

Influencia de la succión matricial en el cambio de volumen de un suelo proveniente de un depósito aluvial del Valle de Aburrá

The matric suction effect on the change of volumen of soil from an alluvial deposit of the Aburrá Valley

Victoria Elena Meza Ochoa^{*1} *Fabián Hoyos Patiño*²

¹Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Facultad de Ingenierías. Cra. 48 N.º. 7-151. Medellín, Colombia.

²Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Cra. 80 N.º. 65-223. Medellín, Colombia.

(Recibido el 25 de julio de 2011. Aceptado el 3 de septiembre de 2012)

Resumen

El presente artículo muestra los resultados del trabajo experimental sobre suelos fino granulares del municipio de Itagüí, asociados al depósito aluvial de la quebrada Doña María (Antioquia-Colombia). Se utilizaron muestras compactadas a las que se les determinó la succión matricial por el método del papel filtro y la técnica de traslación de ejes, para diferentes contenidos de humedad. Adicionalmente, se tomaron mediciones de volumen en las muestras durante el proceso de humedecimiento. A partir de los resultados experimentales, se elaboró la curva característica humedad succión del suelo (SWCC) y se analizaron las relaciones de la succión con el contenido de humedad, el grado de saturación y el cambio de volumen del suelo. Los resultados mostraron que los mayores cambios en la relación de vacíos de los suelos estudiados, se iniciaron a un grado de saturación cercano al 50%. Para saturaciones menores del 50%, en proceso de humedecimiento, la relación de vacíos permaneció estable y el comportamiento humedad-succión fue similar para las tres muestras.

----- *Palabras clave:* Papel filtro, curva característica del suelo, saturación parcial, grado de saturación

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57+ 4 + 3197900 ext. 478, fax: + 57 + 4 + 2669605, correo electrónico: vemeza@elpoli.edu.co (V. Meza)

Abstract

This paper presents the results of experimental study on fine-grained soils in the municipality of Itagüí, associated with Doña María alluvial deposit (Antioquia-Colombia). The matric suction was determined by filter paper method and the axis-translation technique, using soil samples, compacted to different moisture contents. Further, volume measurements were taken during wetting process of the samples. The soil-water characteristic curve (SWCC) and the relationship between suction and moisture content, degree of saturation, and volume change of the soil, shows that, the biggest changes in void ratio of the soils, starts a degree of saturation close to 50%. For saturations below 50%, in wetting process, the void ratio remains stable and moisture-suction behavior, is similar for all three samples.

----- *Keywords:* Filter paper, soil-water characteristic curve, unsaturated soils, degree of saturation

Introducción

Los suelos que conforman el fondo del Valle de Aburrá, corresponden a depósitos aluviales asociados al río Medellín y sus quebradas afluentes. En los suelos aluviales como en otros tipos de suelos que se encuentren en estado de saturación parcial, el comportamiento mecánico está influenciado por la succión matricial ($u_a - u_w$) y el esfuerzo compresivo neto ($\sigma - u_a$), variables de estado ampliamente aceptadas para describir el estado de tensiones del suelo (Fredlund and Morgestern) [1]. El comportamiento de cambio de volumen de un suelo no saturado, es definido como un cambio en la relación de vacíos en respuesta a un cambio en el estado de tensiones, mediante ecuaciones constitutivas, donde las propiedades del suelo son funciones de ambas variables del estado de tensiones (Fredlund) [2].

El punto de partida para el estudio experimental del comportamiento de cambio de volumen del suelo parcialmente saturado, es entonces la determinación de la relación entre el cambio en el contenido de humedad y el cambio en la succión. Esta relación contenido de humedad - succión se representa gráficamente mediante la curva característica humedad-succión de agua en el suelo (SWCC) o curva de retención de agua. Complementariamente se necesita establecer el cambio de volumen del suelo a varios niveles de

succión expresados en términos de la relación de vacíos.

En este trabajo se estudia el comportamiento de cambio de volumen de un suelo fino granular, referenciado como “limo gris de Itagüí”, al ser sometido a variaciones en su contenido de humedad y consecuentemente a cambios en la succión matricial. Se realizaron ensayos de caracterización física y mineralógica, determinación de la succión matricial utilizando el método de papel filtro y la técnica de traslación de ejes en la “placa de presión” y se tomaron mediciones de cambio de volumen y relaciones de vacíos. Para los análisis se determinaron las curvas características humedad-succión, en proceso de humedecimiento en términos del contenido de humedad gravimétrica y del grado de saturación.

Materiales y métodos

Los suelos estudiados corresponden a sedimentos fino granulares del municipio de Itagüí localizado al sur del Valle de Aburrá (Antioquia-Colombia), referenciados en el presente trabajo como “limo gris de Itagüí”. El sitio donde se tomó la muestra se ubica en la carrera 52A con calle 72, sobre la margen izquierda de la quebrada Doña María, afluente del río Medellín, con coordenadas geográficas 6°11'0,37 N y 75°35'54,18”W. Para la toma de muestras se hicieron excavaciones

manuales superficiales de 1,5 m de profundidad y se recuperaron muestras alteradas en bolsa.

Caracterización físico-mecánica

A las muestras recuperadas se les realizaron ensayos de caracterización física: humedad natural (ASTM D-2216), gravedad específica (ASTM D-854), límites de consistencia (ASTM D-4318 y ASTM D-427), distribución y tamaño de grano por método de hidrómetro (Norma ASTM D-422). La clasificación de los suelos se hizo según el Sistema

Unificado de Clasificación de Suelos “SUCS”, (Norma ASTM D-2487). Los resultados de estos ensayos se muestran en la tabla 1.

Las mediciones de succión y de cambios de volumen se hicieron en proceso de humedecimiento, a muestras compactadas. El ensayo de succión con papel filtro se hizo a muestras compactadas estáticamente, aplicando una fuerza de forma gradual al suelo, hasta alcanzar una densidad determinada, siguiendo el “método del molde flotante” de Shackel (1970), descrito por Mendoza [3].

Tabla 1 Caracterización física de los suelos estudiados

<i>Descripción</i>	<i>Limo gris de Itagüí</i>
Origen geológico	Depósitos aluviales
Humedad natural, <i>w</i> (%)	43
Clasificación SUCS	MH
Contenido de partículas finas (%<Tamiz 200-0,075 mm)	97
Gravedad específica de sólidos (Gs)	2,59
Límite Líquido, <i>LL</i> (%)	77
Límite plástico, <i>LP</i> (%)	37
Índice Plástico, <i>IP</i> (%)	40
Límite de contracción, <i>LC</i> (%)	17
Contenido de partículas menores 2 μm, (% pasa)	49
Contenido de coloides (%<1 μm)	33

Se prepararon 3 muestras de suelo (especímenes de 50 mm de diámetro y 15 mm de alto), con diferentes condiciones de humedad (*w*) y densidad seca (γ_d). Las condiciones iniciales corresponden a valores de densidad-humedad ubicados en la rama seca (punto 1), muy cerca

al punto de humedad óptima y densidad seca máxima (punto 2) y en la rama húmeda (punto 3) de la curva de compactación (figura 1). La tabla 2 muestra las condiciones iniciales de la muestra en cuanto a contenido de humedad, densidad, grado de saturación y relación de vacíos.

Tabla 2 Condiciones iniciales de las muestras

<i>Muestra</i>	<i>w inicial (%)</i>	<i>Densidad seca, γ_d (kN/m³)</i>	<i>Grado de saturación, S (%)</i>	<i>Relación de vacíos, e_o</i>
11	22	14,2	71	0,82
12	26	14,7	90	0,76
13	30	14,2	94	0,82

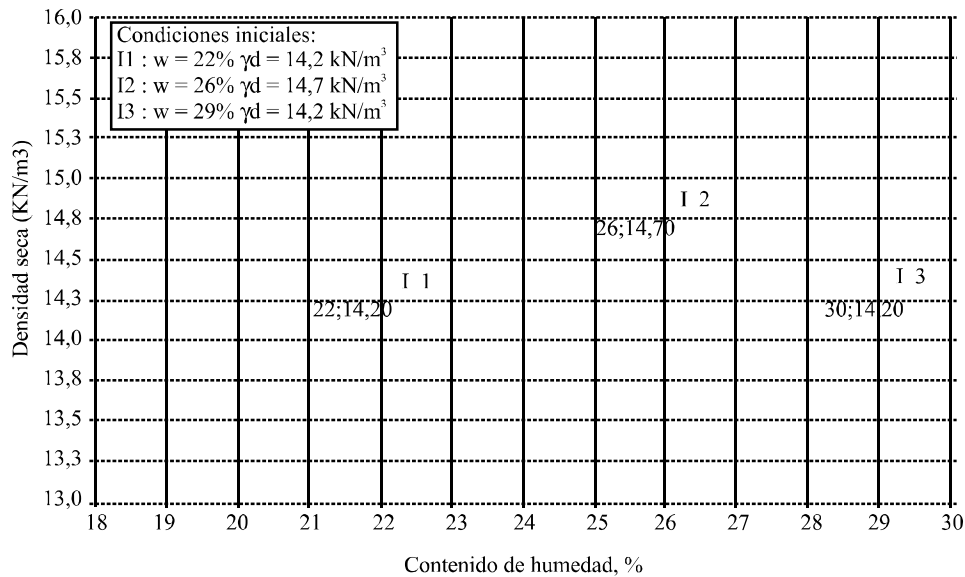


Figura 1 Curva de compactación de las muestras para ensayos de succión con papel filtro

Luego de la compactación las muestras fueron secadas en horno a una temperatura de 60°C durante 24 horas, hasta aproximadamente la humedad higroscópica (6%) y finalmente se inició el proceso de humedecimiento utilizando una membrana permeable para este fin, de acuerdo con la metodología propuesta por Ridley (1995) y descrita por Pineda [4].

El ensayo de succión con el equipo de placa de presión, se hizo a muestras compactadas de forma dinámica, con la energía del ensayo Proctor Estándar. Este ensayo se hizo a muestras con la densidad seca máxima y humedad óptima, es decir con las condiciones iniciales de la muestra I2.

Caracterización mineralógica

Para la caracterización mineralógica de la fracción tamaño arcilla, se utilizó una combinación de técnicas analíticas complementarias entre sí, con el fin de abordar el reconocimiento de las fases presentes desde el punto de vista cristalográfico, utilizando difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR por sus iniciales en inglés) y la disposición de las fases entre sí, utilizando microscopia electrónica de barrido, SEM por sus iniciales en inglés. Para los análisis por

DRX y FTIR, se separó la fracción arcilla por sedimentación selectiva, la cual posteriormente fue macerada en mortero de ágata, con inmersión en acetona, hasta una granulometría pasante malla 400 (Tyler). Para el caso de los análisis por SEM, se utilizaron muestras en polvo (pasante malla 400) y pequeños fragmentos de suelo de 0,7 mm de espesor y 1 cm de longitud, donde fueron hechas imágenes en el modo de electrón secundario (SE).

De estos análisis, se obtuvo una primera aproximación cualitativa de las fases minerales presentes con la DRX y se obtuvieron resultados concluyentes con el FTIR. La figura 2 muestra el difractograma generado y analizado, utilizando el software DIFFRAC PLUS BS2000 [5]

De acuerdo con los valores de los ángulos donde ocurre la difracción (2θ), los cuales son característicos de cada mineral, las fases minerales presentes en la muestra, correspondieron esencialmente a caolinita (K), moscovita (m), cuarzo (Q), halloysita (H), albita (A), y montmorillonita (M).

Para la interpretación de los espectros de FTIR se utilizó el “Atlas de espectroscopia infrarroja de minerales de arcilla y sus mezclas”, Van der Marel and Beutelspacher [6]. La figura 3

muestra el espectro obtenido, donde se ratificó la existencia de caolinita en mayor abundancia

relativa y la presencia de montmorillonita en muy pequeña cantidad.

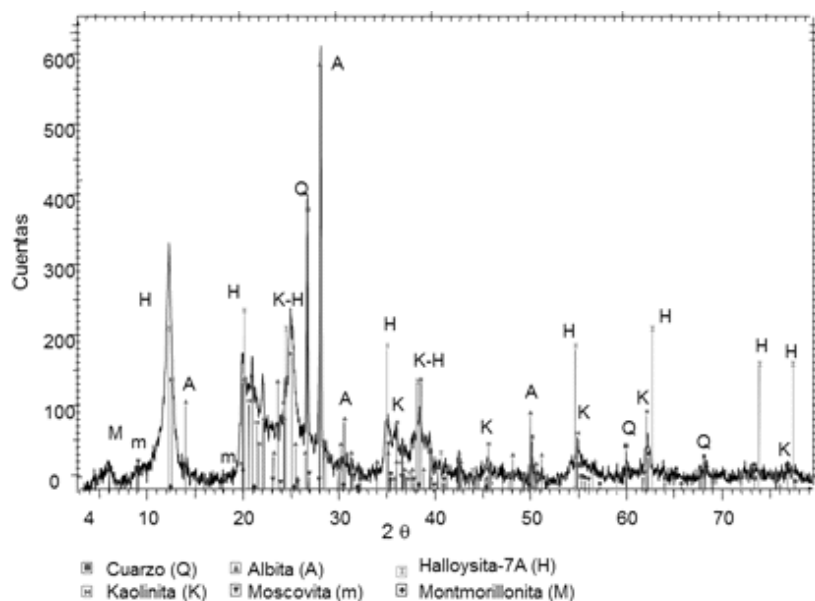


Figura 2 Difractograma resultante del análisis por difracción de rayos X

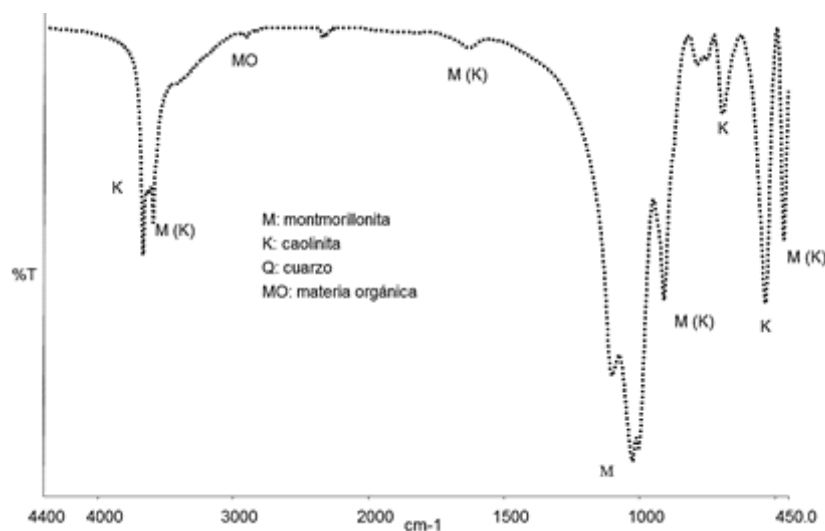


Figura 3 Espectro FTIR, espectroscopia infrarroja con Transformada de Fourier

Medición de la succión matricial y medición del cambio de volumen

El método del papel filtro es un método indirecto para medir la succión matricial del suelo, basado

en el principio de equilibrio de humedad entre el suelo y el papel filtro. En la presente investigación se utilizó el papel filtro *Whatman No 42* en estado inicial seco al horno y la curva de calibración obtenida por Chandler et al. [7], representada por la ecuación 1 y ecuación 2.

Para w del papel filtro $\leq 47\%$. $Succión (kpa) = 10^{(4,842-0,0622 w)}$ (1)

Para w del papel filtro $> 47\%$. $Succión (kpa) = 10^{(6,05-2,48 \text{Log}_{10} w)}$ (2)

Durante el proceso de humedecimiento se tomaron las dimensiones de las muestras (altura y diámetro con calibrador digital de 0,01 mm de precisión) para determinar el cambio de volumen sufrido durante el proceso y analizar la variación de la relación de vacíos con la succión.

su composición mineralógica. Sin embargo, del análisis mineralógico se identificó la presencia de moscovita, caolinita en una gran proporción y con cierto grado de desorden en su estructura cristalina y montmorillonita, aunque esta última se presentó en baja proporción con relación a la caolinita.

Resultados y discusión

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la caracterización física y mineralógica, los suelos se ubicaron según el SUCS, dentro del grupo MH, limos elásticos, con valores de límite líquido e índice plástico de 77% y 40%, respectivamente. Los valores de límites de consistencia y el porcentaje de coloides del 33%, calificaron a los suelos como de alto potencial expansivo según los criterios de Holtz & Gibbs [8] y Seed et. al [9] y con la existencia de minerales de las arcillas del grupo de la illita y de las esmectitas dentro de

Curva característica humedad-succión (SWCC) en proceso de humedecimiento

La figura 4 muestra los resultados experimentales obtenidos con papel filtro y con la técnica de traslación de ejes para la muestra I2. El ensayo de papel filtro permitió alcanzar succiones en un amplio rango entre 100 y 50.000 kPa, mientras que las succiones obtenidas con la placa de presión, se limitaron al rango de succiones entre 100 y 1.500 kPa.

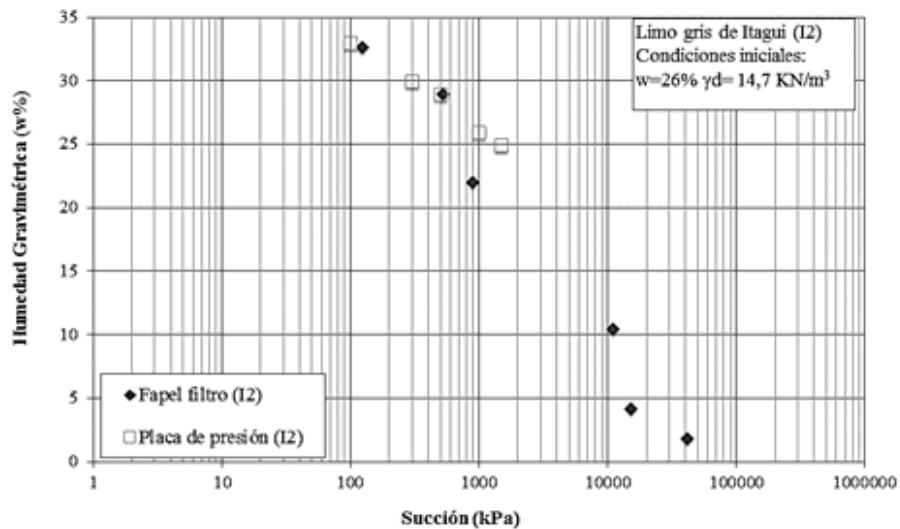


Figura 4 SWCC humedad-succión de la muestra I2, con papel filtro y con equipo de placa de presión

De los resultados experimentales obtenidos con el papel filtro para todas las muestras sometidas a humedecimiento, se hicieron ajustes a partir de regresiones no lineales para definir la curva

característica humedad-succión del suelo, en términos de la humedad gravimétrica, utilizando la ecuación propuesta por Fredlund and Xing [10], ecuación 3:

$$w = C(\psi) \frac{w_s}{\left[\ln \left(e + \left(\frac{\psi}{a_f} \right)^{n_f} \right) \right]^{m_f}} \quad (3)$$

Donde

w_s : contenido gravimétrico de agua para la saturación, $S=100\%$, a_f = succión correspondiente al punto de inflexión de la curva (ligeramente mayor al valor de entrada de aire), n_f = parámetro del suelo relacionado con la pendiente de la curva característica, Ψ = succión en el suelo, m_f = parámetro de ajuste relacionado con los resultados cerca del contenido residual de agua, e = base de logaritmos naturales, 2,71828, $C(\Psi)$ = función de corrección que hace que la SWCC tenga una succión de 10^6 kPa cuando el contenido de agua es nulo.

La función de corrección está definida por la ecuación 4:

$$C(\Psi) = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{1.000.000}{\Psi_r} \right)} \right] \quad (4)$$

Donde Ψ_r es el valor de la succión correspondiente al contenido de agua residual.

La figura 5 muestra la curva característica humedad-succión en términos de la humedad gravimétrica (w) y la succión matricial ($u_a - u_w$), en trayectoria de humedecimiento, con los resultados de laboratorio obtenidos por papel filtro y las curvas de ajuste.

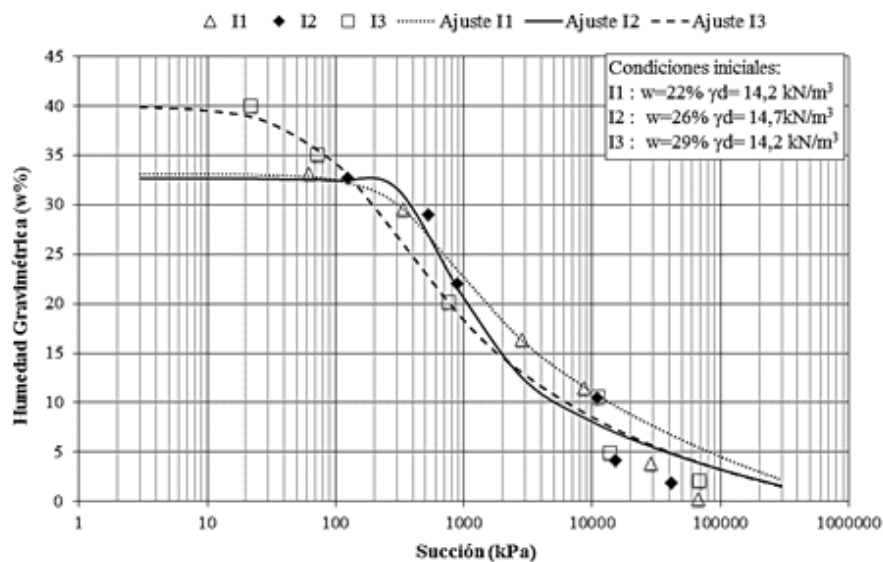


Figura 5 Curva característica humedad - succión en proceso de humedecimiento

De la figura 5 se observa que al iniciar el proceso de humedecimiento, existe una primera zona de baja pendiente, en donde se dan cambios en la succión sin presentar cambios apreciables en el contenido de humedad, hasta llegar a un valor de succión, que denominamos para el proceso de humedecimiento, como presión de entrada de agua (*PEAg*). Esta zona corresponde a la zona de agua fuertemente adsorbida, donde el agua en los poros es retenida

por enlaces de tipo molecular, a succiones entre 10^6 y 10^4 kPa. [11]. En ese primer tramo, cuando el suelo se encuentra muy seco y se inicia el humedecimiento, se presenta la mayor reducción de la succión, de 68.000 kPa a 10.000 kPa, con apenas un 4% de aumento en el contenido de humedad del suelo, desde 5% a 9%. Sin embargo, es muy improbable que se alcancen humedades tan bajas de manera natural en los suelos fino granulares.

El segundo tramo de la curva corresponde a la zona de transición [12] donde hay aire y agua en los poros del suelo y el agua se encuentra inicialmente en forma discontinua y al final del tramo se encuentra en forma continua. Para las muestras estudiadas, la zona de transición inicia en una humedad cercana al 9% y a partir de esta humedad empezó un comportamiento cuasi lineal y con mayor pendiente que la zona inicial, es decir, el suelo requiere de aumentos en el contenido de humedad para lograr una disminución proporcional de la succión. Este comportamiento se presenta en un amplio rango de humedades, hasta llegar a la zona de contenido de aire residual [12] y a succiones entre 10^4 y 100 kPa.

El suelo alcanza la zona de aire residual a humedades alrededor de 33% en las muestras I1 e I2 y alrededor del 40% en la muestra I3 y a succiones de 100 kPa, 300 kPa y 50 kPa, respectivamente. En esta última zona de la curva en humedecimiento, se inicia una disminución de la pendiente hasta hacerse horizontal, manteniéndose la humedad constante pero la succión continúa disminuyendo. En los suelos estudiados, esta disminución de succión considerada crítica, se presenta a saturaciones superiores al 80% en la muestra I1 y superiores al 90% en las muestras I2 e I3, este comportamiento se puede apreciar en la SWCC en términos del grado de saturación (figura 6).

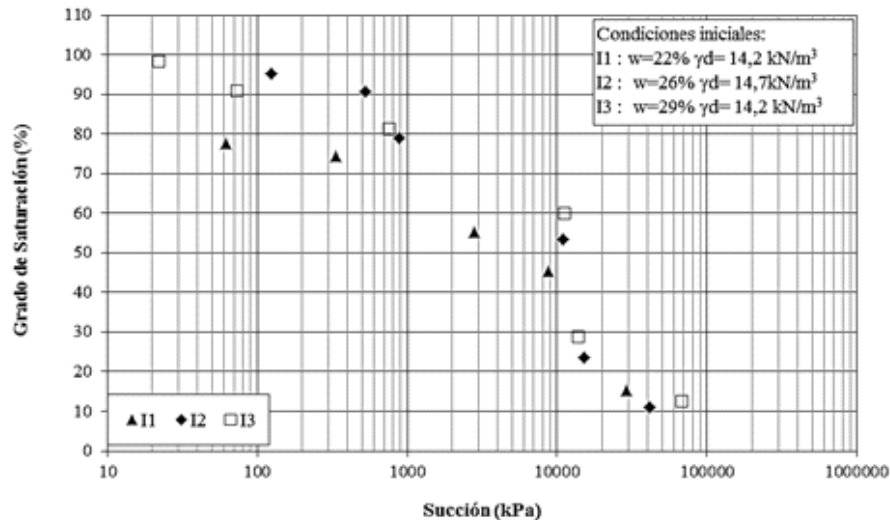


Figura 6 Curva característica: grado de saturación- succión, en proceso de humedecimiento

De la Figura 6, se observa una similitud en el comportamiento grado de saturación –succión para las tres muestras a saturaciones bajas (entre 10% y 50%). Al superar una saturación del 50% y para succiones menores a los 10.000 kPa, se

presentan comportamientos diferentes, asociados a las condiciones iniciales de densidad y humedad.

En la tabla 3, se muestran los valores de succión de entrada de agua ($PEAg$), succión de aire residual (P_{ar}), con los parámetros de ajuste.

Tabla 3 Puntos característicos de la SWCC en humedecimiento y parámetros de ajuste

Muestra	$PEAg$ (kPa)	P_{ar} (kPa)	af	nf	mf	R^2
I1	10.000	100	423,8	1,756	0,506	1
I2	4.000	300	579,3	4,204	0,426	0,974
I3	4.000	50	135,9	1,222	0,974	0,984

**Comportamiento cambio de volumen --
humedad- grado de saturación**

Durante el humedecimiento de las muestras, se tomaron las dimensiones y pesos de las mismas, lo cual permitió analizar los cambios de volumen en todo el proceso, debido únicamente a cambios en la succión. Este comportamiento se analizó en términos de la relación de vacíos - contenido de humedad (figura 7) y relación de vacíos - grado de saturación (figura 8).

En la figura 7 se observa que los cambios volumétricos de mayor magnitud ocurren a partir de una humedad del 10%, cercana a la humedad del punto de entrada de agua a los poros, donde inicia el tramo lineal de la SWCC. A partir de este punto se observan los aumentos en la relación de vacíos hasta llegar a una humedad del 36%, donde se tienden a estabilizar los cambios de volumen en las muestras.

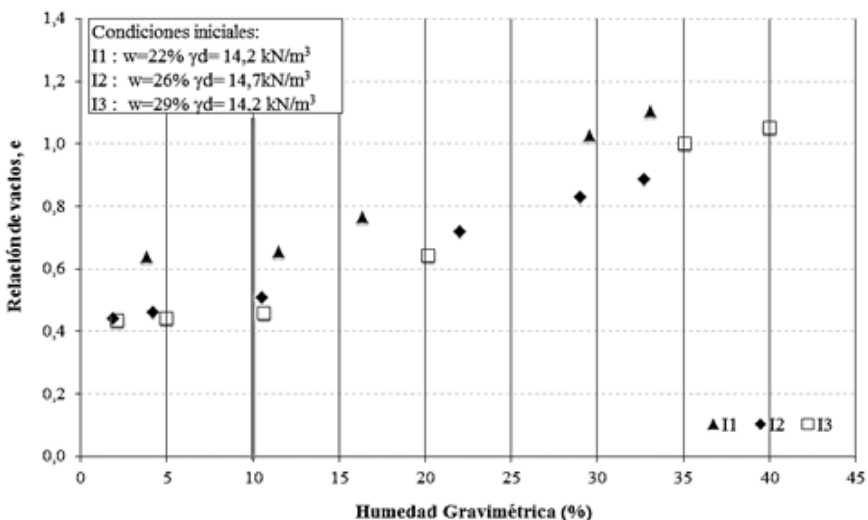


Figura 7 Variación de la relación de vacíos con la humedad gravimétrica

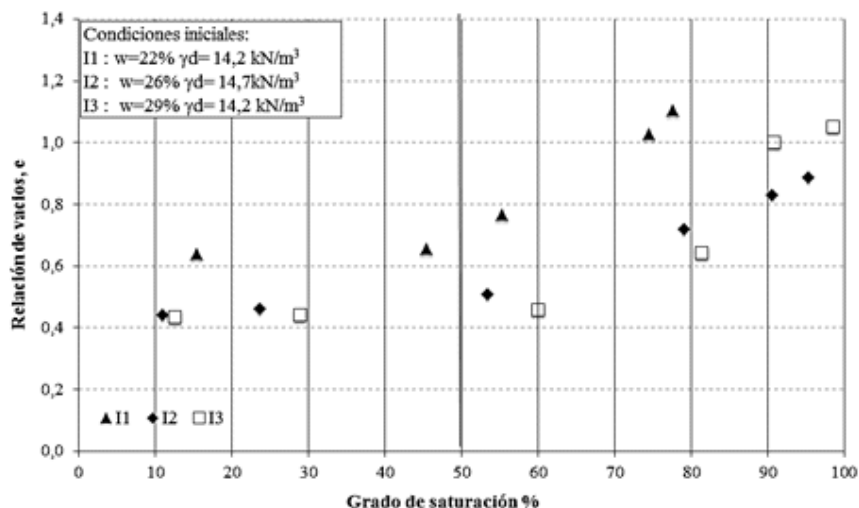


Figura 8 Variación de la relación de vacíos con el grado de saturación

De figura 8 se observa que los aumentos en la relación de vacíos se evidencian a partir de un grado de saturación entre el 40% y 50%, relacionándose con el valor donde inicia el tramo lineal de la SWCC en términos del grado de saturación (figura 6).

En la figura 9 se muestran las variaciones de los cambios de volumen (aumento de relación de vacíos) con la succión matricial. Inicialmente, se puede notar la poca variación del volumen al disminuir la succión, hasta llegar a un valor de succión (~ 10.000 kPa, para todas las muestras)

donde empiezan a darse los mayores cambios de volumen. El valor de succión donde iniciaron los cambios de volumen (~ 10.000 kPa) es mucho mayor que la $PEAg$ (varía entre 4.000 y 10.000 kPa), lo que indica que las muestras desarrollaron el mayor cambio de volumen inmediatamente el agua entra en los poros del suelo de forma discontinua y corresponde a un grado de saturación entre el 40% y 50% para las tres muestras. Finalmente, el cambio de volumen tiende a estabilizarse a valores de succión que coinciden con la presión de aire residual (PAr), definida en la SWCC en términos de la humedad gravimétrica.

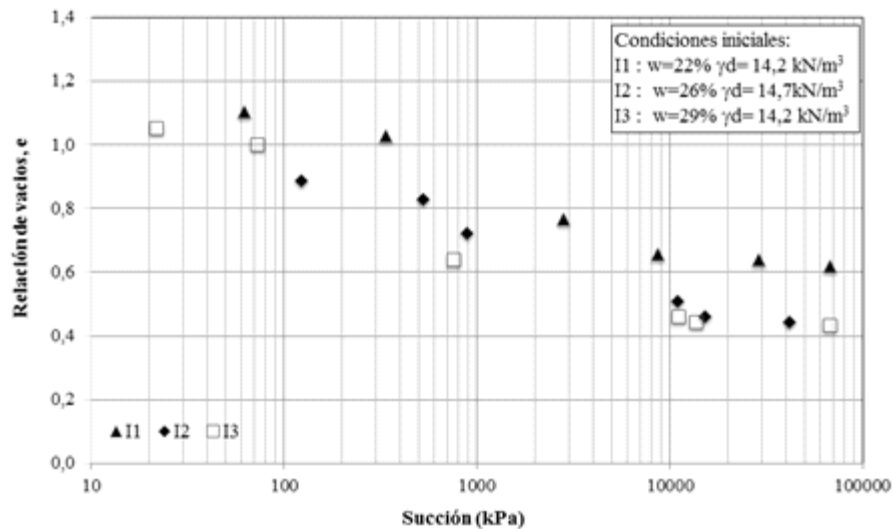


Figura 9 Variación de la relación de vacíos con la succión

Conclusiones

Del análisis del trabajo experimental realizado se destacan los siguientes comentarios con relación al comportamiento de los suelos estudiados.

Con el análisis mineralógico se verificó la existencia de diversos minerales de arcilla en las muestras y por tanto fue necesario utilizar varias técnicas de caracterización para la identificación de los mismos. De estas técnicas, la difracción de rayos X (DRX) constituyó sólo una primera aproximación al tipo de minerales encontrados, mientras que los resultados obtenidos mediante FTIR, fueron concluyentes en la existencia de caolinita en una gran proporción y con

cierto grado de desorden en su estructura cristalina, moscovita y montmorillonita en baja proporción. No obstante la baja proporción de montmorillonita con relación a la caolinita, los suelos se clasificaron como de alto potencial expansivo y presentaron variaciones en la relación de vacíos de hasta un 60% durante el proceso de humedecimiento.

De la curva característica humedad-succión, en términos de la humedad gravimétrica, se observó que la inclinación de la zona de transición (tramo lineal) es independiente de la relación de vacíos inicial y por tanto de la densidad seca, pero dependiente de la humedad inicial.

La succión a la que se iniciaron los cambios de volumen en humedecimiento, fue mayor que la *PEAg*, indicando que las muestras sufrieron deformaciones volumétricas inmediatamente el agua entró a los poros de forma discontinua.

El cambio de volumen de las muestras se inició a grados de saturación cercanos al 50% y por debajo de este valor, la relación de vacíos permaneció estable. El punto del 50% de saturación, está relacionado con el inicio del tramo lineal de la SWCC para todas las muestras.

Agradecimientos

El autor agradece a la Dirección de Investigación y Extensión de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (DIME), por la financiación de la parte experimental de este proyecto.

Al Doctor Marco Antonio Márquez por sus aportes valiosos en la caracterización mineralógica de los suelos.

Referencias

1. D. Fredlund, N. Morgenstern. "Stress state variables for unsaturated soils". *J. of the Geotech. Eng. Div.* Vol. 103. 1977. pp. 447-466.
2. D. Fredlund. "Appropriate concepts and technology for unsaturated soils". *Can. Geotech. J.* Vol. 15. 1979. pp. 313-321.
3. C. Mendoza. "Influencia de la succión en el módulo de corte a muy pequeñas deformaciones de suelos compactados". Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2004. pp. 162.
4. J. Pineda. "Investigación experimental sobre el comportamiento volumétrico de una arcilla de la sabana de Bogotá en procesos de secado". Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2003. pp. 218.
5. Software DIFFRAC PLUS BS2000.
6. H. Van Der Marel, H. Beutelspacher. *Atlas of infrared spectroscopy of clay minerals and their admixtures*. 1st ed. Ed. Elsevier Scientific Publishing Company. New York, USA. 1976. pp. 396.
7. R. Chandler, M. Crilly, G. Montgomery. "A low cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings". *Proc. of the Institute of Civil Engineering ICE*. Vol. 92. 1992. pp. 82-89.
8. W. Holtz, H. Gibbs. "Engineering properties of expansive clays". *Trans. ASCE*. Vol. 121. 1956. pp. 641-663.
9. H. Seed, R. Woodward, R. Lundgren. "Prediction of swelling potential for compacted clays". *Soil Mechanical Foundations (ASCE)*. Vol. 88. 1962. pp. 53-87.
10. D. Fredlund, A. Xing. "Equations for the soils-water characteristic curve". *Can. Geotech. J.* Vol. 31. 1994. pp. 521-532.
11. N. Lu, W. Likos. *Unsaturated Soils Mechanics*. Ed. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, USA. 2004. pp.40-41.
12. S. Vanapalli, D. Pufahal, A. Clifton. "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction". *Can. Geotech. J.* Vol. 33. 1996. pp.379-392.