

Índice de friabilidad de un suelo franco arenoso de sabana del estado Monagas, Venezuela

Friability index of a savanna sandy loamy soil of Monagas state, Venezuela

Américo José HOSSNE GARCÍA

Escuela de Ingeniería agronómica, Núcleo Monagas, Universidad de Oriente, *Campus* Los Guaritos, Maturín, 6201-A. Estado Monagas, Venezuela. Apartado Postal 414. Email: americohossne@cantv.net

Recibido: 21/10/2008
Primera revisión recibida: 15/12/2008

Fin de primer arbitraje: 12/12/2008
Aceptado: 30/12/2008

RESUMEN

La friabilidad y la tensión cortante son consideradas indicadores útiles de la calidad estructural de un suelo. Las labores que impliquen aperos agrícolas que se asen al suelo, así como el crecimiento radical presentan su acción más eficiente en un estado del suelo, con la mejor condición física mecánicas. Los objetivos específicos consistieron en obtener, para un suelo de sabana franco arenoso, el índice de friabilidad con base en los límites de consistencia y relacionarlo con la capacidad de campo, el índice de marchitez y la tensión cortante. Metodológicamente se utilizaron los procedimientos de laboratorio de Mecánica de Suelos: ASTM D427-61 para contracción, ASTM D424-59 para el plástico y ASTM 423-66 para el líquido a las profundidades de 0-15, 15-30, 30-45 y 45-60 cm. La capacidad de campo se determinó por el método de la cámara de presión. Las curvas de tensión cortantes con el uso del Triaxial. El análisis de regresión para interpretar la proporción de la variación entre los parámetros de las curvas de regresión. El análisis de varianza y la prueba de la diferencia mínima significativa. Entre los resultados: (a) se definió el estado friable del suelo, que se encontró entre el límite de contracción (5,04 %) y el límite plástico (13,63 %), el rectángulo de friabilidad se produjo entre 7,63 % y 9,52 %. La franja friable para el suelo estudiado produjo respectivamente un valor de 0,59 de la humedad correspondiente al límite plástico inferior (w_{WP}), es decir $0,59 * w_{WP}$, y de 0,736 con respecto al límite plástico inferior, es decir $0,736 * w_{WP}$, (b) la tensión cortante para el índice friable produjo valores de fragmentación óptimos. Se concluyó que el índice de friabilidad se ubicó entre el índice de marchitez y la capacidad de campo, y que de acuerdo al estado pluviométrico del área, el contenido de humedad del suelo para que se encuentre en estado friable se podría lograr en los meses de junio, julio y agosto; y posiblemente, con las lluvias de norte, en los meses de octubre y noviembre.

Palabras Clave: Índice de marchitez, capacidad de campo, tensión cortante, límites de Atterberg.

ABSTRACT

Friability and sheer tension are considered useful indicators of the soil structural quality. The farming operations that imply agricultural tools that take hold to the soil, as well as the radical growth, presents its more efficient action in a soil state, with the best physical and mechanical conditions. The specific objectives consisted on obtaining, for a sandy loam savanna soil, the friability index with base in the consistency limits and to relate it with the field capacity, the withered index and the shear tension. Methodologically the procedures of laboratory of Soil Mechanics were used: ASTM D427-61 for contraction, ASTM D424-59 for the plastic and ASTM 423-66 for the liquid to the depths of 0-15, 15-30, 30-45 and 45-60 cm. The field capacity was determined by the method of the pressure chamber. The shear tension curves with the use of the Triaxial. The regression analysis to interpret the proportion of the variation among the parameters of the regression curves. The variance analysis and the significant minimum difference test. Among the results: (a) the soil friable state was defined to be found between the contraction limit (5.04%) and the plastic limit (13.63%), the friability rectangle took place between 7.63% and 9.52%. The studied soil friable zone produced a value of 0.59 of the humidity corresponding to the inferior plastic limit respectively (w_{WP}), that is to say $0.59 * w_{WP}$, and of 0.736 with regard to the inferior plastic limit, that is to say $0.736 * w_{WP}$, (b) the sheer tension for the friable index produced optimal fragmentation values. On concluded that the friability index was located between the withered index and the field capacity, and that according to the climatic state of the area, the soil friable index could achieved in the months of June, July and August; and possibly, with the north rains, in the months of October and November.

Key words: Withered index, field capacity, sheering resistance, Atterberg limits.

INTRODUCCIÓN

La fragmentación del suelo es el objetivo primario en la labranza para crear un ambiente favorable para los cultivos. Los suelos varían alrededor del mundo desde aquéllos que exhiben una naturaleza con cubrimiento vegetal a aquéllos de una naturaleza de endurecimiento. Estos extremos se han reportado existir en Australia y otros suelos tropicales (Venezuela) y subtropicales (Commegna *et al.*, 2005). La facilidad de preparar una capa cultivable favorable depende de las interacciones complejas entre el clima, suelo y el instrumento de labranza. El agua del suelo afecta su resistencia y propiedades de fragmentación, y por eso la facilidad de preparar una capa cultivable favorable. La administración de los procesos de la labranza afecta la fragmentación y friabilidad indirectamente a través de los efectos en la formación de estructura y estabilización, y directamente a través de la influencia de la labranza y el tráfico. Como fue reportado por Karlen *et al.*, (1990), la friabilidad alta es una de las características más importantes que tiene un acondicionamiento deseable. El término friabilidad se ha discutido, definido y redefinido por científicos durante décadas, por ejemplo: Christensen, 1930; Bodman, 1949; Utomo y Dexter, 1981b.

El índice de friabilidad (I_F) es el cambio en la resistencia de los agregados con el tamaño de los mismos (Braunack *et al.*, 1979). Representa la tendencia de una masa de suelo no confinada a romperse bajo una presión aplicada en un rango particular de tamaños de fragmentos pequeños (Utomo y Dexter, 1981a). De acuerdo a Macks, *et al.*, (1996) la friabilidad podría ser un indicador útil de la conveniencia de la condición estructural del suelo para el establecimiento de los cultivos en la siembra directa. Los suelos con friabilidad baja parecen ser difíciles en el establecimiento exitoso de la siembra directa. Son varios los métodos que, en principio, permiten estimar el comportamiento de un suelo en relación a su estructura, entre los que podemos citar los límites de consistencia o de Atterberg, ensayos de corte, coeficiente de contracción lineal, friabilidad y mullimiento (mellowing). Ensayos sobre la resistencia mecánica del suelo, un indicador sensible del estado físico, muestran además, la importancia del contenido de materia orgánica, de arcilla y su mineralogía en los respectivos módulos de ruptura. Un valor de I_F alto indica que los agregados grandes tienen un valor del módulo de ruptura menor que los agregados pequeños y que, por lo tanto, se romperán en fragmentos pequeños más rápidamente. Un suelo

con baja friabilidad tenderá a romperse en agregados de tamaño heterogéneo cuando se laboree. Un suelo infriable puede requerir mucha energía para la labranza y producir una pobre cama de siembra, con agregados de mayor tamaño y, de esta manera, proveer condiciones indeseables para la germinación, la emergencia y el establecimiento de las plantas.

La friabilidad fue redefinida como el coeficiente de variación de la tensión cortante del suelo; y la definición recientemente del I_F , fue descrita por una ecuación simple que tiene una exactitud dentro del 2% por encima del rango de interés (Watts y Dexter, 1998; Commegna *et al.*, 2005). Commegna *et al.*, (2005) y Braunack *et al.*, (1979) en sus resultados mostraron el mérito de medir la friabilidad para determinar el contenido óptimo de humedad para la labranza. Munkholm, (2002) evaluó la fragmentación y friabilidad en el campo cualitativamente y cuantitativamente utilizando una prueba de caída libre para determinar la fragmentación. Esta última fue utilizada por Schjønning, *et al.*, (2005). La fragmentación y la friabilidad de un suelo franco arenoso fueron evaluadas por Munkholm, (2002) en el laboratorio midiendo el esfuerzo cortante y la energía de la ruptura específica en los agregados, demostró que el efecto del contenido de humedad en el esfuerzo cortante y la energía de la ruptura específica de agregados, reveló una alta influencia y que la macroporosidad tuvo correlación con la tensión cortante y el índice de friabilidad. Schjønning, *et al.*, (2005) utilizaron una varilla torsional y caja horizontal de corte. Gill *et al.*, (2004) encontraron un decrecimiento de la tensión cortante cuando la proporción de arena fina o gruesa aumentaba; y un incremento de la tensión cortante en tratamientos de por lo menos 1:5 de arena:suelo fue significativamente menor en tratamientos mayores de 1:10 arena:suelo. Este resultado soportó los encontrados por Mullins and Panayiotopoulos (1984) en donde una mezcla insaturada de arena fina:caolinita fue superior que la mezcla insaturada de arena gruesa:caolinita. Un parámetro físico (S) fue definido por Dexter, (2004), y Tormena, *et al.*, (2008), igual a la inclinación de la curva de retención del agua en su punto de inflexión. Esta curva se traza como el logaritmo neperiano del potencial de agua contra el contenido de agua gravimétrica. El valor de S es indicativo de hasta qué punto la porosidad del suelo se concentra en un rango estrecho de tamaños del poro. En la mayoría de los suelos, los valores más grandes de S son consistentes con la presencia de

buena micro estructura. Esteban *et al.*, (2006) encontraron que el efecto de *S* sobre el crecimiento de la raíz mostró que este parámetro fue un indicador adecuado para evaluar el impacto de las prácticas agrícolas sobre la calidad del suelo. Dexter y Bird (2001) también definieron un límite inferior seco y un límite superior seco en la labranza que pueden ser calculados con parámetros de la curva de retención de agua. La diferencia entre el límite superior e inferior de la labranza es el rango de contenido de agua en cual la labranza podría ser realizada satisfactoriamente.

Jansson y Karlberg, (2001) simularon el contenido de agua del suelo por medio de un coeficiente del límite plástico superior. Se ha mostrado que el contenido de agua del suelo afecta fuertemente la fragmentación y la friabilidad. Aunque esto no fue sorprendente que su influencia en los procesos de fragmentación y friabilidad no atrajo la atención merecida. La importancia del contenido de humedad del suelo fue resaltada por Dexter (2002) cuando definió el contenido de humedad óptimo para la labranza. Manifestó la necesidad de establecer el rango de humedad para la labranza. Watts *et al.*, (1996) trabajando en suelos franco arcillosos, encontraron que los agregados recogidos después de la labranza produjeron grandes cantidades de arcillas dispersas que los recogidos inmediatamente antes de la labranza, las diferencias aumentaron con el contenido de humedad, pero las diferencias no fueron significativas por debajo del límite plástico. Watts y Dexter, (1998) manifestaron que la conexión más débil entre partículas de los agregados determinan la resistencia del suelo; que el índice de friabilidad alcanza su valor óptimo en contenidos de humedad alrededor del límite plástico inferior, que la perturbación (labranza) del suelo más allá del límite plástico reduce la friabilidad y que está positivamente correlacionado con el contenido de materia orgánica. (Mulkholm, 2002; Cuevas *et al.*, 2006). Ojeniyi y

Dexter (1979), Utomo y Dexter (1981b), Shanmuganathan y Oades (1982), Colleuille y Braudeau (1996), Dexter y Bird (2001), Campos (2002), De Toro y Arvidsson (2003), Müller *et al.*, (2003), Keller (2004) e Igwe y Okebalama (2006), evaluaron la friabilidad utilizando los límites de consistencia y Eghball *et al.*, (1993) el análisis fractal. Los objetivos específicos en este trabajo consistieron en determinar el índice de friabilidad de los suelos de sabana del Estado Monagas a través de los límites de consistencia y relacionarlo con la tensión cortante, capacidad de campo, índice de marchites y el estado pluviométrico de la zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

El muestreo para el análisis experimental se realizó en un suelo franco arenoso de sabana en el Estado Monagas, situado a 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), Mery (*Anacardium occidentale*), Paja Peluda (*Trachypogon* y *Axonopas sp*), Manteco (*Byrsonima crassifolia* Malpighiaceae, Mastranto (*Hyptis suaveolens* Lamiaceae, Gramíneas, Ciperáceas, etc. El área de trabajo seleccionado del suelo en estudio pertenece a un Ultisol de sabana del grupo de los Oxic Paleustults familia de temperatura Isohipertérmic. El Cuadro 1 muestra los componentes físicos del suelo estudiado. Estos suelos ocupan una extensa área agrícola venezolana y son utilizados en la explotación de muchos rubros, con labores de encalado y fertilización, como maíz, sorgo, yuca y pastizales.

El muestreo estratificado se basó en el trabajo realizado por Espinoza (1970), en el cual el estrato que corresponde a la Unidad Maturín está clasificado como un suelo con textura superficial franco arenosa,

Cuadro 1. Componentes físicos en porcentajes y diámetro de las partículas del suelo de sabana del Estado Monagas estudiado.

Profundidad cm	Componentes Edáficos (%)							Materia orgánica
	Arena muy guesa	Arena	Arena media	Arena fina	Arena muy fina	Limo	Arcilla (caolinita)	
0 – 15	0,22	2,91	12,18	39,13	13,93	19,43	12,2	0,38
15 – 30	0,52	2,23	11,07	41,09	10,51	18,38	16,2	0,27
30 – 45	0,30	2,46	10,30	34,56	12,58	21,6	18,2	0,20
45 – 60	0,33	2,64	10,84	30,69	14,63	20,67	20,2	0,13
Diámetro mm	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,002	< 0,002	

comprendida en una superficie aproximada de 55 ha. Se perforaron 20 calicatas para la recolección de las muestras. 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 de muestreo se realizó un muestreo del horizonte comprendido entre 0,00-0,15 m, 0,15-0,30 m, 0,30-45 m, 0,45-0,60 m de profundidad tomando muestras al azar del mismo. Las muestras para cada horizonte fueron conformadas en una sola muestra. Fue corregida como se muestra.

Metodológicamente se utilizaron los procedimientos de laboratorio de Mecánica de Suelos: ASTM D427-61 para el límite de contracción, ASTM D424-59 para el límite plástico y ASTM 423-66 para el límite líquido a las profundidades de 0-15, 15-30, 30-45 y 45-60 cm. El índice de friabilidad se determinó con la diferencia entre el límite plástico y el límite de contracción. La capacidad de campo se determinó por el método de la cámara de presión. Las curvas de tensión cortantes con el uso del Triaxial. Se utilizó el análisis de regresión para interpretar la proporción de la variación entre los parámetros de las curvas de regresión. Desde el punto de vista de la significación, para determinar la diferencia entre las medias de los resultados se utilizó el análisis de varianza y la prueba de la mínima diferencia significativa (MDS) ($p \leq 0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 relaciona la friabilidad con el límite plástico y el límite de contracción. Se observa que la friabilidad varió inversamente con respecto a la contracción y directamente con la plasticidad, remarcándose más el efecto de la contracción. El valor más bajo del índice de friabilidad (7,627 %) ocurrió entre aproximadamente 5 y 6 % del límite de contracción en el horizonte 15-30 cm. Estas humedades se ubicaron entre el límite de contracción y el índice de marchitez, cuando acontecieron los mayores valores de la tensión cortante (Figura 2). El manejo de estos suelos requiere de humedades adecuadas; cuando están secos por debajo del índice de marchitez se desmenuzan produciendo nubes de polvo en las labores de rastreo, y cuando están muy húmedos en los alrededores del límite plástico producen adherencias y terrones. Al respecto, de acuerdo a Keller (2004) para minimizar el número de operaciones de labranza y por lo tanto la energía total utilizada en un sistema de laboreo debería ser ejecutada en condiciones de humedad óptimas. Baver

(1966) estableció que si un suelo compactado es labrado en condición seca, se producen terrones grandes o polvo fino dependiendo de la textura. Si son labrados muy húmedos hay la formación de terrones. Tales suelos deben ser manipulados en el contenido de humedad de la consistencia friable. Pla (1978) en estudios de las propiedades físicas de los suelos de los llanos Centro Occidentales venezolanos, estableció que el efecto compactante se logra cuando la humedad está en tensiones inferiores a 50 kPa, valor que está por debajo del límite plástico.

La Figura 2 relaciona la tensión cortante a diferentes presiones de cámara (0, 340, 512, 684, 856,

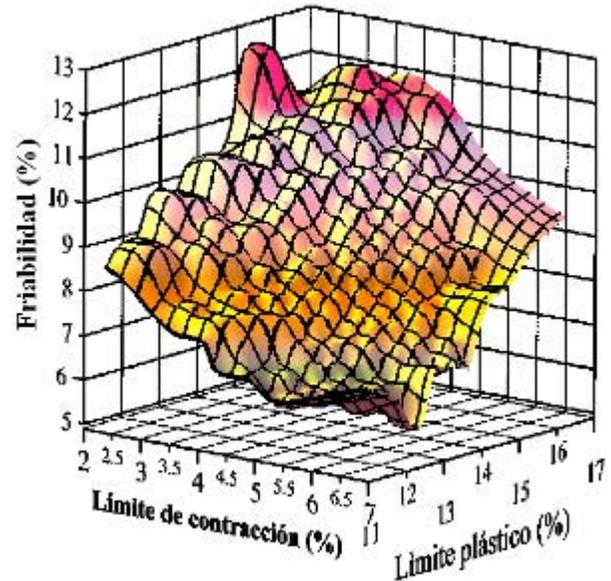


Figura 1. Índice de Friabilidad (I_F) en función del límite plástico (w_p) y el límite de contracción volumétrico (w_{cv}) de un suelo de sabana del Estado Monagas, Venezuela.

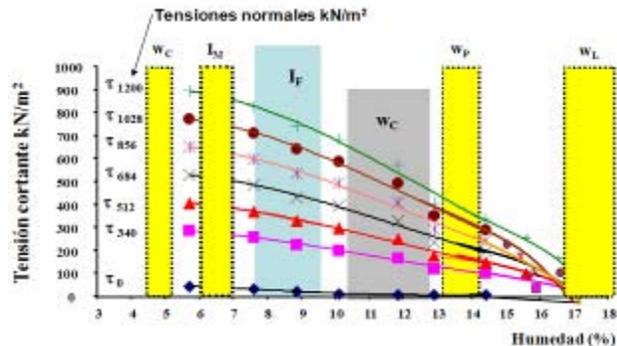


Figura 2. Representación gráfica del índice friable (I_F) en función de la tensión cortante, (τ) tensiones normales (σ_3), capacidad de campo (CC), índice de marchitez (I_M), límites de consistencia y el contenido de humedad de un suelo de sabana del Estado Monagas.

1028 y 1200 kN/m² (kPa)) versus la humedad gravimétrica expuesta bajo las diferentes etapas de las siguientes características físicas: límite de contracción, índice de marchitez, índice friable, capacidad de campo, límite plástico y límite líquido. La franja friable para el suelo estudiado entre 7,63 % y 9,52 %, produjo respectivamente un valor de 0,59 de la humedad correspondiente al límite plástico inferior (w_{WP}), es decir de $0,59 \cdot w_{WP}$, y de 0,736 con respecto al límite plástico inferior, es decir $0,736 \cdot w_{WP}$. De acuerdo a la pluviometría en el área, la friabilidad de este suelo se podría lograr en los meses de junio, julio y agosto; y posiblemente con las lluvias de norte en los meses de octubre y noviembre. Mata (1992) estableció que la actividad de las arcillas definidas por la relación entre el índice plástico y el porcentaje de arcilla, guarda relación inversa con la capacidad de expansión y contracción del suelo. Ellos generalmente se asocian con suelos friables de buena infiltrabilidad, con arcillas de cargas variables tal es el caso de muchos suelos llaneros donde las operaciones de mecanización agrícola son más rápidamente reanudables después de una lluvia fuerte ofreciendo menos resistencia a los implementos, en comparación a suelos con arcillas de carga permanente. En el índice de marchites se produjeron los mayores valores para la tensión cortante (τ).

La humedad requerida para la labranza corresponde a humedades por debajo del límite plástico inferior, como sucedió en este estudio. Ojeniyi y Dexter (1979) encontraron máxima producción de pequeños agregados cuando la labranza era ejecutada a $0,9 \cdot w_{WP}$. De Toro y Arvidsson (2003) observaron un aumento de la proporción de pequeños agregados, disminuyendo el contenido de humedad alrededor de $0,5 \cdot w_{WP}$ durante la preparación de camas para la siembra. Barzegar *et al.*, (2004) encontraron entre $0,70 \cdot w_{WP}$ y $0,80 \cdot w_{WP}$. Utomo y Dexter (1981a) reportaron que la friabilidad fue un máximo para los contenidos de humedad cercano al límite plástico. Kursar *et al.*, (1995) mostraron que la friabilidad, la capacidad de soporte del suelo, el tráfico, y la labranza son mejores cuando la humedad del suelo correspondía al índice de friabilidad máxima para dos suelos franco arenosos para un potencial de 100 kPa por debajo del límite plástico; además reportaron que bajo estas condiciones el riesgo de compactación es mayor para los suelos francos de textura media. Arvidsson y Gustafsson (2004) encontraron que el contenido de agua adecuado para las labores de labranza es cercano al límite plástico del suelo. La labor en un suelo seco

favorece la formación de terrones grandes y suelos con contenido de agua superior al límite plástico son fácilmente deformados y compactados (De Toro y Arvidsson, 2003). Faure (1981) determinó dos puntos en la curva densidad seca con respecto al contenido de humedad que correspondieron a los límites líquidos y plásticos. Pareció que por debajo del límite plástico la compactación se alcanzó independientemente del contenido de humedad, y la máxima densidad se logró en un punto cercano al límite líquido. Esto podría indicar que la friabilidad del suelo no debe estar tan cercana al límite plástico. Baber (1966) resumió que los efectos de compactación observados en suelos hawaianos pueden suceder en cualquier tipo de suelo en donde los suelos no deben ser labrados en condiciones de humedad que no correspondan a la zona friable. Las compactaciones máximas ocurren para los contenidos de humedad cercanos al límite plástico bajo. Expuso que los efectos de compactación por tractores sucedieron para los contenidos de humedad cerca de la capacidad de campo, aunque las rastras de discos producen compactación cuando el suelo está seco. Esto último acaeció en el suelo estudiado.

En el Cuadro 2 se observan siete ecuaciones exponenciales de la tensión cortante en función de la humedad para cada presión de cámara obtenidas con SPSS para la mejor representación de los datos, todas con un alto coeficiente de regresión y con alta significancia estadística tanto para la regresión como para los coeficientes que corresponden a las curvas de la Figura 2. La columna de los valores de la tensión cortante calculada utilizando la humedad media (8,67 %) correspondiente al índice de friabilidad (τ_{IF}), muestran una resistencia relativamente baja en referencia a los esfuerzos radiculares en su crecimiento y también con respecto a los esfuerzos ejercidos por los aperos agrícolas que se asen al suelo.

Cuadro 2. Resultados del análisis de regresión de la tensión cortante (τ) para diferentes presiones de cámara (σ_3) versus la humedad gravimétrica. Valores de τ en función del índice de friabilidad.

Ecuaciones	R ²	σ_3 kN/m ²	τ_{IF} kN/m ²
$\tau = 185,124 e^{-0,256 \cdot w}$	0,907	0	20,12
$\tau = 649,312 e^{-0,125 \cdot w}$	0,930	340	219,68
$\tau = 910,131 e^{-0,121 \cdot w}$	0,917	512	318,79
$\tau = 1171,534 e^{-0,118 \cdot w}$	0,909	684	421,16
$\tau = 1433,129 e^{-0,117 \cdot w}$	0,904	856	519,69
$\tau = 1694,851 e^{-0,116 \cdot w}$	0,901	1028	619,95
$\tau = 1956,637 e^{-0,115 \cdot w}$	0,898	1200	721,93

Barber *et al.*, (1989) usando la diferencia entre los suelos con humedad dos días después de su humedecimiento y el límite plástico del mismo, mostraron que los suelos con mayor propensión a la compactación son aquellos con un mayor contenido de limo y los menos vulnerables, aquellos bien drenados con un contenido de limo más arcilla $\leq 18\%$. La resistencia de estos suelos a la compresión aumenta a un máximo en el rango plástico y luego disminuye. Al respecto, el suelo estudiado tiene un porcentaje de limo parecido, pero la arcilla componente es del tipo caolinita que contribuye al buen manejo. Hossne (2004) mostró que después de los 2.343,2 kPa ($1 \text{ kN/m}^2 = 1 \text{ kPa}$) de resistencia del suelo el crecimiento radical es detenido con gran rapidez, para este valor el crecimiento radicular fue de un 20,78 %, y para 2500 kPa el crecimiento se paralizó por completo. Se pudo observar que al aumentar la resistencia del suelo, también la tensión axial radical. En el rango de resistencia del suelo entre 700 kPa y 1700 kPa el crecimiento radical se mantuvo aproximadamente en un 50 %. El crecimiento cayó rápidamente un 50 % hasta alrededor de los 500 kPa de resistencia edáfica; luego, se mantuvo aproximadamente constante hasta los 1500 kPa, y a partir de allí el crecimiento cayó rápidamente hasta la paralización, para una resistencia de 2500 kPa del suelo. Las curvas de la penetración radical y la tensión axial se cruzaron en un punto, para esta intersección se obtuvo un polinomio de tercer grado, que al resolverlo produjo dos raíces complejas y una real igual a $23,432 \cdot 10^2$ kPa de resistencia del suelo para el cual la penetración radical fue de 20,78 % y la tensión axial radical de $20,78 \cdot 10^2$ kPa. Según Pfeffer (1893), compilado por Gill y Bolt (1955) y Misra *et al.*, (1986), citado por Martino y Shaykewich (1994) la presión máxima que una raíz puede ejercer está restringida alrededor de 700 a 1300 kN/m^2 en la dirección axial y de 400 a 600 kN/m^2 en la dirección radial. Zou *et al.*, (2001) en sus conclusiones establecieron que al disminuir el contenido de humedad del suelo tiene un mayor efecto en el aumento de la resistencia para los suelos de textura fina que en los suelos de textura gruesa. Esto es aplicable en estos suelos ya que el roce interpartículas o ángulo de fricción interno es el más influyente sobre la tensión cortante. Ellos concluyeron que la elongación radical decrece exponencialmente con el aumento de la resistencia del suelo cuando el potencial mátrico se mantuvo constante y los poros aeríferos fueron mayores de $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, y que esta relación era independiente de la textura del suelo, y para una resistencia de 1300

kN/m^2 la elongación máxima se redujo a la mitad. Al respecto, Martino y Shaykewich (1994) establecieron que la resistencia de 2000 kN/m^2 del suelo es crítica para la penetración radical y que es independiente de la textura; sin embargo, en la mayoría de los casos con resistencias mayores de 2000 kN/m^2 , las raíces son capaces de crecer utilizando los canales bióticos, los espacios y las heterogeneidades de la estructura del suelo. Toda esta revisión infiere que la humedad del suelo promedio estudiado de 8,67 % de friabilidad produce condiciones adecuadas para el suelo estudiado. Al respecto, Godwin y Spoor (1977) en estudio sobre factores de suelo que influyen en el trabajo diario, concluyeron que la dificultad en realizar labores de mecanización sobre los suelos, depende de su capacidad para resistir las cargas aplicadas por el equipo tractor-aperos; es decir, depende del esfuerzo cortante. El esfuerzo cortante se incrementa a medida que aumenta la densidad, y disminuye cuando aumenta el contenido de humedad, desde el suelo seco a saturado y hasta el límite inferior de plasticidad.

El Cuadro 3 presenta el análisis de regresión para el índice de friabilidad versus el límite plástico, límite de contracción y la profundidad; produciendo dependencia inversa con respecto a la profundidad y la contracción, y directa con la plasticidad. Esto se observó en la Figura 1. La disminución con la profundidad podría ser debido a la disminución de la materia orgánica. Se observa un ajuste exacto del $I_F = f(w_C, w_P, \text{PRO})$. El Cuadro 4 presenta el análisis de varianza para el límite plástico (w_P) con una media de 13,56 %, el límite de contracción (w_C) con una media de 4,89 % y el índice de friabilidad (I_F) con una media de 8,67 % ajustada por la profundidad, todos con alta probabilidad. El Cuadro 5 muestra la prueba de la mínima diferencia significativa (MDS) ($p \leq 0,05$), en donde se observa que el w_P presentó su mayor valor en el horizonte 0-15 cm, el w_C en los horizontes 0-15 y 15-30 cm y el I_F en el horizonte 30-45.

Utomo y Dexter (1981a) establecieron que para un contenido ligero de agua por encima del límite plástico, se espera que la compresión resulte de la deformación plástica; esto no es aplicable a este suelo por su baja plasticidad. La desviación típica de los resultados obtenidos del límite plástico en este estudio en función de las profundidades de muestreo fue de 0,1753, lo que indicó que para dos cifras significativas el límite plástico no presentó variación al profundizar.

Cuando $w_C > w_P$ nunca habrá contenido óptimo de humedad para la labranza. Muchos suelos arcillosos drenan lentamente y a menudo son muy húmedos que el correspondiente al w_P , al menos que sean secados o las plantas lo hacen por transpiración (Yong y Warkentin, 1966; Dexter, 1988; Utomo y Dexter, 1981b; Watts y Dexter, 1997; Imhoff *et al.*, 2000; Utomo y Dexter, 1981a; Arvidsson *et al.*, 2004;

De Toro y Arvidsson, 2003). Esto también ha sido asociado a la alta resistencia y friabilidad inadecuada del suelo. Los suelos de textura fina necesitan períodos largos para el secado para pasar a friables. Esto retarda las operaciones de campo (Hillel, 1991; Latey, 1985; Ontario Ministry of Agricultura, 1997; Da Silva *et al.*, 1994; Unger y kaspar, 1994; Soehue, 1958). Esto no sucedería con el suelo estudiado.

Cuadro 3. Análisis de regresión lineal para el índice de friabilidad (I_F) en función del límite plástico (w_P) y límite de contracción (w_C) para cuatro profundidades de un suelo de sabana del Estado Monagas.

Estadísticas de la regresión					
Coefficiente de correlación múltiple		1			
Coefficiente de determinación R^2		1			
R^2 ajustado		1			
Error típico		1,52003E-13			
Observaciones		168			
Análisis de varianza					
Resultados	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	316,9772861	105,6590954	4,57302E+27	0,00
Residuos	164	3,7892E-24	2,31049E-26		
Total	167	316,9772861			
Fuentes	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	
Intercepción	1,86634E-12	1,74128E-13	10,71820852	1,19057E-20	
Profundidad (PRO)	-4,379E-15	7,31406E-16	-5,98706221	1,30648E-08	
Límite plástico (w_P)	1	1,12393E-14	8,89733E+13	0	
Límite de contracción (w_C)	-1	1,3514E-14	-7,3997E+13	0	

Cuadro 4. Análisis de varianza para el Límite Plástico (w_P), Límite de Contracción (w_C) y el índice de Friabilidad (I_F) ajustada por la profundidad de un suelo de sabana del Estado Monagas.

Límite Plástico (w_P)					
Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	P
Profundidad (PRO)	3	27,418	9,13933	9,57	0,0000
Error	164	156,576	0,95473		
Media	13,562				
CV	7,20				
Límite de Contracción (w_C)					
Profundidad (PRO)	3	35,774	11,9245	19,20	0,0000
Error	164	101,831	0,6209		
Media	4,8932				
CV	16,10				
Friabilidad (I_F)					
Profundidad (PRO)	3	77,084	25,6946	17,56	0,0000
Error	164	239,905	1,4628		
Media	8,669				
CV	13,95				

Cuadro 5. Promedios para el Límite Plástico (w_p), el Límite de contracción (w_c) y el Índice de Friabilidad (I_f) de un suelo de sabana del Estado Monagas.

Horizontes	Límite plástico †		Límite de contracción †		Índice de friabilidad †	
	Media	Grupo	Media	Grupo	Media	Grupo
0-15	14,063	A	5,2453	A	8,8175	B
15-30	12,938	C	5,3110	A	7,6270	C
30-45	13,671	AB	4,1499	C	9,5210	A
45-60	13,577	B	4,8665	B	8,7104	B

† Prueba de la Mínima Diferencia Significativa (MDS) ($p \leq 0,05$). Letras diferentes indican promedios (%) estadísticamente diferentes.

CONCLUSIONES

La zona friable establecida para este suelo fue aproximadamente entre 7,63 y 9,52 % de humedad para una media de 8,67 %; es la más adecuada para las labores en especial de los aperos que se asen al suelo y el crecimiento radical. Se produjo respectivamente un valor de 0,59 de la humedad correspondiente al límite plástico inferior (w_{WP}), es decir $0,59 \cdot w_{WP}$, y de 0,736 con respecto al límite plástico inferior, es decir $0,736 \cdot w_{WP}$. De acuerdo a la pluviometría en el área, en estos suelos la humedad friable se podría lograr en los meses de junio, julio y agosto; y posiblemente con las lluvias de norte en los meses de octubre y noviembre. Esto infiere que el tiempo oportuno de operación es muy estrecho, lo cual implicaría un uso de maquinarias con un ancho de cobertura conveniente y además un mayor número de equipos en concordancia con el área.

Al relacionar el índice de friabilidad con la tensión cortante, las ecuaciones de la tensión cortante produjeron valores que no infringen el crecimiento radical y favorecen las condiciones para la labranza. La tensión cortante, medida de la resistencia de un suelo, es función exponencial inversamente proporcional de la humedad ($\tau = f(I_f)^{-1}$). En el límite, cuando la humedad tiende a cero, la tensión cortante alcanza su menor valor igual al coeficiente; esto indica que el índice de friabilidad podría ser una condición adecuada de la fragmentación óptima del suelo.

El índice friable para el suelo estudiado se ubicó entre el índice de marchitez y la capacidad de campo. Esto podría indicar que las humedades que definen tanto el índice de marchitez como la capacidad de campo no proporcionan fragmentación adecuada para su manejo y favorecerían la compactación.

Se recomienda el uso de los implementos agrícolas en un rango por debajo del límite plástico y de la capacidad de campo. Si hay requerimientos tractivos, lastrar al tractor y usar implementos en posición montados. No se deben labrar estos suelos con humedades menores del 7,6 % ni por encima del 9,55 % que facilitarían una estructura polvorienta, poca penetrabilidad y compactación.

AGRADECIMIENTO

El autor expresa su agradecimiento al Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente de Venezuela por su soporte y financiamiento para esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Arvidsson, J. T. and K. Gustafsson. 2004. Specific draught for mouldboard plough, chisel plough and disc harrow, at different water contents. *Soil Tillage Research* 79: 221-231.
- Baber, L. D. 1966. *Soil Physics*. John Wiley. Third Edition. 487 p.
- Barber, R. G.; C. Herrera, and O. Díaz. 1989. Compaction status and compaction susceptibility of alluvial soils in Santa Cruz. Bolivia. *Soil and Tillage Research*. 15: 153-167.
- Barzegar, A. R.; A. M. Hashemi, S. J. Herbert and M. A. Asoodar. 2004. Interactive effects of tillage system and soil water content on aggregate size distribution for seedbed preparation in fluvisols in southwest Iran. *Soil and Tillage Research* 78: 45-52.
- Braunack, M. V.; J. S. Hewitt, and A. Dexter. 1979. Brittle fracture of soil aggregates and the

- compaction of aggregate beds. *J. Soil Science* 30: 653-667.
- Bodman, G. B. 1949. Methods of measuring soil consistency. *Soil Science* 68: 37-56.
- Campos, A. 2002. Physical and mechanical properties of three tropical forest soils on limestone in Chiapa, Mexico. *Forestal Veracruzana* 4 (2): 1-9.
- Christensen, O. 1930. An index of friability of soils. *Soil Science* 29: 119-138.
- Colleuille, H. and E. Braudeau. 1996. A soil fractionation method related to soil structural behaviour. *Aust. J. Res.* 34: 653-669.
- Commegna, M. A.; M. E. Aguirre y R. M. Santamaría. 2005. Recuperación natural de la estructura en argiudoles bajo siembra directa. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 34 (1): 71-83.
- Cuevas B. J.; S. O. Seguel y Sch. Ellies. 2006. Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencias a la adición de lodos urbanos. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 6 (2): 1-12.
- Da Silva, A. P.; B. D. Kay, and E. Perfect. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal* 58: 1775-1781.
- De Toro, A. and J. Arvidsson. 2003. Influence of spring preparation date and soil water content on seedbed physical conditions of a clay soil in Sweden. *Soil Tillage Res.* 70: 141-151.
- Dexter, A. R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research* (11): 199-238.
- Dexter, A. R. 2000. The Optimum water content for tillage. *Proceedings of the 15th International Conference of the International Soil Tillage Research Organisation, ISTRO 2000, June 2000, P. Dyke, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas, USA.*
- Dexter, A. R. 2004. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. *Geodema* 120 (3-4): 215-225.
- Dexter, A. R. and N. R. A. Bird. 2001. Methods for predicting the optimum and the range of water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil and Tillage Research* (57): 203-212.
- Eghball, B., L. N. Mielke, G. A. Calvo and W. Wilhelm. 1993. Fractal description of soil fragmentation for various tillage methods and crop sequences. *USDA Agricultural Research Service – Lincoln, Nebraska. Publications from USDA-ARS / UNL Faculty. University of Nebraska – Lincoln.* <http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/82>. Última visita 15 de agosto de 2007. 6 p.
- Espinoza, C. J. 1970. Estudio de las series de suelos y levantamiento agrologico del Campo Experimental Agrícola de la Sabana de Jusepín, Biblioteca de la Universidad de Oriente, Estado Monagas.
- Esteban, S. O. C.; B. S. Figueroa, K. Oleschko, M. L. Flores, M. R. Martínez, F. Menes, y G. Cossío. 2006. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia* 40: 27-38.
- Faure, A. 1981. New Conception of plastic and liquid limits of clay. *Soil and Tillage Research* 1: 97-105.
- Gill, W. R. and G. H. Bolt. 1955. Pfeffer's studies of root growth pressures exerted by plants. *Agro. J.* (47): 166-168.
- Gill, J. S.; Sukartono, J. T., I. G. M. Kusnarta and B. M. McKenzie. 2004. Physical properties of a clay loam soil mixed with sand. *SuperSoil*. ISBN 1 920842 26 8 Published by The Regional Institute Ltd. Department of Agricultural Sciences, La Trobe University, 3086, Australia. 9p.
- Godwin, R. J. and G. Spoor. 1977. Soil factors influencing work days. *Agriculture Engineer* 32(4): 87-90.
- Hossne, G. A. 2004. Evaluación terramecánica del crecimiento radical en un suelo ultisol de sabana del Estado Monagas, Venezuela. *Revista UDO Agrícola* 4 (1): 42-52.
- Hillel, D. 1991. *Out of the Earth: Civilization and the life of the soil.* University of California Press. Berkeley, CA.
- Igwe, C. A. and C. B. Okebalama. 2006. Soil strength

- of some Eastern Nigeria soils and effects of potassium and sodium on their dispersion. *Int. Agrophysics* 20: 107-112.
- Imhoff, S.; Da P. A. Silva and A. Dexter. 2000. Factors Contributing to the tensile strength and friability of oxisols. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1656-1661.
- Jansson, P. E. and L. Karlberg. 2001. Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. Royal Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Stockholm, 321 p.
- Karlen, D. L.; D. C. Erbach, T. C. Kaspar, T. S. Colvin, E. C. Berry and D. R. Timmons. 1990. Soil tillage: a review of past perceptions and future needs. *Soil Science Society of America Journal* 54: 153-161.
- Keller, Th. 2004. Soil compaction and soil tillage - studies in agricultural soil mechanics. Doctoral diss. Dept. of Soil Sciences, Acta Universitatis agriculturae Suecia. Agraria vol. 489. 75 p.
- Kursar, Th. A.; S. J. Wright and R. Radulovich. 1995. The effects of the rainy season and irrigation on soil water and oxygen in a seasonal forest in Panama. Published by: Cambridge University Press. *Journal of Tropical Ecology* 11 (4): 497-516.
- Latey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science* 1: 277-294.
- Macks, S. P.; B. W. Murphy, H. P. Cresswell and T. B. Koen. 1996. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. *Australian Journal of Soil Research* 34 (3): 343-360.
- Martino, D. L. and C. F. Shaykewich. 1994. Root penetration profiles of wheat and barleys as affected by soil penetration resistance in field conditions. *Canadian Journal of Soil Science*. 74 (2): 193-200.
- 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.
- Misra, R. K.; A. R. Dexter and A. M. Alston. 1986. Maximum axial and radial growth pressures of plant roots. *Plant Soil* 95: 315-326.
- Müller, L.; U. Schindler, N. R. Fausey and R. Lal. 2003. Comparison of methods for estimating maximum soil water content for optimum workability. *Soil and Tillage Research* 72: 9-20.
- Mullins, C. E. and K. P. Panayiotopoulos. 1984. The strength of unsaturated mixtures of sand and kaolin and the concept of effective stress. *Journal of Soil Science* 35: 459-468.
- Munkholm, L. J. 2002. Soil fragmentation and friability. Effects of soil water and soil management. PhD thesis, Department of Crop Physiology and Soil Science, Danish Institute of Agricultural Sciences. Danish Institute of Agricultural Sciences. 50p.
- Ojeniyi, S. O. and A. R. Dexter. 1979. Soil factors affecting the macrostructures produced by tillage. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 22: 339-343.
- Ontario Ministry of Agriculture. Food. and Rural Affairs (OMFARA). 1997. Soil Management. Best Management Practices Series. Available from the Ontario Federation of Agriculture. Toronto. Ontario (Canada).
- Pla, S. I. 1978. Dinámica de las propiedades físicas y relación con problemas de manejo conservación de suelos agrícolas de Venezuela. Trabajo de Grado. Profesor Titular. Universidad Central de Venezuela, Maracay. Multigrafiado.
- Pfeffer, W. 1893. Druck-und arbeitsleistung durch wachsende pflanzen. *Abh. Sachs. Ges (Akad.) Wiss.* 33: 235-474.
- Schjønning P.; B. V Iversen, L. J. Munkholm, R. Labouriau and O. H. Jacobsen. 2005. Pore characteristics and hydraulic properties of a sandy loam supplied for a century with either animal manure or mineral fertilizers. *Soil Use and Management* 21(3): 265-275.
- Shanmuganathan, R. T. and J. M. Oades. 1982. Modification of soil physical properties by manipulating the net surface charge on colloids through addition of Fe(III) polycations. *Journal of*

- Soil Science 33: 451-465.
- Soehue, W. 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agricultural Engineering* 39: 276-290.
- Tormena, C. A.; A. Pires da Silva, S. del C. Imhoff and A. R. Dexter. 2008. Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the S index. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* 65 (1): 56-60.
- Unger, P. W. and T. C. Kaspar. 1994. Soil compaction and root growth: a review. *Agronomy Journal* 86: 759-766.
- Utomo, W. H. and A. R. Dexter, 1981a. Effect of ageing on compression resistance and water stability of soil aggregates disturbed by tillage. *Soil and Tillage Research* 33: 127-137.
- Utomo, W. H. and A. R. Dexter 1981b. Soil friability. *J. Soil Sci.* 32: 203-213.
- Watts, C. W. and A. R. Dexter. 1997. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. *Soil Tillage Res.* 42: 253-275.
- Watts, C. W. and A. R. Dexter. 1998. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *European Journal of Soil Science* 49 (1): 73-84.
- Watts, C. W.; A. R. Dexter and D. J. Longstaff. 1996. An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilization during tillage. Part II. Field trials. *Soil and Tillage Research* 37 (2-3): 175-190.
- Yong, R. N. and B. P. Warkentin. 1966. Introduction to soil behavior. The MacMillan Co. New York.
- Zou, C.; C. Penfold, R. Sand, R. K. Misra and I. Hudson. 2001. Effect of soil air-filled porosity, soil matrix potential and soil strength on primary root growth of radiata pine seedlings. *Plant and Soil* 236: 105-115.