

Parámetros de estado crítico empleados para la simulación de la respuesta mecánica de un suelo rhodic ferralsol (mediante el MEF)

Omar González-Cueto¹

Ciro E. Iglesias-Coronel²

Miguel Herrera-Suárez¹

Guillermo Urriolagoitia-Sosa³

Guillermo Urriolagoitia-Calderón³

Luis Héctor Hernández-Gómez³

¹Departamento de Mecanización Agropecuaria,
Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas,
Santa Clara, VC,
CUBA.

²Centro de Mecanización Agropecuaria,
Universidad Agraria de la Habana, San José, La Habana,
CUBA.

³Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
ESIME, Unidad Profesional Adolfo López Mateos,
Instituto Politécnico Nacional, México, DF.
MÉXICO.

Tel. (53) 42281692

Correo electrónico: omar@uclv.edu.cu

Recibido el 18 de noviembre de 2008; aceptado el 24 de junio de 2009.

1. Resumen

Los modelos constitutivos de estado crítico están entre los más empleados para la simulación de la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos. Para los cuales se deben incluir parámetros elásticos y plásticos. Este trabajo tiene el objetivo de determinar la influencia de la densidad de volumen en parámetros elastoplásticos de un suelo Rhodic Ferralsol. Para tal efecto se realizaron ensayos triaxiales y de compresión uniaxial a muestras remoldeadas a las densidades de volumen de 1.1; 1.175 y 1.25 Mg m⁻³; en contenido de humedad gravimétrica de 25 g 100g⁻¹. El incremento de la densidad de volumen, a contenido de humedad constante

provoca variaciones en la respuesta mecánica de los parámetros elásticos y de estado crítico, que son empleados como datos de entrada para la modelación del suelo mediante el método de elementos finitos. Se determinó que el módulo de elasticidad, la pendiente de la línea de estado crítico y de la línea de descarga se incrementan con el aumento de la densidad de volumen, caso contrario al de la pendiente de la línea de compresión normal.

Palabras clave: compactación del suelo, propiedades mecánicas, método de elementos finitos, estado crítico.

2. Abstract (Critical State Parameters Use for Simulation of Mechanical Response of Rhodic Ferrasol Soil by Means of Finite Element Method)

The constitutive models of critical state are among the most employed for soil compaction simulation by means of the finite element method. This paper has the objective to determine the influence of soil bulk density on elastoplastic parameters of Rhodic Ferralsol soil. Triaxial and compression uniaxial tests were carried out to remoulded samples, with a bulk density of 1.1; 1.175; 1.25 Mg m⁻³, and a gravimetric moisture content of 25 g 100g⁻¹. The increment of the bulk density, to constant moisture content causes variations in the behavior of elastic parameters and of critical state that they are employees as input data for soil modeling by means of the finite elements methods. It was determined that the module of elasticity, the slope of the critical state line and the unloading line they are increased with the increase the bulk density case contrary to the slope of normal compression line.

Key words: soil compaction, mechanical properties, finite element method, critical state.

3. Introducción

La compactación del suelo provocada por el tráfico de maquinaria agrícola y al aprovechamiento intensivo de los recursos forestales ha llevado a reducciones en la capacidad agroproductiva de los suelos. La predicción de la respuesta mecánica a la compactación se ha convertido en un medio para

realizar recomendaciones e implementar estrategias de administración de la maquinaria y el suelo que permitan el restablecimiento de las condiciones más adecuadas para el crecimiento de las plantas.

El método de elementos finitos (MEF) es utilizado para resolver problemas complejos en la ingeniería que contengan no linealidades geométricas y materiales. En la modelación de la compactación se incluyen ambas debido tanto al suelo, que es un material con grandes desplazamientos y deformaciones bajo carga; como a las características de los neumáticos, los cuales están compuestos por capas con propiedades diferentes cada una. El MEF ha sido ampliamente empleado para la simulación de la compactación del suelo debido a que representa con mayor precisión el fenómeno físico real de la interacción neumático-suelo que los modelos empíricos o analíticos. Éste es especialmente adecuado para el estudio de los fenómenos referidos a deformación, tracción y compactación [1].

La disponibilidad de códigos de elementos finitos de propósito general, como ANSYS, ABAQUS o COSMOS, quienes incorporan leyes constitutivas específicas para la investigación de los suelos, el empleo de ensayos normalizados y la expansión y desarrollo de la instrumentación para obtener los datos de entrada de los modelos, hacen a este método una técnica apropiada para predecir la compactación del suelo.

Para simular el comportamiento físico de un material es necesario disponer de modelos analíticos o leyes constitutivas que relacionen los esfuerzos y deformaciones e incorporen las propiedades del material en cuestión. Sin embargo, no es posible describir todos los aspectos del comportamiento de éstos siendo necesario incluir en el modelo sólo sus características principales, mientras los aspectos considerados de menor importancia son excluidos [1]. Desai [2] considera que una ley constitutiva debe predecir el comportamiento del material para todos los factores significativos que influyen en la respuesta mecánica de éste, debiendo aplicarse sólo para las condiciones en las cuales éstas fueron desarrolladas.

Los suelos agrícolas bajo carga no se comportan elásticamente lineales lo cual implica que los parámetros elásticos no son constantes, sino que dependen del estado esfuerzo-deformación del suelo. Dado que el suelo es un material altamente no lineal su compresión o falla bajo la acción de los neumáticos agrícolas es elástica y plástica. El suelo soporta una considerable deformación plástica durante la carga; por lo tanto, es necesario tener en cuenta una ley que incluya este tipo de deformación. Los modelos constitutivos elastoplásticos han sido ampliamente utilizados para describir el comportamiento del suelo agrícola [3 - 8]. Estos asumen al suelo como un material elástico lineal en bajas cargas,

hasta el esfuerzo de cedencia y a partir de éste un comportamiento plástico permitiendo además, tomar en cuenta la historia de esfuerzos anteriores al instante considerado.

Los modelos de estado crítico han sido ampliamente utilizados para representar la respuesta mecánica a compresión de los suelos agrícolas, algunos de los trabajos fueron publicados por Kirby y col. [9], Gysi, [10], Poodt y col. [11], Berli y col. [6]. Dentro de los modelos de estado crítico el Cam Clay, desarrollado por Roscoe y colaboradores [12], fue formulado para arcillas normalmente consolidadas o ligeramente sobreconsolidadas. Posteriormente fue modificado por Roscoe y Burland [13] (1968), dando lugar al modelo Cam Clay modificado. Ambos describen el comportamiento de suelos blandos como las arcillas [1] y su popularidad se debe a que son más exactos en la representación del cambio de volumen, son adecuados tanto para suelos cohesivos como friccionantes y son capaces de representar las más relevantes características del comportamiento de los suelos [9, 14]. Otra ventaja de los modelos Cam Clay es que sólo necesitan de cinco parámetros para describir la deformación elástica y plástica; los cuales están muy bien definidos en ensayos estandarizados. La respuesta elástica de estos modelos puede ser representada mediante el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν). Este último se asume con un valor entre 0.3 y 0.45, basado en el contenido de arcilla del suelo debido a que su obtención experimental muestra una cierta dificultad. Los parámetros de estado crítico que describen la respuesta mecánica del suelo son la pendiente de la línea de estado crítico (M), la pendiente de la línea de compresión normal (δ) y la pendiente de la línea de descarga (k).

Las leyes constitutivas implementadas a escala internacional se han desarrollado para suelos con propiedades diferentes a las encontrados en Cuba. Se han establecido principalmente para suelos de regiones templadas o frías. Debido a las inherentes variaciones de las propiedades los resultados de investigaciones realizadas con un tipo de suelo no son siempre aplicables a otros. Además, el comportamiento de las ecuaciones constitutivas varía en dependencia del tipo de suelo debiendo ser verificadas cuando se aplican a suelos diferentes.

Aunque el comportamiento de los parámetros de estado crítico se ha analizado con anterioridad, estas investigaciones se han realizado en su mayoría para suelos de zonas templadas. Sin embargo, existe poco conocimiento de su respuesta mecánica en las condiciones del trópico y muy pocos trabajos se han realizado que describan este tipo de comportamiento para los suelos agrícolas cubanos, en específico los Rhodic Ferralsoles [15]. Además, el desarrollo de la modelación demanda un incremento de la disponibilidad de datos de los distintos tipos de suelos, que permita ampliar las posibilidades de aplicación

del método de elementos finitos para la investigación de la compactación del suelo [16].

El objetivo de este trabajo es determinar la influencia de la densidad de volumen en parámetros elásticos y de estado crítico los cuales son utilizados como datos de entrada para la modelación de la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos.

4. Desarrollo

4.1. Material y métodos

El suelo utilizado es un Rhodic Ferralsol [17], proveniente de la zona agrícola del municipio San José de las Lajas, en la Provincia de La Habana, Cuba. Para el cual se determinaron las propiedades físicas, la granulometría y los límites de Atterberg. Las humedades y densidades se establecieron teniendo en cuenta los valores medios en condiciones de producción y los que originan mayor compactación (tabla 1). La humedad a la cual se deben efectuar las operaciones agrícolas es 0.85 a 0.95 LP [18], motivo por el cual se seleccionó la humedad del suelo de 25 g 100g⁻¹ para la realización de los ensayos.

La conformación de las probetas de suelo se realizó mediante el método de remoldeo. Al suelo se le adicionó la cantidad de agua necesaria para obtener la densidad y humedad requeridas, luego se densificó en un molde abierto con la ayuda de una prensa axial. Posteriormente permaneció en reposo durante una semana para alcanzar el equilibrio interno del suelo.

Se realizaron ensayos de compresión triaxial, rápidos, no drenados, sin consolidar y ensayos de compresión uniaxial. Los ensayos triaxiales se desarrollaron con cuatro especímenes, con presiones de cámara (σ_3) de 100, 200, 300 y 400 kPa, con tres réplicas por condición de suelo. La velocidad de rotura fue de 0.021 mm s⁻¹. Los ensayos de compresión uniaxial se realizaron en un edómetro. La secuencia de presiones a las que se sometieron las muestras fue de: 25, 50, 100, 200, 400 y 800 kPa, aplicándose durante 0.5 h. En cada una de ellas se registró la deformación final. Después de colocar la última carga se procedió al proceso de descarga en

sólo dos pasos. Se realizaron tres repeticiones para cada muestra. Las dimensiones de las probetas para el ensayo de compresión triaxial fueron 100 mm de altura por 50 mm de diámetro y en el ensayo de compresión uniaxial 19 mm de altura por 70 mm de diámetro.

Determinación de los parámetros elásticos y de estado crítico

Módulo de elasticidad (E). Se determinó como la pendiente de la línea tangente al tramo elástico de la curva esfuerzo deformación obtenida mediante los ensayos triaxiales. Se obtuvo E para cada presión de cámara y la media de E fue considerado como el módulo de elasticidad.

Pendiente de la línea de estado crítico (M). Se obtuvo a partir de los ensayos de compresión triaxial para cada presión de cámara. Se determinó el esfuerzo desviador máximo (q) y la presión normal media (P) a la que se produce éste. Posteriormente se calcula $M = q/P$.

Pendiente de la línea de compresión normal (λ). Se determinó el índice de compresión (C_c), a partir de los ensayos de compresión uniaxial, como la pendiente del tramo recto de la curva de compresión, en el plano índice de poros contra el logaritmo de la presión vertical aplicada. Después se obtuvo la pendiente de la línea de compresión normal como $\lambda = C_c/2.3$.

Pendiente de la línea de descarga (k). Se determinó el índice de descarga (C_s), a partir de los ensayos de compresión uniaxial, como la pendiente de la rama de descarga de la curva de compresión del suelo, en el plano índice de poros contra el logaritmo de la presión vertical aplicada. Después se obtuvo la pendiente de la línea de descarga como $k \sim C_s/2.3$.

4.2. Resultados y discusión

Las propiedades físicas del suelo (tabla 2) muestran que es franco arcilloso limoso, con un índice de plasticidad de 30.4, comportándose como un suelo plástico.

Tabla 1. Condiciones de suelos estudiados.

Humedad (θ), g 100g ⁻¹	Densidad de volumen (ρ_d), Mg m ⁻³
25	1.100
25	1.175
25	1.250

Tabla 2. Propiedades físicas del suelo.

G_s , Mg m ⁻³	Límites de consistencia, g 100 g ⁻¹			Granulometría, g 100 g ⁻¹			MO, g 100 g ⁻¹
	LL	LP	IP	arena	limo	arcilla	
2.69	61.10	30.70	30.40	19.00	43.00	38.00	3.01

donde, G_s : densidad real del suelo, LL: límite líquido, LP: límite plástico, IP: índice de plasticidad, MO: cantidad de materia orgánica en el suelo.

El módulo de elasticidad aumentó en forma no lineal en función de la densidad de volumen (figura 1). El análisis de varianza (para un intervalo de confianza del 95%, LSD) mostró que no hay diferencias significativas entre las medias de E para las ρ_d 1.175 y 1.25 Mg m^{-3} , no siendo así cuando se comparan con 1.1 Mg m^{-3} . Herrera [7, 17], obtuvo un incremento no lineal del módulo inicial de elasticidad (E_0) con el incremento de la densidad de volumen para este mismo tipo de suelo, pero a densidades de volumen y humedades diferentes. Mouazen [16], reporta un comportamiento similar para un Arenic Cambisol y para un suelo franco arenoso. Este comportamiento es el esperado debido a que, en el estado más compactado hay un contacto más cercano entre las partículas del suelo, lo cual aumenta su resistencia mecánica y rigidez; el suelo se comporta más elásticamente elevando su esfuerzo de fluencia. Mientras mayor sea el módulo de elasticidad, mayor la resistencia del suelo a la deformación, resultado que coincide con lo expresado por Raper y Erbach [19] y que se aprecia en la figura 2, donde se relacionan curvas esfuerzo-deformación para contenido de humedad constante (25%), lo cual muestra que aumenta el esfuerzo desviador máximo que soporta el suelo, a medida que se incrementa la densidad de volumen.

Este resultado se debe a la menor cantidad de aire y agua presente en la muestra de suelo, debido a que estos espacios han sido ocupados por partículas sólidas, las cuales se reorganizan e introducen en los poros durante el proceso de compactación, disminuyendo la porosidad y aumentando su resistencia a las fuerzas externas. La figura 2 muestra cómo a medida que aumenta la compactación del suelo, se favorece la falla frágil y en el suelo suelto se origina una falla plástica o flujo plástico.

El estado crítico del suelo se refiere al estado donde grandes deformaciones axiales ocurren sin que se produzcan cambios

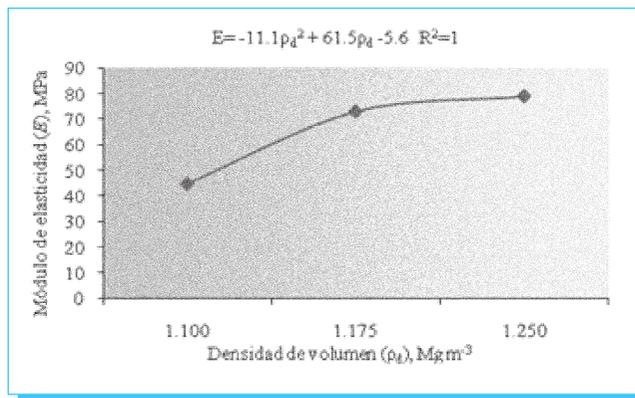


Fig. 1. Módulo de elasticidad, E en función de la densidad de volumen.

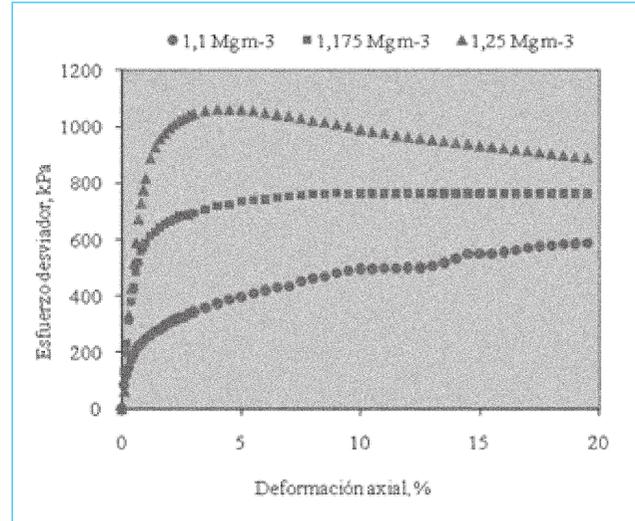


Fig. 2. Relación tensión cortante-deformación axial, para una muestra de suelo con 25% de humedad y densidades de volumen de \bullet 1.1 Mg m^{-3} , \blacksquare 1.175 Mg m^{-3} , \blacktriangle 1.25 Mg m^{-3} .

en el esfuerzo cortante o presión normal media. La figura 3 muestra la media de los valores de la pendiente de la línea de estado crítico para las cuatro presiones de confinamiento investigadas, determinándose aquí que ésta aumenta con el incremento de la densidad de volumen debido a la mayor rigidez del suelo más compacto. La pendiente de estado crítico para la muestra con 1.25 Mg m^{-3} fue 1.26 veces mayor que para la muestra con 1.1 Mg m^{-3} , dado que el empaquetamiento cercano entre las partículas del suelo más denso provocan mayor contacto friccional y mayor resistencia del suelo. La figura 4 muestra las pendientes de estado crítico determinadas a partir de los valores de M para cada presión de confinamiento. Resultados similares

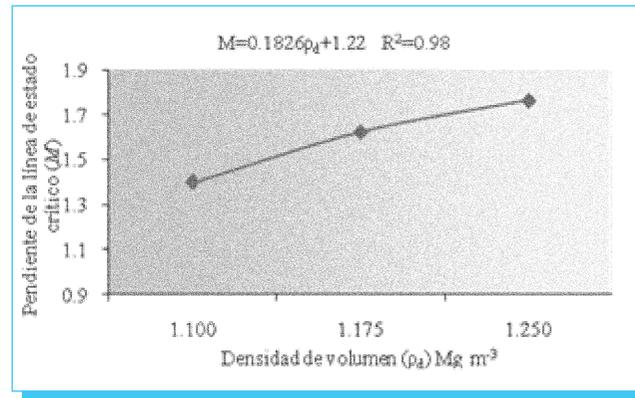


Fig. 3. Pendiente de la línea de estado crítico (M), en función de la densidad de volumen del suelo.

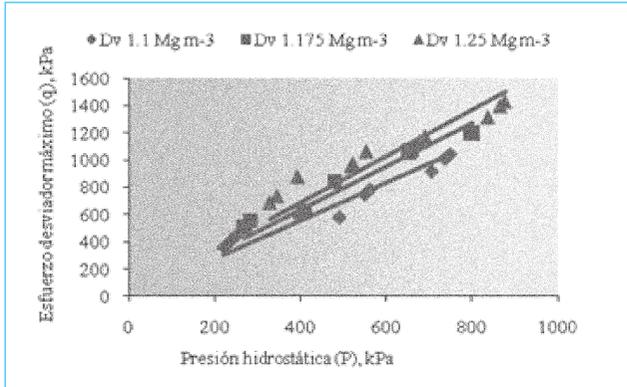


Fig. 4. Línea de estado crítico, muestras de suelo sometidas a compresión triaxial con presiones de confinamiento σ_3 de 100, 200, 300 y 400 kPa.

obtuvieron Medina y Maynar [20] para suelos saturados, coincidiendo con los reportados por Adams y Wulfsohn [21], los cuales son cercanos al máximo valor obtenido por Kirby [22] para vertisoles y por Adams [23] para suelos franco y arcilloso arenoso.

El comportamiento de la pendiente de la línea de compresión normal (figura 5) tiene una dependencia casi lineal de la densidad de volumen del suelo. Los mayores valores de λ se lograron para los suelos más sueltos debido a que éstos tienen un mayor espacio poroso, lo cual los hace más compactables que los suelos densos, coincidiendo con lo reportado por Kirby [22]. Valores similares a los obtenidos para los suelos más densos, analizados aquí, los alcanzó Adams [23] para un suelo arcilloso arenoso. Medina y Maynar [20] obtuvieron

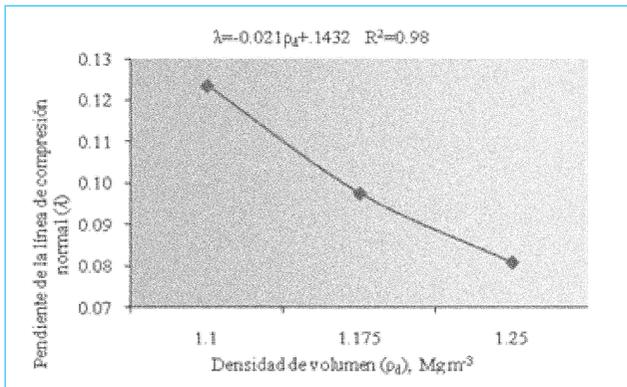


Fig. 5. Pendiente de la línea de compresión normal en función de la densidad de volumen.

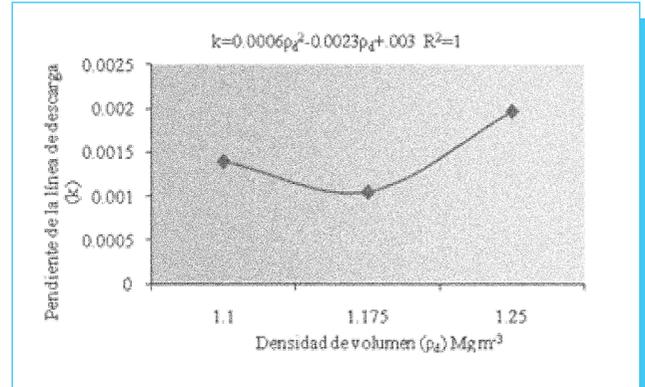


Fig. 6. Pendiente de la línea de descarga en función de la densidad de volumen.

valores de λ tres veces menores, debido a que los suelos saturados son más rígidos y la presencia de agua en sus poros, debido a la incompresibilidad de ésta, hacen que sean menos susceptibles a la compactación.

Los valores obtenidos para la pendiente de la línea de expansión o de descarga (figura 6) son menores en los suelos más sueltos, lo que manifiesta poca capacidad de recuperación. Sin embargo, aumenta para el suelo más compacto debido a que éstos soportan mayores cargas en el tramo elástico de deformación, teniendo mayor módulo de elasticidad. En sentido general los valores de k son bajos, coincidiendo con los resultados presentados por Kirby [22] y Adams y Wulfsohn [21].

5. Conclusiones

El incremento de la densidad de volumen a contenido de humedad constante, provoca variaciones en la respuesta mecánica de los parámetros elásticos y de estado crítico, que son empleados como datos de entrada para la modelación del suelo mediante el método de elementos finitos.

El módulo de elasticidad se incrementa con la densidad de volumen condicionando que aumente la rigidez, esfuerzo de fluencia, resistencia a la deformación y por lo tanto el esfuerzo desviador máximo que es capaz de soportar el suelo, el cual determina el comportamiento de parámetros plásticos como la pendiente de la línea de estado crítico, la cual sigue esa misma tendencia en su comportamiento.

Las pendientes de la línea de compresión normal y de descarga varían con el incremento de la densidad del suelo, debido a que en estado más compacto la compresibilidad es menor y mayor la respuesta elástica del suelo.

6. Referencias

- [1] Wulfsohn, D. y B.A. Adams. «Elastoplastic soil mechanics», en: *Advances in Soil Dynamics*, Vol. 2, St Joseph, Michigan, ASABE, 2002, pp. 1-116.
- [2] Desai, D.C. «Constitutive Modeling for Geologic Materials: Significance and Directions». *International Journal of Geomechanics*, Junio: 81-84, 2005.
- [3] Kirby, J.M. y F. Zoz. «Stress under belt and radial tyres with various wt distributions». *SAE Paper 972733*, 1997.
- [4] Shoop, A.S. *Finite element modeling of tire terrain interaction*. Tesis de doctorado en Ciencias Técnicas, Universidad del Estado de Michigan, Michigan, EU, 2001.
- [5] Fervers, C.W. «Improved FEM simulation model for tire-soil interaction». *Journal of Terramechanics*, (41): 87-100, 2004
- [6] Berli, M., B. Kulli, W. Attinger, M. Keller, J. Leuenberger, H. Flühler, S.M. Springman, R. Schulin. «Compaction of agricultural and forest subsoils by tracked heavy construction machinery». *Soil & Tillage Research* (75): 37-52, 2004.
- [7] Herrera, M. *Simulación del comportamiento mecánico de los suelos ferralíticos rojos mediante el método de elementos finitos*. Tesis de doctorado en Ciencias Técnicas Agropecuarias Universidad Agraria de la Habana, San José, Cuba, 2006.
- [8] González, O., CE. Iglesias, M. Herrera, E. López, A. Sánchez. «Modelación de la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos, aplicación a la selección de neumáticos», en memorias de: *Congreso Internacional AGROCENTRO 2009*, Universidad Central «Marta Abreu» de las Villas, Santa Clara, Cuba, 2009.
- [9] Kirby, J. M, S. Mockler y F. Zoz. «Influence of varying axle load and tire pressure on soil stresses and resulting compaction». *SAE paper 952096*, Warrendale, EU, 1995.
- [10] Gysi, M., «Compaction of an Eutric Cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland: Field data and critical state soil mechanics approach». *Soil & Tillage Research*, (61):133-142, 2001.
- [11] Poodt, M.P., A.J. Koolen, J.P. van der Linden. «FEM analysis of subsoil reaction on heavy wheel loads with emphasis on soil preconsolidation stress and cohesion». *Soil & Tillage Research* (73): 67-76, 2003.
- [12] Roscoe, K.H., A. Schofield y C.P. Wroth. 1958. «On the yielding of soils». *Geotechnique* 8: 22-53.
- [13] Roscoe, K. H. y J. B. Burland. «On the generalized stress-strain behaviour of 'wet' clay», En *Engineering Plasticity* (Heyman, J., F. A. Leckie, eds), Cambridge, Cambridge University Press, 535-609, 1968
- [14] Shoop, S., R. Affleck, V. Janoo, R. Haehnel y B. Barrett. «Constitutive model for a thawing, frost-susceptible sand». *US Army Corp of Engineers. ERDC/CRREL TR 05-3*, 2005.
- [15] González, O., C. Iglesias, M. Herrera, E. López, A. Sánchez. «Influencia de la humedad en parámetros elastoplásticos empleados para la modelación de la compactación del suelo». *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 17, no. 3, pp. 26-30, Cuba, 2008
- [16] Mouazem, M. A., J.R. Herman y J. De Baerdemacker. «Effects of bulk density and moisture content on selected mechanical properties of sandy loam soil». *Biosystems Eng. (UK)*, vol. 83, no. 2, pp. 217-224, 2002.
- [17] Herrera, M., C. Iglesias, O. González, E. López y A. Sánchez. «Propiedades mecánicas de un Rhodic Ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el Método de Elementos Finitos. Parte I». *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(3) 31-38, Cuba, 2008.
- [18] Barzegar, A.R., Hashemi, A.M., Herbert, S.J. y Asoodar, M.A., «Interactive effects of tillage system and soil water content on aggregate size distribution for seedbed preparation in Fluvisols in southwest Iran». *Soil and Tillage Res.* 78, 45-52, 2004.
- [19] Raper, R.I, Dc Erbach. «Effects of variable linear elastic parameters on finite element predictions of soil compaction». *Transaction of ASAE*, vol. 33, no. 3, pp. 731-736, 1990.
- [20] Medina, I. y M.M. Maynar. «Determinación de los parámetros del modelo de estado crítico Cam Clay para los suelos de Madrid». *Revista de Obras Públicas*, vol. 343, no. 2, pp. 29-45, 2003.
- [21] Adams, B.A. Y D. «Wulfsohn. Critical-state behavior of an agricultural soil». *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol.70, pp. 341-354, 1998.
- [22] Kirby, J. M. «Critical state soil mechanics parameters and their variation for vertisols in eastern Australia». *Journal of Soil Science*, 42: 487-499, 1991
- [23] Adams, B. A. *Critical state behavior of an agricultural soil*. Tesis de doctorado en Ciencias Técnicas. Universidad de Saskatchewan, Saskatoon, Canadá, 1996.

ACE-X 2010. 8 y 9 de julio 2010, París, Francia.

www.ace-x2010.com