

Simulación de la labranza sin inversión del suelo empleando el método de los elementos discretos

Simulation of non-inverted soil tillage using the discrete element method

Elvis López-Bravo^{I*}, Arley Placeres-Remíor^{II},

Omar González-Cueto^I, Arturo Martínez-Rodríguez^{III} and Miguel Herrera-Suárez^{IV}

^IUniversidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Facultad de Ciencias Agrícolas, Departamento de Ingeniería Agrícola, Cuba.

^{II}Universidad Católica de Temuco, Facultad Técnica, Chile.

^{III}Universidad Agraria de La Habana, UNAH. Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

^{IV}Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería Mecánica, Portoviejo, Manabí, Ecuador.

*Autor para Correspondencia: Elvis López-Bravo, e-mail: elvislb@uclv.edu.cu

RESUMEN: En el presente trabajo se desarrolla un modelo de simulación por el método de los elementos discretos (DEM) para la labranza sin inversión del prisma con un apero tipo paratill. El bloque virtual de suelo se conformó con macro-partículas que responden a la geometría simplificada de los fragmentos del suelo con atributos y propiedades físico-mecánicas de un suelo cohesivo del tipo vertisol. Para el modelo virtual del apero se realizó el diseño y estudio resistivo del paratill mediante el método de elementos finitos (FEM). La simulación de la interacción del apero y el bloque de suelo permitió determinar los patrones de movimiento y velocidad de las partículas, así como la magnitud de la fuerza de tiro. Los resultados mostraron que el diseño del apero cumple con las exigencias tensionales que le permiten soportar sin deformaciones permanentes la actividad de labranza. Por su parte la dinámica del proceso de labranza permitió establecer la posición final de las partículas, así como las presiones específicas entre ellas y con el apero. Finalmente se obtuvo el valor promedio de la fuerza tiro mediante la simulación, estando en correspondencia con la cohesión del suelo y el diseño del paratill. La validación analítica, mediante las ecuaciones de la mecánica clásica, mostraron adecuados resultados de la fuerza de tiro.

Palabras clave: modelo, numérico, virtual, fuerza, partículas.

ABSTRACT: In the present work, a simulation model is developed by the discrete element method (DEM) for tillage without soil prism inversion with a paratill type implement. The virtual soil block was generated with macro-particles that respond to the simplified geometry of soil fragments with attributes and physical-mechanical properties of a cohesive soil of the vertisol type. For the virtual model of the implement, the design and resistive study of the paratill is carried out using the finite element method (FEM). The simulation of the interaction between the implement and the soil block made it possible to determine the movement and velocity patterns of the particles, as well as the magnitude of the draft force, and the results showed that the design of the implement fulfills the tensile requirements that allow it to support the tillage activity without permanent deformations. On the other hand, the dynamics of the tillage process allowed establishing the final position of the particles, as well as the specific pressures between them and with the implement. Finally, the average value of the draft force was obtained by simulation, being in correspondence with the soil cohesion and the design of the tillage implement. The analytical validation, by means of the classical mechanics equations, showed adequate results of the draft force.

Keywords: Model, Numerical, Virtual, Force, Particles.

INTRODUCCIÓN

La introducción de aperos para la labranza vertical del suelo y con ello la no inversión del prisma, propicia la conservación de los suelos. Este tipo de apero evita el enterramiento de la capa fértil y mantienen una adecuada cantidad de residuos de cosechas sobre la superficie lo que hace posible reducir los efectos de la erosión, la liberación del carbono y la compactación (Topa *et al.*, 2021; Zeng *et al.*, 2021; Liebhard *et al.*, 2022; Tan *et al.*, 2025).

Los aperos del tipo *Paratill* fragmentan el suelo sin destruir su estructura ni alterar sus propiedades. Este apero posee un brazo o soporte con un ángulo de inclinación de

45° con respecto a la horizontal. La dinámica de proceso implica levantar suavemente el suelo, fracturarlo a lo largo de sus planos originales de falla y depositarlo mullido manteniendo su posición original. La no inversión del prisma evita la contaminación de la capa fértil con el sub suelo, para lo cual se trabaja en correspondencia a la capa arable. Este método favorece la reducción de la talla de los terrenos y el enterramiento de residuos de cosechas anteriores, mejora además la infiltración y absorción del agua, estimula el desarrollo de las raíces y permite la colocación de fertilizantes en zonas más profundas (Zeng *et al.*, 2021).

Recibido: 15/12/2024

Aceptado: 21/04/2025

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

CONTRIBUCIONES DE AUTOR: Conceptualización: E. López. Curación de datos: E. López, A. Placeres. Análisis formal: E. López, Placeres, O. González. Investigación: E. López, A. Placeres, M. Herrera, A. Martínez, O. González. Metodología: E. López. Supervisión: E. López, O. González. Validación: E. López, A. Placeres. Redacción-borrador original: E. López, M. Herrera. Redacción, revisión y edición: E. López, A. Placeres, 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/>



Por otra parte, numerosas técnicas de modelación numérica, relacionadas con la predicción de las fuerzas de tiro y el movimiento del suelo, han sido empleadas para predecir el desempeño de los medios para la labranza (Zein El-Din *et al.*, 2021; Cabrera *et al.*, 2022; Marín Cabrera *et al.*, 2022). Con el uso de modelos computacionales, donde se combinan los resultados experimentales y el conocimiento teórico, se han realizado simulaciones que ofrecen pronósticos con suficiente precisión, posibilitando así reducir el tiempo y los recursos de la etapa experimental. Métodos como el análisis en elementos finitos (FEM), elementos discretos (DEM), redes neuronales artificiales (ANN) y dinámica de fluidos computacionales (CFD), han sido empleados para la simulación de los procesos que tienen lugar en el suelo. La modelación en DEM por su parte, se caracteriza por el empleo de un medio discreto de partículas que interactúan de forma independiente acorde a las ecuaciones de la mecánica clásica ofreciendo así suficientes recursos para lograr una representación de la dinámica de la interacción del suelo en los procesos de labranza y la variación de sus propiedades (Sun *et al.*, 2018; Patidar *et al.*, 2024; Sedara *et al.*, 2025).

El presente trabajo tuvo como objetivo la determinación de la dinámica del suelo y la fuerza de tiro durante la simulación en elementos discretos de un proceso de labranza del suelo sin inversión del prisma.

MATERIALES Y MÉTODOS

Configuración del bloque de suelo

El bloque de suelo para el modelo virtual se obtuvo mediante la generación de 85 000 partículas empleando el editor gráfico del software *EDEM Solution, Altair Engineering, Inc* como muestra la figura 1(a). Las partículas de suelo fueron generadas siguiendo un orden aleatorio lo que posibilitó el llenado sin patrones de posición. Al caer las partículas por el efecto de la gravedad se determinaron los contactos a través del modelo para suelos cohesivos basados en la teoría de Mohr-Coulomb desarrollado en *EDEM*, activándose así las fuerzas de cohesión entre partículas hasta alcanzar el bloque de suelo una altura total de 0,4 m. Las partículas empleadas en el modelo de suelo a escala macro, fueron esferas de radio 2 mm con masa de $8,4 \times 10^{-5}$ kg, volumen de $3,3 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ y momentos de inercia en los ejes x, y, z de $1,3 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^2$.

TABLA 1. Parámetros físicos del modelo de suelo

Parameters	Simb	Values	Units
Tensión de falla	τ_{50}	539,9	kPa
Módulo de Elasticidad	E	53,9	MPa
Coeficiente de Poisson	v	0,28	
Cohesión	X	72,6	kPa
Adherencia	χ_a	5,42	kPa
Fricción interna suelo	ϕ	22,2	°
Fricción suelo-metal	δ	15,3	°

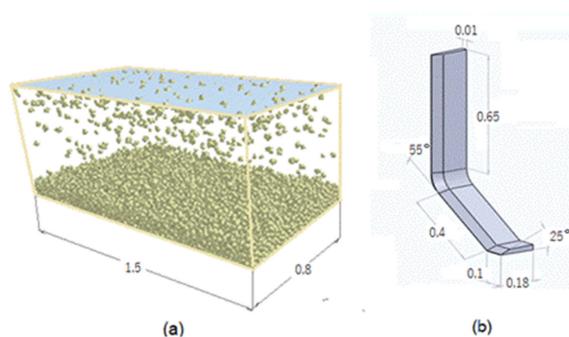


FIGURA 1. a) Generación del bloque de suelo, b) geometría del apero.

Las propiedades físicas asignadas a las partículas virtuales responden a las condiciones de un suelo tipo vertisol con una humedad de 22% y densidad aparente de $1,18 \text{ g/cm}^3$. Los parámetros físicos empleados en el modelo se muestran en la Tabla 1.

El diseño del paratill (Figura 1b) y el estudio de resistencia, se realizó empleando el software *SolidWorks 3D CAD* empleando el Método de los Elementos Finitos. Para ello se empleó como material del apero el acero AISI 1045 donde se establecieron restricciones en la base de la herramienta y en la superficie lateral de la misma las que corresponden a la fijación de esta al bastidor. Las fuerzas se aplicaron en la superficie frontal a lo largo del filo, donde tiene lugar la interacción del suelo con la misma. Se determinaron en el apero las tensiones Von Mises y el desplazamiento como indicador de resistencia a la deformación plástica. Las tensiones fueron aplicadas de forma escalonada hasta alcanzar la magnitud de 0,6 kN.

Para la verificación analítica se utilizó el modelo semiempírico de Perumpral *et al.* (1983), el cual incluye los parámetros definidos en el modelo de suelo, en el mismo la fuerza de tiro se determina mediante la siguiente ecuación:

$$D = w_t(\gamma z^2 N_\gamma + c z N_c + c_a z N_a) \quad (1)$$

donde:

D = fuerza de tiro [N],
 w_t = ancho del apero [mm],
 γ = densidad [g/cm^3],
 z = profundidad [mm],
 c = cohesión [Pa],
 c_a = adherencia [Pa],
 N_γ, N_c, N_a = coeficientes

Los parámetros del modelo fueron trazados una secuencia de la simulación de la interacción del suelo con una herramienta simple y de este modo se determinó el valor de la fuerza de tiro empleando la [ecuación 1](#).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la rigidez de la herramienta

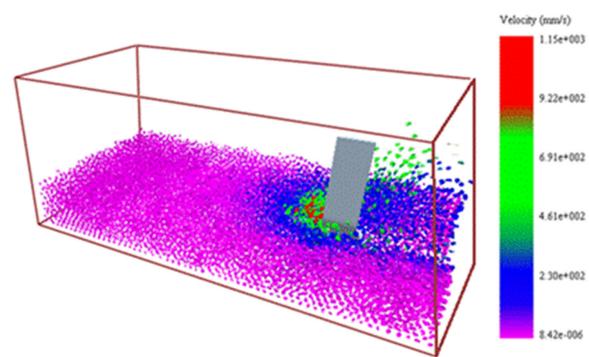
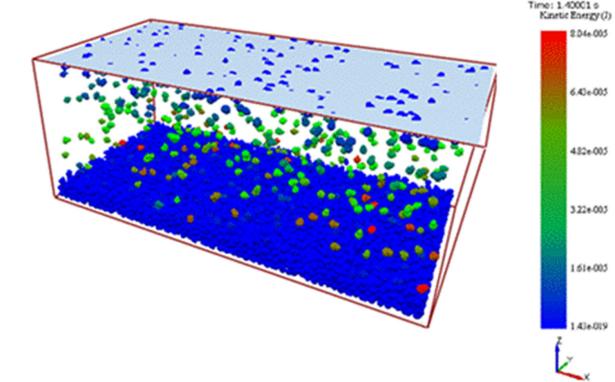
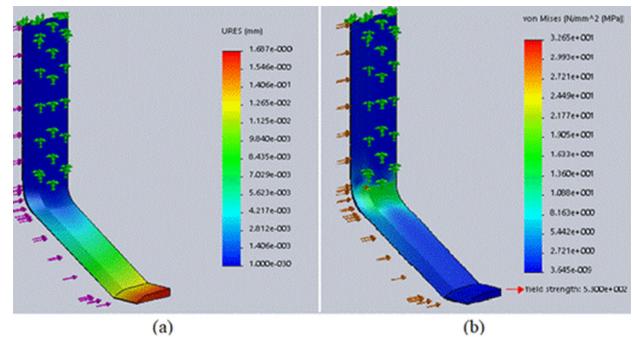
En la [figura 2](#) se muestra la localización de las restricciones y las reacciones en término de resistencia y desplazamiento del material, correspondientes a la aplicación de la tensión distribuida en la zona de filo del apero donde tiene lugar la interacción con el bloque de suelo.

El análisis del desplazamiento del apero, como resultado de la aplicación de las fuerzas mostró valores entre 1,5 y 1,7 mm correspondientes al extremo más alejado de la herramienta ([Figura 2a](#)), dicha deformación decrece considerablemente a medida que se acerca a la zona de fijación en la estructura. Por su parte, el cálculo de la tensión de falla a partir de la teoría Von Mises, muestra que los valores máximos se encuentran en la superficie curva del implemento ([Figura 2b](#)), la que soporta el brazo del segmento de corte horizontal y genera un momento flector que incrementa la concentración de tensiones en el radio de curvatura y se transmite al soporte del apero a través de la sección horizontal, sin embargo estas tensiones son considerablemente menores al coeficiente de seguridad del material, las demás secciones no presentan valores significativos. De tal modo se verifica que la estructura del cuerpo resiste a las solicitudes de la interacción con el suelo sin deformación plástica y con un elevado coeficiente de seguridad.

La distribución de la energía cinética durante el procedimiento de llenado del bloque de suelo se muestra en la [figura 3](#). Las partículas experimentan un incremento de la energía a partir de la posición inicial de generación al ser sometidas a la caída libre. Esta energía gravitacional es empleada en el modelo para activar las fuerzas de contacto encargadas de activar la cohesión entre partículas y formar la estructura del bloque, de este modo las partículas regresan nuevamente al estado de reposo, conformando un cuerpo estructurado capaz de brindar resistencia a las tensiones externas.

Análisis del patrón de movimiento de las partículas

El patrón de movimiento de las partículas de suelo, debido al contacto entre ellas y con el apero se muestra en la [Figura 4](#). El desplazamiento de las mismas tiene lugar describiendo trayectorias espaciales, como consecuencia del arrastre que provoca la herramienta, la velocidad promedio de desplazamiento para las que están directamente en contacto con el apero es de 0,6 m/s y máximas de 1,1 m/s, para las que se encuentran aledañas y solo en contacto entre ellas los valores son de 0,23 m/s.



Las partículas en contacto con la zona de corte horizontal del paratill muestran un desplazamiento en sentido vertical, las mismas son depositadas sobre la superficie del bloque posterior al paso del apero. La zona de movimiento de las partículas no sobrepasa el ancho nominal de 0,8 m del bloque, no obstante, se logra que con un ancho de trabajo de 0,5 m del apero se movilice un área aproximada al 70% del bloque de suelo. Todo ello demuestra la capacidad de fragmentación del suelo que poseen los implementos que se desplazan bajo la superficie sin provocar inversión del prisma, así como la posibilidad de su empleo en operaciones de labranza y cultivo localizado ([Zeng et al., 2021](#)).

Resultados de la fuerza de tiro

Como muestra la Figura 5, la fuerza de tiro incrementa a partir del contacto de la herramienta con el bloque de suelo y se caracteriza por la oscilación de los valores. Esta oscilación responde a la intermitencia de la fuerza necesaria para separar los contactos entre las partículas según la frecuencia de aparición de los mismos lo cual ha sido señalado por otros autores (Zhang *et al.*, 2023a). En la etapa inicial del recorrido se aprecia un incremento del valor de las fuerzas lo que precede a un acomodamiento del flujo de partículas que propicia una mejor estabilidad en los valores. El valor promedio resultante de la fuerza es de 0,47 kN, lo cual está en correspondencia con la cohesión del suelo y el diseño del paratill siendo esta la componente principal durante las operaciones de labranza la cual actúa en sentido contrario al movimiento del apero.

Los resultados concuerdan con estudios realizados por varios autores donde se han obtenido resultados mediante la simulación que permiten determinar su variación en función de las condiciones del suelo en función del diseño del implemento y su posterior validación en condiciones de campo (Kuře *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2022; Abdeldayem y Tekeste, 2025).

En la zona de contacto entre el apero y el bloque de suelo aparecen las variaciones de presión específica, lo que identifica el estado tensional de la zona de corte (Figura 6). Las máximas presiones se muestran en color rojo y se incrementan a medida que se acercan a la saeta del paratill.

El estado tensional de las partículas de suelo y del implemento depende del nivel de cohesión entre partículas, las restricciones geométricas que imponen el apero y su velocidad de traslación (Kim *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023a). Este valor muestra las tensiones a un nivel macro-escalar y que tienen lugar en cada zona de contacto, estas tensiones son las responsables de la desfragmentación de los agregados del suelo en partículas más pequeñas en correspondencia con estudios realizados (Zhang *et al.*, 2023b; He *et al.*, 2025).

Por su parte, la determinación analítica del valor de la fuerza de tiro, empleando los parámetros específicos del modelos y las ecuaciones propuestas por Perumpral *et al.* (1983), tuvo un valor de 0,53 kN. Este valor muestra una diferencia que excede en un 10,6% la fuerza de tiro promedio obtenido mediante la simulación lo que es aceptable, considerando la oscilación del plano de corte principal que tiene lugar debido al movimiento de las partículas durante la simulación, así como la variación de la altura del suelo frente a la herramienta. Por otra parte los resultados de los modelos empíricos se enmarcan de un 60 a 80% de precisión. No obstante algunos estudios consideran que los modelos DEM muestran una tendencia a sobre estimar los valores de las fuerzas (Obermayr *et al.*, 2011).

CONCLUSIONES

1. En el estudio estático de la resistencia del apero tipo paratill se determinó que el diseño del mismo cumple con las exigencias tensionales que le permiten

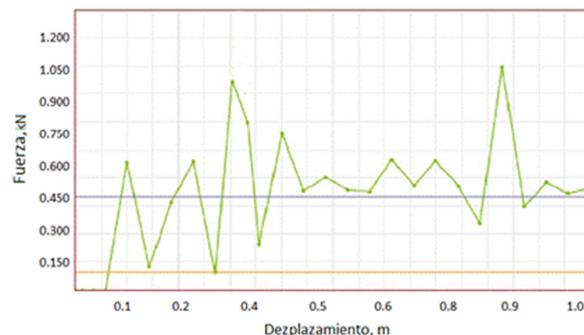


FIGURA 5. Fuerza de tiro respecto al desplazamiento.

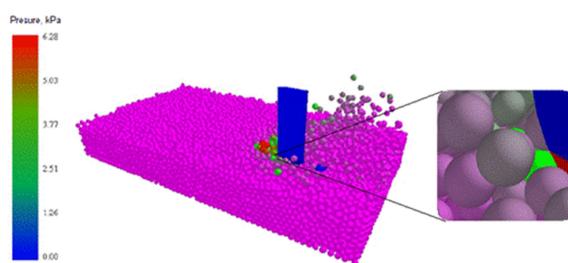


FIGURA 6. Distribución de las presiones específicas.

soportar sin deformaciones permanentes la actividad de labranza.

2. La simulación de la dinámica del proceso de labranza mostró adecuados patrones de movimiento y velocidad de las partículas del suelo, permitiendo establecer la posición final de las mismas, así como las presiones específicas entre ellas y con el apero.
3. El valor promedio de la fuerza tiro, obtenida mediante la simulación fue de 0,47 kN, lo cual está en correspondencia con la cohesión del suelo y el diseño del paratill. Este valor corresponde con los resultados de la validación analítica realizada donde se obtuvo error de 10.6%.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELDAYEM, M. A.; TEKESTE, M. Z.: "Simulation of cohesive-frictional artificial soil-to-blade interactions using an elasto-plastic discrete element model with stress-dependent cohesion", *Journal of Terramechanics*, vol. 117 (1): 2025. ISSN:0022-4898.
- MARÍN-CABRERA, L. O.; GARCÍA DE LA FIGAL, C. A. E.; MARTÍNEZ, R. A.: "Draft Force Prediction of Narrow Tillage Tool Using the Finite Element Method", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 31 (3): 2022. ISSN:2071-0054.
- HE, D.; LI, H.; HE, J.; LU, C.; WANG, C.; WANG, Y, et al. GAO, Z.: "Research on vibration characteristics of no-tillage seeding unit based on the MBD-DEM coupling", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 230 (1): 2025. ISSN:0168-1699.

- KIM, Y.-S.; LEE, S.-D.; BAEK, S.-M.; BAEK, S.-Y.; JEON, H.-H.; LEE, J.-H., et al. SIM, T.: "Development of DEM-MBD coupling model for draft force prediction of agricultural tractor with plowing depth", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 202 (1): 2022. ISSN:0168-1699.
- KIM, Y.-S.; SIDDIQUE, M. A. A; KIM, W.-S.; KIM, Y.-J.; LEE, S.-D.; LEE, D.-K., et al. LIM, R.-G.: "DEM simulation for draft force prediction of moldboard plow according to the tillage depth in cohesive soil", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 189 (1): 2021. ISSN:0168-1699.
- KUŘE, J.; LINDA, M; CHOTĚBORSKÝ, R.; ČERNILOVÁ, B.; HROMASOVÁ, M.: "DEM modelling of tillage tools in sand and verification of draft forces in the soil box", *Agronomy Research* vol. 19 (4): 2021. ISSN:2228-4907.
- LIEBHARD, G.; KLIK, A.; NEUGSCHWANDTNER, R. W.; NOLZ, R.: "Effects of tillage systems on soil water distribution, crop development, and evaporation and transpiration rates of soybean", *Agricultural Water Management*, vol. 269 (1): 2022. ISSN:0378-3774.
- MARÍN-CABRERA, L. O.; GARCÍA DE LA FIGAL-COSTALES, A. E.; MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, A.: "Predicción de Fuerza Traccional de herramienta de labranza estrecha mediante el Método de Elementos Finitos", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 31 (3): 2022. ISSN:2071-0054.
- OBERMAYR, M.; DRESSLER, K.; VRETTO, C. S.; EBERHARD, P.: "Prediction of draft forces in cohesionless soil with the Discrete Element Method", *Journal of Terramechanics*, vol. 48 (3): 47-58, 2011. ISSN:0022-4898.
- PATIDAR, P.; SONI, P.; JAIN, A.; MAHORE, V.: "Modelling soil-rotor blade interaction of vertical axis rotary tiller using discrete element method (DEM)", *Journal of Terramechanics*, vol. 112 (1): 59-68, 2024. ISSN:0022-4898.
- PERUMPRAL, J. V.; GRISSO, R. D.; DESAI, C. S.: "A soil-tool model based on limit equilibrium analysis", *Transactions of the ASABE*, vol. 26 (4): 991-996, 1983. ISSN:2151-0040.
- SEDARA, A. M.; ABDELDAYEM, M. A.; DE FREITAS, F. P. G.; MEHARI, T. Z.: "Optimization of subsoiler design using similitude-based DEM simulation and soil bin testing on cohesive-frictional artificial soil", *Journal of Terramechanics*, vol. 117 (1): 2025. ISSN:0022-4898.
- SUN, J.; WANG, Y.; MA, Y.; TONG, J.; ZHANG, Z.: "DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth >40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics", *Advances in Engineering Software*, vol. 119 (1): 30-37, 2018. ISSN:09659978.
- TAN, H.; SHEN, C.; MA, J.; WU, C.; XU, L.; MA, S.: "The reduction of energy consumption and soil disturbance mechanisms in trenching using biomimetic blades", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 230 (1): 2025. ISSN:0168-1699.
- TOPA, D.; CARA, I. G.; JITĂREANU, G.: "Long term impact of different tillage systems on carbon pools and stocks, soil bulk density, aggregation and nutrients: A field meta-analysis", *Catena*, vol. 199 (1): 2021. ISSN:0341-8162.
- ZEIN EL-DIN, A. M.; YOUSSEF-TAHA, R. M.; ABDEL-HAMIED, R. G.: "Mathematical models for predicting draft forces of tillage tools: A Review", *Journal of the Advances in Agricultural Researches*, vol. 26 (2): 48-52, 2021. ISSN:1110-5585.
- ZENG, Z.; THOMS, D.; CHEN, Y. MA, X.: "Comparison of soil and corn residue cutting performance of different discs used for vertical tillage", *Scientific Reports*, vol. 11 (1): 2021. ISSN:2045-2322.
- ZHANG, C.; XU, J.; ZHENG, Z.; WANG, W.; LIU, L.; CHEN, L.: "Three-dimensional DEM tillage simulation: Validation of a suitable contact model for a sweep tool operating in cohesion and adhesion soil", *Journal of Terramechanics*, vol. 108 (1): 59-67, 2023a. ISSN:0022-4898.
- ZHANG, J.; XIA, M.; CHEN, W.; YUAN, D.; WU, C.; ZHU, J.: "Simulation analysis and experiments for blade-soil-straw interaction under deep ploughing based on the discrete element method", *Agriculture*, vol. 13 (1): 136, 2023b. ISSN:2077-0472.

Elvis López-Bravo, Dr.C., Profesor Titular, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Facultad de Ciencias Agrícolas, Departamento de Ingeniería Agrícola, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Arley Placeres-Remior, Dr.C., Profesor, Facultad Técnica, Universidad Católica de Temuco, Chile. e-mail: aplaceres@uct.cl.

Omar González-Cueto, Dr.C., Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, e-mail: omar@uclv.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.

Miguel Herrera-Suárez, Dr.C., Profesor Titular, Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería Mecánica, Portoviejo, Manabí, Ecuador. e-mail: miguelhs2000@yahoo.com

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.