ESFUERZO CORTANTE EN FUNCIÓN DE LA COMPACTACIÓN Y HUMEDAD DE SUELOS ARENOSOS DE SABANA DEL ESTADO MONAGAS, VENEZUELA.

Hossne García A. J., Mayorga Jaime Y. N., ZasilloContreras A,M., Salazar Bastardo L. D. y Subero Llovera F. A.
Universidad de Oriente, Departamento de Ingeniería Agrícola, Núcleo de Monagas
americohossnegarcia@gmail.com/americohossne@cantv.net

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la relación entre el esfuerzo cortante y la compactación, a ocho (8) niveles de humedad (w), en dos suelos agrícolas franco arenoso de sabana a dos profundidades (0-150 mm y 150-300 mm). Se utilizó el dispositivo manual de paletas para determinar la tensión cortante (τ), el aparato Proctor de compactación, el análisis de regresióny superficie de respuesta. Se encontró que los mayores valores de cizalleo alcanzaron los 100 kN/m^2 para humedades gravimétrica compactantes entre 6,5 y 8,5 %, los máximos de compactación entre 9,5 y 12,5 % de humedad gravimétrica, la densidad aparente un máximo de 1,79 $Mg \cdot m^{-3}$ a una humedad óptima entre 9 y 10%. Se concluyó que la tensión cortante aumentó potencialmente en función de la compactación, cúbicamente en función de la humedad compactante y alcanzó sus valores máximos antes de los máximos de la densidad aparente seca.

Palabras claves: Cizalleo, compactación, humedad.

INTRODUCCIÓN

Los suelos franco arenosos estudiados poseen poca materia orgánica, arcilla caolinita, bajo poder de contracción y expansión, deformables, perturbables, erosionables, compactables y su tenacidad y coherencia se logra a bajo contenido de humedad a causa del efecto de cementación entre las partículas secas (Rucks et al., 2004). Chen y Fryrear (2010) concluyeron que para los suelos francos arenosos la estabilidad mecánica es una medida de erosionabilidad y resistencia. La resistencia del suelo se explica por la teoría de Coulomb-Mohr-Terzaghi-Peckcon, la ecuación $\tau = C + \sigma * \tan(\varphi)$ y la compactación es resultado de la reducción de los espacios porosos llenos de aire. Se ha demostrado que la fuerza de cizallamiento (τ) del suelo disminuye con el contenido de humedad y aumenta con la compactación (Panwar y Siemens1972). Adekalu et al., (2007) trabajando con diferentes órdenes de suelos: ultisol (franco arenoso), entisol (franco arcillo arenosos) y alfisol (franco arenoso) encontraron que los niveles de compactación más altos incrementaron la densidad seca y la fuerza de cizallamiento. Hossne et al. (2003) trabajando con suelos ultisoles de sabana, demostraron la gran influencia inversa de la humedad sobre la tensión cortante, y que el suelo presentó resistencias menores de 100 kN/m^2 para humedades cercanas a su capacidad de campo. El objetivo de este trabajo consistió en evaluar las relaciones entre el esfuerzo cortante y la compactación, a ocho (8) niveles de humedad (w), en dos suelos agrícolas a dos profundidades.

METODOLOGÍA

Cuadro 1. Características físicas de suelo franco arenoso y franco limoso, y uno franco limoso del estado Monagas deVenezuela de dos sitios diferentes a dos profundidades.

Componentes	Horizontes de dos sitios diferentes			
	Suelo A		Suelo B	
	Profundidades			
	0-300 mm	0-600 mm	0-300 mm	0-600 mm
	%	%	%	%
Arena muy gruesa	1.03	0,37	1,77	0,50
Arena gruesa	9.18	1,93	22,43	0,58
Arena media	25.61	7,49	24,01	16,94
Arena fina	30.10	7,22	22,13	27,74
Arena muy fina	12.60	14,06	6,33	8,39
Arena total	78.42	31,07	76,67	54,15
Limo	8.400	52,73	15,23	29,65
Arcilla (caolinita)	13.151	16,2	5,2	10,2
Materia orgánica	1.632	0,86	0,49	0,45
Clase textural	Fa	FL	Fa	Fa

En el ensayo se utilizó un aparato de cizalleo marca Soiltest Pilcon Engineering, con dispositivo manual de ensayos con paletas, y un equipo de ensayo de compactación Próctor con molde estándar de compactación (Assouline et al., 1997; Bowles, 1992).

El arreglo experimental con ocho (8) tratamientos de humedad seleccionados (3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 y 17%) ($w = (M_W*100/M_S)$ con tres repeticiones para cada uno para un total de treinta y dos (32)cilindros Proctor.En cada cilindro se aplicaron 25 golpes por capa (tres capas) y se midió la tensión cortante, la densidad aparente seca y la humedad gravimétrica tanto en la superficie superior como en la superficie inferior del cilindro. Los resultados obtenidos fueron analizados con un diseño experimental de comparación de medias muestrales por diferencia mínima significativa (DMS) por cada nivel de humedad para los parámetros medidos (ρ_s y τ) y un análisis de regresión con diagramas representativos de dispersión de los datos con línea de tendencia, relacionando tensión cortante y densidad aparente seca con la humedad edáfica. Todos los ensayos se realizaron sobre las mismas muestras de suelos. Se utilizó la metodología de superficie de respuesta (Oehlert, 2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 expone el comportamiento de la tensión cortante y la densidad aparente seca en el proceso de compactación Proctor en función de la humedad compactante. Los valores máximos de compactación se obtuvieron entre 9,5 % y 12,5 % de humedad compactante; en cambio para el cizalleo fue entre 6,5 y 8,5 %. Hossne (2008) estableció que la zona friable para estos suelos estuvo entre 7,63 y 9,52 %. Espinoza (1970) determinó que la capacidad de campo para el suelo de sabana estaba entre 11,70 % y13 % y, Hossne (2008) reportó la capacidad de campo aproximadamente entre 10,30 y 12,80 %. 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.

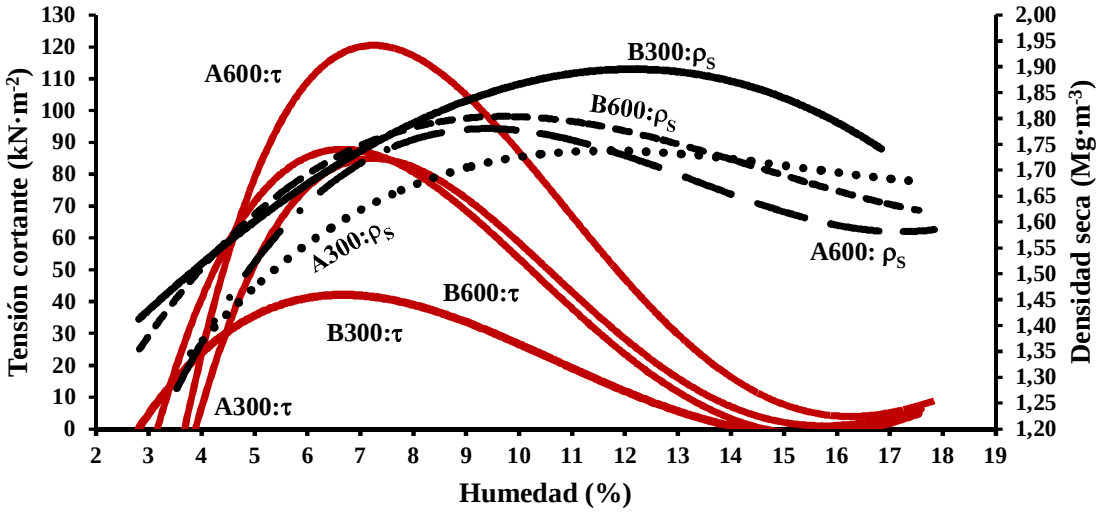

Figura 1. Tensión cortante y densidad aparente seca versus el contenido de humedad compactante para los dos tipos de suelo estudiados, a las profundidades de 0-150 mm y 150-300 mm. En la notación de izquierda a derecha, la letra mayúscula representa el tipo de suelo, el número la profundidad y por último el símbolo representa densidad (ρ_S) o cizalleo (τ).

La Figura 2 presenta la gráfica de superficie de respuesta del polinomio dela Ecuación 8 obtenido de un total de trece términos en donde fueron eliminados los términos ρ_S,w,ρ_S*w, w^2, ρ_S^3,w3yρ_S^3*w^2,con un R^2 de 70,64 %, R^2 ajustado de 70,42 %, un estadístico de Durvin-Watson de 0,21943 (0,0000) y un error estándar de 19,86. Como el valor de P en la anovafue mucho menor de 0,05, hubo una relación estadísticamente significativa entre las variables en el nivel de confidencia de 95 %. El análisis de variancia produjo un F de 167,21 y un P de 0,0000. Se observa la influencia de la humedad en el rango de 5% a 10 % sobre la tensión cortante, y el aumento de la tensión cortante con el aumento de la compactación; no obstante, la preponderancia de la humedad compactante redujoel efecto de la compactación.

$$\tau = -80{,}2206 + 2{,}07175*\rho_S*w^2 - 38{,}5983*\rho_S^2 + 40{,}8795*\rho_S^2*w - 4{,}41358*\rho_S^2*w^2 - 5{,}52075*\rho_S^3*w + 0{,}0544451*\rho_S^3*w^3 \quad (8)$$

Panwar y Siemens (1972) y Hossne et al., (2003) demostraron que la tensión cortante del suelo disminuyó con el contenido de humedad y aumentó con la compactación. Hossne et al. (2003) probaron que la tensión cortante disminuyó exponencialmente con respecto al aumento de la humedad para este suelo. Farouk et al. (2004) mostraron que la tensión

cortante de las muestras en el triaxial aumentó al incrementar la succión mátrica.

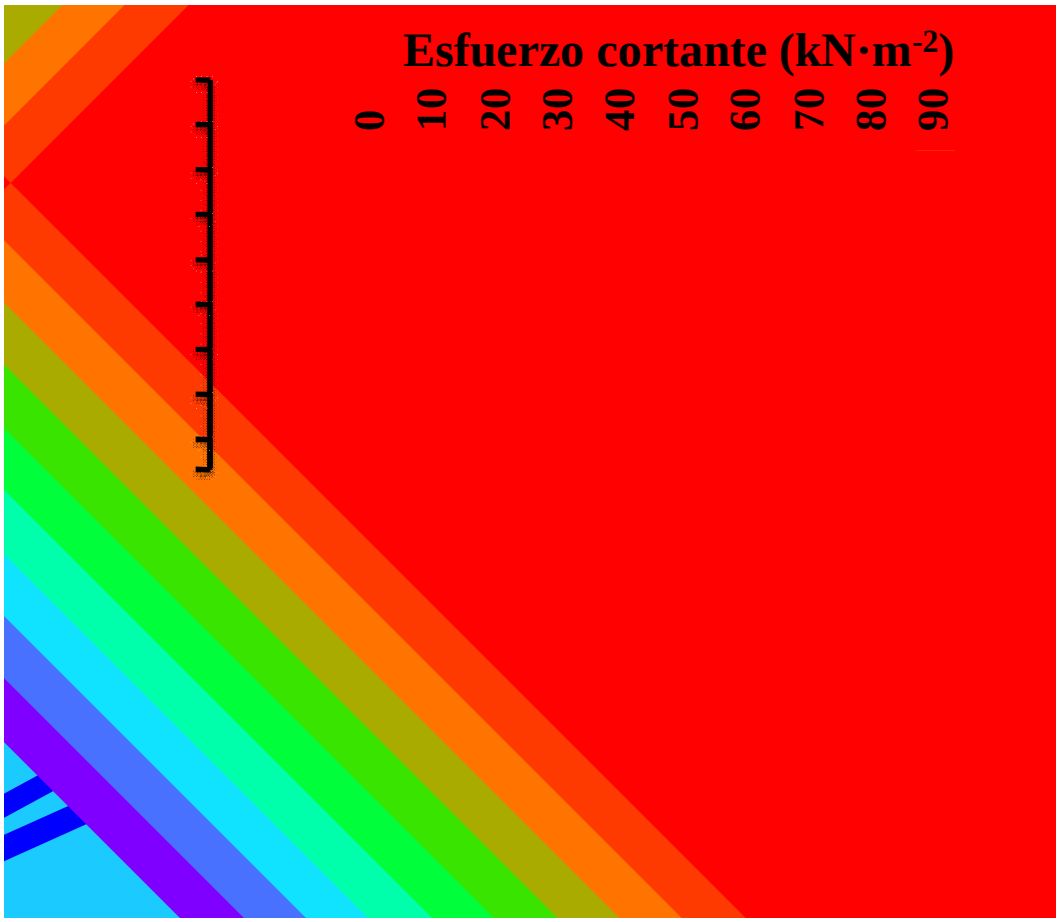

Figura 2. Superficie de respuesta que relaciona la tensión cortante con la compactación y la humedad del suelo.

La Figura 3 muestra el comportamiento de la tensión cortante en función de la densidad aparente seca y la humedad gravimétrica en función de la densidad seca. La conducta más aproximada de la tensión fue la de una curva de tendencia potencial generando $\tau = 0{,}000001*\rho_S^{52{,}97}$, con un R^2 de 0,84 para la superficie superior del cilindro Proctor, y $\tau = 0{,}726*\rho_S^{7{,}54}$, para un R^2 de 0,31 para la superficie inferior. Panwar y Siemens (1972); Adekalu et al. (2007) y Agodzo y Adama (2003) demostraron que la tensión cortante del suelo aumentó con la compactación.

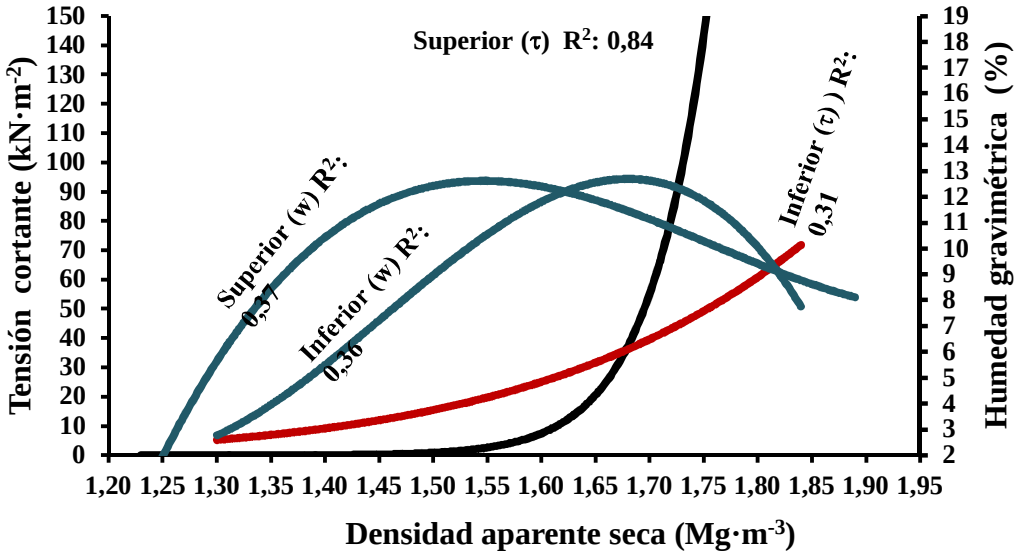

Figura 3. Relación de la tensión cortante (τ)y la humedad (w) con respecto a la densidad aparente seca (ρ_S) para la superficie superior e inferior en el cilindro Proctor del suelo de sabana del estado Monagas, Venezuela.

Cuadro 2. Promedios para esfuerzo cortante $kN \cdot m^{-2}$ (τ) y densidad seca $Mg \cdot m^{-3}$(ρ_S) para dos profundidades (Pro),dos superficies medidas (Su), dos suelos (S) A y By la humedad (w) de sabana del estado Monagas de Venezuela.

Variables Independientes	Variables Dependientes			
	Esfuerzo cortante		**Densidad Seca**	
	Media	**Grupo**	**Media**	**Grupo**
Profundidad				
0-30	28,148	B	1,6915	A
30-60	44,505	A	1,6528	B
Superficie				
Superior (1)	35,956	A	1,6498	B
Inferior (2)	36,696	A	1,6946	A
Suelo				
(A)	43,762	A	1,6182	B
(B)	28,891	B	1,7262	A
Humedad				
5	68,54	C	1,6246	H
6	83,69	B	1,6988	EFG
7	100,30	A	1,7711	BCD
9	84,24	B	1,8360	A
10	33,88	DE	1,8002	AB
11	29,47	E	1,7780	BC

Mínimadiferencia significativa (MDS). Comparaciones apareadas ($p \leq 0,01$). Letras diferentes indican promedios estadísticamente diferentes.

CONCLUSIONES

La tensión cortanteaumentó con el incremento en la densidad aparente seca, refiriendo que la reducción en el volumen de poros causó resistencia del suelo.Los mayores valores de cizalleo alcanzaron los $100kN \cdot m^{-2}$para contenidos de humedad entre 7 y 8%. Esto muestra que a esta humedad la influencia de la traficabilidad juega importancia debido a la carga ejercida al suelo cuando se realizan prácticas agrícolas.La densidad aparente seca presentó un máximo de 1,79 $Mg \cdot m^{-3}$ a una humedad óptima entre el 9 y 10%. Se obtuvo la humedad de equilibrio promedio entre 7 y 8 %.

LITERATURA CITADA

ADEKALU, K.O., D. A. OKUNADE, y J.A. OSUNBITAN. 2007. Estimating trafficability of three Nigerian agricultural soils from shear strength-density-moisture relations.Inernational.

AGODZO S. K. y I. ADAMA. 2003. Bulk density, cone index and water content relations for some Ghanian soils. Agricultural Engineering Department, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi, Ghana. LNS0418002. skagodzo7@usa.net.

ASSOULINE, S., TAVARES-FILHO, J., y TESSIER, D. 1997. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: Experimental results and modeling. Soil Sci.Soc.

Am. J. 61:390-398.
BOWLES, J. E.1992. Engineering properties of soils and their measurements.4th ed.,McGraw-Hill.241 p.
CHEN, W. y FRYREAR, D.W. 2010. Influence of Mechanical Disturbance on Erodibility of Sandy Loam Soils by Wind. Symposium 50th anniversary of the United States Department of Agriculture's Wind Erosion Research at Kansas State University. U. S. Agriculture Department, Northern Plains Area. www.weru.ksu.edu/symposium/proceedings/chen. 24 p.
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.
FAROUK, A., L. LAMBOJ y J. KOS. 2004. Influence of matric suction on the shear strength behaviour of unsaturated sand. ActaPolytechnica Vol. 44(4). Czech Technical University Publishing House http://ctn.cvut.cz/ap/.
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.
HOSSNE, A. J. G. 2008. Índice de friabilidad de un suelo franco arenoso de sabana del estado Monagas. Venezuela. Revista Científica UDO Agrícola 8(1): 107-117.
HOSSNE, A. J. G., J. CRISTOPHER, G. PAREDES, E. CARVAJAL, E. SANTAELLA, J. MALAVER Y J, COVA. 2003. Resistencia terramecánica en función de la humedad edáfica de un suelo ultisol de sabana del estado Monagas, Venezuela. Bioagro15(3): 173-181.
HOSSNE, A. y SALAZAR, J. 2004. Límites de consistencia y sus implicaciones agrícolas en un suelo ultisol de sabana del estado Monagas. Venezuela. AgronomíaCostarricense 28(1): 69-80.
HORN, R. 2004. Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 68:1131- 1137.
OEHLERT, G. W. 2000. *Design and analysis of experiments: Response surface design.* New York. W.H. Freeman and Company.315 p.
PANWAR J.S. y SIEMENS J.C. 1972**.** Shear strength and energy of soil failure related to density and moisture. Transactions of the ASAE, 15(3), 423-427.
RUCKS, L., F. GARCÍA, A. KAPLÁN, J. PONCE DE LEÓN y M. HILL**.** 2004. Propiedades Físicas del Suelo. Universidad De La República.Facultad de Agronomía. Departamento de Suelos y Agua. Montevideo-Uruguay.68 p.