

# DESARROLLO DE UN PENETRÓMETRO INTEGRADO CON TECNOLOGÍA GPS-RTK PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL SUELO

## Development of a Soil Penetrometer Integrated with RTK-GPS Technology for Generating Soil Resistance Penetration Maps

Santos Gabriel Campos Magaña<sup>1‡</sup>, Juan Antonio López López<sup>1</sup>, Martín Cadena Zapata<sup>2</sup>, Marco Antonio Reynolds Chávez<sup>1</sup>, Neftali Cuervo Piña<sup>2</sup> y Gabriela Ramírez Fuentes<sup>2</sup>

### RESUMEN

La agricultura de precisión requiere información precisa acerca de las propiedades del suelo para optimizar la aplicación de insumos y satisfacer necesidades específicas de los cultivos. En particular, la resistencia a la penetración (RP) que es un factor que mide la compactación del suelo, la cual limita el crecimiento de las raíces y el rendimiento del cultivo, lo cual requiere ubicar y cuantificar el valor de RP. El presente trabajo describe el desarrollo de un penetrómetro integrado con dos sensores (resistencia y profundidad) aplicados junto con tecnología de Posicionamiento Cinemático en Tiempo Real-Sistema de Posicionamiento Global para Agricultura (RTK-AgGPS) para la generación de mapas de diagnóstico de capas compactadas. El primer sensor fue desarrollado para la medición de la RP utilizando un transductor de anillo simple con capacidad de hasta 9 MPa, con una sensibilidad de 13.5 Nm V<sup>-1</sup> y un coeficiente de correlación de 99.6% entre la fuerza aplicada y el voltaje de salida. El segundo sensor, se adecuó para determinar la profundidad de RP con un desplazamiento de trabajo máximo de 0.60 m, con una sensibilidad de 258.5 mm V<sup>-1</sup> y un coeficiente de correlación de 100% entre la profundidad de penetración y voltaje de salida. Para la evaluación en campo, se construyó un carro porta-sensores acoplado al enganche del tractor para el accionamiento del actuador hidráulico del penetrómetro. Se realizó un muestreo sistemático de 30 puntos utilizando la tecnología RTK-GPS obteniendo los valores

y localización geo referenciada de RP con una precisión de 0.025 m en una profundidad de trabajo hasta de 0.40 m, esto permitió la generación de mapas de diagnóstico de la RP empleando un Sistema de Información Geográfica para tres profundidades diferentes de 0.20, 0.30 y 0.40 m.

*Palabras clave:* sensores de fuerzas; sensores de posición; agricultura de precisión.

### SUMMARY

Precision agriculture requires accurate information about soil properties to optimize the input supply and to satisfy a particular crop need. In particular, resistance to penetration (RP) is a factor that measures soil compaction, which limits the growth of roots and crop yield, so it is important to determine its magnitude and location. This paper describes the development of a system for measuring and monitoring physical soil properties, specifically an integrated penetrometer with two sensors (resistance and depth) connected to Real Time Kinematics-Geo Positional System for Agriculture (RTK-AgGPS) technology in order to construct soil compacted layers diagnostic maps. The first sensor was developed for RP measurement using a ring transducer with a capacity of up to 9 MPa, a sensitivity of 13.15 Nm V<sup>-1</sup> and a correlation coefficient of 99.6% between the applied force and the output voltage. The second sensor was developed to determine with high accuracy the working depth of RP with a maximum displacement of 0.60 m, a sensitivity of 258.5 mm V<sup>-1</sup> and a correlation coefficient of 100% between the penetration depth and the voltage output. For field evaluation, the portable sensors carriage prototype was attached to the tractor three-point hitch; the penetrometer is driven by a hydraulic actuator. Systematic sampling with 30 points was performed using RTK-GPS

<sup>1</sup> División de Ingeniería, <sup>2</sup> Estudiante de Posgrado en Ingeniería, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Blvd. Antonio Narro s/n. 25315 Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (camposmsg@hotmail.com)

technology to obtain RP values and location with an accuracy of 0.025 m in a working depth range of up to 0.40 m. Three maps were generated with a GIS software for three different ranges of depths: 0.20, 0.30 and 0.40 m.

**Index word:** *force sensor; position sensor; precision agriculture.*

## INTRODUCCIÓN

Para la aplicación correcta de la tecnología de agricultura de precisión (AP) se requiere de información puntual acerca de las propiedades del suelo para conocer en qué medida éstas satisfacen las necesidades específicas del cultivo y a partir de ello optimizar la aplicación de insumos. La AP está basada en la existencia de la variabilidad edáfica lo cual requiere de la aplicación de distintas áreas de tecnología para estimar y evaluar dichas variaciones tales como un Sistema de Posición Global (GPS), sensores remotos y locales, así como Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Zhang *et al.*, 2002).

La AP está siendo ampliamente difundida, incrementando el interés en el uso de sensores para la obtención de información de las variables del suelo y de los cultivos. Muchos de estos sensores están acoplados a un GPS, para obtener los mapas de las diferentes variables (Andrade *et al.*, 2004). Los datos obtenidos y procesados con SIG son la base para determinar la variabilidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos agrícolas. Mediante el uso de técnicas geo-estadísticas, la variabilidad espacial de los parámetros del suelo puede ser evaluada, lo que facilita una gestión regionalizada, siguiendo los objetivos de la agricultura de precisión, por ejemplo, la realización de operaciones de labranza de acuerdo con esta variabilidad espacial (Paz *et al.*, 2000).

El estudio de la variabilidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo tiene un papel importante en la cuantificación de las necesidades de laboreo del suelo, en función de los requerimientos de desarrollo del cultivo. La resistencia a la penetración (RP) es un parámetro directamente relacionado con la compactación, que es resultado del aumento en densidad y disminución de la porosidad lo que implica un deterioro de la estructura que limita el crecimiento de las plantas y el rendimiento del cultivo (Dexter *et al.*, 2007). Por lo anterior, es de suma importancia cuantificar

y georreferenciar el valor de la RP en el terreno. La característica mecánica del suelo como la RP proporciona información útil sobre la ubicación en espacio y profundidad de capas compactadas del suelo. Los suelos compactados reducen las tasas de crecimiento de las raíces de los cultivos y así limitan la disponibilidad de agua y nutrientes a la planta (Upadhyaya *et al.*, 1999). La detección precisa de la RP del suelo y la ubicación de capas duras es un paso importante para la aplicación con éxito de la Labranza de Precisión. Se están desarrollando tecnologías para la medición de la RP del suelo en tiempo real para identificar las capas duras para apoyar el desarrollo de la Labranza de Sitio Específico. Algunos investigadores han llevado a cabo estudios para la medición del perfil de la compactación del suelo utilizando dispositivos diseñados para funcionar de una manera similar a una herramienta de labranza. Glancey *et al.* (1989) y Adamchuk *et al.* (2001) desarrollaron vigas en voladizo instrumentadas con galgas extensiométricas para medir la distribución de la fuerza de corte del suelo en la viga. Como aplicación práctica, penetrómetros horizontales han sido desarrollados y empleados para la caracterización de la distribución de la resistencia mecánica del suelo a diferentes profundidades (Sirjacobs *et al.*, 2002; Andrade *et al.*, 2007).

El penetrómetro de cono, es un dispositivo que mide la fuerza requerida para empujar un cono de metal verticalmente dentro del suelo (ASAE, 2002a). Los penetrómetros son ampliamente utilizados para medir la resistencia del suelo a la penetración, expresado como la fuerza por unidad de área de sección transversal de la base del cono (Bengough *et al.*, 2001). El penetrómetro de cono ha sido automatizado y modificado para incrementar la tasa de adquisición de datos y evaluado para producir mapas de la resistencia del suelo (Clark, 1999; Raper *et al.*, 1999; Price, 2002). Varios autores han desarrollado un sistema de penetrómetro basado en Sistemas de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS) montado sobre el tractor utilizado para cuantificar la resistencia del suelo a la penetración de manera georreferenciada (Khalilian *et al.*, 2002; Boon *et al.*, 2005).

En la última década, la integración de sensores con los Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS) han permitido obtener mediciones en tiempo real con una precisión de su ubicación de centímetros y han mejorado significativamente el volumen y la precisión espacial de los datos necesarios para la AP (Wilson,

2000; Pérez *et al.*, 2011). Los receptores GNSS son las tecnologías fundamentales de la AP donde la información de la posición es un requisito para la aplicación de tecnologías para el manejo del cultivo de sitio específico, tales como: el monitoreo de rendimiento, muestreos de suelo o aplicación variable de insumos, las cuales se llevan a cabo con suficiente precisión con los sistemas diferenciales (DGPS) y sistemas de corrección de posición tiempo real (RTK-GPS).

La adquisición de equipos de agricultura de precisión es un tema de gran importancia en las zonas de alta productividad agrícola en México. En la actualidad se cuenta en forma limitada con equipos para determinar los requerimientos a nivel espacial de propiedades físicas del suelo para optimizar la producción agrícola en los componentes de siembra, fertilización y control de plagas y enfermedades. Similar situación se presenta en la labranza, en donde no se conocen en México registros de contribuciones científicas en el manejo variable de laboreo del suelo. Por lo anterior, se requiere disponer de sistemas integrados o dispositivos electrónicos para la generación de mapas de diagnóstico de las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos agrícolas y su interacción con los mapas de rendimiento, que permitan la elaboración de mapas de prescripción de aplicaciones de insumos entre los que destacan la aplicación de energía diferenciada en el laboreo primario del suelo.

Debido a que la compactación (que puede ser ubicada por la RP del suelo) es uno de los factores limitantes en el rendimiento de la producción agrícola y que el uso de la labranza para su adecuada corrección representa altos consumos de energía al tratar el suelo como si el problema fuese homogéneo. El propósito de la presente investigación fue el desarrollo de un sistema para la medición de la resistencia a la penetración del suelo, el cual dispone de sensores para la medición de fuerza y profundidad de RP integrados con tecnología GPS-RTK, con la finalidad de generar mapas de diagnóstico de alta precisión de la geo-localización de capas compactadas de suelo. El presente trabajo antecede a la investigación del desarrollo de tecnología de laboreo variable automático el cual usará como principal insumo los mapas de diagnóstico de capas compactadas de sitio específico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo tecnológico se realizó del periodo 2010 al 2014, en las instalaciones del laboratorio de mecánica-electrónica del departamento de maquinaria agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Para esta investigación se diseñó y construyó un carro porta sensores con acoplamiento al enganche de los tres puntos del tractor (Figura 1). La construcción del diseño desarrollado del carro porta sensores se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Investigación

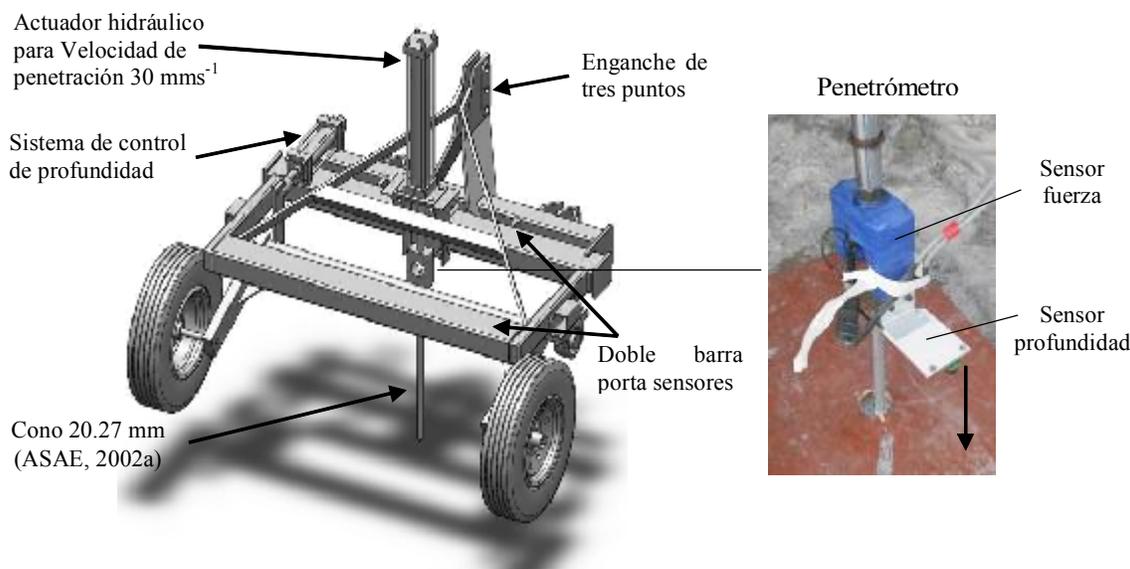


Figura 1. Carro porta sensores con el penetrómetro acoplado.

y Desarrollo de Aguascalientes (CIDEA), de la empresa TECNOMEC AGRÍCOLA S.A. de C.V. en Aguascalientes, México. El carro cuenta con un actuador hidráulico para controlar la altura de la doble barra donde se pueden montar sensores para la medición de las propiedades físicas del suelo entre ellas la resistencia a la penetración. Los componentes que integran el penetrómetro son dos sensores: el primer sensor para la medición de fuerza de RP, para el cual se empleó el método desarrollado por Campos y Wills (1995), para diseñar un sensor de fuerzas tipo anillo simple con capacidad de 10 kN. El acero empleado en la construcción del transductor fue un 1020 (AISI) con un esfuerzo límite de cedencia de 380 MPa. Las galgas extensiométricas utilizadas fueron de 350  $\Omega$  tipo KFG-5-350-C1-11 de la marca Kyowa con un factor de galga de 2.11, en un arreglo de puente de Wheatstone completo. La colocación de las galgas en el anillo fue en la parte interior y exterior, empleando para su montaje el procedimiento descrito por Sakurai (1996). Para su operación, este sensor de anillo simple se acopla en su extremo superior el vástago del actuador hidráulico y en su extremo inferior el penetrómetro con una punta cónica de 20.27 mm de base y ángulo de 30° (Norma ASAE S313.3, 2002a). El segundo sensor para medición de profundidad de penetración fue seleccionado para mediciones en un rango de 30 a 600 mm y está integrado por un sensor de distancia LV-MaxSonar-EZ1 de la empresa MaxBotix, dos amplificadores de instrumentación en serie AD620AN y un filtro pasabaja Resistivo-Capacitivo (RC). Esta combinación de circuitos integrados acondicionan las señales para un porcentaje menor al 2% de ruido magnético al realizar el registro de datos en el sistema de adquisición Daqbook 2000. La velocidad de penetración fue de 30  $\text{mms}^{-1}$  (Norma ASAE EP542, 2002b).

La calibración del sensor de fuerza se realizó aplicando pesos conocidos para la obtención de la constante de proporción entre la carga aplicada y el voltaje de salida. De manera similar la calibración del sensor de profundidad se realizó en un rango de trabajo de 30 a 500 mm, desplazando el sonar con respecto a la posición fija de una placa reflectora del sonido a intervalos de 50 mm, esto para la obtención de la constante de proporción entre la distancia y el voltaje de salida. Para ambas calibraciones se empleó el sistema de adquisición de datos Daqbooq 2000 además del acondicionador de señales DBK43A y el programa DaqView 9.1.27 para el registro de la información a una

frecuencia de muestreo de 20 Hz. La generación de la ecuación de calibración, se realizó con una regresión lineal empleando el programa Minitab V16.

Para la determinación de la RP en campo, se utilizó un tractor acondicionado, que permitió las facilidades de conectividad y acoplamiento de los equipos de seguimiento y registro de la información. La instrumentación en el tractor incluyó los siguientes equipos: un convertidor analógico-digital Daqbook2000, un acondicionador de voltaje modelo DBK43a y un controlador AgGPSFMX marca Trimble.

Las evaluaciones en campo del sistema desarrollado para la determinación de la (RP) georeferenciada se realizaron en el campo experimental Navidad, perteneciente a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicado en el estado de Nuevo León, México. Con coordenadas 25° 01' 50.88" N, 100° 37' 35.65" O, y altitud de 1884 m. La textura del suelo de evaluación fue migajón con contenidos medios de 42% arena, 36% limo y 22% de arcilla, con humedad promedio del 15% y densidad aparente de 1.07  $\text{Mg m}^{-3}$ . El equipo utilizado para georreferenciación de la variable de muestreo fue la pantalla integrada AgGPSFMX, adicionalmente se utilizó la señal de corrección RTK, para obtener posiciones con un grado de error inferior a 0.0254 m, en el Cuadro 1 se observan las especificaciones del penetrómetro.

Las profundidades de evaluación fueron de 0.20, 0.30 y 0.40 m donde se determinó la media, mediana, máximo, mínimo y coeficiente de variación (CV). Para la clasificación de la variabilidad del parámetro muestreado, se tomó el criterio de Warrick y Nielsen (1980) donde la variabilidad baja para CV menores de 12%, variabilidad media entre 12 y 60% y variabilidad alta para CV

**Cuadro 1. Especificaciones técnicas del penetrómetro.**

Tipo	Especificación
Variables	Resistencia a la penetración(MPa)
	Profundidad (mm)
Accionamiento penetrómetro	Hidráulico
Cono	Norma ASAE S313.3
RP máxima	9 MPa
Profundidad máxima	0.60 m
Velocidad de penetración	30 $\text{mms}^{-1}$ (Norma ASAE 542)
Precisión profundidad	$\pm 0.01$ m
Geo-Localización (X,Y,Z)	Pantalla AgGPS FMX + RTK
Precisión localización	0.0254 m (RTK)

mayores a 60%. Posteriormente al muestreo, se realizó la interpolación con el método Ponderación de la Distancia Inversa (IDW) para la superficie total y se generaron los mapas de resistencia a la penetración para cada una de las profundidades evaluadas empleando el Sistema de Información Geográfica (SIG) GS+ V5.1.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las pruebas de laboratorio mostraron que el desarrollo del sensor de RP presentó alta confiabilidad en la respuesta a la detección de fuerzas conocidas. En la Figura 2 se observan los resultados de la calibración del transductor de anillo simple con una sensibilidad de  $13.15 \text{ Nm V}^{-1}$  y un coeficiente de correlación de 99.6% entre la fuerza aplicada y el voltaje de salida. Resultados similares fueron reportados por Sun *et al.* (2006) y Laffita *et al.* (2012), para la calibración estática de una celda de carga para medición continua de RP y de un transductor tipo “S”, respectivamente, aplicando valores de pesos conocidos.

Los resultados de calibración del sensor de profundidad con una sensibilidad de  $258.5 \text{ mm V}^{-1}$  y un coeficiente de correlación de 100% entre la profundidad de penetración y la salida de voltaje se observan en la Figura 3.

En la Figura 1 se muestra el carro porta sensores con los dos diferentes aditamentos para el muestreo de la fuerza y la profundidad de la RP, así como el actuador del hidráulico del penetrómetro.

La validación en campo del sistema de monitoreo de resistencia a la penetración se llevó a cabo con muestreo sistemático de 30 puntos a partir de una muestra simple distribuidos en forma equidistante en

superficie de una hectárea, con lecturas continuas de RP de 0-400 mm de profundidad, controlada por una válvula reguladora de flujo y el sistema hidráulico del tractor. El desempeño del equipo presentó adecuada funcionalidad de los componentes mecánicos y electrónicos, con una alta precisión de muestreo para la fuerza y profundidad. La configuración del carro porta sensores para la medición de resistencia a la penetración en campo se muestra en la Figura 4, donde se aprecia además del carro, la antena de corrección de posición satelital RTK.

Las gráficas de los muestreos continuos obtenidos con el sensor de fuerza y profundidad respectivamente para la obtención de la RP bajo condiciones de campo se muestran en la Figura 5 y 6.

La estabilidad del monitoreo de los primeros 500 datos cuando la sonda aún no ha penetrado en el suelo se pueden observar en la Figura 5 y 6 sección (a); en la sección (b) la sonda ya penetró en el suelo y manda las señales de la RP y la profundidad al sistema de adquisición de datos. En la sección (c) las señales del sonar y del penetrómetro se estabilizan ya que la sonda ha dejado de penetrar el suelo; esto es ocasionado por dos causas: la primera es cuando el carro-porta sensores es levantado por la resistencia del suelo a ser penetrado (capas compactadas) y que supera el esfuerzo normal transmitido por el carro al suelo (9 MPa) y el penetrómetro no alcanzó los 0.40 m de profundidad y la segunda causa, es que se alcanzó la profundidad deseada y es detenido el muestreo de datos.

Se observa en la Figura 7 el resultado de la medición de la resistencia a la penetración contra profundidad, realizada con el penetrómetro integrado por ambos sensores. Se observa una respuesta nítida, en la medición de datos obtenidos en campo.

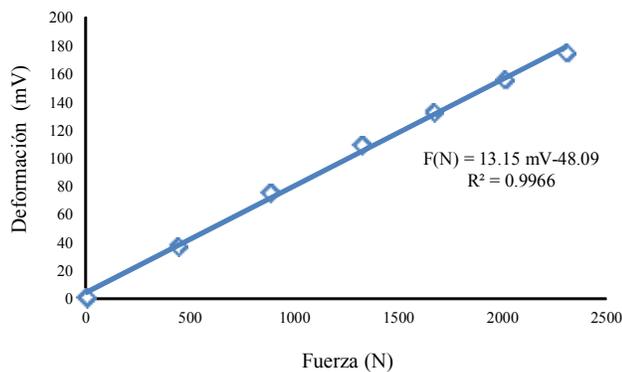


Figura 2. Ecuación de respuesta del sensor de fuerza de RP.

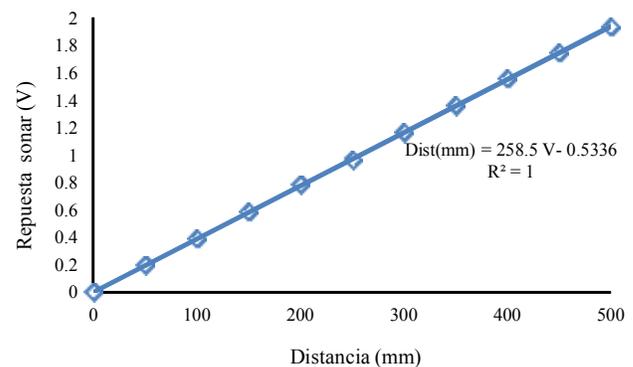


Figura 3. Ecuación de respuesta del sensor de profundidad.

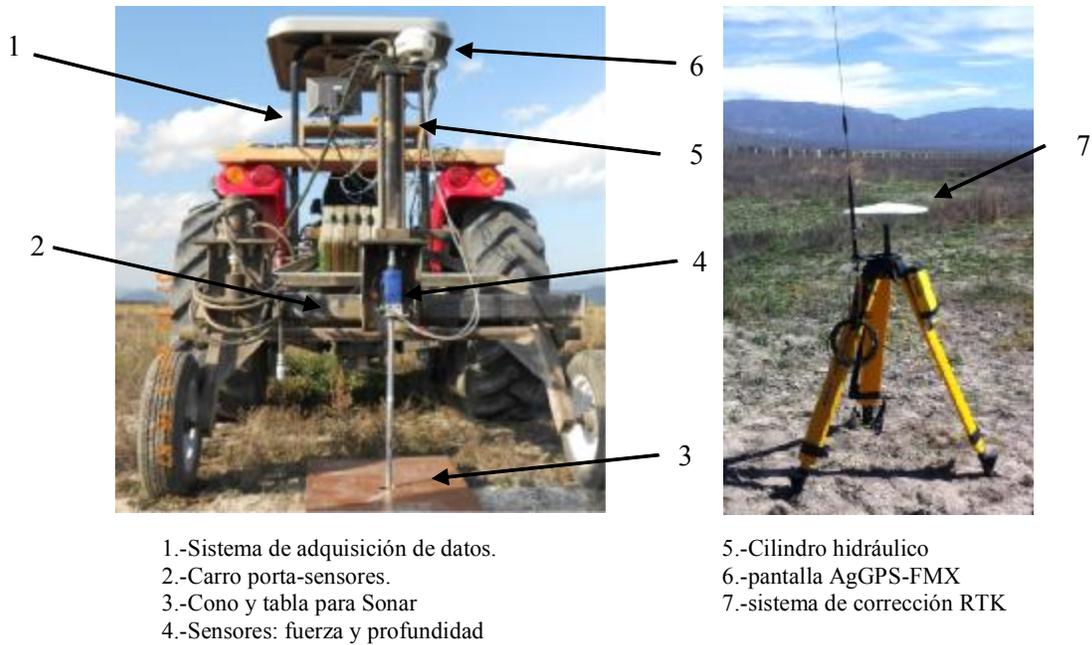


Figura 4. Carro porta sensores y componentes del sistema de muestreo para la medición de (RP) en campo.

Las magnitudes de la RP oscilaron en un rango de 0.644 y 3.96 MPa, de la superficie del suelo hasta 0.40 m de profundidad. A partir de la base de datos de las variables de posición (latitud, longitud y sensor de profundidad), se utilizó el método de interpolación IDW, para la generación de los mapas a tres profundidades distintas (0.20, 0.30 y 0.40 m).

Los resultados obtenidos de resistencia a la penetración a la profundidad de 0.20 m, con rangos que

van desde 0.644 hasta 1.656 MPa se observan en la Figura 8a. En la Figura 8b se observan los resultados obtenidos a la profundidad de 0.30 m, con rangos que van desde 1.30 hasta 2.35 MPa. En la Figura 8c se observan los resultados obtenidos a la profundidad de 0.40 m, con rangos que van desde 1.710 hasta 3.960 Mpa. Taylor y Gardner (1963), Atwell (1993), Silva y Kay (1996), Raper *et al.* (2005a), encontraron que con RP superiores a 2 MPa, se reduce

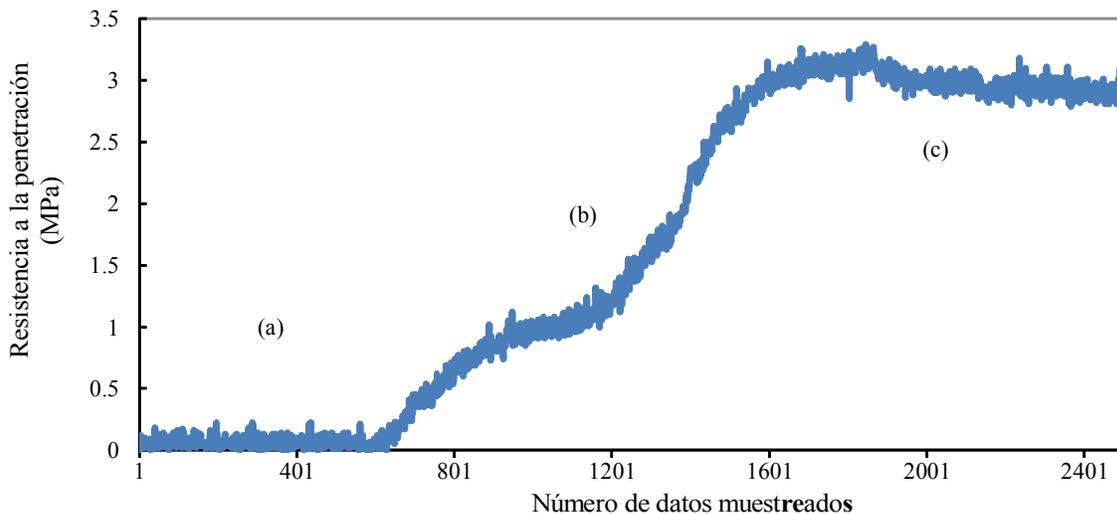


Figura 5. Resultados de las gráficas obtenidas en campo para RP.

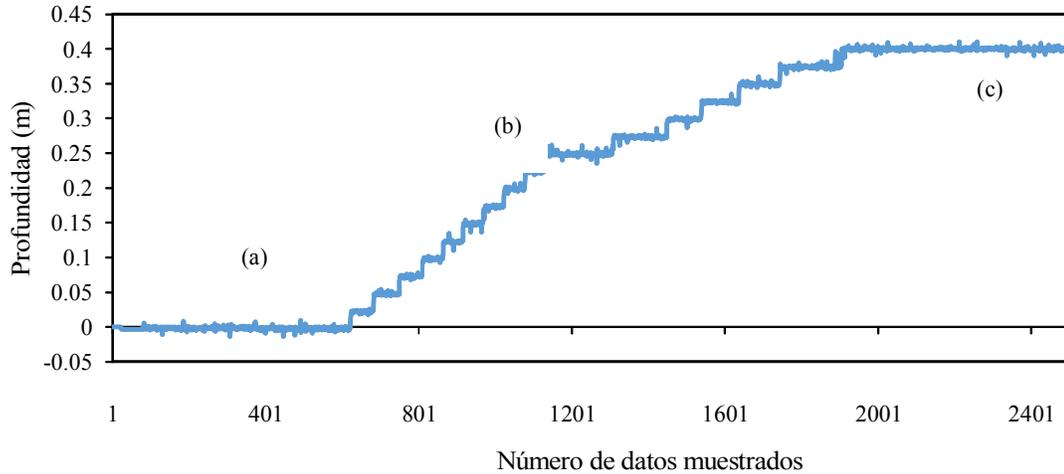


Figura 6. Resultados de las gráficas obtenidas en campo para profundidad.

significativamente el crecimiento de las raíces de la mayoría de las especies cultivadas. Esto nos indica, que para todos los valores medidos con el penetrómetro que excedan el valor de 2 MPa a la profundidad de muestreo registrada, deberán ser labrados para evitar un efecto negativo en el rendimiento.

El resultado de los valores de RP para las 3 profundidades monitoreadas y la clasificación de la variabilidad tomando el coeficiente de variación de la media de los datos, de acuerdo al criterio de Warrick y Nielsen (1980) se observa en el Cuadro 2.

De acuerdo al resultado del coeficiente de variación de la variable RP, para las tres profundidades, la variabilidad se clasifica como variabilidad media, ya que los valores se encuentran dentro del rango de 12 a 60%. Los resultados de la generación de mapas de diagnóstico, demostraron que es posible determinar áreas de capas compactadas del suelo a partir de un muestreo con alta precisión. El uso del penetrómetro equipado con GPS-RTK, más la adición del sensor de profundidad otorga precisión vertical milimétrica. Resultados similares fueron encontrados por Clark (1999), Raper *et al.*

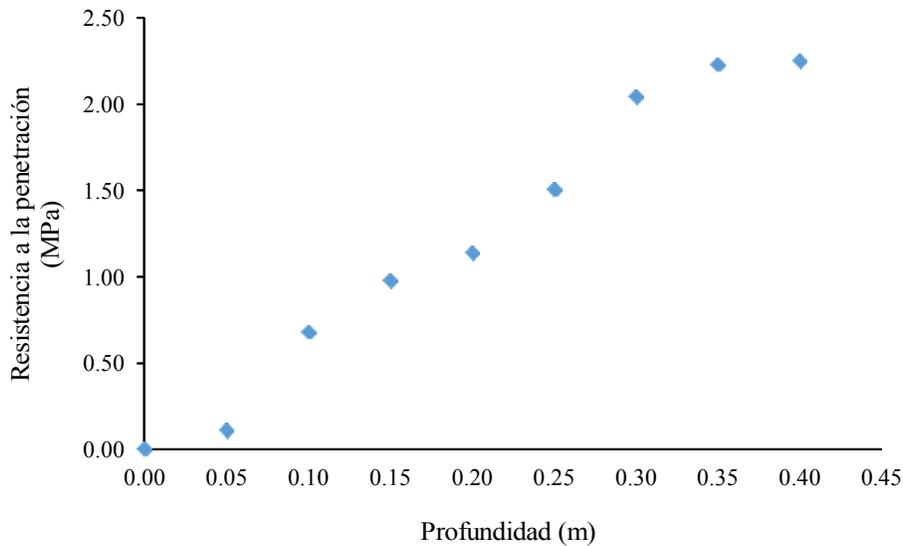


Figura7. Resultados de la medición de resistencia a la penetración del suelo en un punto.

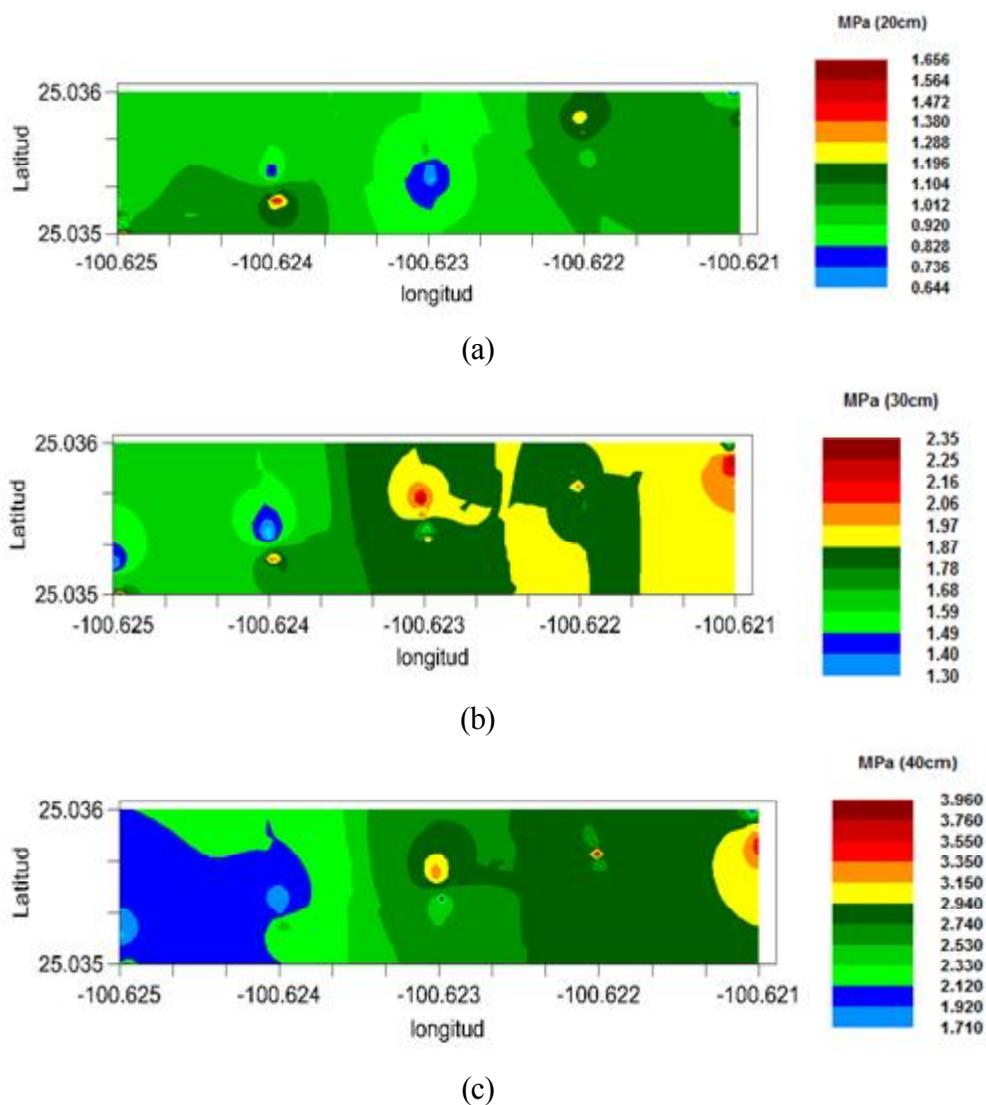


Figura 8. Mapas de la resistencia a la penetración del suelo (MPa) a profundidades de 0.20, 0.30 y 0.40 m.

Cuadro 2. Datos de 30 puntos de muestreo de RP para la clasificación de la variabilidad.

Variable	Media	D.S.	Varianza	Mínimo	Mediana	Máximo	C.V.
Profundidad	----- Mpa -----						%
RP 0.20 m	0.9782	0.3497	0.1223	0.453	0.968	1.856	35.75
RP 0.30 m	1.7836	0.5305	0.2814	0.72	1.7295	2.816	29.74
RP 0.40 m	2.511	0.893	0.797	1.014	2.345	4.459	35.55

C.V. = coeficiente de variación; D.S. = desviación estándar.

(2005b) reportando que la profundidad de la capa dura era completamente variable, en todo el terreno desde 10 a 25 cm. Con base en los mapas de diagnóstico obtenidos e identificando capas compactadas superiores a 2 MPa, se requiere que 50% se laboree a 0.20 m, 30% a 0.30 m y el restante 20% a 0.40 m.

Una aplicación potencial del uso de este desarrollo y su análisis, es la identificación y localización de capas compactadas con alta precisión para su posterior manejo como labranza de sitio específico o aplicación de laboreo variable.

## CONCLUSIONES

- El equipo desarrollado permite la medición de la magnitud, profundidad y geolocalización de las capas compactadas del suelo, con una precisión mayor de 0.025 m y errores menores al 1%.
- La información generada permitió la elaboración de mapas de diagnóstico de la resistencia a la penetración (RP) a diferentes profundidades. Dichos mapas contienen atributos de la ubicación de las capas compactadas y la magnitud de la resistencia a la penetración.

## LITERATURA CITADA

- Adamchuk, V. I., M. T. Morgan, and H. Sumali. 2001. Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go. *Trans. ASAE* 44: 1377-1383.
- Andrade S., P., S. K. Upadhyaya, B. M. Jenkins, C. Plouffe, and B. Poutre. 2004. Field evaluation of the improved version of the UC Davis compaction profile sensor (UCD CPS). Paper number 041037. *ASAE Annu. Meeting*. (doi: 10.13031/2013.17644).
- Andrade S., P., S. K. Upadhyaya, and B. M. Jenkins. 2007. Development, construction and field evaluation of a soil compaction profile sensor. *Trans. ASABE* 50: 719-725.
- ASAE Standards. 2002a. S313.3. Soil cone penetrometer. St. Joseph, MI, USA.
- ASAE Standards. 2002b. EP542. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. St. Joseph, MI, USA.
- Atwell, B. J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environ. Exp. Bot.* 33: 27-40.
- Bengough, A. G., D. J. Campbell, M. F., and O'Sullivan. 2001. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. pp. 377-403. *In: K. A. Smith and C. E. Mullins (eds.). Soil and environmental analysis*. Marcel Dekker. New York, NY, USA.
- Boon, N. E., A. Yahya, and A. F. Kheiralla, B. S. Wee, and S. K. Gew. 2005. A tractor-mounted, automated soil penetrometer shear meter unit for mapping soil mechanical properties. *Biosyst. Engin.* 90: 1-96
- Campos M., S. G. and B. M. D Wills. 1995. Force measurement-recording and data analysis for tillage tools. *Agric. Mechanizat. Asia, Africa, Latin America* 26: 13-16.
- Clark, R. 1999. Evaluation of the potential to develop soil strength maps using a cone penetrometer. *ASAE Paper No. 99-3109*. St. Joseph, MI, USA.
- Dexter, A. R., E. A. Czyz, and O. P. Gate. 2007. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil Tillage Res.* 93: 412-419.
- Glancey, J. L., S. K. Upadhyaya, W. J. Chancellor, and J. W. Rumsey. 1989. An instrumented chisel for the study of soil tillage dynamics. *Soil Tillage Res.* 14: 1-24.
- Khalilian, A., Y. J. Han, R. B. Dodd, M. J. Sullivan, S. Gorucu, and M. Keskin. 2002. A control system for variable depth tillage. *ASAE Paper No. 021209*. St. Joseph, MI, USA.
- Laffita-Leyva, A., E. Ramos-Carbajal, A. García de la Figal-Costales, P. A. Valdés-Hernández y R. Torres Cepero. 2012. Diseño, construcción y calibración de un transductor de fuerza tipo S. *Rev. Cienc. Téc. Agropec.* 21: 11-16.
- Paz G, A., S. R. Vieira, and M. T. Taboada C. 2000. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma* 97: 273-292.
- Pérez R., M., J. Carballido, J. Agüera, and J. A. Gil. 2011. Assessing GNSS correction signals for assisted guidance systems in agricultural vehicles. *Precis. Agric.* 12: 639-652.
- Price, R. R. 2002. Development of a dynamic cone penetrometer for research and private use. *ASAE Paper No. 021048*. St. Joseph, MI, USA.
- Raper, R. L., B. H. Washington, and J. D. Jarrell. 1999. A tractor-mounted multipleprobe soil cone penetrometer. *Appl. Eng. Agric.* 15: 287-290.
- Raper, R. L., E. B. Schwab, K. S. Balkcom, C. H. Burmester, and D. W. Reeves. 2005a. Effect of annual, biennial, and triennial in-row subsoiling on soil compaction and cotton yield in southeastern U.S. silt loam soils. *Appl. Eng. Agric.* 21: 337-343.
- Raper, R. L., E. B. Schwab, and S. M. Dabney. 2005b. Measurement and variation of site-specific hardpans for silty upland soils in the Southeastern United States. *Soil Tillage Res.* 84: 7-17.
- Sakurai, H. 1996. An application of strain gages to the agricultural machinery. Edit. Farm machinery section. Second Training Division. Tsukuba International Center (TBIC). Japan International Cooperation Agency (JICA). Japan
- Silva, A. P. and B. D. Kay. 1996. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant Soil* 184: 323-329.
- Sirjacobs, D., B. Hanquet, F. Lebeau, and M. F. Destain. 2002. On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture. *Soil Tillage Res.* 64: 231-242.
- Sun Y., D. Ma, P. Schulze, O. Schmittmann, and M. Rose. 2006. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. *Soil Tillage Res.* 86: 209-217.
- Taylor, H. M. and H. R. Gardner. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Sci.* 96: 153-156.
- Upadhyaya, S. K., U. A. Rosa, M. Ehsani, M. Koller, M. Josiah, and T. Shikanai. 1999. Precision farming in a tomato production system. Paper No. 99-1147. St. Joseph, MI, USA.

Warrick, A. and D. Nielsen. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. pp. 319-44. *In*: D. Hillel (ed.). Applications of soil physics. Academic Press. New York, NY, USA.

Wilson, J. N. 2000. Guidance of agricultural vehicles- a historical perspective. *Comput. Electron. Agric.* 25: 3-9.

Zhang, N., M. Wang, and N. Wang. 2002. Precision agriculture – a world overview. *Comput. Electron. Agric.* 36: 113-132.