



Effect of the Geometry of the Arm of a Vibratory Scarifier

Efecto de la geometría de la cuña del brazo de un escarificador vibratorio

MSc. Luis Orlando Marín-Cabrera*; Dr.C. Armando Eloy García de la Figal-Costales; Dr.Cs. Arturo Martínez-Rodríguez
Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

ABSTRACT. Both draft force and soil breaking up of clods of soil are in function of the kind of tool, geometry and operational conditions. In order to analyze the effect of the conditions of operation (density of mesh) and the geometry (fluffed angle of wedge) in the tractional force of a vibratory scarifier of curved arm tilling a Rhodic Ferralsol soil, the soil was considered as homogeneous material. The model extended linear Drucker Prager's elastoplastic of constitutive relation was used for this modelation by finite elements and soil-tillage tool interaction was modeled with surface to surface contact and the software Solid Works and its complement simulation were used. When increasing the angle of attack of the wedge, the grade increases in displacement of the particles of soil, both, in the direction of advance of the tool and in vertical sense, and the values of the tensions of contact in the nodes grow, mainly located in the tip of the tillage tool of cultivation and the plane of the undersurface of the deformed soil prism.

Keywords: Finite elements, force of traction, density of mesh, fluffed angle of wedge.

RESUMEN. Tanto las fuerzas de tracción como las desterrnamiento del suelo están en función del tipo de herramienta, geometría y condiciones de operación. Para analizar el efecto de las condiciones de operación (densidad de malla) y la geometría (ángulo de mullido de la cuña) en las fuerzas de tracción de un escarificador vibratorio de brazo curvo labrando un suelo Rhodic Ferralsol, se consideró el suelo como material homogéneo, siendo empleado el modelo elastoplástico de relación constitutiva de Drucker-Prager extendido lineal para su modelación por elementos finitos y la interacción suelo-herramienta de labranza con modelo de contacto superficie a superficie, mediante el software utilizado fue Solid Works y su complemento simulation. Al aumentar el ángulo de ataque de la cuña aumenta el grado de desplazamiento de las partículas del suelo, tanto en la dirección de avance de la herramienta como en sentido vertical, crecen los valores de las tensiones de contacto en los nodos, localizadas fundamentalmente en la punta de la herramienta de labranza y el plano de la superficie inferior del prisma de suelo deformado.

Palabras clave: elementos finitos, fuerza de tracción, densidad de malla, ángulo de mullido de la cuña.

INTRODUCTION

The acting force in the farming tools affect directly the energy consumption of tillage operations. About half of the energy used for harvest production in agriculture is consumed in tillage

INTRODUCCIÓN

Las fuerzas actuantes en las herramientas de labranza afectan directamente el consumo energético de las operaciones de cultivo. Cerca de la mitad de la energía utilizada para la producción de las

*Author for correspondence: Luis Orlando Marín Cabrera, e-mail: luismc@unah.edu.cu

Received: 15/09/2019.

Approved: 13/03/2020.

operations because of the magnitude of cutting forces generated when fault and breaking up of soil clods happen (Davoudi *et al.*, 2008; Armin *et al.*, 2015). Some studies have been focused to the measuring of draft force and power requirements of tillage tools under some soil conditions (Grisso *et al.*, 1996). The determination of draft force, necessary for the soil tillage, has gotten the attention of several researchers since 60s of last century Hettiaratchi *et al.* (1966); Gill & VandenBerg (1968), to nowadays (Abo *et al.*, 2011; Ibrahmi *et al.*, 2015) The draft force depends on factors related with tool geometry, soil resistance and operation parameters (Armin *et al.*, 2014; Moeinfar *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2015; Ahmadi, 2016).

Several researchers have used both analytical and numerical methods to investigate the soil fault process and soil-tillage tool interaction (Elbashir *et al.*, 2014). Entre los métodos numéricos, el método de elementos finitos (MEF) ha demostrado ser útil en la comprensión Among numerical methods, the Finite Element Method (FEM) has demonstrated to be useful in the comprehension, research, description and solution of these problems. It has been developed to model soil tillage and fault processes Bentaher *et al.* (2013), to model simple tools of wedge or plow shear Davoudi *et al.* (2008), curved bent leg plows (Jafari *et al.*, 2006), disc plows Abu & Reeder (2003), and moldboards plows (Plouffe *et al.*, 1999; Formato *et al.*, 2005; Jeshvaghani *et al.*, 2013).

Also, the effects of displacement velocity, working depth and attack angle of tillage tool in draft have been studied by this method (Yong y Hanna, 1977; Chi y Kushwaha, 1990; Abo *et al.*, 2003).

Some researchers have attempted improve the tillage tool geometry using physical experiments (Soni *et al.*, 2007), while mathematic simulations were also considered in other investigations (Shrestha *et al.*, 2001). In other research works, the influence of operational conditions in the energy consumption of tillage tool was studied (Al-Janobi y Al-Suhaibani, 1998; Moitzi *et al.*, 2014; Ehrhardt *et al.*, 2001).

The main objective of this work was to study the influence of the density of mesh and the angle of fluffed of the arm of a scarifier in traccional forces, the tensions of contact between the nodes, as well as deformations and fault of the ground for the tool of cultivation, utilizing the Finite Element Method and extended Drucker Prager's Model.

METHODS

Model for Soil. The mechanical behavior of soil under external tillage load is modelled with different yield approaches (Ibrahmi *et al.*, 2015). Several researchers have utilized the Drucker-Prager yield approach and its extended forms (lineal, hyperbolic and exponential) to simulate the interaction between soil and different tools used in civil engineering, excavations and tillage (Li *et al.*, 2013). In the present paper, the soil was modeled as continuous, homogeneous and elastoplastic, using the lineal form of the extended Drucker-Prager Model (Figure 1) employee with success by Herrera (2008a, 2008b), given the simplicity of it and the small amount of parameters required for its imple-

cosecas en la agricultura es consumida en las operaciones de cultivo, debido a la magnitud de las fuerzas de corte generadas cuando ocurre el rompimiento o aflojamiento del suelo (Davoudi *et al.*, 2008; Armin *et al.*, 2015). Muchos estudios han sido dirigidos a la medición de las fuerzas de corte y los requerimientos de potencia de los implementos de cultivo bajo varias condiciones del suelo (Grisso *et al.*, 1996). La determinación de la fuerza de corte, necesaria para el cultivo del suelo ha llamado la atención de varios investigadores desde los años sesenta del pasado siglo Hettiaratchi *et al.* (1966); Gill & VandenBerg (1968), a la actualidad (Abo *et al.*, 2011; Ibrahmi *et al.*, 2015). La misma depende de factores relacionados con la geometría de la herramienta, resistencia del suelo y los parámetros de operación (Armin *et al.*, 2014; Moeinfar *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2015; Ahmadi, 2016).

Varios investigadores han utilizado tanto métodos analíticos como numéricos para investigar el proceso de corte del suelo y la interacción suelo-herramienta de labranza (Elbashir *et al.*, 2014). Entre los métodos numéricos, el método de elementos finitos (MEF) ha demostrado ser útil en la comprensión, investigación, descripción y solución de estos problemas. Ha sido desarrollado para los procesos de corte del suelo (Bentaher *et al.*, 2013), para modelar el cultivo, desde herramientas simples como rejas Davoudi *et al.* (2008), arados de brazo curvo Jafari *et al.* (2006), arados de disco Abu y Reeder (2003), hasta arados de vertedera (Plouffe *et al.*, 1999; Formato *et al.*, 2005; Jeshvaghani *et al.*, 2013). Además, los efectos de la velocidad de corte, profundidad de corte y el ángulo de corte de la herramienta de labranza en las fuerzas de tracción, han sido también estudiados por este método (Yong y Hanna, 1977; Chi y Kushwaha, 1990; Abo *et al.*, 2003).

Algunos investigadores han intentado perfeccionar la geometría de las herramienta de cultivo utilizando experimentos físicos Soni *et al.* (2007), mientras simulaciones matemáticas también fueron consideradas en otras investigaciones (Shrestha *et al.*, 2001). En otros trabajos de investigación se estudió la influencia de las condiciones de operación en el consumo de energía de las herramientas de cultivo (Al-Janobi y Al-Suhaibani, 1998; Moitzi *et al.*, 2014; Ehrhardt *et al.*, 2001).

El objetivo general de este estudio es analizar, de modo comparativo, utilizando el método de elementos finitos y el criterio de fluencia de Drucker-Prager extendido, la influencia de la densidad de malla y la geometría del brazo escarificador (ángulo de corte) en las fuerzas de corte, las tensiones de contacto entre los nodos, así como las deformaciones del suelo cuando está siendo cortado por la herramienta de labranza.

MÉTODOS

Modelo para el suelo. El comportamiento mecánico del suelo bajo la carga externa de cultivo es modelado con diferentes criterios de fluencia (Ibrahmi *et al.*, 2015). Varios investigadores han utilizado el criterio de fluencia de Drucker-Prager y sus formas extendidas (lineal, hiperbólica y exponencial) para simular la interacción entre el suelo y diferentes herramientas utilizadas en ingeniería civil, excavaciones y cultivo (Li *et al.*, 2013). En el presente trabajo, el suelo se modeló como continuo, homogéneo y elastoplástico, utilizando la forma lineal del empleado extendido del Modelo Drucker-Prager (Figura 1) con éxito por Herrera (2008a, 2008b), dada la simplicidad del mismo y la pequeña cantidad de parámetros necesarios para su implementación por el tráfico de los neumáticos de los vehículos

mentation por el tráfico de los neumáticos de los vehículos agrícolas, en suelos en condiciones de laboratorio”, “publisher”: “Universidad Agraria de La Habana (UNAH. The yield function of this model (F) is defined as (González, 2008; De la Rosa, 2014) por el tráfico de los neumáticos de los vehículos agrícolas, en suelos en condiciones de laboratorio”, “publisher”: “Universidad Agraria de La Habana (UNAH:

$$f(s_1, s_2, s_3) = t - s_c \operatorname{tg}\beta - C, \quad (1)$$

where:

t - deviatoric effort; s_c - normal effort actuating over the soil; β - angle that defines the slope lifting of the yield surface, commonly referred to the angle of internal friction of the soil; C is the cohesion; (s_1, s_2, s_3) - principal maximum, medium and minimum stresses.

$$t = \frac{\sigma_e}{2} \times \left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K} \right) \left(\frac{r}{\sigma_e} \right)^3 \right] \quad (2)$$

where:

K - coefficient that relates the deflecting stress, calculated as:

$$K = \frac{3 - \operatorname{sen}\varphi}{3 + \operatorname{sen}\varphi} \quad (3)$$

where:

φ - internal friction angle

$$\sigma_c = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (4)$$

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{6 \times \operatorname{sen}(\varphi)}{3 - \operatorname{sen}(\varphi)} \quad (5)$$

s_c - Von Mises equivalent stress De la Rosa (2014) and can be expressed by:

$$s_c = (s_1 - s_3); \quad (6)$$

r^3 third invariant of stresses, calculated as:

$$r^3 = -(s_1 - s_3)^3 \quad (7)$$

The cohesion C , is calculated as:

$$d = \frac{\sqrt{3}}{2} \tau \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (8)$$

where τ - tangential stress

Soil Properties and Parameters. The soil taken like object of study was classified as Rhodic Ferralsol Hernández *et al.* (1975), with density 1 150 kg.m⁻³, plasticity ratio 36,2% and organic matter content 2,7%. The elastic modulus was determined by the slope of a tangential line of a stress- strain curve in straight section, obtained by Herrera (2006) for this type of soil. The Poisson rate ν was determined by:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (9)$$

agrícolas, en suelos en condiciones de laboratorio”, “publisher”: “Universidad Agraria de La Habana (UNAH. La función de rendimiento de este modelo (F) se define como (González, 2008; De la Rosa, 2014) por el tráfico de los neumáticos de los vehículos agrícolas, en suelos en condiciones de laboratorio”, “publisher”: “Universidad Agraria de La Habana (UNAH:

$$f(s_1, s_2, s_3) = t - s_c \operatorname{tg}\beta - C, \quad (1)$$

donde:

t es el esfuerzo desviador, s_c es el esfuerzo normal que actúa sobre el suelo, β es el ángulo que define la pendiente de la superficie de fluencia lineal (referido comúnmente al ángulo de fricción interna del material), C es la cohesión, son los esfuerzos principales máximos, intermedios y mínimos.

$$t = \frac{\sigma_e}{2} \times \left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K} \right) \left(\frac{r}{\sigma_e} \right)^3 \right] \quad (2)$$

donde:

K es el coeficiente que relaciona los esfuerzos desviadores obtenidos en triaxial extensión con los obtenidos en triaxial compresión, calculándose como:

$$K = \frac{3 - \operatorname{sen}\varphi}{3 + \operatorname{sen}\varphi} \quad (3)$$

Donde:

φ es el ángulo de fricción interna

$$\sigma_c = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (4)$$

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{6 \times \operatorname{sen}(\varphi)}{3 - \operatorname{sen}(\varphi)} \quad (5)$$

q son las tensiones equivalentes de Von Mises según De la Rosa (2014) y se expresan por:

$$s_c = (s_1 - s_3); \quad (6)$$

r^3 es la tercera invariante de tensiones, el cual se calcula por:

$$r^3 = -(s_1 - s_3)^3 \quad (7)$$

La cohesión d , cuando el endurecimiento se define por ésta, se calcula como:

$$d = \frac{\sqrt{3}}{2} \tau \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (8)$$

Donde τ las tensiones tangenciales.

Propiedades y parámetros del suelo. El suelo tomado como objeto de estudio fue clasificado como Rhodic Ferralsol (Hernández *et al.*, 2015), con una densidad de 1 150 kg.m⁻³, índice de plasticidad de 36,2% y contenido de materia orgánica 2,7%. El módulo elástico se determinó por la pendiente de una línea tangencial de una curva de tensión-deformación en sección recta, obtenida por Herrera (2006), para este tipo de suelo. La tasa de Poisson ν fue determinada por:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (9)$$

$$\text{for that: } \nu = \frac{E}{2G} - 1, \quad (10)$$

where:

G -strain modulus and was determined by the slope of a tangential line of straight section of the stress- strain curve obtained of the direct cut tests (De la Rosa, 2014).

$$\text{para eso: } \nu = \frac{E}{2G} - 1, \quad (10)$$

donde:

G -módulo de tensión y se determinó por la pendiente de una línea tangencial de sección recta de la curva de tensión-deformación obtenida de las pruebas de corte directo (De la Rosa, 2014).

La Tabla 1 muestra los valores de los parámetros y propiedades del suelo requerido por el modelo de elementos finitos

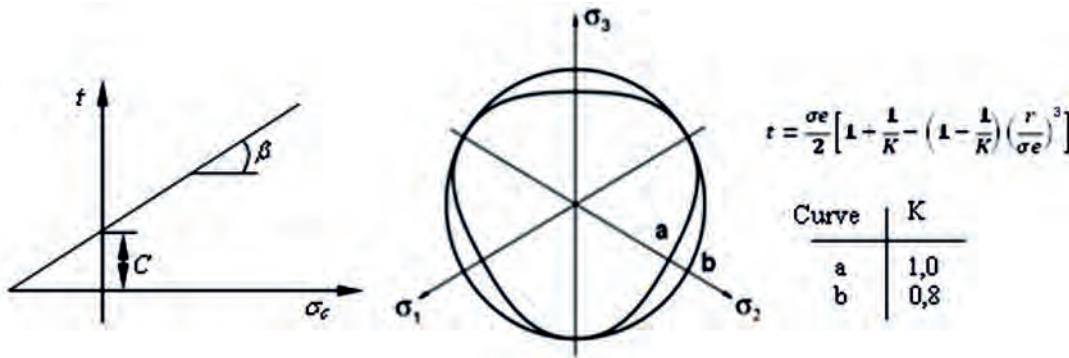


FIGURE 1. Yield surface of the extended linear Drucker-Prager Model: a) southern plane b) main stresses plane. (Herrera, 2008a).

FIGURA 1. Superficie de rendimiento del modelo lineal Drucker-Prager extendido: a) plano sur b) plano de tensiones principales (Herrera, 2008a).

The Table 1 show the values of properties and soil parameters required by the finite element model (Herrera, 2008a, 2008b; García de la Figal, 2013; De la Rosa, 2014).

(Herrera, 2008a, 2008b; García de la Figal, 2013; De la Rosa, 2014).

Modelo de elementos finitos. Un modelo de simulación tridi-

TABLE 1. Properties and soil parameters required for the FEM Model
TABLA 1. Propiedades y parámetros requeridos por el modelo FEM

Property or parameter	Symbol	Dimension
Friction internal angle	φ	33°
Modulus of elasticity	E	5 M Pa
Poisson's ratio	ν	0,4
Flexion stress	σ_f	120 kPa
Dilatancy angle	ψ	0°
Cohesion	d	15 kPa
Cut resistance	t	190 kPa
Cut modulus	G	1,793 4 MPa
Type of soil		Linear elastic
Traction limit of soil	σ_t	20 kPa
Compression limit of soil	σ_c	480 kPa
K ratio	σ_e	1
Elastic limit of soil	δ	42 kPa
Soil-metal friction angle	K	30.5°
Soil humidity	H	27%
Density	ρ	1 200 kg.m ⁻³

Finite Element Model. A tridimensional simulation model (3D) of the soil-tillage tool interaction was developed applying the Finite Element Method and modeled, by means the software Solid Works (Figure 2). The vibratory scarifier was compound of: Tool of curved arm with logarithmic profile, the block of soil and the surface of interaction between both.

mensional (3D) de la interacción suelo-herramienta de labranza fue desarrollado aplicando el método de elementos finitos y modelado con el software de diseño *Solid Works* (Figura 2). Lo componen el escarificador vibratorio con mecanismo vibrador de masas desbalanceadas (herramienta de brazo curvo con perfil logarítmico), el bloque de suelo y la superficie de interacción entre ambos. El

The arm scarifier was modelled as a rigid discrete body, with reference point located in the tip. The working depth of the arm p is 0,40 m and the fluffed angles α are 15 and 25°.

brazo escarificador fue modelado como un cuerpo rígido discreto, con punto de referencia situado en la punta. La profundidad de trabajo del brazo (D) es de 0,40 m y el ángulo de corte (α) es 5 y 25°
El bloque de suelo (deformable en interacción con el brazo es-

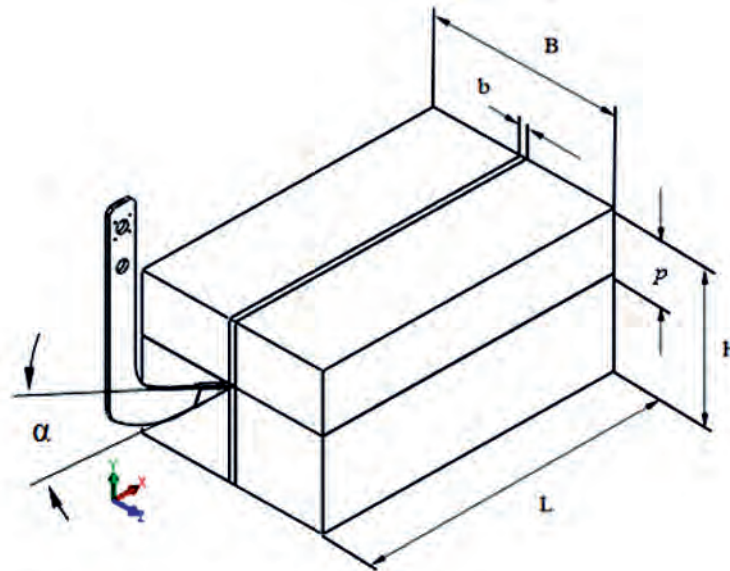


FIGURE 2. Tridimensional model of the system in study.
FIGURA 2. Modelo tridimensional del sistema en estudio

The soil block -deformable in interaction with the bent leg scarifier- was modeled as a rectangular prism of length $L=2$ m, width $B=1$ m and height $H=1$ m with contact surface to surface. The work width of the blade coincides with the width of the cut soil prism $b=0,041$ m. An increase of the dimensions of the prism of soil, beyond the assigned, as a result of the interaction with the arm of scarifier, can be disregarded (Kushwaha y Shen, 1995; Ibrahmi et al., 2015).

Loads, Boundary Conditions and Model Mesh. The loads were established as function of acting forces: the gravity $g=9.81$ ms^{-1} and environment pressure $p_a=101,325$ kPa. The block of soil is restricted outwardly surfaces: Two lateral, inferior, posterior and frontal (Figure 3). The arm scarifier has a freedom movement in X and Y axes. It moves in X axis sense at constant velocity of $0,85$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, oscillating with respect to X axis and with a frequency of 12 Hz and amplitude 0,008 m. The draft force applied to the model was 5 kN. The soil prism deformed and moved displaces tangent to the plowshare's surface of fluffed in arm scarifier.

According to mismas Abo *et al.* (2004); Bentaher *et al.* (2013). the mesh size has an important effect in the magnitude of tillage force and the calculation time of them. A very fine mesh will allow getting more exact simulation dates, but with a bigger time of calculation (Jafari *et al.*, 2006; Armin *et al.*, 2014). Therefore, only to the surfaces in contact, both soil block (inferior surface of soil prism that was displaced) and the arm scarifier (fluffed surface of chisel), mesh control was applied, with element size $e=0,004$ m. The rest of model's surface were meshed with element size 0,006 m and the iterative modified Newton-Raphson Method was used (Figure 3, for a total of 132 891 nodes, 107 262 elements and 364 959 degrees of freedom).

carificador) se modeló como un prisma rectangular de 2 m de largo (L), 1 m de ancho (B) y 1 m de altura (H) y con modelo de contacto superficie a superficie. El ancho de corte de la reja coincide con el ancho del prisma de suelo cortado ($b=0,041$ m). Un aumento de las dimensiones de éste, más allá de las asignadas, como resultado de la interacción con el brazo escarificador, no tiene ningún efecto en las fuerzas de cultivo (Kushwaha y Shen, 1995; Ibrahmi et al., 2015).

Cargas, condiciones de contorno y mallado del modelo. Las cargas se establecieron en función de las fuerzas actuantes. Sobre el modelo actúan la aceleración de gravedad (9.81 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) y la presión atmosférica (101 325 Pa). El bloque de suelo está restringido exteriormente por las dos superficies laterales, la superficie inferior, posterior y anterior (Figura 3). El brazo escarificador tiene libertad de movimiento en los ejes X e Y. Se desplaza en la dirección del eje X a una velocidad constante de 0.85 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ con frecuencia de las vibraciones del mecanismo vibrador de 12 Hz y amplitud 0,008 m. La fuerza de tracción aplicada al modelo fue de 5 000 N. El prisma de suelo cortado se desplaza tangente a la superficie de ataque de la reja del brazo escarificador. Aunque parte de las partículas del prisma de suelo cortado se adhieren en el proceso de corte a las superficies laterales de la herramienta de labranza, la adhesión no fue considerada.

El tamaño de la malla tiene un efecto importante en la magnitud de las fuerzas de cultivo y el tiempo de cálculo de las mismas (Abo *et al.*, 2004; Bentaher *et al.*, 2013). Una malla más fina permitirá obtener datos de simulación más precisos, pero el costo de un tiempo de cálculo largo será mayor (Jafari *et al.*, 2006; Armin *et al.*, 2014). Por tanto, en el presente estudio, solo a las superficies en contacto, tanto del bloque de suelo (superficie inferior del prisma de suelo cortado) como del brazo (superficie de ataque de la reja), se les aplicó control de mallado, con tamaño de elementos (e) de 0,004 m; el resto de las superficies del modelo se mallaron con tamaño de elemento 0,006 m y se utilizó el mé-

todo iterativo de Newton-Raphson modificado (Figura 3). El mallado se realizó con 132 891 nodos, 107 262 elementos y 364 959 grados de libertad.

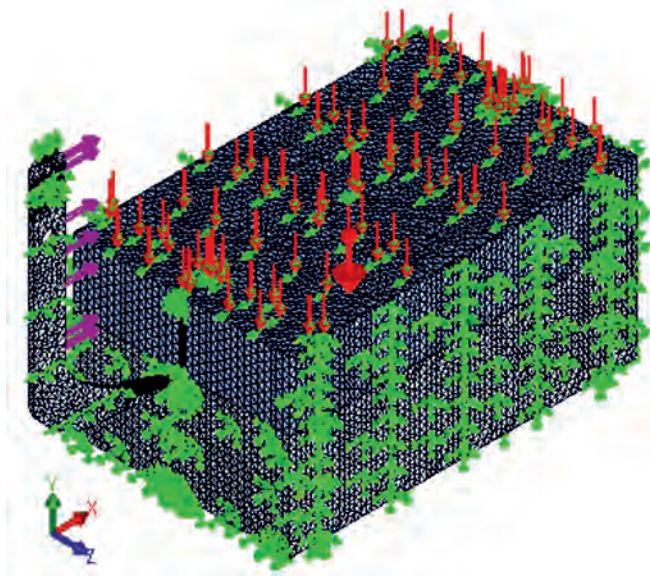


FIGURE 3. Loads, boundary conditions and Finite Element Model mesh.
FIGURA 3. Cargas, condiciones de contorno y mallado del modelo FEM.

RESULTS AND DISCUSSION

Predicting Tool Forces. The results of the finite element analyses of the implemented simulation model, at work depth of 0,4 m provided information regarding the reaction forces of soil (draft, lateral and vertical forces) and the displacement field of soil particles (Li *et al.*, 2015). Figure 4 shows the distribution of Von Mises stresses when the arm scarifier works on the soil block. In agreement with other authors Bentaher *et al.* (2013); Armin *et al.* (2014); Ibrahmi *et al.* (2015), it can be observed that the model simulates the soil displacement process in appropriate way. The stresses grow progressively as the soil-tool interaction takes place.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Predicción de las fuerzas de la herramienta. Los resultados del análisis por elementos finitos del modelo de simulación implementado, a una profundidad de corte de 0,4 m, proporcionaron información respecto a las fuerzas de reacción del suelo (fuerzas de tracción, laterales y verticales) y el campo de desplazamiento de las partículas del suelo (Li *et al.*, 2015). La Figura 4 muestra la distribución de las tensiones de Von Mises cuando el brazo escarificador labora el bloque de suelo. Coincidiendo con otros autores Bentaher *et al.* (2013); Armin *et al.* (2014); Ibrahmi *et al.* (2015), puede observarse que el modelo simula el proceso de corte del suelo de forma adecuada. Las tensiones van aumentando progresivamente a medida que transcurre la interacción suelo-herramienta de labranza.

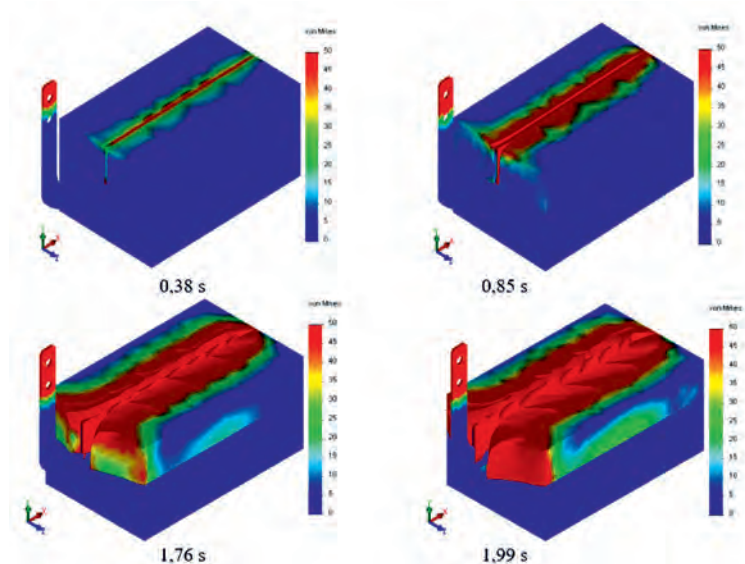


FIGURE 4. Von Mises stresses distribution for different steps of time.
FIGURA 4. Distribución de las tensiones de von Mises para diferentes pasos de tiempo.

Mesh Density Effect in Draft Force. To investigate the mesh density effect in draft force, as result of the soil- tillage tool simulation several runs of the Finite Element Model were realized with different element sizes (0,008 m; 0,014 m; 0,02 m and 0,035 m), at 0,3 m of tool displacement using the same tillage conditions of soil defined in Table 1.

In Figure 5, it is observed that the mesh density, which is proportional to the number of elements (Bentaher et al., 2013; Armin et al., 2014; Ibrahim et al., 2015), has a significant effect in traction forces, both in horizontal direction (draft force) and in vertical direction (vertical force) for the implemented simulation model. That coincides with the obtained results by other researchers in previous papers (Abo et al., 2004). As the density of mesh increases, the draft force F_x decreases, becoming stabilized in an approximate value of 886 N ($e= 0.006$ m), being this the optimal size of elements for the model under consideration.

Efecto de la densidad de malla en las fuerzas de corte. Para investigar efecto de la densidad de malla en las fuerzas de corte, como resultado de la simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza, fueron realizadas varias corridas del modelo de elementos finitos con diferentes tamaño de elementos (0,008 m; 0,014 m; 0,02 m y 0,035 m), a 0,3 m de desplazamiento de la herramienta y utilizando las mismas condiciones de cultivo definidas en la Tabla 1. Los resultados de las corridas se muestran en la Figura 5.

Se observa que la densidad de malla, la cual es proporcional al número de elementos Bentaher et al. (2013), puede observarse que el modelo simula el proceso de corte del suelo de forma adecuada. Las tensiones van tiene un efecto significativo en las fuerzas de corte, tanto en la dirección horizontal (fuerza de tracción) como vertical (fuerza vertical) para el modelo de simulación implementado, lo cual coincide con los resultados obtenidos por otros investigadores en trabajos previos (Abo et al., 2004). A medida que aumenta la densidad de malla, las fuerzas de corte decrecen.

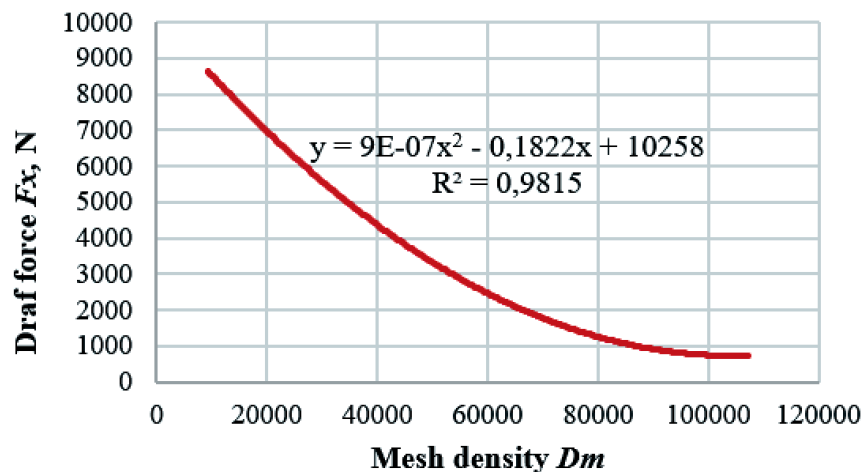


FIGURE 5. Density mesh D_m effect of the model in draft force F_x .
 FIGURA 5. Efecto de la densidad de malla del modelo en las fuerzas de corte.

Displacement and Formation of Soil Prism. The kind and extent of breaking up of soil clods is the most important factor selecting the tillage tools, but it may be considered together the required draft force for efficient tilling (Li et al., 2015). The distribution of the soil displacement field, both in vertical and forward directions, as well as the prism formation and displacement processes were simulated by the Finite Element Model at 0,3 m of displacement, with the same density mesh: Element size $e=0,006$ m and attack angles α of 15 and 25°. At the zone above tillage tool (Figure 6), big movements of the prism of soil that moves happened, both, in horizontal direction and in vertical direction and little lateral displacement

As a Figure 6 shows, the fluffed angle α has a significant effect in the extent of clod breaking up and in the displacement of the deformed soil prism.

For an attack angle α of 15°, the displacement of the soil, both, in horizontal direction and in vertical direction is smaller (Figure 6a) and the required draft forces F_x for the displacement and breaking up of clods is smaller. When the fluffed angle is 25° (Figure 6b), the necessary draft force

Desplazamiento e inversión del prisma de suelo. El tipo y grado de desmenuzamiento del suelo es el factor más importante en la selección de las herramientas de cultivo, pero esto debe ser considerado junto con la fuerza de tracción requerida para un cultivo eficiente (Li et al., 2015). En el presente trabajo, la distribución del campo de desplazamiento del suelo, tanto en la dirección vertical como de avance de la herramienta, así como el proceso de formación e inversión del prisma fueron simuladas por el modelo de elementos finitos a de 0,3 m de desplazamiento, con la misma densidad de malla (tamaño de elementos $e=0,006$ m) y a diferentes ángulos de corte (15 y 25 grados). En la zona sobre la herramienta de labranza (Figura 6), grandes movimientos del prisma de suelo cortado ocurrieron, tanto en dirección horizontal como vertical y hubo poco desplazamiento lateral.

Como muestra la Figura 6, el ángulo de corte tiene un efecto significativo en el grado de desmenuzamiento, desplazamiento e inversión del prisma de suelo cortado. Para un ángulo de corte de 15 grados, la inversión y el desplazamiento del suelo, tanto en dirección horizontal como vertical es menor (Figura 6a), por lo que la fuerza de tracción requerida para su rompimiento es menor. Cuando el ángulo de corte es de 25 grados (Figura 6b), se obtiene gran

F_x increases to get bigger displacements from deformed soil prism in vertical direction.

Effect of the Fluffed Angle α in the Contact Stresses in the Nodes. Figure 7 shows the magnitude of the maximum contact stresses in nodes obtained by the simulation of Finite Element Model. For an attack angle α of 15° (Figure 7a), the biggest value obtained is 9,93 MPa located in the inferior surface of the deformed soil prism and the high contact stresses zone is smaller. When the fluffed angle is 25° (Figure 7b), the biggest value of the contact stresses reached is 1 737,2 MPa, located on a chisel tip of the scarifier arm contacting with the inferior surface of the deformed soil prism. The zone of high stresses of contact is wide and is located in the plane that coincides with the work depth of the tillage tool.

inversión del prisma, así como un mayor desplazamiento del suelo cortado en sentido vertical.

Efecto del ángulo de corte en las tensiones de contacto en los nodos. La Figura 7 muestra las magnitudes de las tensiones de contacto máximas en los nodos obtenidas de la simulación del modelo en elementos finitos. Para un ángulo de corte del brazo escarificador de 15° (Figura 7a), el mayor valor obtenido es de 9,93 MPa y se localiza en la superficie inferior del prisma de suelo cortado y la zona de altas tensiones de contacto es menor. Cuando el ángulo de corte es de 25° (Figura 7b), el valor máximo de las tensiones de contacto alcanzado es de 1737,2 MPa, localizado en la punta de la reja del brazo escarificador que contacta con la superficie inferior del prisma de suelo cortado. La zona de altas tensiones de contacto es más amplia y está situada en el plano coincidente con la profundidad de corte de la herramienta de labranza.

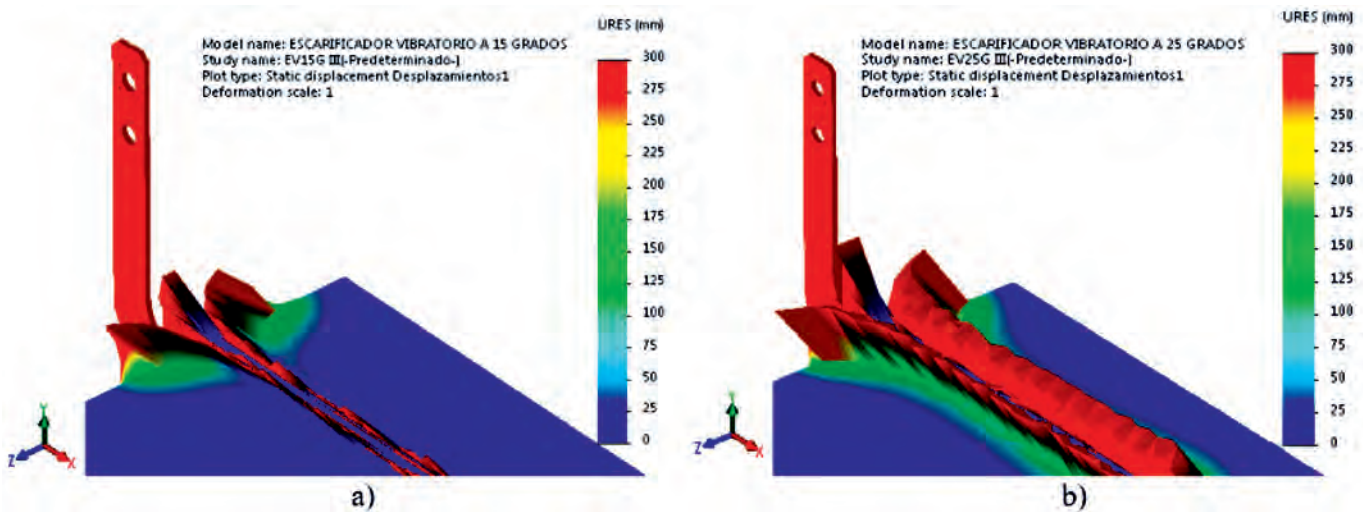


FIGURE 6. Displacements of the soil block and the tool after 300 mm: a) 15 degrees b) 25 degrees.
FIGURA 6. Desplazamientos del bloque de suelo y la herramienta al cabo de 300 mm: a) 15 grados b) 25 grados.

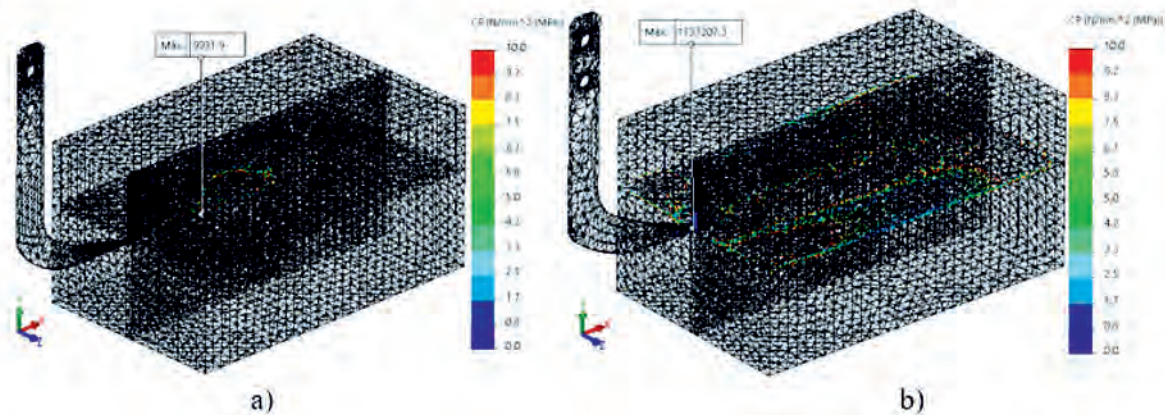


FIGURE 7. Contact stresses in nodes of the Finite Element Model: a) 15° b) 25° .
FIGURA 7. Tensiones de contacto en los nodos del modelo en elementos finitos: a) 15 grados b) 25 grados.

CONCLUSIONS

- Mesh density D_m has a significant effect in the magnitude of the draft force F_x necessary for deformation and displacement of the soil prism; when D_m increases, the draft force F_x decreases.

CONCLUSIONES

- La densidad de malla tiene un efecto significativo en la magnitud de las fuerzas de corte necesarias para el rompimiento y aflojamiento del suelo, al aumentar la misma, las fuerzas de corte disminuyen.

- The fluffed angle α has a remarkable influence in the loosening and displacement of the cut soil prism, as well as in the magnitude of the contact stresses in the nodes. When it increases, the grade of displacement of the soil particles increases, both, in the direction of advance of the tool and in vertical direction.
- The contact stresses in nodes grow with the increasing of fluffed angle α , located mainly in the tip of the tilling tool and in the plane of the inferior surface of the formed soil prism.
- El modelo en elementos finitos simula de forma adecuada el proceso de interacción del suelo con la herramienta de labranza.
- El ángulo de corte ejerce marcada influencia en el nivel de aflojamiento, desplazamiento e inversión del prisma de suelo cortado, así como en la magnitud de las tensiones de contacto en los nodos. Al aumentar el ángulo de corte, aumenta el grado de inversión del suelo cortado así como el desplazamiento de las partículas del mismo, tanto en la dirección de avance de la herramienta como en sentido vertical.
- Las tensiones de contacto en los nodos crecen con el aumento del ángulo de corte y se localizan fundamentalmente en la punta de la herramienta de labranza y el plano de la superficie inferior del prisma de suelo cortado.

REFERENCES

- ABO, A.A.; EID, M.; AOUES, Y.; EL-HAMI, A.; KHARMANDA, M.G.; MOUAZEN, A.M.: "Theoretical analysis of the spatial variability in tillage forces for fatigue analysis of tillage machines", *Journal of Terramechanics*, 48(4): 285-295, 2011, ISSN: 0022-4898.
- ABO, E.M.; HAMILTON, R.; BOYLE, J.: "Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis", *Soil and Tillage Research*, 75(1): 61-73, 2004, ISSN: 0167-1987.
- ABO, E.M.; HAMILTON, R.; BOYLE, J.T.: "3D Dynamic analysis of soil-tool interaction using the finite element method", *Journal of Terramechanics*, 40(1): 51-62, 2003, ISSN: 0022-4898.
- ABU, H.N.H.; REEDER, R.C.: "A nonlinear 3D finite element analysis of the soil forces acting on a disc plow", *Soil & Tillage Research*, (74): 115-124, 2003, ISSN: 0167-1987.
- AHMADI, I.: "Development and evaluation of a draft force calculator for moldboard plow using the laws of classical mechanics", *Soil and Tillage Research*, 161: 129-134, 2016, ISSN: 0167-1987.
- AL-JANOBI, A.; AL-SUHAIBANI, S.: "Draft of primary tillage implements in sandy loam soil", *Applied engineering in agriculture*, 14(4): 343-348, 1998.
- ARMIN, A.; FOTOUHI, R.; SZYSZKOWSKI, W.: "On the FE modeling of soil-blade interaction in tillage operations", *Finite elements in analysis and design*, 92: 1-11, 2014, ISSN: 0168-874X.
- ARMIN, A.; FOTOUHI, R.; SZYSZKOWSKI, W.: "3D Finite Element Analysis for Mechanics of Soil-Tool Interaction", *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 9(5): 843-848, 2015.
- BENTAHHER, H.; IBRAHMI, A.; HAMZA, E.; HBAIEB, M.; KANTCHEV, G.; MAALEJ, A.; ARNOLD, W.: "Finite element simulation of moldboard-soil interaction", *Soil and Tillage Research*, 134: 11-16, 2013, ISSN: 0167-1987.
- CHI, L.; KUSHWAHA, R.: "A non-linear 3-D finite element analysis of soil failure with tillage tools", *Journal of Terramechanics*, 27(4): 343-366, 1990, ISSN: 0022-4898.
- DAVOUDI, S.; ALIMARDANI, R.; KEYHANI, A.; ATARNEJAD, R.: "A two dimensional finite element analysis of a plane tillage tool in soil using a non-linear elasto-plastic model", *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci*, 3(3): 498-505, 2008.
- DE LA ROSA, A.A.A.: *Ajuste del modelo de Drucker Prager extendido para la simulación de la respuesta mecánica de un vertisol mediante el método de elementos finitos*, Universidad Central de las Villas, PhD. Thesis, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 2014.
- EHRHARDT, J.P.; GRISSO, R.; KOCHER, M.; JASA, P.; SCHINSTOCK, J.: "Using the Veris electrical conductivity cart as a draft predictor", *En: ASAE Annual International Meeting, Paper*, pp. 49085-9659, 2001.
- ELBASHIR, M.A.; ZHAO, Z.; HEBEIL, E.A.; LI, X.Y.: "Comparative Finite Element Analysis of the Effects of Tillage Tool Geometry on Soil Disturbance and Reaction Forces", *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(15): 3145-3149, 2014, ISSN: 2040-7459; e-ISSN: 2040-7467.
- FORMATO, A.; FAUGNO, S.; PAOLILLO, G.: "Numerical simulation of soil-plough mouldboard interaction", *Biosystems engineering*, 92(3): 309-316, 2005, ISSN: 1537-5110.
- GARCÍA DE LA FIGAL, C.A.E.: *Maquinaria Agrícola II*, Inst. Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería, Apuntes de clases, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, 2013.
- GILL, W.; VANDENBERG, G.: "Soil dynamics in tillage and traction. Agriculture Handbook 316", 1968.
- GONZÁLEZ, O.: *Modelación de la compactación provocada, por el tráfico de los neumáticos de los vehículos agrícolas, en suelos en condiciones de laboratorio*, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), PhD. Thesis, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba, 134 p., 2008.
- GRISSO, R.; YASIN, M.; KOCHER, M.: "Tillage implement forces operating in silty clay loam", *Transactions of the ASAE (USA)*, 1996, ISSN: 0001-2351.

- HERRERA, S.M.: *Simulación del comportamiento mecánico de los suelos Ferralíticos rojos mediante el método de elementos finitos*, 107pp, Universidad Agraria de La Habana, PhD. Thesis, San José de las Lajas. Habana, Cuba, 109 p., 2006.
- HETTIARATCHI, D.R.P.; WITNEY, B.D.; REECE, A.R.: “The calculation of passive pressure in two-dimensional soil failure”, *J. Agric. Eng. Res.*, 11: 89–107, 1966.
- IBRAHMI, A.; BENTAHER, H.; HBAIEB, M.; MAALEJ, A.; MOUAZEN, A.M.: “Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation”, *Computers and Electronics in Agriculture*, 117: 258-267, 2015, ISSN: 0168-1699.
- JAFARI, R.; TAVAKOLI, T.; MINAEE, S.; RAOUFAT, M.: “Large deformation modeling in soil-tillage tool interaction using advanced 3D nonlinear finite element approach”, En: *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Simulation, Modelling and Optimization*, Ed. Citeseer, p. 6, 2006.
- JESHVAGHANI, H.S.; DEHKORDI, S.K.H.; SAMANI, M.F.; DEHKORDI, H.R.; BRANCH, S.: “Comparison and optimization of graphical methods of moldboard plough bottom design using computational simulation”, *J. Am. Sci.*, 9(6): 414-420, 2013.
- KUSHWAHA, R.; SHEN, J.: “Finite element analysis of the dynamic interaction between soil and tillage tool”, *Transactions of the ASAE*, 38(5): 1315-1319, 1995.
- LI, M.; CHEN, D.; ZHANG, S.; TONG, J.: “Biomimetic design of a stubble-cutting disc using finite element analysis”, *Journal of Bionic Engineering*, 10(1): 118-127, 2013, ISSN: 1672-6529.
- LI, M.; ZHANG, Q.; WANG, H.; SUN, H.; TONG, J.: “A 3D Finite Element Simulation Analysis of the Soil Forces Acting on a Rotary Blade”, *Transactions of the ASABE*, 58(2): 243-249, 2015.
- MOEINFAR, A.; MOUSAVI, S.S.R.; KALANTARI, D.: “Influence of tillage depth, penetration angle and forward speed on the soil/thin-blade interaction force”, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 16(1): 69-74, 2014, ISSN: 1682-1130.
- MOITZI, G.; WAGENTRISTL, H.; REFENNER, K.; WEINGARTMANN, H.; PIRINGER, G.; BOXBERGER, J.; GRONAUER, A.: “Effects of working depth and wheel slip on fuel consumption of selected tillage implements”, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 16(1): 182-190, 2014, ISSN: 1682-1130.
- PLOUFFE, C.; LAGUË, C.; TESSIER, S.; RICHARD, M.; MCLAUGHLIN, N.: “Moldboard plow performance in a clay soil: simulations and experiment”, *Transactions of the ASAE*, 42(6): 1531, 1999.
- SHRESTHA, D.; SINGH, G.; GEBRESENBET, G.: “PM—Power and Machinery: Optimizing design parameters of a mouldboard plough”, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(4): 377-389, 2001, ISSN: 0021-8634.
- SONI, P.; SALOKHE, V.; NAKASHIMA, H.: “Modification of a mouldboard plough surface using arrays of polyethylene protuberances”, *Journal of Terramechanics*, 44(6): 411-422, 2007, ISSN: 0022-4898.
- SUN, H.; LI, M.; ZHANG, Q.; WANG, H.; TONG, J.: “A 3D finite element simulation analysis of the soil forces acting on a rotary blade”, *Transactions of the ASABE*, 58(2): 243-249, 2015, ISSN: 0001-2351.
- YONG, R.; HANNA, A.: “Finite element analysis of plane soil cutting”, *Journal of terramechanics*, 14(3): 103-125, 1977, ISSN: 0022-4898.

Luis Orlando Marín Cabrera, Especialista, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, mail: luismc@unah.edu.cu

Armando Eloy García de la Figal Costales, Prof. Titular. Universidad Agraria de La Habana (UNAH). Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: areloy@unah.edu.cu

Arturo Martínez Rodríguez, Prof. Titular e Inv. Tiular, Prof. de Mérito. Universidad Agraria de La Habana (UNAH). Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: armaro646@gmail.com

The authors of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.