



## Determinación de la tensión del suelo, su correlación con la densidad e índice de cono

### *Determination of the soil stress values and the relationship with bulk density and cone index*

Dr.C. Ernesto Ramos Carbajal, Dr.Cs. Arturo Martínez Rodríguez, Ing. Adrián Brito Llera. Ing. Juan Manuel Batista Cardet  
Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

**RESUMEN.** La investigación fue realizada en el Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA) de la Facultad de Ciencias Técnicas de la Universidad Agraria de La Habana, estando dirigida a la determinación de la tensión interna y su relación con la densidad volumétrica y la resistencia a la penetración (índice de cono ASABE) para un suelo Ferralítico Rojo Lixiviado, típico de Cuba. Para cumplir este objetivo se ejecutó un diseño experimental de naturaleza factorial  $3^2$ , fijándose tres niveles de humedad (23, 28 y 35%) y tres niveles de tensión interna del suelo (0,10; 0,14 y 0,18 MPa), obteniéndose como salida las relaciones de la tensión interna con el índice de cono y la densidad aparente del suelo. La medición de la tensión interna (estado tensional de compresión del suelo), se efectuó con un dispositivo diseñado y construido a los efectos. Como resultado se obtienen relaciones funcionales medianamente fuerte a fuerte entre la tensión interna del suelo compactado y el índice de cono ASABE ( $R^2 = 0,62$  a  $0,86$ ), así como una débil relación entre la tensión interna y la densidad volumétrica seca.

**Palabras clave:** Compactación del suelo, estado tensional, resistencia a la penetración, impedancia mecánica.

**ABSTRACT.** The research was carried out in the Center of Agricultural Mechanization (CEMA) of the Faculty of Technical Sciences of the Agrarian University of Havana, being directed to the determination of the internal tension and its relationship with the volumetric density and the resistance to the penetration (cone index ASABE) for a Red Ferralitic soil, typical of Cuba. To complete this objective a  $3^2$  experimental design of factorial nature was executed, fixing three levels of humidity (23, 28 and 35%) and three levels of internal tension of the soil (0,10; 0,14 and 0,18 MPa), obtaining the relationships of the internal tension with the cone index and the apparent density of the soil. The measuring of the internal tension (tensional status of compression of the soil), was made with a device designed and built for the research. As a result, were obtained fairly functional relationships from medium strong to strong between the internal tension of the compacted soil and the cone index ASABE ( $R^2 = 0,62$  at  $0,86$ ), as well as a weak relationship between the internal tension and the volumetric dry density.

**Keywords:** Soil compaction, stress state, penetration resistance, mechanical impedance.

## INTRODUCCIÓN

Dentro de la composición de los suelos agrícolas en Cuba, la agrupación de los Ferralíticos es una de las más importantes, teniendo en cuenta su fertilidad, excelentes condiciones para la producción y amplia extensión en el territorio nacional. De un fondo total de 8 725 300 ha, 1 461 200 ha pertenecen a estos tipos de suelo lo que representa un 16,7% del área agrícola total (ONE, 2008).

Los suelos del tipo Ferralítico Rojo, caracterizados por ser altamente productivos, ocupan el segundo lugar en extensión y rendimientos agrícolas en Cuba. La llanura Habana Matanzas es el mayor asentamiento en el país de estos suelos y en

ella se ubican geográficamente las provincias de Mayabeque y Artemisa, en las cuales se destinan cerca de 195 000 ha a la producción agrícola, fundamentalmente de cultivos varios y caña de azúcar (Morales *et al.*, 2008).

El conocimiento de determinadas propiedades físicas y físico-mecánicas de los suelos, constituye un elemento indispensable durante el estudio de la interacción del suelo con los elementos que modifiquen su estado natural.

En esta interacción intervienen propiedades tales como: la humedad del suelo y su densidad volumétrica; el coeficiente de fricción suelo-metal; el estado tensional volumétrico del suelo

compactado (tensión interna); la tensión de fallo del suelo; su módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y otros. Todas estas propiedades, con la excepción de la tensión interna del suelo, cuentan con metodologías y normas establecidas para su determinación.

Para el caso del tipo de suelo Ferralítico Rojo, se conoce muchas de sus propiedades mecánicas, tales como la tensión de fallo del suelo, su módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y otras (Herrera, 2006<sup>1</sup>; Herrera *et al.*, 2001; Herrera *et al.*, 2008). También se conoce de los estudios dirigidos a la determinación de la resistencia de los mismos a los diferentes tipos de deformaciones que surgen durante la interacción del apero con el suelo, así como a la determinación del comportamiento de la fricción suelo-metal y suelo-suelo ante los cambios de humedad (García de la Figal, 1978; Pérez de Corcho *et al.*, 2004<sup>2</sup>; González *et al.*, 2008; Ramos *et al.*, 2012).

La tensión interna del suelo ha sido objeto de medición, aunque no en estado volumétrico, fundamentalmente durante ensayos destinados a determinar los efectos en el suelo de la presión ejercida por neumáticos (González, 2011<sup>3</sup>). Para estas mediciones se emplearon celdas de presión del tipo de diafragma, destinados a detectar las presiones en la dirección vertical únicamente. Sin embargo para la medición del estado tensional volumétrico del suelo compactado no se reportan instrumentos comerciales, aunque si algunos intentos de medición en investigaciones realizadas por Hovanessian, 1958 según (Gill and Glen 1968).

El conocimiento de la tensión interna del suelo es de interés con vistas a poder utilizar los datos relativos al suelo procedentes de ensayos triaxiales (Herrera, 2006), de los que se obtienen parámetros tales como: la tensión de fallo del suelo, su módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson, entre otros, pero que dependen del nivel de compactación del suelo provocado en las probetas sometidas a dichos ensayos a través de una tensión de confinamiento, o sea, de un estado tensional de compresión volumétrico inicial que por lo general no es conocido en los suelos en estado natural.

Por tal motivo se hace necesario desarrollar un método experimental que permita determinar la tensión interna del suelo con diferentes niveles de compactación, así como su grado de asociación con la densidad volumétrica y la resistencia a la penetración (índice de cono). En el caso que nos ocupa, esta determinación se centrará al caso de suelos Ferralíticos Rojo, típicos de Cuba.

## MÉTODOS

Las investigaciones experimentales se realizaron en el laboratorio Canal de Suelos perteneciente al Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA) de la Facultad de Ciencias

Técnicas de la Universidad Agraria de la Habana (UNAH), ubicado en el municipio de San José de las Lajas, provincia Mayabeque durante el periodo 2011 a 2014.

El suelo objeto de estudio es un Ferralítico Rojo Lixiviado según la última clasificación vigente en el país (Hernández *et al.*, 1999; Hernández *et al.*, 2015), proveniente de la zona agrícola de San José de las Lajas, en la Provincia de Mayabeque, Cuba, con un índice de plasticidad de 30,4%, comportándose como un suelo plástico (González *et al.*, 2008).

**Metodología para la determinación de la humedad y densidad del suelo.** La determinación de la humedad y densidad volumétrica del suelo se realizó según la norma cubana NC 67: 2000. El pesaje de las muestras antes y después del secado, se realizó con una balanza electrónica de  $\pm 0,1$  g de precisión.

**Metodología para la determinación de la resistencia a la penetración.** La determinación de la resistencia a la penetración (índice de cono estándar) del suelo, se midió con un penetrómetro digital FIELDSCOUT Modelo: SC 900 SN: 328 con una precisión de 0,001 MPa. Su principio de funcionamiento está amparado por la norma cubana NC 13: 1998.

**Metodología para la determinación de la tensional volumétrico del suelo.** Para la determinación del estado tensional volumétrico del suelo compactado (tensión interna,  $\sigma_i$ ), se diseñó y construyó un instrumento de medición que utilizaba un elemento sensor primario de forma esférica, el cual era enterrado en el suelo objeto de estudio, transmitiendo a un manómetro con precisión de  $0,2 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$  una señal proporcional a la presión media ejercida por el suelo compactado sobre toda la superficie del sensor. Para la calibración del instrumento se utilizó una cámara de aire sellada conectada a un compresor. La cámara se sometió a diferentes niveles de presión, tanto en carga, como en descarga, la cual era controlada a través de un manómetro con una precisión de  $0,2 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

**Metodología para la determinación de la correlación entre la tensión interna, la resistencia a la penetración y la densidad volumétrica del suelo.** Para determinar la correlación entre la tensión interna, la resistencia a la penetración y la densidad volumétrica del suelo se concibió un diseño factorial  $3^2$  donde las variables independientes fueron la humedad y la tensión interna del suelo (Tabla 1). Los tres niveles de humedad se seleccionaron con el propósito de obtener: un nivel de baja humedad (23%) coincidente con el 75% del límite de plasticidad y con el límite inferior de los ensayos triaxiales del suelo (Herrera, 2006); un nivel intermedio (28%) coincidente con el 90% del límite de plasticidad y un nivel alto (35%), por encima del límite de plasticidad y coincidente con el límite máximo de los ensayos triaxiales.

Los niveles de tensión interna fueron fijados mediante la aplicación de cargas de compresión a las muestras de suelo,

<sup>1</sup> HERRERA, M.: "Simulación del comportamiento mecánico de los suelos Ferralíticos Rojos mediante el método de elementos finitos", 107 pp. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias): Universidad Agraria de la Habana (UNAH), San José de las Lajas, Mayabeque, 2006.

<sup>2</sup> PÉREZ DE CORCHO, R. J.; M. HERRERA y C. IGLESIAS: Determinación de las propiedades físico-mecánicas de suelos ferralíticos rojos en áreas de producción de piña. En: Memorias de la Sexta Conferencia Científica Internacional UNICA 2004, Universidad de Ciego de Ávila, 18-21 de octubre, Ciego de Ávila, Cuba, 2004.

<sup>3</sup> GONZÁLEZ, O.: "Modelación de la compactación provocada, por el tráfico de los neumáticos de los vehículos agrícolas, en suelos en condiciones de laboratorio", 134pp. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias). Universidad Agraria de La Habana (UNAH), San José de las Lajas, Mayabeque, 2011.

fiándose un nivel inferior (cercano a 1 kgf·cm<sup>-2</sup>), un nivel medio (cercano a 1,5 kgf·cm<sup>-2</sup>) y un nivel alto (cercano a 2 kgf·cm<sup>-2</sup>). Los niveles máximos y mínimos de tensión interna se seleccionaron, a partir de un pre-experimento, con el fin de alcanzar valores de la resistencia a la penetración en un amplio rango entre 1 y 6 MPa.

**Tabla 1. Tratamientos aplicados en el experimento para determinar la correlación entre la tensión interna, la resistencia a la penetración y la densidad volumétrica del suelo.**

Tratamientos Variables	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
σ <sub>i</sub> (kgf·cm <sup>-1</sup> )	1	1	1	1,5	1,5	1,5	2	2	2
H, (%)	23	28	35	23	28	35	23	28	35

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado de la calibración del dispositivo sensor de la tensión interna del suelo se obtuvo la curva de calibración estática del dispositivo (Figura 1), así como el error de calibración (±0,09 kgf·cm<sup>-2</sup>).

Partiendo de esta curva y el error determinado, se obtiene la presión que ejerce el suelo compactado sobre el sensor mediante la expresión:

$$\sigma_i = \frac{p_r - 0,202}{1,027} \pm 0,09 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2} \quad (1)$$

donde:

σ<sub>i</sub> – tensión interna (presión aplicada por el suelo al sensor), kgf·cm<sup>-2</sup>;

p<sub>r</sub> – presión registrada por el dispositivo, kgf·cm<sup>2</sup>.

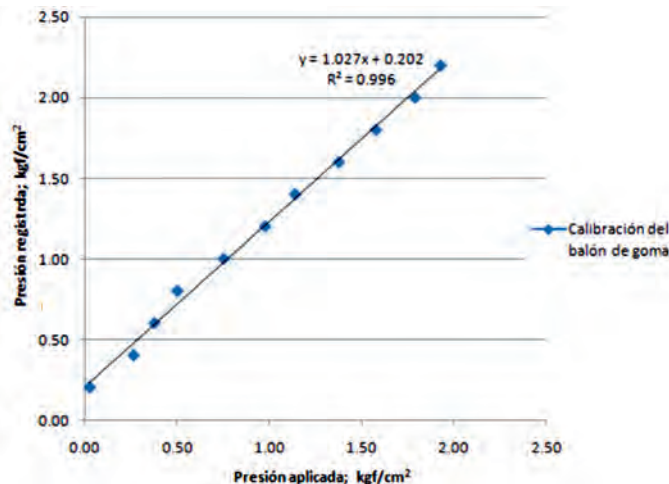


FIGURA 1. Curva de calibración estática del dispositivo sensor de la tensión interna del suelo.

Los resultados del análisis de regresión lineal efectuado entre la tensión interna del suelo y el índice de cono ASABE y entre la tensión interna del suelo y la densidad volumétrica, respectivamente, para los tres niveles de humedad experimen-

tados se resumen en las Figuras 2 y 3.

En la Figura 2, se aprecia la obtención, para el nivel superior de humedad (35%), de un fuerte grado de relación entre la tensión interna del suelo y el índice de cono, caracterizado por un coeficiente de determinación R<sup>2</sup> = 0,86.

Para los niveles de humedad intermedia (28%) y baja (23%), la relación resultó medianamente fuerte (R<sup>2</sup> = 0,66 y 0,62 respectivamente).

Aunque en los tres casos el grado de relación demuestra una interrelación estadística fuerte entre las variables tensión interna e índice de cono, se aprecia que la interrelación es más fuerte a medida que es más alta la humedad del suelo, dentro del rango de variables estudiado, así como que la dispersión de las lecturas del índice de cono también es menor a medida que se incrementa la humedad. Esto puede atribuirse a que el suelo húmedo, al compactarse, asume una constitución más homogénea.

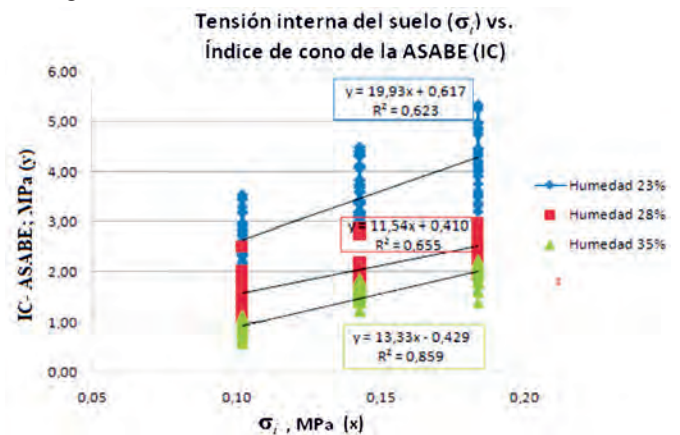


FIGURA 2. Resultado de análisis de regresión entre la tensión interna del suelo y el índice de cono ASABE para tres niveles de humedad del suelo.

De la Figura 2 puede apreciarse, además, que para el mismo grado de tensión interna, el suelo presenta una mayor dureza (o resistencia a la penetración) a medida que disminuye la humedad. Estos resultados confirman lo planteado por Hamza y Anderson (2005), quienes reportan que la humedad es la variable de mayor influencia en el proceso de compactación del suelo, dado que, para cualquier valor de la densidad volumétrica, la resistencia a la penetración se incrementa con la disminución del contenido de humedad.

Este incremento de la resistencia a la penetración con la disminución de la humedad, explica el comportamiento clásico de los suelos Ferralíticos Rojo cubanos, que se auto-endurecen producto del déficit hídrico, incluso sin haber estado sometidos a acciones mecánicas externas inductoras de la compactación.

En el caso de la densidad volumétrica (Figura 3) el grado de relación de esta variable con la tensión interna del suelo resultó débil para los tres niveles de humedad experimentados, sobre todo para los niveles bajos (R<sup>2</sup>=0,12 y 0,18), por lo que no es procedente intentar sacar conclusiones, ni explicar tendencias a partir de las ecuaciones de regresión obtenidas.

Si se interpreta la tensión interna del suelo como un indicador directo del estado tensional de compresión a que está sometido el suelo, entonces, a partir de los resultados obtenidos



en este experimento, es posible afirmar que la densidad volumétrica (en el caso del suelo Ferralítico Rojo objeto de estudio y en el intervalo de humedad experimentado), no constituye un indicador fiable del estado de compresión mecánica a que está sometido el suelo, siendo más aconsejable utilizar la resistencia a la penetración (o índice de cono) como indicador de este estado tensional de compresión mecánica que asume el suelo compactado.

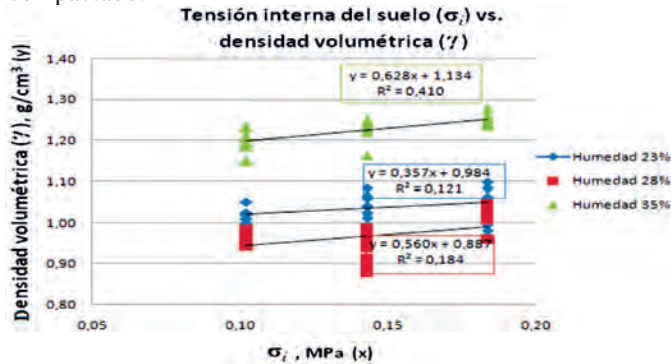


FIGURA 3. Resultado de análisis de regresión entre la tensión interna del suelo y la densidad volumétrica para tres niveles de humedad del suelo.

Los valores más altos de tensión interna logrados en estos experimentos (cerca de 0,18 MPa), se correspondieron con niveles de índice de cono entre 3 y 5,5 MPa en el caso de las muestras de suelo con menor humedad (23%). Para los suelos Ferralíticos Rojo Lixiviados, estos niveles de dureza son considerados altos (Vega, 2008<sup>4</sup>). Durante los ensayos triaxiales efectuados a este tipo de suelo (Herrera 2006), se aplican

tensiones de confinamiento ( $\sigma_3$ ) de hasta 0,4 MPa, las cuales es posible alcanzar manteniendo las presiones hidrostáticas en la cámara de presión del instrumento a esos niveles. Sin embargo, cuando el suelo se recupera una vez retirada las cargas, como es el caso de los experimentos expuestos en este capítulo, así como durante el pase de la maquinaria agrícola o de transporte sobre el suelo, es difícil obtener estos niveles tan altos de tensión interna. Es posible que esos valores altos de tensión de confinamiento, al menos en el caso de los suelos Ferralíticos objeto de estudio, tengan interés para el estudio de cimentaciones de construcciones civiles, en las que las cargas sobre el suelo son permanentes y no temporales, como es el caso de los suelos agrícolas.

## CONCLUSIONES

- El desarrollo de un método y un sistema de medición de la tensión interna del suelo, posibilitó la determinación de dicho estado tensional para diferentes grados de compactación y humedad del suelo así como su relación con el índice de cono ASABE y la densidad volumétrica para un suelo Ferralítico Rojo, típico de Cuba.
- Los resultados de este estudio arrojaron una relación medianamente fuerte a fuerte entre la tensión interna del suelo y el índice de cono ASABE ( $R^2 = 0,62$  a  $0,86$ ), así como una débil relación con la densidad volumétrica ( $R^2 = 0,12$  a  $0,41$ );
- Se obtuvo que a medida que disminuye la humedad del suelo, para el mismo nivel de tensión interna, se incrementa la resistencia a la penetración.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASAE, STANDARDS S.313.2: *Soil cone penetrometer*, 591pp., Agricultural Yearbook, ASAE, St. Joseph, Mich., USA, 1991
- ASAE STANDARDS, S313.3: *Soil cone penetrometer*, 46 Ed. ASAE, St. Joseph, Mich., USA, 1999a.
- ASAE STANDARDS: *Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer*, ASAE. 46 Ed. EP 542, St. Joseph, Mich., USA, 1999b.
- BAI, Z.G., DENT, D.L., OLSSON, L. & SCHAEPMAN, M.E.: *Global assessment of land degradation and improvement I: identification by remote sensing*, Repor 2008/01, FAO/ISRIC, Roma, 2008.
- GARCÍA DE LA FIGAL, C. A.: "Estudio de las propiedades tecnológicas más importantes de los suelos cubanos", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 3(2): 61-77, 1978.
- GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C., HERRERA, M., LÓPEZ, E. y 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.
- HAMZA, M. & ANDERSON, W.: "Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solution", *Soil and Tillage Research*, ISSN 0167-1987, DOI: 10.1016/j.still.2004.08.009, 82(2), 121-145, 2005.
- 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.
- HERNÁNDEZ, A.; PÉREZ, J.; CASTRO, N Y BOSCH, D.: *Clasificación de los suelos de Cuba 2015*, edición ed., Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas e Instituto de suelo, Ed. INCA 2015 pp.45-48, ISBN: 978-959-7023-77-7, San José de las Lajas, Mayabeque, 2015.
- HERRERA, M.; IGLESIAS, C.; RODRÍGUEZ, M.; GARCÍA DE LA FIGAL, A.; PÉREZ, R. y FERNÁNDEZ, M.: "Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores (parte 1)". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 10(3): 21-28, 2001.
- HERRERA, M.; IGLESIAS, C.; GONZÁLEZ, O.; LÓPEZ, E. y SÁNCHEZ, 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. Interface suelo-herramienta", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 17(4): 50-54, 2008.

<sup>4</sup> VEGA, E.: "Estudio del efecto de la compactación del suelo Ferralítico Rojo compactado durante la cosecha mecanizada de la caña de azúcar. Estudio de caso: CPA Amistad Cuba-Nicaragua. La Habana", 99pp., Trabajo de Diploma (en opción al título de Ingeniero Mecanizador Agropecuario). Universidad Agraria de La Habana, San José de las Lajas, La Habana, Cuba, 2008.

MORALES, M.; HERNÁNDEZ, A.; BORGES, Y.; MORELL, F.; CALDERÓN, M. Y RODRÍGUEZ, J.: “Características de tres perfiles de suelo Ferralítico Rojo lixiviado en condiciones naturales bajo bosque”, *Revista Agrotecnia de Cuba*, ISSN: 0568-3114, 32(1): 2008.

NC 67:2000: *Geotecnia. Determinación del contenido de humedad de los suelos y rocas en laboratorio*, 15pp., La Habana, Vig. 2000.

NC 155: 2000. *Geotecnia. Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos mediante compresión triaxial. Ensayo sin consolidación y sin drenaje*. Vig. 2002.

OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (ONE), *Anuario Estadístico de Cuba*, [en línea] 2008, Disponible en: [http://www.one.cu/aec\\_web/paginas\\_detablas/p\\_i/1\\_30\\_31.htm](http://www.one.cu/aec_web/paginas_detablas/p_i/1_30_31.htm) [Consulta: octubre 25 2011].

PELÁEZ, O.: “Revertir el deterioro de los suelos”, *diario Granma*, ISSN 0864-0424, 47(186), La Habana, 5 de agosto de 2011.

**Recibido:** 08 de marzo de 2015.

**Aprobado:** 13 de noviembre de 2015.

**Publicado:** 30 de diciembre de 2015.

*Ernesto Ramos Carbajal*, 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: [carbajales@unah.edu.cu](mailto:carbajales@unah.edu.cu)

*Arturo Martínez Rodríguez*, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Correo electrónico: [arturo@unah.edu.cu](mailto:arturo@unah.edu.cu)

*Adrián Brito Llera*, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Correo electrónico: [carbajales@unah.edu.cu](mailto:carbajales@unah.edu.cu)

*Juan Manuel Batista Cardet*, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Correo electrónico: [carbajales@unah.edu.cu](mailto:carbajales@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.



**CRECIMIENTO  
SOSTENIBLE  
EN LA AGRICULTURA  
Y LA GANADERÍA**

**UNIVERSIDAD  
AGRARIA  
DE LA HABANA**

- \*Mecanización en la agricultura ecológica
- \*Biotecnología vegetal
- \*Biofertilizantes
- \*Biorreguladores de crecimiento vegetal
- \*Control de plagas
- \*Laboratorios de análisis químico
- \*Alimentación animal no convencional
- \*Mejoramiento animal
- \*Sistemas silvopastoriles