

Comparación de tres métodos para determinar densidad aparente y solidez en tres suelos franco arenosos de sabana

Three methods of determining soil bulk density and solidity in three savanna sandy loam soils

Américo José HOSSNE GARCÍA ✉ y Héctor José CEDEÑO CAMPOS

Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Escuela de Ingeniería Agronómica, Departamento de Agronomía.
Avenida Universidad, Campus Los Guaritos, Maturín, 5201, estado Monagas, Venezuela.
E-mails: americohossnegarcia@gmail.com y americohossne@cantv.net ✉ Autor para correspondencia

Recibido: 02/02/2012

Fin de arbitraje: 30/04/2012

Revisión recibida: 28/11/2012

Aceptado: 16/12/2012

RESUMEN

El análisis de campo sobre el suelo es difícil debido a su variabilidad espacial y gran heterogeneidad resultante de varios factores de formación del suelo. Se debe tener cuidado para garantizar un muestreo preciso, como seleccionar el equipo adecuado y la manera en que el muestreo se realiza. El objetivo fue comparar la toma de muestras con el cilíndrico tipo Uhland en caída libre y caída forzada del martillo con el densímetro nuclear, para evaluar *in situ*, la densidad seca (ρ_s), la densidad húmeda (ρ_h) y la relación de solidez (i_s), a dos profundidades (0-150 y 150-300 mm) en tres suelos ultisoles franco arenosos del estado Monagas. Metodológicamente se utilizó un arreglo factorial con tres suelos, tres métodos y dos profundidades ($3 \times 3 \times 2$) en bloques al azar con cinco repeticiones con tres réplicas, se realizó un ANDEVA, las medias y coeficientes de variación de los tratamientos fueron comparadas con la prueba de MDS y análisis de gráficos estadísticos. La densidad seca, la densidad húmeda y la relación de solidez por el método del densímetro nuclear presentaron los valores más bajos con diferencias estadísticas significativas con respecto a los obtenidos con la metodología Uhland con caída libre y forzada en los tres suelos. Los valores promedios con la toma muestras tipo Uhland fueron menores para la caída libre sin diferencia significativa para los tres suelos. Para la profundidad de 150 a 300 mm los valores promedios de las densidades aparentes y la relación de solidez fueron mayores significativamente. El análisis de los coeficientes de variación mostró diferencias de resultados en función de los suelos y la humedad con los menores valores para el densímetro.

Palabras claves: Densímetro, toma muestras tipo Uhland, solidez, humedad.

ABSTRACT

Soil field analysis is difficult due to spatial variability and heterogeneity resulting from various factors of soil formation. Care must be taken to ensure accurate sampling, such as selecting the right equipment and the manner in which sampling is performed. The objective was to compare the method Uhland in free and forced fall down of the hammer, with the nuclear density gauge to evaluate *in situ* dry density (ρ_s), the wet density (ρ_h) and the solidity ratio (i_s), at two depths (0-150 y 150-300 mm) in three sandy loam soils of Monagas State, Venezuela. Methodologically it was used a factorial arrangement with three soils, three methods and two depths ($3 \times 3 \times 2$) in a randomized block with five repetitions with three replicates, ANOVA, means and coefficients of variation of the treatments were compared with the LSD test and analysis of statistical graphics. The dry density, wet density and the ratio of strength by the method of nuclear densometer showed the lowest values with statistically significant differences compared to those obtained with the free and forced Uhland fall in the three soils. The mean values were lower in Uhland for free fall with no significant difference for the three soils. For the depth of 150 to 300 mm the average values of bulk density and solidity ratio were significantly higher. The analysis of the variation coefficients showed differences in results depending on soil and moisture with the lowest values for the densitometer.

Key words: Densitometer, Uhland-type sampler, solidity, humidity.

INTRODUCCIÓN

La determinación de la densidad aparente seca de los suelos agrícolas normalmente se realiza sin tomar en cuenta el estado consistencial del suelo, ya que la densidad es variable en función del contenido de humedad del suelo (Hossne, 2008). Los

estudios sobre la variabilidad espacial han revelado que incluso en un suelo homogéneo, sus propiedades físicas pueden ser considerablemente cambiantes entre dos puntos vecinos en el mismo campo sin una causa aparente. Esta variabilidad puede ser alta en los campos grandes, por lo que para llevar a cabo experimentos en este tipo de áreas con cada punto de

muestreo muy lejos del siguiente no es aconsejable. Al respecto, Silva *et al.*, (1989) expusieron que el análisis de campo sobre el suelo es difícil debido a su variabilidad espacial, y debido a la gran heterogeneidad resultante de varios factores de formación del suelo. Se debe tener cuidado para garantizar un muestreo preciso, cómo seleccionar el equipo adecuado y la manera en que el muestreo se realiza (Fernandes *et al.*, 1983; Nesmith *et al.*, 1986; Constantini, 1993). De acuerdo a Suarez *et al.*, (2011) los errores en las predicciones de la compactación del suelo oscilaron de 1,50 a 4,16%, quedando demostrado que la exactitud en las predicciones dependerá de las condiciones físicas del suelo y la aptitud de las ecuaciones de predicción empleadas.

La determinación de las densidades aparentes del suelo es práctica común en los proyectos agronómicos, mayormente en función de la densidad aparente seca. La densidad aparente húmeda se evalúa en función de la masa total de suelo dividida por el volumen del cilindro muestreador que es igual al volumen de la muestra; es decir, la ρ_h incorpora la humedad de la muestra, la cual debería ser la de uso en el agro, ya que los suelos agrícolas deben estar húmedos. Los valores de la densidad húmeda son mayores que los de la densidad seca $\rho_H = \rho_s(1+w)$; w representa el contenido de agua gravimétrico del suelo (Hossne, 2001b). La relación de solidez proporciona cuanto sólida se encuentra la muestra, que viene ser igual a la inversa de el volumen específico (v). Muchos investigadores argumentan que el volumen específico ($1/i_s$) y compactación relativa, pueden ser mejores índices de compactación del suelo que la densidad aparente y porosidad (Soane *et al.*, 1981); también, la relación de vacíos se ha propuesto como un índice de compactación del suelo (Hartge y Sommer, 1979), pero se relaciona con la relación de solidez. Existe una clara relación entre los valores de las densidades con otras características, estados y propiedades de los suelos, entre las que se tienen: la textura, estructura, contenido de humedad, el contenido de materia orgánica, la porosidad, la compactación y la conductividad térmica (Misle y Norero, 2002; Hossne, 2008). Se emplean muchos procedimientos para medir las densidades aparentes, como los métodos del cono de arena, hoyo con agua, hoyo con aceite, rayos gamma, el martillo Clegg, técnicas electromagnéticas, el método del terrón, cilindros saca muestras, excavación muestral, cilindro Uhland y el densímetro nuclear (Treasure, 2006; Taylor y Kansara, 1967; Swiford y Meyer, 1985; Lichter y Costello, 1994; Hossne, 2001a; Blake y

Hartge, 1986; Folegatti *et al.*, 2001; McKeague, 1978; Yoder, 1936; Vanremortel y Shields, 1993; Zwarich y Shaykewich, 1969).

Sin embargo, el método más común por su sencillez y costo es con la toma muestra tipo Uhland, el cual es normalmente utilizado con caída forzada del martillo (Hossne, 2001a). Lichter y Costello (1994) manifestaron que el muestreo con el cilindro impulsado en el suelo, es la técnica más común para la determinación de la densidad aparente de los suelos agrícolas y una muestra de volumen conocido es extraída, secada en la estufa y pesada. Según Blake y Hartge (1986), y Craul (1992) el cilindro de suelo extraído con una toma muestra cilíndrico tiene limitado uso en suelos secos y muy húmedos, y pierden exactitud en suelos pedregosos. Swinford y Meyer (1985) alegaron que el cilindro altera la muestra y no puede ser usado como un patrón absoluto ya que puede ocurrir compactación dentro del cilindro, y el tamaño y la forma del cilindro serían diferentes del volumen de suelo. La toma muestra tipo Uhland fue introducido por Uhland (1949) quien utilizó anillos de aluminio de 76,2 mm de diámetro y de 76,2 mm de altura, lo patentó de acuerdo al tipo descrito por Yoder (1936) modificándolo y mejorándolo. De acuerdo a McKeague (1978) la toma muestra tipo Uhland ha recibido aceptabilidad total. La toma muestra tipo Uhland es considerado que proporciona muestras imperturbadas (Perfect *et al.*, 2002; Folegatti *et al.*, 2001; Barrios y Florentino, 2001; Wagner *et al.*, 1995; Bravo y Andreu, 1995; Hossne, 2001b).

La falta de estandarización de algunos factores básicos, como el tamaño y la forma de las muestras, la fuerza y la velocidad aplicada en la inserción, la velocidad de extracción de la muestra, y el estado de humedad del suelo durante el muestreo, pueden ser fuentes de variaciones que influyen en las diferencias en los valores de la densidad aparente seca y húmeda. Folegatti *et al.*, 2001, reportaron que las técnicas utilizadas con diferentes muestreadores pueden influir en los valores de las densidades aparentes. Es imposible establecer normas en cada etapa de muestreo en el campo, estos errores son difíciles de cuantificar, pero hay que considerar una gran importancia sobre todo cuando se comparan los valores de densidad aparente seca (Veras de Lima *et al.*, 2005). Los densímetros nucleares permiten mediciones rápidas y exactas y repetibles. Los instrumentos pueden ser operados a mano y son móviles. Las desventajas son que utiliza material

radiactivo y se requiere una licencia para operadores apropiadamente entrenados (Taylor y Kansara, 1967). El equipo es costoso y necesita la calibración correcta para cada sitio (Treasure, 2006).

El objetivo de este trabajo fue comparar el método de la toma muestra cilíndrica tipo Uhland con caída libre del martillo de penetración, el método de la toma muestra cilíndrica tipo Uhland con caída forzada o velocidad inicial del martillo de penetración y el densímetro nuclear, en la medición de la densidad aparente seca (ρ_s), densidad aparente húmeda (ρ_h) y la relación de solidez (i_s) de tres suelos agrícolas a dos profundidades de 0-150 mm y de 150-300 mm.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en dos profundidades de 0-150 mm y de 150-300 mm en tres suelos ultisoles franco arenosos agrícolas del estado Monagas, Venezuela en las localidades de Jusepín (A), El Barril (B) y San Jacinto (C) con las características mostradas en el Cuadro 1 y la Figura 1.

Los instrumentos empleados fueron: (a) el densímetro nuclear modelo HS-5001C de Humbolt y (b) la toma muestra tipo Uhland marca Humboldt Meg CO modelo H-4203.3 con peso del martillo de 4240 g (Figura 2) con todos los cilindros muestreadores de alrededor 70 mm de longitud y 72 mm de diámetro. Al respecto, Vomocil (1957) con relación al método del núcleo cilíndrico, recomendó que el cilindro tenga por lo menos 7,5 cm de diámetro para disminuir la disturbación que la presión del instrumento ejerce sobre el suelo. Todos los cilindros utilizados (100) fueron etiquetados con sus medidas promedios de tres alturas y tres diámetros. Se

utilizaron tres métodos: (a) Método del densímetro (M1), (b) Método del Uhland con caída libre del martillo (M2) y (c) Método del Uhland con caída forzada (velocidad inicial por impulso manual) del martillo (M3) (Treasure, 2006; Taylor y Kansara, 1967; Swiford y Meyer, 1985; Lichter y Costello, 1994; Hossne, 2001a).

En cada una de las tres zonas, se trabajó en un área de una hectárea aproximadamente, se seleccionaron 5 sitios de 1,5 m². Se colocó el microprocesador emisor-receptor de rayos gamma sobre la base de calibración por 5 minutos aproximadamente. Este procedimiento de calibración se realizó una vez en cada zona, se colocó la plancha de aleación de aluminio con el cilindro guía de perforación sobre el terreno (Figura 1) y se introdujo la barra perforadora por el cilindro guía para luego golpear con el martillo hasta clavar la barra a la profundidad de 300 mm. Para extraer la barra se

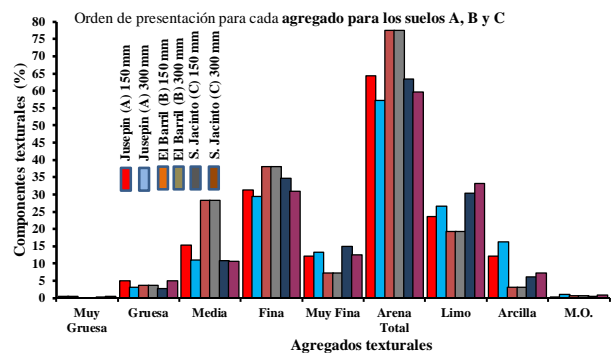


Figura 1. Componentes físicos de los suelos estudiados en el estado Monagas. Suelo (A) de Jusepín (JU), suelo (B) de El Barril (BA) y suelo (C) de San Jacinto (JA), para las profundidades 0-150 y 150-300 mm.

Cuadro 1. Componentes físicos (%), materia orgánica (%) y clase textural de los tres suelos estudiados en el estado Monagas.

Componentes (%)	Jusepín		El Barril		San Jacinto	
	Profundidad (mm)					
	0-150	150-300	0-150	150-300	0-150	150-300
Arena muy gruesa	0,57	0,49	0,17	0,13	0,25	0,53
Arena gruesa	5,06	3,05	3,67	2,99	2,79	5,03
Arena media	15,27	10,93	26,36	24,02	10,75	0,68
Arena fina	31,27	29,41	38,06	37,6	34,70	30,98
Arena muy fina	12,12	13,31	7,16	8,20	14,96	12,45
Arena total	64,29	57,19	77,44	72,94	63,45	59,67
Limo	23,51	26,61	19,36	21,86	30,35	33,13
Arcilla (caolinita)	12,2	16,2	3,2	5,2	6,2	7,2
Materia orgánica	0,29	1,12	0,61	0,78	0,53	0,94
Clase textural	Fa	Fa	aF	Fa	Fa	Fa

utilizó una llave doble asa, acoplándola a la barra con tensión y movimientos giratorios. La extracción de la barra dejó un hoyo por el cual se introdujo la barra emisora-receptora de radiación gamma; esta barra se encuentra acoplada al microprocesador, el cual realiza el registro de la velocidad de propagación de las ondas emitidas y ejecuta los cálculos de los parámetros físicos del suelo. Después de tomar los registros a la profundidad de 300 mm, se elevó la barra emisora receptora hasta los 150 mm de profundidad para tomar el registro a este nivel. Este proceso se realizó en los suelos estudiados de la forma siguiente: 3 suelos X 2 profundidades X 5 puntos de muestreo X 3 repeticiones X 3 métodos, y así produjo un total de 270 muestras analizadas.

En los mismos sitios se colocaron en el suelo 6 cilindros, identificados, y se introdujeron con el Uhland: tres cilindros se alojaron con caída libre del martillo y los otros tres con caída forzada; se anotaron en la planilla los números de golpes dados a cada anillo para introducirlo completamente en el suelo. Se excavó hasta la profundidad de 150 mm para colocar a este nivel seis nuevos cilindros y repetir todo el proceso antes descrito. Las muestras se pesaron y se secaron a estufa a 105 °C por 24 horas. Se calculó el porcentaje de contenido de humedad (w) con la Ecuación 1, con base a la masa de agua (M_w) y la masa de suelo seco (M_s). La densidad seca (ρ_s) ($g \cdot cm^{-3}$) con la Ecuación 2, en donde V_T fue el volumen interno del cilindro del cilindro. La densidad natural o in situ ρ_h se determinó por medio de la masa de suelo total ($M_T = M_s + M_w + M_A$) con la Ecuación 3. El índice o relación de solidez (i_s) por medio de la densidad seca (ρ_s) y la gravedad específica del suelo (G) con la Ecuación 4. ρ_w representó la densidad del agua:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \cdot 100 \quad (1) \quad \rho_s = \frac{M_s}{V_T} \quad (2) \quad \rho_h = \frac{M_T}{V_T} \quad (3) \quad i_s = \frac{V_s}{V_T} = \frac{\rho_s}{G \cdot \rho_w} \quad (4)$$

Metodológicamente se utilizó un arreglo factorial con tres suelos, tres métodos y dos profundidades (3*3*2) en bloques al azar con cinco repeticiones con tres réplicas, se realizó un ANDEVA, las medias de los tratamientos fueron comparadas con la prueba de MDS, prueba de Tukey para comparación de coeficientes de variación, comparaciones apareadas ($p \leq 0,05$) y análisis de gráficos estadísticos. Gómez y Arcos (2006) reportaron que los resultados obtenidos de densidad húmeda y contenido de humedad medidos con el

método nuclear, es posible concluir que es recomendable efectuar al menos 3 mediciones en cada punto con el fin de obtener resultados representativos y disminuir los errores que se producen al no considerar la heterogeneidad del material.

La Figura 3 señala el contenido de humedad *in situ* de los tres tipos de suelos estudiados durante el muestreo. Se observa que el suelo con mayor contenido de humedad, entre 12 y 15 %, fue el suelo de Jusepín (Suelo A); siguiéndole el suelo de San Jacinto (Suelo C) con humedad entre 5 y 8 %, y por último el suelo de El Barril (Suelo B) con humedades entre 2 y 3%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4 presenta los promedios del número de golpes, la humedad gravimétrica y sus respectivas desviaciones estándar versus caída libre o forzada, profundidad de muestreo y tipo de suelo,

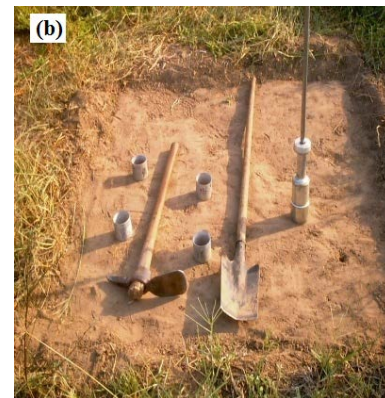


Figura 2. Equipos utilizados en las evaluaciones: (a) densímetro nuclear HS-5001C y b) Toma de muestras tipo Uhland H-4203.3

obtenidos con la toma muestra cilíndrica tipo Uhland. Se utilizaron más golpes para la introducción del cilindro a bajas humedades por debajo del 8 %. De acuerdo a Blake y Hartage (1986), y Craul (1992), el muestreo con cilindros en suelos secos, húmedos y con granzón tiene un uso muy limitado. Se observa que el martilleo en el uso del Uhland en caída forzada requirió obviamente menos golpes. Las desviaciones estándar exhibieron, en general, mayor variación a bajas humedades, en especial para los suelos B y C. Al respecto Blake y Hartage (1986) señalaron que la densidad aparente puede aumentar, por el efecto Proctor al compactar, si el dispositivo de muestreo es sobre martillado al introducirlo en el suelo. Hossne (2001a, 2009) expuso que la toma muestras tipo Uhland produce variabilidad de la densidad aparente seca producto del efecto Proctor. Parfitt *et al.*, (2010) observaron que el martilleo en la conducción del cilindro toma muestra produjo valores bajos de la densidad aparente seca, agrietamiento y expansión de la muestra.

En la Figura 5 se muestra los valores de la densidad aparente seca lograda por los tres métodos versus el tipo de suelo y profundidad de muestreo. Se nota que los mayores valores de la densidad aparente seca ocurrieron para el suelo de Jusepín (Suelo A) tanto para el rango de profundidad de 0-150 mm y de 150-300 mm. El suelo de Jusepín (A) presentó un alto contenido relativo de arcilla y el mayor contenido de humedad que pudo haber causado la mayor compactación de la muestra con el uso del Uhland

(Figura 3). En relación, Hossne *et al.*, (2009) reportaron que la humedad óptima de compactación de estos suelos está cercana a la capacidad de campo (12,5 %) y Pinzón y Amézquita (1991) trabajando en compactación producto del pisoteo de animales, reportaron que la compactación aumentó con el contenido de arcilla, pero no hizo referencia del contenido de humedad para el momento del muestreo. Sekwakwa y Dikinya (2012) reportaron que los suelos franco arenosos son susceptible a la compactación especialmente con proporciones relativas altas de arcillas que de limo. Matus *et al.*, (2002) reportaron que la diferencia en el contenido de humedad del suelo fue el factor más significante en el muestreo. Gómez y Arcos (2006) reportaron que el método nuclear es muy susceptible a las variaciones de

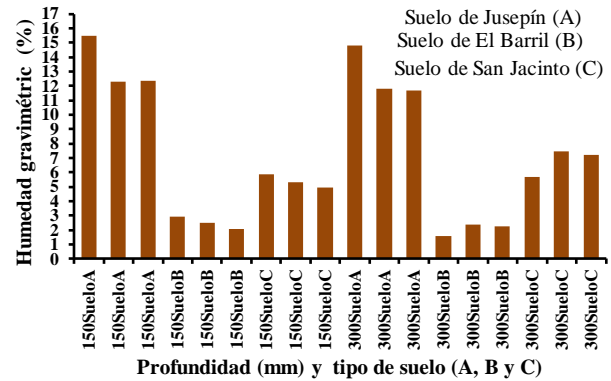


Figura 3. Contenido de humedad gravimétrica *in situ* de los tres tipos de suelos del estado Monagas al momento de la evaluación

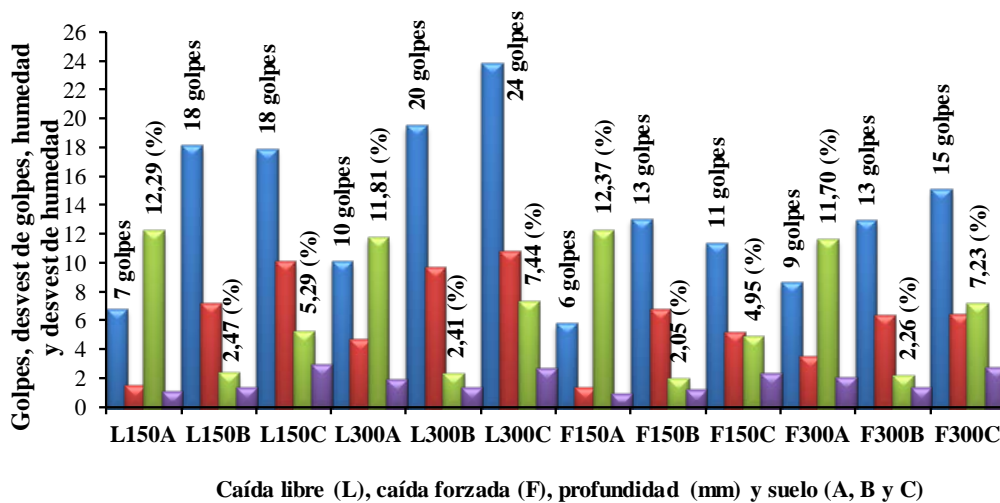


Figura 4. Golpes libres (L) y forzados (F) ejecutados con el muestreador Uhland durante el muestreo en los tres suelos A, B y C del estado Monagas a las profundidades de 150 y 300 mm. Para cada ensayo: la primera columna representa el número de caída del martillo, la segunda la desviación estándar (desvest) del número de caídas, la tercera la humedad de la muestra y la cuarta la desviación estándar de la humedad.

humedad del terreno y por lo tanto las mayores diferencias se presentan en suelos con elevados porcentajes de humedad.

La Figura 6 presenta la densidad aparente natural o húmeda versus la relación de solidez y la humedad en función comparativa de los métodos de medición. Se observa que los máximos valores de la densidad natural en función de los mayores valores de la solidez del suelo, se obtuvieron en orden ascendente para los métodos Densímetro (1), Uhland libre (2) y Uhland forzado (3). El diámetro de las esferas es función de la humedad, lo cual revela que la densidad natural obtuvo sus valores proporcionalmente al porcentaje del contenido de agua del suelo. Se nota mayor solidez del suelo, en orden ascendente, cuando se usó el Uhland en caída libre y caída forzada, producto del efecto Proctor al producir mayores niveles de compactación con el aumento de la humedad. Soika *et al.*, (2001) reportaron que la densidad aparente seca puede variar abruptamente a distancias cortas de pocos centímetros como resultado, por ejemplo del tráfico, labranza o riego; y que, el contenido de humedad *in situ* es menos probable de variar que la densidad aparente en cortas distancias laterales; al respecto, los resultados encontrados en este trabajo reflejaron resultados similares encontrados por Campbell *et al.*, (1988) y Busscher *et al.*, (1997) en suelos Ultisoles.

Gómez y Arcos (2006) manifestaron que los rangos obtenidos en la densidad seca son similares a los de la densidad húmeda, lo que permite concluir que puntos con rangos elevados de densidad húmeda tienen también rangos elevados de contenido de humedad y, por lo tanto, el rango o diferencia de la

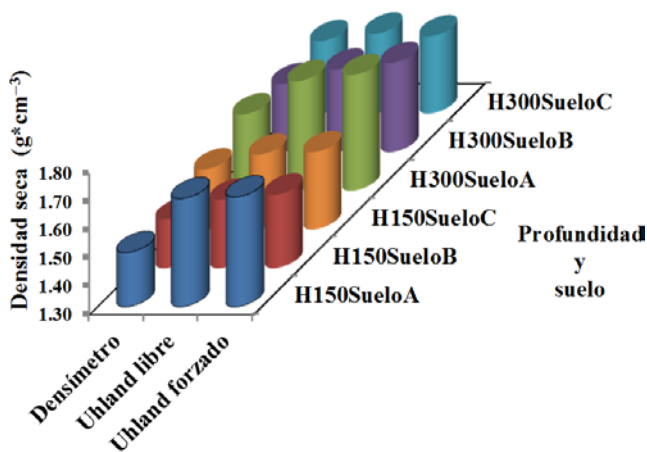


Figura 5. Densidad aparente seca obtenidas por los tres métodos en las dos profundidades de los tres suelos estudiados del estado Monagas.

densidad seca sigue siendo alto. De acuerdo a Raper y Erbach (1985) la compactación de la muestra de suelo en el cilindro muestreador aparenta ser la mayor fuente de error durante el muestreo bajo condiciones favorable; por ejemplo, Hakansson (1990) reportó que la densidad seca fue mayor en las muestras obtenidas con el cilindro muestreador que con el método del marco de metal.

Trobert *et al.*, (1997) informaron que una reducción significativa de aproximadamente 0,06 g*cm⁻³ resultó en el centro de la sección del cilindro de suelo de la muestra producto de la fricción en las paredes del cilindro cuando la muestra se mueve por la presión aplicada, y que la densidad aparente seca resultante, para una presión dada, dependió de la serie de suelo, la humedad y diámetro del cilindro. Camponez do Brasil, (2000) usando cinco diferentes técnicas de muestreo de suelo mostraron que estas técnicas perturban la estructura de la muestra de suelo, y sus resultados demostraron una probable compactación del suelo debido al proceso de muestreo. Pires *et al.*, (2004) reportaron que el muestreador cilíndrico de suelo indujo una compactación del suelo junto a la pared del cilindro y en la región inferior de la muestra de suelo que indicó un aumento de la densidad aparente del suelo desde el centro hasta el borde y la parte inferior. Una causa probable de esta compactación fue el pequeño diámetro de los cilindros de muestreo.

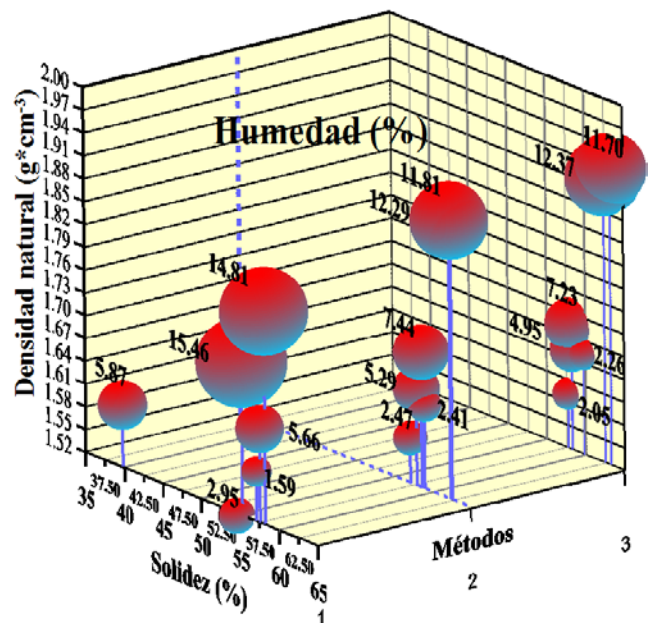


Figura 6. Densidad aparente natural versus la relación de solidez, los métodos de medición (Densímetro (1), Uhland libre (2) y Uhland forzado (3)) y la humedad del suelo en tres tipos de suelos del estado Monagas.

El Cuadro 2 presenta los resultados del análisis de varianza (ANDEVA) para la densidad natural o *in situ*, la densidad seca y la relación de solidez. Como los $F_{\text{calculado}}$ fueron mayores que los $F_{\text{críticos}}$, se rechazó la hipótesis nula concluyendo que los resultados obtenidos de la densidad húmeda son diferentes. Para la densidad seca y la relación de solidez se rechazó la hipótesis nula excluyendo los efectos de la humedad en donde $F_{\text{calculado}}$ fueron menores que los $F_{\text{críticos}}$. La media para ρ_S fue de 1,5902 g/cm³, para ρ_H de 1,7423 g/cm³ y para i_S de 58,016 %. El valor de ρ_H fue mayor que ρ_S , como era de esperarse ($\rho_H = \rho_S + w * \rho_S$). La densidad seca (ρ_S), densidad natural (ρ_H) y la relación de solidez (i_S) fueron altamente significativas con respecto a la profundidad, métodos, suelos, humedad y el efecto combinado suelo*profundidad*método (S*H*M). Sheesley (1976) encontró que los experimentos de campo demostraron que el tráfico, sobre suelos de textura arenosa o mediana, la densidad seca incrementó al profundizar.

El Cuadro 3 muestra el empleo del método de mínima diferencia significativa (MDS) que exhibe promedios para la densidad aparente natural (ρ_h), la densidad aparente seca (ρ_S) y la relación de solidez (i_S) para dos profundidades, tres métodos y de tres suelos (S) de sabana. Los valores mayores se encontraron en las profundidades de 150 a 300 mm. El método que produjo el menor valor fue el densímetro con diferencia significativa con respecto a los Uhland libre y forzado en los cuales no hubo diferencia significativa. Esto pudo haber sido posible al efecto de los Uhland y al proceso de pesado y contracción de las muestras en la estufa. El suelo A produjo los mayores valores con diferencia significativa en cuanto al suelo B y C para la densidad seca y natural los cuales fueron estadísticamente similares. Para la relación de solidez el suelo A produjo el mayor valor sin diferencia significativa en relación al suelo B, y el suelo C produjo el menor valor con diferencia significativa con respecto al suelo A y B. La diferencia entre los valores de la

Cuadro 2. Análisis de varianza (ANDEVA) para la densidad seca (ρ_S), densidad natural (ρ_H), y relación de solidez (i_S) ajustado por la profundidad (H), tres métodos (M), tres tipos de suelo (S), humedad y el efecto combinado S*H*M de los suelos de sabana del estado Monagas.

Densidad Seca (ρ_S)					
Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	P
Profundidad (H)	1	0.10807	0.10807	29.52	0.0000
Métodos (M)	2	0.22507	0.11254	30.74	0.0000
Suelo (S)	2	0.15740	0.07870	17.37	0.0000
Humedad (w)	16	0.17054	0.01066	2.91	0.0002
S * H * M	12	0.13049	0.01087	2.97	0.0007
Error experimentatl	236	0.86403	0.00366		
Media	1.5902				
Coeficiente de variación	3.81				
Densidad Natural o Húmeda (ρ_H)					
Profundidad (H)	1	0.13204	0.13204	29.13	0.0000
Métodos (M)	2	0.25081	0.12541	27.67	0.0000
Suelo (S)	2	0.15740	0.07870	17.37	0.0000
Humedad (w)	16	0.54836	0.03427	7.56	0.0000
S * H * M	12	0.18254	0.01521	3.36	0.0002
Error experimentatal	236	1.06956	0.00453		
Media	1.7423				
Coeficiente de variación	3.86				
Relación de Solidez (i_S)					
Profundidad (H)	1	634.73	634.728	127.22	0.0000
Métodos (M)	2	1105.08	552.539	110.75	0.0000
Suelo (S)	2	716.46	358.231	71.80	0.0000
Humedad (w)	16	234.53	14.658	2.94	0.0002
S * H * M	12	2219.95	184.996	37.08	0.0000
Error experimental	236	1177.43	4.989		
Media	58.016				
Coeficiente de variación	3.85				

densidad aparente seca encontrados entre los tres métodos fueron: 5,49 %, 6,22 % y 0,70 % para el densímetro-Uhland libre, densímetro-Uhland forzado y Uhland libre-Uhland forzado respectivamente; resultados incrementados se lograron para la densidad aparente natural. Lichter y Costello (1994) mencionaron que a pesar de la diferencia entre los dos métodos utilizados por ellos para evaluar la densidad aparente producida fue relativamente pequeña (3 a 9 %), pero las implicaciones de esta diferencia en términos de la administración de suelos y el desarrollo de las plantas, podría ser substancial. Folegatti *et al.*, (2001) muestreando en dos suelos, uno arcilloso y uno arenoso, encontraron que el muestreo con la toma muestra tipo Uhland mostró una reducción de volumen de 19,24 cm³ (0,5 cm en la altura del cilindro) después del secamiento lo cual disminuyó los valores de la densidad seca (1,57 g/cm³). Las medias de la densidad aparente seca obtenidas con el densímetro (M1) fueron menores para todos los suelos y las profundidades analizadas, con diferencias significativas (DS) con respecto a los métodos M2 y M3 con el uso de la toma muestras tipo Uhland.

En el análisis presentado en el Cuadro 4, utilizando el coeficiente de variación (CV), del efecto combinado S*H*M sobre las densidades aparentes y la relación de solidez. El CV proporciona una visión general acerca de la eficacia de un método; CV de 5% o menor en general, nos dan una sensación de buen método de rendimiento, mientras que el CV de 10% y mayor es la mala sensación (Westgard, 2012). Parece

ser que hay una transición en el suelo B entre el suelo A y el suelo C. Se observa para el suelo A, con respecto a la densidad aparente seca, que el densímetro produjo el menor valor de 1,4898 g·cm⁻³ en a la profundidad de 150 mm con un CV de 4,94 con diferencia significativa con respecto a los Uhland con caída libre y caída forzada; y a la profundidad de 300 mm, el menor valor de 1,5578 g·cm⁻³ con un CV semejante al Uhland forzado; en total, se nota la misma tendencia para las otras variables. Para el suelo B no hubo diferencia significativa para los tres métodos a las dos profundidades; ambas modalidades del Uhland generaron mayores valores en todos los parámetros que el densímetro. Para el suelo C, de 0-150 mm, el densímetro produjo con diferencia significativa, los menores valores para todos los parámetros y el CV; de 150-300 mm, el densímetro produjo, para todas las variables, valores menores, pero solo con diferencia significativa para el CV. Resumiendo, el densímetro (M1) produjo siempre las menores estimaciones para todas las variables, como que si no hubo influencia relativa de la humedad y la textura. Al respecto, Hossne (2008) reportó que la densidad aparente seca varía inversamente de acuerdo al contenido de humedad en los suelos franco arenosos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para la densidad aparente seca, la densidad aparente húmeda y la relación de solidez fueron menores con el uso del densímetro nuclear; encontrándose diferencia

Cuadro 3. Promedios para la densidad húmeda o natural (ρ_H), la densidad seca (ρ_S) y la relación de solidez (i_S) para dos profundidades (H), tres métodos (M), efecto combinado S*H*M y tres suelos (S) de sabana del estado Monagas.

Variables Independientes	Variables Dependientes					
	Densidad húmeda †		Densidad seca †		Relación de solidez †	
	Media	Grupo	Media	Grupo	Media	Grupo
Profundidad						
0-150	1,7174	B	1,5650	B	56,171	B
150-300	1,7673	A	1,6029	A	59,346	A
Método						
Densímetro (M1)	1,6857	B	1,5245	B	53,651	B
Uhland libre (M2)	1,7641	A	1,6081	A	59,589	A
Uhland forzado (M3)	1,7773	A	1,6193	A	60,035	A
Suelo						
Jusepín (A)	1,7736	A	1,6448	A	59,948	A
El Barril (B)	1,7654	A	1,5480	A	58,131	A
San Jacinto (C)	1,6880	B	1,5589	B	35,196	B

† Mínima diferencia significativa (MDS). Comparaciones apareadas ($p \leq 0,05$). Letras diferentes indican promedios estadísticamente diferentes ($p \leq 0,05$). Comparaciones por variables.

significativa con respecto al empleo de las modalidades de la toma muestra cilíndrica tipo Uhland. No hubo diferencia significativa para los resultados obtenidos por el Uhland con caída libre del martillo y el Uhland con caída forzada del martillo, con valores mayores para el Uhland forzado, posiblemente debido a los cambios de textura y a las variaciones del contenidos de humedad, que disminuyó en el orden de los suelos: A, C y B. Esto vislumbra que hubo disturbación de las muestras de suelo por los saca muestras tipo Uhland. El suelo de Jusepín presentó los parámetros evaluados con los valores mayores, siguiéndole el suelo de El Barril, sin diferencia significativa, y luego el de San Jacinto con diferencia significativa con respecto a los dos anteriores. Esto muestra que los suelos de Jusepín son más propensos a la compactación.

Los tres suelos bajo estudio presentaron diferencias estadísticas significativas para la densidad aparente seca, la densidad aparente húmeda y la relación de solidez con respecto a la profundidad del suelo; obteniéndose valores mayores a la profundidad de 150-300 mm. Los promedios de densidad seca

obtenidos con el densímetro nuclear proporcionaron valores mayores a la profundidad de 150–300 mm. El suelo de San Jacinto fue el único que presentó diferencias estadísticas de la humedad con respecto a la profundidad con un promedio más alto de humedad a la profundidad de 150-300 mm.

La metodología con el uso de los coeficientes de variación reportaron mucha variabilidad de un método con respecto al otro y la influencia de los diferentes suelos, posiblemente fue producto de los diferentes contenidos de humedad y textura; sin embargo, los valores menores de la densidad aparente seca, la densidad aparente húmeda y la relación de solidez, se obtuvieron con el densímetro nuclear, siguiéndole el Uhland con caída libre y el Uhland con caída forzada. Para el suelo de Jusepín a la profundidad de 150 mm se obtuvo la menor variación con el densímetro, para todos los parámetros.

El saca muestras tipo Uhland resultó ser el instrumento más sencillo y económico para ser empleado agrícolamente.

Cuadro 4. Promedios para la densidad húmeda o natural (ρ_H), la densidad seca (ρ_S), la relación de solidez (i_s) y coeficientes de variación (CV) para la densidad seca (ρ_S) para dos profundidades (H), tres métodos (M) y tres suelos (S) en su efecto combinado S*H*M de la sabana del estado Monagas.

Efecto combinado	ρ_H	Ámbito	ρ_S	Ámbito	CV	Ámbito	i_s	Ámbito
SAH150M1	1,6269	H †	1,4898	H †	4,942	B ‡	55,111	H †
SAH150M2	1,8211	A	1,6574	AB	2,757	A	61,380	AB
SAH150M3	1,8252	A	1,6612	AB	2,358	A	61,521	AB
SAH300M1	1,7040	DEF	1,5578	EFG	2,978	B	57,679	EFG
SAH300M2	1,8216	A	1,6592	AB	2,523	A	61,413	AB
SAH300M3	1,8429	A	1,6811	A	3,361	B	62,236	A
SBH150M1	1,6608	FGH	1,5155	GH	5,047	B	56,175	GH
SBH150M2	1,7318	CD	1,5823	DE	3,853	B	58,659	DE
SBH150M3	1,7572	BC	1,6090	CD	6,576	B	59,652	CD
SBH300M1	1,8015	AB	1,6302	BC	5,274	B	60,446	BC
SBH300M2	1,8068	A	1,6560	AB	4,640	B	61,407	AB
SBH300M3	1,8343	A	1,6821	A	4,041	B	62,362	A
SCH150M1	1,6388	GH	1,4910	H	2,754	A	39,036	I
SCH150M2	1,6919	DEF	1,5467	EFG	4,434	B	57,351	EFG
SCH150M3	1,7029	DEF	1,5555	EFG	4,704	B	57,687	EFG
SCH300M1	1,6821	EFG	1,5353	FG	1,641	A	56,794	FG
SCH300M2	1,7111	CDE	1,5603	EF	4,621	B	57,808	EF
SCH300M3	1,7012	DEF	1,5526	EFG	3,431	B	57,564	EFG

‡ Prueba de Tukey para comparación de coeficientes de variación entre métodos en un mismo suelo y a una misma profundidad. Letras diferentes indican promedios estadísticamente diferentes ($p \leq 0,05$).

AGRADECIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente, Venezuela por su soporte y financiamiento para esta investigación. Al Ministerio del Ambiente por su apoyo instrumental y personal.

LITERATURA CITADA

- Barrios, R. y A. Florentino. 2001. Evaluación del patrón de humedecimiento de dos suelos subirrigados cultivados con palma aceitera. *Agronomía Tropical* 51 (3): 371-386.
- Blake, G. R. and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. *In: Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America.* p. 363-375.
- Bravo, C. y E. Andreu. 1995. Propiedades físicas y producción de maíz (*Zea mays* L.) en un alfisol del estado Guárico, Venezuela, bajo dos sistemas de labranza. *Venesuelos* 3 (2): 62-68.
- Busscher, W. J.; P. J. Bauer, C. R. Camp and R. E. Sojka. 1997. Correction of cone index for soil water content differences in a Coastal Plain soil. *Soil Tillage Res.* 43 (3-4): 205-217.
- Campbell, R. B.; W. J. Busscher, O. W. Beale and R. E. Sojka. 1988. Soil profile modification and cotton production. *Proceedings, Beltwide Cotton Production Research Conference. Jan. 3-8, 1988. New Orleans, Louisiana, United States of America.*
- Camponez do Brasil, R. P. 2000. Influência das técnicas de coleta de amostras na determinação das propriedades físicas do solo. MSc. Thesis, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP). Piracicaba, São Paulo, Brasil. 102 p.
- Constantini A. 1993. Soil sampling bulk density in the Coastal Lowlands of South-East Queensland. *Australian Journal of Soil Research* 33: 11-18.
- Craul, P. J. 1992. *Urban soil in landscape design.* John Wiley and Sons, Inc. New York, United States of America. 396 p.
- Fernandes, B.: H. M. Galloway, R. D. Bronson e J. V. Mannering. 1983. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf). *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 7: 329-333.
- Folegatti, M. V.; R. P. Camponez and F. F. Blanco. 2001. Sampling equipment for soil bulk density determination tested in a Kandiudalfic Eutrudox and a Typic Hapludox. *Scientia Agricola* 58 (4): 833-838.
- Gómez, L. M. S. y S. V. Arcos. 2006. Correlación entre densímetro nuclear y cono de arena para suelos finos de baja plasticidad y no cohesivos. *Revista de la Construcción* 5 (2): 23-32.
- Hakansson, I. 1990. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Tillage Res.* 16: 105-120.
- Hartge, V. K. H. und G. Sommer. 1979. Bodenverdichtungen und ihre Beurteilung. *Z. Kulturtech. Flurbereinigung* 20: 257-268.
- Hossne García, A. J.; N. J. Mayorca, L. D. Salazar, F. A. Subero y A. M. Zasillo. 2009. Humedad compactante y sus implicaciones agrícolas en dos suelos franco arenoso de sabana del estado Monagas, Venezuela. *Revista UDO Agrícola* 9 (4): 937-950.
- Hossne, A. J. 2008. La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. *Terra Latinoamericana* 26 (3): 195-202.
- Hossne, G., A. J. 2001a. El muestreador Uhland en la determinación de la humedad de compactación de un suelo Ultisol de sabana del Estado Monagas. XVI Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Efectuado del 24 al 27 de septiembre del 2001. En CD con posición FS-06.
- Hossne, G., A. J. 2001b. Indexación física de los suelos agrícolas. Versión 5. Biblioteca del Núcleo de Monagas de la Universidad de Oriente. Departamento de Ingeniería Agrícola, Escuela de Ingeniería Agronómica, Núcleo de Monagas, Universidad de Oriente, Maturín, Estado Monagas, Venezuela. 155 p.

- Lichter, J. M. and L. R. Costello. 1994. An evaluation of volume excavation and core sampling techniques for measuring soil bulk density. *Journal of Arboriculture* 20 (3): 160-164.
- Matus, F.; A. Osorio y A. Acevedo. 2002. Efecto del manejo y algunas propiedades del suelo sobre la densidad aparente. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 2 (1): 7-15.
- McKeague, J. A. (Ed.). 1978. *Manual on soil sampling and methods of analysis*. 2nd Edition. Canadian Society of Soil Science. Ottawa, Canada.
- Misle A., E. y A. Norero Sch. 2002. Comportamiento térmico del suelo bajo cubiertas plásticas. III simulación. *Agricultura Técnica* 62 (3): 427-438.
- Nesmith, D. S.; W. L. Hargrove, E. W. Tollner and D. E. Radcliffe. 1986. A comparison of three soil surface moisture and bulk density sampling techniques. *Transactions of the ASAE*, 29: 1297-1299.
- Parfitt, R. L., C. Ross, L. A. Schipper, J. J. Claydon, W. T. Baisden and G. Arnold. 2010. Correcting bulk density measurements made with driving hammer equipment. *Geoderma* 157: 46-50.
- Perfect, E.; M. C. Sukop and G. R. Haszler. 2002. Prediction of dispersivity for undisturbed soil columns from water retention parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 696-701.
- Pinzón, A. y E. Amézquita. 1991. Compactación de suelos por el pisoteo de animales en pastoreo en el piedemonte amazónico de Colombia. *Pasturas Tropicales* 13 (2): 21-26.
- Pires, L. F.; C. J. A. Robson, V. Correchel, O. O. S. Bacchi, K. Reichardt and R. P. Camponez do Brasil. 2004. The use of gamma ray computed tomography to investigate soil compaction due to core sampling devices. *Brazilian Journal of Physics* 34 (3A): 728-731.
- Raper, R. L. and D. C. Erbach. 1985. Accurate bulk density measurement using a core sampler. *ASAE, Paper No 85-1542*.
- Sekwakwa O. and O. Dikinya. 2012. Tillage-induced compaction: Effects on physical properties of agricultural loamy soils. *Scientific Research and Essays* 7 (15): 1584-1591.
- Sheesley, R. 1976. Timing of first alfalfa harvest to avoid impedance of root growth. *Farm Advisor, Cooperative Extension. University of California, Fresno*. Disponible en: ucanr.org/alfsymp/1976/76-54.pdf. Última visita enero 2012.
- Silva, A. P.; P. L. Libardi e S. R. Vieira. 1989. Variabilidade espacial da resistência à penetração de um latossolo vermelho-escuro ao longo de uma transeção. *Revista Brasileira de Ciência de Solo* 13: 1-5.
- Soane, B. D.; P. S. Blackwell, J. W. Dickson and D. J. Painter. 1981. Compaction by agricultural vehicles: A review. 1. Soil and wheel characteristics. *Soil Tillage Res.* 1: 207-238.
- Soika, R. E.; W. J. Busscher and G. A. Lehrs. 2001. *In situ* strength, bulk density, and water content relationships of a Durinodic Xeric Haplocalcid soil. *Soil Science* 166 (8): 520-529.
- Suárez, M. H.; C. I. Coronel, D. L. Coba, O. G. Cueto y E. L. Bravo. 2011. Desarrollo de un sensor para la medición continua de la compactación del suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 20 (1): 6-11.
- Swinford, M. and J. H. Meyer. 1985. Evaluation of a nuclear density gauge, for measuring infield compaction in soils of the South African Sugar Industry. *Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association*. p. 218-224.
- Taylor, D. and M. Kansara. 1967. A Theory of the nuclear densimeter. *Soil Science* 104 (1): 25-34.
- Treasure S. 2006. Measuring of stockpile density by nuclear densitometer. Disponible en: http://fr.aamhatch.com/resources/pdf/publications/documents/AIMS2006Density_1.pdf. 6 p. Última visita enero 2012.
- Torbert, H. A.; S. A. Prior and C. B. Elkins. 1997. Hydraulic compaction device for making soil cores. *Soil Science Society Journal* 56 (6): 1942-1944.
- Uhland, R. E. 1949. Physical properties of soils as modified by crops and management. *Soil Sci. Soc. Proc.* p. 361-366.
- Vanremortel, R. D. and D. A. Shields. 1993. Comparison of clod and core methods for

- determination of soil bulk density. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 24: 2517-2528.
- Veras de Lima, H.; C. L. Rodrigues de Lima, T. Paiva Leão, M. Cooper, A. Pires da Silva e R. Espíndola Romero. 2005. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. *R. Bras. Ci. Solo* 29: 677-684.
- Vomocil, J. A. 1957. Measurement of bulk density and penetrability: a review of methods. *Advances in Agronomy* 9: 159-173.
- Wagner, M.; C. Rincones, G. Medina G. y M. Mujica. 1995. Efecto del arado cincel y el riego sobre el desarrollo de la caña de azúcar en un suelo compactado. *Agronomía Trop.* 45 (1): 5-26.
- Westgard, J. F. 2012. Mean, standard deviation, and coefficient of variation. *Westgard Workshop*. Disponible en: <http://www.westgard.com/lesson34.htm>. Última visita Junio 2012.
- Yoder, R. E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agronomy*. 28 (5): 337-351.
- Zwarich, A. A. and C. F. Shaykewich. 1969. An evaluation of several methods of measuring bulk density of soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 49: 241-245.