

LÍMITES DE CONSISTENCIA Y SUS IMPLICACIONES AGRÍCOLAS EN UN SUELO ULTISOL DE SABANA DEL ESTADO MONAGAS, VENEZUELA¹

Américo Hossne^{2/}, Juan Salazar**

Palabras clave: Límites de Atterberg, caolinita, labranza, compactación, capacidad de campo, enmiendas.

Keywords: Atterberg limits, kaolinite, tillage, compaction, field capacity, amendment.

RESUMEN

El conocimiento de las propiedades físicas de los suelos agrícolas y bióticos proporciona información para el manejo de equipos agrícolas, procesos de compactación y la labranza convencional y conservacionista. A medida que la humedad edáfica aumenta, genera diversos estados del suelo; e.g. una menor interacción entre partículas adyacentes y un comportamiento que se aproxima al del líquido. El inicio de la sensibilidad de compactación, parece ser el límite plástico del suelo bajo una bien definida energía de compactación. El objetivo general, de este estudio fue caracterizar sistemáticamente, con las implicaciones de ingeniería posibles, los suelos agrícolas de sabana del Estado Monagas de Venezuela. Los objetivos específicos consistieron en determinar: a- los límites de Atterberg; y b- el índice de plasticidad y friabilidad. Para ello se utilizó 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, de un suelo de sabana en muestras aleatorias a las profundidades de 0-15, 15-30, 30-45 y 45-60 cm. Se utilizó el análisis de regresión para interpretar la proporción de la variancia entre parámetros. Los resultados indicaron valores de: límite de

ABSTRACT

Consistency limits and their agricultural implications in a Savanna Ultisol Soil of Monagas, Venezuela. Knowledge of the physical properties of agricultural and biotic soils provides information for management of agricultural equipment, compaction processes, and conventional and conservation tillage. As the soil moisture increases it produces diverse stages of the soil; the interaction among adjacent particles decreases, and its behavior approximates that of a liquid. The beginning of compaction sensibility appears to be the plastic limit of the soil under a well-defined compaction energy. The general objective of this study consists of characterizing, systematically, with possible engineering implications, the agricultural savanna soils of the state of Monagas, Venezuela. The specific objectives consisted in determining: a- the Atterberg limits; and b- the index of plasticity and friability. Methodologically, the procedures of the Soil Mechanics laboratory used were: ASTM D427-61 for the shrinkage limit, ASTM D424-59 for the plastic limit, and ASTM 423-66 for the liquid limit, of a savanna soil, from random samples at depths of 0-15, 15-30, 30-45 and 45-60 cm. Regression analysis was used to interpret the proportion of the variance among parameters.

1/ Recibido el 27 de enero de 2004. Aceptado el 30 de abril de 2004.

2/ Autor para correspondencia. Correo electrónico: americohossne@cantv.net
ahossne@monagas.udo.edu.ve

* Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad de Oriente. Estado Monagas. Venezuela.

contracción de 4,22–5,20%, límite plástico de 12,92–14,04%, límite líquido de 16,94–19,43%, índice de plasticidad de 3,59–5,78% e índice de friabilidad de 8,63–8,84%. Se concluye que los valores concuerdan con la bibliografía y el rango de uso agrícola se encuentra entre 8% y 15% para el suelo en estudio.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades físicas, químicas, terramecánicas y los procesos asociados del suelo están íntimamente relacionados con la interacción entre las partículas y las moléculas de agua. Aparentemente, la contracción, expansión, cohesión y plasticidad, están muy correlacionadas. Estas características dependen no sólo de la arcilla presente en el suelo y los cationes adsorbidos dominantes, sino también de la naturaleza y cantidad de humus que acompañan a los coloides inorgánicos. Los suelos bióticos, que se mantienen constantemente ocupados por organismos edáficos como los bosques; y los sometidos a siembra directa contienen más coloides o geles orgánicos que los suelos que se labran constantemente, los primeros tienen una mejor capa agrícola y por lo tanto un mayor límite plástico. Allbrook (1992), al analizar una mezcla de vermiculita más caolinita, encontró que la misma presentaba contracción normal pero sin contracción estructural ni residual. Estudios realizados en Ultisoles y Oxisoles por García y Herrera (1980), Martínez (1986), Rodolfo (1987), Vargas y López (1983) y Zapata (1986), indican que la caolinita y el cuarzo son los silicatos más abundantes en la fracción arcillosa. La caolinita tiene un total del 30% para la contracción normal y no presenta contracción residual (Baver *et al.* 1972). Emerson (1994), manifiesta que cuando los agregados de caolinita se secan hasta el punto de marchitez, se desmenuzan severamente; esto es debido a que las partículas de caolinita son grandes y por lo tanto los poros entre ellas no se llenan de agua en el punto de marchitez. De acuerdo con Gaspar (1983), para 1/3 de atmósfera, la retención de humedad varía

Results showed: contraction limit 4,22-5,20%, plastic limit 12,92-14,04%, liquid limit 16,94-19,43%, index of plasticity 3,59-5,78%, and index of friability 8,63-8,84%. It is concluded that values agree with the bibliography and their range of agricultural use falls in between of 8% and 15% for the soil under study.

de 7,68 a 12,01% -para la Unidad II de los suelos de sabana- aumentando al profundizar en el perfil del suelo, esto se debe al aumento del contenido de caolinita. Faure (1981), determinó 2 puntos en la curva de densidad seca, con respecto al contenido de humedad, que corresponden a los límites líquidos y plásticos; también, manifiesta que con el aumento del contenido de caolinita, a bajo contenido de humedad, hay una tendencia lineal que finaliza en un contenido característico de humedad, el cual es considerado como una nueva forma de medir el límite plástico. Smith (1990), encontró que los suelos de sabana del Estado Monagas tienen un 76,5% de arena (60-90% de cuarzo, inclusiones de mineral de Fe, con presencia de muscovita y feldespatos), 10,1% de limo (100% de cuarzo), 13,04% de arcilla caolinítica (10-20% de cuarzo y 5% de pirofilita) y 1,09% de materia orgánica (MO); contienen como bases cambiables: 0,41 de Ca, 0,51 de Mg, 0,12 de K y 0,004 de Na, todos en $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ de suelo; un 5,6 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ de capacidad intercambiable catiónica; y un pH de 4,6. Smith (1990), por su parte, reporta entre un 70-80% de arcillas caoliníticas y de 5-10% de feldespatos. Según Lambe y Whitman (1979), la arena venezolana natural tiene un 4% de sus partículas más finas de 0,074 mm y si sufren compresión el porcentaje llega a un 20%; ellos también, exponen que las partículas de caolinita tienen 1 μm a través y 0,08 μm de grosor y la clasifican en gruesa (0,06-0,02 mm), media (0,02-0,006 mm) y fina (0,006-0,002 mm). También, las arenas las clasifican en gruesas (2,0-0,6 mm), medias (0,6-0,2 mm) y finas (0,2-0,06 mm). Hillel (1998), considera arenas muy finas aquellas entre 0,05 mm y 0,1 mm. Comparativamente, la partícula más pequeña de montmorillonita que

existe en placas tiene un grosor de 10^{-2} mm (Lambe y Whitman 1979). Soane *et al.* (1981), muestran que el límite plástico obtenido por el método Proctor, es similar al límite plástico determinado por el penetrómetro cónico. Campbell *et al.* (1980) citados por Soane y Ouwerkerk (1981), establecen que la humedad óptima obtenida por el método Proctor es muy similar al límite plástico determinado por el método del penetrómetro cónico de caída. Es posible que el efecto modificante de la textura y la MO pueda ser descrito cuantitativamente según la compresión y el índice de contracción de los límites de Atterberg, o en el caso de las arenas, por su efecto en la compresibilidad (Greacen y Sands 1980). Salazar (1999), al estudiar los límites de consistencia de un suelo de sabana, obtuvo los valores esperados con poca variación en los horizontes. León (1997), al emplear la fórmula propuesta por Terzaghi y Peck (1967) y Lambe y Whitman (1979), para los límites de consistencia de los suelos de sabana, obtuvo algunos resultados en desacuerdo con los suelos franco arenosos finos, caoliníticos. Hipotéticamente, se espera que la cantidad de agua adsorbida y absorbida dependa del contenido de MO, caolinita, limo y en menor grado de las partículas finas de arena del suelo en estudio. Estos suelos de sabana, contienen arcillas caoliníticas consideradas como inexpandibles, que posiblemente no influyan en su consistencia. Bravo y Andreu (1995), observaron que cuando los horizontes debajo de los superficiales presentan mayor contenido de arcilla (11,5-11,8%), la proporción de arenas finas, muy finas y limo son muy altas (>60%), confiriéndole a estos suelos una alta susceptibilidad tanto a la degradación superficial (sellado, encostrado, etc.) como a la compactación. El conocimiento de los límites de Atterberg para los suelos agrícolas, representa una ventaja para establecer los estados de comportamiento del suelo, de acuerdo con el contenido de humedad edáfica. De esta forma, por ejemplo, el estado físico del suelo para el uso de implementos agrícolas, aplicación de riego y el crecimiento radical adecuado podrían verse favorecidos. El objetivo de este estudio fue caracterizar sistemáticamente, con las implicaciones de ingeniería posibles, los suelos agrícolas de sabana del Estado Monagas de Venezuela.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó en las sabanas de Jusepín, Estado Monagas en Venezuela, a 147 msnm, $9^{\circ}41'33''$ latitud Norte y $63^{\circ}23'$ longitud Oeste; con una precipitación anual de 1127 mm y una temperatura media anual de $27,5^{\circ}\text{C}$. El área presenta una vegetación típica de sabana: Chaparrillo (*Curatella americana*), Merey (*Anacardium occidentale*), Paja peluda (*Trachypogon* y *Axonopas* sp), Manteco (*Byrsonima crassifolia*), Mastroto (*Hyptis suaveolens*), gramíneas, ciperáceas, etc. El suelo en estudio pertenece a un Ultisol y al subgrupo de los Oxic Paleustults, familia de temperatura "Isohipertérmico". Estos suelos, con labores de encalado y fertilización, son utilizados en la explotación de muchos cultivos.

El muestreo estratificado se basó en el trabajo realizado por Espinoza (1970). Para la recolección de muestras se perforó 20 calicatas en un área aproximada a las 3 ha y se conformaron como muestras compuestas por horizonte. La recolección de las muestras y ubicación de los pozos se realizó apoyándose en el método de muestreo aleatorio simple. En cada una de las áreas se realizó un muestreo de los horizontes comprendidos entre 0-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm y 45-60 cm. El cuadro 1 presenta, porcentualmente, los componentes físicos y el tamaño de las partículas conformantes del Ultisol. Se observa el bajo contenido de MO, un alto porcentaje de arena y un porcentaje representativo de caolinita y limo. Con más detalle, es factible notar la mayor representatividad de arenas de ese suelo, en especial las arenas finas. También pudo observarse que los componentes varían muy poco en las diferentes profundidades, partiendo de arenas muy finas hacia la derecha y una mayor cantidad de componentes de menor diámetro a los 45 y 60 cm.

Los métodos utilizados para la determinación de los límites de consistencia son los estándares: ASTM D427-61 para contracción, ASTM D424-59 para el plástico y ASTM 423-66 para el líquido. El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo. El índice de friabilidad es la diferencia entre el límite plástico y el límite de contracción. Los análisis fueron realizados en el Laboratorio

Cuadro 1. Componentes físicos (%) y diámetro (mm) de las partículas de un Ultisol de sabana del Estado Monagas.

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

de Edafofísica y Terramecánica Agrícola del Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Oriente, Maturín, Estado Monagas.

El aparato utilizado para determinar el límite líquido consiste en una copa y una base de hule duro. Para la prueba, se hace una pasta con el suelo de la muestra y a esta se le hace una ranura en el centro, usando la herramienta de corte estándar. Luego, con la leva operada por la manivela, se deja caer la copa desde una altura de 0,01 m. El contenido de agua, en porcentaje, requerido para cerrar una distancia de 0,0127 m a lo largo del fondo de la ranura, luego de 25 golpes, se define como el límite líquido (Braja 2001, Lambe y Whitman 1979, Bowles 1970).

El límite plástico se define como el contenido de agua, en porcentaje, con el cual el suelo, al ser enrollado en piezas de 0,0032 m de diámetro, se desmorona. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. La prueba se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano, sobre una placa de vidrio una masa de suelo de forma elipsoidal (Braja 2001, Lambe y Whitman 1979, Bowles 1970).

La masa de suelo se contrae conforme pierde su humedad. La pérdida continua de agua, hará que se alcance una etapa de equilibrio en la que, aunque haya más pérdida de agua no habrá cambio en el volumen. El contenido porcentual, bajo el cual el cambio de volumen de la masa del suelo cesa, se define como el límite de contracción. Las pruebas se efectúan en un recipiente de porcelana de aproximadamente 0,044 m de diámetro y 0,013 m de altura. El interior del recipiente está re-

cubierto con aceite de petróleo que luego se llena completamente con suelo húmedo. Se registra la masa de suelo húmedo dentro del recipiente, luego la masa de suelo se seca en el horno. El volumen de la masa de suelo secada al horno se determina por desplazamiento de mercurio; sin embargo, como el manejo del mercurio es peligroso, la masa de suelo seco es sumergida en una vasija de cera derretida. La masa de suelo revestida de cera es enfriada, y su volumen se determina sumergiéndola en agua. Se utiliza la expresión algebraica:

$$LC = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) (100) - \left(\frac{(V_i - V_f) \rho_w}{m_2} \right) (100), \text{ donde}$$

LC representa el límite de contracción, m_1 la masa del suelo húmedo al inicio, m_2 la masa del suelo seco, V_i el volumen inicial del suelo húmedo, V_f el volumen de la masa de suelo secado en horno y ρ_w la densidad del agua (Braja 2001, Lambe y Whitman 1979, Bowles 1970).

Se utilizó un análisis de regresión para interpretar la proporción de la variancia entre los parámetros.

RESULTADOS

El cuadro 2 presenta las medias de 42 repeticiones, con sus respectivas desviaciones típicas (DT), los límites de Atterberg, el índice de friabilidad y el índice de plasticidad del suelo estudiado. Se observa la tendencia de algunos límites en aumentar ligeramente y otros se mantienen con

Cuadro 2. Límites de Atterberg para un Ultisol de sabana del Estado Monagas.

Horizonte (cm)	Límite de contracción (media)	DT	Límite plástico (media)	DT	Límite líquido (media)		Índice de plasticidad (media)		Índice de friabilidad
						DT		DT	
%									
0-15	5,202	0,5679	14,04	0,790	17,72	1,099	3,59	0,4770	8,84
15-30	5,185	0,5868	13,92	0,679	16,94	0,868	3,94	0,1991	8,74
30-45	4,218	0,6385	13,59	1,448	19,11	0,935	5,41	1,0165	9,37
45-60	4,919	0,8125	13,55	0,798	19,43	0,993	5,78	0,4271	8,63

DT= Desviación típica.

poca variación al profundizar. El índice de friabilidad, casi constante en los horizontes, se encuentra cercano a la banda del límite plástico presentada en la figura 2.

La figura 1 muestra el contenido de caolinita (K), límite líquido, límite plástico, límite de contracción e índice de plasticidad vs. la profundidad. Se observa que algunos parámetros aumentan, otros disminuyen o se mantienen constantes.

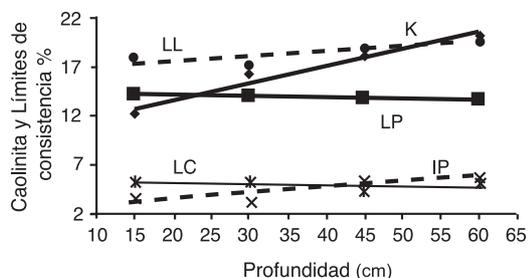


Fig. 1. Contenido de caolinita (K), límite líquido (LL), límite plástico (LP), límite de contracción (LC) e índice de plasticidad (IP) vs. la profundidad del suelo en estudio.

La figura 2 muestra esquemáticamente los límites de Atterberg promedio, donde se puede observar que el estado plástico comienza alrededor del 14% de humedad en base seca.

En la figura 3 se observa que el límite plástico se presenta con un valor ligeramente mayor (14,04%), a los 0-15 cm de profundidad, donde la arena fina tiene un alto contenido en comparación con los valores promedio de limo,

arena muy fina, caolinita y MO, en el orden de influencia relativa.

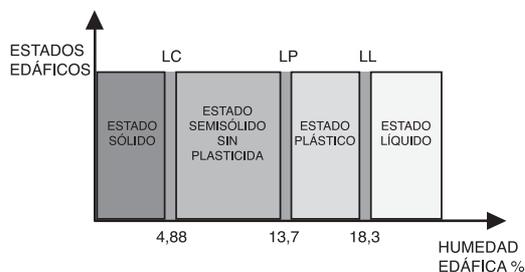


Fig. 2. Representación esquemática promedio de los límites de consistencia de un Ultisol de Sabana del Estado Monagas.

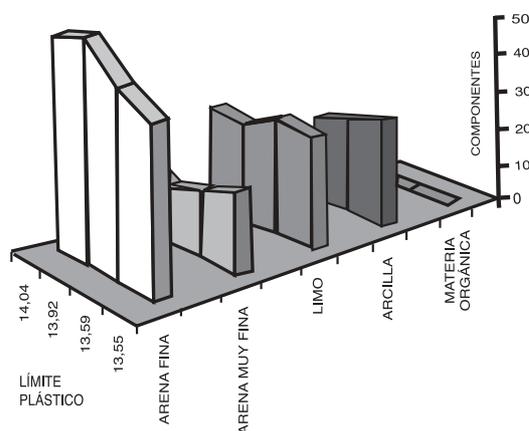


Fig. 3. Límite plástico (%) vs. los componentes físicos (%) de un suelo Ultisol de sabana a: 0-15, 15-30, 30-45, 45-60 cm.

La figura 4 muestra que el valor promedio mayor del límite líquido (19,43%) aparece en el horizonte de 45-60 cm, en donde la arena muy fina, el limo y la caolinita tienen el mayor promedio. El límite líquido es el contenido de humedad cuando la película húmeda es tan gruesa que la cohesión disminuye y la masa de suelo fluye.

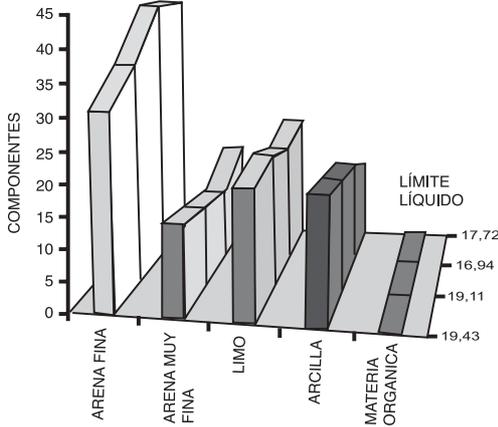


Fig. 4. Límite líquido (%) vs. los componentes físicos (%) de un suelo Ultisol de sabana a: 0-15, 15-30, 30-45 y 45-60 cm.

La figura 5 presenta los promedios del límite de contracción, con el mayor valor (5,20%) en el horizonte de 0-15 cm en donde la arena fina y la MO tienen un alto contenido; el limo y la arena muy fina presentan valores de influencia relativa.

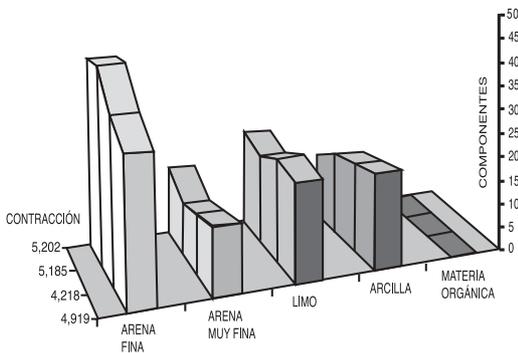


Fig. 5. Límite de contracción (%) vs. los componentes físicos (%) de un suelo Ultisol de sabana a: 0-15, 15-30, 30-45 y 45-60 cm.

La figura 6 muestra que el valor promedio mayor (5,78%) del índice de plasticidad aparece en el horizonte de 45-60 cm, en donde la arena muy fina, el limo y la caolinita tienen el mayor promedio. El índice de plasticidad es una medida indirecta de la fuerza requerida para moldear al suelo.

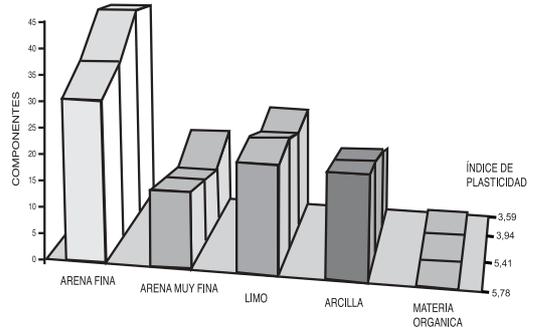


Fig. 6. Índice de plasticidad (%) vs. los componentes físicos (%) de un suelo Ultisol de sabana a: 0-15, 15-30, 30-45 y 45-60 mm.

DISCUSIÓN

En la figura 1 se observa que el contenido de caolinita aumenta al profundizar, y de la misma forma aumenta el límite líquido y el índice plástico, lo cual es corroborado en los trabajos de Faure (1981) en su trabajo sobre la nueva concepción de los límites plástico y líquido. Por su parte, el límite plástico y el límite de contracción disminuyen ligeramente al profundizar, manteniéndose prácticamente constantes, lo cual es un resultado esperado en este tipo de suelo.

El esquema de la figura 2 muestra que el límite plástico se encuentra en los rangos de la capacidad de campo de estos suelos (12 y 13%). Espinoza (1970), determinó la capacidad de campo para un suelo Ultisol de sabana, encontrando: 11,70% (0-20 cm), 13,49% (20-50 cm), 16,89% (50-100 cm) y 19,48% (100-350 cm) y 12,6% (0-50 cm); con un promedio total de 15,39%. Campbell *et al.* (1980) citados por Soane y Ouwkerk (1981), manifiestan que el límite plástico obtenido por el método del penetrómetro cónico de caída, generalmente, se encuentra en las cercanías de la capacidad de campo. De acuerdo a Boekel (1959, 1963), citado por Barber *et al.*

(1989), la diferencia entre la capacidad de campo y el límite plástico es considerada un índice de susceptibilidad a la compactación. Esto es aplicable para estos suelos.

En la evaluación de la influencia de los componentes físicos en la plasticidad, se ha considerado que la plasticidad es una propiedad de las arcillas, el limo y el contenido de MO. En la figura 3, el mayor promedio del límite plástico se encuentra a los 15 cm de profundidad, con una diferencia muy ligera con respecto a los otros horizontes. Los resultados obtenidos son bajos, respecto a los esperados para estos suelos. El límite plástico representa el contenido de humedad del cambio del estado friable a la consistencia plástica. Las arenas pueden ser moldeadas cuando están húmedas, pero se separan cuando se secan; por lo tanto, las arenas no son plásticas. Esto no pasa en el suelo analizado, en donde se forman terrones muy duros. Al respecto, Greacen y Sands (1980) establecen que en los suelos arenosos insaturados, una pequeña pero importante cohesión, se desarrolla debido a la succión de agua en los poros. La máxima cohesión aparente, se logra ligeramente, por arriba del límite plástico. De acuerdo a White (1958) citado por Emerson (1995), los suelos limosos tienen pocas partículas mayores de 0,4 mm, ocasionando que el límite plástico pueda ser medido. Además, el límite plástico depende del contenido de arcilla, y no es sensible al efecto de los cationes intercambiables, como si lo es el límite líquido. En el suelo limoso estudiado por Emerson (1995), las partículas presentes entre 80-90% son menores de 50 μm (Cuadro 1). Este autor encontró que el límite plástico aumenta linealmente con el contenido de carbono y que la capacidad de adsorción de agua a 30 kPa de succión fue de 17 g g^{-1} de polisacáridos, esto es posible, en parte, para el comportamiento del límite plástico determinado. Seed *et al.* (1964) citados por Emerson (1995), mostraron que los suelos cuarzosos, con partículas entre 2 y 5 μm , tienen un límite plástico del 27%. El límite plástico como un indicador del grado de humedad, donde el suelo es más susceptible a la compactación y al sellado superficial, permite calificar a la mayoría de los suelos de sabana. Suelos que al humedecerse son estructuralmente inestables debido a los

bajos contenidos de arcillas y alta proporción de arena fina y muy fina. Barber *et al.* (1989), usando la diferencia entre los suelos con humedad 2 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 18%. La resistencia de estos suelos a la compresión aumenta a un máximo en el rango plástico y luego disminuye. Uto y Dexter (1981), establecen 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. Según Smith (1979), las arenas finas no son plásticas, sólo las arcillas y los limos tienen algo de plasticidad. La desviación típica, de los resultados obtenidos del límite plástico, para las profundidades de muestreo es de 0,1753, lo que indica que para 2 cifras significativas el límite plástico no presenta variación al profundizar. El análisis de regresión para visualizar la influencia de la poca MO del suelo en estudio, produjo una relación de $LP=2,158*MO+13,25$ para una probabilidad de $9,2E-24$ y $1,2E-8$ para la intercepción y la variable MO respectivamente, r^2 de 0,95 y un valor de P de $1,16E-8$. El método de regresión paso a paso produce como primer modelo de influencia el efecto combinado limo-caolinita. Se debe notar la superioridad de la arena fina sobre todo en el horizonte de 0–15 cm, para lo cual se recomendaría estudiar su comportamiento físico, especialmente a baja humedad. En resumen, la poca plasticidad de estos suelos, es debida a la presencia del limo y la caolinita.

En concordancia con el cuadro 2 y la figura 4, el límite líquido aumenta al profundizar; varía entre 17,7 y 19,4, con el mayor valor en el horizonte de 45–60 cm. Paredes y Carvajal (1999), al trabajar con estos suelos en una celda de compresión triaxial encontraron que el límite líquido estaba alrededor del 17% de humedad en base seca. Faure (1981), establece que el contenido de agua es proporcional al contenido de caolinita de la muestra, esto coincide con el resultado obtenido. De acuerdo con Gaspar (1983), para 1/3 de atmósfera, la retención de humedad varía de 7,68

a 12,01% para la Unidad II, aumentando al profundizar en el perfil del suelo, esto debido al aumento del contenido de caolinita. Faure (1981), determinó 2 puntos en la curva de densidad seca, con respecto al contenido de humedad, los cuales corresponden a los límites líquido y plástico. Parece que por debajo del límite plástico, la compactación se alcanza independientemente del contenido de humedad, y la máxima densidad se logra en un punto cercano al límite líquido. Este resultado concuerda con lo obtenido en los suelos en estudio. Gil *et al.* (2000), trabajando con estrategias de riego en el rendimiento de melón, en un suelo areno francoso, concluyeron que el riego diario fue el que dio mejores resultados, esto muestra que acercarse al límite líquido y mantener la capacidad de campo de estos suelos no es fácil. La adhesión de este suelo aumenta hasta un máximo cerca del límite líquido. En el análisis de regresión aplicado a los datos del límite líquido, para el limo, se obtuvo una r^2 de 0,59 para una $P=0,002$ con una probabilidad para el coeficiente positivo de 0,0022 de la variable limo y de 0,26 para el intercepto; para la caolinita se obtuvo una r^2 de 0,61 para una $P=0,0016$ con una probabilidad para el coeficiente positivo de 0,0016 para la variable caolinita y de 0,0050 para el intercepto; para la MO por separado se obtuvo una r^2 de 0,63 para una $P=0,0012$ con una probabilidad para el coeficiente negativo de 0,0012 para la variable MO y de $4,05E-10$ para el intercepto; sin embargo, para la representación cúbica se obtiene una $r^2=0,82$ y a partir de 0,33% de MO el límite líquido comienza a aumentar en función de este componente. El método de regresión paso a paso produce como primer modelo de influencia el efecto combinado caolinita-MO. Wires y Topp (1983), establecieron que la mayor parte de la variación del límite líquido se relacionó con la cantidad de materiales finos, menores a los 0,05 mm en el suelo, generalmente considerados muy uniformes. Aquí se podría concluir que tanto la caolinita, como el limo y la poca MO contribuyen al aumento del límite líquido al profundizar, con mayor influencia de la caolinita y la MO. Aunque también contribuye el porcentaje de partículas menores de 0,07 mm a la profundidad de 45-60 cm.

Con referencia al cuadro 2 y la figura 5, la contracción en volumen disminuye al profundizar, variando desde 5,2 a 4,9%; con el valor más alto en el horizonte de 0-15 cm. Sin embargo, Castro (1998) reporta valores de 1,45-3,37%. La contracción aumenta con la disminución del tamaño de las partículas y el aumento del índice de plasticidad. Los suelos en estudio, tienen un alto porcentaje de partículas relativamente muy pequeñas como se puede observar en el cuadro 1. Según Coulon y Bruand (1989), la diferencia entre el volumen de poros y el volumen de mercurio en los poros, aumenta con la succión y no puede ser atribuida a la contracción durante el secamiento al aire debido al bajo contenido de arcilla. Así, esa diferencia se podría atribuir al tamaño de los poros mayores a $2,5 \times 10^5$ nm. McGarry y Daniels (1987), concluyen que los suelos preparados en seco, duplican el volumen de poros de aire a través de la contracción normal, comparado con los preparados cuando están húmedos. Esta interpretación coincide con lo reportado por Coulon (1988), quien indica que la contracción no sucede durante el secamiento al aire libre, pero contradice el resultado obtenido por Hossne (2001), quien trabajó con un suelo que se contrae ligeramente al aire libre. Cabe aclarar, que la actividad de las arcillas, definida por la proporción entre el índice plástico y porcentaje de arcilla, guarda una proporción inversa con la capacidad de expansión y contracción del suelo (Baver *et al.* 1972). En este sentido, la expansión de las diferentes arcillas sucede en el siguiente orden: vermiculita>montmorillonita>bedelita>ilita>caolinita.

Lutz (1934) citado por Baver *et al.* (1972) menciona que los coloides lateríticos (Ultisoles y Oxisoles) no se expanden, independientemente de la naturaleza de los iones adsorbidos en el complejo intercambio. Por su parte, Baver *et al.* (1972) indican que la arcilla tiene una mayor cohesión que los franco arenosos finos, debido al mayor número de películas húmedas y superficies de contacto. Así, Stengel *et al.* (1984), muestran que el factor que más influye sobre la contracción del suelo es el contenido de arcilla, aumentando linealmente con el incremento de arcilla; aunque el contenido de MO puede influenciar la contracción. La caolinita

tiene un total del 30% para la contracción normal y no presenta contracción residual (Baver *et al.* 1972). Allbrook (1992), al analizar una mezcla de vermiculita más caolinita encontró que tenía contracción normal pero sin contracción estructural ni residual. En el análisis de regresión aplicado a la información numérica del límite de contracción, para el limo se obtuvo una r^2 de 0,72 con una $P=0,00024$ y una probabilidad para el coeficiente negativo de la variable limo de 0,00024 y de $1,35E-07$ para el intercepto; para la caolinita se obtuvo una r^2 de 0,42 con una $P=0,016$ y una probabilidad para el coeficiente negativo de 0,016 para la variable caolinita y de $1,33E-08$ para el intercepto; para la MO se obtuvo una r^2 de 0,43 con una $P=0,016$ con una probabilidad no significativa. En conjunto se obtuvo una r^2 de 0,78 con una $P=0,0024$ y una probabilidad de 0,004 para el limo y una probabilidad no significativa para la caolinita y la MO. Al utilizar el método de paso a paso, el primer modelo fue para el limo y el segundo para la arena muy fina. Aquí se puede concluir que el limo aparentemente, contribuye más a la contracción del suelo por la acción del agua entre partículas que la arena muy fina. Esto último genera una separación mayor entre las partículas de los suelos de sabana cuando son rastreados en condición seca, ya que aumenta su porosidad, contrario a lo que sucede, cuando la labor es hecha en condición húmeda. Esto es coincidente con los trabajos de Emerson (1994), quien manifiesta que cuando los agregados de caolinita se secan hasta el punto de marchitez, se desmenuzan severamente debido a que las partículas de caolinita son grandes y por lo tanto los poros entre ellas no se llenan de agua en el punto de marchitez.

Al analizar el índice de plasticidad presentado en el cuadro 2 y la figura 6, se observa una variación entre 3,59-5,78%; con el mayor promedio en el horizonte de 45-60 cm. Rodas (1964), manifiesta que para que un suelo muestre plasticidad es necesario que posea una cantidad de arcilla superior a 14-16%. De acuerdo con Lambe y Whitman (1979), el índice de plasticidad es el rango del contenido de agua en donde el suelo permanece plástico. Esto indica que debe existir una relación directa entre el índice de plasticidad y el límite líquido. Para el suelo en estudio se en-

contró: una correlación de 0,77; un coeficiente de regresión de 0,59; una expresión algebraica $IP=0,3*LL-0,6$ para una $P=0,002$, y una probabilidad de 0,66 para el intercepto y 0,002 para la variable. Sin embargo, al realizar la regresión paso a paso, incorporando la presencia individual y combinada de los componentes, la combinación caolinita-limo produjo el mayor efecto sobre el índice de plasticidad con una r^2 de 0,94 y una $P=0$. De acuerdo con Means y Parcher (1963), cuando los valores del IP son mayores a 1,5 indica que son arcillas progresivamente más activas. Skempton (1953), considerando la atracción del agua, menciona que la actividad de las arcillas se define como el cociente entre el índice de plasticidad (IP) y el porcentaje de las partículas menores de $0,2 \mu\text{m}$. De allí que la atracción molecular entre el limo y la arena es insignificante (Gavande 1976). La adhesión máxima de un suelo aumenta directamente con el índice de plasticidad; estos suelos se adhieren a los discos de labranza para humedades del rango plástico. Soane *et al.* (1981), encontraron que los resultados de tensión de compactibilidad dependen del contenido de humedad, MO, distribución del tamaño de las partículas, índice de plasticidad y la mineralogía arcillosa. Para este suelo, la actividad de la caolinita fue de 0,28 entre 45-60 cm. Otros valores reportados en la literatura son 0,38 (Lambe y Whitman 1979), 0,33-0,46 (Baver *et al.* 1972) y 0,32 (Faure 1981).

Se concluye que los suelos en estudio tienen un índice plástico muy bajo, y que solamente para la profundidad de 45-60 cm se registra un comportamiento moderadamente plástico para el suelo en estudio, debido sobre todo al efecto combinado de caolinita-limo. El bajo índice de plasticidad es producto, posiblemente, del contenido escaso de MO y la carencia de arcillas expansivas.

CONCLUSIONES

Los límites de consistencia resultaron con valores muy bajos. Esto es debido a que estos suelos arenosos finos carecen completamente de arcillas expansivas.

El valor no varía con la profundidad, debido al alto contenido de arenas y a que las caolinitas son las arcillas con menor plasticidad. El límite de plasticidad se sucede en la banda de la capacidad de campo, con un valor promedio de 14%. El componente que más influyó en el límite plástico encontrado fue el efecto combinado del limo y la caolinita.

El aumento del límite líquido al profundizar, es producto del pequeño incremento del contenido de caolinita. El efecto combinado caolinita-MO fue el que más influyó. En promedio, se obtuvo un valor de 18%. Aquí se debe tomar en cuenta la influencia de un 45% de partículas menores de 0,07 mm.

La poca contracción es producto de la acción del contenido de limo y el contenido de arena muy fina, posiblemente por acción del agua. Se obtuvo un valor promedio de 4,9%. El valor numérico para estos suelos prácticamente no varió en los horizontes estudiados, donde el porcentaje de limo más arena muy fina se mantuvo con poca variación.

El índice de plasticidad promedio fue de 4,5%. El componente más influyente fue el efecto combinado limo-caolinita. El comportamiento moderadamente plástico se logró a 45-60 cm.

Considerando el alto contenido de arenas finas y muy finas, las labores de labranza contribuirían más a la compactación de esos suelos, sobre todo cuando son realizadas a humedades por debajo del 7%. Esto favorece la disminución de la densidad aparente; pero al caer las lluvias ocurre una mayor compactación y formación de costras por el efecto Proctor producido por las gotas de agua.

Si se realiza algún tipo de labranza, esta debe hacerse en la franja friable por debajo del límite plástico, ya que el índice de friabilidad es aproximadamente del 9%.

En los suelos venezolanos, y muchas partes del mundo, es común la presencia de arcillas coalínicas, por su diferencia con los demás tipos de arcillas y su importancia agrícola, sería recomendable hablar de caolinitas y no de arcillas en general, como se acostumbra.

Humedades entre el 12% (capacidad de campo) y el 14% (límite plástico), hacen que los suelos sean susceptibles a la compactación.

LITERATURA CITADA

- ALLBROOK R. F. 1992. Shrinkage of some New Zealand soils and its implication for soil physics. *Aust. J. Soil Res.* 31:111- 118.
- BAVER L. D., GARDNER W. H., GARDNER, W. R. 1972. *Soil Physics*. John Wiley. 549 p.
- BARBER R. G., HERRERA C., DÍAZ O. 1989. Compaction status and compaction susceptibility of alluvial soils in Santa Cruz, Bolivia. *Soil and Tillage Research* 15:153-167.
- BOEKEL P. 1959. Evaluation of the structure of clay by means of soil consistency. *Proceedings of an international symposium on soil structure*, 28-31. May 1958, Ghent Meded. Landb. Hogesch. Opzoek. Station, Staat. Gent. Deel XXIV, 1:363-367.
- BOEKEL P. 1963. The Effect of organic matter on the structure of clay soils. University of California, Davis, 53 p.
- BOWLES J. E. 1970. *Engineering properties of soils and their measurement*. McGraw-Hill. 187 p.
- BRAJA M. D. 2001. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Thomson Learning. 594 p.
- BRAVO C., ANDREU E. 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.
- CAQUOT A., KERISEL J. 1969. *Tratado de mecánica de suelos*. Interciencia, Costanilla de los Ángeles, Madrid. 549 p.
- CAMPBELL D. J., STAFFORD J. V., BLACKWELL P. S. 1980. The plastic limit as determined by the drop-cone test, in relation to the mechanical behaviour of soil. *J. of Soil Sci.* 31:11-24.
- CASTRO A. A. 1998. Contracción lineal de un suelo de sabana del Estado Monagas. Universidad de Oriente. Trabajo de Grado. Escuela de Ingeniería Agronómica, Campus Los Guaritos, Maturín, Estado Monagas Venezuela. 34 p.
- COULON E. 1988. Conséquences du tassement sur l'organisation de l'espace poral des sols sableux. Contribution á la connaissance des mecanismes de compactage. *Thése Université d'Orleans*. 183 p.
- COULON E., BRUAND A. 1989. Effects of compaction on the pore space geometry in sandy soils. *Soil and Tillage Research* 15:137-152.

- EMERSON W. W. 1994. Aggregates slaking and dispersion class, bulk properties of soil. *Aust. J. Soil Res.* 32:173-184.
- EMERSON W. W. 1995. The plastic limit of silty, surface soils in relation to their content of polysaccharide gel. *Aust. J. Soil Res.* 33:1-9.
- 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.
- FAURE A. 1981. New conception of plastic and liquid limits of clay. *Soil and Tillage Research* 1: 97-105.
- GARCÍA M., HERRERA R. 1980. Algunas propiedades del complejo de intercambio de varios ultisoles de la Sabana Nororiental Venezolana. Centro de Ecología, Venezuela. 74 p.
- GASPAR J. 1983. Determinación de diferentes parámetros físicos del suelo con fines de riego en la Estación Agrícola de Sabana de la Universidad de Oriente. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería Agronómica, Campus Los Guaritos, Maturín, Estado Monagas, Venezuela. 119 p.
- GAVANDE S. A. 1976. Física de suelos, principios y aplicaciones. Limusa-Wiley. 351 p.
- GIL J. A., MONTAÑO N., KHAN L., GAMBOA A., NARVÁEZ E. 2000. Efecto de diferentes estrategias de riego en rendimiento y la calidad de dos cultivares de melón (*Cucumis melo* L.). *Bioagro* 12 (1):25-31.
- GREACEN E. L., SANDS R. 1980. Compaction of forest soils. A Review. *Aust. J. Soil Res.* 19:163-189.
- HILLEL D. 1998. Environmental soil physics. Academic London. 287 p.
- HOSSNE A. 2001. Investigaciones de la inherencia de la humedad edáfica sobre la densidad aparente de los suelos agrícolas. IV Congreso Científico de la Universidad de Oriente, Cumaná, del 2 al 7 de diciembre del 2001. Trabajos/AGRONOMICA/IA35.htm.
- KEZDIA. 1974. Handbook of soil mechanics, Volume 1, Soil physics. Elsevier Scientific. 293 p.
- LAMBE T. W., WHITMAN R. V. 1979. Soil mechanics, SI Version. John Wiley. 553 p.
- LEÓN R. R. 1997. Determinación del límite de contracción de un suelo de Sabana del Estado Monagas. Universidad de Oriente, Trabajo de Grado. Escuela de Ingeniería Agronómica, Campus Los Guaritos, Maturín, Estado Monagas, Venezuela. 129 p.
- LUTZ J. F. 1934. The physicochemical properties of soils affecting soil erosion. *Missouri Agr. Exp. Sta. Research Bull.* 212 p.
- MCBRIDE R. A. 1989. Estimation of density-moisture-stress functions from uniaxial compression of unsaturated structured soils. *Soil and Tillage Research* 13:383-397.
- MCGARRY D., DANIELLS I. G. 1987. Shrinkage curve indices to quantify cultivation effects on soil structure of a vertisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1575-1580.
- MARTINEZ B. M. 1986. Estudio de algunas características mineralógicas de las principales unidades de suelos de los Llanos Altos de Monagas, en relación con su fertilidad y práctica de manejo. Trabajo de Grado. Escuela de Ingeniería Agronómica, Maturín, Monagas, Venezuela. 94 p.
- MEANS R. E., PARCHER J. V. 1963. Physical properties of soils. Charles Merrill. 464 p.
- PAREDES G. E., CARVAJAL R. R. 1999. Efecto del esfuerzo cortante y su interrelación con la humedad y la densidad seca en un suelo Ultisol franco arenoso. Universidad de Oriente. Trabajo de Grado. Escuela de Ingeniería Agronómica, Campus Los Guaritos, Maturín, Estado Monagas Venezuela. 125 p.
- RODAS V. 1964. Carreteras, calles y aeropistas. Buenos Aires, Argentina. Ateneo. 424 p.
- RODOLFO S. 1987. Estudio de las formas y dinámica del potasio en 14 suelos del Nororientе Venezolano. Trabajo de ascenso. Escuela de Ingeniería Agronómica. Universidad de Oriente. Maturín, Monagas, Venezuela. 88 p.
- SALAZAR F. J. 1999. Interrelación entre la capacidad de campo y los límites de consistencia de un suelo agrícola de sabana del Estado Monagas. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería Agronómica, Campus Los Guaritos, Maturín, Estado Monagas Venezuela. 150 p.
- SEED J. M., WOODWARD J. R., LUNDGREN R. 1964. Fundamental aspects of the Atterberg limits. *Proc. Am. Soc. Civil Eng.* SM6:75-105.

- SKEMPTON A. W. 1953. The colloidal activity of clays. Proceeding 3rd International Conference of soil Mechanics Foundation Engineering. Switzerland. I:57.
- SMITH G. N. 1979. Elements of soil mechanics for civil and mining engineers. Granada. 424 p.
- SMITH C. Y. A. 1990. Caracterización del estado del potasio en 10 estratos subsuperficiales de suelos de la Región Nororiental. Trabajo de Grado. Escuela de Ingeniería Agronómica. Universidad de Oriente. Maturín, Monagas, Venezuela. 83 p.
- SOANE B.D., BLACKWELL P.S., DICKSON J.W., PAINTER D.J. 1981. Compaction by agricultural vehicles: A Review I. Soil and wheel characteristics. Soil and Tillage Research 1:207-237.
- SOANE B. D., VAN OUWERKERK C. 1981. The role of field traffic studies in soil management research. Soil and Tillage Research 1:205-206.
- STENGEL P., DOUGLAS J. T., GUÉRIF J., GOSS M. J., MONNIER G., CANNEL R. Q. 1984. Factors influencing the variation of some properties of soil in relation to their suitability for direct drilling. Soil and Tillage Research 4:35-53.
- TERZAGHI K., PECK R. B. 1967. Soil mechanics in engineering practice. Wiley. 729 p.
- UTOMO W. H., DEXTER A. R. 1981. Effect of ageing on compression resistance and water stability of soil aggregates disturbed by tillage. Soil and Tillage Research 1:127-137.
- VARGAS N., LOPEZ C. 1983. Caracterización del potasio en cuatro suelos del Estado Monagas. Trabajo de Grado. Escuela de Ingeniería Agronómica. Universidad de Oriente. Maturín, Monagas, Venezuela. 78 p.
- WHITE W. A. 1958. Water sorption properties of homonic clay minerals. Investig. Rep. 208. Illinois State Geol. Survey, Urbana.
- WIRES K. C., TOPP G. C. 1983. Assessing the variability of Atterberg indices within the Dalhousie Soil Association. Can. J. Soil Sci. 63:485-404.
- ZAPATA R. 1986. Efecto de la fertilización y enclamiento sobre las propiedades fisicoquímicas en la interfase colvida-solución de tres ultisoles Venezolanos. Curso de Postgrado en Ciencia de Suelos. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Maracay, Aragua, Venezuela. 122 p.