



SUELO Y AGUA
SOIL AND WATER

Determinación experimental de la validez de las ecuaciones de predicción de la compactación del suelo empleadas en el sensoramiento continuo

Experimental determination of the validity of the prediction equations of soil compaction employed on-the-go sensing

Darina Lara Cobra¹ y Miguel Herrera Suárez²

RESUMEN. Los modelos desarrollados para el sensoramiento continuo de la compactación del suelo a través de la densidad tienen en cuenta el contenido de humedad, la profundidad y la resistencia que opone el suelo a ser interactuado por el sensor, estos han sido desarrollados para suelos arenosos, limosos y arcillosos, pero se desconoce su exactitud para predecir la compactación en las condiciones de los suelos cubanos. El presente trabajo tiene como objetivo determinar la validez de las ecuaciones desarrolladas para la predicción de la densidad del suelo durante el sensoramiento continuo, en un suelo ferralítico rojo de la región occidental de Cuba. Para cumplimentar dicho objetivo se comprobó experimentalmente la validez de los modelos analizados en las condiciones controladas del canal de suelos, para un amplio intervalo de condiciones de suelo y operación del sensor. Los principales resultados muestran que los errores de predicción de los modelos analizados (0,90 a 260%) evidencian la incapacidad de los mismos para correlacionar las lecturas del sensor con la compactación del suelo; aunque los modelos desarrollados por Mouazen son más exactos ($e=0,90$ a 41%) que los modelos desarrollados por Andrade ($e=8,15$ a 260%). La humedad del suelo fue la variable que mayor peso tuvo en la exactitud de la predicción de la densidad del suelo; siendo la velocidad de avance del sensor la segunda variable de importancia en lo referente a la exactitud de las predicciones, lo cual es un indicador de la necesidad de su inclusión en futuros modelos de predicción.

Palabras clave: densidad volumétrica, sensoramiento continuo, contenido de humedad, ecuaciones de predicción, compactación del suelo.

ABSTRACT. The models developed for on the go soil compaction sensing taking into account the soil density and the moisture content, the depth and the soil resistance, these have been developed for sandy, silty and clay, but its accuracy is not known to predict compaction on the conditions of cuban soil. The goals of this study is to determine the validity of the equations developed for predicting soil compaction during the go sensing, in a Rhodic ferralsol western Cuba. To complete this objective was tested experimentally the validity of these models in the soil bin controlled conditions, for a wide range of soil conditions and operation of the sensor. The main results show that the prediction errors of the models analyzed (0,90 to 260%) inability to correlate the sensor readings with soil compaction, although the models developed by Mouazen are more accurate ($e = 0,90$ to 41%) that the models developed by Andrade ($e = 8,15$ to 260%). Soil moisture was variable in the prediction that more weight have in the predictions accuracy, being the forward speed the second variable of importance regarding the accuracy of the predictions, which is an indicator of the inclusion need in future prediction models.

Keywords: Bulk density, on the go soil sensing, moisture content, prediction equation, soil compaction.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso esencial para el desarrollo económico-social, además de ser el sostén físico y químico de todos los ecosistemas terrestres. Su degradación es definida como

la pérdida a largo plazo de la función y productividad de los ecosistemas, causada por alteraciones a partir de las cuales este no puede recuperarse sin ayuda, constituyendo un problema de alcance global, que afecta el medio ambiente y el desarrollo

Recibido 19/11/11, aprobado 28/01/13, trabajo 19/13, artículo original.

¹ Ing., Prof. Asistente, Universidad de Granma, Departamento de Ingeniería Agrícola, Granma. E-✉: d.lara@udg.co.cu

² Dr.C., Prof. Titular, Universidad Central de Las Villas, Dpto. Ingeniería Agrícola, Villa Clara, Cuba.

(Keller *et al.*, 2007). Entre los factores que provocan la degradación física del suelo se encuentra la compactación (Pagliai *et al.*, 2003; Keller, 2004), la cual ha sido considerada además como una de sus causas principales (Berli, 2001), pues en la medida que se incrementa disminuye el espacio poroso, especialmente a nivel de los macroporos, los cuales están ocupados por el aire y agua útil. La infiltración también se ve afectada pues disminuye la permeabilidad de la capa compactada. Cuando la compactación ocurre en la capa superficial se produce un incremento de la escorrentía, disminuyendo la capacidad de filtración del agua. Esto aumenta el riesgo de erosión producida por el agua, la pérdida de las capas superficiales de suelo y los nutrientes. Esta problemática se debe fundamentalmente al impacto de los factores naturales, el empleo de maquinaria agrícola cada vez más pesada, y a la utilización de sistemas de labranza inadecuados, limitando el crecimiento vegetal y el rendimiento de los cultivos (Vrindts *et al.*, 2005).

Dada la significación que tiene el conocimiento del estado de compactación del suelo como una de las variables de mayor importancia a la hora elaborar las estrategias de manejo, así como el desarrollo que han alcanzado el empleo de sensores dentro del marco de la agricultura de precisión, en el ámbito internacional se han desarrollado varios tipos de sensores para la medición continua y en sitio específico de la compactación del suelo, pues la mayoría de los métodos para la determinación *in situ* de la compactación del suelo se basan en el empleo de instrumentos de medición directa y puntual de las propiedades que definen el estado del suelo, relacionadas con la compactación.

A partir de esta problemática varios investigadores han desarrollado ecuaciones que le permiten correlacionar las lecturas del sensor con la magnitud de la compactación del suelo medida a partir de la resistencia a la penetración o de la densidad volumétrica, en las que incluyen tanto las variables de operación del sensor como las que caracterizan su estado físico, siendo un factor determinante las características del sensor y su principio de funcionamiento. Los parámetros de operación que se tienen en cuenta durante el sensado de la compactación, son: la profundidad, el ancho del órgano de trabajo y la velocidad de trabajo. Las variables más utilizadas para caracterizar el estado físico del suelo son: humedad, textura y densidad del suelo, siendo el contenido de humedad la variable que mayor significación tiene en la exactitud de las predicciones (Andrade *et al.*, 2001; Mouazen *et al.*, 2003b; Hall y Raper, 2005).

A diferencia de la resistencia a la penetración, la densidad volumétrica es más exacta para estimar la compactación del suelo, ya que no se ve afectada por el contenido de humedad durante la medición (Mouazen y Ramon, 2009).

Las ecuaciones de predicción de la densidad volumétrica más utilizadas son las desarrolladas por Andrade *et al.* (2002), para suelos limosos, arcillosos y arenosos; y las de Mouazen *et al.* (2003a); Mouazen *et al.* (2003b), que fueron obtenidas inicialmente para un suelo loam arenoso y extendidas con posterioridad a las arenas loamosas; loam limosos, y finalmente a los suelos loamosos y limosos. En ambos casos se reporta que estos modelos predicen con la exactitud requerida la densidad volumétrica del suelo. A pesar de esto, en Cuba no se ha hecho

ningún estudio encaminado a comprobar la validez de estos modelos para estimar la densidad volumétrica de los oxisoles.

Tomando en cuenta esta problemática, así como que los oxisoles ocupan el segundo lugar en Cuba en cuanto a extensión territorial que abarcan, además de poseer una gran importancia económica, se decide la realización del presente trabajo que tiene como objetivo determinar la validez de las ecuaciones desarrolladas por Andrade *et al.* (2002), Mouazen *et al.* (2003a), Mouazen *et al.* (2003b), Mouazen y Ramon (2009), para la estimación de la densidad volumétrica del suelo a través del sensoramiento continuo, en un Oxisol de la región occidental de Cuba.

MÉTODOS

PROGRAMA Y METODOLOGÍAS DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES

Programa

Las investigaciones experimentales se realizaron en el canal de suelos CS-CEMA-25 del Centro Mecanización Agropecuaria (CEMA), de la Universidad Agraria de La Habana. El mismo fue modificado y perfeccionado con el objetivo de garantizar los requisitos tecnológico y de operación requeridos para este tipo de investigación. Las modificaciones realizadas y características técnicas del canal se detallan por Iglesias y Herrera (2003).

Metodologías

Metodología para la preparación y acondicionamiento del suelo contenido en el canal

Durante la preparación y acondicionamiento del suelo (Oxisol) contenido en el depósito del canal, se siguió la metodología descrita por Herrera *et al.* (2011) para garantizar el desmenuzamiento, humedecimiento y compactación del mismo.

Metodología para la determinación de la resistencia o impedancia mecánica del suelo

Para el sensoramiento de la compactación del suelo se utilizó el sensor desarrollado por Herrera *et al.* (2011), acoplado a un sistema para la adquisición y almacenamiento de datos conformado por un amplificador de señales KYOWA de seis canales; tarjeta de conversión analógico digital (AD); computadora Pentium IV con procesador a 1,5 GHz, 500 MB de memoria RAM y 40 GB de disco duro. Se empleó el software (Tensoft), para la adquisición, almacenamiento, visualización y graficación de los datos registrados.

Para la determinación de la fuerza de resistencia del suelo se empleó la ecuación 1, obtenida durante la calibración del sensor, la misma relaciona las salidas de voltaje del sensor con los esfuerzos de resistencia del suelo.

$$D = \frac{Vs}{0,8213} \quad (1)$$

donde:

D-fuerza que opone el suelo a ser cortada en el sentido del movimiento del sensor, kN;

Vs-voltaje de salida del puente del transductor, mV.

Determinación experimental de la velocidad de avance de la herramienta de labranza

Para la determinación de la velocidad de avance de la herramienta de labranza se empleó el sensor de velocidad descrito por Herrera *et al.* (2011), el cual permite conocer esta magnitud, a partir del registro del espacio recorrido y el período de tiempo necesitado en recorrer dicho espacio.

Planificación de los experimentos

Partiendo de la necesidad de evaluar el funcionamiento del sensor en diferentes condiciones de suelo y operación, se definen como variables que caracterizan dichas condiciones: X_1 , velocidad de trabajo (V), $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$; X_2 , humedad del suelo (MC), %; X_3 , densidad del suelo (BD), $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; resistencia horizontal que opone el suelo a ser cortado en el sentido de avance del sensor (D), kN; X_4 , profundidad de trabajo (d), m; X_5 , Ancho de trabajo (W), m.

La experimentación se realizará a dos niveles de humedad y densidad, considerando que el suelo se encuentra en sus estados extremos, es decir: húmedo o seco; desmenuzado o compactado. Los valores absolutos de dichas variables en cada condición dependerán del estado del suelo en el momento de la experimentación.

La profundidad de trabajo se mantendrá constante a 0,20 m, aunque las mediciones de la densidad y humedad del suelo se harán en dos horizontes de profundidad (0 a 0,10 m y 0,10 a 0,20 m), tomando el valor promedio en toda la profundidad de trabajo del sensor.

Los experimentos se repetirán tres veces, para los cual se subdividieron los 25 m de longitud total del canal en tres parcelas de 7 m cada una, se dejaron dos parcelas en los ex-

tremos del canal de 2 m de longitud cada una, para garantizar la aceleración y desaceleración del carro portaherramientas.

Metodología para la determinación de las condiciones del suelo

Para la determinación del estado de compactación y humedad del suelo se siguió el procedimiento establecido por Herrera *et al.* (2011) para atenuar los posibles efectos de borde, es decir se tomaron tres muestras de suelo por parcelas y horizontes de muestreo (0,10 y 0,20 m) en la zona de acción directa del órgano de trabajo (centro del canal), separadas por la horizontal dos metros unas de otras y a metro y medio de los bordes que conforman las fronteras entre parcelas (Figura 1). La recolección de las mismas se realizó antes pasar el sensor. El número de muestras se determinó según el criterio de Student.

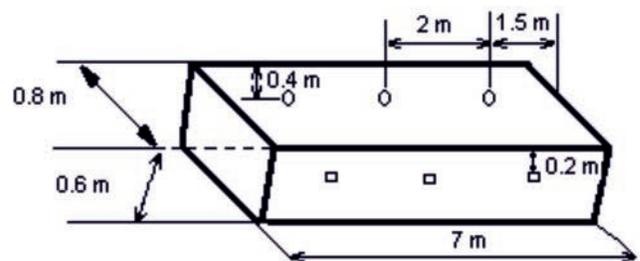


FIGURA 1. Esquema de las zonas de muestreo en el canal de suelos.

Metodología para determinar la humedad del suelo

Para su determinación el método empleado fue el gravimétrico (NC 67:2000), consistente en el secado (estufa) de las muestras tomadas en el canal de suelos. Se empleó una temperatura constante de 60 °C durante 24 horas, a partir de lo cual las muestras se pesaron cada dos horas hasta alcanzar una masa constante. El pesaje de las muestras antes y después del secado se realizó en una balanza de precisión, Figura 2a.



FIGURA 2. Determinación de las condiciones del suelo. a) Humedad del suelo; b) Densidad Volumétrica del suelo.

El valor de la humedad se calculó mediante la siguiente expresión:

$$MC = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - m} \cdot 100 \quad (2)$$

donde:

MC-humedad del suelo, %; P1-masa del suelo húmedo dentro del recipiente, g;

P2-masa del suelo seco dentro del recipiente, g;

m-masa del recipiente sin muestra, g.

Metodología para la determinación de la densidad volumétrica

Para la determinación de la densidad volumétrica se recurre al método de los cilindros de Kopecki. El tiempo y la temperatura de secado de las muestras de suelo, así como el procedimiento de pesado una vez secadas las muestras hasta su estabilización, concuerdan con el seguido durante la determinación de la humedad. El pesaje se realizó en una balanza analítica de $\pm 0,2$ g de precisión, Figura 2b. Una vez conocida la masa del suelo seco y el volumen del cilindro la densidad se calculó, como:

$$BD = \frac{Gn}{Vc} \quad (3)$$

donde:

BD-Densidad volumétrica, $g \cdot cm^{-3}$;

Gn-masa del suelo después de secada, g;

Vc-volumen del cilindro para la toma de muestras, cm^3 .

Metodología para la estimación de la densidad del suelo

Se determinó a partir de las ecuaciones 4 a 8 las cuales tienen en cuenta las variables de operación del sensor (fuerza de tiro horizontal, ancho de trabajo y profundidad de trabajo) y las que caracterizan el estado físico del suelo (contenido de

humedad, contenido de arcilla).

Andrade et al. (2002):

$$BD = \frac{D}{g \cdot W^3 \left[a_0 + (a_1 \cdot MC) + a_2 \left(\frac{d}{W} \right) + a_3 \cdot MC \left(\frac{d}{W} \right) \right]^2} \quad (4)$$

donde:

BD-densidad volumétrica seca del suelo, $g \cdot cm^{-3}$;

D-fuerza de tiro horizontal, N;

MC-contenido de humedad del suelo, $kg \cdot kg^{-1}$;

d-profundidad de trabajo, m; g, aceleración de la gravedad, $m \cdot s^{-2}$;

W-ancho del sensor, m; a_0, a_1, a_2, a_3 , coeficientes de regresión.

Suelos arcillosos:

$$a_0 = 1.666 \quad a_1 = -0.02 \quad a_2 = 1.821 \quad a_3 = -0.027$$

Suelos limosos

$$a_0 = 1.527 \quad a_1 = -0.018 \quad a_2 = 1.142 \quad a_3 = -0.02$$

Suelos arenosos

$$a_0 = 1.71 \quad a_1 = -0.029 \quad a_2 = 1.088 \quad a_3 = -0.014$$

Mouazen et al. (2003b):

$$BD = \left(\frac{\sqrt[3]{D + 21,36 \cdot MC - 73,9313 \cdot d^2}}{1.6734} \right) \quad (5)$$

Mouazen et al. (2003a):

$$BD = \left(\frac{\sqrt[3]{D + 21,36 \cdot MC - 73,9313 \cdot d^2}}{1.6734} \cdot 1,14 \right) \quad (6)$$

Mouazen y Ramon (2009):

$$BD = \left(\frac{\sqrt[3]{D + 21,36 \cdot MC - 73,9313 \cdot d^2}}{1.6734} \cdot 1,14 \right) \cdot (1,240 - 0,592 \cdot MC - 0,000792 \cdot clay) \quad (7)$$

$$BD = \left(\frac{\sqrt[3]{D + 21,36 \cdot MC - 73,9313 \cdot d^2}}{1.6734} \cdot 1,14 \right) \cdot (1,255 - 0,775 \cdot MC) \quad (8)$$

donde: clay, contenido de arcilla del suelo, %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones del suelo. Los resultados experimentales se muestran en la Tabla 1, donde se observa que la humedad del suelo durante la experimentación osciló en un rango de 17,93 a 36,59%, o sea, se trabajó el suelo en estado seco y húmedo, por encima del límite plástico (28,53%). Los valores de la densidad del suelo oscilaron de 0,85 a 1,32 $g \cdot cm^{-3}$, resultado que evidencia que la experimentación comprendió suelos sueltos y muy compactos, con valores cercanos a su máximo valor de densificación 1,4 $g \cdot cm^{-3}$, según Herrera (2004).

TABLA 1. Resultados experimentales

Experimentos	MC, kg·kg ⁻¹	BD, g·cm ⁻³	V, m·s ⁻¹	Dmed, kN
1	0,3659	1,12	1,51	0,57
2	0,3490	1,08	1,64	0,60
3	0,2221	1,32	1,58	0,46
4	0,2070	0,96	1,39	0,45
5	0,3486	1,00	0,46	0,20
6	0,3490	1,08	0,45	0,33
7	0,2221	1,32	0,47	0,49
8	0,1793	0,85	0,50	0,40

Resistencia mecánica del suelo. Los valores máximos promedios de esta variable se obtuvieron para una condición de suelo húmedo y suelto (MC=34,90%, BD=1,08 g·cm⁻³) y una velocidad de 1,64 m·s⁻¹ (Tabla 1), sin embargo los valores mínimos promedios se registraron cuando el suelo se encontró en estado húmedo y poco compacto (MC=34,86%, BD=1,00 g·cm⁻³), pero en este caso la velocidad de avance del sensor fue significativamente inferior V=0,46 m·s⁻¹.

Análisis de la exactitud en la estimación de la densidad de los suelos ferralíticos rojos compactados. Los modelos analizados en términos globales introdujeron un error promedio en la predicción de la densidad de los suelos ferralíticos rojos compactados que osciló de 0,90 a 260% (Figura 3), en función del estado de humedad del suelo (MC) y el nivel de esfuerzo comprendido en la estimación (D).

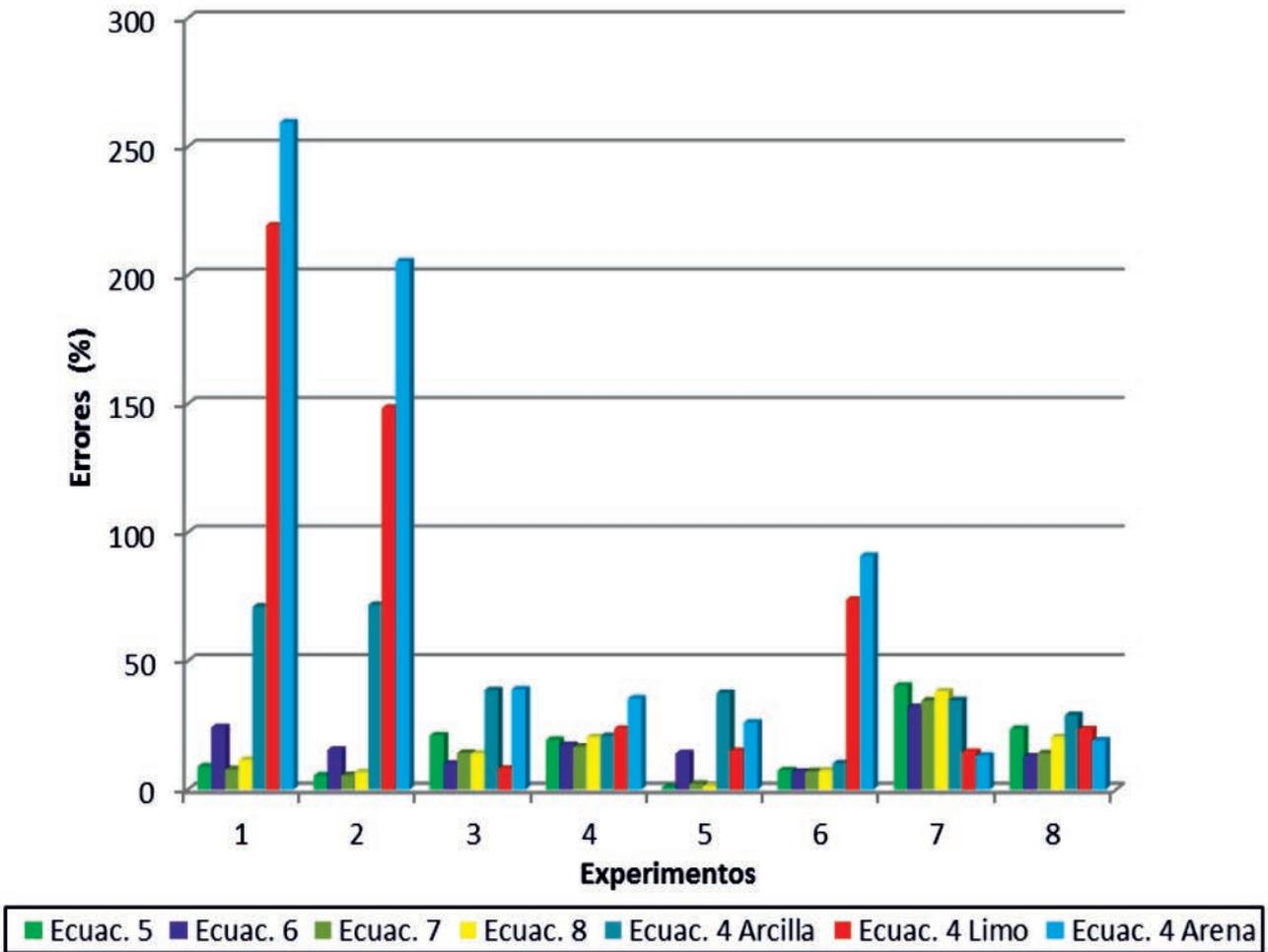


FIGURA 3. Errores de cada modelo por experimento.

Los mayores errores en la estimación se encontraron en los modelos desarrollados por Andrade *et al.* (2002), específicamente en los experimentos 1 y 2, donde el suelo se encontraba en estado húmedo y poco compacto (MC=36,59 y 34,90%; BD=

1,12 y 1,08 g·cm⁻³ respectivamente), en especial las variantes para suelo arenoso y limoso, pues lógicamente los mismos fueron determinados empíricamente para suelos de naturaleza muy diferente al analizado. En el resto de los experimentos donde el

suelo se encontró en estado seco se obtuvieron predicciones más exactas independientemente de su grado de compactación, con la excepción del experimento 5 donde el suelo estaba húmedo y poco compacto, resultado que estuvo dado porque la velocidad del sensor empujada se encontraba en el rango recomendado por Andrade *et al.* (2002). Este resultado es un indicio de que la exactitud de estos modelos está influenciada por la humedad del suelo y la velocidad del sensor. La variante para suelos arcillosos exhibió errores del 72% a pesar de haber sido desarrollado a partir de la experimentación en un suelo con un contenido de arcilla semejante al investigado (42%).

Sin embargo los errores en la estimación de los modelos desarrollados por Mouazen *et al.* (2003a); Mouazen *et al.* (2003b); Mouazen y Ramon (2009) fueron menores en la mayoría de los experimentos (<20%), estos se incrementaron considerablemente en los experimentos en los cuales el suelo se encontraba en un estado seco (3, 4, 7 y 8) con independencia de la compactación del suelo (MC≈20% y BD de 0,85 a 1,32 g·cm⁻³), estos modelos,

para la condición de suelo seco no predicen con la exactitud requerida la compactación del suelo, además se puso de manifiesto que cuanto más compacto esté el suelo mayor será el error de las predicciones. La mayor exactitud en las predicciones se alcanzó cuando el suelo se encontró en estado húmedo y poco compacto (experimentos 2; 5; 6), resultado que puede estar dado porque en este estado el suelo objeto de estudio exhibe los menores niveles de resistencia mecánica cuando es sometido a esfuerzos externos, o sea los niveles de resistencia para esta condición de humedad y densidad se asemejan más a los suelos en los cuales fueron desarrollados y validados dichos modelos.

En la Tabla 2, se muestran los resultados de un análisis de correlación entre los valores de la densidad predichos por los modelos y observados experimentalmente, evidenciando la incapacidad de los modelos de correlacionar las lecturas del sensor con la compactación del suelo, requiriéndose de la precisión de los mismos o del desarrollo de nuevos modelos que se adecuen a las condiciones de los suelos agrícolas cubanos.

TABLA 2. Resultados del análisis de correlación entre los resultados predichos y observados

	Ecuac. 4 Arcilla	Ecuac. 4 Limo	Ecuac. 4 Arena	Ecuac. 5	Ecuac. 6	Ecuac. 7	Ecuac. 8
Correlación BD	0,1432	0,2062	0,0234	0,3187	0,3191	0,3997	0,3877
Tamaño de Muestra	(24)	(24)	(24)	(24)	(24)	(24)	(24)
Valor-P (95%)	0,5045	0,3337	0,9135	0,1291	0,1286	0,0530	0,0612

Para el estudio de la influencia de la velocidad en la exactitud de los resultados predichos se realizó un análisis de correlación entre los modelos investigados y las variables involucradas en dichos modelos, mostrando que a pesar de ser el contenido de humedad la variable que tiene mayor peso en la exactitud de las predicciones (Tabla 3), la velocidad le sigue en orden de importancia, teniendo un efecto más marcado en la ecuación 8 con un coeficiente de correlación de 0,62, lo cual es un indicador de que la velocidad debe incluirse en el desarrollo de próximos modelos.

TABLA 3. Resultados del análisis de correlación entre los resultados predichos y las variables involucradas en los modelos

	Ecuac. 4 Arcilla	Ecuac. 4 Limo	Ecuac. 4 Arena	Ecuac. 5	Ecuac. 6	Ecuac. 7	Ecuac. 8
Correlación D	0,7133	0,5970	0,5523	0,2410	0,2411	0,2443	0,3074
Tamaño de Muestra	(24)	(24)	(24)	(24)	(24)	(24)	(24)
Valor-P (95%)	0,0001	0,0021	0,0051	0,2567	0,2565	0,2499	0,1440
Correlación V	0,5982	0,4879	0,4284	0,5284	0,5288	0,5661	0,6151
Tamaño de Muestra	(24)	(24)	(24)	(24)	(24)	(24)	(24)
Valor-P (95%)	0,0020	0,0156	0,0368	0,0079	0,0079	0,0039	0,0014
Correlación MC	0,6539	0,6302	0,7045	0,7861	0,7856	0,6758	0,6533
Tamaño de Muestra	(24)	(24)	(24)	(24)	(24)	(24)	(24)
Valor-P (95%)	0,0005	0,0010	0,0001	0,0000	0,0000	0,0003	0,0005

CONCLUSIONES

- Las condiciones de humedad y densidad, así como de la velocidad empleada en la experimentación garantizaron comprobar la validez de los modelos analizados para un amplio intervalo de condiciones de suelo y operación del sensor.
- Los errores de predicción de los modelos analizados (0,90 a 260%) evidencian la incapacidad de los mismos para correlacionar las lecturas del sensor con la compactación del suelo.

- Los modelos desarrollados por Mouazen son más exactos que los modelos desarrollados por Andrade a la hora de predecir la densidad del suelo.
- La humedad del suelo es la variable que mayor peso tiene en la exactitud de la predicción de la densidad del suelo.
- La velocidad de avance del sensor es la segunda variable de importancia en la exactitud de la estimación de la compactación del suelo lo cual es un indicador de la necesidad de su inclusión en futuros modelos de predicción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDRADE, P.; U. ROSA; S. UPADHYAYA; B. JENKINS; J. AGUERA & M. JOSIAH: *Soil profile force measurements using an instrumented tine*, 11pp., In: ASAE Paper No. 011060, July 28-August 1, 2001.
2. ANDRADE, P.; S. K. UPADHYAYA; B. M. JENKINS & F. A. GARCIA S: *Evaluation of the UC Davis Compaction Profile Sensor*, 14pp., In: ASAE Paper Number: 021185, 28-31 July, 2002.
3. BERLI, M.: *Compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery*, (**Doctoral Degree Thesis**) Institute Federal Swiss of Technology, Zurich, 2001.
4. HALL, H. E. & R. L. RAPER: "Development and concept evaluation of an on-the-go soil strength measurement system", *American Society of Agricultural Engineers*, 48(2): 469-477, 2005.
5. HERRERA, M.: Determinación de la humedad crítica de compactación de los suelos ferralíticos rojos compactados. En: **I Conferencia Científica de Ingeniería Agrícolas de La Habana. AgroIng**, La Habana, Cuba. 2004.
6. HERRERA, M.; C. E. IGLESIAS; D. LARA; O. GONZÁLEZ y E. LÓPEZ: "Desarrollo de un sensor para la medición continua de la compactación del suelo", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(1): 6-11, 2011.
7. IGLESIAS, C. E. y M. HERRERA: Fundamentación de un canal de suelos para los estudios de labranza, trafabilidad y compactación. En: **Memorias de la Segunda Conferencia Sobre Desarrollo y Sostenibilidad, Agrocentro**, pp. 6, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba. 2003.
8. KELLER, T.: *Soil compaction and soil tillage studies in agricultural soil mechanics*, (**Doctoral Degree Thesis**), Swedish university of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 2004.
9. KELLER, T.; P. DÉFOSSEZ; P. WEISSKOPF; J. ARVIDSSON & G. RICHARD: "SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches", *Soil & Tillage Research*, 93(2): 391-411, 2007.
10. MOUAZEN, A.; K. DUMONT; K. MAERTENS & H. RAMON: "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*, 74(1): 91-102, 2003a.
11. MOUAZEN, A. & H. RAMON: "Expanding implementation of an on-line measurement system of topsoil compaction in loamy sand, loam, silt loam and silt soils", *Soil & Tillage Research*, 103: 98-104, 2009.
12. MOUAZEN, A.; H. RAMON & J. DE BAERDEMAEKER: "Modelling compaction from on-line measurement of soil properties and sensor draught", *Precision Agriculture*, 4(2): 203-212, 2003b.
13. PAGLIAI, M.; A. MARSILI; P. SERVADIO; N. VIGNOZZI & S. PELLEGRINI: "Changes in some physical properties of a clay soil in central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power", *Soil & Tillage Research*, 73: 119 - 129, 2003.
14. VRINDTS, E.; A. MOUAZEN; M. REYNIERS; K. MAERTENS; M. MALEKI; H. RAMON & J. DE BAERDEMAEKER: "Management zones based on correlation between soil compaction, yield and crop data", *Biosystems Engineering*, 92(4): 419-428, 2005.

*Todos nuestros servicios
a su disposición*

BIBLIOTECA ANTONIO MACHADO RUIZ

UNIVERSIDAD DE GRANMA (UGR)