

Influencia del ángulo de ataque del brazo de un subsolador vibratorio en las fuerzas de corte y la falla del suelo

Rake Angle Influence of the Vibrating Subsoiler Arm in Cutting Forces and Soil Failure

Luis Orlando Marín-Cabrera*, Armando Eloy García de la Figal-Costales and 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.

*Autor para correspondencia: Luis Orlando Marín-Cabrera, e-mail: luismc@unah.edu.cu

RESUMEN: En el presente trabajo se analiza la influencia del ángulo de ataque del brazo de un subsolador vibratorio en las fuerzas de corte, así como el comportamiento de la falla del suelo a diferentes ángulos de ataque, labrando un suelo arcilloso limoso (ferralítico), mediante un modelo de simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza, el cual fue desarrollado aplicando el Método de Elementos Finitos y la forma lineal del modelo constitutivo elastoplástico de Drucker-Prager. Para la modelación del mismo fue utilizado el software de diseño Solid Works. Se asignaron al modelo las propiedades y parámetros del suelo requeridos para la simulación, se aplicaron las condiciones de frontera y cargas actuantes, así como la discretización del mismo. Fueron realizadas, además, las corridas del modelo de simulación para tres valores distintos del ángulo de ataque (15° ; 25° y 35°). Los resultados mostraron el comportamiento cuadrático de la fuerza de tracción con el aumento del ángulo de ataque del brazo del subsolador.

Palabras clave: MEF, fuerza de tracción, modelo de simulación, velocidad de avance.

ABSTRACT: In the present work is analyzed the rake angle influence of the vibrating subsoiler arm in the cutting forces, as well as the soil failure behavior, tilling a silt loam soil (ferralsitic), by a soil-tillage tool interaction simulation model, developed applying the Finite Element Model and using the linear elastoplastic Drucker-Prager constitutive model. For modeling was used the Solid Works design software. It was assigned to model the parameters and properties of soil required for simulation, the boundary conditions and acting loads were applied as well as the meshing of the model. As well, several running of the model was realized for three rake angle (15° , 25° y 35°). The results showed the quadratic behavior of draft force with the increasing of subsoiler arm rake angle.

Keywords: FEM, Draft Force, Simulation Model, Rake Angle.

INTRODUCCIÓN

El cultivo del suelo es una de las operaciones de campo más importantes para la producción de las cosechas agrícolas (Zhu *et al.*, 2020), es la práctica de modificar el estado del suelo para lograr condiciones favorables para el crecimiento de las cosechas (Meselhy, 2020). La fuerza de tracción es afectada por tres parámetros, a saber: condiciones del suelo, configuración de la herramienta y parámetros de operación (Abbaspour *et al.*, 2014).

Los efectos del ángulo de ataque sobre el suelo y su influencia en las fuerzas de corte han sido analizados por varios investigadores (Li *et al.*, 2014; Armin *et al.*, 2015; Ibrahim *et al.*, 2015; Tagar *et al.*, 2015; He *et al.*, 2016).

El Método de Elementos Finitos (MEF) es una técnica numérica para el análisis de complejos problemas de la ingeniería, especialmente para sistemas dinámicos con grandes deformaciones y fallas (Rosa y Wulfsohn, 2002). Este método ha sido utilizado por numerosos investigadores

para analizar problemas relacionados con la mecánica de suelos y la interacción suelo - herramientas de labranza (Abo *et al.*, 2003; 2004; Topakci *et al.*, 2010); y ha mostrado ser capaz de simular diferentes formas de herramientas de labranza y el efecto de la geometría en las fuerzas de corte (Abu y Reeder, 2003). Sin embargo, para un modelado preciso del implemento de trabajo del suelo, propiedades físicas y mecánicas importantes deben ser tenidas en cuenta (Dehghan y Kalantari, 2016).

El objetivo de este estudio es analizar, utilizando el Método de Elementos Finitos, la influencia del ángulo de ataque de una herramienta de labranza (subsolador vibratorio) en las fuerzas de corte (fuerza de tracción y fuerza vertical), así como el comportamiento de la falla del suelo a diferentes ángulos de ataque, labrando un suelo arcilloso limoso (ferralsitic), con velocidades de avance y profundidad de trabajo asignadas, así como propiedades físicas (humedad, densidad) y mecánicas del suelo determinadas.

Recibido: 10/07/2024

Aceptado: 15/12/2024

Los autores de este trabajo declaran no tener conflicto de intereses.

AUTHOR CONTRIBUTIONS: **Conceptualization:** L. O. Marín. **Data curation:** L. O. Marín, A. García de la Figal, A. Martínez. **Formal analysis:** L. O. Marín, A. García de la Figal, A. Martínez. **Investigation:** L. O. Marín, A. García de la Figal, A. Martínez. **Methodology:** L. O. Marín, A. García de la Figal, A. Martínez. **Supervision:** A. García de la Figal, A. Martínez. **Roles/Writing, original draft:** L. O. Marín, A. García de la Figal, A. Martínez. **Writing, review & editing:** A. García de la Figal, A. Martínez.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo del suelo

El suelo fue clasificado como un material elastoplástico, como un Rhodic Ferralsol según FAO-UNESCO (1988); Oxisol según Soil Survey Staff (2014); y como Ferralítico Rojo Típico según la tercera clasificación genética de suelos en Cuba (Hernández *et al.*, 1999). Se consideró como una arcilla loamosa muy plástica, con 15% de arena, 38% de limo, 47% de arcilla y contenido de materia orgánica 2,59% (Herrera *et al.*, 2008a; 2008b). La forma lineal del modelo de Drucker-Prager extendido según de la Rosa *et al.* (2016) fue utilizada para modelar el mismo (Fig. 1). Según Arefi *et al.* (2022), este modelo es el más adecuado para la modelación del material suelo, pues puede ser calibrado obteniendo datos de pruebas triaxiales. La función de fluencia del modelo lineal de Drucker y Prager (1952) se expresa como:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = t - \sigma \cdot \tan\beta \cdot c \quad (1)$$

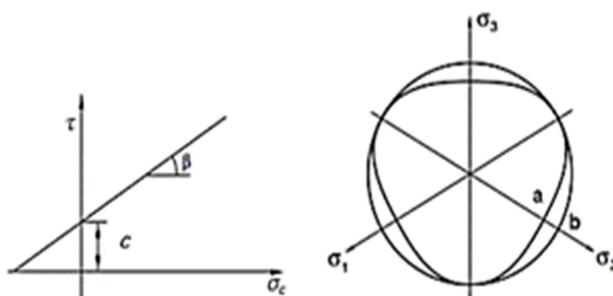


FIGURA 1. Superficie de fluencia y dirección del flujo en el plano meridional del modelo Drucker-Prager extendido lineal.

Propiedades y parámetros del suelo

El módulo de elasticidad (E) se determinó como el módulo tangente a la curva esfuerzo deformación del suelo en su tramo recto, obtenida por Herrera *et al.* (2008a; 2008b), para este tipo de suelo. El coeficiente de Poisson se determinó mediante la ecuación:

$$\nu = \frac{E}{2 \times G} - 1 \quad (2)$$

El módulo cortante G se determina por:

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)} \quad (3)$$

Las propiedades o parámetros requeridos por el modelo MEF (Tabla 1) han sido obtenidas en el laboratorio de mecánica de suelos de la Empresa de Investigaciones Aplicadas a la Construcción de Villa Clara (ENIA.VC).

Modelo de elementos finitos

Está formado por un brazo escarificador (tratado como cuerpo rígido) y el bloque de suelo (deformable en interacción con el brazo). Ambos fueron modelados utilizando el software de diseño *Solid Works* y su complemento *Simulation*. Las dimensiones del bloque de suelo son: longitud ($L = 2$ m), ancho ($B = 1$ m) y altura ($H = 0,9$ m), se consideró isotrópico y homogéneo, tiene restricciones de movimiento por las superficies laterales, inferior y posterior (Fig. 2a), a las cuales se aplicaron presiones de confinamiento. Sobre el modelo actúan la fuerza de gravedad y la presión atmosférica. Se asume que el aumento de las dimensiones del prisma de suelo cortado más allá de las asignadas no afecta las fuerzas de corte (Bentaher *et al.*, 2013a).

La interacción suelo-herramienta se modeló tangencialmente a la superficie de ataque de la herramienta, con modelo de contacto superficie a superficie. Se discretizó el modelo con tamaño de elementos (e) máximo de 0,008 m, tamaño mínimo de 0,006 m y se utilizó el método iterativo de Newton-Raphson. Las superficies en contacto, tanto de la herramienta como del prisma de suelo cortado se discretizaron aplicando control de mallado, con tamaño de elementos de 0,004 m (Fig. 2b). El brazo corta el bloque de suelo a velocidad constante (V_m) en la dirección del eje X, profundidad de trabajo de 0,3 m y ancho de corte 0,081 m. El suelo cortado después de la falla se desliza por encima de la superficie de la herramienta.

TABLA 1. Propiedades y parámetros del suelo requeridos por el modelo virtual del bloque de suelo

Propiedad o parámetro	Símbolo	Dimensión	Fuente
Ángulo de fricción interna	ν	33°	(Herrera <i>et al.</i> , 2008a; 2008b).
Módulo de elasticidad	E	44 000 kPa	(Herrera <i>et al.</i> , 2008a; 2008b).
Módulo cortante	G	15 909 kPa	(Herrera <i>et al.</i> , 2008a; 2008b).
Coeficiente de Poisson	ν	0,32	Calculado
Cohesión	c	50 kPa	(Herrera <i>et al.</i> , 2008a; 2008b).
Resistencia a los esfuerzos cortantes	τ	295 kPa	(Herrera, 2006)
Límite de tracción del suelo	σ_t	20 kPa	(García de la Figal, 2022)
Límite de compresión del suelo	σ_c	750 kPa	(García de la Figal, 2022)
Ángulo de fricción suelo-metal	ϕ	25°	(Herrera, 2006)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia del ángulo de ataque α de la cuña en las fuerzas de corte

Se realizaron varias corridas del modelo de simulación (Figs. 3, 4 y 5) con diferentes ángulos de ataque ($15; 25; 35^\circ$), $f = 14 \text{ Hz}$, amplitud pico $Y_{\text{pico}} = 11 \text{ mm}$, $V_m = 0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, utilizando las propiedades y parámetros de la Tabla 1.

Los resultados mostraron que F_x aumenta de forma polinómica de segundo orden a medida que aumenta α (Fig. 6a), lo cual coincide con lo reportado por Abbaspour *et al.* (2014) y Lamia (2020). Incrementos en 5° del ángulo de ataque α , provocan incrementos de la fuerza de tiro en aproximadamente 4 kN (25 % de aumento).

En el caso de la componente vertical de la fuerza de interacción herramienta-suelo F_y , el mejor ajuste ($R^2 = 0,957$) de su variación respecto al ángulo α se obtuvo con una función polinómica de 2do grado (Fig. 6b), resultado que coincide con otros autores (Bentaher *et al.*, 2013b; Odey *et al.*, 2018).

Falla del suelo

El proceso de la falla del suelo, tanto en la dirección vertical como de avance de la herramienta, fue simulado mediante corridas del modelo de elementos finitos, a lo largo de su recorrido, con densidad de malla ($e = 6 \text{ mm}$), $f = 14 \text{ Hz}$, $Y_{\text{pico}} = 11 \text{ mm}$ y a diferentes ángulos de corte α : 15 y 25° . Se utilizaron las propiedades y parámetros del suelo de la Tabla 1.

En la zona sobre la herramienta de labranza (Fig. 7), ocurrieron grandes movimientos del prisma

de suelo cortado, tanto en dirección horizontal como vertical, observándose, además, desplazamientos en direcciones laterales.

Para $\alpha = 15^\circ$ y la herramienta trabajando con vibraciones forzadas, el desmenuzamiento del suelo, tanto en dirección horizontal como vertical es menor que para $\alpha = 25^\circ$ (Fig. 7a), así como la fuerza de tracción requerida para su rompimiento.

Cuando $\alpha = 25^\circ$ (Fig. 7b), se obtiene gran desmenuzamiento del prisma de suelo cortado, así como un mayor desplazamiento del mismo en sentido vertical (Abu y Reeder, 2003; Odey y Okon, 2019). Se observan, además, la formación de los planos de falla del prisma de suelo removido.

CONCLUSIONES

Las fuerzas de corte del suelo, tanto vertical como de tracción, aumentan de forma cuadrática con el aumento del ángulo de ataque, siendo esta última de mayor magnitud.

El ángulo de ataque ejerce marcada influencia en el nivel de aflojamiento, desplazamiento e inversión del prisma de suelo cortado. Al aumentar el ángulo de ataque, 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.

El MEF ha sido capaz de simular, de forma adecuada, los efectos del ángulo de ataque de la herramienta de labranza en las fuerzas de corte del suelo.

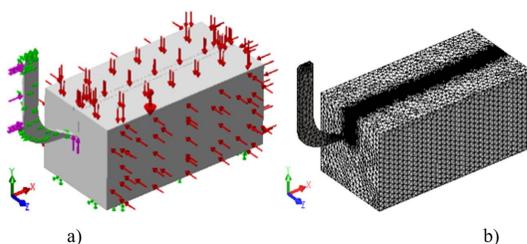


FIGURA 2. Modelo de elementos finitos: a) Condiciones de frontera b) Mallado del modelo.

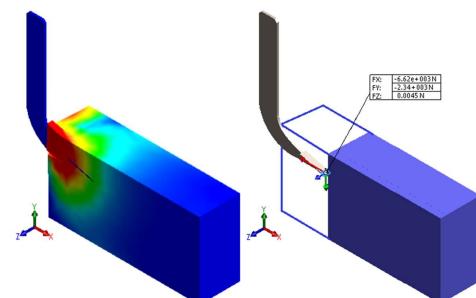


FIGURA 3. Fuerza de tracción con ángulo de ataque del brazo $\alpha = 15^\circ$.

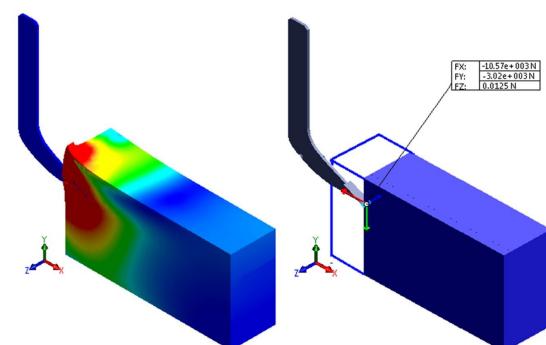


FIGURA 4. Fuerza de tracción con ángulo de ataque del brazo $\alpha = 25^\circ$.

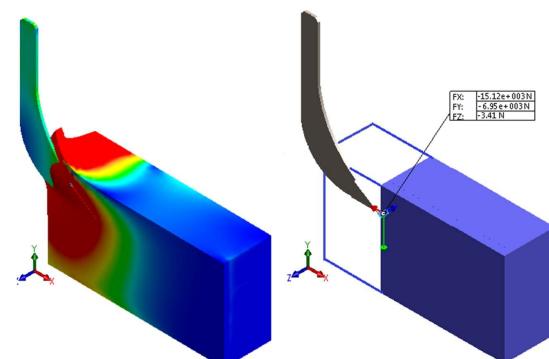


FIGURA 5. Fuerza de tracción con ángulo de ataque del brazo $\alpha = 35^\circ$.

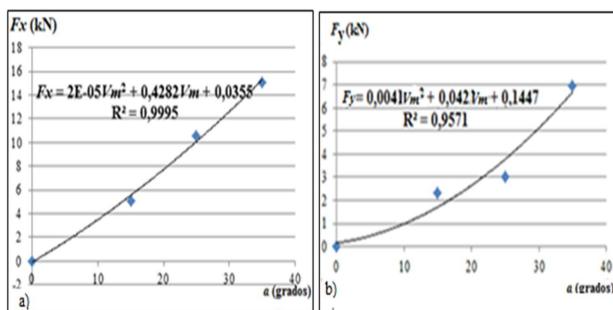


FIGURA 6. Comportamiento de las fuerzas: a) de tracción F_x y b) vertical F_y a diferentes ángulos de ataque α .

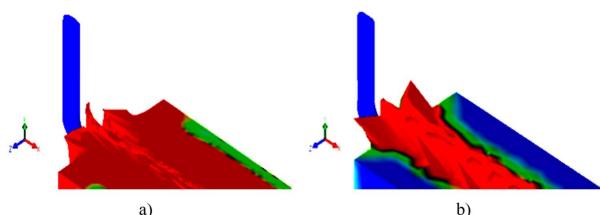


FIGURA 7. Desmenuzamiento del prisma de suelo cortado por el brazo escarificador: a) $\alpha = 15^\circ$; b) $\alpha = 25^\circ$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, F.M.; HOSEINI, S.A.; AGHKHANI, M.; SHARIFI, A.: "The behavior of tillage tools with acute and obtuse lift angles", *Spanish journal of agricultural research*, 12(1): 44-51, 2014, ISSN: 2171-9292.
- 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.
- AREFI, M.; KARPARVARFARD, S.H.; AZIMI, N.H.; NADERI, B.M.: "Draught force prediction from soil relative density and relative water content for a non-winged chisel blade using finite element modelling", *Journal of Terramechanics*, 100: 73-80, 2022, ISSN: 0022-4898, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2022.01.001>.
- 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.
- BENTAHER, 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, 2013a, ISSN: 0167-1987.
- BENTAHER, 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, 2013b, ISSN: 0167-1987.
- DE LA ROSA, A.A.A.; QUINTEROS, P.R.; GONZÁLEZ, C.O.; RODRÍGUEZ, A.M.; SUÁREZ, H.M.: "Adjustment of the plastic parameters of the Extended Drucker Prager model for the simulation of the mechanical response of a clayey soil (Vertisol)", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3): 4-12, 2016, ISSN: 1010-2760.
- DEHGHAN, H.H.; KALANTARI, D.: "Design a biomimetic disc using geometric features of the claws", *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(1): 103-109, 2016, ISSN: 1682-1130.
- DRUCKER, D.C.; PRAGER, W.: "Soil mechanics and plastic analysis or limit design", *Quarterly of applied mathematics*, 10(2): 157-165, 1952, ISSN: 0033-569X.
- FAO- UNESCO: *Soil map of the world, reviewed legend*, Ed. FAO, Report 80, Roma. Italia, Roma. Italia, 1988.
- GARCÍA DE LA FIGAL, C.A.E.: *Maquinaria Agrícola II. Apuntes de clases. Tema I. Teoría y cálculo de órganos de preparación de suelos. 1.1. Principales propiedades físico-mecánicas (tecnológicas) de suelos*, Ed. UNAH, Universidad Agraria de La Habana, Centro de Mecanización Agropecuaria, 2022.
- HE, C.; YOU, Y.; WANG, D.; WANG, G.; LU, D.; KAJI, J.M.T.: "The effect of tine geometry during vertical movement on soil penetration resistance using finite element analysis", *Computers and Electronics in Agriculture*, 130: 97-108, 2016, ISSN: 0168-1699.
- HERNÁNDEZ, J.A.; PÉREZ, J.J.M.; MESA, N.Á.; BOSCH, I.D.; RIVERO, L.; CAMACHO, E.: *Nueva versión de la clasificación genética de los suelos de Cuba.*, Ed. AGRINFOR, Barcaz L L ed., vol. I, La Habana, Cuba, 64 p., 1999, ISBN: 959-246-022-1.
- HERRERA, S.M.: *Simulación del comportamiento mecánico de los suelos ferralíticos rojos mediante el método de elementos finitos*, Universidad Agraria de La Habana, Centro de Mecanización Agropecuaria, Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Técnicas Agropecuarias), San José de las Lajas, La Habana, Cuba, 109 p., 2006.
- HERRERA, S.M.; IGLESIAS, C.C.E.; GONZÁLEZ, C.O.; LÓPEZ, B.E.; SÁNCHEZ, I.A.: "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, 2008a, ISSN: 1010-2760.
- HERRERA, S.M.; IGLESIAS, C.C.E.; GONZÁLEZ, C.O.; LÓPEZ, B.E.; SÁNCHEZ, I.A.: "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, 2008b, ISSN: 1010-2760.
- IBRAHMI, A.; BENTAHER, H.; HAMZA, E.; MAALEJ, A.; MOUAZEN, A.M.: “3D finite element simulation of the effect of mouldboard plough’s design on both the energy consumption and the tillage quality”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1): 473-487, 2017, ISSN: 1433-3015.
- 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.
- LAMIA, D.A.: “Modeling the effect of soil-tool interaction on draft force using visual basic”, *Annals of Agricultural Science, Moshtohor*, 58(2): 223-232, 2020, ISSN: 1110-0419.
- LI, X.Y.; ELBASHIR, M.H.; ZHAO, Z.; HEBEIL, E.A.: “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: 2040-7467.
- MESELHY, A.: “Effect of Tillage Depth Division and Vibration on Subsoiler Performance”, *Plant Archives*, 20(2): 3548-3567, 2020, ISSN: 2581-6063 (online), ISSN: 0972-5210.
- NADERI, B.M.; ALIMARDANI, R.; HEMMAT, A.; SHARIFI, A.; KEYHANI, A.; TEKESTE, M.Z.; KELLER, T.: “3D finite element simulation of a single-tip horizontal penetrometer-soil interaction. Part I: Development of the model and evaluation of the model parameters”, *Soil and Tillage Research*, 134: 153-162, 2013, ISSN: 0167-1987.
- ODEY, S.; OKON, O.: “Measurement of tillage forces and soil disturbance of subsoilers”, *World Journal of Engineering Research and Technology*, 5(2): 131-147, 2019, ISSN: 2454-695X.
- ODEY, S.O.; OVAT, F.A.; OKON, O.O.: “Draughts, Power Requirements and Soil Disruption of Subsoilers”, *World Journal of Engineering Research and Technology*, 6(9): 17-39, 2018, ISSN: 2349-4395 (Print) & ISSN 2349-4409 (Online).
- ROSA, U.; WULFSOHN, D.: “Application of the finite element method in agricultural soil mechanics”, En: *Advances in Soil Dynamics Volume 2*, Ed. American Society of Agricultural and Biological Engineers, vol. 2, p. 117, publisher: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2002, ISBN: 1-892769-82-4.
- SOIL SURVEY STAFF: *Keys to soil taxonomy*, Ed. Government Printing Office, USDA Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, USA, 12 th Edition. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, Washington, DC ed., Washington, DC., USA, 346 p., 2014, ISBN: 0-16-085427-X.
- TAGAR, A.; CHANGYING, J.; ADAMOWSKI, J.; MALARD, J.; QI, C.S.; QISHUO, D.; ABBASI, N.: “Finite element simulation of soil failure patterns under soil bin and field testing conditions”, *Soil and Tillage Research*, 145: 157-170, 2015, ISSN: 0167-1987.
- TOPAKCI, M.; CELIK, H.K.; CANAKCI, M.; RENNIE, A.E.; AKINCI, I.; KARAYEL, D.: “Deep tillage tool optimization by means of finite element method: Case study for a subsoiler tine”, *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 8(2): 531-536, 2010.
- ZHU, L.; ZHANG, J.W.; CHEN, P.; WU, Q.M.; WEI, M.; YIN, C.L.; LI, G.L.: “Flowing interaction between cutting edge of ploughbreast with soil in shifting tillage operations”, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1): 1404-1415, 2020, ISSN: 1994-2060.

Luis Orlando Marín-Cabrera. Dr.C., Especialista, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

Armando Eloy García de la Figal-Costales. Dr.C., 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. Dr.Cs., Prof. Titular e Inv. Titular, 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.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a fines de identificación, no existe ningún compromiso promocional relacionado con los mismos, ni para los autores ni para el editor.