

# Caracterización geotécnica de un suelo tropical laterítico

Artículo de Investigación Científica - Fecha de recepción: 8 de marzo de 2013 - Fecha de aceptación: 8 de junio de 2013

César Fresneda Saldarriaga

Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. cafresnedas@unal.edu.co

Sebastián Navarro Saldarriaga

Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. seanavarrosa@unal.edu.co

Yamile Valencia González

Ingeniera Civil. Doctora en Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. yvalenc0@unal.edu.co

Para citar este artículo / to reference this article:

C. Fresneda, S. Navarro and Y. Valencia, "Caracterización geotécnica de un suelo tropical laterítico". *INGE CUC*, vol. 9, no. 1, pp. 219-230, Jun, 2013.

## RESUMEN

Los suelos de las zonas tropicales son suelos que están altamente influenciados por factores tales como el clima, la temperatura, la vegetación, entre otros, lo que genera una amplia variedad de perfiles con propiedades ingenieriles particulares, que difieren de las características de los suelos de regiones templadas. En este artículo se presenta un análisis geotécnico descriptivo de un suelo tropical laterítico, ubicado en un talud en el municipio de Girardota, Antioquia (Colombia). El análisis se centra en la caracterización del estrato superior del perfil, determinando sus propiedades físicas, mecánicas, mineralógicas y estructurales a partir de ensayos más adecuados y específicos para este tipo de suelos (clasificación miniatura compactada tropical rápida, análisis químicos  $\Delta\text{ph}$ , microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos x, succión matricial, desagregación, colapso, etc.), que permitan definir la influencia que la laterización tiene en el comportamiento geotécnico del mismo.

## Palabras clave

Suelos tropicales, suelo laterítico, caracterización geotécnica.

*Geotechnical characterization of a tropical laterite soil***ABSTRACT**

The soils in the tropics are heavily influenced by factors such as weather, temperature, and vegetation, among others. These factors contribute to form a variety of materials with specific engineering properties. They are different from properties common in temperate region soils. This article presents a descriptive geotechnical analysis of a lateritic tropical soil that is located on a slope of Girardota-Antioquia (Colombia). The analysis focuses on the characterization of the upper layer in the profile in order to determine its physical, mechanical, mineralogical and structural properties. Based on the kind of soil, more specific and appropriate lab tests were performed (fast Miniature Compact Tropical classification,  $\Delta$ pH chemical analysis, Scanning Electron Microscopy, x-ray diffraction, soil matrix suction, disintegration, collapse, etc.) in order to define the level of influence of the lateritization process in the geotechnical behavior of the upper layer.

**Keywords**

Tropical Soil, Laterite Soil, Geotechnical Characterization.

## INTRODUCCIÓN

Los suelos de las zonas tropicales están altamente influenciados por factores que favorecen el proceso de meteorización, generando materiales con propiedades ingenieriles particulares, que difieren de las características de los suelos de regiones templadas. Al situarse Colombia en una región tropical, sus suelos requieren de estudios complementarios que permitan caracterizar esas particularidades con una mayor aproximación; por esta razón, en este artículo se presenta de forma más detallada la caracterización geotécnica de un suelo tropical ubicado en el municipio de Girardota (Antioquia, Colombia).

El suelo en estudio (estrato superior) presenta una mayor meteorización en relación con el estrato que le subyace; en esta investigación se efectuaron ensayos clásicos de mecánica de suelos (gravidad específica de los sólidos, contenido de humedad, límites de consistencia, granulometría, corte directo), así como pruebas específicas para suelos tropicales (clasificación miniatura compactada tropical rápida, análisis químicos  $\Delta$ ph, microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos x, succión matricial, desagregación, determinación del colapso, etc.),

las cuales permitieron una caracterización geotécnica más ajustada al comportamiento de suelos de tipo laterítico.

## ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se ubica en el municipio de Girardota, al norte del Valle de Aburrá y hace parte del Área Metropolitana de la ciudad de Medellín, Antioquia (Colombia). El suelo estudiado se encuentra exactamente en las coordenadas  $6^{\circ}22'57.9''N$  y  $75^{\circ}28'27''O$  (Fig. 1) a 50 cm de la superficie y cuyo espesor de estrato es de 90 cm.

La cabecera municipal se encuentra a 1.425 msnm y su temperatura promedio es de  $22^{\circ}C$ . La humedad relativa es de 70%, llegando a valores extremos de 40% en la época seca y 85% durante las lluvias. Los promedios de lluvias anuales varían desde 1.400 mm en la parte central hasta los 2.700 mm en el norte y sur del valle [1].

La zona de estudio está compuesta en su mayoría por rocas metamórficas (anfíbolita) del grupo Ayurá-Montebello, así como por extensos depósitos de vertiente y aluviales. Las anfíbolitas están constituidas principalmente por hornblenda (anfíbol) y plagioclasa [2].

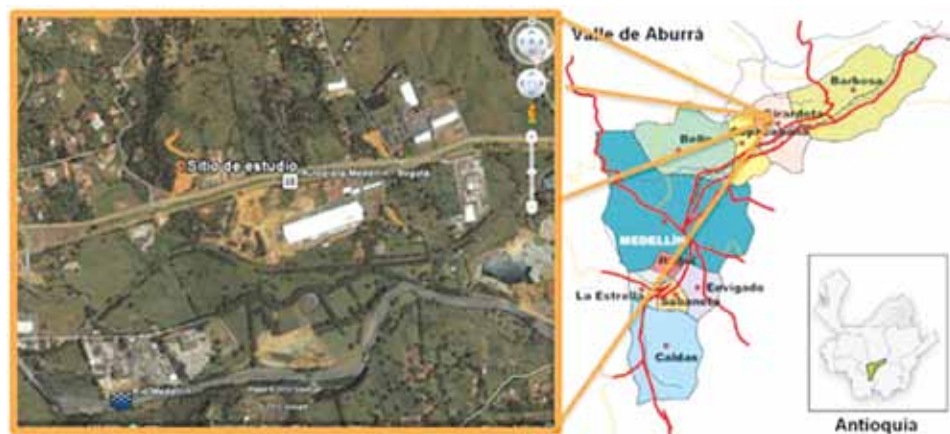


Fig 1. Ubicación zona de estudio [1]

## METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Para la realización de los diferentes ensayos que permitan obtener una caracterización geotécnica más adecuada del suelo, se tomaron muestras alteradas en bolsa para la caracterización física, química y mineralógica; y muestras inalteradas en tubo shelby y cajón, para la caracterización estructural y mecánica.

Sobre las muestras recolectadas en campo se realizaron ensayos de caracterización física como: contenido de humedad natural [3], límites de consistencia [4], gravedad específica de los sólidos [5], granulometría por malla y por hidrómetro, con y sin defloculante [6] y el ensayo miniatura compactada tropical (MCT) rápida [7]. De igual forma se efectuaron ensayos de clasificación mecánica como: resistencia al corte directo (consolidado-drenado) [8], consolidación saturada y sin saturar [9], ensayo de succión con papel filtro en trayectoria mixta [10] y desagregación. Adicionalmente se efectuaron ensayos de identificación mineralógica (difracción de rayos x) y reconocimiento microestructural (microscopía electrónica de barrido); así como ensayos de determinación de pH en agua y en KCl [11]. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

### Gravedad específica de los sólidos ( $G_s$ )

El valor de  $G_s$  para este material es relativamente alto (2,89, Tabla I). En regiones de clima tropical son frecuentes los suelos con gravedades próximas a 3,0 por la posible presencia de minerales de hierro u oxi-hidróxidos de hierro; estos últimos comunes en un suelo laterítico o en estado de laterización [12].

### Límites de consistencia

El resultado de la clasificación por el sistema unificado mostrado en la Tabla I indica que el suelo corresponde a un limo de alta plasticidad (MH), sin brindar ningún tipo de información sobre el grado de laterización del suelo como sí lo hace el ensayo MCT (expedita), que por ser un ensayo poco conocido y usado en Colombia, será descrito a continuación.

### MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) Expedita

La clasificación MCT surgió con el objetivo de hacer una identificación rápida de los suelos. El ensayo consiste en medir la contracción radial (ct) de pastillas moldeadas en anillos de 20 mm de diámetro por 5 mm de espesor, y su penetración después de la absorción de agua. Este método permite clasificar el suelo dentro de uno de los siguientes grupos, lateríticos y no lateríticos, y a su vez en subgrupos (LG' arcillas lateríticas y arcillas lateríticas arenosas; LA' arenas arcillosas lateríticas; LA arenas con poca arcilla laterítica; NG' arcillas, arcillas limosas y arcillas no lateríticas; NS' limos caoliníticos y micáceos, limos arenosos y limos arcillosos no lateríticos; NA' arenas limosas y arenas arcillosas no lateríticas; NA arenas limosas con limos cuarzosos y limos arcillosos no lateríticos).

Al realizar el ensayo al material, se observó que este presentó una contracción diametral de 1,86 mm y una penetración de 0, que clasifica el suelo como arcilloso laterítico (LG'). Estos suelos, cuando se encuentran en estado natural, la colapsibilidad, por inmersión en agua, es una propiedad frecuentemente observada, sobre todo cuando presentan agregados bien desarrollados [7].

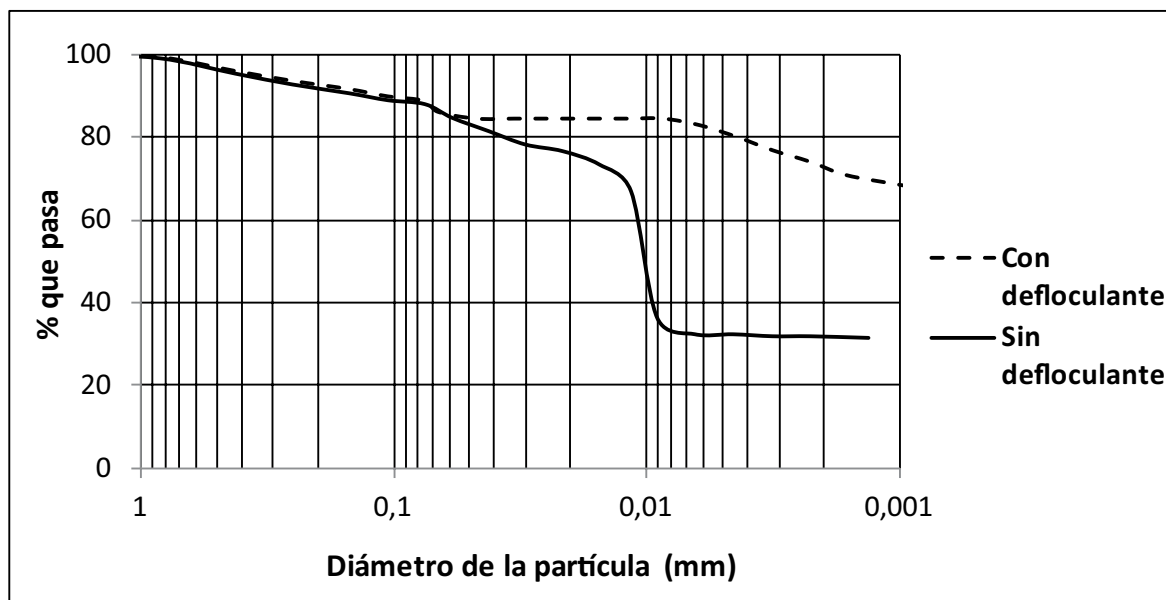


Fig. 2. Granulometría

Fuente: Elaboración propia

## Granulometría

La granulometría del material se efectuó buscando evaluar la posible presencia de agregaciones entre las partículas, por lo tanto se realizaron ensayos de hidrómetro con y sin defloculante (hexametáfosfato de sodio). En la Fig. 2 se muestran las curvas granulométricas obtenidas para cada caso. Las diferencias entre las curvas con y sin agente defloculador reflejan la existencia de agregaciones (común en suelos sometidos a procesos de meteorización intensos como ocurre con los suelos lateríticos); estas agregaciones son inestables en presencia de aguas residuales, ya que neutralizan las cargas en los minerales [13].

## Determinación del pH en H<sub>2</sub>O y KCl

Para el caso de la determinación del pH a la muestra, se usaron dos soluciones, una en KCl y otra en H<sub>2</sub>O; si la diferencia entre pH<sub>KCl</sub> y pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub> es positiva, indica la predominancia de oxi-hidróxidos de hierro y aluminio en el suelo y si es negativa, indica la predominancia de arcillominerales [14]. En este caso el ΔpH es de 0,17, lo que revela la predominancia de oxi-hidróxidos de hierro y aluminio.

En la Tabla I se muestra un resumen de los resultados de algunas de las propiedades físicas y ΔpH del material.

TABLA I. RESULTADOS DE ENSAYOS FÍSICOS Y ΔpH

w <sub>nat</sub> (%)	Gs	e	Ll (%)	IP (%)	% Finos	USC	MCT	ΔpH
32	2,89	1,3	73	31	88	MH	LG'	0,17

Fuente: Elaboración propia

### Mineralogía y microestructura

El ensayo de difracción de rayos x (DRX), es un ensayo que permite, a partir de un difractograma, identificar los minerales que componen una muestra de suelo.

El análisis de los resultados del ensayo de difracción arrojó como minerales principales el cuarzo y la caolinita (en mayor proporción), así como moscovita, goetita y gibsita (Fig. 3). La presencia de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio como es el caso de la goetita y la gibsita, es típico en suelos lateríticos, confirmando la clasificación obtenida por el ensayo MCT y el  $\Delta pH$ .

En las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) (Fig. 4), se aprecia una estructura muy uniforme, sin

agregaciones que generen macroporos y microporos. Puede concluirse que, a pesar de contar con un suelo que clasifica como laterítico, su estado de meteorización no es tan profundo como para generar una estructura de macro y microporos típica de suelos tropicales lateríticos altamente meteorizados [15].

### Corte Directo (CD)

Se ejecutaron ensayos de corte directo de tipo consolidado drenado (CD) [8]. Los resultados se ilustran en la Fig. 5.

Los valores en relación con la resistencia son significativos, asociados al hecho de que para la humedad que tenía la muestra al momento de ejecución del ensayo (27%), las succiones son importantes (aproximadamente 200 kPa) (Fig. 6).

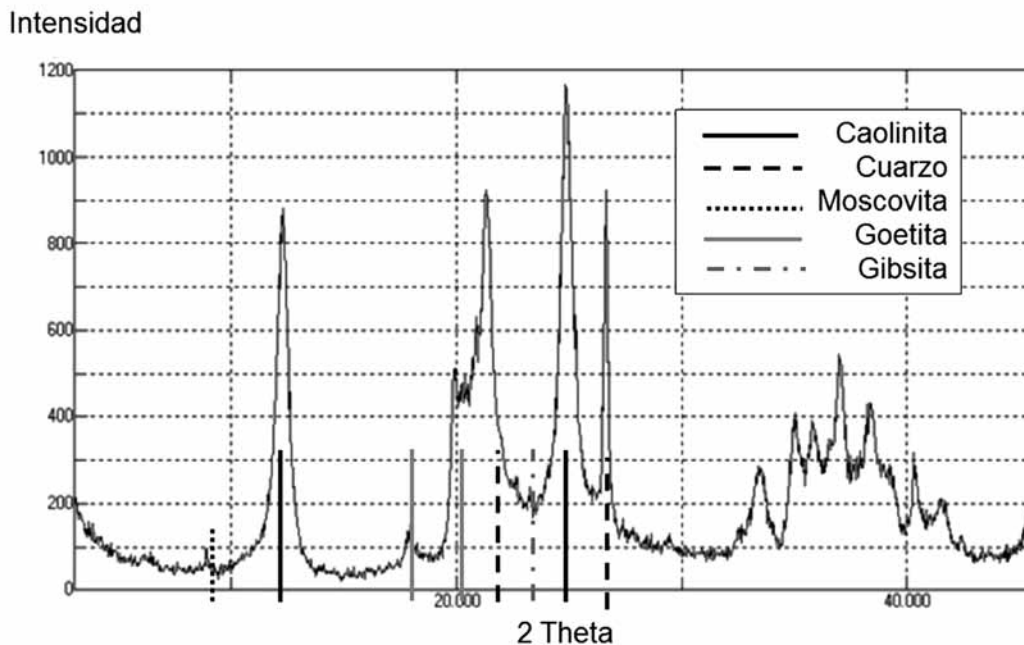


Fig. 3. Resultados difracción de rayos x

Fuente: Elaboración propia

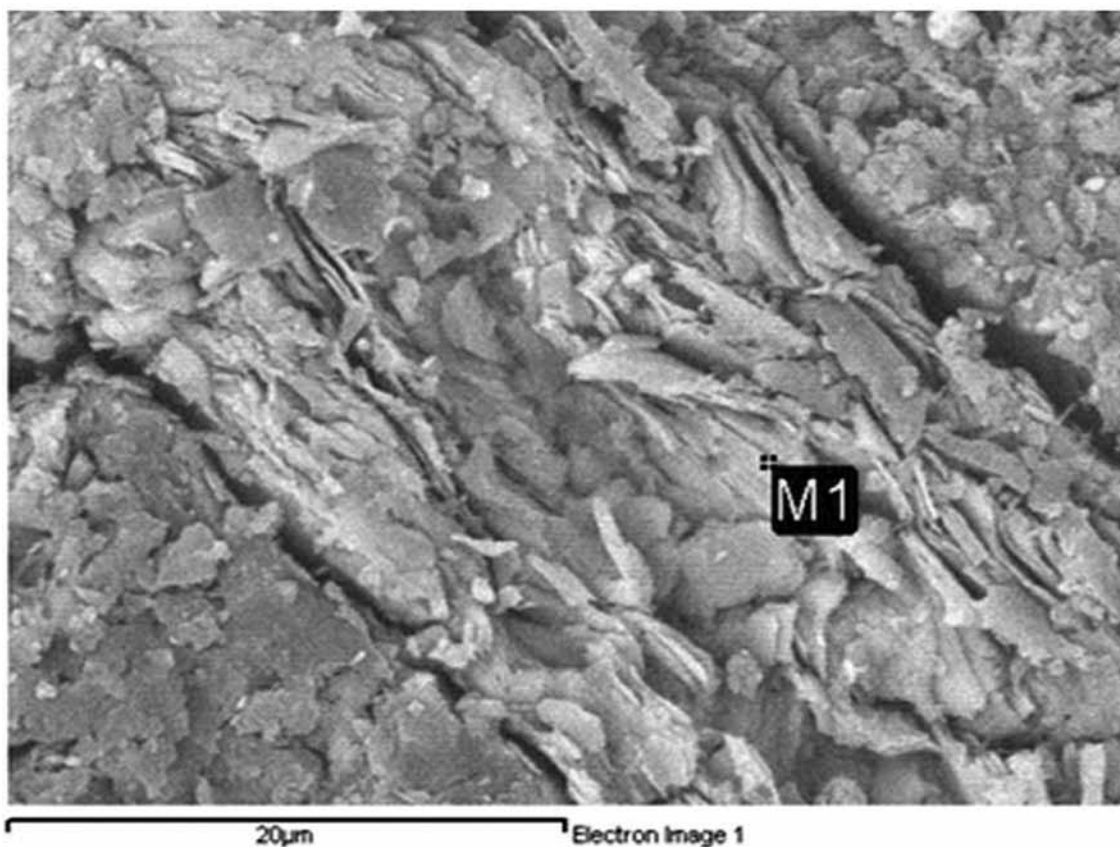


Fig. 4. Microscopía electrónica de barrido  
Fuente: Elaboración propia

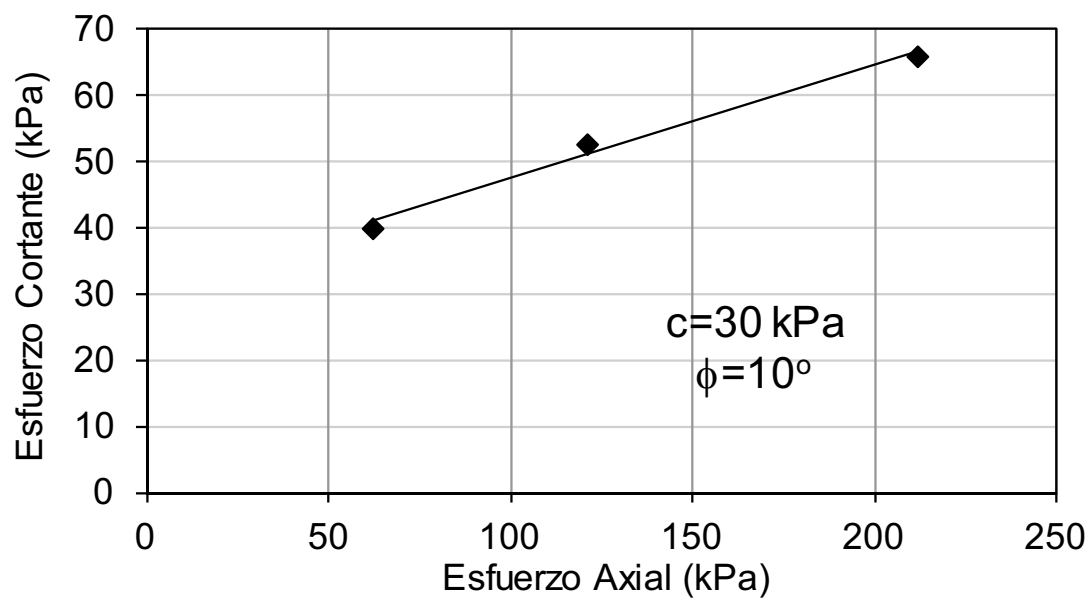


Fig. 5. Resultados ensayo de corte directo  
Fuente: Elaboración propia

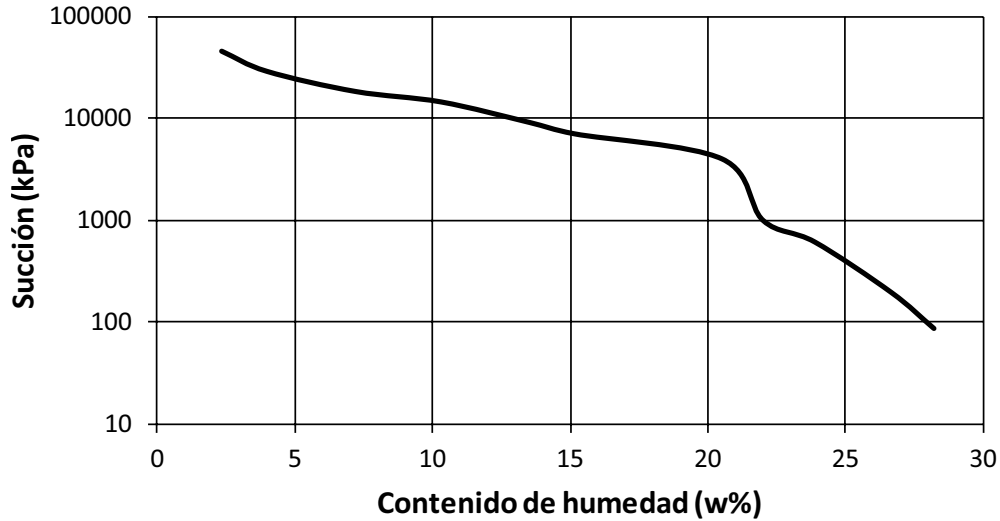


Fig. 6. Curva característica humedad-succión

Fuente: Elaboración propia

## Consolidación

El ensayo de consolidación se efectuó con el fin de determinar el índice de colapso ( $I$ ) del suelo [16]. Cuando el suelo es cargado y el contenido de humedad crítico es excedido, los puentes de grano fino alcanzan un estado donde no pueden resistir por mucho tiempo las fuerzas de deformación, colapsando la estructura. Para el cálculo de este índice (Ecuación 1) se realizó el ensayo de consolidación duplo-edómetro, en el cual se consolidan bajo las mismas cargas dos especímenes, uno con la humedad natural y el otro en estado saturado.

$$I = \frac{\Delta e_c}{\left[ 1 + \left( \frac{e_{nat}}{e_{o(nat)}} \right) \times e_{o(medio)} \right]} \quad (1)$$

$$\Delta e_c = \left[ \left( \frac{e_{nat}}{e_{o(nat)}} \right) - \left( \frac{e_{sat}}{e_{o(sat)}} \right) \right] \times e_{o(medio)} \quad (2)$$

$$e_{o(medio)} = \frac{(e_{o(nat)} + e_{o(sat)})}{2} \quad (3)$$

$e_{nat}$ ,  $e_{sat}$  son los índices de vacío natural y saturado final para una tensión aplicada, y  $e_{o(nat)}$ ,  $e_{o(sat)}$ , son los índices de vacío inicial, tanto para la muestra en la humedad natural como para la muestra en estado saturado [16].

En la Fig. 7 se muestran las curvas tensión-relación de vacíos (esta última normalizada por el índice de vacíos natural medido en laboratorio al inicio del ensayo) para ambos especímenes; en ella se observa que es probable que el suelo presente comportamiento colapsible para cargas superiores a 93 kPa, debido a las diferencias que hay entre las relaciones de vacíos para la muestra en la humedad natural y para la muestra saturada, a partir de dicha carga.

En la Tabla II se presentan los valores obtenidos del índice de colapso (en porcentaje) para cada esfuerzo o tensión y la respectiva gravedad del problema. En esta tabla puede verse que la muestra comienza a presentar colapso cuando es inundada y sometida a cargas superiores a 93kPa.



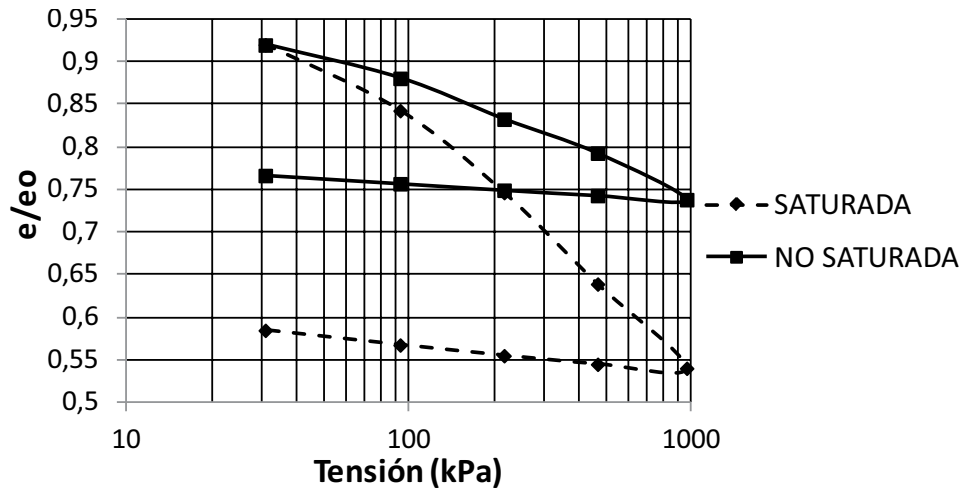


Fig. 7. Curvas tensión-relación de vacíos normalizada

Fuente: Elaboración propia

TABLA II. CLASIFICACIÓN SEGÚN JENNINGS Y KNIGHT PARA EL ÍNDICE DE COLAPSO [16]

Esfuerzo (kPa)	Índice colapso (%)	Gravedad del problema
0	0	Nulo
31	0	Nulo
93	2	Moderado
217	5	Problemático
464	10	Grave
959	13	Grave

### Succión matricial con papel filtro, trayectoria mixta

El ensayo de succión se realizó por el método de papel filtro por trayectoria mixta con el objeto de determinar la succión matricial de la muestra. Este ensayo consiste en utilizar cuerpos de prueba con diámetro de 50 mm y altura de 20 mm, aproximadamente, en el cual se distribuyen las humedades desde la mínima hasta la máxima partiendo de la humedad natural, lo cual se logra dejando secar o humedeciendo con agua

destilada los cuerpos. Luego se coloca el papel filtro y se deja equilibrar la humedad por un mínimo de 15 días. Después de este tiempo es determinada la humedad del papel asociada a un valor de succión matricial, que es el mismo del cuerpo de prueba. Como el valor de succión es determinado a través de una curva de calibración, este método es conocido como indirecto [17].

Se recomiendan las ecuaciones a continuación para ser utilizadas como curvas de calibración [18], [19]. Para contenidos de humedad ( $w$ ) mayores al 47% se utiliza la ecuación (4) y para contenidos de humedad ( $w$ ) menores o iguales al 47% se utiliza la ecuación (5).

$$Succión (kPa) = 10^{(6,05-2,48 \log w)} \tag{4}$$

$$Succión (kPa) = 10^{(4,84-0,0622 \log w)} \tag{5}$$

Posteriormente se determina la humedad de los cuerpos de prueba y se grafica la curva característica o curva de retención de agua del suelo (contenido de humedad vs succión), como se muestra en la Fig. 6.

La curva característica del material no presenta una forma bimodal que muestre una clara diferenciación entre macro-poros, poros intermediarios y micro-poros. Hay una reducción gradual de los poros con una leve insinuación de poros intermediarios (para una humedad del 21%, aproximadamente). Lo que indica que se tiene una distribución de poros homogénea, como se observó en las imágenes de SEM.

### Desagregación

La prueba de desagregación es un ensayo cualitativo que consiste en someter cubos de suelo de 6 cm de lado a inmersión parcial y total en agua destilada, pretendiendo examinar la estabilidad de una muestra indeformada de suelo ante la inmersión en agua, lo cual puede ser directamente asociado a fases del proceso erosivo o a mecanismos importantes en el estudio de la erosión [15]. Para las muestras sometidas a saturación tanto total (Fig. 8), como parcial (Fig. 9), las muestras conservaron su estabilidad estructural y no hubo cambios volumétricos significativos, lo cual puede deberse a los altos valores de succión que el sue-

lo presenta para contenidos de humedad elevados.

### CONCLUSIONES

Los ensayos clásicos de laboratorio para la caracterización geotécnica, se quedan cortos en información acerca del comportamiento de los suelos tropicales; y es por eso que las pruebas específicas permiten una mayor aproximación al comportamiento geotécnico de los materiales y una mejor idea del grado de meteorización en que se encuentran los suelos.

El ensayo de granulometría con y sin defloculante indicó presencia de agregaciones, comunes en suelos meteorizados; así como los resultados obtenidos con la prueba de DpH mostraron una posible predominancia de oxi-hidróxidos de hierro y aluminio en el suelo, concordando, adicionalmente, con los resultados del ensayo MCT y con la presencia de minerales como gibsita y goetita, encontrados por medio de la difracción de rayos X.

Los análisis por el SEM no muestran una estructura con macroporos y micro-poros, como lo indica de igual forma el



Fig. 8. Inmersión total



Fig. 9. Inmersión parcial

ensayo de succión, lo que refleja que a pesar de que el suelo está meteorizado, su grado de meteorización no es tan severo como para generar una estructura de macro y microporos típica de suelos tropicales lateríticos altamente meteorizados.

Los resultados de consolidación reflejan un comportamiento colapsible del suelo al ser saturado cuando se tienen cargas impuestas superiores a 93 kPa, haciendo que el suelo se debilite y pierda la estabilidad estructural, llevándolo a sufrir deformaciones excesivas.

En conclusión, los resultados han reflejado la importancia de una adecuada caracterización de suelos tropicales lateríticos. La metodología planteada permite definir propiedades importantes como la colapsibilidad, la susceptibilidad a la erosión y la variación de la succión con el contenido de humedad, propiedades altamente influyentes en la comprensión de problemas que ocurren en la ingeniería.

## AGRADECIMIENTOS

Al grupo del curso “Comportamiento de suelos tropicales”, Facultad de Minas, Universidad Nacional, 2012-01. De igual forma, a los laboratorios de Geotecnia y Pavimentos, Caracterización de Materiales, de la Universidad Nacional, sede Medellín.

## REFERENCIAS

- [1] N. Valderrama, J. Yepes, J. Mesa and Y. Valencia, “Una metodología para la caracterización física, mineralógica, estructural y mecánica de un suelo tropical en el Valle de Aburrá, Municipio de Girardota”. *XVI Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana*, Bogotá D.C., 2012, 11 p.
- [2] SIATA. Sistema de Alerta Temprana de Medellín, estación Pluviométrica en el municipio de Girardota, 2007.
- [3] ASTM D2216. *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. 2005.
- [4] ASTM D4318. *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. 2005.
- [5] ASTM D854. *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. 2006.
- [6] ASTM D422. *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. 2007.
- [7] J. S. Nogami and D. F. Villibor, *Pavimentação de baixo custo com Solos Lateríticos*. São Paulo, Ed. Vilibor, São Paulo, 1995, 213 p.
- [8] ASTM D3080. *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. 2006.
- [9] ASTM D2435. *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. 2003.
- [10] ASTM D5298. *Standard test methods for measurement of soil potential (Suction) using filter paper*. 2003.
- [11] ASTM G51-95. *Standard Test Method for Measuring pH of Soil for Use in Corrosion Testing*. 2012.
- [12] E. Kiehl, *Manual de edafologia: Relações solo-planta*. Ed. Agronômica Ceres, São Paulo, 1979, 264 p.
- [13] EMBRAPA, *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Centro Nacional de Pesquisa

- do Solo, 2a edição, Rio de Janeiro, 1997, 212 p.
- [14] M. Lima, *Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas*. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, 336 p., Brasília, DF, 2003, 336 p.
- [15] J. Camapum de Carvalho, M. Matines, N. Moreira and M. T. Da Silva, *Processos erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. Ed. FINATEC, Brasília, 2006, 464 p.
- [16] N. H. Gutierrez, *Influencia de aspectos estruturais no colapso de solos do norte do Paraná*. Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado, Brasil, 143 p. 2005.
- [17] D. G. Fredlund and H. Rahardjo, *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons Inc., New York, 1993, 517 p.
- [18] F. A. M. Marinho, “A técnica do Papel Filtro para Medição da Sucção”. *Anais do Encontro de Solos Não Saturados*. Porto Alegre, RS, 1995, pp. 112-125.
- [19] R. J. Chandler, M. S. Crilley and G. Montgomery-Smith, “A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings”. *Proc. Instn. Civ. Engrs Civ. Engng.* 92, (May 1992), pp. 82-89.