

Determinación experimental del esfuerzo de adherencia en la interface suelo-metal

Experimental determination of soil-metal adhesion

M.Sc. Alexander Laffita Leyva, Dr.C. Armando Eloy García de la Figal Costales, Dr.C. Ernesto Ramos Carbajal, Dr.C. Pedro A. Valdés Hernández

Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

RESUMEN. Se determinó experimentalmente los valores del esfuerzo de adherencia en la interface suelo-metal para suelos Ferralíticos rojo compactado en función de la humedad volumétrica de 26,71 y 34,13%, esfuerzos normales de 3,33; 4,51 y 6,30 kPa y en condiciones de laboratorio en el canal de pruebas del Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA). Los valores del esfuerzo de adherencia así obtenidos: 2,981; 3,828 y 4,478 kPa, para esfuerzos normales de 3,331; 4,506 y 6,299 kPa, respectivamente, manifiestan una tendencia inicial a aumentar con el incremento de los esfuerzos normales y la humedad volumétrica, hasta valores máximos por encima del límite plástico del suelo (30,07%); disminuyendo con el posterior aumento de la humedad volumétrica.

Palabras clave: suelo Ferralítico rojo, humedad volumétrica, esfuerzo normal.

ABSTRACT. The values of the strain of adherence in the interface soil-metal had been experimentally determined for compacted red Ferralitic soil in terms of 26.71 and 34.13% of volumetric humidity, normal strains of 3.33; 4.51 and 6.30 kPa, and in laboratory conditions in the Center of Agricultural Mechanization (CEMA). The values of the strain of adherence obtained were: 2.981; 3.828 and 4.478 kPa, for normal strains values of 3.331; 4.506 and 6.299 kPa, respectively, having an initial tendency to increase with the increment of the normal strain and the volumetric humidity, to maximum values above the plastic limit of the soil (30.07 %); decreasing with the later increase of the volumetric humidity.

Keywords: red Ferralitic soil; volumetric humidity; normal strain.

INTRODUCCIÓN

Para la modelación de los fenómenos que ocurren en la interface suelo-herramienta de labranza, se conoce que durante el proceso de corte continuo del suelo, existe un desplazamiento relativo entre el suelo y la herramienta, cuya magnitud depende de la rugosidad de la superficie de la segunda y de las características de fricción y adhesión del suelo. Este fenómeno se simplifica a partir de la consideración de la existencia de una interface totalmente rugosa, sin desplazamiento relativo, o totalmente lisa sin fricción (García de la Figal, 2010).

Las instalaciones y dispositivos utilizados durante los experimentos se dividen en dos grupos: dispositivos que registran las fuerzas de fricción que surgen cuando se desliza una lámina del material a experimentar por la superficie del suelo y un segundo grupo de dispositivos que utilizan el principio contrario: deslizamiento de probetas de suelo por la superficie del material a experimentar (García de la Figal, 2010).

En ambos casos existen deficiencias que se tienen en cuenta al definir el equipamiento y el método a utilizar, estas son: en el primer grupo, el proceso de fricción está acompañado de la deformación por aplastamiento del suelo con el surgimiento de una huella por donde desliza la lámina del material a experimentar y en el segundo, donde al final del experimento se observa el alisamiento de la superficie en fricción de la probeta de suelo, depositándose capas muy finas, gruesas o pequeñas motas de suelo adheridas a la superficie metálica, en dependencia de la humedad del suelo en la interface de las superficies en fricción.

En las condiciones reales de explotación de los órganos de trabajo de la maquinaria agrícola el área de las superficies metálicas que están en contacto con el suelo son mucho menores que el área de las superficies de los prismas de suelo que deforman y deslizan por la superficie de los primeros, deformándose y desplazándose las partículas del suelo en las zonas de contacto,

por lo que el fenómeno de la fricción suelo-metal incluye la deformación de la superficie del suelo (García de la Figal, 2010).

Por lo tanto, el método que más se ajusta a lo que ocurre durante el proceso de labranza de suelo lo constituye el primer grupo descrito anteriormente; sin embargo, el más utilizado según la literatura consultada es el último método (Owende y Ward, 1996; Durairaj y Balasubramanian, 1997; Makanga et al., 1997; Onwuaju y Watts, 1998; Hermawan et al., 1998; Mouazen et al., 2003; Aluko y Chandler, 2004; Tadesse, 2004; Herrera, 2006), recurriendo a la solución gráfica de Mohr-Coulomb para determinar la relación esfuerzo-deformación del suelo y obtener los valores de las propiedades físico mecánicas objeto de análisis.

Según el primer método, Rajaram y Erbach (1999), reportan tendencia de la adherencia a aumentar hasta un valor máximo de 0,3 kPa a 28% de humedad para, posteriormente, disminuir a 0,010 kPa a 40% de humedad (Figura 1), durante el ciclo de humedecimiento para un suelo arcilloso loamoso (clayloam), franco arcilloso según la clasificación del Departamento de Agricultura de los EUA (USDA), arcilla poco densa según ISSS.

Utilizando el segundo método, Herrera *et al.* (2008), reportaron valores de adherencia de 2 a 14 kPa (Figura 2), para el horizonte de 0 a 15 cm, intervalo de humedad de 20 a 40%, densidad de 1,0 a 1,4 g/cm³, en un suelo Ferralítico rojo compactado, Rhodic Ferralsol, arcilla poco densa según la International Society of Soil Science (ISSS). La adherencia presenta tendencia a aumentar de forma no lineal con el aumento de la humedad y la densidad.

Por otro lado, Zhang y Araya (2001), (Figura 3), reportan que:

- La adhesión inicialmente aumenta hasta un máximo de 3 kPa a 28,5% de humedad, para luego disminuir a 1 kPa a un 40% de humedad en un suelo Pseudo gley, franco arcilloso según ISSS, franco según USDA con límite plástico LP de 23,7% y límite líquido LL de 34,6%;
- Apreciaron comportamiento similar en tres horizontes (Ap, A, Cg1) de un suelo Meadow reportando valor máximo de adhesión de 10 kPa a 42% de humedad para el horizonte Ap, franco limoso según USDA o arcillo limoso según ISSS con 31,6% de LP y 75,2% de LL;

- Valor máximo de adhesión de 12 kPa a 34% en el horizonte A, arcilla según USDA o arcilla densa según ISSS con 35,1% de LP y 65,2% de LL;
- Valor máximo de adhesión de 8 kPa a 31% de humedad, para el horizonte Cg1, arcillas egún USDA o arcilla poco densa según ISSS con 27,4% de LP y 52,6% de LL.

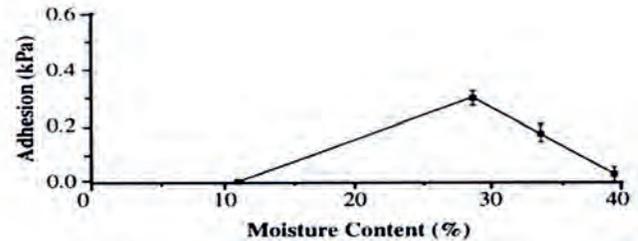


FIGURA 1. Comportamiento de la adhesión suelo metal en función de la humedad. Fuente: Rajaram y Erbach (1999).

D u r á n

(2002),

reporta que la adherencia permanece prácticamente constante en un intervalo de 8 a 20%, no siendo significativa con el aumento de la humedad hasta 25% en un suelo Haploxeralf vértico, suelo franco según la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

Wang *et al.* (1995), reportaron tendencia de la adherencia a aumentar en el rango de 2,35 y 4,6 kPa con el aumento de la humedad para un suelo arcilloso loamoso (Clayloam), en un intervalo de humedad de 19,4 a 41,2%.

Wang *et al.* (1998), reportaron que la adherencia manifiesta tendencia a aumentar en el rango de 10,5 a 18,6 kPa a humedades entre 38,7 y 45,3% para posteriormente disminuir a 16,9 kPa a un 49,8% de humedad para un suelo arenoso loamoso.

Sobre la base de las diferencias en los valores de la adherencia reportados por los investigadores antes analizados y teniendo en cuenta el criterio de que la superficie mayor es la del suelo, se propone determinar experimentalmente los valores del esfuerzo de adherencia en la interface suelo-metal para suelos Ferralítico rojo compactados en función de la humedad volumé-

trica, los esfuerzos normales, en condiciones de laboratorio del canal de pruebas del Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA).

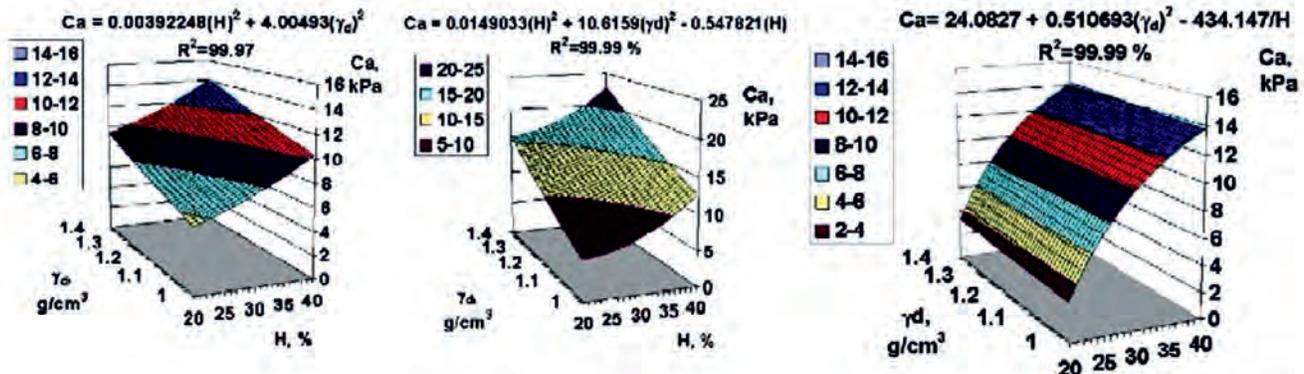
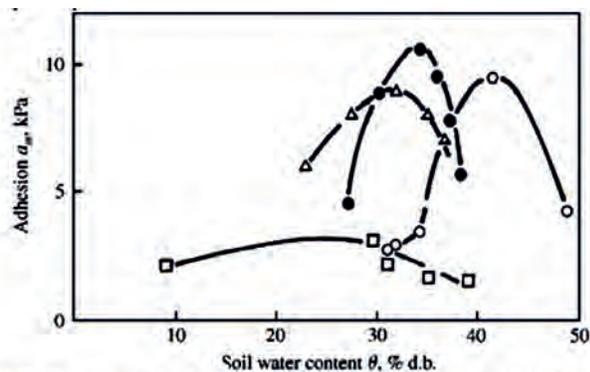


FIGURA 2. Comportamiento de la adhesión suelo metal. a) profundidad 0 a 15 cm; b) profundidad 15 a 30 cm; c) profundidad 30 a 50 cm. Fuente: Herrera (2008).

No se conoce el método empleado para la determinación de los resultados analizados.



LEYENDA: □-pseudogley soil; ○-meadow soil horizon Ap; ■-meadow soil horizon A; △-meadow horizon Cgl

FIGURA 3. Comportamiento de la adherencia suelo-metal en función de la humedad. Fuente: Zhang y Araya (2001).

MÉTODOS

Caracterización de las condiciones del canal de suelo. El suelo originalmente empleado en el canal de suelo del CEMA, es Ferralítico rojo lixiviado, según la clasificación de la Soil Taxonomy de Estados Unidos, franco arcilloso según la clasificación USDA; arcilla poco densa según ISSS y arcillo limoso según el Instituto de Suelo de la Academia de Ciencias de Cuba (ISACC), proveniente de la zona agrícola de San José de las Lajas, en la Provincia de Mayabeque, Cuba y cuyas principales características físicas se muestran en la Tabla 1 (Hernández *et al.*, 1999).

TABLA 1. Características físicas del suelo objeto de estudio

Límites de consistencia (%)			Granulometría (%)			MO (%)
LL	LP	IP	Arena	Limo	Arcilla	
61,1	30,7	30,4	19	43	38	3,01

Nota: LL: Límite líquido; LP: Límite plástico; IP: índice de plasticidad; MO: cantidad demateria orgánica en el suelo. Fuente: González *et al.* (2008)

Diseño experimental para determinar la adherencia del suelo a la superficie metálica (σ_{adh})

Como variable dependiente se establece la fuerza de adhesión del suelo a la superficie metálica y como variables independientes o factores se definen la humedad volumétrica del suelo H_v y el esfuerzo normal σ con tres niveles de variación para cada uno (bajo, intermedio y alto). Definiéndose un diseño de naturaleza factorial 3^2 , con tres repeticiones por tratamiento.

Para la determinación de la adherencia entre suelo-metal se prepara el suelo sin destruir su textura y estructura, desterronando y eliminado las gravas, se compacta con un rodillo de 850 N y nivelada con la ayuda de un perfil rectangular de aluminio de 2 m de longitud y nivel de burbuja de precisión de 0,258°. Se riega agua sobre el suelo, garantizando tres niveles de humedad H_v . Con una maqueta especialmente construida (Fig. 4) se coloca sobre el suelo una plato metálico de diámetro 144,5 mm y masa 540 g, sobre el cual son colocadas sucesivamente masas calibradas de 5, 7 y 10 kg,

respectivamente, para obtener sobre el suelo tres niveles de esfuerzo normal: $\sigma = 3,331; 4,506$ y $6,299$ kPa, unida al transductor de fuerza.

Deslizándose inicialmente el plato metálico aproximadamente 20 mm sobre el suelo se tracciona en la dirección vertical, a una velocidad constante de 0,5 mm/s, mediante un moto-reductor. La señal del transductor de fuerza durante todo el proceso (pretensión del cable, separación de la superficie metálica-masa calibrada del suelo y equilibrio estático o posición de reposo) es registrada en tiempo real por el sistema de adquisición de datos dinámicos y procesados en el software YE-7600 con una resolución de 751 lecturas por segundo. De la superficie metálica en contacto con el suelo se toman fotos mediante una cámara Nikon de 8 Megapíxeles (Figura 5) y se procesa el área de adherencia suelo metal en el software para tratamiento de imágenes Imagen Tool.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Del comportamiento de la adherencia σ_{adh} mostrado en la Figura 6, se observa que: para el esfuerzo normal σ igual a 3,331 kPa, la misma manifiesta una tendencia a aumentar con el incremento de la humedad volumétrica H_v hasta obtener un máximo de 2,981 kPa para H_v igual a 29,38% y disminuir posteriormente con el aumento de H_v .



FIGURA 4. Maqueta para determinar la adherencia.

Comportamiento similar fue obtenido para esfuerzos normales σ iguales a 4,506 y 6,299 kPa, obteniéndose valores máximos de adherencia σ_{adh} de 3,828 y 4,478 kPa para 28,92 y 29,53% de H_v , respectivamente. En todos los casos se aprecia que los máximos valores de adherencia se encuentran en el entorno del límite de plasticidad del suelo.

Comportamientos similares de la adherencia obtuvieron Zhang y Araya (2001), en un suelo franco (Pseudogley) y en un suelo negro pardo típico de China (meadowsoil), así como Bradford (1980), en un suelo (menfrosoil) en Estados Unidos.

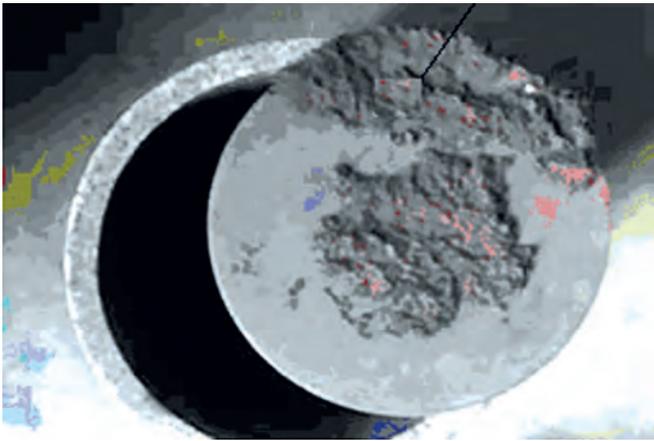


FIGURA 5. Masa de suelo adherida a la superficie metálica.

Los resultados experimentales muestran que el valor de σ_{adh} sobre una superficie metálica de acabado superficial $R_z=3,2$; está condicionado por el nivel de H_v ; para niveles inferiores al 25% de H_v no fue significativo los valores de σ_{adh} , para cada uno de los tres niveles de σ estudiados. Para niveles de H_v por encima del 26%, la adherencia mostró incrementos significativos (Figuras 7 y 8).

Para estimar la adherencia en función de la humedad volumétrica y el esfuerzo se obtienen del análisis de regresión entre las variables: esfuerzo de adherencia σ_{adh} y humedad volumétrica H_v , para cada nivel de esfuerzo normal σ las tres expresiones obtenidas del programa profesional Table Curve 2D versión 5.0 con coeficientes de determinación igual a 0,89; 0,95 y 0,92; respectivamente, las cuales se exponen a continuación:

$$\ln(\sigma_{adh}) = -10,210 + 0,014 * H_v^2 - 1,69 * 10^{-13} * e^{H_v}, \text{ kPa} \tag{1}$$

$$\sigma_{adh} = -99,308 + (6076,308 / H_v) - (889815,2 / H_v^2) \text{ kPa} \tag{2}$$

$$\sigma_{adh} = 2005,805 - 61,904 * H_v + (0,631 * H_v^2) - (21397,36 H_v), \text{ kPa} \tag{3}$$

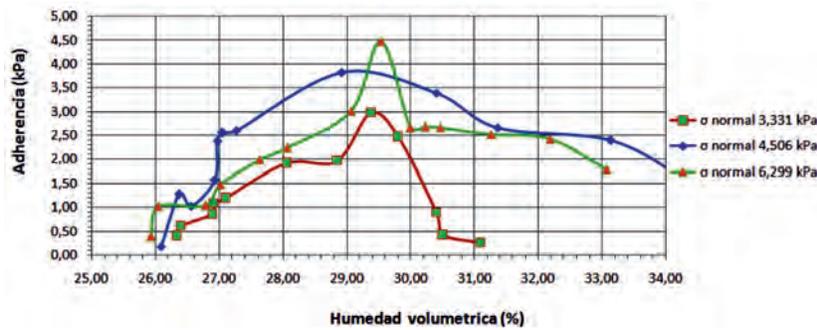


FIGURA 6. Comportamiento de la adherencia suelo-metal σ_{adh} en función del esfuerzo normal σ y la humedad volumétrica H_v .

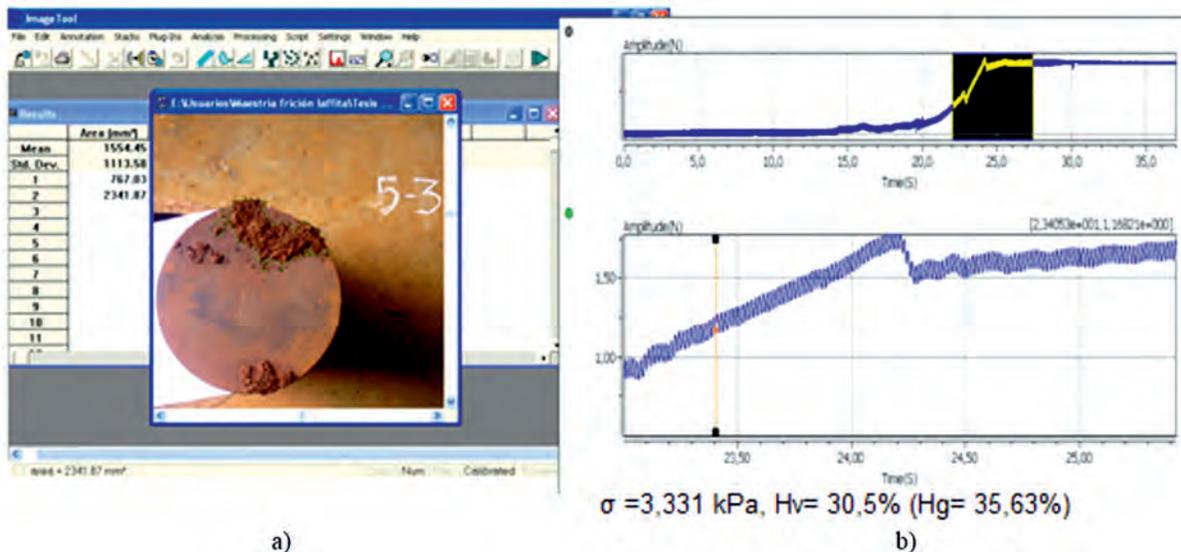


FIGURA 7. Comportamiento de la adherencia σ_{adh} para H_v de 30,5% (humedad gravimétrica H_g 0 36,66%) y σ de 3,331 kPa. a) suelo adherido a superficie metálica; b) señal del transductor de fuerza.

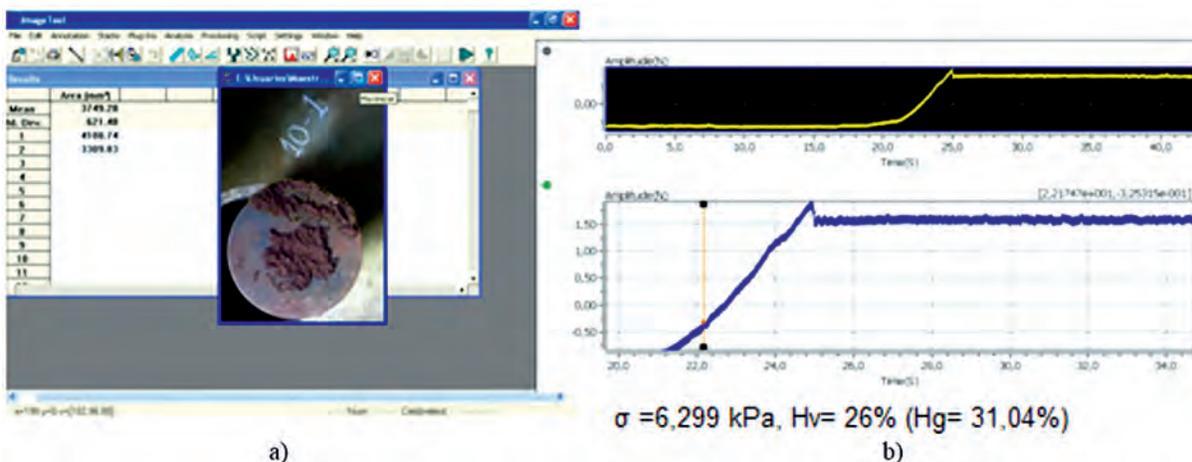


FIGURA 8. Comportamiento de la adherencia (σ_{adh}) para H_v de 26% (humedad gravimétrica H_g 31,04%) y σ de 6,299 kPa a) suelo adherido a superficie metálica; b) señal del transductor de fuerza.

CONCLUSIONES

- Los valores experimentales del esfuerzo de adherencia aumentan con el incremento de los esfuerzos normales y la humedad volumétrica, hasta valores máximos en el entorno del límite plástico del suelo (30,07%), para, posteriormente, disminuir con el sucesivo aumento de la humedad. Esta tendencia coincide con los valores reportados por otros investigadores.
- Los valores máximos del esfuerzo de adherencia obtenidos

son: 2,981; 3,828 y 4,478 kPa, para esfuerzos normales de 3,331; 4,506 y 6,299 kPa, respectivamente, los cuales son inferiores a los reportados por los investigadores que emplean el método de deslizar una superficie de suelo sobre metal.

- Se obtienen modelos estadísticos para determinar los valores del esfuerzo de adherencia en función de la humedad volumétrica con coeficientes de determinación de: 0,89; 0,95 y 0,92; para esfuerzos normales de: 3,331; 4,506 y 6,299 kPa, respectivamente.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALUKO, O., B.; CHANDLER H., W: "Characterization and Modelling of Brittle Fracture in Two-dimensional Soil Cutting", *Biosystems Engineering*, ISSN: 1537-5110, E-ISSN: 1537-5129, 88(3): 369-381, 2004.
- BRADFORD, J., M: "The penetration resistance in a soil with well-defined structural units", *Soil science Society American Journal*, ISSN 1537-5110, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2004.03.009, DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400030034x, 44(3): 601-606, 1980.
- DURAIRAJ, C., D.; BALASUBRAMANIAN, M: "Influence of tool angles and speed on the soil reactions of a bent leg plough in two soils", *Soil Tillage*, DOI: 10.1016/S0167-1987(97)00048-2, 44: 37-150, 1997.
- DURÁN, G. H., M. "Efecto de la humedad en la resistencia mecánica de un suelo franco", *Journal of Terramechanics*, ISSN: 0022-4898, 20(3): 227-234, 2002.
- GONZÁLEZ, O.; IGLESIAS, C.; HERRERA, M.; LÓPEZ, E.; SÁNCHEZ, A: "Efecto de la humedad y la presión sobre el suelo en la porosidad total de un Rhodic Ferralsol". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 17(2): 50-54, 2008.
- HERMAWAN, W.; YAMAZAKI, M.; OIDA, A: "Experimental analysis of soil reaction on a lug of a movable lug Wheel", *Journal of Terramechanics*, DOI: 10.1016/S0022-4898(98)00017-2, 35(2): 119-135, 1998.
- HERNÁNDEZ, A.; PÉREZ, J.; BOSCH, D.; RIVERO, L.; CAMACHO, E.: *Nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba.*, ed. L.L Barcaz, Ed. AGRINFOR, t. 1, ISBN-959-246-022-1, La Habana, Cuba, 1999.
- HERRERA, S., M.; IGLESIAS, C., C.; 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 II", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 17(4): 5, 2008.
- MAKANGA, J., T.; SALOKHE V., M.; GEE-CLOUGH, D: "Effects of tine rake angle and aspect ratio on soil reactions in dry loam soil", *Journal of Terramechanics*, DOI: 10.1016/S0022-4898(98)00003-2, 34(4): 235-250, 1997.
- MOUZAZEN, M., A.; DUMONT K., M.; RAMON K., H: "Two-dimensional prediction of spatial variation in topsoil compaction of a sandy loam field-based on measured horizontal force of compaction sensor, cutting depth and moisture content", *Soil & Tillage Research*, ISSN: 0167-1987, 74(1): 91-102, 2003.
- ONWUALU, A., P.; WATTS K., C: "Draught and vertical forces obtained from dynamic soil cutting by plane tillage tools", *Soil & Tillage Research*, DOI: 10.1016/S0167-1987(98)00127-5, 48(4): 239-253, 1998.
- OWENDE, O., P.; WARD M., M: "Characteristic loading of light mould board ploughs at slow speeds", *Journal of Terramechanics*, DOI: 10.1016/0022-4898(96)00011-0, 33(1): 29-53, 1996.
- RAJARAM, G.; ERBACH D., C: "Effect of wetting and drying on soil physical properties", *Journal of Terramechanics*, DOI: 10.1016/S0022-4898(98)00030-5, 36: 39-49, 1999.
- TADESSE, D: *Evaluating DEM results with perspectives of load-soil interaction*, Disertación en la Universidad Wageningen, ISBN 90-8504-011-6, June, 2004, Wageningen, Low Countries, 2004.
- WANG, L., X.; YAMAZAKI, M.; TANAKA, T: "Characteristics of soil reactions of an open Lugged wheel under paddy soil conditions", *Journal of Terramechanics*, DOI: 10.1016/0022-4898(95)00011-9, 32(3): 115-125, 1995.

WANG, L., X.; YAMAZAKI, M.; TANAKA, T. "Characteristics of soil reactions of an open Lugged wheel under paddy soil conditions", *Journal of Terramechanics*, DOI: 10.1016/0022-4898(95)00011-9, 32(3): 115-125, 1995.

ZHANG, C.; ARAYA K. "A Three-stage Soil Layer Mixing Plough for the Improvement of Meadow Soil. Part 1: Mechanical Properties of Soils", *Journal Agriculture Engineer Research*, DOI: 10.1006/jaer.2000.0644, 78(3): 253-260, 2001.

Recibido: 28 de febrero de 2015.

Aprobado: 13 de noviembre de 2015.

Publicado: 30 de diciembre de 2015.

Alexander Laffita Leyva, Especialista, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. Correo electrónico: alexl@unah.edu.cu

Armando Eloy García de la Figal Costales, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Correo electrónico: areloy@unah.edu.cu

Ernesto Ramos Carbajal, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), Correo electrónico: carbajales@unah.edu.cu

Pedro A. Valdés Hernández, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Correo electrónico: pvaldes@unah.edu.cu

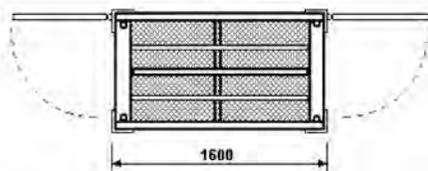
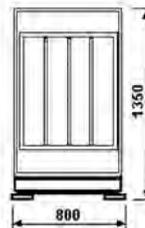
Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.



**MAQUINARIA AGRICOLA &
INSTRUMENTOS DE MEDICION**

BALANZAS PARA CERDOS Y OVINOS

CEMA TED - 500



Display digital

Capacidad hasta 500 kg.
Precisión de 0,2 kg.
Presentación de la lectura: Digital (5 dígitos LCD).
Dimensiones de la plataforma: 1600 x 800 mm.
Altura de la jaula: 1350 mm.
Superficie de la plataforma: Metálica con alfombra de goma.

Solicitudes de ofertas a:
Dr. C. Ernesto Ramos Carbajal
Centro de Mecanización Agropecuaria
Autopista Nacional y Carretera de Tapaste. km 23, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. Apdo. 18-19
Tel.: (53)(47) 864346
E_mail: carbajales@unah.edu.cu