

Interacción de la frecuencia de riego, relación de solidez y tensión cortante en la profundidad de enraizamiento de la soya (*Glycine max* (L.) Merrill)

Irrigation frequency, solidity ratio and shear stress interaction on soybean rooting depth

Américo José HOSSNE GARCÍA ✉, **Jesús Rafael MÉNDEZ NATERA**, **María Esther Del Valle TRUJILLO GALINDO** y **Francisco Javier PARRA DÍAZ**

Escuela de Ingeniería Agronómica, Núcleo de Agronomía, Universidad de Oriente. Avenida Universidad Campus Los Guaritos, Maturín, 6201, estado Monagas, Venezuela. E-mail: americohossnegarcia@gmail.com y americohossne@cantv.net ✉ Autor para correspondencia

Recibido: 08/02/2012 Fin de primer arbitraje: 02/05/2012 Primera revisión recibida: 16/07/2012
Fin de segundo arbitraje: 13/08/2012 Segunda revisión recibida: 13/08/2012 Aceptado: 13/08/2012

RESUMEN

Se realizó un estudio del sistema radical de soya (*Glycine max* (L.) Merrill cv. SAN BAIBA) para evaluar el alcance en penetración vertical de las raíces en función de la humedad, relación de solidez, tensión normal y tensión cortante. La soya es de importancia agrícola de la zona, en donde el suelo es franco arenoso incompresible y de fácil deformación. Los suelos son compactados producto del tránsito de maquinaria, pisoteo, pies de arado y rastras, y procesos de contracción y expansión. Al aumentar el peso por eje de los equipos agrícolas se profundiza la compactación. Por similitud, la prueba Proctor se realiza en tres capas de suelo causando mayor compactación en la capa inferior. El objetivo fue estudiar en soya: (a) El efecto de la humedad, la solidez y efecto combinado período de riego*solidez del suelo sobre la profundización de suelo enraizado y (b) Las relaciones de la tensión normal y cortante sobre la profundidad de enraizado. Se utilizaron el método Proctor, triaxial, medidores de humedad y cilindros plásticos 30X30X1,5 cm. Se empleó bloques al azar en arreglo factorial simple con cuatro niveles de compactación por capa, (0, 12, 24, 36) y cuatro de humedad a través de cuatro frecuencias de riego (todos los días, interdiario, cada dos días y cada tres días), análisis de variancia, MDS, regresión múltiple y superficie de respuesta. Entre los resultados, la profundidad de enraizado logró el 98,51 % para riego diario, 94,11 % para riego interdiario, de 90,09 % para una relación de solidez media de 52,5 sin diferencia significativa. Se concluyó que la profundidad de enraizamiento de soya fue más positivamente influenciado por la humedad que por los efectos de la compactación y que la tensión cortante no inhibiría el crecimiento radical para humedades cercanas a la capacidad de campo.

Palabras clave: Suelos de sabana, cizalleo, frecuencias de riego, solidez, humedad del suelo, raíces.

ABSTRACT

A study of the root system of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill cv. SAN Baiba) was performed to assess the extent to vertical root penetration in terms of moisture, solidity ratio, normal and shear stress. Soybean is of agricultural importance of the area, where the soil is sandy loam, easily compressible and deformable. The soils are compacted product of the machinery passes, trampling, plows and harrows pans, and processes of contraction and expansion. By increasing the axle load of farm equipment deepens compaction. By similarity, the Proctor test runs in three layers carrying higher compaction in the lower layer. The aim was to study in soybeans: (a) The effect of moisture, soil solidity ratio and the combined effect of irrigation period * soil solidity on root soil depth (b) The relationship of normal and shear stress on the depth of rooted. It was used the Proctor method, triaxial, moisture meters and plastic cylinders 30x30x1.5 cm. Randomized block was used in simple factorial arrangement with four levels of compaction layer (0, 12, 24, 36) and four moisture through four irrigation frequencies (daily, inter-day, every two days and three days), analysis of variance, MDS, multiple regression and response surface. The results, depth of rooting achieved 98.51% for daily watering, irrigation inter-day 94.11% from 90.09% for a mean solidity ratio of 52.5 without significant difference. It was concluded that soybean rooting depth was more positively influenced by moisture than the effects of compaction, and that shear stress did not inhibit root growth to moisture near field capacity.

Key words: savannah soil, shear tension, irrigation frequency, soil solidity, roots.

INTRODUCCIÓN

Son muchos los estudios realizados sobre la influencia de la compactación y la resistencia del suelo sobre el desarrollo radicular y rendimientos de variados cultivos agrícolas, investigados en función del uso de maquinarias agrícolas, resistencia del suelo, pies de arado, capas compactadas, textura del suelo, etcétera (Iijima *et al.*, 1991; Grzesiak *et al.*, 2002; Tu y Tan 1991; Tokunaga, 2006. Sin embargo, no se menciona como se controló el factor humedad del suelo en el estudio, si se consideró que es el parámetro que más influye sobre las propiedades y características de todos los suelos. Al respecto, Tokunaga, (2006) en su estudio concluyó que la producción de biomasa fue mayor cuando el agua estuvo fácilmente disponible. Los efectos negativos de suelos altamente compactados fueron a menudo menos severos cuando el agua estuvo utilizable. Esto indica la importancia del agua en la producción de biomasa tanto como en la habilidad de las plantas para tolerar suelos compactados.

En labores de campo, en donde la disponibilidad de agua podría ser muy variable, cuando la compactación afecta la disponibilidad de agua puede ser más importante que los impedimentos físicos. En algunos casos, se emplea el penetrómetro para evaluar la resistencia del suelo sin señalar bajo que contenido de humedad del mismo se realizaron las mediciones. Se utiliza la densidad aparente seca para caracterizar la resistencia del suelo sin mencionar la humedad del suelo, tensión cortante, tensión normal, porosidad, porosidad aerífera, compactación relativa, relación de solidez, volumen específico, etcétera. El estado friable del suelo es requerido para cualquier labor y el desarrollo total de la planta. La biomasa radicular, como la profundidad hasta la que pueden llegar las raíces en su exploración del suelo, son de vital importancia en la dinámica de los ecosistemas, así como en el ciclo hidrológico, del carbono y el de los nutrientes (Ibáñez, 2006).

La mayor parte de los problemas en ingeniería están relacionados con dimensiones físicas y en la mayoría de los casos se presume un medio continuo donde las variaciones de las propiedades físicas que constituyen el medio son tan suaves, que se puede utilizar el cálculo diferencial para el análisis. La mecánica del medio continuo provee de las herramientas básicas de análisis de medios que pueden ser tratados como continuos, como es el caso de sólidos, fluidos y suelos basados en la

interpretación matemática de las leyes de la física que los describen. Al respecto Schofield y Wroth (2011) manifestaron que variables como relación de solidez, la presión, deformación y la tensión cortante son esenciales para un adecuado estudio de mecánica de medios continuos; y que suelos compactados, acero laminado y el polímero de nailon, deben tener estado esencialmente iguales en mecánica de medios continuos. Es concebido que la compactación del suelo, medida generalmente con la evaluación de la densidad aparente seca, produzca inhibición del crecimiento radicular de las plantas como la soya que es de importancia agrícola para la zona.

El efecto restrictivo de la compactación del suelo puede causar limitaciones físicas y fisiológicas para el crecimiento global de la planta y el rendimiento a través de un pobre desarrollo del sistema radical (Iijima and Kono 1991, Iijima *et al.* 1991, Grzesiak *et al.* 2002). Iijima and Kono 1991; Yamauchi 1993, Grzesiak *et al.* 1999, 2002; Masle 2002; Fageria *et al.*, 2006 manifestaron que la inhibición del crecimiento de las plantas fue principalmente atribuida a la reducción del volumen de enraizamiento. Se ha considerado que la compactación aumenta la resistencia del suelo. Según Ponder (2004) el mecanismo como el suelo compactado favorece mejor el crecimiento, no está entendido totalmente; porque probablemente, gran parte del crecimiento de las plantas es debido a mejores cambios físicos del suelo que produjeron las mejores condiciones de humedad. Taylor y Burnett (1964) y Taylor (1974) informaron sobre la resistencia excesiva del pie de arado cuando se seca. La sequedad es la principal restricción que impide el crecimiento de raíces, ya que la resistencia del suelo disminuye con la lluvia o riego.

El valor crítico de la resistencia del suelo con el cual las raíces no crecen, se ve afectado por la humedad del suelo en cualquier etapa de desarrollo de la planta. Rahman *et al.*, (2005) condujeron un experimento de invernadero, con suelo andisol franco arenoso, para valorar el efecto de diferentes niveles de compactación sobre la soya, encontraron que el peso seco radical, la proporción de brotes radicales y el peso seco de brotes se redujeron significativamente con el aumento de los niveles de compactación. Hossne (2004) reveló que la acción de crecimiento de las raíces aumenta su tensión axial al amplificarse la resistencia del suelo con un valor crítico de 2.343,2 kPa para un 20,78 % de desarrollo radical; estos suelos ejercieron una resistencia menores a los 500

kPa en el rango de la capacidad de campo. Los objetivos de este trabajo fueron determinar (a) El efecto del contenido de humedad y el nivel de compactación de un suelo franco arenoso de sabana sobre la profundidad de enraizamiento de la soya y (b) La relación de la solidez, tensión cortante y tensión normal con el crecimiento radical.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó, en invernadero, con muestras de suelo recogidas en un pedón franco arenoso de sabana en Jusepín, estado Monagas, Venezuela (Figura 1), situado a 147 m.s.n.m. 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*, Gramineous, Ciperaceas, etc.



Figura 1. Área de muestreo en los puntos Norte: 1078422,0; 1078979,0; 1079445,0; 1079698,0; 1079821,0; 1079772,0 Este: 451257,0; 451018,0; 451394,0; 451555; 451486,0; 451276,0 respectivamente.

El área de trabajo seleccionada del suelo objeto de estudio, pertenece a las condiciones de un Ultisol de sabana del grupo de los Oxic Paleustults familia de temperatura Isohipertérmic. Estos suelos son utilizados en la explotación de muchos rubros, con labores de encalado y fertilización, como maíz, sorgo y pastizales. Los Cuadros 1 y 2 muestran las características físicas y químicas del suelo, respectivamente, acopiado en el horizonte de 0-600 mm.

Para el estudio se utilizó el cultivo de Soya (*Glycine max* L. Merrill cv. San Baiba). Se empleó el método Proctor para producir los diferentes niveles de solidez del suelo. La relación de solidez (i_s), definida por Hossne (2001) en función del volumen de los sólidos (V_s) y el volumen total (V_T) de la muestra de suelo, Ecuación 1, se determinó en función de la densidad aparente seca (ρ_s), la densidad de las partículas (ρ_p) o gravedad específica (G), la humedad del suelo (w), la porosidad (n) y la relación de vacío (e). Hossne (2004a) reportó que la relación de solidez mostró ser el parámetro más acertado para evaluar el índice de compactación de un suelo. Muchos

Cuadro 1. Características físicas y contenido de materia orgánica del suelo de sabana de Jusepín, estado Monagas, Venezuela..

Componentes	mm	%
Arena muy gruesa	1	1,9055
Arena gruesa	0,5	11,99
Arena media	0,098	24,092
Arena fina	0,053	24,284
Arena muy fina	0,041	9,303
Arena total		71,539
Limo		15,785
Arcilla (caolinita)		12,676
Materia orgánica		1,041
Clase textural		FA

Cuadro 2. Características químico del suelo de sabana franco arenoso de Jusepín, estado Monagas, Venezuela.

Profundidad ad cm	pH en H ₂ O	pH en pastaK CL	Materia Orgánica		P Soluble en Ácido Cítrico		Cationes cambiabiles (cmol _c .kg ⁻¹ de suelo)					C.I.C. (cmol _c .kg ⁻¹ de suelo)	Saturación de bases (%)	Saturación de acidez (%)
			C ₄ Orgánico (%)	N ₂ (%)	Ca (ppm)	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

investigadores argumentan que el volumen específico (v) y compactación relativa, pueden ser mejores índices de compactación del suelo que la densidad aparente seca y la porosidad (Soane *et al.*, 1981).

La relación de vacíos también se ha propuesto como un índice de compactación del suelo (Hartge y Sommer, 1979), y se relaciona con la relación de solidez. Bevilacqua, (2012) demostró en su artículo, que el incremento del volumen específico es una medida más apropiada y dependiente de la medida del crecimiento en árboles, basada en consideraciones teóricas y evidencias empíricas con otros índices. Según Atkinson (2007) la montmorillonita con superficie específica grande puede existir con una relación de solidez por encima de 10 %, la caolinita de 33 %, arena densa de 66 % y arena suelta de 55 %, con una gravedad específica para las arenas de 2,65. Se emplearon medidores de humedad que consistieron en resistencias eléctricas marca Delmhost Modelo KS-D1, utilizando un probador mediante el cual se determina la resistencia provocada por la abundancia de agua en el suelo que se infiltra en bloques de yeso, estos bloques de yeso fueron saturados de agua por unos 2 a 3 min y se colocaron en la segunda capa de compactación Proctor (profundidad de 15 cm aproximadamente).

Se estudiaron las interacciones de cuatro niveles de compactación (golpes Proctor) por capa, (0, 12, 24, 36) y cuatro de humedad a través de la variación de las frecuencias de riego (H): (todos los días (H1), interdiario, un día si y un día no (H2), cada dos días (H3) y cada tres días (H4)). La densidad aparente seca se evaluó midiendo las variaciones de volumen en los cilindros de suelo producto de la compactación producida por los golpes Proctor. Se emplearon sesenta y cuatro cilindros de polímeros de 30 cm de diámetro, 30 cm de altura y 1,5 cm de grosor, cortados en dos mitades longitudinalmente por el centro y amarrados como lo muestra la Figura 2. Después de la cosecha, cada cilindro fue separado por corte vertical cuidadoso; se midió la altura sin desarrollo radical en la parte inferior que al restársela a la altura del cilindro de suelo se obtuvo la profundidad de enraizamiento (PSE). Para la determinación de la resistencia del suelo $\tau = C + \sigma \cdot \tan(\phi)$, en donde τ representa la tensión cortante o cizalleo, C la cohesión, σ la tensión normal y ϕ el ángulo de fricción interno, se utilizó el aparato triaxial.

$$i_s = \frac{V_s}{V_T} = \frac{\rho_s}{\rho_p} = \frac{1}{v} = \frac{1}{1+e} = \frac{1}{1+G \cdot w} = \frac{n}{e} \quad (1)$$

La cosecha se realizó entre los setenta y dos y setenta y cinco días. Se utilizó 24,57 kg (8,19 kg/capa) de suelo por cilindro. Aplicación de 25-100-120 kg/ha de N-P-K a razón de 2,74 g/cilindro. Se empleó un litro de agua por frecuencia de riego, suficiente para lograr la capacidad de campo y algo de agua se perdió por infiltración. Se usó el diseño experimental de bloques al azar en arreglo factorial simple (4*4) con dieciséis tratamientos (Tr) (C1H1, C1H2, C1H3, C1H4, C2H1, C2H2, C2H3, C2H4, C3H1, C3H2, C3H3, C3H4, C4H1, C4H2, C4H3, C4H4) con cuatro repeticiones para un total de sesenta y cuatro unidades experimentales. Se establecieron para el riego: todos los días, cada 24 h (H1), interdiario, cada 48 h (H2), cada dos días, cada 72 h (H3) y cada tres días, cada 96 h (H4) y para los niveles de compactación: 0 golpes/capa (C1), 12 golpes/capa (C2), 24 golpes/capa (C3) y 36 golpes/capa (C4). Estadísticamente se utilizó el análisis de regresión, el análisis de variancia (ANDEVA), la mínima diferencia significativa (MDS) y con regresión múltiple se introdujo un polinomio de tercer grado con la variable dependiente profundidad de enraizamiento (PSE) y las independientes: compactación representada por la relación de solidez (i_s) y la humedad incorporada con las frecuencias de riego (H).

RESULTADOS

Con regresión múltiple fue optimizado el polinomio PSE = $i_s + H + i_s^2 + H^2 + i_s^3 + H^3 + i_s \cdot H + i_s \cdot H^2 + i_s \cdot H^3 + i_s^2 \cdot H + i_s^2 \cdot H^2 + i_s^2 \cdot H^3 + i_s^3 \cdot H + i_s^3 \cdot H^2 + i_s^3 \cdot H^3$, de los cuales los términos i_s , i_s^2 , i_s^3 , H^3 , $i_s \cdot H$, $i_s \cdot H^2$, $i_s^2 \cdot H$, $i_s^2 \cdot H^3$, $i_s^3 \cdot H$, $i_s^3 \cdot H^2$ e $i_s^3 \cdot H^3$ fueron eliminados con valores de P mayores de 0,05, para obtener un polinomio de tercer grado con cuatro términos mostrado en la Ecuación 2, con un coeficiente de determinación R^2 de 94,0648, coeficiente de determinación R^2 ajustado a los grados



Figura 2. Cilindros, martillo Proctor, soporte de golpes y medidores de humedad utilizados en el estudio.

de libertad de 93,6625, error estándar de 1,68086 error absoluto de 1,18255, estadístico de Durbin-Watson de 2,23011 ($P=0,6965$). La significancia para el modelo fue de 0,0000 y de 0,0000 para la constante y los parámetros seleccionados, para un nivel de confianza del 95%.

$$PSE = 83,3485 + 29,706 \cdot H - 12,5316 \cdot H^2 + 0,0445988 \cdot i_s \cdot H^3 - 0,00154734 \cdot i_s^2 \cdot H^2 \quad (2)$$

Puesto que el valor de P en la tabla ANOVA fue menor que 0,05, existió una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%. El estadístico R^2 indicó que el modelo así ajustado explica 94,0648% de la variabilidad en PSE. El estadístico R^2 ajustado, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, fue 93,6625%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos fue 1,68086. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones. El error absoluto medio (MAE) de 1,18255 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor de P fue mayor que 0,05, no hubo indicación de una autocorrelación seria en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

La Figura 3 presenta la gráfica de superficie de respuesta para el modelo de la Ecuación 2, en donde PSE representa la profundidad de suelo enraizado en porcentaje, H la frecuencia de riego e i_s la relación de solidez. Se observa que las profundidades mayores de enraizamiento en los cilindros de 30 cm de altura fueron para las frecuencias de riego 1 y 2.

Las Figuras 4 y 5 muestran la profundidad de enraizamiento registrados durante el proceso del crecimiento radical de la soya. Esto coincide con los resultados estadísticos obtenidos. Las curvas de tensión cortante (τ) para diferentes tensiones normales muestran que la resistencia del suelo estudiado en condiciones adecuadas de humedad (H1 y H2) para las plantas, se hicieron imperceptibles.

La Figura 6 evidencia la profundidad radical obtenido con los tratamientos C4H4 (36 golpes/capa con riego cada tres días), y C4H1 (36 golpes/capa y

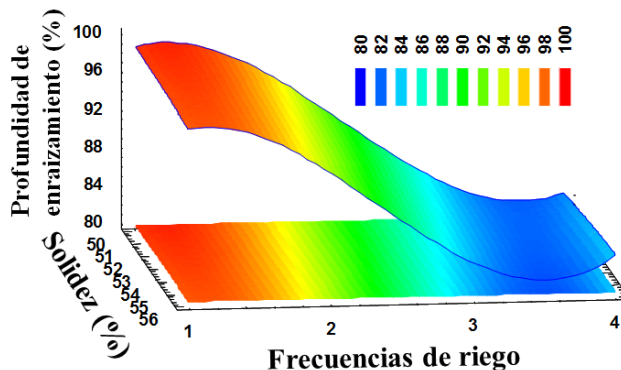


Figura 3. Superficie de respuesta de la profundidad de enraizamiento *versus* período de riego y relación de solidez en soya (*Glycine max* (L.) Merrill) cv. SAN Baiba en un suelo de sabana en Jusepín, estado Monagas, Venezuela.

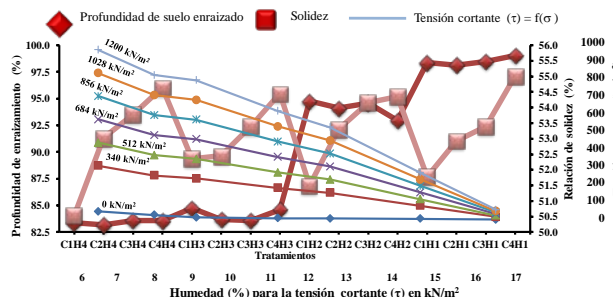


Figura 4. Profundidad del suelo enraizado *versus* tratamiento, humedad, relación de solidez y la tensión cortante en soya (*Glycine max* (L.) Merrill) cv. SAN Baiba en un suelo de sabana en Jusepín, estado Monagas, Venezuela.

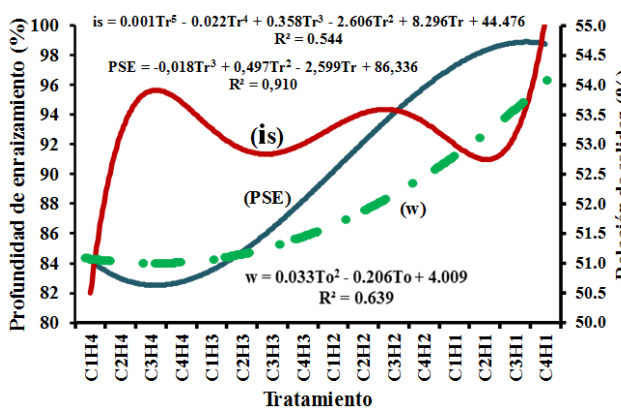


Figura 5. Profundidad de enraizamiento (PSE) *versus* tratamientos, relación de solidez (i_s) y humedad del suelo (w) en soya (*Glycine max* (L.) Merrill) cv. SAN Baiba en un suelo de sabana en Jusepín, estado Monagas, Venezuela.

riego diario). Esto soporta los resultados expuestos en las gráficas y el análisis estadístico.

El Cuadro 3 presenta el análisis de varianza para la profundidad de enraizamiento, en donde se observa que no hubo significancia para la relación de solidez ni para el efecto combinado H^*i_s ; aunque la Figura 3 muestra que hubo un efecto muy ligero de la relación de solidez (franja roja trapezoidal) sobre la profundidad de enraizamiento como lo presenta el Cuadro 4, no obstante sin significancia estadística.

DISCUSIÓN

La humedad fue la que más influyó en el desarrollo radical. La relación de solidez mostró afectar poco al crecimiento radicular, posiblemente debido a que su variación estuvo entre los límites aceptados de solidez. Al respecto, según Davis (1984), en los niveles más altos de resistencia del suelo, las raíces son más sensitivas al déficit de humedad. Medvedev *et al.*, (2000) y Lipiec y Hakansson (2000) reportaron que el crecimiento radicular profundo reducido fue atribuido al impedimento mecánico excesivo de 3 MPa, especialmente en época seca e insuficiente aireación menor del 10% en época húmeda; Lipiec *et al.*, (2003) concluyeron que insuficiente suplido de agua disminuyó el enraizamiento en suelos compactados; sin embargo, el uso eficiente de agua por las raíces aumentó; Hossne (2008) reportó que la densidad aparente seca disminuye con el aumento de la humedad del suelo. Al respecto, en estos suelos la resistencia o tensión cortante no llega a los 3000 kPa y es función inversa exponencial con respecto a la humedad del suelo utilizado y de todos los suelos en general (Hossne, 2004) y la aireación no bajó de 43%.

El mejor desarrollo radical, en función del volumen de enraizamiento, se reflejó para el período de riego diario e interdiario, que fue aumentando con el incremento de la humedad. Note que los tratamientos fueron ordenados de tal forma que los diferentes valores de la compactación, de menor a mayor, por etapa de humedad que fue aumentando desde el inicio. Esto coincide con los resultados estadísticos obtenidos. Estas derivaciones están secundadas por Blouin *et al.*, (2004); Hossne *et al.*, (2003); Hossne, (2004); Iijima and Kono (1991), Yamauchi (1993), Grzesiak *et al.*, (1999, 2002), Masle (2002), Fageria *et al.*, (2006) y Taylor *et al.*, (1967). La tensión cortante tiende a cero al aumentar la humedad para todas las tensiones normales en



C4H4



C4H1



C4H1

Figura 6. Vista de los tratamientos C4H4 y C4H1 en corte de la profundidad de enraizamiento desarrollados al final del experimento en soya (*Glycine max* (L.) Merrill) cv. SAN Baiba en un suelo de sabana en Jusepín, estado Monagas, Venezuela.

comportamiento paralelo. Al relacionar las características físicas y mecánicas del suelo utilizado, que se presentan a continuación, con los resultados gráficos, se podría, posiblemente, captar mejor la influencia de la humedad en las variables independientes. Hossne (2008a) estableció que la zona friable para estos suelos estuvo entre 7,63 y 9,52 %. Espinoza (1970) determinó la capacidad de campo para el suelo de sabana Ultisol de Monagas, encontrando: 11,70 % (0 – 0,2 m), 13,49 % (0,2 m – 0,5 m), 16,89 (0,5 m – 1,0 m) y 19,48 % (1,0 m – 3,50 m), con un promedio total de 15,39 % y entre 0,0 m – 0,5 m de 12,6 %. Hossne (2008) reportó para la capacidad de campo aproximadamente entre 10,3 y 12,8 %. Hossne y Salazar (2004) determinaron: el límite de contracción 4,22 – 5,20 %, el límite plástico 12,92 – 14,04 %, el límite líquido 16,94 – 19,43 %, el índice de plasticidad de 3,59 – 5,78 % y el índice de friabilidad de 8,63 – 8,84 %. El punto de marchitez encontrado por Gaspar (1983) fue de 6,19 % y para Fermín (1971) fue de 5,53 % para estos suelos.

Por ejemplo, en condiciones de humedad baja, por debajo del índice de marchitez, se observa que la resistencia aumentó exponencialmente que dificultaría la acción penetrante de las raíces; la relación de solidez, función directa de la densidad aparente seca que es el índice de compactación, se mantuvo alta a altas humedades y decreció en el estado friable, también, se nota que los valores mayores y menores sucedieron para los niveles de compactación C4 y C1 respectivamente. Se evidencia la influencia de la mayor relación de solidez producto del nivel cuatro de compactación al relacionarlo con la frecuencia de riego H1 y H4, en donde la frecuencia H1 (riego todos los días) opacó el efecto compactante.

CONCLUSIONES

Las frecuencias de riego diario e interdiario produjeron resultados promedios por encima de la gran media 90,08% de profundidad de enraizamiento

Cuadro 3. Análisis de varianza para la profundidad de enraizamiento de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) cv. SAN Baiba para las cuatro frecuencias de riego, relación de solidez y el efecto combinado H*i_s con un suelo de sabana de Jusepín, estado Monagas, Venezuela.

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	P
Frecuencias de riego	3	2641,35	880,449	273,33	0,0000
Relación de solidez	3	2,62	0,874	0,27	0,8457
Efecto combinado H*i _S	9	10,54	1,171	0,36	0,9467
Error	48	154,62	3,221		

Promedio general: 90,082 y Coeficiente de Variación: 1,99%

Cuadro 4. Promedios para la profundidad de enraizamiento de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) cv. SAN Baiba para las cuatro frecuencias de riego, relación de solidez y el efecto combinado H*i_s con un suelo de sabana de Jusepín, estado Monagas, Venezuela.

Variables Independientes	Variable dependiente	
	Profundidad de Enraizamiento (PSE)	
Frecuencia de riego H (% l)	Media	Grupo
H1 (todos los días)	98,506	a
H2 (interdiario)	94,111	b
H3 (cada dos días)	84,286	c
H4 (cada tres días)	83,426	c
Relación de solidez i _s (%)	Media	Grupo
i _s 1 = 51	90,307	a
i _s 3 = 53	90,204	a
i _s 4 = 54	90,047	a
i _s 2 = 52	89,770	a
Efecto combinado H*i _s (%)	Media	Grupo
H1*i _s 4 (54)	99,043	a
H1*i _s 3 (53)	98,480	a
H1*i _s 1 (51)	98,355	a
H1*i _s 2 (52)	98,145	ab
H2*i _s 1 (51)	94,773	bc
H2*i _s 3 (53)	94,605	c
H2*i _s 2 (52)	94,105	c
H2*i _s 4 (54)	92,960	c

Para los efectos combinados de las frecuencias de riego H3 y H4 con la relación de solidez no hubo diferencia significativa.

Mínima diferencia significativa (MDS). Comparaciones apareadas ($p \leq 0,01$). Letras diferentes indican promedios estadísticamente diferentes. Un error estándar para la comparación de 1,2691, un valor T crítico de 2,682, un valor crítico para la comparación de 3,4040 y error con 48 grados de libertad.

para los cuatro niveles de compactación. El desarrollo radical evaluado resultó ser mayormente influenciado por el contenido de humedad del suelo. La resistencia del suelo, evaluada con la tensión cortante para diferentes tensiones normales, no influyó en el enraizamiento cuando se aplicaron las frecuencias de riego que produjeron las mayores humedades del suelo.

LITERATURA CITADA

- Atkinson, J. H. 2007. The mechanics of soils and foundations. Second Edition. Routledge, Taylor & Francis Group. 441 p.
- Bevilacqua E. 2012. Using specific volume increment for quantifying growth responses in trees, theoretical and practical considerations. Syracuse, NY, USA. e-mail: ebevilacqua@esf.edu, 7p.
- Blouin, V.; M. Schmidt, C. Bulmer and M. Krzic. 2004. Soil compaction and water content effects on lodgepole pine seedling growth in British Columbia. SuperSoil 2004: 3rd Australian New Zealand Soils Conference, 5–9 December 2004, University of Sydney, Australia. Published on CDRom. Website www.regional.org.au/au/asssi/. vblouin@sfu.ca.
- Davis, G. R. 1984. Effect of soil compaction on root growth of *Pinus radiata* D. Don. In: Proc. Symp. Site and Productivity of Fast Growing Plantations. 2: 871-877.
- 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.
- Fageria N. K.; V. C. Balingar and R. B. Clark. 2006. Physiology of crop production. The Haworth Press Inc., New York, USA. p.23-60.
- 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.
- 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.
- Grzesiak S.; T. Hura, M. T. Grzesiak and S. Pieńkowski. 1999. The impact of limited soil moisture and waterlogging stress conditions on morphological and anatomical root traits in maize (*Zea mays* L.) hybrids of different drought tolerance. Acta Physiol. Plant. 21: 305- 315.
- Grzesiak S.; M. Y. Grzesiak. W. Filek, T. Hura and J. Stabryła. 2002. The impact of different soil moisture and soil compaction on the growth of triticale root system. Acta Physiol. Plant. 24: 331-342.
- Hartge, V. K. H. and G. Sommer. 1979. Bodenverdichtungen und ihre beurteilung. Z. Kulturtech. Flurbereinigung 20: 257-268.
- 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. 2008b. La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. Terra Latinoamericana 26: 195-202.
- Hossne, A. y J. Salazar. 2004. Límites de consistencia y sus implicaciones agrícolas en un suelo ultisol de sabana del estado Monagas. Venezuela. Agronomía Costarricense 28 (1): 69-80.
- Hossne G., A. J. 2004a. El tubo bradfield o uhlund en la determinación de la densidad aparente de un suelo ultisol de sabana. VII Congreso Venezolano de Ingeniería Agrícola. Universidad Central de Venezuela.
- Hossne G., A. J. 2004b. Evaluación terramecánica del crecimiento radical en un suelo Ultisol de sabana del estado Monagas, Venezuela. UDO Agrícola 4 (1): 45-52.
- Hossne G., A.; J. Christopher, G. Paredes, E. Carvajal, E. Santaella, J. Malaver y A. Cova. 2003. Resistencia terramecánica en función de la humedad edáfica de un suelo Ultisol de sabana del estado Monagas, Venezuela. Bioagro 15 (3): 173-181.
- Hossne G., A. 2001. Indexación física de los suelos agrícolas. Versión 5. Departamento de Ingeniería

- Agrícola, Escuela de Ingeniería Agronómica, Núcleo de Monagas, Universidad de Oriente, Maturín, Estado Monagas, Venezuela. 155 p.
- Ibáñez, J. J. 2006. Las raíces de las plantas y los suelos: Profundidad de enraizamiento. Revisado 06 febrero 2012. www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/11/23/52.
- Iijima, M. and Y. Kono. 1991. Inter specific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. *Jpn. J. Crop Sci.* 60: 130-138.
- Iijima, M.; Y. Kono, A. Yamauchi and J. R. Pardales Jr. 1991. Effects of soil compaction on the development of rice and maize root system. *Environ. Exp. Bot.* 30: 333-342.
- Lipiec, J.; V. V. Medvedev, M. Birkas, E. Dumitru, T. E. Lyndina, S. Rouseva and E. Fulajtár. 2003. Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. *International Agrophysics*, 17: 61-69.
- Lipiec, J. and I. Håkansson. 2000. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. *Soil Tillage Research* 53: 87-94.
- Masle, J. 2002. High soil strength: mechanical forces at play on root morphogenesis and in root:shoot signaling. *In*: Y. Waisel, A. Eshel and U. Kafkafi (Eds.). *Plant roots the hidden half*. Marcel Dekker Inc, New York, USA. p. 807-819.
- Medvedev V. V.; T. E. Lyndina and T. N. Laktionova. 2000. Effect of running systems agricultural engineering on soil and plants. *Proceeding. 2nd International. Conference. on Subsoil Compaction, 29–31 May, Gödöllo, Hungary.* p. 91–98.
- Ponder, Jr. F. 2004. Soil compaction affects growth of young shortleaf pine following litter removal and weed control in the missouri ozarks. *Proceedings of the 14th Central Hardwoods Forest Conference. NC, USA.* p. 255-264.
- Rahman, M. H.; M. Hara and S. Hoque. 2005. Growth and nutrient uptake of grain legumes as affected by induced compaction in andisols. *International Journal of Agriculture and Biology* 7 (5): 740-743.
- Schofield, A. and P. Wroth. 2011. Critical state soil mechanics. Harvard School of Engineering and Applied Sciences. Lecturers in Engineering at Cambridge University. people.seas.harvard.edu/.../Schofield_%26_Wrot. Revisado en enero 2012. 228 p.
- 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.
- Taylor, H. M. 1974. Root behavior as affected by soil structure and strength. *In*: The Plant root and its environment. E. W. Carson (Ed.) University Press of Virginia, Charlottesville. USA. p. 271-291.
- Taylor, H. M.; G. M. Roberson and J. J. Parker, Jr. 1967. Cotton seedling taproot elongation as affected by soil strength changes induced by slurring and water extraction. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31: 700-704.
- Taylor, H. M. and E. Burnett. 1964. Influence of soil strength on root-growth habits of plants. *Soil Sci.* 98: 174-180.
- Tokunaga, A. A. 2006. Effects of bulk density and soil strength on the growth of Blue wildrye (*Elymus glaucus* Buckl.). A Thesis Presented to The Faculty of Humboldt State University for the Degree Masters of Science In Natural Resources: Rangeland Resources and Wildland Soils. 59 p.
- Tu J. C. and C. S. Tan. 1991. Effect on soil compaction on growth, yield and root rots of white beans in clay loam and sand loam soil. *Soil Biol. Biochem.* 23: 233-238.
- Yamauchi, A. 1993. Significance of root system structure in relation to stress tolerance in cereal crop. *In*: Low-input sustainable crop production system in Asia. Korean Soc. Crop Sci., Korea. p. 347-360.