OPEN ACCESS

ARTÍCULO ORIGINAL

UNAH UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA

Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 35
enero-diciembre 2026
ISSN 1010-2760, eISSN 2071-0054
Cu-ID: https://cu-id.com/2177/v35e24

Aplicaciones del Método de Elementos Finitos en la simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza

Applications of the Finite Element Method in Simulation of Soil-Tillage Tool Interaction

Luis Orlando Marín Cabrera*

Universidad Agraria de La Habana, 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: Este trabajo desarrolla modelos de simulación tridimensionales de la interacción suelo-herramienta de labranza aplicando el Método de Elementos Finitos (MEF), labrando suelos arcilloso-limosos (ferralíticos). Se utilizó el modelo elastoplástico de relación constitutiva (*Drucker-Prager*) para la modelación y el software de diseño *Solid Works,* versión 2021 y su complemento *Simulation*. Para una mejor conexión entre las superficies, tanto de los bloques de suelo como de las herramientas de labranza, fueron utilizados elementos de contacto y el teorema de Coulomb para lograr el movimiento adecuado de los elementos del suelo sobre la superficie de trabajo de las herramientas de labranza. Fueron definidos los parámetros geométricos de las herramientas de labranza, así como las dimensiones y parámetros de los bloques de suelo. Los resultados obtenidos muestran que, ambos modelos simulan, de forma adecuada, el movimiento de los bloques de suelo en su interacción con las herramientas de labranza. Los valores de las fuerzas de corte, obtenidos para ambos modelos, son similares a los obtenidos por otros autores en investigaciones previas.
Palabras clave: Elementos finitos, interacción suelo- herramienta, modelo elastoplástico, modelo de simulación tridimensional.

ABSTRACT: This work develops tridimensional simulation models of the soil-tillage tool interaction applying the Finite Element Method (FEM), tilling clay loam soils (ferralitic). The elastoplastic model of constitutive relation (Drucker-Prager) was used for modeling and Solid Works design software, 2021 version and its complement Simulation. To ensure optimal connection between surfaces of the soil blocks and the tillage tools, contact elements and Coulomb theorem were used to achieve adequate movement of soil elements over the working surface of tillage tools. The geometric parameters of tillage tools were defined as well as parameters and dimensions of soil blocks. The results showed that, both models simulate, in appropriate way, the movement of soil blocks in its interaction with tillage tools. The values of cutting forces, obtained for both models, are similar to values obtained in previous researches.
Keywords: Finite element, soil-tillage tool interaction, elastoplastic model, tridimensional simulation model.

INTRODUCCIÓN

La interacción suelo-herramienta de labranza se caracteriza por dos fenómenos: fuerzas que surgen en la interfase suelo-herramienta (fuerzas de tracción, laterales y verticales) y desplazamiento de las partículas de suelo (Ani *et al.*, 2014). Una parte importante de las investigaciones relacionadas con la interacción suelo-herramienta de labranza ha sido enfocada al desarrollo de modelos de simulación para predecir las fuerzas de corte bajo diferentes condiciones de suelo (Torotwa *et al*., 2022), geometría de la herramienta y parámetros de operación (Lamia *et al*., 2020; Kuře *et al*., 2021; Workesa y Alemu, 2021; Marín *et al*., 2020, 2021 y 2023), impacto de la maquinaria agrícola en la compactación del suelo (Mileusnić *et al*., 2022).

El MEF ha sido utilizado con gran aceptación a escala internacional en la simulación computacional de la interacción suelo-herramienta de labranza, debido a su potencial para describir la misma en tres dimensiones (Marín *et al*., 2019).

Para la simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza mediante el MEF se han realizado numerosas investigaciones en el ámbito internacional, entre ellas las de Abu Hammdeh y Reeder (2003); Armin *et al.*(2016); He *et al.*(2016), con el objetivo de desarrollar modelos, en dos o tres dimensiones, tanto lineales como no lineales; elásticos, plásticos y elastoplásticos, para la predicción de los esfuerzos del suelo sobre la herramienta de cultivo, la influencia de la geometría en las fuerzas de corte, así como el consumo energético de las mismas.

Para los suelos agrícolas de Cuba, caracterizados por ser principalmente arcillosos, las investigaciones sobre modelos de simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza por el MEF para arados de discos y subsoladores alados para este tipo de suelo son escasas. Las realizadas han sido para suelos fundamentalmente arenosos y por otros métodos numéricos.

Recibido: 25/11/2025
Aceptado: 27/04/2026
Conflicto de intereses: El autor de este trabajo declara no presentar conflicto de intereses.
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 el autor ni por el editor

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/

El objetivo general de este trabajo es desarrollar modelos de simulación tridimensional del proceso de interacción suelo-herramienta de labranza, que permita el análisis del movimiento de la herramienta a través del suelo, la distribución y magnitud de las tensiones y deformaciones, así como las fuerzas de corte.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo para el suelo

En el presente trabajo la interacción suelo-herramienta es modelada mediante la función de fluencia de Drucker-Prager lineal, la cual se expresa como:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = t - p \times tg\beta - d \quad (1)$$

Donde:

σ_1, σ_2, σ_3- son los esfuerzos principales máximos, intermedios y mínimos, t es el esfuerzo desviador y se calcula por:

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

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

$$k\frac{3 - sen(\varphi)}{3 + s\ \ en(\varphi)} \quad (3)$$

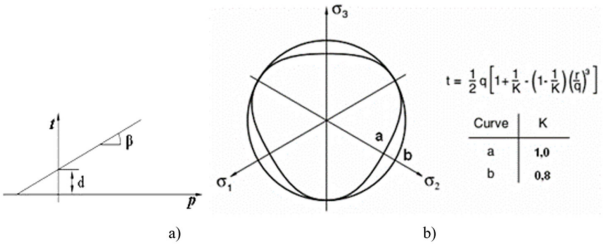
Donde:

φ es el ángulo de fricción interna, p es el esfuerzo normal que actúa sobre el suelo y se define como:

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

B ángulo que define la pendiente de la superficie de fluencia lineal, el cual está referido comúnmente al ángulo de fricción interna del material en el modelo de Drucker-Prager Extendido (Fig. 1) y se calcula por:

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



a) b)

Figura 1. Criterio de Fluencia del Modelo Drucker-Prager extendido. a) Plano meridional; b) Plano de tensiones principales.

q son las tensiones equivalentes de Von Mises y se expresan por:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (6)$$

r^3 es el esfuerzo desviador, el cual se calcula por:

$$r^3 = -(\sigma_1 - \sigma_3)^3 \ (7)$$

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

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

Propiedades del suelo

El suelo se clasificó como ferralítico rojo típico según la Segunda Clasificación Genética de los Suelos en Cuba (Hernández *et al.*, 1975), como Oxisol (Cid *et al.*, 2011) y como Rhodic Ferralsol (Hernández *et al.*,2015), con una densidad de 1 200 kg·m^{-3}, humedad 27%, índice de plasticidad de 36,2% y contenido de materia orgánica 2,7%. El módulo de elasticidad se determinó como la pendiente de una recta tangente a la curva esfuerzo-deformación en su tramo recto. El coeficiente de Poisson se determinó mediante la ecuación

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

La cohesión y el ángulo de fricción interna fueron determinados mediante la solución gráfica de Mohr. La Tabla 1 muestra las propiedades y parámetros del suelo requeridos por el modelo de elementos finitos.

Modelos de elementos finitos

Dos modelos de simulación tridimensional de la interacción suelo-herramienta de labranza en elementos finitos han sido desarrollados utilizando el software de diseño *Solid Works* (Fig. 2). Un modelo, formado por una herramienta de labranza ancha (arado de discos) y un bloque de suelo. El otro modelo, formado por una herramienta estrecha (subsolador alado con brazo de perfil logarítmico) y un bloque de suelo. En ambos modelos la herramienta se desplaza a velocidad constante. Ambos bloques de suelo son deformables en interacción con las herramientas de labranza y las dimensiones asignadas a los mismos, garantizan el volumen suficiente para las simulaciones.

Se asume que el aumento de las dimensiones del prisma de suelo cortado por ambas herramientas más allá de las asignadas no afecta las fuerzas de corte (Ibrahmi *et al.*, 2014; Marín *et al.*, 2022). La interacción herramienta-suelo se modeló tangencialmente a la superficie de ataque con modelo de contacto superficie a superficie.

Cargas y condiciones de contorno

Las condiciones de contorno para los modelos se establecieron en función de las cargas actuantes. Sobre el bloque de suelo del modelo de arado de discos (Fig. 3a) actúan la aceleración de la gravedad (9,81 ms^{-2}) y la presión atmosférica (10 1325 Pa). Tiene restricciones de movimiento por su parte inferior (eje Y).

Tabla 1. Propiedades y parámetros requeridos por el modelo MEF

Propiedad o parámetro	Símbolo	Dimensión	Fuente
Ángulo de fricción interna	φ	33º	Herrera *et al*. (2008)
Módulo de elasticidad	E	44 000 kPa	Herrera *et al*. (2008)
Módulo cortante	G	15 909 kPa	Herrera *et al*. (2008)
Coeficiente de Poisson	v	0,32	Calculado
Cohesión	c	50 kPa	Herrera *et al*. (2008)
Resistencia a los esfuerzos cortantes	τ	295 kPa	Herrera *et al*. (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	25º	Herrera *et al*. (2006)

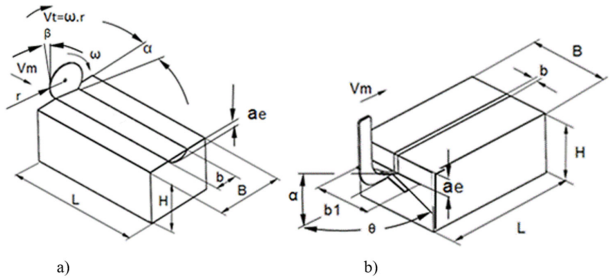


Figura 2. Modelos de simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza: a) Arado de discos; b) Subsolador alado.

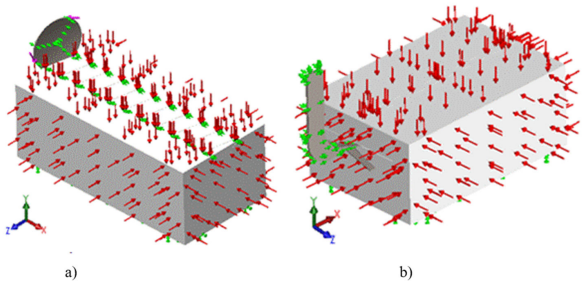


Figura 3. Cargas y condiciones de contorno de los modelos de simulación: a) Arado de discos; b) Subsolador alado.

El disco avanza a velocidad constante (Vm = 1,2 ms^{-1}) en la dirección del eje X y rota en su desplazamiento a velocidad angular constante, profundidad de trabajo (ae = 100 mm) y ancho de trabajo (b = 358 mm). Las dimensiones del bloque de suelo son: ancho (B = 1200 mm); largo (L = 2000 mm); alto (H = 1000 mm). El ángulo de inclinación vertical del disco (β) es de 15º, el ángulo de inclinación lateral es de 25º, el diámetro es de 500 mm y el radio de curvatura es de 40,3 mm. El material utilizado en su fabricación es acero aleado.

Sobre el bloque de suelo del modelo de subsolador alado (Fig.3b) actúan la aceleración de la gravedad (9,81 ms^{-2}) y la presión atmosférica (10 1325 Pa). Tiene restricción fija por la parte inferior. Por las superficies laterales actúan las tensiones de confinamiento del suelo. El brazo subsolador alado se desplaza a una velocidad constante Vm = 1,2 ms^{-1} (0,33 kmh^{-1}) en la dirección del eje X, a una profundidad de trabajo (ae = 300 mm) y ancho de trabajo (b = 80 mm). Las dimensiones del bloque de suelo son: ancho (B = 1500 mm); largo (L = 2200 mm); alto (H = 1000 mm). El material del brazo es acero al carbono y el material de la reja es acero aleado. El ángulo de ataque de la reja es 30º. El ancho de las saetas laterales (b1) es 900 mm.

Las dimensiones asignadas, tanto del modelo de arado de discos como el modelo de subsolador alado, garantizan un volumen de suelo suficiente para abarcar el movimiento del mismo durante su deformación, sin exigir un tiempo de cómputo excesivo.

Discretización de los modelos de elementos finitos

La discretización general de ambos modelos se realizó con tamaño de elementos (e) máximo de 20 mm, tamaño mínimo de 6 mm y se utilizó el método iterativo de Newton-Raphson. Las superficies en contacto, tanto de las herramientas como de los prismas de suelo cortado se discretizaron aplicando control de mallado, con tamaño de elemento de 4 mm (Fig. 4).

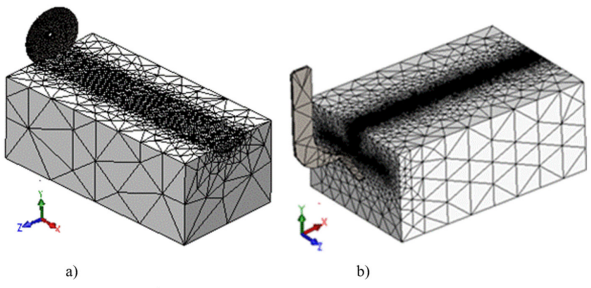


Figura 4. Discretización de los modelos de elementos finitos: a) Arado de discos; b) Subsolador alado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los modelos de simulación tridimensional desarrollados proporcionaron información respecto a fuerzas de corte, tensiones, deformaciones y desplazamientos, tanto de los bloques de suelo como de las herramientas de labranza. Ambos modelos simularon, de forma adecuada, los movimientos de ambas herramientas a través de los bloques de suelo, a 300 mm de desplazamiento de las mismas.

Tensiones de von Mises, desplazamientos y deformaciones

Para el modelo de arado de discos, el valor máximo de tensiones de von Mises obtenido es de 206,5 MPa (Fig. 5) y se localizó en el diámetro interior del mismo. En esta área se concentran los mayores momentos de flexión y de torsión del disco durante la labranza del suelo. Por tanto, es muy importante tener en cuenta los parámetros geométricos del disco en los procesos de diseño y fabricación del mismo para la disminución de los valores de flexión y torsión. Resultados similares (222 MPa) obtuvieron Dehghan-Hesar y Kalantari (2016) para un arado de discos convencional, con 300 mm de diámetro, profundidad de trabajo de 70 mm, espesor del disco 3 mm y radio de curvatura 53 mm. Puede observarse que, el suelo cortado por el disco es elevado, pulverizado, parcialmente invertido y desplazado hacia un solo lado (Abu Hamdeh y Reeder, 2003).

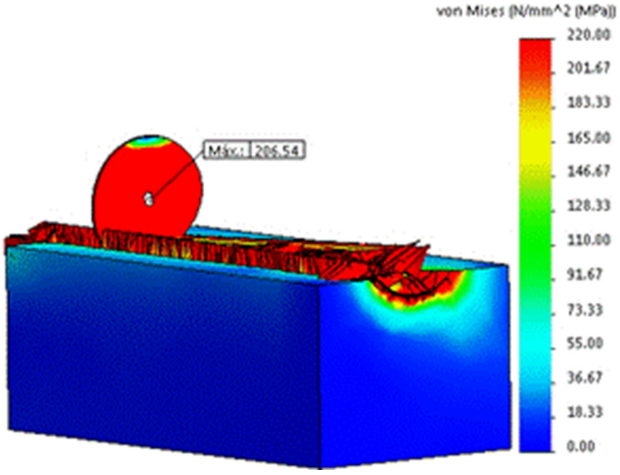


Figura 5. Tensiones de Von Mises del modelo de arado de discos a 300 mm de desplazamiento.

Para el modelo de subsolador alado, el valor máximo de tensiones (Fig. 6) se localiza en la superficie de ataque de la reja (79,65 MPa). En esta zona, los valores promedio de tensiones son mayores que en la punta de la herramienta debido a su mayor área de contacto (Marín *et al*., 2019), demostrando además, la influencia del ángulo de ataque en los esfuerzo de corte de las herramientas de labranza

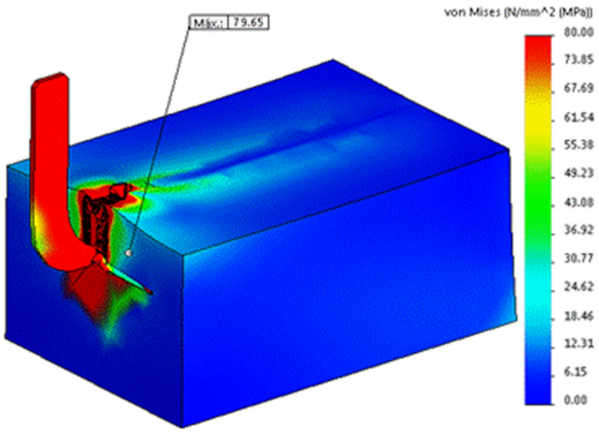


Figura 6. Tensiones de von Mises del modelo de subsolador alado a 300 mm de desplazamiento.

(Marín, 2023). Coincidiendo con otros autores (Marín *et al*., 2022; Arefi *et al*., 2022; Marín, 2023), se observa que, a medida que el brazo subsolador alado avanza sobre el bloque de suelo, grandes desplazamientos ocurren en todas direcciones, venciéndose las fuerzas de resistencia del suelo y produciéndose su rompimiento.

Las tensiones de von Mises, desplazamientos y deformaciones unitarias del disco a la profundidad de trabajo (ae=100 mm) se muestran en la Figura 7. La fuerza aplicada es de 0,9 kN y el momento de torsión es 80 Nm. Del análisis por elementos finitos se observa que, el mayor valor de tensiones de von Mises obtenido (206,48 MPa) no supera el límite elástico del material utilizado en la fabricación del mismo (620,4 MPa), por lo que el disco resiste los esfuerzos a que está sometido durante su funcionamiento. Asimismo, los valores máximos de desplazamientos y deformaciones son despreciables y no afectan de modo significativo su trabajo.

Para el brazo subsolador alado (Fig. 8), las tensiones de von Mises alcanzan su valor máximo (79 MPa) en la superficie de ataque de la reja. Del análisis por elementos finitos realizado al subsolador alado, se observa que los valores de tensiones obtenidos no superan el límite elástico del material, resistiendo los esfuerzos a que está sometido durante su funcionamiento. Los desplazamientos y deformaciones son despreciables.

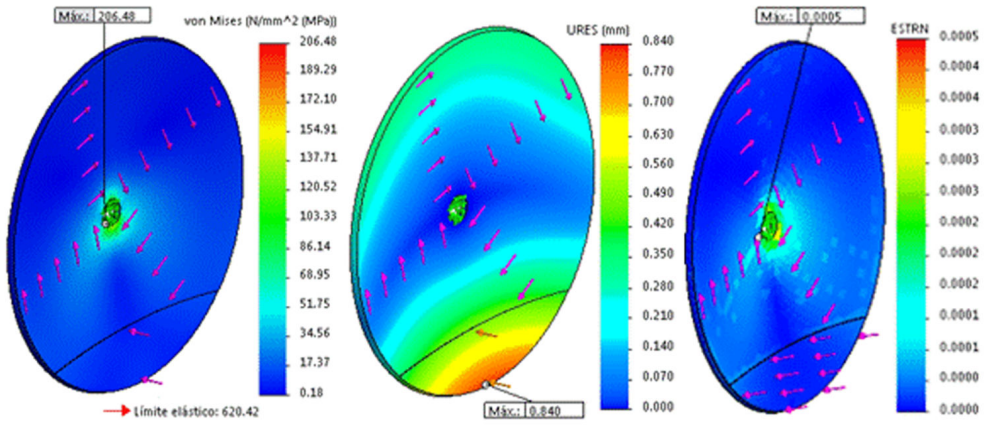


Figura 7. Tensiones de von Mises, desplazamientos y deformaciones del disco.

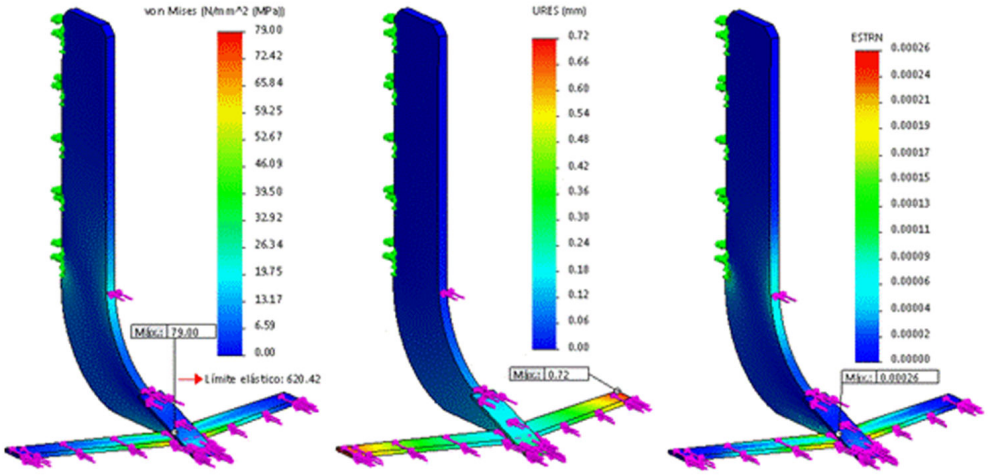


Figura 8. Tensiones de von Mises, desplazamientos y deformaciones del brazo subsolador alado.

CONCLUSIONES

Dos modelos de simulación tridimensionales de la interacción suelo-herramienta de labranza, utilizando el MEF han sido desarrollados, demostrando que este método permite simular ambos modelos de forma adecuada.

El modelo elastoplástico de relación constitutiva de Drucker-Prager utilizado en la simulación fue capaz de predecir el comportamiento del suelo al interactuar con las herramientas de labranza utilizadas.

Los valores de las tensiones resultantes de ambos modelos son similares a otros encontrados en investigaciones previas. Para el arado de discos, los mayores valores de tensiones se obtuvieron en el diámetro interior del mismo. Para el subsolador alado, fueron obtenidos en superficie de ataque.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la simulación numérica mediante el MEF de ambos modelos y teniendo en cuenta los parámetros geométricos y condiciones de operación de las herramientas de labranza utilizadas, se recomienda para trabajos futuros su validación experimental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-HAMDEH, N. H. and R. C. REEDER. "A nonlinear 3D FE analysis of the soil forces acting on a disk plow". *Soil & Tillage Research,* 74, 115-124, 2003.

AHMAD F.; QIU B. J.; DING Q. S.; DING W. M.; KHAN Z. M.; SHOAIB M.: ALI CHANDIO F.; REHIM, A. and ABDUL KHALIQ. "DEM simulation of disc type furrow openers in paddy soil". *Int J Agric & Biol. Eng*; 13(4): 103-110, 2020.

ANI, A.O.; UZOEJINWA, B.B.; EZEAMA, O.A.; UGWU, S.N.; OHAGWU, C.J.; ODIGBOH, E.U.: "Soil Bin Facility for Soil-machine Interaction Studies", En: *Department of Agricultural and Bioresources Engineering, University of Nigeria, Nsukka*, *International Soil Tillage Research Organization (ISTRO) Nigeria Symposium, Akure, November 3 - 6*, Nsukka, Nigeria, pp. 110 - 124, 2014.

AREFI, M.; SEYED H. KARPARVARFARD; HADI AZIMI-NEJADIAN and MOJTABA NADERI-BOLDAJI. "Draught force prediction from soil relative density and relative water content for a non-winged chisel blade using FE modeling". *Journal of Terramechanics*, Volume 100, Pages 73-80. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2022.01.001. (2022).

ARMIN, A.; SZYSZKOWSKI, W.; FOTOUHI, R.: "3D Finite Element Analysis of Curved Blade's Mechanics in Farming Tillage Operations", En: *World Congress on Engineering 2016 Vol II WCE 2016, June 29 - July 1*, London, U.K., 2016.

CID, L.G.; LÓPEZ, T.; GONZÁLEZ, F.; HERRERA, J.; RUIZ, M.E.: "Propiedades físicas de algunos suelos de Cuba y su uso en modelos de simulación", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(2): 42-46, 2011, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.

DEHGHAN, H. H. and D. KALANTARI. "Design a biomimetic disc using geometric features of the claws". *Agric Eng Int*: *CIGR Journal*, 18(1):103-109, 2016.

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. (2022).

HE, C.; YOU, Y.; WANG, D.; WANG, G.; LU, D.; KAJI, M.J.: "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, A.; PÉREZ, J.; BOSCH, D.; CASTRO, N. Clasificación de los suelos de Cuba 2015. *edit. Ediciones INCA,* Mayabeque, Cuba*, 2015, 93 p*, Ed. IINCA, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, 2015, ISBN: 978-959-7023-77-7.

HERNÁNDEZ, A.; PÉREZ, J.M.; ASCANIO, O.; ORTEGA, F.; ÁVILA, L.; CÁRDENAS, A.; MARRERO, A.: "II Clasificación genética de los suelos de Cuba", *Revista Agricultura*, 8(1): 47-69, 1975.

HERRERA, S. M. Simulación del comportamiento mecánico de los suelos ferralíticos rojos mediante el

método de elementos finitos. 109 pp. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Técnicas Agropecuarias), Departamento de Mecanización Agrícola, Universidad Agraria de La Habana, La Habana, Cuba, 2006.

HERRERA, S. M.; C. E. IGLESIAS; O. GONZÁLEZ; E. LÓPEZ y A. 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*, 17(3): 31-37, 2008.

IBRAHMI, A.; BENTAHER, H.; MAALEJ, A.: "Soil-blade orientation effect on tillage forces determined by 3D finite element models", *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12(4): 941-951, 2014, ISSN: 2171-9292.

KUŘE, J.; M. LINDA; R. CHOTĚBORSKÝ; B. ŢERNILOVÁ and M. HROMASOVÁ. "DEM modelling of tillage tools in sand and verification of draft forces in the soil box". *Agronomy Research* 19(4), 1813-1822. https://doi.org/10.15159/AR.21.147 (2021).

LAMIA, A. A. D., EL-HADDAD, Z. A. and AFIFY M. T. "Modeling the Effect of Soil-Tool Interaction on Draft Force Using Visual Basic". *Annals of Agric. Sci*. 123 Moshtohor. Vol. 58(2), p. 223 - 232. ISSN 1110-041. https://assjm.journals.ekb.eg. (2020).

MARÍN, C.L.O.; GARCÍA DE LA FIGAL, C.A.: "Model of Soil-TillageTool Interaction Using Finite Element Method", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(4), 2019, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.

MARÍN, C.L.O.; GARCÍA DE LA FIGAL, C.A.; RODRÌGUEZ M, A. "Effect of the Geometry of the Arm of a Vibratory Scarifier". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN -1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, Vol. 29. No. 2 (April-May-June, pp. 5-14), 2020.

MARÍN C., L. O.; GARCÍA DE LA FIGAL C., A. E. y MARTÍNEZ R., A. "Effect of Vibrations and Operational Parameters in Frequency and Amplitude of a Vibratory Subsoiler". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN -1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, Vol. 30. No. 2 (april-may-june, pp. 23-36), 2021.

MARÍN, C.L.O.; GARCÍA DE LA FIGAL, C.A.; RODRÌGUEZ M, A: "Draft Force Prediction of Narrow Tillage Tool by the Finite Element Method". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Vol. 31. No. 3 july-september 2022.

MARÍN, C.L.O. Análisis de la interacción suelo-escarificador vibratorio mediante el método de elementos finitos. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias. Universidad Agraria de la Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria, 2023.

MARÍN C., L. O.; GARCÍA DE LA FIGAL C., A. E. y MARTÍNEZ R., A. Influencia de la velocidad de avance en las fuerzas de corte de un subsolador vibratorio. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Vol. 32, No. 1. (2023).

MILEUSNIĆ, Z.; ELMIRA SALJNIKOV; RADE L. RADOJEVIĆ and DRAGAN V. PETROVIĆ. "Soil compaction due to agricultural machinery impact". *Journal of Terramechanics*,Volume 100, https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.12.002. Pages 51-60 (2022).

TOROTWA, I.; QISHUO DING; JOSEPH ODERO ALELE and RUIYIN, HE. "3D FE analysis of the tillage and straw cutting performance of a curved-edged toothed disc". Scientific Paper *Eng. agríc*. (Online) 42 (2). https://doi.org/10.1590/1809-4430. (2022).

UCGUL, M.; C. SAUNDERS y J. M. FIELKE: "Discrete element modeling of tillage forces and soil movement of a one-third scale moldboard plough", *Biosystems Engineering*, 155: 44-54, 2017, ISSN: 1537-5110.

WORKESA, DULA. M. and DEREJE ALEMU ANAWUTE. "Design of subsoiler for deep tillage operation of compacted soil due to heavy duty agricultural machinery traffic on the field". *Middle East Journal of Applied Science & Technology*. Vol.4, Iss.1, Pages 30-50, January-March. (2021).