

RIEGO Y DRENAJE

ARTÍCULO ORIGINAL

Operación del pivote central evaluando la dinámica de humedad en el suelo con TRD

Operation of the Central Pivot Evaluating the Dynamics of Humidity in the Soil with TRD

Dr.C. Maiquel López-Silva¹, Dr.C. Dayma Carmenates-Hernández¹, Dr.C. Albi Mujica-Cervantes¹,
Dr.C. Pedro Paneque-Rondón

¹ Universidad de Ciego de Ávila (UNICA), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Ciego de Ávila, Cuba.

^{II} Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba.

RESUMEN. En el trabajo se presenta el estudio de la operación del sistema de riego de pivote central para el cultivo del maíz sobre el suelo Ferralítico Rojo Típico, mediante el análisis de las precipitaciones y el contenido volumétrico de humedad en el suelo, obtenidos con el Pluviómetro Digital Portátil TPJ-32 y el uso de una sonda TDR portátil que aplica la técnica de Reflectometría de Dominio Temporal (Time Domain Reflectometry). Se tomaron las lecturas del contenido volumétrico de humedad en el suelo en 192 puntos distribuidos uniformemente en cada ensayo a diferentes profundidades de 20 cm, 30 cm, y 40 cm. Los resultados obtenidos muestran que la utilización de la sonda TDR es un método rápido y eficaz, que permitió evaluar el comportamiento del contenido volumétrico de humedad en el suelo entre el límite superior y límite inferior de la reserva fácilmente utilizable para el cultivo. Se logró un aumento del 15% de los rendimientos del cultivo con el ajuste del intervalo de riego de cuatro y cinco días y una disminución del volumen de agua a aplicar en 31,13% y de la energía eléctrica consumida para el riego en 25%.

Palabras clave: agua, energía, reflectometría de dominio temporal.

ABSTRACT. This work presents the study of the operation of the central pivot irrigation system for the cultivation of corn over the typical Red Ferralitic soil by analyzing the precipitations and the volumetric content of soil moisture obtained with the Digital Rain Gauge Portable TPJ-32 and the use of a portable TDR probe that applies the technique of Time Domain Reflectometry. The volumetric soil moisture content readings were taken at 192 points uniformly distributed in each test at different depths of 20 cm, 30 cm, and 40 cm. The results obtained show that the use of the TDR probe is a fast and efficient method that allowed to evaluate the behavior of the volumetric content of soil moisture between the upper limit and lower limit of the reserve easily usable for the crop. A 15% increase in crop yields was achieved by adjusting the irrigation interval of four and five days and a reduction of the volume of water to be applied in 31.13% and of the electric energy consumed for irrigation in 25%.

Keywords: water, energy, time domain reflectometry.

INTRODUCCIÓN

La demanda creciente por el recurso hídrico en el sector de la agricultura acentúa la necesidad de su manejo cada vez más racional, de modo que permita asegurar el equilibrio del medio ambiente. Por lo que, la operación adecuada de los sistemas de riego es suministrar agua de forma óptima al cultivo, en el momento apropiado y la cantidad suficiente para satisfacer

sus necesidades hídricas, con el objetivo de maximizar la productividad del cultivo y minimizar el uso del agua (Mantovani *et al.*, 2012).

El desarrollo de mejores prácticas del manejo del riego, requiere gran conocimiento de la dinámica del agua en el suelo (Canone *et al.*, 2017) por ello, es necesario conocer con precisión

los aportes de agua de lluvia y las variaciones de las reservas de agua en la zona radicular del cultivo (Sifuentes *et al.*, 2016).

Desde hace dos décadas, la metodología indirecta es la más utilizada y divulgada para medir de manera rápida y precisa el contenido volumétrico del agua en el suelo, como la Time Domain Reflectometry (TDR) (Stander *et al.*, 2013) que supera los métodos directos. Sin embargo, Kargas y Soulis (2012), y Naranjo y Ataroff (2015), recomiendan la calibración del instrumento a pesar de la calibración que el fabricante proporciona según el tipo de suelo.

Son diversos los estudios realizados que analizan la humedad del suelo empleando sondas TDR para el manejo del agua en el riego (Jung *et al.*, 2013; Flores-Medina *et al.*, 2015; Largaespada y Henríquez, 2015; Soulis y Elmaloglou, 2016) lo que ha permitido ajustar las frecuencias de riego y el coeficiente de cultivo para las condiciones edafoclimáticas, lo que repercute en un uso racional de los recursos hídricos y energéticos. En tal sentido, el objetivo de este trabajo es operar el sistema de riego de pivote central para el cultivo de maíz, a partir de la evaluación de la dinámica de humedad en el suelo, con una sonda TDR portátil.

MÉTODOS

La investigación se desarrolló en la granja “La Legua” de la Empresa Agropecuaria CUBASOY en la provincia de Ciego de Ávila desde el mes de mayo hasta agosto en los años 2013 al 2015. El sistema de riego de pivote central dotado del emisor Rotator ocupa un área de 63,58 ha, con caudal de 78 L s⁻¹ y presión en el pivote de 400 kPa. El relieve es predominantemente llano, con pendiente promedio de 0,1%.

En el área de objeto de estudio predomina el suelo Ferralítico Rojo Típico y sus propiedades hidrofísicas muestran en la Tabla 1, para una profundidad hasta 60 cm.

TABLA 1. Propiedades hidrofísicas del suelo Ferralítico Rojo Típico, provincia Ciego de Ávila (López, 2015)

Perfil (cm)	ρ (g·cm ⁻³)	ρ_s (g·cm ⁻³)	θ_{ini} (cm ³ ·cm ⁻³)	θ_{cc} (cm ³ ·cm ⁻³)
0-20	1,29	2,60	0,36	0,37
20-40	1,30	2,63	0,35	0,39
40-60	1,31	2,66	0,36	0,38

Nota: ρ - la densidad aparente, ρ_s - la densidad real, θ_{ini} - el límite inicial superior de la reserva fácilmente utilizable, θ_{cc} - el límite superior de la reserva fácilmente utilizable.

La operación del sistema de riego de pivote central se realizó mediante el seguimiento de la dinámica de humedad en el suelo, entre el límite superior de la reserva fácilmente utilizable y el límite inferior de la reserva fácilmente utilizable. Se tomó el 85% del límite superior, porque según González-Robaina *et al.* (2014), este valor propicia en el maíz los máximos rendimientos del cultivo.

Se determinaron la humedad en el suelo antes y después del riego, mediante la toma de lecturas del contenido volumétrico de humedad en el suelo, con la sonda FieldScout TDR 300, modelo 6430FS, con precisión de $\pm 3\%$ (Figura 1). Las precipitaciones se tomaron de las lecturas del Pluviómetro Digital Portátil

TPJ-32 (Figura 2) con diámetro de 200 mm y precisión de $\pm 0,4$ mm y se calculó la precipitación efectiva según las láminas de agua que se almacenaron en cada capa del perfil después de la precipitación.



FIGURA 1. Toma de lecturas con el TDR 300.



FIGURA 2. Pluviómetro Digital Portátil TPJ-32.

La sonda TDR-300 fue previamente calibrada por el método gravimétrico con respecto al tipo de suelo según Spectrum Technologies (2013). Se tomaron 31 lecturas el TDR-300 por cada perfil de 20 cm, 30 cm, y 40 cm mediante el empleo de la propia ecuación del fabricante del equipo y amplio rango de humedad. Paralelamente se tomaron el mismo número de muestras de suelo con barrena para la determinación gravimétrica y transformada a humedad volumétrica mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_v = \theta_g \left(\frac{\rho}{\rho_w} \right) \quad (1)$$

donde

θ_v - contenido volumétrico de humedad en el suelo

($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);

θ_g - contenido gravimétrico de humedad en el suelo (% en peso);

ρ_w - densidad del agua ($1,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) y ρ la densidad aparente ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

Los valores emitidos por el TDR-300 y los obtenidos a través del método gravimétrico que transformados a contenido volumétrico de humedad en suelo, fueron representados en un diagrama de dispersión como puntos de coordenadas (x, y) respecto a dos ejes perpendiculares entre sí, señalando en ellos una línea de tendencia en función lineal o cuadrática (Quichimbo Cita). Luego se aplicó el análisis de correlación y se determinó la ecuación para la predicción de los valores de humedad volumétrica, a partir de los valores emitidos por el TDR-300

La toma de lecturas del contenido volumétrico de humedad en el suelo se realizó en 192 puntos distribuidos uniformemente en cada ensayo a profundidades de 20 cm, 30 cm, y 40 cm que se corresponde con el desarrollo radicular del cultivo del maíz (Herrera *et al.*, 2013). El área de riego se dividió en 4 sectores y el lateral del pivote se fraccionó en 4 partes iguales que representan cada uno el 25% del área a 225 m, 93 m, 72 m y 61 m (figura 3) producto a que cada metro de lateral tiene que regar mayor superficie en el mismo tiempo.

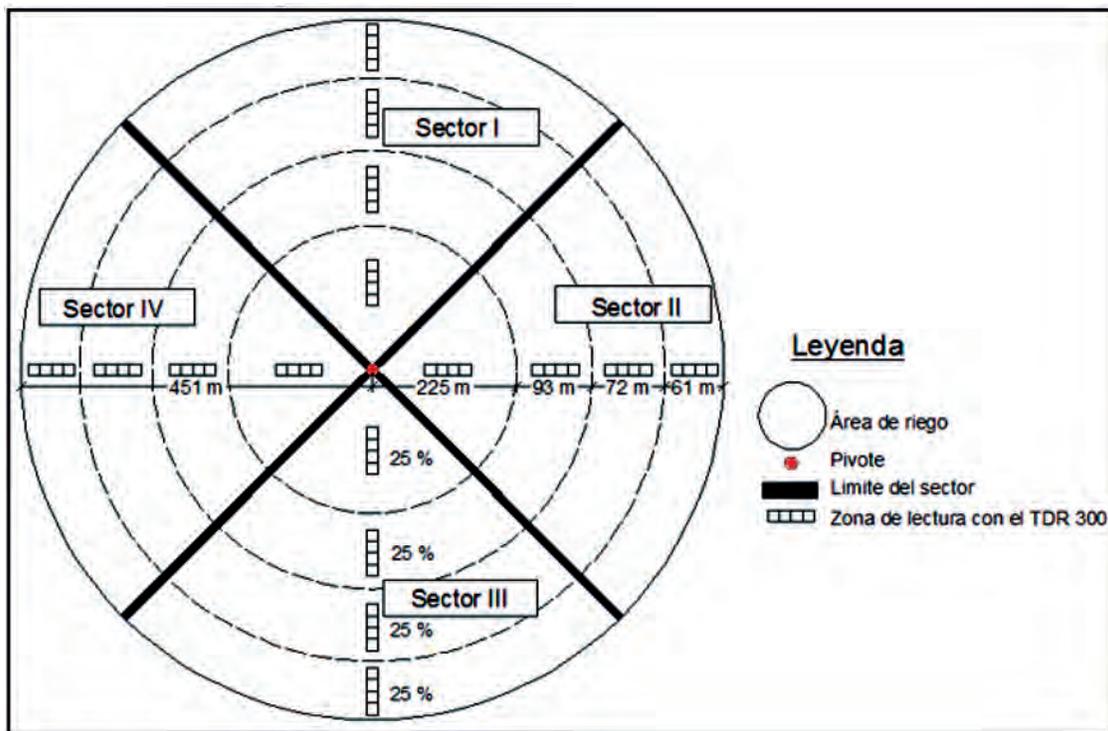


FIGURA 3. Esquema de la toma de lectura con el TDR-300.

En cada tramo del lateral fraccionado se tomaron cuatro lecturas para cada longitud de la barrilla del TDR-300, realizando este proceso durante tres días a la semana para cada etapa inicial, desarrollo, mediados de temporada y final de temporada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se ilustra la relación entre el contenido volumétrico de humedad calculado y medido con el TDR-300. Se

observa que los análisis de regresión permitieron comprobar la existencia de una estrecha relación entre las medidas suministradas por el TDR-300 y los valores de humedad obtenidos en las muestras de suelo ($R^2=0,94$; $R^2=0,93$; $R^2=0,96$ para las profundidades de 20, 30 y 40 cm). La ecuación matemática entre ambas mediciones resultó lineal y en general los valores obtenidos con el TDR-300 a partir de la calibración del fabricante resultaron superiores a los valores de humedad volumétrica.

TABLA 2. Relación entre el contenido volumétrico de humedad calculado y medido con el TDR-300

Profundidad (cm)	Ecuación	R ²
20	$\theta_v = 0,914 \cdot TDR + 2,685$	0,94
30	$\theta_v = 0,950 \cdot TDR + 1,673$	0,93
40	$\theta_v = 0,963 \cdot TDR + 0,961$	0,96

En las Figuras 4, 5 y 6 se muestran los resultados de la dinámica de la humedad en suelo mediante la toma de lecturas del TDR-300 operando el pivote central en el cultivo de maíz.

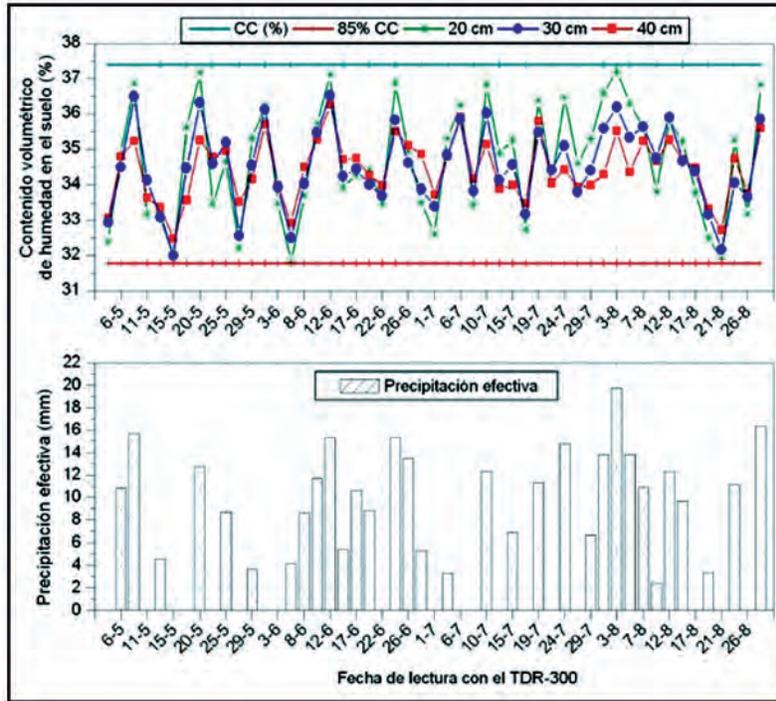


FIGURA 4. Dinámica de la humedad en suelo operando el pivote central en el año 2013.

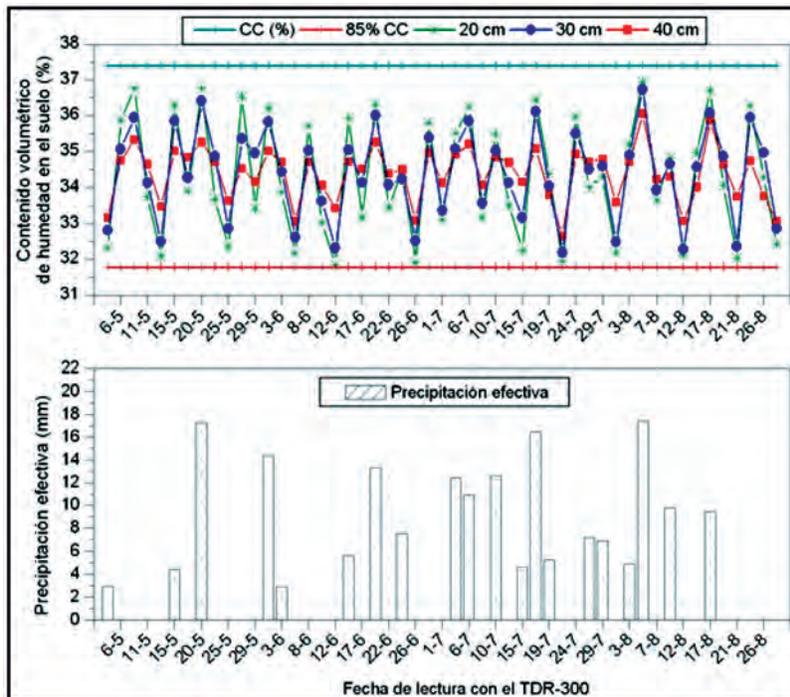


FIGURA 5. Dinámica de la humedad en suelo operando el pivote central en el año 2014.

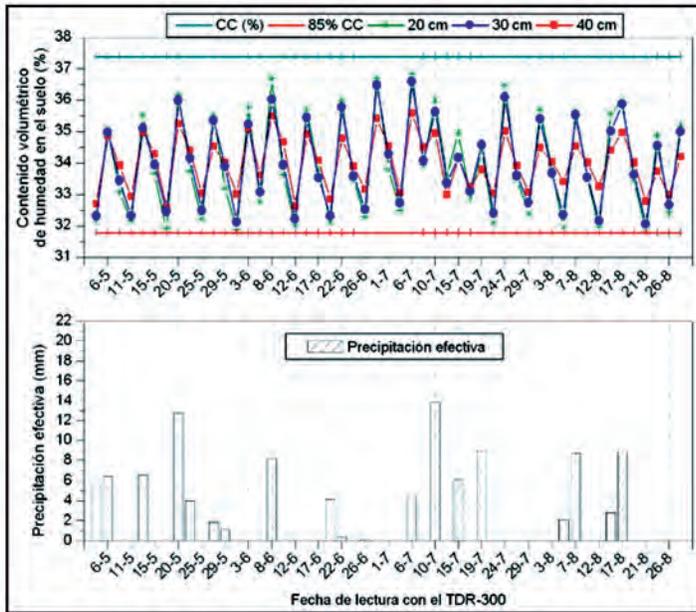


FIGURA 6. Dinámica de la humedad en suelo operando el pivote central en el año 2015.

Se observa en las Figuras 4, 5 y 6 como la operación del pivote central en función de la dinámica de humedad en el suelo obtenida por medio del TDR-300, el contenido volumétrico de humedad en el suelo se mantuvo entre el límite superior de la reserva fácilmente utilizable y el límite inferior de la reserva fácilmente utilizable.

En las Figuras 5 y 6 se puede observar que el contenido volumétrico de humedad en el suelo los primeros 20 cm estuvo más cercano al límite inferior de la reserva fácilmente utilizable, debido a las condiciones meteorológicas que provocó una disminución de las precipitaciones y genera menor la lámina de agua almacenada en la primera capa, porque influye más el proceso de evaporación.

La precipitación efectiva incrementó el contenido volumétrico de humedad en el suelo, lo que permitió suplir el 47,47%, 29,16% y el 16,75% de la lámina bruta durante los años 2013, 2014 y 2015 respectivamente, que originó menor número de riego y ajuste del intervalo de riego de 4 y 5 días.

En la Figura 7 se muestran los mapas de isóneas del contenido volumétrico de humedad en el suelo para los años en estudio. Se observa que la humedad en el suelo en todas las fases del cultivo del maíz se comportó entre 32 y el 36%, favorable para la obtención del rendimiento máximo según las necesidades hídricas para cada etapa. Factor que influyó para obtener un aumento del rendimiento de 15% con respecto a 12 pivotes centrales cercanos al área de estudio, siendo el año 2013 el más significativo, porque mantuvo un óptimo contenido volumétrico de humedad en el suelo superior a los 34,5%.

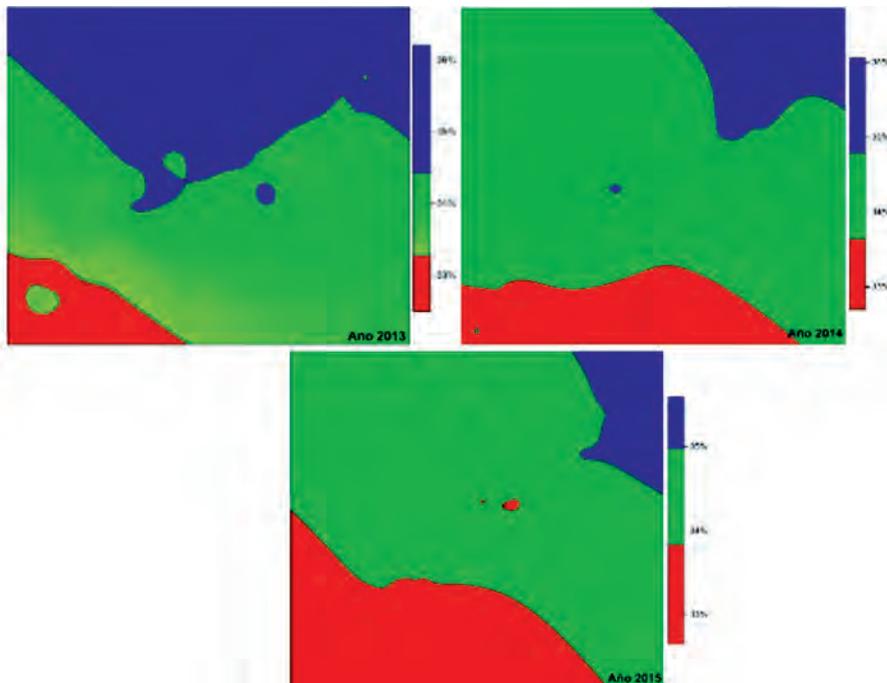


FIGURA 7. Mapas de isóneas del contenido volumétrico de humedad en el suelo.

Se puede concluir que la operación del sistema de riego de pivote central en función de la dinámica de humedad en el suelo obtenida por el TDR-300 posibilitó una disminución del volumen de agua en 31,13% y la energía eléctrica consumida para el riego en 25% en los años 2013, 2014 y 2015. Los resultados anteriormente mencionados concuerdan con los obtenidos por Rodríguez-Díaz *et al.* (2011), que alcanzaron una reducción del volumen del agua y energía eléctrica en los sistemas de riego de pivote central entre el 15 al 30 %.

CONCLUSIONES

- El uso de la sonda TDR-300 mostró ser un método eficaz que permitió obtener de forma rápida y eficiente las lecturas del contenido volumétrico de humedad en el suelo para operar el pivote central con una lámina de agua que se mantuviera entre el límite superior y el límite inferior de la reserva fácilmente utilizable.
- La operación del pivote central en función de la humedad en el suelo tomada con la sonda TDR-300 permitió disminuir el consumo de agua y energía eléctrica y un aumento de los rendimientos del cultivo de maíz.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CANONE, D.; PREVIATI, M.; FERRARIS, S.: "Evaluation of Stemflow Effects on the Spatial Distribution of Soil Moisture Using TDR Monitoring and an Infiltration Model", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(1): 04016075, 2017, ISSN: 0733-9437, 1943-4774, DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001120.
- FLORES-MEDINA, M.; FLORES-GARCÍA, F.; VELASCO-MARTÍNEZ, V.; GONZÁLEZ-CERVANTES, G.; JURADO-ZAMARRIPA, F.: "Monitoreo de humedad en suelo a través de red inalámbrica de sensores", *Tecnología y ciencias del agua*, 6(5): 75-88, 2015, ISSN: 2007-2422.
- GONZÁLEZ-ROBAINA, F.; HERRERA-PUEBLA, J.; LÓPEZ-SEIJAS, T.; CID-LAZO, G.: "Productividad del agua en algunos cultivos agrícolas en Cuba", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(4): 21-27, 2014, ISSN: 2071-0054.
- HERRERA, P.J.; GARCÍA, L.A.; CUM, G.R.; RODRÍGUEZ, G.M.; PUJOL, O.R.; CID, L.G.; CISNEROS, Z.E.; ALEMÁN, G.C.; ROQUE, R.R.: *Uso eficiente de sistemas de riego. Manual práctico sobre el riego de los cultivos*, Ed. Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, 1.ª ed., La Habana, Cuba, 123 p., 2013, ISBN: 978-959-285-021-7.
- JUNG, S.; DRNEVICH, V.P.; ABOU NAJM, M.R.: "New Methodology for Density and Water Content by Time Domain Reflectometry", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(5): 659-670, 2013, ISSN: 1090-0241, 1943-5606, DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000783.
- KARGAS, G.; SOULIS, K.X.: "Performance Analysis and Calibration of a New Low-Cost Capacitance Soil Moisture Sensor", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(7): 632-641, 2012, ISSN: 0733-9437, 1943-4774, DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000449.
- LARGAESPADA, K.; HENRÍQUEZ, C.: "Distribución espacial de la humedad y su relación con la textura en un suelo", *Agronomía Costarricense*, 39(3): 137-147, 2015, ISSN: 2215-2202.
- LÓPEZ, S.M.: *Modelación matemática para el diseño hidráulico y manejo de los sistemas de riego de pivote central en la Empresa Agropecuaria CUBASOY de la provincia de Ciego de Ávila*, Universidad de Ciego de Ávila, Tesis de Doctorado, Ciego de Ávila, Cuba, 94 p., 2015.
- MANTOVANI, C.E.; BERNARDO, S.; PALERETTI: *Irrigação. Princípios e métodos*, Ed. UFV, 3.ª ed., Brasil, 2012, ISBN: 978-85-7269-373-8.
- NARANJO, M.E.; ATAROFF, M.: "Calibración de equipos TDR para su uso en suelos no disturbados", *Interciencia*, 40(6): 416-422, 2015, ISSN: 0378-1844.
- RODRÍGUEZ-DÍAZ, J.A.; CAMACHO-POYATO, E.; BLANCO-PÉREZ, M.: "Evaluation of Water and Energy Use in Pressurized Irrigation Networks in Southern Spain", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(10): 644-650, 2011, ISSN: 0733-9437, 1943-4774, DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000338.
- SIFUENTES, I.E.; MACÍAS, C.J.; GONZÁLEZ, H.F.; FLORES, G.H.; BORBÓN, G.A.; PRECIADO, R.P.: "Metodología sistematizada con TDR portátiles, para el manejo eficiente del agua en maíz en Sinaloa. Chapingo", En: *Memorias del II Congreso Nacional De Riego Y Drenaje COMEII*, México, pp. 1-9, 2016.
- SOULIS, K.X.; ELMALOGLOU, S.: "Optimum Soil Water Content Sensors Placement in Drip Irrigation Scheduling Systems: Concept of Time Stable Representative Positions", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(11): 04016054, 2016, ISSN: 0733-9437, 1943-4774, DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001093.
- SPECTRUM TECHNOLOGIES: *Manual de usuario. Fieldsout medidor de humedad de suelo TDR 300, [en línea]*, Monterrey, México, 2-16 p., 2013, Disponible en: <http://www.kosmos.com.mx/>, [Consulta: 18 de mayo de 2015].
- STANDER, E.K.; ROWE, A.A.; BORST, M.; O'CONNOR, T.P.: "Novel Use of Time Domain Reflectometry in Infiltration-Based Low Impact Development Practices", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(8): 625-634, agosto de 2013, ISSN: 0733-9437, 1943-4774, DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000595.

Recibido: 13/11/2016.

Aprobado: 17/05/2017.

Maiquel López-Silva, Prof. e Inv., Universidad de Ciego de Ávila (UNICA), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Ciego de Ávila, Cuba, Correo Electrónico: maiquel@unica.cu

Dayma Carmenates-Hernández, Correo Electrónico: daymas@unica.cu

Albi Mujica-Cervantes, Correo Electrónico: albis@unica.cu

Pedro Paneque-Rondón, Correo Electrónico: paneque@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.