



SUELO Y AGUA
SOIL AND WATER

Sensoramiento del estado de compactación del suelo mediante un campo magnético variable

Sensing of soil compaction by means of a variable magnetic field

Arturo Martínez Rodríguez¹; Raisel Rodríguez Pérez² y Alfredo Pérez Sendín³

RESUMEN. Con vistas a evaluar las posibilidades de sensoramiento no invasivo del suelo mediante el empleo de un campo electromagnético variable, se efectúa un estudio teórico experimental de la interacción campo electromagnético-suelo empleando la vía de la modelación mediante elementos finitos, así como la experimentación en un depósito de suelos. En un artículo anterior se determina la influencia de la frecuencia de excitación de un enrollado emisor y de la distancia entre dicho enrollado y un enrollado receptor, sobre la respuesta del suelo a la acción de un campo electromagnético variable y se obtienen criterios de validación del empleo del análisis por elementos finitos durante El estudio de la interacción de un campo magnético variable con el suelo. En el presente trabajo, utilizando dicha método de análisis, se estudian las posibilidades de sensoramiento del estado de compactación del suelo mediante la aplicación de un campo electromagnético variable. Como resultado de la modelación se obtiene una alta correlación ($R^2=0,96$) entre la conductividad eléctrica del suelo y la densidad de la corriente inducida en un enrollado receptor de la acción del campo electromagnético a través del suelo. La determinación experimental de la influencia de la humedad del suelo ferralítico rojo compactado y su estado de compactación sobre la conductividad eléctrica del suelo, evidenció un incremento de la conductividad eléctrica del suelo con el incremento de la humedad, así como que incrementos del grado de compactación del suelo, medidos a través de su densidad aparente, provocan incrementos en la conductividad eléctrica del suelo y por ende en el voltaje inducido medido en el enrollado receptor, obteniéndose altos coeficientes de correlación, oscilando el estadígrafo R^2 entre 95,9 y 98,4 % para los diferentes niveles de humedad del suelo experimentados.

Palabras clave: campo magnético, suelo, compactación, elementos finitos.

ABSTRACT. With a view to evaluating the possibility of non invasive sensing of soil compaction by means of the application of a variable electromagnetic field, a theoretical - experimental study of the interaction < electromagnetic field-soil > is made, by using finite element simulation, as well as experimentation in a soil deposit. In a previous paper the influence on the soil response to the action of a variable electromagnetic field is determined in function of the excitement frequency of a field-generator coil and of the distance between the field-generator coil and a receiver coil, measured through the current induced in the receiver coil. Also, validation criteria of the use of finite element analysis during the study of the interaction electromagnetic field - soil, were obtained. In present work, using this analysis method, the possibilities of sensing of soil compaction by means of the application of an electromagnetic variable field is studied. As a result, a high correlation ($R^2=0,96$) among the soil electric conductivity and the density of the induced in a receiver coil current is obtained. Experimentally, increments of electric conductivity of a compacted red ferralitic soil were evidenced with increases of soil moisture and compaction, measured through their apparent density. Soil electric conductivity and therefore induced voltage in the receiver coil, correlated with soil compaction, oscillating R^2 between 95,9 and 98,4% for different soil moisture levels.

Keywords: electromagnetic field, soil compaction. FEA simulation.

INTRODUCCIÓN

La sobreutilización de la maquinaria agrícola, así como su mal manejo durante las operaciones de labranza, originan

la compactación de los suelos, Según Soane *et al.* (1994) este proceso es además la causa de un significativo descenso del rendimiento de los cultivos, ocasionado por la disminución de la infiltración del agua que hace las plantas más susceptibles

Recibido 14/07/09, aprobado 21/09/10, trabajo 05/11, investigación

¹ Dr.Cs., Prof. Titular, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), Mayabeque, Cuba, E-✉: armaro6@yahoo.es y arturo@isch.edu.cu

² Estudiante de la Facultad de Ciencias Técnicas de la UNAH, Mayabeque, Cuba.

³ MSc., Profesor Auxiliar, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, Mayabeque, Cuba.

al estrés por sequía. En los trabajos de Bengough (1991) se vincula la compactación del suelo con la reducción del índice de crecimiento de la raíz de las plantas limitando así la disponibilidad de nutrientes.

La afectación a la porosidad del suelo es otro indicador de los cambios de la compactación (Servadio *et al.*, 2001); pues la modificación en el tamaño y cantidad de los poros reduce la capacidad del suelo para el almacenamiento de agua y aire, así como los espacios ocupados por la mayoría de los organismos, limitando además el intercambio gaseoso. Una compactación excesiva del suelo puede, además de afectar adversamente el rendimiento de los cultivos, incrementar los requerimientos energéticos durante las operaciones de labranza, acelerar la erosión y causar un uso ineficiente del agua y los nutrientes debido a una lenta capacidad de drenaje del subsuelo (Jhonson y Bailey, 2002).

Las operaciones de labranza dirigidas a la descompactación del suelo son costosas, ya que conllevan la penetración de los implementos a profundidades relativamente grandes, por lo que es de sumo interés en la práctica agrícola la determinación con la mayor precisión posible del grado de compactación del suelo y de la distribución de los perfiles de compactación del suelo a diferentes profundidades.

La práctica tradicional de aplicación de implementos de descompactación del suelo ha sido básicamente preventiva, en lugar de estar basada en el diagnóstico (Hall and Raper, 2005), lo que puede acarrear gastos innecesarios, por lo que diversos investigadores han propuesto determinar las necesidades de aplicación de enmiendas de descompactación a partir de la medición previa de la impedancia mecánica del suelo (Bowen y Coble, 1967; Schafer *et al.*, 1981).

En la actualidad al nivel internacional, la aplicación de métodos de la Agricultura de Precisión, basados en la aplicación de tratamientos en “sitios específicos”, constituye una de las tendencias fundamentales de la agricultura moderna, dirigida tanto a la economía de insumos, combustible y tiempo, como a la disminución de los impactos indeseables sobre el medio ambiente.

Un tratamiento de descompactación en “sitios específicos” requiere de un mapeo georeferenciado del estado de compactación del suelo que posibilite, a su vez, elaborar el mapa de tratamiento correspondiente. De ahí la importancia del estudio de métodos y medios que posibiliten el sensoramiento del nivel de compactación del suelo.

Los métodos tradicionalmente empleados en la práctica agrícola al nivel internacional durante el sensoramiento del estado de compactación del suelo han estado basados en la medición directa de la densidad aparente del suelo o en el empleo del penetrómetro (Campell and O' Sullivan, 1991; Clark, *et al.*, 1986; Hartge *et al.*, 1985) como indicador del índice de cono (ASAE, 2003), cuya correlación con la densidad aparente del suelo ha sido demostrada. Ambos métodos son de baja productividad cuando se pretende caracterizar grandes áreas con vistas a la elaboración de mapas georeferenciados que puedan ser utilizados para la aplicación de tratamientos en sitios específicos.

Diversos procedimientos y medios han sido objeto de desarrollo desde la década de los 90 dirigidos al sensado al vuelo (on-the-fly) o sobre la marcha (on-the-go) de parámetros del suelo indicadores del nivel de compactación (Alihamsyah, 1990; Adamchuk *et al.*, 2001; Glancey *et al.*, 1996; Chukwu and Bowers, 1997; Weissbach and Wilde, 1997; Hall and Raper, 2005; Andrade-Sánchez *et al.*, 2007).

La mayor parte de los dispositivos desarrollados emplean como elemento sensor de la resistencia del suelo una cuña con un ángulo de 30°, con dimensiones más o menos en el orden de las de los conos estandarizados para la medición del índice de cono mediante penetrómetros, introduciéndose el concepto de “índice de cuña” con una definición similar a la del índice de cono estándar.

Aunque este tipo de dispositivo puede representar un avance importante en lo referente a la obtención de mapas georeferenciados del estado de compactación del suelo, no es menos cierto que su aplicación es invasiva, o sea que conlleva la penetración en la profundidad del suelo de determinados implementos que demandan determinados niveles de potencia de tiro y consumo de combustible, además de requerir de todo un sistema de captación, manipulación y transmisión de datos complejo, basados en la técnica de la extensometría eléctrica.

Un sistema de sensoramiento no invasivo, basado en la detección de cambios en la conductividad eléctrica del suelo a diferentes grados de compactación pudiera constituir una herramienta de gran valor para la elaboración de mapas georeferenciados de tratamiento.

Es conocido que la elaboración de mapas de conductividad eléctrica del suelo, dirigido fundamentalmente a la detección de zonas de salinidad, constituye una herramienta actual de la agricultura moderna, comercializándose para estos fines equipos basados en la aplicación al suelo de un campo eléctrico (Sistema VERIS: Broughton, 1999), o un campo electromagnético (Sistemas EM-38 y EM-31, Geonics Ltd, 1997).

Una posible correlación entre el grado de compactación del suelo y su conductividad eléctrica, pudiera constituir una vía para la aplicación de métodos de sensoramiento no invasivos basados en la acción de un campo magnético o eléctrico sobre el suelo.

Entonces constituye el objetivo de esta investigación evaluar, sobre la base de un estudio teórico-experimental de la interacción campo electromagnético-suelo empleando tanto la vía de la modelación mediante elementos finitos, como la experimentación, la posibilidad de sensoramiento no invasivo mediante el empleo de un campo magnético variable, del estado de compactación del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Método empleado para la modelación de la interacción del campo magnético con el suelo

Mediante un programa de diseño asistido por computadora CAD-3D fueron digitalizados los dibujos de un “bloque” de suelo, un “bloque” de aire y dos enrollados: uno para la generación del campo magnético de corriente alterna y otro

para la recepción de la corriente inducida. En la Figura 1 se muestran los componentes del sistema simulado, así como las dimensiones principales. Fueron realizadas cuatro variantes del sistema suelo-aire-enrollados, en las cuales se asignó tres niveles a la distancia de colocación entre los enrollados: 250; 500 y 1 000 mm.

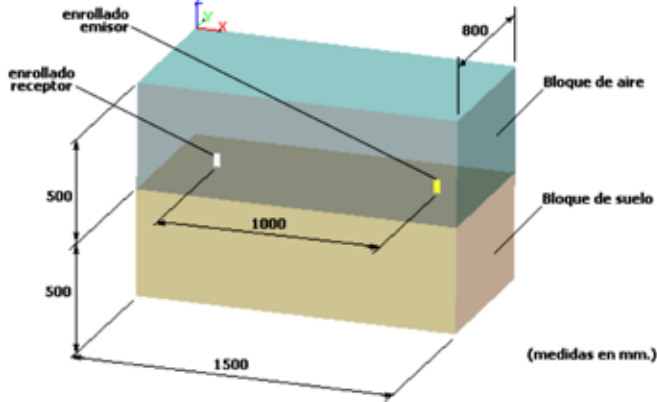


FIGURA 1. Modelación digitalizada del sistema suelo-aire-electrodos.

Para el análisis de las diferentes variantes, los dibujos correspondientes eran importados a un software de análisis por elementos finitos, efectuándose el mallado correspondiente, así como la declaración de los materiales: aire, cobre para los enrollados y el suelo. En el caso del suelo, con vistas a evaluar la influencia de su conductividad eléctrica sobre la corriente inducida en el enrollado receptor, se efectuaron corridas del programa con diferentes valores de la conductividad eléctrica del suelo que oscilaron entre 1 y 150 mS/m de acuerdo a datos de la literatura (Boydell *et al.*, 2003).

Materiales y métodos empleados para la investigación experimental

Los experimentos estuvieron dirigidos a determinar el efecto de la compactación y la humedad del suelo sobre el voltaje inducido en el enrollado receptor de un campo magnético aplicado al suelo mediante la excitación con un voltaje alterno de un enrollado emisor.

A estos efectos se habilitó un depósito construido con bloques de concreto, cuya vista general se muestra en la Figura 2.



FIGURA 2. Vista general de la instalación experimental.

El depósito fue dividido en tres secciones mediante tabiques (Figuras 2 y 3), de manera de fijar tres niveles de humedad del suelo (w_1 , w_2 y w_3) y tres niveles de compactación (δ_1 , δ_2 y δ_3) para cada nivel de humedad. Los niveles de compactación fueron fijados apisonando el terreno hasta lograr los niveles de densidad aparente deseados. Las corridas experimentales fueron realizadas de acuerdo al diseño que se muestra en la Tabla 1.

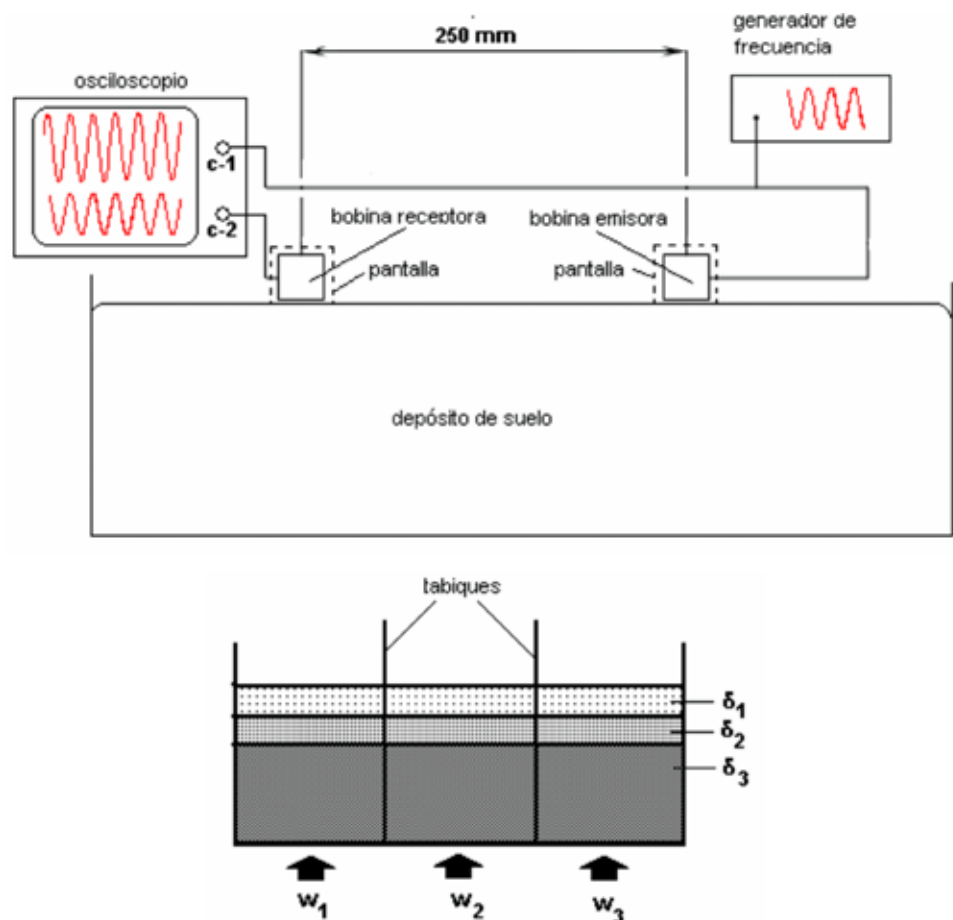


FIGURA 3. Esquema de la instalación experimental.

TABLA 1. Matriz del diseño experimental

Variables Corrida	Niveles de Humedad			Densidad Aparente		
	w ₁	w ₂	w ₃	δ ₁	δ ₂	δ ₃
1	x			x		
2	x				x	
3	x					x
4		x		x		
5		x			x	
6		x				x
7			x	x		
8			x		x	
9			x			x

Las condiciones de realización de los experimentos fueron las siguientes:

- Distancia entre enrollados: 250 mm;
- Posición del eje de los enrollados: vertical;
- Frecuencia del Voltaje de excitación del enrollado emisor: 10 000 Hz;
- Amplitud del Voltaje de excitación del enrollado emisor: 5 V;
- Tipo de suelo: Ferralítico Rojo compactado con bajo nivel de salinidad;
- Rango de variación de la humedad;
- Rango de variación de la densidad aparente: 1,1–1,8 g/cm³.

A manera de control, durante las corridas experimentales, se midió la conductividad eléctrica del suelo empleando una sonda de cuatro electrodos basada en el método Wenner, aplicado por Rhoades y Van Schilfgaard (1976) que se basa en la aplicación de un campo eléctrico en el suelo. De esta forma, podía evaluarse la respuesta del suelo con diferentes niveles de compactación y humedad bajo la aplicación de un campo electromagnético y un campo eléctrico.



FIGURA 4. Sonda de cuatro electrodos.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Influencia de la conductividad eléctrica del suelo sobre la densidad de la corriente inducida

Un primer experimento virtual realizado sobre el modelo digitalizado de la Figura 1, mediante el análisis por elementos finitos, con el objetivo de determinar la correlación entre la conductividad eléctrica del suelo y la densidad de la corriente inducida en el enrollado receptor, arrojó como resultado que los valores máximos de la densidad de la corriente inducida, obtenidas en la zona del enrollado receptor (Figura 5), alcanzaron valores ascendentes en función del crecimiento de la conductividad eléctrica del suelo en el rango estudiado. En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos para variaciones de la electroconductividad del suelo entre 1 y 150 mS/m.

TABLA 2. Densidad de la corriente inducida (Eddy Current Density) en función de la conductividad eléctrica del suelo

Conductividad eléctrica del suelo (S/m)	Densidad de la corriente inducida (Ampere/m ²)
0,001	13,87
0,010	14,38
0,050	17,93
0,075	21,86
0,100	23,66
0,150	26,05

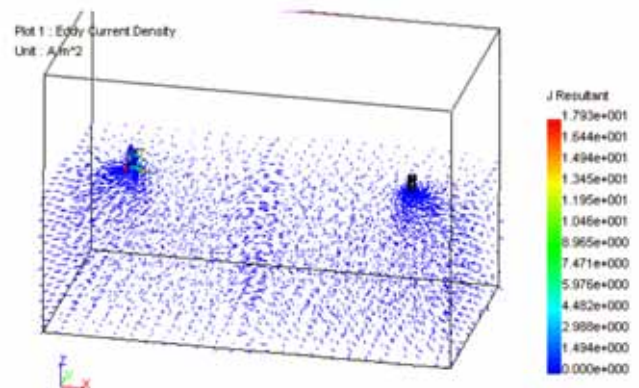


FIGURA 5. Distribución de la Densidad de la corriente inducida (J, A/m²) para una conductividad eléctrica del suelo de 50 mS/m.

La Figura 6 muestra el resultado del análisis de correlación efectuado, obteniéndose un alto coeficiente de correlación entre la conductividad eléctrica del suelo y la densidad de la corriente inducida de 0,983.

Influencia de la humedad del suelo y su estado de compactación sobre la conductividad eléctrica del suelo

En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos durante la determinación experimental de la influencia de la humedad del suelo y su estado de compactación sobre la conductividad eléctrica del suelo, estimada tanto con una sonda de cuatro electrodos, como a través de la medición en un osciloscopio de la amplitud del voltaje de la corriente inducida en el enrollado receptor de un campo electromagnético variable.

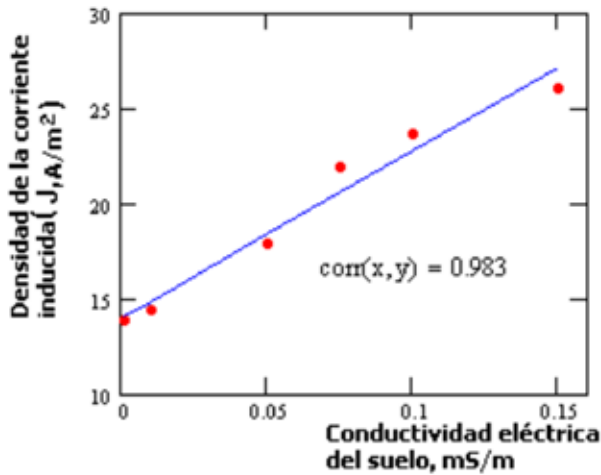


FIGURA 6. Correlación entre la densidad de la corriente inducida por un campo magnético variable y la conductividad eléctrica del suelo.

En ambos gráficos representados en la Figura 7 se evidencia un incremento de la conductividad eléctrica del suelo con el incremento de la humedad, lo que provoca mayores lecturas en la amplitud del voltaje inducido en el enrollado receptor. Asimismo, para cada nivel de humedad, puede apreciarse que un incremento del grado de compactación del suelo, medido a través de su densidad aparente, provoca incrementos en la conductividad eléctrica del suelo y por ende en el voltaje medido en el enrollado receptor.

De la figura se aprecia la obtención de altos coeficientes de correlación, oscilando el estadígrafo R^2 entre 95,9 y 98,4% para los diferentes niveles de humedad del suelo experimentados.

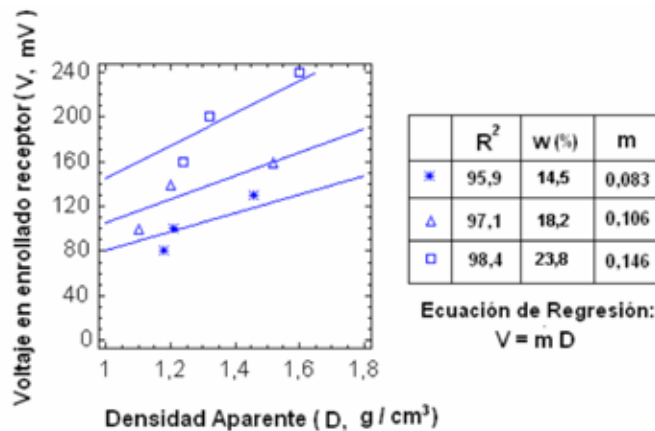


FIGURA 8. Análisis de correlación entre la densidad aparente del suelo a diferentes grados de humedad y la amplitud del voltaje inducido en el enrollado receptor durante la acción de un campo magnético variable aplicado al suelo.

Los resultados de este experimento, obtenidos a través de la aplicación de un campo magnético al suelo provocado por la aplicación de un voltaje alterno de frecuencia de 10 000 Hz (Figura7b), fueron procesados mediante el software Stat-Graphic 5.1 con vistas a obtener los indicadores de correlación entre la variable independiente (densidad aparente del suelo) y la variable dependiente (amplitud del voltaje inducido por el campo electromagnético en el enrollado receptor), presentándose los resultados de este análisis en la Figura 8. Para el análisis de correlación se asumió que las diferentes líneas de regresión pasaran por cero, de manera que si la densidad aparente del medio fuera muy pequeña, entonces la conductividad de dicho medio así como el campo magnético secundario también lo serían.

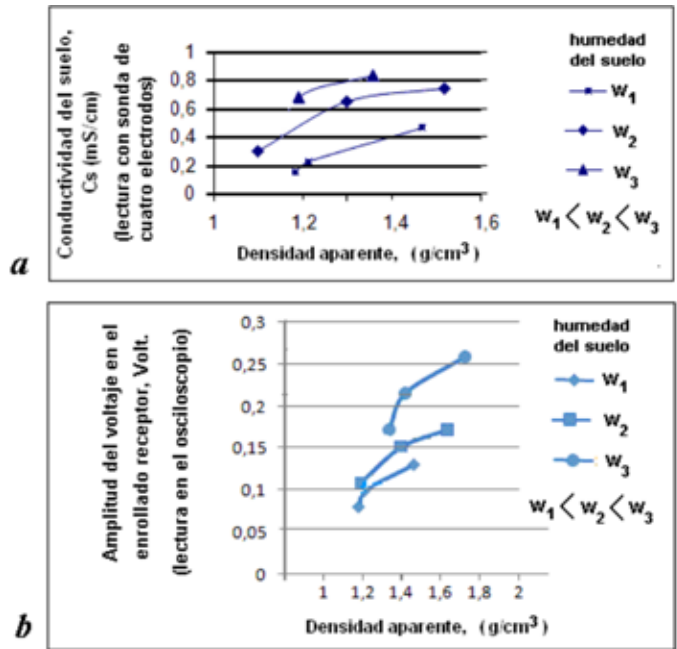


FIGURA 7. Influencia de la humedad del suelo y su densidad aparente sobre la corriente inducida: a) bajo un campo eléctrico; b) bajo un campo electromagnético.

De estos resultados se infiere la posibilidad de detectar cambios en el nivel de compactación del suelo, mediante la medición de su respuesta a la acción de un campo magnético variable, cuya frecuencia preferiblemente debe oscilar entre 10 000 y 15 000 Hz, en correspondencia con la distancia entre los electrodos (Martínez *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

- El resultado del análisis de correlación efectuado a partir de los datos obtenidos mediante el análisis por elementos finitos, reflejó un alto coeficiente de correlación (0,983) entre la conductividad eléctrica del suelo y la densidad de la corriente inducida en un enrollado receptor de un campo electromagnético aplicado a un bloque de suelos modelado mediante herramientas CAD.
- La determinación experimental de la influencia de la humedad del suelo y su estado de compactación sobre

la conductividad eléctrica del suelo, evidenció un incremento de la conductividad eléctrica del suelo con el incremento de la humedad, así como que incrementos del grado de compactación del suelo, medidos a través de su densidad aparente, provocan incrementos en la conductividad eléctrica del suelo y por ende en el voltaje medido en el enrollado receptor, obteniéndose altos coeficientes de correlación, oscilando el estadígrafo R^2 entre 95,9 y 98,4% para los diferentes niveles de humedad del suelo experimentados.

- La obtención mediante modelación de una tendencia similar de variación de la corriente inducida en el enrollado receptor ante variaciones de la conductividad eléctrica del suelo, a la obtenida experimentalmente, constituye un elemento de validación del método de elementos finitos como vía para la modelación de eventos de esta naturaleza.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMCHUK, V. I.; M. T. MORGAN, and H. SUMALI: "Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go", *Trans. ASAE* 44(6): 1377-1383, 2001.
- ALIHAMSYAH, A: *Technique for Horizontal Measurement of Soil Mechanical Impedance*, ASAE Paper No. 90-12201, ASAE, St. Joseph, Mich., USA, 1990.
- ASAE STANDARDS: *EP542, Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer*, St. Joseph, Mich., USA, 2003.
- BENGOUGH, J. VAN AND D. GOENSE: Soil tillage resistance as a tool to map soil type differences, P. 605-616. In: **Proc. 3rd Intl. Conference on Precision Agr. M inneapolis, MN. ASA, CSSA, and SSSA**, Madison, WI, USA, 1996.
- BOWEN and COBLE: "Environment requirement for germination and emergence", *TRANSACTIONS of the ASAE*, 11(12): 10-24, 1967.
- BROUGHTON, B.; A. MCBRATNEY; B. WHELAN & BUDIMAN: *Preliminary results with the VERIS soil electrical conductivity instrument [en línea] 1999 Disponible en: <http://www.mea.com.au/> [Consulta: mayo 2009]*.
- CAMPELL, D. J.; O'SULLIVAN M.F: The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction and tillage soil analysis, physical methods, 281pp. **Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias)** Ed. Marcel Dekker, Inc.; St. Joseph, Michigan, USA, 34(3): 399-423, 1996.
- CHUKWU, E., and C. G. BOWERS: *Instantaneous multiple depth soil mechanical impedance sensing from a moving vehicle*, ASAE Paper No. 971077, St. Joseph, Mich., USA, 2005.
- GEONICS LIMITED: *Applications of electromagnetic methods: Soilsalinity*. Geonics Limited, Mississauga, ON, Canada, [en línea] 1997 Disponible en: <http://agron.scijournal.org/cgi/content/full/95/3/483>. [Consulta: mayo 2009].
- GLANCEY, J.L., UPADHYAYA, S.K., W.J. CHANCELLOR, J.W., RUMSEY: "Prediction of agricultural implement draft using an instrumented analog tillage tool", *Soil Tillage Res.*, 37(1): 47-65, 1996.
- HALL, H. E.; R. L. RAPER: "Development and concept evaluation of an on-the-go Soil strength measurement system", *Transactions of the ASAE*, 48(2): 469-477 2005.
- HARTGE, K.H.: "Penetrometer measurements for screening soil physical variability", (Amsterdam) *Soil & Tillage Research*, 5(4): 343-350, 1985.
- JOHNSON, C. E., and A. C. BAILEY: "Soil compaction. Advances in Soil Dynamics", St. Joseph, Mich., USA, *Transactions of the ASAE*, 2: 155-178, 2002.
- MARTÍNEZ, R. A.; R. RODRÍGUEZ; A. PÉREZ: "Influencia de la frecuencia de excitación y la distancia entre enrollados durante el sensoramiento de la conductividad eléctrica del suelo mediante un campo magnético variable", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(4): 17-23, 2010.
- SERVADIO, R. and L. HUFFMAN: "Vehicle and heel factors influencing soil compaction crop response in different traffic regimes", *Soil & tillage research*, 11: 239-282, 1988.
- SOANE, B. D., and C. VAN OUWERKERK: *Soil compaction problems in world agriculture*, In Soil Compaction in Crop Production, eds. B. D. Soane and C. Van Ouwerkerk, ch. 1, 1-21, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1994.
- WEISSBACH and WILDE: "Cone penetration resistance equation as a function of the clay ratio, soil moisture content and specific weight", *Journal of Terramechanics* 24(1): 41-56, 1997.