

PROPIEDADES DE UN INCEPTISOL DERIVADO DE GRANITO Y SUS IMPLICACIONES EN LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

Luis Fernando Salazar Gutiérrez*

SALAZAR G., L.F. Propiedades de un inceptisol derivado de granito y sus implicaciones en la susceptibilidad a deslizamientos. Revista Cenicafé 66(1): 61-75. 2015

Para los suelos de la región cafetera de Colombia cultivados en café en zonas de ladera, son escasos los estudios sobre los procesos involucrados en los movimientos en masa relacionados con sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. Con el fin de contribuir a este conocimiento, se seleccionó un Inceptisol derivado de granito, ubicado en el municipio de Ibagué (Colombia), se tomaron muestras de cajón inalteradas, con cilindro de pared delgada, y suelo alterado hasta los 1,60 m de profundidad. El horizonte B presentó una cohesión efectiva de 10 kPa y un ángulo de fricción efectivo de 26°. El índice de compresión fue de 0,31. El suelo se caracterizó como un limo de baja plasticidad (ML), densidad aparente entre 1,28 a 1,54 kg.m⁻³, con gravedad específica de 2,66 kg.m⁻³. Dadas su baja cohesión, diferencias en la permeabilidad de sus horizontes, desde poco permeable hasta muy poco permeable, valor de saturación de 0,3 cm³.cm⁻³ y que según los límites de consistencia y curva característica de humedad del suelo, éste puede pasar de estado sólido a líquido, con pequeñas variaciones en el contenido de humedad, puede inferirse que se trata de un suelo propenso a la erosión hídrica y movimientos en masa superficiales.

Palabras clave: Suelo, geotecnia, laderas.

SOIL PROPERTIES OF AN INCEPTISOL DERIVATE FROM GRANITE AND ITS IMPLICATIONS IN THE LANDSLIDES SUSCEPTIBILITY

For soils of the Colombian coffee region of coffee grown in hillside areas, there are few studies on the processes involved in mass movements relating to their physical, mechanical and chemical properties. In order to contribute to this knowledge, it was selected an inceptisol derived from granite located in the city of Ibague - Colombia, box samples, unaltered with thin-walled cylinder and disturbed soil until 1,60 m depth were taken. The soil horizon B provided an effective cohesion of 10 kPa and effective angle of friction of 26°. The compression ratio was 0.31. The soil was characterized as a low plasticity silt (ML), bulk density between 1.28 to 1.54 kg.m⁻³, with specific gravity of 2.66 kg.m⁻³. Due to their low cohesion, differences in the soil permeability between horizons, the soil saturation value of 0.3 cm³.cm⁻³, the limits of consistency and soil moisture characteristic curve parameters, could be inferred that this is a soil prone to hydric erosion and shallow mass movements.

Keywords: soil, geotechnical, hillslopes.

* Investigador Científico I. Disciplina de Suelos, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

El granito es una roca muy representativa en la cordillera Central de los Andes en Colombia; mineralógicamente está formado por cuarzo, feldspatos, hornblenda y micas, cuando disminuye el contenido de cuarzo se forma granodiorita y cuarzdiorita (19). Una de las unidades cartográficas más representativas de este tipo de suelo en la región Andina es la unidad San Simón, la cual es susceptible a procesos de erosión y movimientos en masa (13, 14). Esta unidad corresponde a un suelo residual, formado a partir de granito de la formación geológica denominada batolito, de Ibagué. Su fisiografía corresponde a un paisaje de vertientes erosionables y pertenece al orden taxonómico de los inceptisoles y entisoles.

La unidad San Simón, es la principal unidad cartográfica de suelos de las zonas cafeteras del centro y sur del Tolima y del Huila; se ubica en los municipios de Ibagué, Rovira y Chaparral, en el Tolima, y en los municipios de Timaná, Sicandé, Pitalito, Tarqui, San Agustín, Iquirá, Teruel y Palermo en el Huila. En el municipio de La Argentina en el Huila se encuentra en asociación con tobas volcánicas de la unidad cartográfica Salado Blanco de acuerdo con los estudios de la Federación Nacional de Cafeteros-FNC (13, 14).

En términos generales, se localiza entre los 1.000 y 2.000 m de altitud; cuando las condiciones climáticas no son favorables para la transformación total de la roca el perfil consta de arena suelta, con variaciones en el color debido a la oxidación. Generalmente se encuentra en pendientes del 70% con grandes longitudes, lo que impide el desarrollo normal del perfil debido a los procesos denudativos (13, 14).

Según Núñez (25), la meteorización del batolito desarrolla suelos residuales y roca parcial a totalmente meteorizada, que alcanza espesores entre 3 y 15 m. Se trata de materiales que varían entre arcillas limosas hasta arenas gruesas limosas, que desarrollan diferentes procesos denudativos como erosión laminar difusa, erosión en surcos y erosión en cárcavas. Asociados a las cárcavas existen deslizamientos rotacionales. El fenómeno más sentido, por los daños que puede causar, es la generación de flujos de suelo que se transforman en avenidas torrenciales que transitan a lo largo de los cauces y valles de las corrientes de agua que drenan el área donde aflora el batolito de Ibagué. Para Núñez (25) un proceso poco identificado y estudiado en este tipo de suelo es el conocido como fusión o erosión interna que, aparentemente, forma los hundimientos característicos en esta unidad cartográfica. Los procesos de erosión y remoción en masa son más frecuentes en terrenos desprotegidos de vegetación arbórea, en donde sólo hay pastos y actividad antrópica, especialmente, técnicas inadecuadas de cultivo, vías mal diseñadas y sin obras de protección y mal manejo de aguas lluvias y residuales.

Ejemplos de estos fenómenos pueden observarse en toda la zona montañosa que rodea a la ciudad de Ibagué en el departamento del Tolima (Colombia), en donde se han producido pérdidas humanas y daños materiales incalculables debido a la acción de estos eventos (5). Las zonas bajas pueden ser severamente afectadas por flujos de tierra y avenidas torrenciales originadas en la zona montañosa, así como por inundaciones.

El efecto de la actividad humana en el incremento de los deslizamientos puede estar relacionado con la degradación o

remoción de la vegetación (deforestación), prácticas agrícolas inadecuadas, sobrecargas, explanaciones, llenos artificiales, construcción de reservorios, intervención de drenajes y concentración de aguas (8). El cambio o la intervención de la cobertura vegetal, además de disminuir el refuerzo de las laderas, tiene efectos fundamentales en las relaciones hidroedafológicas, que guardan estrecha relación con la estabilidad de las laderas (18).

Actualmente, para las condiciones de la zona cafetera colombiana y para los suelos de la unidad San Simón, existe poca información sobre los factores involucrados en los deslizamientos, como las propiedades hidrofísicas, mecánicas y químicas relacionadas con la susceptibilidad a deslizamientos. Es así como, la estabilidad de una ladera depende entre muchos otros factores de los parámetros de resistencia al corte, cohesión y fricción efectivos del material (c' y ϕ'), la altura e inclinación del talud, la densidad del material, y la distribución de las presiones intersticiales en la ladera (1); mientras que la estabilidad de los suelos en condiciones no saturadas guarda relación estrecha con la curva característica de humedad del suelo (*SWCC* por sus siglas en inglés), que es la relación entre el contenido de agua (θ) y la succión (16). En esta curva puede definirse la humedad de saturación (θ_s) y el valor de entrada de aire o presión de burbujeo, donde el aire comienza a ingresar a los poros del suelo (20), parámetros de importancia en la susceptibilidad a los deslizamientos (16). Por lo anterior, se planteó un estudio de caso para determinar algunas propiedades mecánicas, hidrofísicas y químicas relacionadas con la susceptibilidad a deslizamientos de un inceptisol de importancia para la producción de café en Colombia, con el fin de generar

conocimientos sobre las propiedades de los suelos de la Unidad San Simón, relacionadas con los deslizamientos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. El muestreo de la unidad de suelo se realizó en la zona cafetera del municipio de Ibagué - Tolima, vereda Chembe, finca Cafetal del Río, ubicada entre los $04^{\circ} 28' 36''$ N, $75^{\circ} 09' 59''$ W, a 1.220 m de altitud y los $04^{\circ} 28' 39''$ N, $75^{\circ} 10' 17''$ W a 1.344 m de altitud.

Muestras de suelo. En dos lotes de la finca, con condiciones fisiográficas y de suelo similares, se realizaron dos calicatas de aproximadamente 1,60 m de profundidad, donde se obtuvieron muestras de suelo alterado a humedad de campo. En cada sitio, a 80 cm de profundidad, se obtuvieron dos muestras de suelo de cajón de 25 x 25 x 25 cm. Igualmente, por cada horizonte de suelo, se tomaron muestras con tubos de pared delgada y muestras alteradas en bolsas debidamente etiquetadas. Las muestras del suelo pertenecen a la Unidad San Simón, representativa de la zona cafetera central, y susceptible a procesos de erosión y movimientos en masa (13, 14).

Metodología. Se realizó la caracterización mecánica del horizonte B y la caracterización física y química de los horizontes A, AB y B.

Las pruebas de mecánica de suelos realizadas al horizonte B, para lo cual se tomaron muestras de cajón a 80 cm de profundidad fueron las siguientes:

- Resistencia al corte directo consolidado drenado, según la norma ASTM D3080-04 (2)
- Prueba de consolidación, según la norma

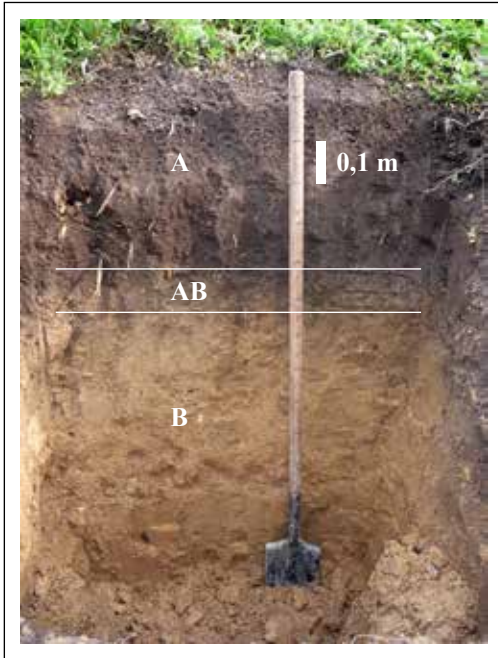


Figura 1. Perfil típico representativo del suelo muestreado de la Unidad San Simón. Clasificado taxonómicamente como Typic eutropepts según USDA (31).

ASTM D2435 – 04 (3)

Las pruebas físicas realizadas a los horizontes A, AB y B fueron:

Granulometría. Método de tamizado según norma (ASTM D 422-63) y la pipeta (dispersión con pirofosfato de sodio al 8%) adaptado de Gee y Bauder (17). Se determinó el porcentaje de limos (partículas entre 0,05 y 0,002 mm de diámetro promedio) y arcillas (partículas menores de 0,002 mm de diámetro promedio) por el método de la pipeta, para lo cual se empleó el equipo Daiki DIK-2020. Previa destrucción de materia orgánica con H_2O_2 al 30%. Se separó la fracción de arenas pasando la suspensión a través de un tamiz No.325, posteriormente la suspensión se llevó a un frasco de sedimentación de 500 cm, con el fin

de determinar la fracción de limos y arcillas mediante muestreo con pipeta, de acuerdo con el tiempo y profundidad establecido por el fabricante (Daiki Rika Kogyo Co, Ltd,) basado en la ley de Stokes. Se determinó el peso seco de arenas y de las fracciones de limos y arcillas, y con base en el peso seco de la muestra se calculó la distribución en porcentaje de arenas, limos y arcillas. Igualmente, se determinó el contenido de arcillas, limos y arenas por el método del hidrómetro de Bouyucos.

Límites de consistencia. Límite plástico, límite líquido e índice de plasticidad, de acuerdo a la norma ASTM D4318-84 descrita por USDA (30), Abramson *et al.* (1) y Das (10).

Densidad aparente. Método del cilindro (6).

Gravedad específica o densidad real. Método del picnómetro ASTM, 1958, descrito por Blake y Hartge (7).

Porosidad total. Calculada a partir de las densidades real y aparente (9).

Conductividad hidráulica. Método del permeámetro carga constante en muestras saturadas (22), calculado mediante la Ecuación <1>.

$$k_{sat} = QL/Ath \quad <1>$$

Donde:

k_{sat} = Coeficiente de conductividad hidráulica saturada

Q = Caudal

L = Longitud de la muestra

A = Área transversal de la muestra

t = Tiempo

h = Gradiente hidráulico

Se determinó el coeficiente de permeabilidad en el horizonte B mediante los coeficientes de consolidación al utilizar la Ecuación <2>.

$$k = C_v \gamma_w m_v \quad <2>$$

Donde:

k = Coeficiente de permeabilidad

C_v = Coeficiente de consolidación

m_v = Coeficiente de consolidación volumétrica

γ_w = Peso específico del agua

Curva característica de humedad. La curva característica del agua en el suelo, definida como la relación entre el contenido de agua y la succión (15), se determinó mediante una metodología que combinó la medición del contenido de agua volumétrica (%) por el método gravimétrico y la succión por medio de tensiómetros con transducción electrónica Eijkelkamp (0 a - 85 kPa). A partir de muestras de suelo alterado, se moldearon tres monolitos de suelo por cada horizonte, en cilindros de PVC de 10 cm de diámetro por 12 cm de altura. Los monolitos se moldearon hasta alcanzar la densidad aparente del campo. En el punto medio de cada cilindro se ubicó un tensiómetro de humedad de copa porosa con transducción electrónica de masa conocida.

Una vez constituidas las muestras de suelo en cada cilindro y ubicado en cada una de ellas el tensiómetro de humedad, el suelo se sometió a procesos continuos de humedecimiento (de arriba hacia abajo) y secado. Se realizaron las lecturas de tensión, con el tensiómetro de transducción electrónica, e inmediatamente se registraba la masa del cilindro + suelo húmedo + tensiómetro. Al final de las mediciones se registró la masa de suelo seco a la estufa a 105+/-5°C por 18 h. De esta forma, se conoció el contenido de agua en el suelo con su respectivo valor de tensión para los procesos de secado y humedecimiento y la humedad saturada (θ_s), que fue el máximo valor de humedad alcanzado por el suelo bajo estas condiciones. Lo anterior fue el insumo para construir la curva característica

de humedad mediante el modelo empírico de Fredlund y Xing (15) (Ecuación <3>), cuyos coeficientes (a , n , m) se obtuvieron con el programa de regresión no-lineal NLIN del paquete estadístico SAS®.

$$\theta = \theta_s \left[\frac{1}{\ln[e + (\psi/a)^n]} \right]^m \quad <3>$$

Donde:

θ = Contenido de agua en el suelo (%)

θ_s = Humedad saturada

ψ = Humedad matricial o succión

a , n , m = Coeficientes del modelo. a representa el valor de succión donde el aire comienza a entrar a los poros más grandes del suelo conocida también como presión de entrada de aire. n y m son valores implícitos en la pendiente y forma de la curva. n se relaciona con la tasa de saturación y m con las condiciones de humedad residual.

Propiedades químicas del suelo. Se realizó la caracterización de las propiedades químicas del perfil de suelo. Contenido de materia orgánica por el método de Walkley y Black (33), capacidad de intercambio catiónico, pH, potasio, calcio, magnesio, sodio, manganeso, hierro, aluminio (30) y azufre (fosfato de calcio 0,008 M – turbidimetría).

Análisis estadístico. Por tratarse de un estudio de caso exploratorio y no experimental, se realizó el análisis descriptivo de los datos obtenidos para las propiedades físicas de los suelos, y con el fin de valorar si existían diferencias del comportamiento de la curva de retención humedad del suelo debidas al efecto de los cambios en los horizontes del perfil, se compararon los parámetros de los modelos que describían las curvas características de humedad, para lo cual se empleó el método del modelo de regresión no-lineal

NLIN del paquete SAS®, con el fin de estimar los parámetros de ajuste de cada uno de los modelos y sus intervalos de confianza según prueba t al 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados tienen un alcance limitado dado que el sitio de muestreo podría no representar el comportamiento general de la Unidad de Suelos San Simón, dada la heterogeneidad de la misma que es gobernada por los factores de formación del suelo. Las ideas que se consignan son el resultado del análisis de la información siguiendo los criterios de ingeniería y edafología que contribuyen a explicar algunos comportamientos y aplicar procedimientos en la práctica de la ingeniería geotécnica.

Parámetros de resistencia al corte

Según el ensayo de corte directo consolidado drenado, el horizonte B presentó una cohesión efectiva de 10 kPa y un ángulo de fricción efectivo de 26° (Figura 2). En términos relativos, a partir de la cohesión efectiva baja (10) se podría interpretar su alta susceptibilidad a la erosión hídrica por la desagregación de las partículas de suelo

debida al efecto de las gotas de lluvia y su susceptibilidad al movimiento en masa una vez se pierda dicha cohesión por la suma de diferentes factores como son la saturación, la pérdida de succión y la deforestación, y al tener en cuenta su ángulo de fricción relativamente bajo (10).

Prueba de compresibilidad

Esta prueba permitió formar la figura típica de un suelo compresible. El índice de compresión fue 0,31 que se asocia con una compresibilidad moderada a media, de una arcilla blanda normalmente consolidada (10) (Figura 3 y Tabla 1).

A partir de la prueba de consolidación y según el índice de colapso (I_c) de Bell y Culshaw (4), que representa la disminución relativa de la relación de vacíos de un suelo confinado cuando se le satura bajo una carga vertical determinada y que se expresa mediante la Ecuación <4>:

$$I_c = \Delta e / (1+e) \quad <4>$$

Donde:

I_c = índice de colapso de Bell y Culshaw (4)

Δe = Gradiente de la relación de vacíos

e = Relación de vacíos

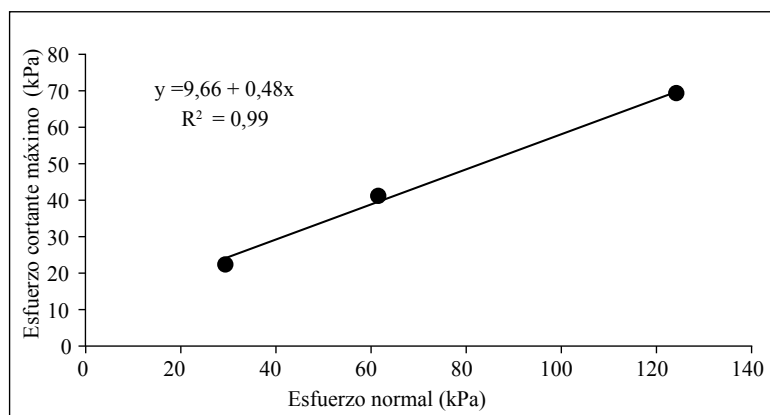


Figura 2. Representación gráfica de la prueba de corte directo por el diagrama de Mohr. La intersección de la recta con el eje Y indica la cohesión efectiva y el ángulo entre el eje de esfuerzos normales y la tangente a la envolvente de Mohr es el ángulo de fricción interna (ϕ) (29).

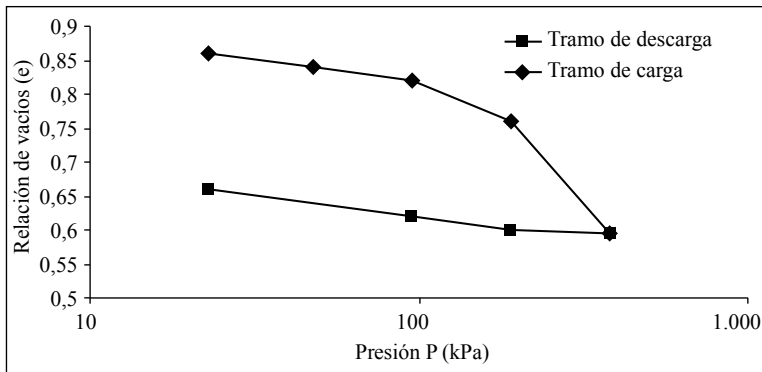


Figura 3. Curva de compresibilidad del horizonte B. Presión – relación de vacíos.

Tabla 1. Coeficientes obtenidos de la prueba de consolidación del suelo (horizonte B).

σ_v (kPa)	a_v (1/kPa)	m_v (1/kPa)	Δe	C_c
23,6 – 47,2	0,0001	0,00054	0,024	-
47,2 - 94	0,0001	0,00023	0,020	-
94,6 – 189,3	0,001	0,00029	0,050	-
189,3 – 378,8	0,001	0,00050	0,166	0,309

Puede interpretarse que el horizonte B presenta susceptibilidad al colapso, con un valor del índice de 5,9%, que lo clasifica como un material con problema de colapso. El colapso es la disminución del volumen, y por consiguiente, de la relación de vacíos de un suelo confinado, cuando se le satura bajo una carga vertical constante. Un suelo colapsable puede resistir una carga vertical relativamente grande, con pequeñas deformaciones, mientras el contenido de humedad sea bajo, pero al aumentar el contenido de humedad puede presenciarse un asentamiento súbito sin incremento de la carga (21).

Análisis de granulometría

En las Tablas 2 y 3 se presentan los datos relacionados con la granulometría de los suelos, obtenida por los métodos de la pipeta e hidrómetro, respectivamente. Al tener en cuenta los resultados de la prueba de pipeta e hidrómetro (Según la

clasificación del triángulo textural de los suelos del USDA (20), los tres horizontes (A, AB y B) se clasifican como suelos franco arenos arcillosos. Según el SUCS (Sistema unificado de clasificación de suelos, norma ASTM D2487), reportado por Das (10), el suelo se caracterizó en términos generales como un limo, que puede estar en el límite entre una arena limosa y un limo arenoso.

El comportamiento mecánico de los limos a diferencia de las arcillas y arenas no ha sido estudiado ampliamente, y en la actualidad no se ha entendido suficientemente (1). En general, los niveles superficiales (A y AB) se caracterizan por una granulometría más fina y en el nivel más profundo (B) se encuentra el suelo de naturaleza más arenosa (Figura 4 y Tabla 4). Los valores de arcilla obtenidos por las dos metodologías (pipeta e hidrómetro) y las diferencias en los contenidos de arenas y limos, posiblemente se deben al método de dispersión.

Tabla 2. Promedio de la distribución granulométrica según el método de la pipeta.

Horizonte	Profundidad (m)	Arenas	Desv.	Limos (%)	Desv.	Arcillas	Desv.
A	0 -0,35	51,8	0,5	27,6	0,5	20,6	0,3
AB	0,35 - 0,45	50,4	0,9	26,8	1,2	22,8	0,9
B	0,45 m - >1,60	58,0	1,1	22,1	1,0	19,9	1,1

Tabla 3. Promedio de la distribución según el método del hidrómetro.

Horizonte	Profundidad (m)	Arenas	Desv.	Limos (%)	Desv.	Arcillas	Desv.
A	0 -0,35	56,0	5,7	23,0	5,7	21,0	0,0
AB	0,35 - 0,45	60,0	n.d.	18,0	n.d.	22,0	n.d.
B	0,45 m - >1,60	60,5	0,7	20,0	1,4	19,5	0,7

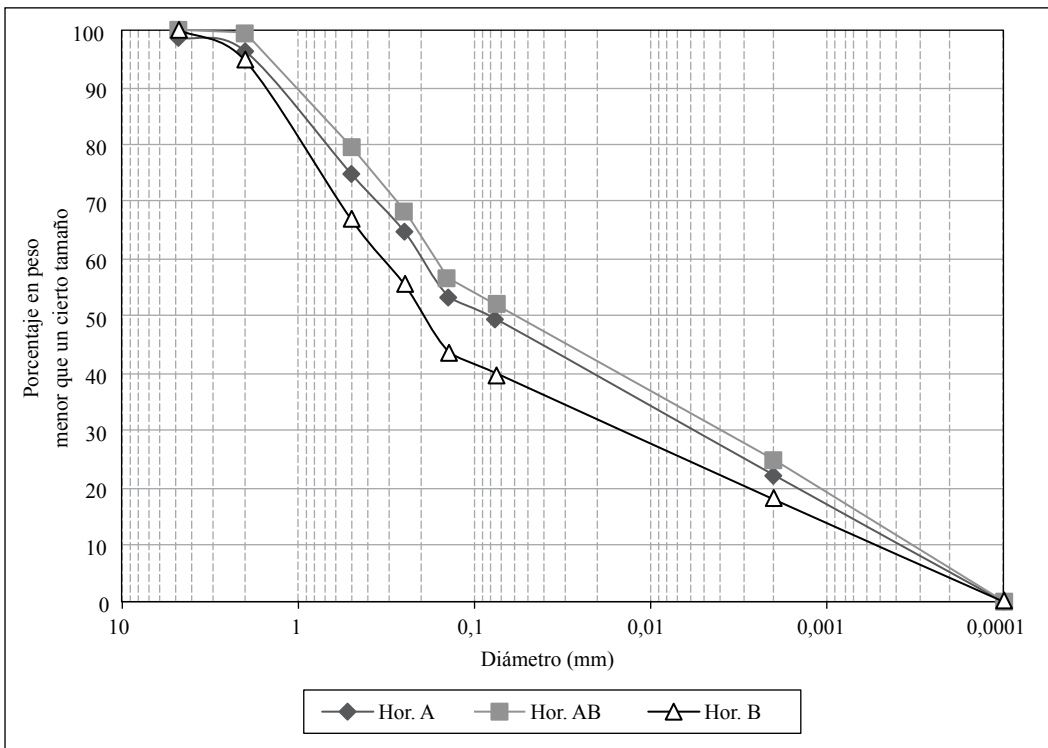


Figura 4. Curva granulométrica por el método combinado (tamizado y pipeta).

Límites de consistencia

El suelo se caracterizó cualitativamente como un limo de baja plasticidad (ML) según la

carta de plasticidad de Casagrande (Tabla 5); sin embargo, en conjunto, el suelo corresponde a una arena limosa (SM). En la carta de plasticidad se observó que los suelos de los

Tabla 4. Clasificación del suelo según la SUCS a partir de la curva granulométrica.

Horizonte	Profundidad (m)	D ₆₀	D ₁₀ (mm)	D ₃₀	Clasificación SUCS
A	0-0,35 m	0,2	0,0003	0,0051	SM (arena limosa)
AB	0,35 - 0,45 m	0,18	0,0002	0,004	ML (limo)
B	0,45 m - >1,60m	0,33	0,0004	0,015	SM (arena limosa)

D₁₀ Diámetro efectivo del grano.

Tabla 5. Límites de consistencia del suelo.

Horizonte	Profundidad (m)	w _L (%)	w _p (%)	I _p (%)	A
A	0-0,35 m	44,7	30,1	14,6	0,71
AB	0,35 - 0,45 m	45,8	33,6	12,2	0,53
B	0,45 m - >1,60m	45,9	27,6	18,3	0,92

w_L = Límite líquido, w_p = Límite plástico, I_p = Índice de plasticidad, ML = Limo de baja plasticidad. * Según carta de plasticidad de Casagrande (10). A=I_p/fracción de arcilla (actividad de las arcillas de Skempton, 1953, Reportado por Das (10)).

perfiles están localizados ligeramente debajo de la Línea A. Los limos presentan un rango amplio de comportamiento que comprende desde las arenas finas hasta las arcillas. Estos limos de la unidad San Simón, por ser de baja plasticidad podrían comportarse geotécnicamente más como arenas finas que como arcillas. Cabe anotar que estos suelos tienen como propiedad distintiva su baja permeabilidad, que influye en su comportamiento y merece consideración especial. Sin embargo, pueden ser sensibles al humedecimiento y a la compactación al igual que las arcillas.

De acuerdo los valores de límite líquido entre 44,7 % y 45,9 % se trata de un suelo de compresibilidad baja a media. El índice de plasticidad por debajo de 25 se califica como bajo y los valores encontrados fueron de 14,6 a 18,3 lo que indica que el suelo puede cambiar de estado sólido a líquido con un poco contenido de humedad, lo que lo hace propenso a los movimientos en masa.

Propiedades volumétricas del suelo

En la Tabla 6 se presenta la caracterización de las propiedades volumétricas del perfil.

La densidad aparente se incrementó con la profundidad del perfil. Se observa como el horizonte A fue menos denso y, por ende, más poroso, debido posiblemente a su mayor contenido de materia orgánica (5%). El horizonte AB fue más denso y con menor porosidad que el horizonte A, lo cual puede tener implicaciones en el movimiento del agua y en la saturación rápida del horizonte orgánico (A). La densidad aparente y específica del horizonte B es la mayor, con la porosidad total más baja, lo anterior puede tener implicaciones en su estabilidad, debido a que su alta densidad favorece el incremento de los esfuerzos efectivos y totales. El horizonte B presentó la menor relación de vacíos (0,72), lo cual muestra que se trata de un suelo compacto, que tiende a saturarse más rápidamente y comprometer la estabilidad de los horizontes (A y AB), por tratarse de un suelo poco permeable. La gravedad específica se incrementó levemente con la profundidad del perfil, como se reporta para los suelos residuales, con valores del orden de 2,63 a 2,66 kg.m³, que pueden relacionarse con la presencia de minerales de cuarzo (12) y corresponden a los valores de 2,65 kg.m³ para el batolito de Ibagué (32).

Tabla 6. Propiedades volumétricas del suelo.

Horizonte	Profundidad (m)	G_s (kg.m ⁻³)	Desv.	ρ_b (kg.m ⁻³)	Desv.	n (%)	e_0
A	0-0,35	2,63	0,008707	1,28	0,111241	51,28	1,05
AB	0,35-0,45	2,64	0,009561	1,46	0,0663	44,72	0,81
B	0,45 m - >1,60	2,66	0,014828	1,54	0,067089	41,98	0,72

G_s = gravedad específica de los sólidos o densidad de los sólidos, ρ_b = Peso específico seco o densidad aparente, n = porosidad total, e_0 = relación de vacíos, Desv.= Desviación estándar.

Permeabilidad

El ensayo de permeabilidad en medio saturado mostró que se trató de un perfil de suelo calificado cualitativamente como poco permeable a muy poco permeable (29) (Tabla 7); su comportamiento probablemente se deba al contenido de arenas finas y limos. Debido a la gran proporción de partículas finas presentes en el suelo (Tablas 2 y 3) es posible que el método empleado de cabeza constante no sea el mejor para explicar la permeabilidad del mismo, de allí los valores altos de desviación estándar; sin embargo, la determinación de la permeabilidad del horizonte B por el método de consolidación, según la norma ASTM D2435-04 (3) (Tabla 7), mostró valores más bajos de permeabilidad para el horizonte B. Es posible que la escasa permeabilidad del horizonte B pueda afectar la estabilidad de los horizontes superiores (A y AB), por convertirse en un plano de falla potencial (23).

Características químicas del suelo

Los valores de pH y sodio (Na) del suelo se incrementaron con la profundidad del horizonte, caso contrario a lo ocurrido con el contenido de materia orgánica (MO), magnesio (Mg), capacidad de intercambio catiónico (CIC), fósforo (P), manganeso (Mn), cobre (Cu) y cinc (Zn) que decrecieron con la profundidad del perfil (Tabla 8). Se consideró un suelo muy pobre en bases (K, Na y Mg), fósforo y materia orgánica, con contenidos moderadamente altos de Ca. Su

capacidad de intercambio catiónica es baja (< 8 cmol₍₊₎.kg⁻¹), que puede relacionarse con la moderada actividad de las arcillas (Tabla 5).

Suzuki *et al.* (27), Omar *et al.* (26) y Medina y Salazar (24) indican que los suelos ácidos poseen una resistencia al corte mayor que los suelos básicos, debido a que la estructura del suelo tiende a ser más floculada que dispersiva por los bajos valores de pH. En este sentido, el horizonte A podría presentar una estabilidad mayor debido a sus contenidos superiores de materia orgánica frente a los demás horizontes evaluados. La materia orgánica presenta interacción con otros componentes del suelo como iones metálicos y arcillas, y debido a su efecto cementante crea estructuras muy estables, lo cual favorece el incremento de la cohesión del suelo, aun en condiciones saturadas (11, 28).

Curva característica de humedad

Al tener en cuenta la interpretación teórica donde el suelo se encuentra en estado de saturación cuando el potencial matricial alcanza el valor de cero, las curvas características de humedad obtenidas de los tres horizontes de suelo (Figuras 5, 6 y 7) permiten inferir que el perfil de suelo tiende a saturarse rápidamente, con valores bajos de humedad cercanos a 0,3 cm³.cm⁻³. Lo anterior se debe posiblemente a las características granulométricas del suelo, que le confieren una porosidad total promedio igual o inferior al 50% (Tabla 6). Este comportamiento

puede tener implicaciones en la estabilidad del suelo y la susceptibilidad a la erosión, dado que los espacios porosos se llenan rápidamente de agua y se incrementa así la presión intersticial y la escorrentía.

La observación general de las curvas características de humedad obtenidas permite interpretar que se trata del comportamiento de un suelo de partículas finas, otorgado por la fracción de limos y arcillas, ya que no se evidencia un cambio abrupto en el comportamiento de la humedad. Este comportamiento puede obedecer a la oclusión de poros, la densidad aparente alta y permeabilidad muy lenta, de acuerdo con los datos obtenidos para estas propiedades.

Al comparar los coeficientes de las curvas características de humedad (Tabla 9) en el proceso de humedecimiento (adsorción) de los tres horizontes de suelo, se observa como para los tres coeficientes (a , n , y m) los horizontes AB y B son similares, lo que muestra que no hay una clara diferenciación entre estos dos horizontes en cuanto a la retención de

humedad y, por ende, puede afirmarse que las curvas características de humedad son iguales para estos dos horizontes; pero sí hubo una clara diferencia entre el horizonte A y los horizontes AB y B, al comparar el coeficiente a (Tabla 8). También se ve reflejada la diferencia del horizonte A con el horizonte AB al comparar los coeficientes n y m del modelo. Al comparar las curvas en el proceso de secado (desorción) (Figuras 5, 6 y 7), se observa que los horizontes A y B presentan curvas disímiles dadas las diferencias entre el coeficiente m (Tabla 8).

Lo anterior permitiría interpretar que el horizonte A presenta una salida más tardía del aire atrapado en los poros durante el proceso de adsorción que los horizontes AB y B, y ser el horizonte A quien gana más rápidamente la entrada de aire en el proceso de desorción. Lo anterior tiene implicaciones en la estabilidad, dado que este horizonte es el que mayor resistencia opondría en perder la succión durante el proceso de adsorción y quien más rápido encontraría la entrada de aire en el proceso de desorción.

Tabla 7. Permeabilidad del suelo.

Horizonte	Profundidad (m)	k_{sat}	Desv. (cm.s ⁻¹)	K	Permeabilidad relativa*
A	0–0,35	1,0 x10 ⁻⁴	1,06 *10 ⁻⁴	n.d.	Poco permeable
AB	0,35 – 0,45	2,4 x 10 ⁻⁵	4,57*10 ⁻⁵	n.d.	Muy poco permeable
B	0,45 - >1,60	8,2 * 10 ⁻⁶	1,02*10 ⁻⁵	2,3*10 ⁻⁶ a 3,4*10 ⁻⁷	Muy poco permeable

K_{sat} = coeficiente de permeabilidad saturado obtenido por el método del permeámetro de cabeza constante. k = coeficiente de permeabilidad obtenido con los coeficientes de consolidación (ASTM, 2004b). Con valores de coeficiente de consolidación (Cv) de 4,3*10⁻² y 1,5*10⁻² cm².kgf y de compresión volumétrica (mv) de 0,053 y 0,023 cm².kgf, respectivamente. n.d. = sin dato. *Terzagui et al. (29).de Casagrande (10). A= Ip/fracción de arcilla (actividad de las arcillas de Skempton, 1953, Reportado por Das (10)).

Tabla 8. Características químicas del suelo.

Horizonte	pH		MO	K	Ca	Mg	Na	Al	CIC	P	Fe	Mn	Zn	Cu	B	S
	%															
						cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹										
						mg.kg ⁻¹										
A	5,2	5,0	0,2	2,9	0,7	0,02	0,9	8,0	3,0	251,0	27,0	0,6	1,4	0,4	7,2	
AB	5,3	1,8	0,0	1,5	0,1	0,06	1,7	8,0	2,0	163,0	18,0	0,3	0,0	0,0	8,6	
B	5,8	0,3	0,1	2,4	0,3	0,07	1,0	4,5	1,5	54,5	11,5	0,2	0,2	0,3	2,9	

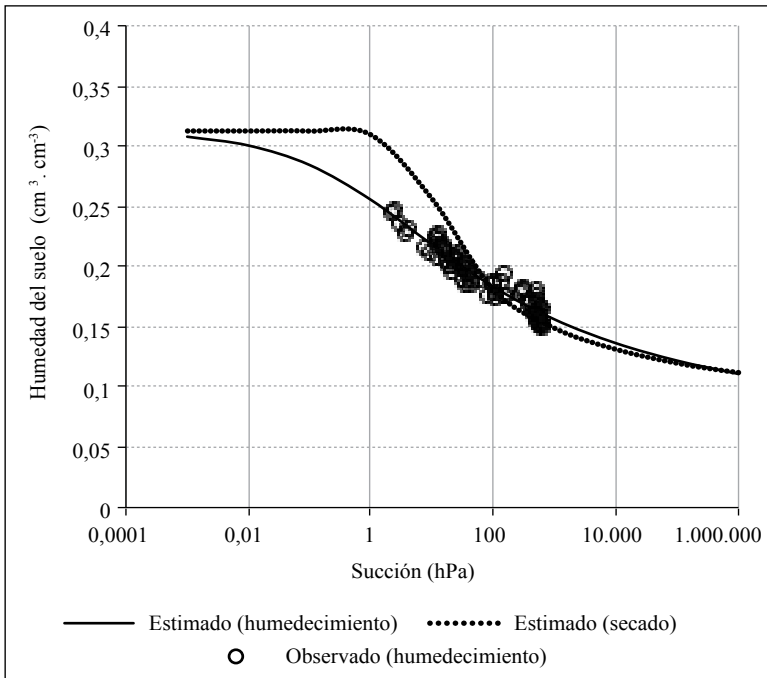


Figura 5. Curva característica de humedad del horizonte A, suelo alterado.

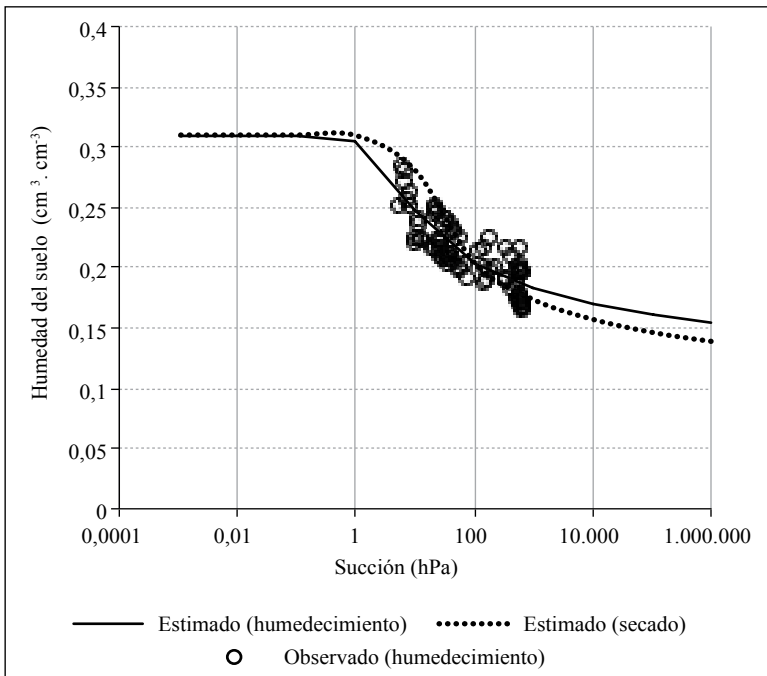


Figura 6. Curva característica de humedad del horizonte AB, suelo alterado.

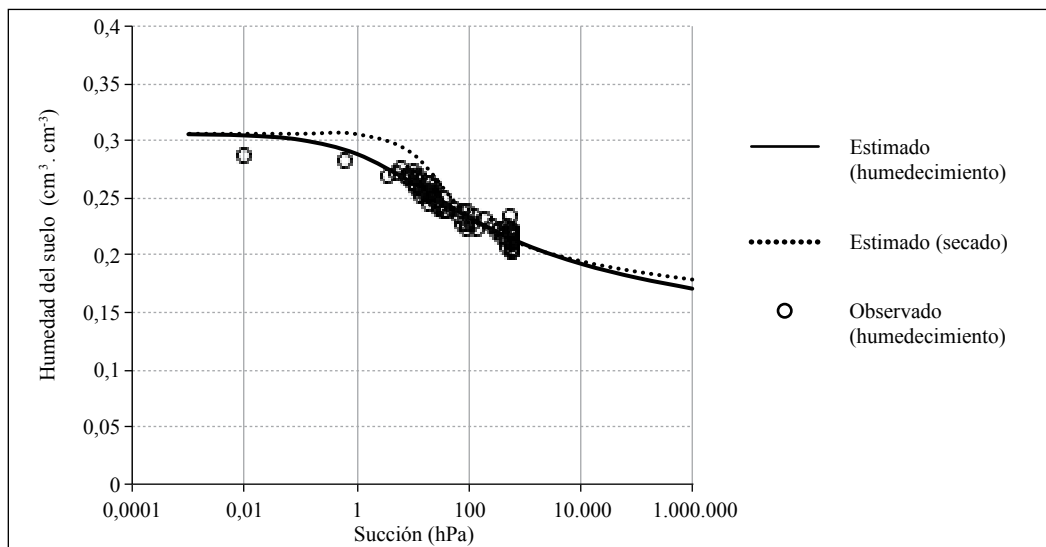


Figura 7. Curva característica de humedad del horizonte B, suelo alterado.

Tabla 9. Coeficientes obtenidos de la curva característica de humedad según el modelo de Fredlund y Xing (15).

Horizonte	Proceso	Coficiente	Valor coeficiente	Error estándar	Límite inferior*	Límite superior*
A	Humedecimiento	<i>a1</i> (hPa)	0,407	0,115	0,177	0,637
		<i>n1</i>	0,428	0,107	0,215	0,642
		<i>m1</i>	0,563	0,118	0,327	0,798
		Θ_s	0,3126			
AB	Humedecimiento	<i>a2</i> (hPa)	2,214	0,803	0,615	3,813
		<i>n2</i>	1,686	0,788	0,116	3,256
		<i>m2</i>	0,227	0,045	0,137	0,317
B	Humedecimiento	Θ_s	0,3100			
		<i>a3</i> (hPa)	1,767	0,355	1,059	2,474
		<i>n3</i>	0,597	0,137	0,324	0,870
		<i>m3</i>	0,282	0,052	0,178	0,386
A	Secado	<i>a1</i>	4,8089	0,3667	4,0578	5,5601
		<i>n1</i>	1,5756	0,2558	1,0516	2,0997
		<i>m1</i>	0,3486	0,0311	0,2848	0,4123
AB	Secado	<i>a2</i>	7,72 n.s	8	-8,5255	23,9831
		<i>n2</i>	2,02 n.s	3	-3,7242	7,7659
		<i>m2</i>	0,25 n.s	0,1409	-0,0346	0,5435
B	Secado	<i>a3</i>	8,5102	2	3,8793	13
		<i>n3</i>	1,9312	0,859	0,1687	3,6938
		<i>m3</i>	0,1729	0,0342	0,1027	0,2432

Intervalos de confianza según prueba t al 5%. n.s = Valor sin significancia estadística.

Se observa una menor pendiente en el horizonte A, representada en el coeficiente n , lo cual implicaría una mayor capacidad para conservar la humedad durante los procesos de secado y humedecimiento.

El mayor valor de entrada de aire para el horizonte A indica que éste puede retener más agua por unidad de volumen que los horizontes AB y B. Por otro lado se observó con claridad el fenómeno de histéresis, en donde para valores de succión iguales se obtienen valores de humedad mayores durante el proceso de drenaje.

Como conclusión y de acuerdo las propiedades mecánicas e hidrofísicas podría inferirse que este suelo es susceptible a la erosión hídrica y movimiento en masa, debido a su baja cohesión (10 kPa); así mismo, que se trata de un suelo de moderada compresibilidad y alta susceptibilidad de colapso. Las diferencias en permeabilidad entre los horizontes A, AB y B pueden crear superficies de falla de los primeros horizontes de suelo sobre el horizonte B de menor permeabilidad, los índices de consistencia y la curva de característica de humedad del suelo indican que el suelo puede pasar de estado sólido a líquido, con pequeñas variaciones en el contenido de humedad, lo cual lo hace propenso a los deslizamientos y flujos superficiales.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por su apoyo en la realización de análisis de suelos. Al Servicio de Extensión del Comité Departamental de Cafeteros del Tolima en especial a los ingenieros Olga Girón y Luis Alberto Olaya por su esmerada colaboración en la toma de las muestras de suelo. A Fabián Hoyos Patiño, ingeniero

geólogo M.Sc., Óscar Echeverri Ramírez, ingeniero civil M.Sc., Edgar Hincapié Gómez, ingeniero agrónomo Ph.D por su asesoría. Al señor Arturo Gómez por su colaboración.

LITERATURA CITADA

1. ABRAMSON, L.W.; LEE, T.S.; SHARMA, S.; BOYCE, G.M. Slope stability and stabilization method. 2a. ed. New York : John Wiley & Sons, 2002. 712 p.
2. ASTM. Standard D3080-04. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. [En línea]. West Conshohocken : ASTM International, 2004a. Disponible en internet: <http://www.astm.org>. Consultado en Agosto de 2011.
3. ASTM. D2435 - 04. Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. [En línea]. West Conshohocken : ASTM International, 2004b. Disponible en internet: <http://www.astm.org>. Consultado en Agosto de 2011.
4. BELL, F.G.; CULSHAW, M.G. Problem soils: A review from a British perspective. En: JEFFERSON, I.; MURRAY, E.J.; FARANGHER, E.; FLEMING, P.R. Problematic soils. Nottingham : Thomas Telford, 2001. 130 p.
5. BELTRAN, J.; CASTIBLANCO, W.; ALFARO, A. Evaluación de zonas con posible amplificación topográfica y susceptibles a deslizamientos debido a un sismo en Ibagué - Colombia. IMME 44(3):9-16. 2006.
6. BLAKE, G.R.; HARTAGE, K.H. Bulk density. p. 363-375. En: KLUTE, A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2a. ed. Madison : American society of agronomy, 1986a.
7. BLAKE, G.R.; HARTAGE, K.H. Particle density. p. 377-382. En: KLUTE A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2a. ed. Madison : American society of agronomy, 1986b.
8. CROZIER, M.J. Deciphering the effect of climate on landslide activity: A review. Geomorphology 124(3/4):260-267. 2010.
9. DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. p. 443-461. Porosity. En: KLUTE A. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2a. ed. Madison : American society of agronomy, 1986.

10. DAS, B.M. Principles of geotechnical engineering. 5a. ed. Toronto : Thomson Learning, 2002. 589 p.
11. DAVIES, P. Influence of organic matter content, moisture status and time after reworking on soil shear strength. *The journal of soil science* 36(2):299-306. 1985.
12. ECHEVERRI R., O. Efecto de la microestructura en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de algunos suelos provenientes de rocas ígneas presentes en Medellín. Medellín : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas, 2005. 104 p. Tesis: Magister en Ingeniería geotecnica.
13. FNC. Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento del Tolima: Programa de desarrollo y diversificación de zonas cafeteras. Bogotá : FNC, 1973. 93 p.
14. FNC. Estudio de zonificación y uso potencial del suelo en la zona cafetera del departamento del Huila: Programa de desarrollo y diversificación de zonas cafeteras. Bogotá : FNC, 1985. 235 p.
15. FREDLUND, D.G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal* 31(3):521-532. 1994
16. FREDLUND, D.G. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 132(3):286-321. 2006.
17. GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle size analysis. p. 383-411. En: KLUTE A. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2a. ed. Madison : American society of agronomy, 1986.
18. GRAY, D.H.; SOTIR, R.B. *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control*. Nueva York : John Wiley and Sons, 1996. 378 p
19. GRISALES G., A. *Suelos de la zona cafetera: Clasificación y uso*. Medellín : Fondo Cultural Cafetero, 1977. 155 p.
20. HILLEL, D. *Environmental soil physics*. San Diego : Academic Press, 1998. 413 p.
21. HOYOS P., F. *Geotecnia: Diccionario básico*. Medellín : Hombre nuevo, 2001. 182 p.
22. KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. p. 687-734. En: KLUTE, A. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2a. ed. Madison : American society of agronomy, 1986.
23. LOURENCO, S.; SASSA, K.; FUKUOKA, H. Failure process and hydrologic response of a two layer physical model: Implications for rainfall-induced landslides. *Geomorphology* 73(1/2): 115-130. 2006
24. MEDINA L., S.B.; SALAZAR G., L.F. Relación entre la resistencia al corte directo y propiedades físicas y químicas en algunos suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* (60)3:253-268. 2009.
25. NUÑEZ, A. *Catálogo de las unidades litoestratigráficas de Colombia Jurásico: Batolito de Ibagué*. Bogotá : Ministerio de minas y energía, 1998. 22 p.
26. OMAR, M.; SHANABLEH, A.; TAHMAZ, A. Shear strength of compacted green clay physic-chemical factors. *Lowland technology international* 6(1):9-20. 2004.
27. SUZUKI, M.; TSUZUKI, S.; YAMAMOTO, T. Physical and chemical index properties of residual strength of various soils. *Memoirs of the engineering faculty of Yamaguchi University* 56(1):1-11. 2005.
28. TERLIEN M., T.J. Modeling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides: The integration of hydrologic model, slope stability models and geographic information systems for the hazard zonation of rainfall-triggered landslides with examples from Manizales (Colombia). *Enschede [Holanda] : International institute for aerospace survey and earth sciences*, 1998. 254 p.
29. TERZAGHI, K.; PECK R., B.; MESRI, G. *Soil mechanics in engineering practice*. New York : John Wiley & Sons, 1996. 529 p.
30. USDA. *Soil survey laboratory methods manual: Soil survey investigations report No. 42 Version 3.0*. Washington : USDA, 1996. 693 p.
31. USDA. *Claves para la taxonomía de suelos*. Washington : NRCS, 2006. 339 p.
32. VARGAS, C.A.; KAMMER, A.; VALDES, M.; RODRÍGUEZ, C.E.; CANEVA, A.; SÁNCHEZ, J.J.; ARIAS, E.; CORTES, C.A.; MORA, H. New geological and geophysical contributions in the section Ibagué – Armenia, Central Cordillera – Colombia. *Earth sciences research journal* 9(2):99-109. 2005
33. WALKLEY, A.; BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science* 37:29-38. 1934

