda de la quebrada La Barbuda y/o infiltración de aguas provenientes de las redes de acueducto y alcantarillado presentes a lo largo de la calle 10 del municipio; aunque no se descartó que éstos hubieran podido contribuir con el evento [1].

Considerando lo anterior, el plan de ensayos de laboratorio fue diseñado para verificar las hipótesis mencionadas, i.e., determinar los parámetros de resistencia en diferentes condiciones de drenaje y tratar de cuantificar, de alguna manera, la sensibilidad del material a la generación de procesos erosivos y pérdida de resistencia mecánica en presencia de agua. A continuación se listan los ensayos de laboratorio ejecutados:

5.1. Caracterización física

- Contenido de humedad natural. [7]
- Gravedad específica de los sólidos. [8]
- Granulometría por lavado sobre la malla No 200. [9]
- Límites de consistencia. [10]

5.2. Caracterización mineralógica

- Difracción de rayos ‘‘X’’ para determinar la presencia de minerales sensibles a la presencia de agua. [14].
- Microscopía Electrónica de Barrido (MEB): permite estudiar la microestructura y confirmar la presencia de minerales específicos a partir de imágenes detalladas. [14].

5.3. Caracterización mecánica

- Corte directo consolidado drenado (CD) [12].
- Corte directo no consolidado no drenado (UU) saturado y no saturado: este ensayo no cuenta con una norma estándar para su ejecución, dadas sus limitaciones. Sin

embargo, dicho ensayo fue ejecutado para evaluar el comportamiento del suelo no consolidado, bajo aplicaciones de carga rápida y sin drenaje [11] [12].

- Ensayo triaxial convencional a compresión consolidado drenado (CD) [15].
- Ensayo de compresión inconfina [16].
- Doble-edómetro: Consiste en la ejecución simultánea de dos ensayos edométricos simples, uno en condiciones de humedad natural y otro en condiciones saturadas, a partir de los cuales se generan dos curvas de compresibilidad del suelo y con base en las diferencias en la relaciones de vacíos se calcula el índice de colapso [17] [18].
- Desagregación: Con este ensayo se pretende examinar la estabilidad de una muestra de suelo natural ante la inmersión en agua, lo cual puede ser asociado a fases del proceso erosivo [19] [20].
- *Pinhole test*: Este ensayo se realizó para tratar de evaluar el comportamiento del suelo ante una posible infiltración de aguas provenientes de redes de acueducto y alcantarillado [21] [20].
- Ensayo de succión con papel filtro trayectoria mixta: Este ensayo permite medir la succión tanto matricial como total del suelo [22], [24,25].

6. Análisis de resultados

6.1. Propiedades índices

Para caracterización física del material del sitio se realizaron ensayos de clasificación siguiendo las metodologías del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Estos ensayos se realizaron sobre tres especímenes tomados de un mismo bloque de suelo en estado natural. En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos.

Se observa que el suelo en su estado natural presenta un bajo porcentaje de humedad, tal y como se observó en la visita de campo. Sin embargo, no se puede comprobar por medio de los límites de Atterberg la consistencia firme a dura de la muestra, dado que el material resultó no plástico, i.e., no se pudo ejecutar el ensayo de límite de plasticidad por el método de Casagrande.

De igual manera, se observa un bajo porcentaje de saturación del orden de 40%.

Tabla 1.

Resumen de propiedades físicas y clasificación del suelo							
Muestra	Gs	e	S	Wnat (%)	% Finos	IP (%)	SUCS
M1	2.94	0.67	0.39	9	69	NP	ML
M2	2.90	0.66	0.40	9	58	NP	ML
M3	2.95	0.63	0.41	9	58	NP	ML

Gs: gravedad específica de los sólidos, e: relación de vacíos, S: saturación, Wnat: humedad natural, IP: índice de plasticidad, NP: no plástico.

Fuente: el autor.

6.2. Granulometría

Por tratarse de un suelo donde el material fino-granular predomina y con el fin de clasificar el suelo de la zona de estudio, el ensayo de granulometría que se realizó fue lavado sobre la malla No 200. Los resultados se presentan en la Tabla 1 y en la Fig. 3. De los resultados se puede notar un porcentaje de finos promedio de 64 %, además, el material grueso-granular en menor proporción (36 %) corresponde a arena fina (25 %) y arena media (11 %).

6.3. Análisis mineralógico del suelo

6.3.1. Difracción de Rayos X (DRX)

El resultado del ensayo de DRX se presenta en la Fig. 4. De la figura se observa predominio en minerales como el cuarzo y la albita, en menor proporción anfibolita y se refiere la existencia de montmorillonita y vermiculita, arcillo minerales moderadamente expansivos. En el ensayo duploedométrico se verifica la relevancia de la montmorillonita y la vermiculita en el comportamiento del suelo.

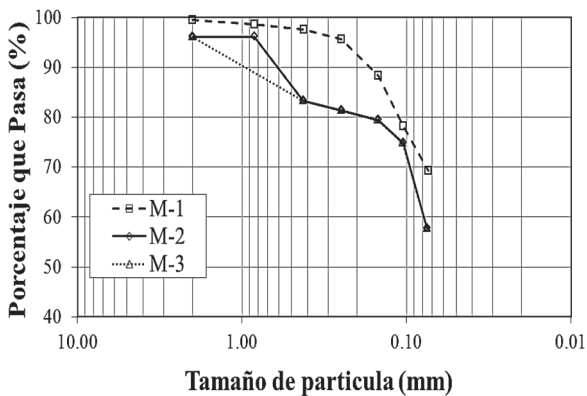


Figura 3. Curva granulométrica del material grueso-granular retenido en la malla No 200
Fuente: el autor.

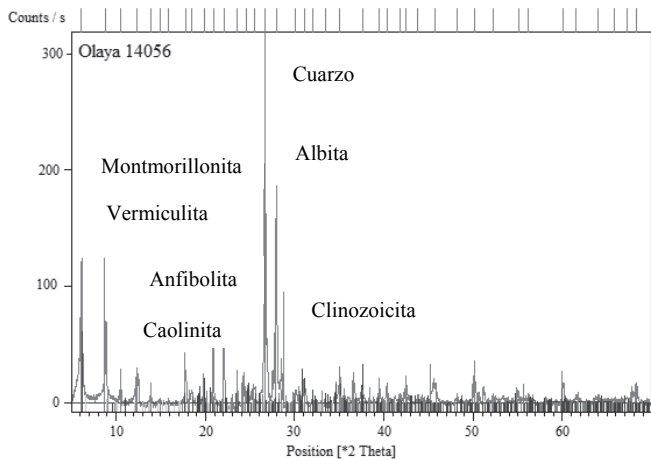


Figura 4. Resultados del ensayo de DRX
Fuente: el autor.

6.3.2. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

A partir del ensayo de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) se obtuvieron imágenes, Fig. 5, en las cuales se puede observar el arreglo estructural del suelo controlado por la mineralogía del mismo. De la Fig. 5 se observa un arreglo homogéneo con presencia de poros debido al empaquetamiento de los minerales de arcilla presentes reportados en el ensayo de DRX.

6.4. Ensayo de corte directo

6.4.1. Corte directo consolidado drenado (CD)

El ensayo de corte directo CD fue realizado con varios especímenes de suelo natural, los cuales fueron sometidos a diferentes esfuerzos de confinamiento, dependiendo de las condiciones *in situ*. Los resultados se presentan en la Fig. 6.

De la Fig. 6, se puede inferir que el material objeto de estudio no presenta parámetro de cohesión, tal y como se planteó en la hipótesis de trabajo, por tanto se puede afirmar que la resistencia al corte del material, para condiciones largo plazo, depende únicamente del parámetro de ángulo de fricción interna. Es importante recalcar que para casos de estabilidad de taludes, la condición largo plazo es la más

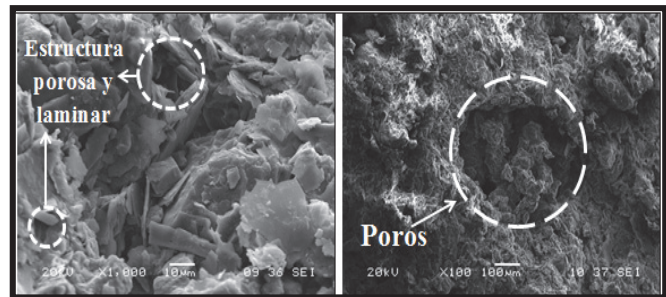


Figura 5. Resultados de la microscopia electrónica de barrido
Fuente: el autor.

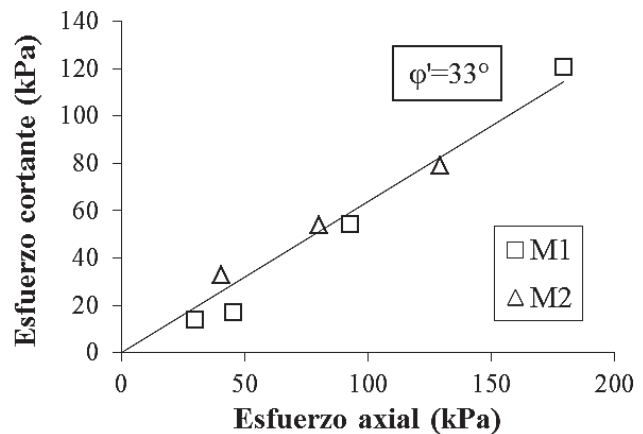


Figura 6. Resultado del ensayo de corte directo CD
Fuente: el autor.

crítica y el ensayo de laboratorio que mejor representa dicha condición es el ensayo de corte directo CD.

6.4.2. Corte directo no consolidado no drenado (UU)

Anteriormente el ensayo de corte directo UU era frecuentemente utilizado en la mecánica de suelos aplicada para evaluar la resistencia al corte de suelos empleados para fundaciones, también para evaluar la estabilidad de taludes a corto plazo, entre otros casos. Sin embargo, la anterior práctica no es la más adecuada puesto que los equipos que hasta la fecha son empleados para realizar dicho ensayo presentan muchas limitaciones, las cuales no permiten en el laboratorio controlar las variables que se requieren para representar las condiciones en campo [13]. No obstante, no se puede desconocer que la condición no consolidada no drenada es la más crítica cuando se quiere evaluar suelos para fundaciones.

Considerando lo anterior, este ensayo se realizó con el fin de tener una idea de cómo puede verse afectado el comportamiento del suelo empleado como fundación cuando hay presencia de agua, para condiciones de corto plazo. En este orden de ideas, el ensayo se realizó sobre dos muestras de suelo en estado natural, una en condiciones de humedad natural y otra saturada, Fig. 7. En dicha figura se puede observar que la resistencia al corte del suelo a corto plazo se puede ver muy afectada por la presencia de agua.

Cabe resaltar que los resultados del ensayo de corte directo UU fueron analizados con respecto a esfuerzos totales. Se observa una pérdida significativa de la cohesión cuando se satura el suelo, de 128 kPa a 28kPa.

6.5. Ensayo triaxial axisimétrico (CD)

La envolvente de falla resultado del ensayo triaxial convencional CD se presenta en la Fig. 8. Los parámetros de resistencia efectivos obtenidos por medio de este ensayo son coherentes a los obtenidos en el ensayo de corte directo CD, puesto que por la condición de carga es de esperarse que los obtenidos por el ensayo triaxial sean un poco mejores que los obtenidos por el ensayo de corte directo.

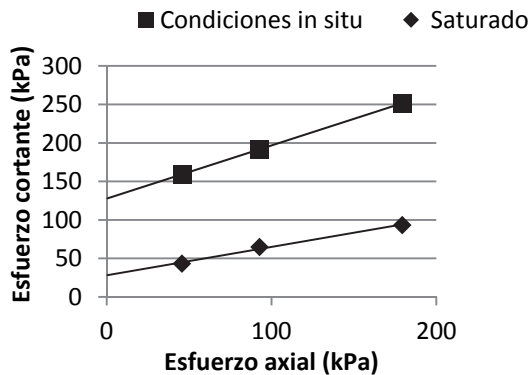


Figura 7. Resultados del ensayo de corte directo UU, realizado para condiciones *in situ* (a humedad natural) y para condiciones saturadas Fuente: el autor.

Sin embargo, si lo que se quiere es evaluar el comportamiento del suelo para condiciones de largo plazo se recomienda emplear los resultados obtenidos por el ensayo triaxial convencional CD.

6.5. Ensayo compresión inconfiada

El ensayo se realizó sobre tres muestras de suelo natural, labradas del mismo bloque, Fig. 9. De la figura se puede observar que el material exhibe un comportamiento rígido, dado que muestra poca deformación axial para las cargas impuestas.

De este ensayo se obtuvo la resistencia al corte no drenado del material, 200 kPa, considerando el aporte por fricción. De acuerdo con lo anterior en la Tabla 2 se presenta un resumen de los parámetros de resistencia drenados y no drenados obtenidos.

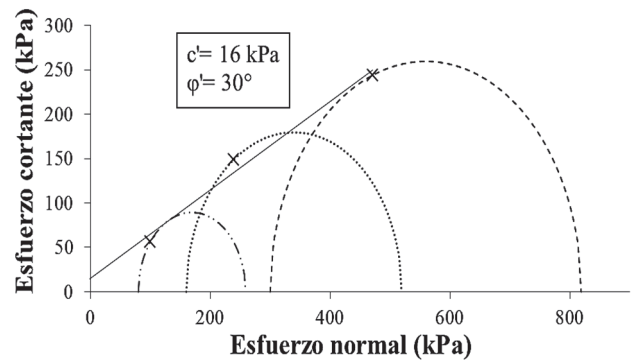


Figura 8. Envolvente de falla resultado del ensayo triaxial convencional CD Fuente: el autor.

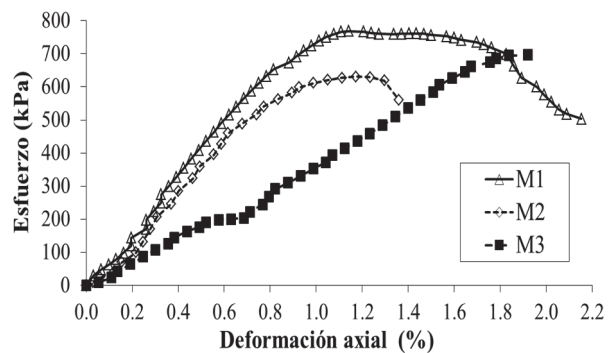


Figura 9. Curva de esfuerzo deformación. Resultado de ensayo a compresión inconfiada. Fuente: el autor.

Tabla 2

Resumen de parámetros de resistencia				
Condición	Su (kPa)	c' (kPa)	φ' (°)	Observación
No drenado	200	N/A	33	Parámetros corto plazo
Drenado	N/A	0	33	Parámetros largo plazo

Su: resistencia no drenada, c': parámetro de cohesión efectiva, φ': parámetro de ángulo de fricción efectiva, N/A: no aplica.

Fuente: el autor.

De la Tabla 2 se puede inferir que el material en condiciones no drenadas presenta una resistencia alta (fruto de la cohesión y la fricción), sin embargo, al saturarse la resistencia por cohesión se pierde. Es muy probable que en las épocas tempranas del asentamiento del municipio, los taludes permanecieran estables debido a la condición de corto plazo, sin embargo, hoy día las condiciones de drenaje ya no son las mismas y por tanto la estabilidad geotécnica de los taludes puede experimentar una disminución considerable.

6.6. Ensayo de doble edómetro

El ensayo de doble edómetro se realizó sobre dos muestras y los resultados se presentan en la Fig. 10 y en la Fig. 11. En la Fig. 10 se presenta la curva de compresibilidad para los especímenes de la muestra M2, en dicha figura se observa que el material no es expansivo dado que al inicio del ensayo el espécimen saturado no experimenta expansión con respecto al espécimen en condiciones *in situ*, i.e., los dos espécimen inician el proceso de carga con la misma relación de vacíos [22].

En la Fig. 11 se presenta la curva de compresibilidad normalizada (e/e_0) con respecto a la relación de vacíos, con el fin de realizar los cálculos de índice de colapso a los niveles de esfuerzos requeridos [16]. Considerando las condiciones *in situ*, se puede estimar que el máximo esfuerzo probable que se puede presentar en la zona de estudio es de 500 kPa, para este nivel de esfuerzo el índice de colapso es de 4 %, calificando el suelo como moderadamente colapsable. Sin embargo, se debe tener en cuenta que si las cargas en la terraza llegaran a aumentar entre 1000 kPa hasta 1600 kPa, por efecto de construcciones en la zona, el colapso pasaría a clasificarse como un problema grave.

6.7. Ensayo de desagregación

El ensayo de desagregación se realizó sobre un espécimen cúbico de 6 cm de lado, el cual fue sometido a un proceso de inundación con agua durante 50 minutos, el resultado del ensayo se presenta en la Fig. 12a y en la Fig. 12b se observa

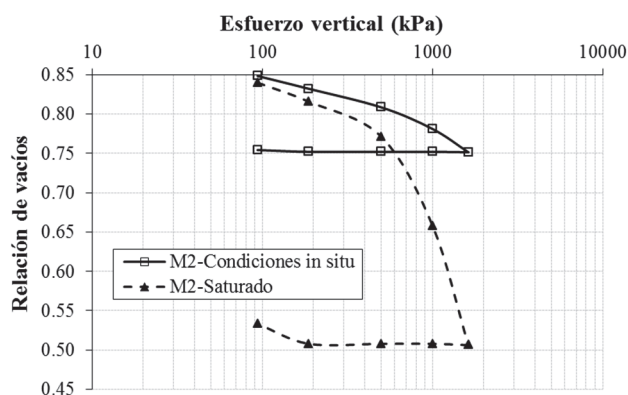


Figura 10. Curva de compresibilidad para la muestra M2. Ensayo de doble-edómetro. Fuente: el autor.

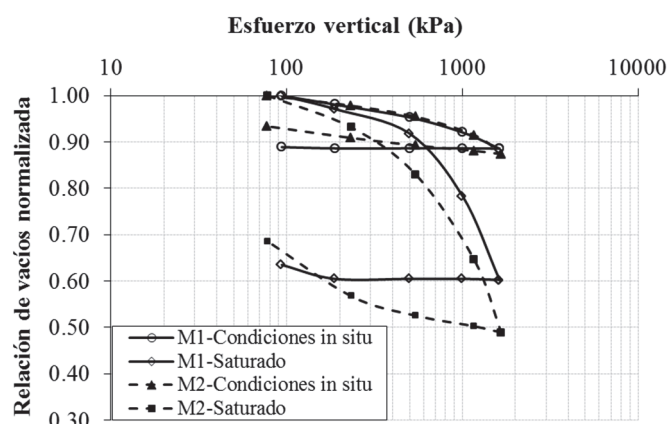


Figura 11. Curvas de compresibilidad normalizadas con respecto a la relación de vacíos. Ensayo doble-edómetro. Fuente: el autor

el ascenso por capilaridad del agua hasta aproximadamente 2/3 de la altura del cubo cuando el nivel del agua está en la base del mismo (la base fue una piedra porosa). Lo anterior ocurrió en 15 minutos. Luego se aumentó el nivel del agua hasta 1/3 de la altura del cubo por 15 minutos, Fig. 12d, se observó el ascenso de agua hasta la parte superior. Cuando el nivel se aumentó a 2/3 de la altura del espécimen, este estaba prácticamente saturado, a partir de este momento la muestra empezó a experimentar pérdida súbita de resistencia, Fig. 12f y Fig. 12g, hasta la desagregación total cuando el nivel del agua se aumentó hasta la altura del espécimen. Lo anterior demuestra que el suelo en condiciones *in situ* experimenta alta succión matricial, presiones de poros negativas, las cuales se encargan de brindar al suelo cohesión aparente, i.e., mejor estabilidad. Sin embargo, dichas presiones negativas se pierden rápidamente y aparecen las presiones positivas, una vez el suelo entra en contacto con el agua, en otras palabras, cuando el suelo está saturado la resistencia al corte depende únicamente del ángulo de fricción.

6.4.6. Ensayo Pinhole

De la Fig. 13 se puede observar que la muestra presenta alto grado de erosión interna, al presentarse una notable diferencia entre el tramo de carga y descarga, asociado al fenómeno presentado por algunas partículas desprendidas debido al flujo del agua y posterior taponamiento del agujero que se da a partir de una cabeza hidráulica de 40cm (tramo de descarga debajo del tramo de carga).

6.4.7. Ensayo de succión

El ensayo de succión se realizó sobre dos muestras aplicando el método del papel filtro, los resultados se presentan en la Fig. 14. De la dicha figura se puede decir que cuando el suelo presenta humedades muy bajas, i.e., por debajo de 10 %, la succión puede llegar a ser mayor de 100 kPa, no obstante, con aumentos en la humedad, el suelo pierde succión, hasta llegar a valores de 10 kPa, para humedades de 25 %, aproximadamente.

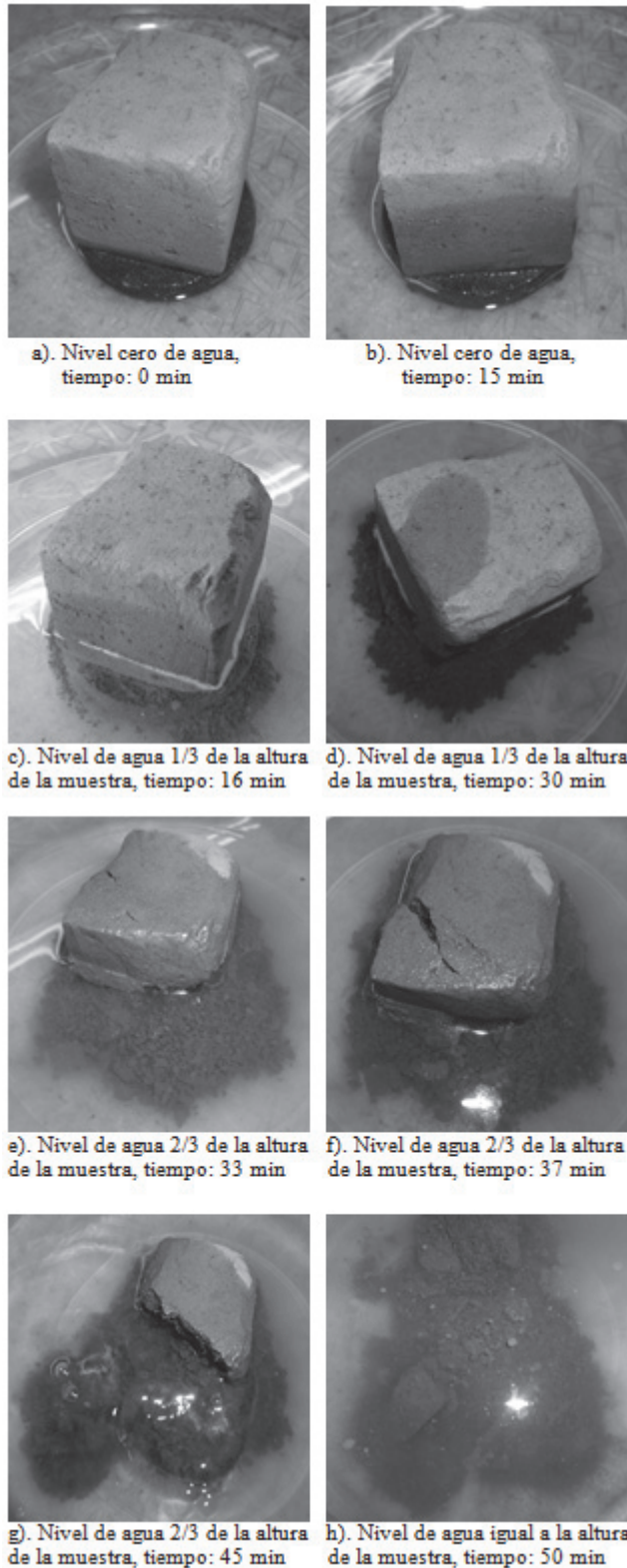


Figura 12. Resultados del ensayo de desagregación. Inmersión parcial
Fuente: el autor.

El ensayo no se pudo realizar con la humedad de saturación porque los especímenes no se dejaban moldear. De estas curvas

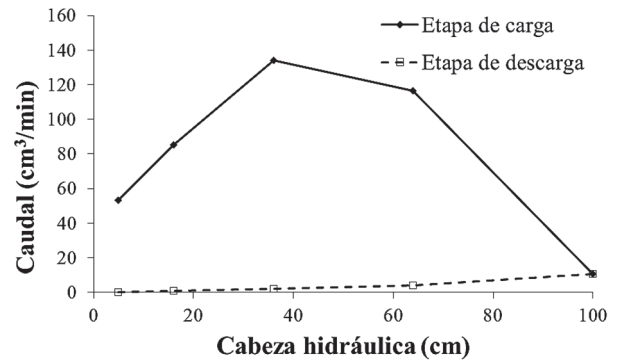


Figura 13. Curva de caudal vs. Cabeza hidráulica. Pinhole test.
Fuente: el autor.

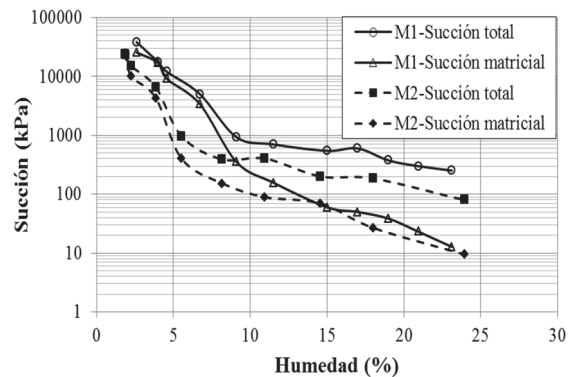


Figura 14. Curva característica del suelo. Succión total y matricial
Fuente: el autor.

se puede concluir que no hay una diferencia marcada entre macroporos y microporos (no hay bimodalidad marcada), sólo una pequeña insinuación de microporos, pero en general hay un paso gradual de macro a micros, reflejado en la MEB.

7. Conclusiones

Una de las hipótesis planteadas en el presente artículo fue comprobada, y es la relacionada con los parámetros de resistencia del suelo; para las condiciones *in situ* el suelo experimenta una cohesión aparente como resultado de la generación de presiones de poros negativas (succión matricial, que para humedades inferiores al 10% puede alcanzar 100 kPa), sin embargo, cuando dicho material se pone en contacto con agua, dicha cohesión se pierde rápidamente, lo cual conduce a que la resistencia al corte solo dependa del ángulo de fricción. Además, considerando que en la zona son comunes los taludes casi verticales, si la anterior situación se presenta, la posibilidad de que ocurra un movimiento en masa es muy alta.

Los ensayos de caracterización mineralógica, y el ensayo de colapso mostraron que el material no es expansivo, a pesar de contener vermiculita y montmorillonita. Además del

ensayo de colapso se puede inferir que para las condiciones de carga actual, la población no tendría problemas de asentamientos súbitos.

Los ensayos de desagregación y de *pinhole*, muestran que el suelo es susceptible tanto a la erosión externa como a la interna. El ensayo de desagregación, a pesar de ser un ensayo cualitativo, fue en el que mejor se pudo observar el fenómeno de cómo se pierde la succión cuando el suelo se encuentra en contacto con el agua.

No se puede concluir a ciencia cierta que el detonante del movimiento de tierras en Olaya haya sido causado por problemas de fuga de agua, por la falta de información disponible. No obstante, existe la probabilidad de que ocurra un movimiento en masa si se tiene en cuenta el registro histórico, si se alteraran las condiciones de saturación y/o las condiciones de carga externa sobre los taludes.

Referencias

- [1] Gobernación de Antioquia, Informe asesoría y asistencia técnica para el movimiento en masa ocurrido en el municipio de Olaya, Antioquia, Colombia, Medellín, 2014.
- [2] Alcaldía de Olaya-Antioquia-Colombia, Sitio web del municipio de Olaya en Antioquia, [En línea]. [Último acceso: 05/05/2015]. Disponible en: <http://www.olaya-antioquia.gov.co/index.shtml>.
- [3] Google Earth, 17/09/2005. [En línea]. [Último acceso: 11/05/2015].
- [4] Arrieta-Pastrana, A., Análisis de las terrazas aluviales del río Cauca producidas por el deslizamiento El Guásimo cerca a Santa Fé de Antioquia, Tesis, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 1989.
- [5] Ortiz-Amariles, E.A. y Pérez-Flórez, Y., Características geológicas y geomorfológicas del mega deslizamiento del Guásimo, Tesis, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 1998.
- [6] Agudelo-Giraldo, B. y Arroyave-Soto, J.D., Cartografía detallada y litoestratigrafía de los depósitos Aluvio-Lacustres Holocénicos del Río Cauca en los alrededores de Santa Fe de Antioquia, Tesis, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2005.
- [7] ASTM D 2216-05, Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass.
- [8] ASTM D854-06, Standard test method for specific gravity of soil soils by water pycnometer.
- [9] ASTM D1140-14, Standard Test Methods for Determining the Amount of Material Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Soils by Washing, D1140-14, 2014.
- [10] ASTM D4318-05, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index soils.
- [11] Valencia, Y., Influencia da biomineralizacáo nas propriedades físico - mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos, Tesis, Universidad de Brasilia, Brasilia, Brasil, 2009.
- [12] ASTM D3080-04, Standard test methods for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.
- [13] Ou, Deep excavation theory and practice, London: Taylos & Francis, 2006.
- [14] Bowles, Foundation analysis and design, Illinois: McGraw Hill, 1988.
- [15] ASTM D7181-11, Method for consolidated drained triaxial compression test for soils, D7181-11, 2011.
- [16] ASTM D2166M-13, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, D2166M-13, 2013.
- [17] ASTM D2435-04, Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading.
- [18] Jennings, J. and Knight, K., A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to "Collapse" of grain structure., VI Conference for África on Soils mechanics and Foundation Engineering, Durban, pp. 99-105, 1975.
- [19] ASTM D4647, Standard test methods for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test.
- [20] Camapum de Carvalho, J., Processos erosivos no Centro- Oeste Brasileiro, Brasília, Brasil: Editora FINATEC, 2006.
- [21] ABNT NBR 14114/98, Solo-solos argilosos dispersivos- identificação e classificação por meio do ensaio do furo e agulha (pinhole test).
- [22] ASTM D5298-03, Standard test methods for measurement of soil potential (suction) using filter paper.
- [23] Fredlund, D.G. and Rahadjo, H., Soil mechanics for unsaturated soils, New York, 1993. DOI: 10.1002/9780470172759
- [24] Melo-Ferreira, S.R., Graça de Vasconcelos, M. y Ferreira, X., Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um vertissolo no semiárido de Pernambuco, Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33, pp. 779-791, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000400004
- [25] Escobar, L. y Valencia, Y., Análisis de estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín-Bogotá en el tramo de vía entre Marinilla y Santuario, Boletín de Ciencias de la Tierra, 31, pp. 51-64, 2012.
- [26] INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI, Mapa de Formaciones Vegetales de Colombia 1:500.000, Bogotá, 1977.
- [27] ASTM D4221, Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer.
- [28] Nogami, J. y Villibor, D., Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos, São Paulo, Brasil, 1995.

O. Echeverri-Ramírez, graduado de Ingeniera Civil en 1980, MSc. en Ingeniería – Geotecnia en 2005 de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente es profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Sus líneas de investigación son: geotecnia de ambientes tropicales, biotecnología, estabilidad de taludes.
ORCID 0000-0002-4665-8786