

TECNOLOGÍA MECÁNICA

ARTÍCULO ORIGINAL

Simulación de la respuesta mecánica de un suelo mediante el Método de los Elementos Distintos

Simulation of the mechanical response of a soil by means the Distinct Elements Method

Dr. C. Ángel Lázaro Sánchez Iznaga¹, Dr. C. Miguel Herrera Suárez¹¹, M.Sc. Yoandry Socarrás Armentero¹, M.Sc. Reinaldo Pérez Arma¹, Ing. Jorge Daniel López Morfá¹¹¹.

¹ Universidad de Cienfuegos, Dpto. Tecnología Agropecuaria, Cienfuegos, Cuba.

¹¹ Universidad Central de Las Villas, Dpto. Mecanización Agropecuaria, Villa Clara, Cuba.

¹¹¹ Taller Raúl Suárez. Santa Elena, Rodas, Cienfuegos, Cuba.

RESUMEN. En el presente trabajo se simuló el comportamiento mecánico de un suelo Ferralítico Cuarcítico Amarillento Rojizo Lixiviado requerido por el MED para la simulación del desgaste abrasivo de los aperos de labranza. Para el cumplimiento del objetivo planteado se desarrolló un modelo numérico para la simulación del ensayo de corte directo de un espécimen de cilíndrico de suelo, donde el mismo es obligado a fallar a cortante debido a la acción conjunta de una carga normal y desplazamiento longitudinal de la caja de corte, tal y como se realizan en los ensayos convencionales en los laboratorios de mecánica de suelos. Para la ejecución de este ensayo se utilizó la consola de programación del software YADE, la cual permite la ejecución del modelo y la visualización de la caja de corte y la probeta de suelo durante el ensayo. La probeta de suelo se generó en 3D, conformada por un total de 20 550 partículas esféricas distribuidas aleatoriamente. El diámetro de las partículas osciló entre 0,5 y 0,9 mm. El ensayo se realizó empleando presiones normales (σ) de 25, 50, 75 y 100 kPa, y la velocidad del mismo se mantuvo constante a 1,2 mm·min⁻¹. Los resultados de la simulación fueron comparados con los experimentales. Los resultados permiten concluir que el modelo numérico implementado predice con exactitud, tanto la tensión máxima de corte del suelo para las presiones normales empleadas, así como el comportamiento plástico del suelo para las presiones normales 50, 75 y 100 kPa.

Palabras clave: Simulación de corte directo, propiedades macros, parámetros micros.

ABSTRACT. In this work was simulated the mechanical behavior of an Ultrasol required by the MED for the simulation of the abrasive waste of the farm implements. For the execution of the outlined objective a numeric model was developed for the simulation of the test of direct cutting of a cylindrical specimen of soil, where the same one is forced to fail to sharp due to the combined action of a normal load and longitudinal displacement of the cutting box, such and like they are carried out in the conventional tests in the laboratories of mechanics of soils. For the execution of this test was used the programming console of the software YADE, that allows the execution of the pattern and the visualization of the cutting box and the test tube of soil during the test. The soil test tube was generated in 3D, conformed by a total of 20 550 spherical particles randomly distributed. The diameter of the particles oscillated between 0.5 and 0.9 mm. The test was carried out using normal pressures (σ) of 25, 50, 75 and 100 kPa, and the speed stayed constant to 1.2 mm·min⁻¹. The results of the simulation were compared with the experimental ones. The results allow concluding that the numeric pattern implemented predicts with accuracy the maximum tension of cutting of the soil for the normal pressures used as well as the plastic behavior of the soil for the normal pressures 50, 75 and 100 kPa.

Keywords: Simulation of direct cutting, properties macros, parameters micros.

INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento mecánico del suelo es un requisito indispensable para el desarrollo de investigaciones relacionadas con la interacción suelo-apero de labranza (Chi y Kushwaha, 1990; Chi, 1993; Fielke, 1999; Durán, 2002; Moua-

zem, 2002; Herrera *et al.*, 2008; González *et al.*, 2008; Nieto y Fernando, 2009; De La Rosa *et al.*, 2011).

El comportamiento mecánico del suelo, por lo general ha sido estudiado mediante ensayos experimentales que se realizan en los laboratorios de mecánica de suelo.

Los ensayos más usados han sido el triaxial y el cortante directo, los cuales dependen del tipo de suelo a investigar.

En la actualidad, con el desarrollo de la ciencia de la computación aplicada a la solución de problemas ingenieriles, se han creado los métodos numéricos de los cuales el Método de los Elementos Distintos MED ha tenido éxito en la simulación de este ensayo (Indraratna and Ngo, 2014).

El Método de los Elementos Distintos (MED) trata el suelo como un medio discontinuo conformado por partículas que interactúan entre sí bajo determinadas leyes de contacto, pudiendo simularse de forma simultánea tanto el daño como la fractura que ocurren como una consecuencia genérica del resbalamiento y la separación de las partículas a escala microscópica, además permite modelar el movimiento de las discontinuidades a nivel microscópico y macroscópico (Asaf *et al.*, 2007; Coetzee *et al.*, 2007; Khot *et al.*, 2007; Coetzee and Els, 2009; Coetzee *et al.*, 2009; López *et al.*, 2012).

Los elementos discretos que conforman el medio se desplazan de manera independiente unos de otros, trayendo como resultado que interactúen entre sí describiendo un movimiento de traslación y rotación, cambiando de posición en el tiempo bajo la acción de fuerzas de contacto y las fuerzas volumétricas. Estos cambios de posición están referidos a un sistema de coordenadas globales que definen la ubicación de las partículas en el espacio global, y a un sistema de coordenadas locales que identifica la ubicación de estas con respecto al sistema de coordenadas global y al resto de las partículas vecinas.

El MED requiere para la simulación del comportamiento mecánico del suelo los parámetros referidos a la macro y microestructura (López *et al.*, 2012), que en el primer caso definen la rigidez del suelo y en el segundo la rigidez del modelo de contacto entre partículas. La definición de uno u otro parámetro está dada por el software a emplear.

En la actualidad, a pesar de la existencia de software para la simulación en (MED), uno de los que se encuentra disponible como software libre es el Yet Another Dynamic Element (YADE). Este software requiere como parámetros de entrada para la simulación del comportamiento mecánico del suelo los parámetros macroestructurales: módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν), cohesión (c), fricción interna del suelo (ϕ), los cuales son determinados experimentalmente, sin embargo, los parámetros micros: rigidez

normal (K_N), rigidez tangencial (K_T) y coeficiente de Coulomb (μ) pueden ser estimados a partir de las relaciones físicas que existen entre ambos.

Tomando en cuenta lo anterior se decide realizar este trabajo que tiene como objetivo simular el comportamiento mecánico de un Ultrasol requerido por el (MED) para la simulación del desgaste abrasivo de los aperos de labranza.

MÉTODOS

Fundamentación de un modelo en MED

para la simulación de la respuesta mecánica del suelo

La fase de programación del modelo se desarrolló en el Dpto. de Tecnología Agropecuaria de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Cienfuegos, mediante el empleo del manual de usuario del lenguaje de programación Python y el del software Yet Another Dynamic Engine (YADE) versión yade_0.70.0-5, el cual requiere para su uso el Sistema Operativo Linux, versión Ubuntu 12.04.

Para la ejecución de este ensayo se utilizó la consola de programación del software (YADE), la cual permite la ejecución del modelo o código que ha sido programado y la visualización de la caja de corte y la probeta de suelo durante el ensayo, así como el gráfico que muestra en tiempo real los resultados de la simulación.

Descripción del problema objeto de simulación

Se simuló el ensayo de corte directo de un espécimen de cilíndrico de suelo, donde el mismo es obligado a fallar a cortante debido a la acción conjunta de una carga normal y desplazamiento longitudinal de la caja de corte.

El suelo se define como Ultrasol según la USDA Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014), y como un suelo Ferralítico Cuarcítico Amarillento Rojizo Lixiviado, según la 2da Clasificación Genética de los Suelos en Cuba (Cairo y Quintero, 1980).

Definición del modelo virtual

El modelo representa en forma ideal un ensayo de corte directo de suelo, de los que se realizan convencionalmente en los laboratorios de mecánica de suelos (Figura 1).

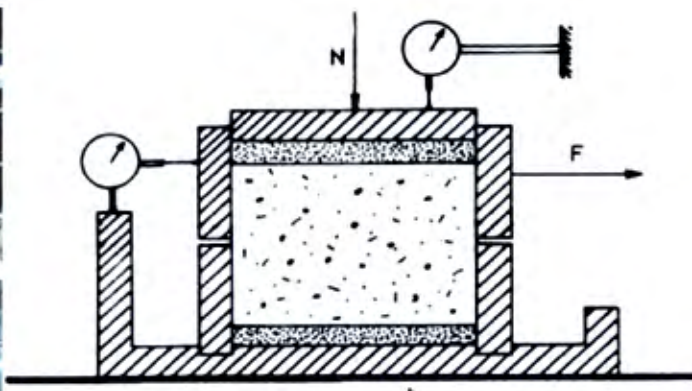
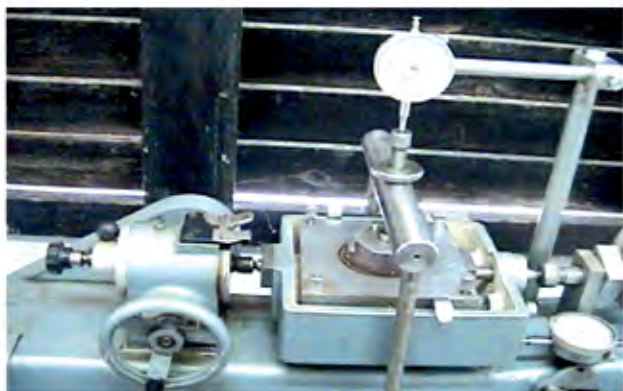


FIGURA 1. Aparato de corte directo.

Este modelo muestra una caja de corte en 3D que está compuesta por dos elementos cilíndricos que confinan la muestra de suelo (1), piso intermedio para evitar la caída al exterior de las partículas de suelo (2), plancha rectangular que comprime la probeta de suelo (3) y suelo (4) (Figura 2b). Sus dimensiones coinciden con la de los elementos empleados en los ensayos experimentales (Figura 2b).

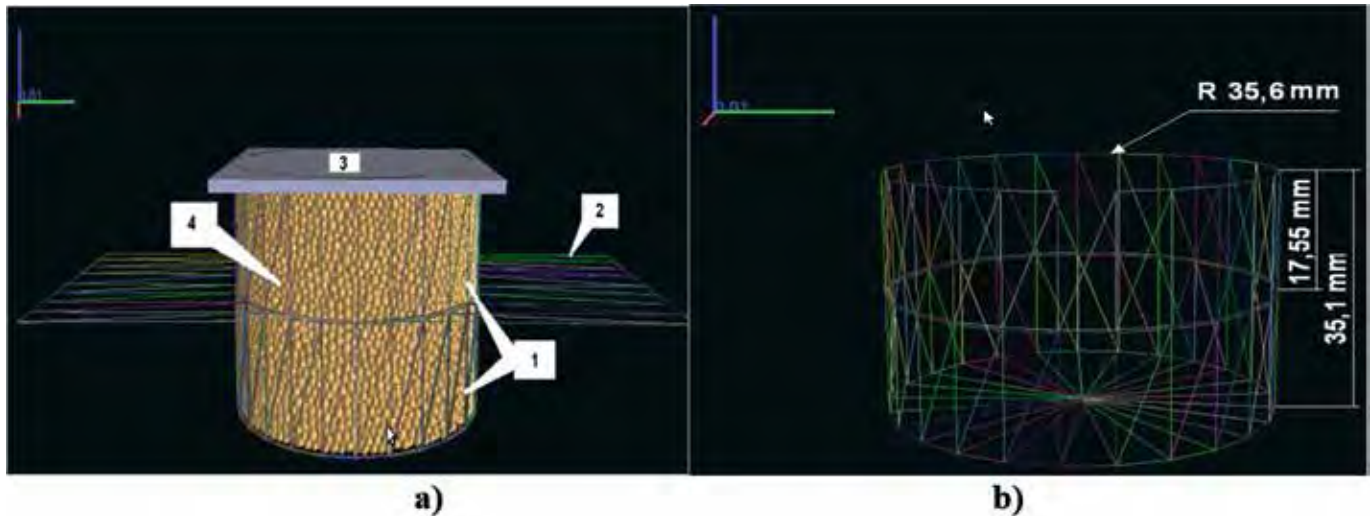


FIGURA 2. Caja de corte virtual. a) Partes componentes: Cilindros para confinamiento (1), piso intermedio (2), plancha para comprimir (3) y suelo (4); b) dimensiones.

La probeta de suelo se generó en 3D, siguiendo el procedimiento establecido en el manual de usuario del software YADE. Para esto se empleó el generador de partículas **pack.randomDensePack**. La misma está conformada por un total de 20 550 partículas esféricas distribuidas aleatoriamente. El diámetro de las partículas osciló entre 0,5 y 0,9 mm.

Condiciones de Fronteras. Durante el corte del suelo se permitió el desplazamiento libre del elemento rectangular ubicado en la parte superior de la caja de corte, en ambos sentidos de la vertical, producto de la acción del peso propio del mismo (Figura 3). Dicho elemento ejerce una presión semejante a la

presión normal (σ), empleada en los ensayos experimentales (25, 50, 75, 100 kPa). Se limitó el movimiento del mismo en el resto de los ejes. Al cilindro superior de la caja de corte se le restringió movimiento en los tres ejes de coordenadas. Al cilindro inferior de la caja de corte, se impuso un desplazamiento de 50 mm en sentido positivo del eje Y, es decir se permitió su traslación sobre el plano horizontal, tal y como se muestra en la Figura 3. La velocidad de desplazamiento se mantuvo constante a $1,2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. A las partículas de suelo se les permitió la libertad de movimiento de traslación y rotación, según la acción de las cajas de corte que las confinan.

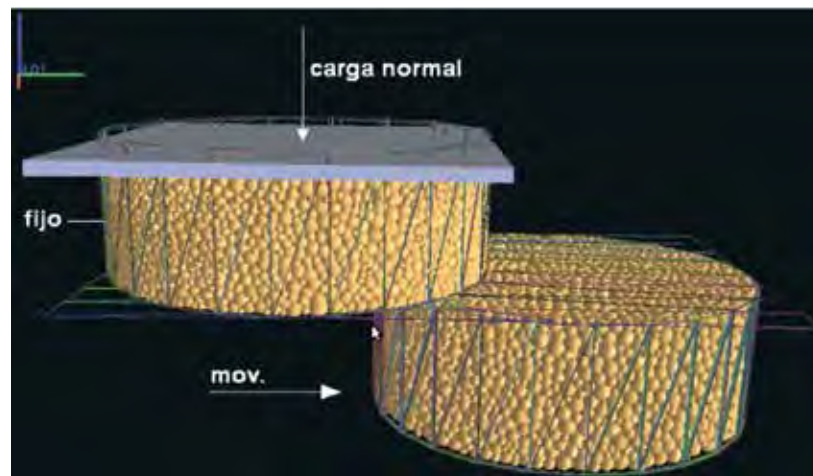


FIGURA 3. Condiciones de frontera del modelo virtual.

Modelo constitutivo de contacto

Contacto suelo-suelo

El modelo constitutivo de contacto entre las partículas de suelo, fue formulado tomando en cuenta que en la dirección

normal del contacto, las mismas tendrán una reacción viscoelástica que está dada por la inclusión de la rigidez normal (K_n) y la constante viscosa en la dirección normal (C_n), representada por la acción de un muelle y un amortiguador trabajando en paralelo, según el Modelo de Kelvin (Figura 4a). En el sentido

tangencial del contacto el modelo constitutivo comprende una reacción elástica del suelo representada por la rigidez tangencial (K_T), la constante viscosa en la dirección tangencial (C_T), además de la acción de la fricción interpartículas dada por el coeficiente de Coulomb (μ) que se tomará como dato la fricción interna del suelo (Figura 4b).

Contacto entre las partículas de suelo y las paredes de la caja de corte

Para el caso del modelo constitutivo de contacto entre las partículas de suelo y las paredes de la caja de corte (Figura 4b),

se formuló de forma similar al caso anterior, con la diferencia que el coeficiente de fricción que se tomó como dato, corresponde a la fricción externa correspondiente a la fricción suelo-metal.

TABLA 1. Parámetros del suelo para la simulación

Parámetros	Valores
E (kPa)	1 300 000-1 500 000-2 000 000-3 000 000
ν (-)	0,35
c (kPa)	8,19
ϕ (°)	31,44
ρ (kg cm ⁻³)	12 235
R (mm)	0,2-0,9

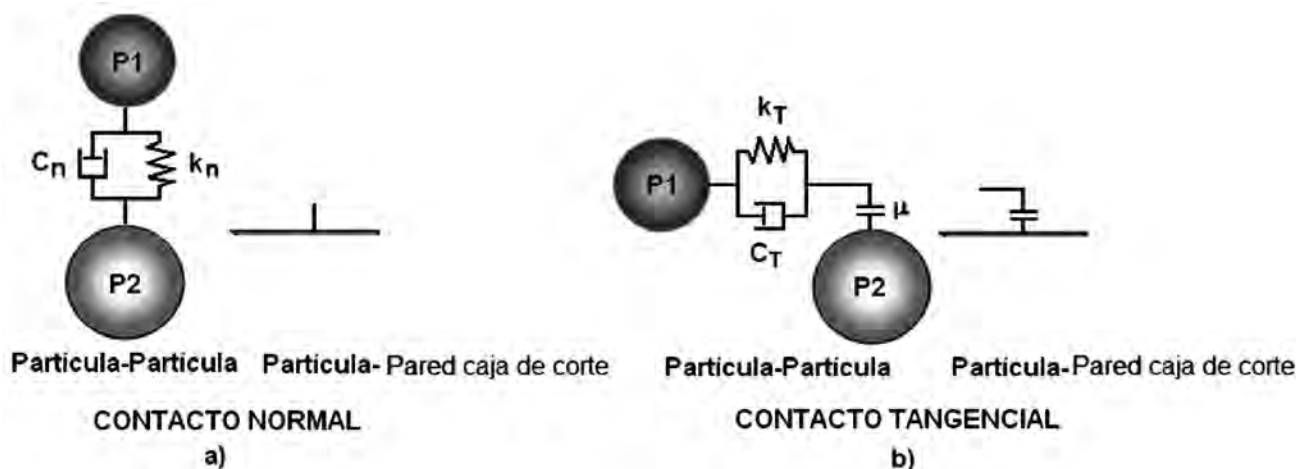


FIGURA 4. Modelo constitutivo de contacto interpartículas y partículas-pared de la caja de corte. a) contacto en la dirección normal, b) contacto en la dirección tangencial.

Metodología para la simulación de la respuesta mecánica del suelo en estudio

La respuesta mecánica del suelo se simuló graficando en un sistema de coordenadas (τ, ϵ) los valores de tensión cortante contra el desplazamiento tangencial de la muestra de suelo, tal y como se realizó en el ensayo experimental. La tensión de corte se determinó dividiendo los valores de las fuerzas que ejercen las partículas de suelo en las paredes traseras del cilindro inferior de la caja de corte entre el área de dichas paredes. Este parámetro se expresó en kPa, y se calculó mediante la fórmula siguiente:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

donde:

F – fuerzas de las partículas de suelo, N;

A – área de las paredes, m².

La simulación se realizó variando el radio de las partículas y se mantuvo constante los demás parámetros. Los resultados de la simulación fueron comparados con los experimentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la simulación en MED

Los resultados de la simulación de la respuesta mecánica del suelo muestran que en la medida que disminuye el valor de la presión normal usado en la simulación, el modelo predice con menor exactitud el comportamiento plástico del suelo respecto a las curvas experimentales (Figura 5). La tendencia mostrada puede estar dada por la imposibilidad que tiene el modelo a simular el ablandamiento del suelo cuando la presión normal es 25 kPa, tendencia encontrada por Indraratna *et al.* (2014). En el caso de la parte elástica se observa buen ajuste en las pendientes de las curvas respecto a las experimentales, tendencia encontrada por Indraratna *et al.* (2014).

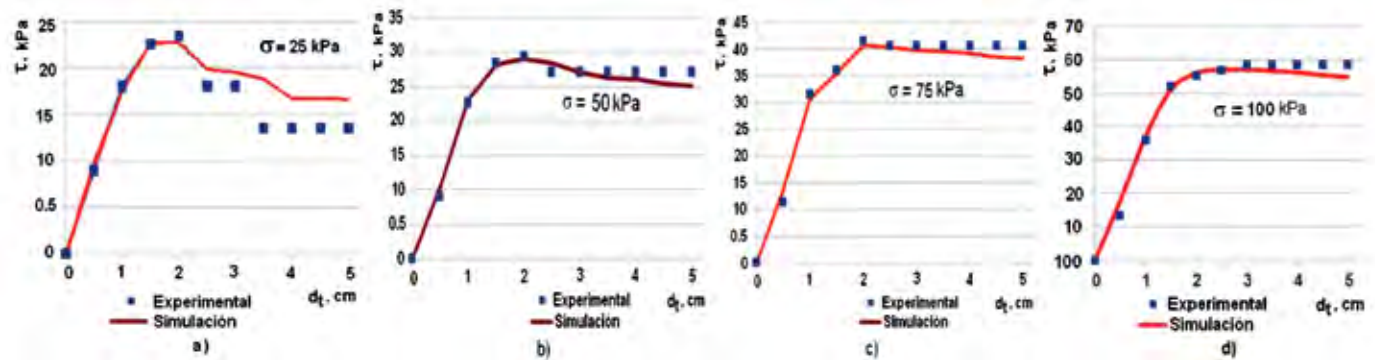


FIGURA 5. Curvas de tensión de corte contra desplazamiento tangencial para diferentes presiones normales. a) presión normal 25 kPa, b) presión normal 50 kPa, c) presión normal 75 kPa y d) presión normal 100 kPa.

En la Figura 6 se muestra que el modelo numérico predice con gran exactitud el valor máximo de la tensión de corte para todos los valores de presión normal usados en la simulación.

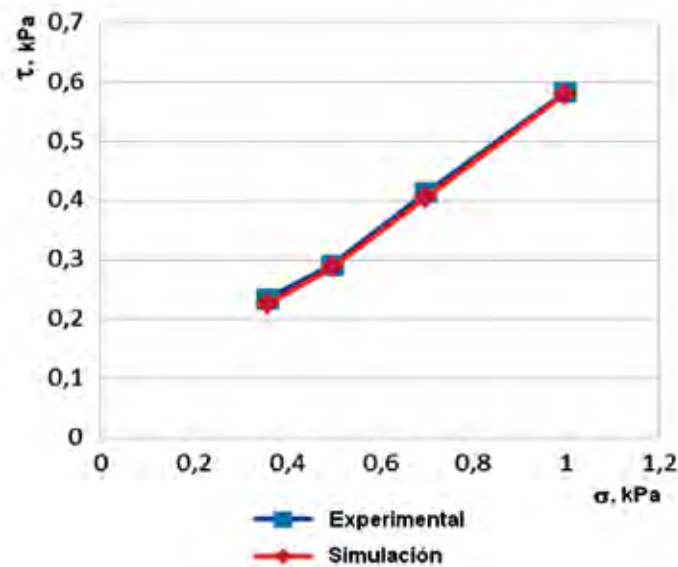


FIGURA 6. Curvas de tensión de corte contra presión normal.

CONCLUSIÓN

- Tomando en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación se llegó a la siguiente conclusión:
- El modelo numérico implementado permite predecir con

exactitud, tanto la tensión máxima de corte del suelo para las presiones normales empleadas, así como el comportamiento plástico del suelo para las presiones normales 50, 75 y 100 kPa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASAF, Z.; D. RUBINSTEIN & I. SHMULEVICH: "Determination of discrete element model parameters required for soil tillage", *Journal of Soil & Tillage Research*, ISSN 0167-1987, 92(1): 227-242, 2007.
- CAIRO, P. y G. QUINTERO: Suelos, 475pp., Ed. Pueblo y Educación, ISBN 959-13-0209-6, La Habana, Cuba, 1980.
- CHI, L. & AND R. L. KUSHWAHA: "A non-linear 3D finite element analysis of soil failure with tillage tools", *Journal of Terramechanics*, ISSN 0022-4898, 27(4): 343-366, 1990.
- CHI, L.: "An elastoplastic constitutive model for agricultural cohesive soil", *Journal Canadian Agricultural Engineering*, ISSN 0045-432X, 35(4): 245-251, 1993.
- COETZEE, C. J. & D. N. ELS: "Calibration of granular material parameters for DEM modelling and numerical verification by blade-granular material interaction", *Journal Terramechanics*, ISSN 0022-4898, 30(46): 15-26, 2009.
- COETZEE, C. J.; A. H. BASSON & AND P. A. VERMEER: "Discrete and continuum modelling of excavator bucket filling", *Journal Terramechanics*, ISSN 0022-4898, 44: 177-186, 2007.
- COETZEE, C. J.; D. N. ELS & G. F. DYMOND: "Discrete element parameter calibration and the modeling of dragline bucket filling", *Journal Terramechanics*, ISSN 0022-4898, 30: 1-12, 2009.

- DE LA ROSA, A. A. A.; S. M. HERRERA y C. O. GONZÁLEZ: "Propiedades Macroestructurales de un Vertisuelo requeridas para la simulación computacional de la interacción suelo-apero de labranza mediante el Método de Elementos Finitos (MEF)", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 20(2): 1-15, 2011.
- DURÁN, G. H. M.: "Efecto de la humedad en la resistencia mecánica de un suelo franco", *Journal of Terra Latinoamericana*, ISSN 2395-8030, 20(3): 227-234, 2002.
- FIELKE, M. J.: "Finite element modeling of the interaction of the cutting edge of tillage implements wet soil", *Journal Agriculture Engineering Research*, ISSN 1095-9246, 74: 91-101, 1999.
- GONZÁLEZ, C. O.; C. C. IGLESIAS; S. M. HERRERA; E. B. LÓPEZ y Á. L. I. SÁNCHEZ: "Influencia de la humedad en parámetros elastoplásticos empleados para la modelación de la compactación del suelo", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 17(3): 1-5, 2008.
- HERRERA, M. S.; C. C. IGLESIAS; C. O. GONZÁLEZ; B. E. LÓPEZ y I. Á. L. 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*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 17(3): 31-38, 2008.
- INDRARATNA, B., N. NGO; C. RUJIKIATKAMJOM & J. VINOD: "Behavior of Fresh and Fouled Railway Ballast Subjected to Direct Shear Testing: Discrete Element Simulation", *Journal of Geomechanics*, ISSN 1943-5622, 14(1), 34-44, 2014.
- KHOT, L. R.; V. M. SALOKHE; H. P. W. JAYASURIYA & H. NAKASHIMA: "Experimental validation of distinct element simulation for dynamic wheel-soil interaction", *Journal Terramechanics*, ISSN 0022-4898, 44 (6): 429-437, 2007.
- LÓPEZ, E.; M. HERRERA; O. GONZÁLEZ; E. B. TIJSKENS y H. RAMÓN: "Determination of basics mechanical properties in a tropical clay soil as a function of dry bulk density and moisture", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, 21(3): 5-11, 2012.
- MOUAZEM, M. A.: "Mechanical behavior of the upper layers of a sandy loam soil under shear loading", *Journal of Terramechanics*, ISSN 0022-4898, 39(3): 115-126, 2002.
- NIETO, A. L. Y J. C. T. FERNANDO: "Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos mohr-coulomb y hardening soil en suelos arcillosos", *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, ISSN 1692-3324, Medellín, Colombia. 8(15): 146. 2009.
- SOIL SURVEY STAFF: *Keys to Soil Taxonomy*, USDA Natural Resources Conservation Service, Twelfth Edition, ISBN-13: 978-0160923210, 346pp., Washinton, DC, 2014.

Recibido: 27/09/2014.

Aprobado: 14/11/2015.

Publicado: 05/12/2015.

Ángel Sánchez Iznaga, Prof. Auxiliar, Universidad de Cienfuegos. Dpto. Tecnología Agropecuaria, Cienfuegos. CP: 59430. Correo electrónico: alsanchez@ucf.edu.cu

Miguel Herrera Suárez, Correo electrónico: miguelhs2000@yahoo.com

Yoandry Socarrás Armentero, Correo electrónico: alsanchez@ucf.edu.cu

Reinaldo Pérez Arma, Correo electrónico: alsanchez@ucf.edu.cu

Jorge Daniel López Morfa, Correo electrónico: alsanchez@ucf.edu.cu

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.



**Instituto de Investigaciones
de Ingeniería Agrícola**



**DATOS DE LOCALIZACIÓN DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA (IAgriC)**

Sede Boyeros:

Dirección General y Económica. Dirección: Carretera de Fontanar, km 2½, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba. E-mail: IAgriCdireccion@minag.cu; direccion.general@iagric.cu Teléfonos: (53) (7) 645-1731; 645-1353.

Sede Arroyo Naranjo:

Direcciones Científica y de Desarrollo Institucional, Unidad de Producciones Tecnológicas y Comercial. Dirección: Avenida Camilo Cienfuegos y Calle 27, Municipio Arroyo Naranjo, Apartado Postal 6090, Habana 6, Cuba. E-mail: directorad junta@iagric.cu Teléfonos: (53) (7) 691 2533/ 691 2665 Telefax: (53) (7) 691 7595/ 691 1038.