

Coherencia interpartículas de un suelo agrícola franco arenoso de sabana. Monagas, Venezuela

Agricultural savanna sandy loam soil inter-particle coherence. Monagas State, Venezuela

Américo José HOSSNE GARCÍA, Gerson Enrique PAREDES BARRIOS, Rodolfo Rafael CARVAJAL POREZA, Ernesto José SANTAELLA BARRETO y José Pablo MALAVER AGUIAR

Escuela de Ingeniería Agronómica, Núcleo de Monagas, Universidad de Oriente, Maturín. Apartado Postal 414, Monagas, Venezuela 6201-A. E-mails: americohossne@cantv.net y americohossnegarcia@gmail.com

✉ Autor para correspondencia

Recibido: 07/02/2011 Fin de primer arbitraje: 31/01/2012 Primera revisión recibida: 10/04/2012
Fin de segundo arbitraje: 27/04/2012 Segunda revisión recibida: 21/06/2012 Aceptado: 23/07/2012

RESUMEN

La cohesión y el ángulo de fricción interna son de interés agrícolas en los aspectos del crecimiento radical, tenacidad del suelo, diseño de implementos, sistemas tractivos en la interfaz suelo/tracción, erodibilidad, elasticidad, deformación, infiltración, capacidad de campo, diseño de las fuentes de potencia y equipos autopropulsados. Se ha conjeturado que los suelos francos arenosos por no poseer arcillas expansibles carecen de cohesión. El objetivo consistió en valorar la coherencia interpartículas del suelo y sus relaciones con el ángulo de fricción interna, la densidad seca, la tensión normal, la humedad, la profundidad y su efecto en la resistencia del suelo. Los ensayos triaxiales se utilizaron para determinar los parámetros físicos y terramecánicos; y la regresión lineal y el análisis para el mejor subconjunto para interpretar la variancia entre los parámetros. Entre los resultados se obtuvo un valor máximo de la fuerza de coherencia interpartículas de 98,05 kPa con tensión normal de 835,58 kPa, un ángulo de fricción de 31,77° y humedad de 6,12%; y de 68,31 kPa para un ángulo de fricción de 33,31°, una densidad seca de 1640 kg·m⁻³ y humedad de 6,04%. Se concluyó que la humedad fue la que más influyó, en forma inversa y exponencial, sobre la cohesión y la tensión cortante. En el estado friable se podría producir un rango de atracción interpartículas entre 33,88 kPa y 19,96 kPa, adecuado para la labranza y el desarrollo radical. La compactación influyó y la fricción interna no intervino sobre la atracción interpartículas. El efecto de la cohesión aparente sobre la resistencia del suelo objeto de estudio secundó al ángulo de fricción interna y cual resultó ser el más influyente parámetro de resistencia en la ecuación de resistencia al corte de Coulomb.

Palabras Clave: Tensión cortante, tensión normal, cohesión, densidad, ángulo de fricción, profundidad, humedad.

ABSTRACT

Cohesion and angle of internal friction are of agricultural interest aspects for root growth, soil tenacity, design tools, systems on the soil tractive/traction, erodibility, elasticity, deformation, infiltration, field capacity, design sources of power and self-propelled equipment. It has been conjectured that sandy loam soils have not expandable clays which lacks cohesion. The objective was to assess the soil inter-particle coherence and its relationship with the angle of internal friction, dry density, the normal stress, soil moisture, depth and its effect on the studied soil resistivity. The Triaxial tests were used to measure the physical and terramechanic parameters, and linear regression and statistical analysis for the best subset to interpret the variance between parameters. Among the results yielded a maximum value of the strength of inter-particle coherence or apparent cohesion of 98.05 kPa with a normal stress of 835.58 kPa, an internal friction angle of 31.77 ° and a humidity of 6.12% and 68.31 kPa for an internal friction angle of 33.31 °, a dry density of 1640 kg·m⁻³ and a humidity of 6.04%. It was concluded that soil moisture was the most influential, inverse exponential relation, on soil cohesion and soil shear stress. In the friable state could produce a range of interparticle attraction between 33.88 and 19.96 kPa suitable for tillage and root development. Compaction had effect on the inter-particle attraction and internal friction did not intervene. The effect of soil cohesion on soil strength seconded to the angle of internal friction, a component of the equation of Coulomb shear strength, was the most influential parameter of resistance.

Key word: Shear stress, normal stress, cohesion, density, friction angle, depth, water content

INTRODUCCIÓN

Se ha estimado que los suelos agrícolas franco arenosos carecen de cohesión ya que se estima que la cohesión es una propiedad de las arcillas de los tipos expansibles poco o muy poco existentes en los suelos franco arenosos, a excepción de la existente arcilla caolinita considerada inexpandible. Los límites de Atterberg dan información sobre el estado de consistencia o coherencia de las partículas de un suelo. El parámetro que regula el estado de coherencia de un suelo es el contenido de humedad y a medida que ésta disminuye, el suelo puede pasar por los estados líquido, plástico, semisólido y sólido, estableciéndose entre ellos los límites líquido, plástico y de contracción-expansión (Márquez, 2006). Se han logrado avances en las últimas décadas en la comprensión cuantitativa del mecanismo de capilaridad en medios granulares no saturados.

La atracción capilar puede existir en cualquier suelo insaturado y su magnitud es en general, inversamente proporcional al tamaño de las partículas y al grado de saturación (Orr *et al.* 1975; Dobbs y Yeomans 1982). Los suelos arcillosos exhiben mayor atracción interpartículas que los suelos arenosos producto de las partículas laminares que causan mayores efectos cohesivos que las esféricas. Cuando el contenido de agua falta entre las partículas, se desorientan y al aumentar se orientan. Shubert (1984) reportó que la diferencia de comportamiento entre arena seca y húmeda se atribuye a la presencia de puentes líquidos que dan lugar a fuerzas capilares que actúan entre las partículas sólidas en las arenas húmedas. Estas fuerzas pueden ser mil veces el peso de un grano de arena. La relación entre la fuerza atractiva entre partículas con el peso de las partículas, sirve para dividir los materiales granulares en dos grandes grupos: materiales cohesivos e incohesivos (Castellano, 2005). La fuerza entre partículas depende del radio local de curvatura en contacto, y disminuye al disminuir el radio de aspereza local, se deduce que el flujo de partículas finas de forma irregular es mejor que las partículas redondas (Massimilla y Donsi, 1976). Si las fuerzas entre partículas se mantienen constantes (mismo material y aspereza), un aumento en el tamaño de las partículas disminuye la cohesión (Castellano, 2005).

En la ingeniería geotécnica, aunque la magnitud de la tensión de tracción es por lo general menos de varios cientos de kilopascales, desempeña un papel importante en la magnitud de la cohesión

aparente que afecta en gran medida la capacidad de carga y estabilidad del suelo (Inglés, 1962; Lu y Likos, 2004; Griffiths y Lu, 2005; Heath *et al.*, 2004). Al respecto, Dudley (1970) señaló la existencia de una humedad, para cada suelo, en la que el colapso producido al aumentar el grado de saturación es máximo. Este fenómeno puede estar relacionado con la fuerza intergranular máxima que se genera al variar la humedad (Aitchison y Donald, 1956; Vargas, 1973; Maswoswe, 1985 y Delgado, 1986).

La atracción en, o cerca de los contactos de partículas de suelo pueden ser debido a: 1. Atracción de van der Waals, 2. Repulsión eléctrica de doble capa, 3. La atracción de los contactos cercanos cara-a-punta por la cementación, 4. Cementación debido a la precipitación del soluto o química en los contactos, 5. Atracción capilar debido a la existencia de puentes de agua u organismos entre las partículas, 6 Magnética, 7. La tensión capilar debido a la presión negativa de los poros y 8. La tensión capilar debido a la tensión superficial del agua. En relación a estos mecanismos tractivos se considera que los suelos saturados e insaturados poseen, por ejemplo, los componentes 1, 2, 3 y 6 sobre todo para los suelos finos o arcillosos; y suelos saturados de partícula de naturaleza interfacial los componentes 7 y 8 (Lu y Likos, 2006; Verwey y Overbeek, 1948; Schubert, 1975; Van Olphen, 1991; Fisher, 1926; Dallavalle, 1943; Santamarina *et al.*, 2001, Lu y Likos 2004; Schubert, 1982; Heibrock *et al.* 2003; Lu y Likos, 2004). Muchos estudios que relacionan el rendimiento de los cultivos, el crecimiento radical y el desarrollo vegetativo con la densidad aparente, o con la resistencia del suelo al penetrometro; lo hacen sin contemplar la humedad edáfica. La densidad aparente seca, una forma de medir el estado de compresibilidad, se basa en la reducción de los poros aeríferos, considerados por Wiersum (1962) y Fisher (1964) como poros de 3 mm.

Se ha demostrado experimentalmente que la atracción molecular entre partículas es insignificante a una distancia de 10^{-5} mm. Phillips y Young, (1973) encontraron que para suelos arcillosos un cambio de humedad de 23,5% a 21,3% produjo una cohesión de 9,6 kPa y 17,7 kPa. Daguar (1976) para determinar la cohesión aparente del suelo objeto de estudio utilizó un cilindro torsional *in situ* y el método de corte horizontal o directo, encontrando un valor de 54,89 kPa con el cilindro torsional y de 2,46 kPa con la prueba directa, no especificó el contenido de humedad pero hizo hincapié en su influencia inversa

para la cohesión. Battika (1985) determinó para el suelo objeto de estudio una cohesión aparente de 37,73 kPa a 10,5% de humedad con el cilindro torsional *in situ* y 15,55 kPa para una humedad 10,08% con el uso del aparato de corte horizontal. Los suelos agrícolas franco arenosos de sabana muestran diferentes comportamientos de tenacidad y, por lo tanto, es necesario esclarecer como influyen los parámetros de resistencia, cohesión y fricción interna, en estos suelos.

El objetivo general consistió en investigar el proceso resistente de los suelos agrícolas en función de la coherencia interpartículas involucrando algunos parámetros físicos mecánicos y la influencia de la humedad. El objetivo específico consistió en evaluar la cohesión aparente (C) y su relación con el ángulo de fricción interna (ϕ), la densidad seca (ρ_s), la tensión normal (σ), la profundidad (Pro), la humedad (w) y su efecto sobre la resistencia del suelo (τ), de un suelo franco arenoso de sabana.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en las sabanas franco arenosas de Jusepín, estado Monagas en Venezuela, situada a una altura de 147 msnm y coordenadas geográficas de 9° 41' 33" latitud Norte y 63° 23' de

longitud Oeste; con una precipitación anual de 1127 mm y una temperatura media anual de 27,5 °C. Bajo una vegetación típica de sabana: Chaparro (*Curatella americana* (Dilleniaceae), merey (*Anacardium occidentale*), paja peluda (*Trachypogon* y *Axonopas sp*), manteco (*Byrsonima crassifolia* Malpighiaceae), mastranto (*Hyptis suaveolens* Lamiaceae), gramineas, ciperaceas y otras.

El área del suelo seleccionado pertenece a las condiciones de un Ultisol y al subgrupo de los Oxic Paleustults familia de temperatura Isohipertérmico. Estos suelos son utilizados, con labores de encalado y fertilización, en la explotación de muchos rubros como: maíz, sorgo y pastizales. Los Cuadros 1 y 2 muestran las características físicas y químicas del suelo objeto de estudio. El tamaño de las partículas se encuentra en el rango establecido por Rucks *et al.*, (2004) y CIVIL2121 (2012).

En la Figura 1 se observa la mayor representatividad de arenas del suelo objeto de estudio en especial las arenas finas. Las líneas de tendencia muestran que los componentes varían muy poco para las diferentes profundidades a partir de las arenas muy finas hacia la derecha y que la mayor cantidad de componentes de menor diámetro se encuentra a la profundidad entre 45 y 60 cm.

Cuadro 1. Componentes físicos en porcentajes y diámetro promedio en mm de las partículas de un suelo de sabana del Estado Monagas, Venezuela.

Profundidad (cm)	Componentes Edáficos (%)							
	Arena muy gruesa	Arena gruesa	Arena media	Arena fina	Arena muy fina	Limo	Arcilla Caolinita	Materia Orgánica
0 – 15 (A)	0,22	2,91	12,18	39,13	13,93	19,43	12,2	0,38
15 – 30 (B)	0,52	2,23	11,07	41,09	10,51	18,38	16,2	0,27
30 – 45 (C)	0,30	2,46	10,30	34,56	12,58	21,6	18,2	0,20
45 – 60 (D)	0,33	2,64	10,84	30,69	14,63	20,67	20,2	0,13
Diámetro (mm)	1,41	0,72	0,37	0,151	0,07	0,053	0,024	

Cuadro 2. Perfil químico de un suelo de sabana del Estado Monagas, Venezuela.

Prof (cm)	pH en pasta H ₂ O	pH en pasta KCL	Materia Orgánica		P (ppm)	Cationes cambiabiles (cmol _c .kg ⁻¹ de suelo)					C.I.C. (cmol _c .kg ⁻¹ de suelo)	SB (%)	SA (%)	
			C ₄ orgánico (%)	N ₂ (%)		Ca	Mg	Na	K	AL ⁺³				H ⁺
0 - 15	4,70	3,90	0,38	0,04	1,85	0,79	0,31	0,10	0,04	0,68	0,55	2,47	50,20	49,80
15 - 30	4,70	3,90	0,27	0,03	1,23	0,40	0,37	0,04	0,03	0,84	0,68	2,36	35,59	64,41
30 - 45	4,70	3,90	0,20	0,02	1,23	0,51	0,24	0,02	0,03	0,96	0,71	2,47	32,39	67,61
45 - 60	4,80	3,90	0,13	0,01	1,23	0,28	0,24	0,02	0,03	0,96	0,76	2,29	24,89	75,11

Prof: Profundidad (cm); P: Fósforo soluble en ácido cítrico; C.I.C.: Capacidad de intercambio catiónico (m.e.q. por 100 de suelo); SB: Saturación de bases y SA; Saturación de acidez.

El muestreo se basó en el trabajo realizado por Espinoza (1970), donde se practicó una estratificación de los suelos presentes, en el cual el estrato que corresponde a la Unidad Maturín está clasificado como Unidad II con textura superficial franco arenosa, comprendida en una superficie aproximada de 55 ha. Se perforaron 20 calicatas para la recolección de las muestras y se conformó como una muestra compuesta. La recolección de las muestras y ubicación de los pozos se realizó apoyado en el método de muestreo aleatorio simple. En cada uno de las áreas se realizó un muestreo del horizonte comprendido entre 0,00-0,30 m y 0,30-0,60 m, tomando muestras al azar del mismo. Se utilizó la regresión lineal y el análisis para el mejor subconjunto para interpretar la variancia entre los parámetros.

En la preparación de los especímenes de suelo para la compresión confinada con drenaje en el triaxial, la muestra se secó al aire y luego se desmenuzó para eliminar los terrones. Se pasó por un tamiz de 4,69 mm y se volvió a desmenuzar. Al suelo estudiado para los estratos 0,00-0,30 m y 0,30-0,60 m. se utilizaron 4 presiones de cámara (60, 120, 180, 240 kPa) y once (11) niveles bases de humedad (5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15), con tres repeticiones para formar un sub-total de 132 unidades experimentales. Las unidades experimentales se representaron por los especímenes ensayados en la cámara de compresión triaxial. Para el humedecimiento de las muestras se tomó una porción de 4 kg de suelo tamizado y secado al aire. Los niveles de humedad se lograron aplicando volúmenes de agua en forma creciente usando la siguiente relación: $V_w = M_s \cdot \%w / 100$. Las muestras se mezclaron por un tiempo mayor de 8 minutos, utilizando una espátula para romper los terrones

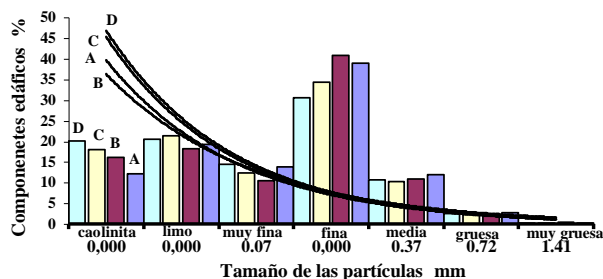


Figura 1. Contenido de arcilla, limo, arena muy fina, arena fina, arena media, arena gruesa y arena muy gruesa respectivamente *versus* el tamaño de las partículas, en los cuatro horizontes estudiados. Las tendencias del tamaño de las partículas *versus* profundidad (exhibida con los colores) son: (A) de 0-15 cm, (B) de 15 a 30 cm, (C) de 30 a 45 cm y (D) de 45 a 60 cm.

formados por el agua, fueron colocados en bolsas de 2 kg, cerrada herméticamente y dejadas reposar por 12 horas en una caja de anime etiquetada con el nivel de humedad correspondiente; luego, a las 12 horas se tomó una porción de 40 g para calcular un estimado del contenido de humedad, las bolsas fueron cerradas y guardadas nuevamente en la misma caja de anime por 12 horas más para que se uniformizara la humedad. Una vez transcurrido 24 h; se utilizó el equipo de compactación Mini Hardware para confeccionar los especímenes, los cuales tuvieron una altura y diámetro inicial iguales a las del cilindro moldeador. La densidad seca de los especímenes se estableció con la siguiente relación: $M_s = \rho_s \cdot V \cdot (1 + \%w)$.

Para el montaje de los especímenes en la cámara triaxial se procedió a instalarlo en la base de la cámara triaxial, colocándole una placa porosa en la parte superior. Con el expansor de membrana se ensanchó la funda de hule y se recubrió tanto el espécimen de suelo como la placa porosa. Luego se colocaron las bandas de hule, para evitar el humedecimiento del espécimen. Se verificó la centralidad de la probeta y se instaló el cilindro de lucita, que forma la cámara triaxial, sobre el empaque de la base de bronce de la cámara, colocándose la tapa teniendo la precaución de levantar el vástago para no tocar el espécimen. La cámara se cerró herméticamente, procurando que las dos bases quedaran paralelas y pudiese coincidir el centro del balero que esta alojado en el cabezal con la espiga del vástago que transmite la carga axial o esfuerzo desviador (σ). Una vez dada la presión de confinamiento, se pusieron en cero los deformímetros y se encendió la máquina. Las lecturas de los deformímetros tanto el lineal como el de carga se anotaron cada 10 divisiones del deformímetro lineal. La velocidad del ensayo estaba calibrada para el tipo de prueba. Cuando se presentaron fallas por deformación plástica las lecturas se tomaron hasta un 20% de la deformación lineal, o cuando las lecturas del deformímetro de carga se repetían más de 4 veces. Se procedió a desmontar el espécimen pero antes se leyó nuevamente la presión lateral, luego se desalojó el agua y se procedió a desarmar la cámara. Se desligó el espécimen de las bases, se le quitó la funda y se colocó en una tara para determinarle la masa húmeda más la masa de la tara. Después de esto se llevó a la estufa y con la masa de suelo seco más la masa de la tara se le determinó el contenido de humedad y la densidad aparente seca con el cual fue ensayado.

Se registraron los datos de las lecturas del deformímetro lineal en $\times 10^{-3}$ pulgadas y los datos de las lecturas del deformímetro de carga en $\times 10^{-4}$ pulgadas. Los datos fueron anotados en su mayoría en la siguiente progresión aritmética de la lectura del deformímetro lineal en $\times 10^{-3}$ pulgadas; cada 10, 20, 30 y 50 divisiones. La tercera columna del deformímetro de carga en kN, se obtuvo multiplicando la lectura del deformímetro de carga en $\times 10^{-4}$ pulgadas por la constante del anillo de carga en $\text{kN}/10^{-4}$ pulgadas. La cuarta columna de la deformación lineal, se obtuvo transformando la lectura del deformímetro lineal en mm. La quinta columna de la deformación unitaria en%, se obtuvo con la siguiente fórmula: $\varepsilon = \Delta L * 100/L_0$, donde ΔL fue la deformación lineal del espécimen ensayado y L_0 su longitud inicial antes del ensayo. La sexta columna del factor de corrección, se obtuvo restando a la unidad la deformación unitaria en fracción decimal. La séptima columna del área corregida, se obtuvo dividiendo el área inicial del espécimen ensayado entre el factor de corrección, tal como lo muestra la siguiente fórmula: Área corregida = Área inicial / Factor de Corrección, Esfuerzo desviador (σ) = Carga en $\text{kN}/\text{Área corregida en m}^2$, y $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma$ (σ_1 esfuerzo efectivo; σ_3 esfuerzo de confinamiento o de cámara; σ esfuerzo desviador). Los Algoritmos 1 y 2, mostrados a continuación, fueron empleados en el manejo de la gran información almacenadas en Excel para el cálculo de la cohesión.

Algoritmo en Excel utilizado en el horizonte de 300 mm, en donde B17 representa el intercepto (A) y B18 el coeficiente (B), para el cálculo de la cohesión aparente (C) y el ángulo de fricción interna (ϕ) (Hossne, 2008c):

Intercepto	'[Final]Hossne(30)5.69!\$B\$17
coeficiente	'[Final]Hossne(30)5.69!\$B\$18
C	'[Final]Hossne(30)5.69!\$B\$17/(2*RAIZ('[Final]Hossne(30)5.69!\$B\$18))
ϕ	((ASENO(('[Final]Hossne(30)5.69!B18-1)/('[Final]Hossne(30)5.69!B18+1)))/PI())*180
r^2	'[Final]Hossne(30)5.69!B6 (1)

Algoritmo en Excel utilizado en el horizonte de 600 mm, en donde B17 = A representa el intercepto y B18 = B el coeficiente), para el cálculo de la cohesión aparente (C) y el ángulo de fricción interna (ϕ) (Hossne, 2008c):

Intercepto	[Final]Hossne(60)5.69!\$B\$17
coeficiente	[Final]Hossne(60)5.69!\$B\$18
C	[Final]Hossne(60)5.69!\$B\$17/(2*RAIZ('[Final]Hossne(60)5.69!\$B\$18))
ϕ	((ASENO(('[Final]Hossne(60)5.69!B18-1)/('[Final]Hossne(60)5.69!B18+1)))/PI())*180
r^2	[Final]Hossne(60)5.69!B6 (2)

La expresión matemática que relaciona la presión principal (σ_1) (igual a la presión principal de cámara (σ_3) más la carga del pistón o esfuerzo desviador, la cohesión (C) y el ángulo de fricción interna (ϕ), está dada por (Crespo, 2007):

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \left(C * \cot(\phi) + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) * \text{sen}(\phi) \quad (3)$$

Se estableció la comparación con la ecuación general de la línea recta $Y = A + B * X$, obteniéndose (Hossne, 2008c):

$$C = \frac{(\sum \sigma_1 - \sum \sigma_3 \frac{N \sum \sigma_1 * \sigma_3 - \sum \sigma_1 \sum \sigma_3}{N \sum \sigma_3^2 - (\sum \sigma_3)^2}) / N}{2 * \sqrt{\frac{N \sum (\sigma_1 * \sigma_2) - \sum \sigma_1 \sum \sigma_3}{N * \sum \sigma_3^2 - (\sum \sigma_3)^2}}} \quad (4)$$

$$r = \frac{N * \sum (\sigma_1 * \sigma_3) - \sum \sigma_1 * \sum \sigma_3}{\sqrt{(N * \sum (\sigma_3)^2 - (\sum \sigma_3)^2) * (N * \sum (\sigma_1)^2 - (\sum \sigma_1)^2)}} \quad (5)$$

Con la aplicación de regresión lineal para los valores de (σ_1) y (σ_3) con los Algoritmos 1 y 2, y las Ecuaciones 3 y 4, se obtuvo C y el coeficiente de regresión r, para cada análisis, en donde N representó el número de datos. Se evaluó la resistencia del suelo objeto de estudio calculando la tensión cortante (τ) en función de C, ϕ y w.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron estadísticamente 132 datos. Para la función $C = f(w, \sigma, \phi, Pro)$ con una significancia total P de 0,000 para la constante y variables independientes, un r^2 de 0,964 y una correlación de Pearson con significancia de 0,05* y 0,01** fue de: (-0,953**: 0,905**: 0,680**: -0,218*) para cada término en el orden de influencia y de la función; se produjo la ecuación $C = - 1,005*w + 0,062*\sigma - 0,322*\phi - 0,034*Pro + 14,946$. El análisis de correlación lineal provocó signos diferentes a los derivados al realizarse la regresión lineal, posiblemente debidos a reajustes entre las demás variables producto de la alta multicolinealidad: el r de $(w:\sigma)$ fue - 0,954, el r de $(w:\phi)$ fue - 0,798 y el r de $(\sigma:\phi)$ fue - 0,914; el factor de inflación de variancia (VIF) para w fue de 20,556, para ϕ de 9,752 y para σ de 42,242. Al respecto, según Adnan *et al.*, (2006) el valor de VIF mayor de diez (10) es una indicación de multicolinealidad. Se utilizaron dos procedimientos recomendados por Adnan *et al.*, (2006): primeramente utilizando en lugar de las variables, la diferencia entre la variable y la media; sin embargo aunque se redujo el VIF no hubo respuesta satisfactoria; después, se eliminó el factor w en el análisis de regresión; los valores de VIF fueron: 6,29 para la tensión normal, 6,24 para la fricción interna y 1,03 para la profundidad. Indicando esto último la gran influencia de la humedad (w) sobre las variables independientes. De acuerdo a Ranjit (2005) y Hawking y Pendleton (1983), si el objetivo es simplemente predecir a Y de un conjunto de variables X , la multicolinealidad no es problema, la predicción sería exacta, y el r^2 general (r^2 ajustado) cuantifica lo bien que el modelo predice a Y ; pero si el problema es entender como los valores de X impactan a Y , entonces multicolinealidad es un gran problema.

El análisis de regresión para el mejor subconjunto con exclusión del intercepto, la variable independiente w forzada y las variables σ , ϕ y Pro libres, produjo para la variable dependiente C en el orden de influencia: w , σ , ϕ y Pro . Según Clare (2004) la cohesión es producida por las fuerzas de atracción de las partículas, y es independiente de la tensión normal. La cohesión en este suelo es capilar. Lambe y Whitman, (1979) reportaron que la humedad puede introducir una cohesión aparente entre las partículas por capilaridad. Estos resultados son revelados en la Figura 2, en donde se presenta la relación de la cohesión (C) *versus* la humedad, la compactación y el ángulo de fricción interna; se

observa la gran influencia de la humedad sobre la cohesión y sobre el ángulo de fricción interna más que la compactación. Las arenas poseen una cohesión no despreciable, que le permiten mantenerse con un talud vertical, pero es un estado inestable (Caquot y Kerisel, 1969). Se observa que los valores máximos de la cohesión aparente se produjeron a humedades bajas. El punto de marchitez para estos suelos se encuentra entre 5,53% y 6,19% (Gaspar, 1983; Fermín, 1971). La capacidad de campo para el suelo Ultisol de sabana se encuentra alrededor en un promedio de 12,6% (Espinoza, 1970; Fermín, 1971; Mata, 1992; Hossne y Salazar, 2004). El límite plástico para estos suelos se encuentra entre 12,92 y 14,04 (Hossne y Salazar, 2004). Al analizar los datos de consistencia citados arriba, se podría decir que el comportamiento de la cohesión aparente en función de la humedad comenzó a hacerse cero en las cercanías del límite plástico. Fountaine y Brown (1959) en pruebas en arenas con el uso de una caja torsional de corte registró una cohesión aparente 390 kPa y de 230 kPa a una humedad de 9%.

La Figura 3 muestra las líneas de tendencia exponencial de la relación entre la cohesión registrada y el esfuerzo desviador aplicado a las muestras, ambas en función inversa de la humedad a las profundidades de 0-300 mm y 300-600 mm. Se observa que para la humedad de 10,5% la cohesión fue de 21,724 kPa para ambas profundidades; de aquí en adelante con el aumento de la humedad, la cohesión empezó a acercarse a cero con menores

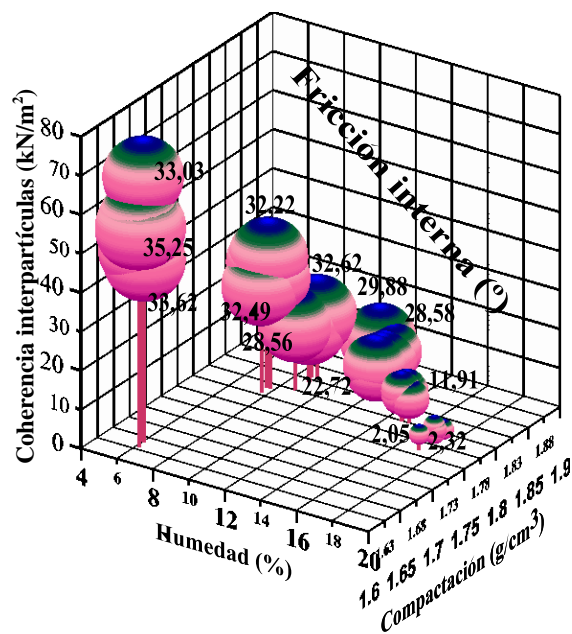


Figura 2. La cohesión aparente en relación con la humedad gravimétrica, la tensión normal y el ángulo de fricción interna.

valores para la profundidad de 300-600 mm. Este comportamiento fue debido a que el contenido de caolinita aumenta con la profundidad y que la cohesión es capilar. Hossne (2008a) reportó que el contenido de arcilla caolínica de estos suelos aumentó al profundizar. Se observa la misma tendencia del esfuerzo desviador en función de la humedad. Esto indica que el esfuerzo para producir la falla del elemento de suelo es función esencialmente de la humedad.

La regresión lineal para la función $\tau = F(\sigma, \phi, C, w, Pro)$ con una significación total P de 0,000, un r^2 de 1 y una correlación de Pearson de: (0,997***: 0,877***: 0,921***: - 0,936***: - 0,062) para cada variable independiente en el orden de la función, produjo la ecuación lineal $\tau = 1,572*\sigma - 6,768*\phi - 2,266*C + 2,133*w - 0,029*Pro - 264,502$. Al determinar a τ se observaron también cambios en signos producto de la alta multicolinealidad con un VIF para las variables independientes de σ con 86,18; ϕ con 28,06; C con 24,83 y w con 23,7. Sin embargo, se obtuvo $\tau_{determinado} \approx \tau_{calculado}$ con correlación de 1. El análisis de regresión para el mejor subconjunto con exclusión del intercepto, con la variable independiente w forzada y las variables C, σ , ϕ y Pro libres, produjo en el orden de influencia: w, σ , ϕ , C y Pro para la variable dependiente τ . Esto muestra, para la resistencia del suelo, que la cohesión aparente secundaria a la fricción interna. Braunack y Williams (1993) en una de sus conclusiones manifestaron que el contenido inicial de agua es importante en la determinación de la resistencia del suelo. Bateman *et al.*, (1965) encontraron que los valores de tensión cortantes obtenidos con baja tensión normal eran mayores en magnitud que la aplicada tensión normal, lo cual indicó que la cohesión fue primordialmente responsable de la tensión cortante registrada, y que la

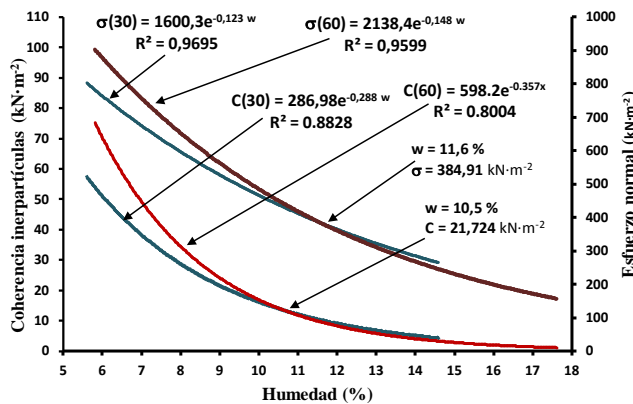


Figura 3. Coherencia interpartículas y el esfuerzo normal (esfuerzo desviador) versus la humedad gravimétrica del suelo.

cohesión aumentó con el aumento de la densidad seca.

La regresión lineal con 42 datos analizados para la función $C = F(\phi, \rho_s, w)$, un r^2 de 0,9788 y una correlación de Pearson de: (0,681**, - 0,831**, - 0,825); produjo para el modelo resultante la ecuación lineal $C = 0,014*\phi - 151,621*\rho_s - 2,635 w + 318,988$, con un P general de 0,000 y un P de 0,968; 0,000; 0,003; 0,000 para el orden de la ecuación. El VIF fue de 47,11; 55,17; 4,01 para las variables independientes en el orden de la función. A pesar de la multicolinealidad se obtuvo $C_{determinado} \approx C_{calculado}$ con correlación de 0,9893**. La multicolinealidad fue objeto de la influencia que tiene la humedad sobre la cohesión y la densidad seca. Según Hossne (2008b) las densidades aparentes de un suelo franco arenoso fueron alteradas por la humedad y variaron en forma inversamente proporcional. El análisis de regresión para el mejor subconjunto con exclusión del intercepto, la variable independiente w forzada y las variables ρ_s , y ϕ libres, produjo en el orden de influencia: w, ρ_s , y ϕ para la variable dependiente C.

La Figura 4 muestra el comportamiento de la cohesión en función de la humedad y la densidad seca, observándose la influencia de la densidad seca con un máximo valor de la cohesión para la ρ_s de alrededor de $1,88 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para una humedad de alrededor 6%. Los niveles de densidades se lograron con el agregado de agua; es decir, a mayor humedad, mayor la densidad seca originada por la

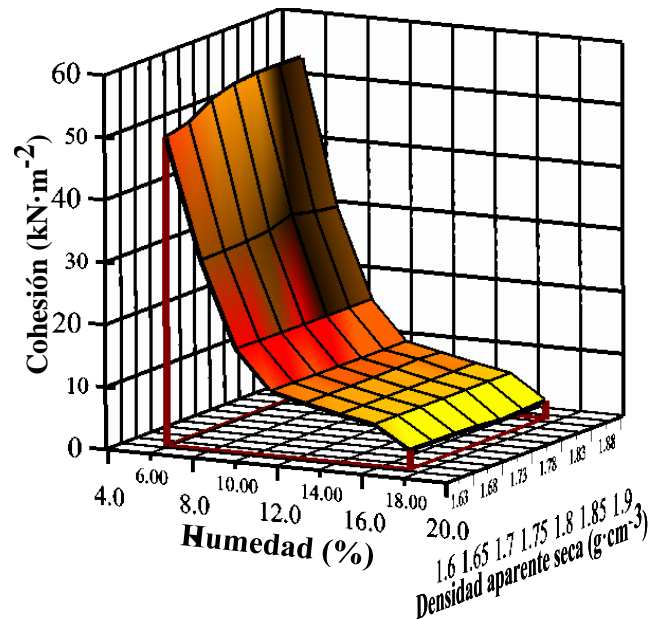


Figura 4. Cohesión aparente versus la densidad aparente seca y la humedad gravimétrica.

compactación, similar al efecto Proctor en la determinación de la humedad compactante, en el proceso de la preparación de los especímenes para ser utilizados en el triaxial. La cohesión varió más por el efecto de la humedad que por la densidad seca. Los cambios en el contenido de humedad tienen un efecto más pronunciado en C que los cambios en la densidad aparente (ASAE, 1971). La cohesión aumenta con la densidad aparente (ASAE, 1971). Proctor (1948) aplicó varias cantidades de energía compactante a un suelo arenoso y a un suelo arcilloso; encontró que los aumentos de la densidad resultaron en continuo aumento de la cohesión para el suelo arcilloso, pero en un pequeño aumento de la cohesión para el suelo arenoso. Panwar y Siemens (1972) en un ensayo de esfuerzo cortante por el método del corte directo concluyeron que el esfuerzo cortante disminuyó con el aumento de la humedad y de la densidad. Ellos encontraron que los valores de la cohesión fueron altos a bajos contenidos de humedad, excepto a la densidad de $1,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Laib *et al.*, (2010) reportaron que la cohesión y la fricción interna no son constantes en diferentes tipos de suelo, ambos cambiaron en función de la profundidad y la compactación del suelo; y concluyeron, que la cohesión aumentó en función de la profundidad del suelo, la compactación redujo la cohesión y la cohesión del suelo y el cizallamiento del suelo disminuyeron en función del contenido de humedad.

En el Cuadro 3 se presenta las medias, mínimos y máximos de la cohesión aparente (C) obtenidos para las profundidades de 0-30 cm y 30-60 cm con una significancia de 0,017. Se incluyeron los respectivos valores del ángulo de fricción (ϕ), tensión normal (σ) y humedad (w) y densidad aparente seca

(ρ_s). Se anexaron los respectivos valores de correlación, coeficiente de regresión, eta y linealidad. La cohesión aparente tuvo un valor promedio de 21,03 kPa a la profundidad de 60 cm, y 23,09 kPa a la profundidad de 30 cm. Los mayores valores de la cohesión aparente fueron para la profundidad de 60 cm de 86,96 kPa para un ángulo fricción interna de $36,96^\circ$, una tensión normal de 938,38 kPa y una humedad de 6,69% y de 98,05 kPa para la profundidad de 30 cm, con un ángulo de fricción interna de $31,77^\circ$, una tensión normal de 835,58 kPa y una humedad de 6,12%.

La resistencia de los suelos es según la ecuación de Coulomb: $\tau = C + \sigma \cdot \tan \phi$ y la tracción de la ecuación de Micklethwait (1944): $H = A \cdot C + V \cdot \tan \phi$, tanto la resistencia como la tracción del suelo objeto de estudio serían altamente influenciadas por la humedad, la tensión normal, el ángulo de fricción interna y la cohesión. Esto repercute sobre los sistemas tractivos. La cohesión mostró la menor influencia sobre la tensión cortante en el suelo estudiado. Esto implica que los cauchos tractivos de tacos altos por su costo no deberían ser utilizados. Ademosun (1990) informó que el tiro disminuyó linealmente con el grado hidrométrico del suelo con un rango de 12 a 16% en un suelo franco arenoso. Gupta y Surendranath (1989) informaron que el requerimiento de tiro aumentó gradualmente con un bajo grado hidrométrico de 6,9% hasta que alcanzó 18,9%. En este trabajo se obtuvo la mayor cohesión a la humedad entre 6,12% y 6,69%. Hossne (2008a) reportó para este suelo una zona friable entre 7,63% y 9,52%; que indicaría (según la ecuación de la Figura 3) un rango de cohesión entre 33,88 kPa y 19,96 kPa adecuado para la labranza.

Cuadro 3. Análisis de medias de la cohesión aparente con relación a la humedad (w), tensión normal (σ), fricción interna (ϕ), densidad seca (ρ_s) y la profundidad (Pro).

Profundidad	C	ϕ	σ	w	ρ_s
(máximo y mínimo)	(kN/m ²)	(°)	(kN/m ²)	(%)	(g/cm ³)
30 cm (máximo)	98,05	31,77	835,58	6,12	-
30 cm (mínimo)	4,09	17,21	287,13	13,95	-
60 cm (máximo)	86,96	36,96	938,38	6,69	-
60 cm (mínimo)	0,15	0,72	154,14	17,61	-
Mezcla	68,31	33,31	-	6,04	1,64
r			0,914	-0,798	-0,831
r ²			0,836	0,637	0,691
Eta	0,025		1,000	0,995	0,935
Linealidad			0,000	0,000	0,000
Significación	0,784		0,04	0,06	0,000

CONCLUSIONES

La humedad edáfica fue la variable independiente que más influyó, en forma inversa exponencialmente, sobre la coherencia interpartículas y la tensión cortante. Se obtuvo un valor máximo de la coherencia de 98,05 kPa a una humedad de 6,12%. Para la densidad seca de 1640 kg/m³, una humedad de 6,04% y una fricción interna de 33,31°, se produjo una coherencia de 68,31 kPa. El orden de influencia de las variables independientes sobre la cohesión fue (a) w , ρ_s y ϕ ; y (b) w , σ , ϕ y Pro . El orden de influencia de las variables independientes sobre la tensión cortante fue w , σ , ϕ , C , y Pro .

La coherencia interpartículas influiría su efecto resistente en las labores y procesos agrícolas sólo a valores bajos de humedad. En el estado friable se podría producir un rango de atracción interpartículas entre 33,88 kPa y 19,96 kPa, adecuado para la labranza y el desarrollo radical. La compactación influyó menos que la humedad sobre la atracción interpartículas. El ángulo de fricción interna no influyó sobre la coherencia interpartículas.

El efecto de la cohesión sobre la resistencia del suelo objeto de estudio secundó el de la fricción interna. El comportamiento de la cohesión aparente en función de la humedad comenzó a hacerse cero en las cercanías del límite plástico. Para estos suelos se recomiendan los cauchos tractivos de taco cortos y el uso del sistema hidráulico de tres puntos para la óptima transferencia de carga; por supuesto, en el estado friable del suelo objeto de estudio.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento al Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente por el financiamiento de esta investigación.

LITERATURA CITADA

Ademosun, O. C. 1990. The design and operation of a soil tillage dynamics equipment. *The Nigerian Engineer* 25 (1): 51-57.

Adnan N.; M. H. Ahmada and R, Adnan. 2006. A comparative study on some methods for handling multicollinearity problems. *Matematika* 22 (2): 109-119.

American Society of Agricultural Engineers (ASAE). 1971. *Compaction of agricultural soils*. ASAE Monograph. 299950 Niles Road, St. Joseph, Michigan 49085. 471 p.

Bateman, H. P.; M. P. Naik and R. R. Yoerger. (1965). Energy required to pulverize soil at different degrees of compaction. *J. Agr. Eng. Res.* 10: 132.

Braunack, M. V. and B. G. Williams. 1993. The effect of initial soil water content and vegetative cover on surface soil disturbance by tracked vehicles. *Journal of Terramechanics*, 30 (4): 299-311.

Battika, J. N. 1985. Estudio del esfuerzo de cizalleo de varios tipos de suelos agrícolas venezolanos. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería Agronómica, Campus Los Guaritos, Maturín, Estado Monagas Venezuela. 144 p.

Caquot, A. y J. Kerisel. 1969. *Tratado de Mecánica de Suelos*. Interciencia, Constanilla de Los Ángeles. 549 p.

Castellanos, A. 2005. The relationship between attractive interparticle forces and bulk behaviour in dry and uncharged fine powders. *Advances in Physics* 54 (4): 263-376.

CIVIL2121. 2012. Soil classification. Engineering Geology and Geomechanics. Classification systems based on the US system (The Unified Soil Classification System, USCS), or the British Standard Soil Classification System, The Australian Soil Standard. [Http://geotech.uta.edu/lab/main/sieve](http://geotech.uta.edu/lab/main/sieve). 12p. Revisado febrero 2012.

Clare, E. K. 2004. The influence of the clay fraction on the engineering properties of soil, with some suggestion for future research. Road Research Laboratory, Harmondsworth, Middlesex.

Crespo, V. C. 2007. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Editorial Limusa, México. 6^a Edición. 646 p.

Daguar, R. N. 1976. Esfuerzo cortante de varios suelos agrícolas Venezolanos. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería

- Agronómica, Campus Los Guaritos, Maturín, Estado Monagas Venezuela. 74 p.
- Delgado, A. 1986. Influencia de las trayectorias de las tensiones de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- Dobbs, H. T., and J. M. Yeomans. 1982. Capillary condensation and prewetting between spheres. *Gifu Shika Gakkai Zasshi*, 4: 10133-10138.
- Dudley, A. 1970. Review of collapsing soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Proc. Of the American Society of Civil Engineer.*
- Espinoza, J. 1970. Estudio de las series de suelo y levantamiento agrológico del campo experimental agrícola de la sabana de Jusepín. Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería Agronómica, Campus Los Guaritos, Maturín, Estado Monagas Venezuela: 42 p.
- Fountaine, E. R. and Brown, N. J. 1959. Shearing resistance of top soils under small normal loads. *Journal of Agricultural Engineering Research* 4 (1): 53-59.
- Fermín, A. 1971. Algunas relaciones suelo-agua de la Estación Experimental Agrícola de sabana de la Universidad de Oriente. Trabajo de Grado. Maturín, Estado Monagas, Venezuela. 78 p.
- Fisher, J. E. 1964. Evidence of circumnutational growth movements of rhizomes of *poa pratensis* L. that aid in soil penetration. *Canad. J. Botl.* 42: 293-299.
- Gaspar, J. 1983. Determinación de diferentes parámetros físicos del suelo con fines de riego en la Estación Experimental Agrícola de sabana de la Universidad de Oriente. Trabajo de Grado. Monagas, Maturín, Venezuela. 75 p.
- Griffiths, D. V. and N. Lu. 2005. Unsaturated slope stability analysis with steady infiltration or evaporation using elasto-plastic finite elements. *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.* 29: 249-267.
- Grim, R. E. 1962. *Applied clay minerology.* Mcgraw-Hill book company, New York. 320 p.
- Gupta, C. P and Surendranath 1989. Stress field in soil owing to tillage tool Interaction. *Soil and Tillage Research* 13: 123-149.
- Hawking, R. R. and, O. J. Pendleton. 1983. The regression dilemma. *Commun. Stat. Theo. Meth.* 12: 497-527.
- Heath, A. C.; J. M. Pestana, J. T. Harvey and M. O. Bejerano. 2004. Normalizing behavior of unsaturated granular pavement materials. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 130 (9): 896-904.
- Heibroek, G.; R. M. Zeh and K. J. Witt. 2003. Tensile strength of compacted clays. From experimental evidence towards numerical modeling of unsaturated soil, *ICSMGE Conf.*, October 18 and 19, T. Schanz, ed., Springer, Berlin.
- Hossne G., A. J. 2008a. Índice de friabilidad de un suelo franco arenoso de sabana del estado Monagas, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 8 (1): 107-117.
- Hossne G., A. J. 2008b. La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. *Terra Latinoamericana*, 26(3): 195-202.
- Hossne G., A. J. 2008c. *Fisicomecánica y las Implicaciones Agrícolas de los Suelos de Sabana del Estado Monagas, Venezuela. Trabajo de Ascenso para Titular. Biblioteca del Núcleo de Monagas de la Universidad de Oriente. Dos (2) Tomos. 442 p.*
- Hossne, A y J. Salazar. 2004. Límites de consistencia y sus implicaciones agrícolas en un suelo ultisol de sabana del Estado Monagas de Venezuela. *Revista Costarricense* 28 (1): 69-80.
- Ingles, O. G. 1962. Bonding forces in soils, Part III: A theory of tensile strength for stabilized and naturally coherent soils. *Proc., 1st Conf. of the Australian Road Research Board*, 1: 1025-1047.
- Lambe, W. T. and Whitman, R. V. 1979. *Soil Mechanics, SI Version.* John Wiley and Sons. 553 p.
- Laib L.; L. Máthé and G. Pillinger. 2010. The effects of the off-road Vehicle on the soil cohesion and internal friction. Department of Automotive

- Technology. Institute for Process Engineering. 4: 73-91. Annual Technical-Scientific Journal of the Mechanical Engineering Faculty, Szent István University, Gödöllő, Hungary. HU ISSN 2060-3789. Páter K. u. 1., Gödöllő, H-2103 Hungary. dekan@gek.szie.hu, www.gek.szie.hu.
- Lu, N. and W. J. Likos. 2006. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (2): 131-142.
- Lu, N. and W. J. Likos. 2004. *Unsaturated soil mechanics*, Wiley, New York.
- Márquez, J. J. 2006. *Mecánica de suelos y estudios geotécnicos en obras de ingeniería*. p 16-18.
- Maswoswe, J. 1985. *Stress path for compacted soil during collapse due to wetting*. Ph.D. Thesis, Imperial College, London.
- Massimilla, L. and G. Donsi. 1976. Cohesive forces between particles of fluid-bed catalysts. *Powder Technology* (15): 253-260.
- Mata, R. A. 1992. *Fundamentos para el manejo de los suelos llaneros del Oriente de Venezuela*. Escuela de Ingeniería Agronómica. Universidad de Oriente. Maturín, Estado Monagas, Venezuela. 292 p.
- Micklethwait, E. W. E. 1944. *Soil Mechanics in relation to fighting vehicles*. Military Coll. Of Science, Chobham Lane, Chertsey.
- Orr, F. M.; L. E. Scriven and A. P. Rivas. 1975. Pendular rings between solids, meniscus properties and capillary force. *J. Fluid Mech.* 67 (4): 723-742.
- Panwar, J. S. and J. C. Siemens. 1972. Shear strength and energy of soil failure related to density and moisture. *Transaction of the ASAE* 15 (3): 423-427.
- Phillips, S. H. and H. M. Jr. Young. 1973. *No-tillage farming*. Reiman Associates, Milwaukee. 224 p.
- Proctor, R. R. 1948. The relationship between foot pounds per cubic foot of compactive effort and shear strength of compacted soils. 2nd International Conf. Soil Mech. Proc. 5: 219.
- Ranjit, K. P. 2005. *Multicollinearidad: Causes, effects and remedies*. Roll No. 4405. LA.S.R.I, Library Avenue, New Delhi-110012.
- Rucks, L.; F. García, A. Kaplán, J. Ponce de León y M. Hill. 2004. *Propiedades físicas del suelo*. Universidad De La República, Facultad de agronomía, Departamento de Suelos y Aguas, Montevideo, Uruguay. 68 p.
- Schubert, H. 1984. *Capillary forces-modeling and application in particulate technology*. *Powder Technol.* 37: 105-116.
- Schubert, H. 1982. *Kapillarität in porösen Feststoffsystemen*, Springer.
- Varga, M. 1973. Structurally unstable soils in Southern Brazil. *Proc. 8th ICSMFE, Moscú.* 2 (2): 239-246.
- Verwey, E. J. W. and J. T. G. Overbeek. 1948. *Theory of the stability of lyophobic colloids*, Elsevier.
- Wiersum, L. K. 1962. Uptake of nitrogen and phosphorus in relation to soil structure and nutrient mobility. *Plant and Soil* 16: 62-70.