

**UNA APROXIMACIÓN A LA REFLECTOMETRÍA DE DOMINIO TEMPORAL PARA
LA MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DE UN SUELO FERRALÍTICO ROJO
APPROACH TO THE TIME DOMAIN REFLECTOMETRÍA FOR WATER CONTENT
MEASUREMENT OF RED FERRALITIC SOIL**

Autores: Santiago Cabrera Moreira

Claudio Pérez Olmo

Kirenia Raquel Rodríguez Valle

Néstor Concepción Bonachea

Yosvany Palmero Venegas

Institución: Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez

Correo electrónico: santiagoc@unica.cu

RESUMEN

En el trabajo se hace un análisis crítico acerca de la idoneidad del modelo desarrollado por Topp et al. (1980), que es el más utilizado en la técnica de Reflectometría de Dominio Temporal (TDR por sus siglas en inglés) y el uso de este equipamiento en suelos ferralíticos rojos de la provincia de Ciego de Ávila. Para ello se confrontaron resultados de medición de permitividad dieléctrica y contenidos de humedad obtenidos mediante el modelo de Topp, gravimetría y un equipo TDR. Se concluye que los valores de humedad reportados por el equipo TDR, cuyo funcionamiento está basado en el modelo universal de Topp, en general, son imprecisos respecto a los obtenidos por gravimetría. Se sugiere, para la explotación confiable de estos novedosos equipos, la obtención de curvas de calibración que relacionen los valores de humedad dados por ellos y los reportados por el método gravimétrico.

Palabras clave: Modelo de Topp, Técnica TDR, Método Gravimétrico, Curvas de Calibración.

ABSTRACT

In the work a critical analysis about the suitability of the model developed by Topp et al. (1980) is made. This model is the more used in the equipment of Time Domain Reflectometry (TDR) for the soil water content measurement. In this work

measurement results of dielectric permittivity and soil moisture obtained by means of Topp model, gravimetry and a TDR-technique were confronted. This study showed that the values of soil moisture content reported by the TDR-technique are imprecise regarding those obtained by gravimetric method. It is suggested, for the reliable exploitation of these technique, the obtaining of calibration curves that relate the values of soil moisture given by TDR and those reported by gravimetric method.

Keywords: Topp Model, TDR-Technique, Gravimetric Method, Calibration Curves.

INTRODUCCIÓN

La Reflectometría de Dominio Temporal (TDR por sus siglas en inglés) fue introducida por Fellner-Feldegg (1969) para la medición de las propiedades dieléctricas de los líquidos y después de las propiedades dieléctricas de varios materiales, entre ellos, el suelo.

A partir de los trabajos de Topp et al. (1980), la TDR aplicada a los suelos comenzó a ser considerada muy promisoría. Es una técnica indirecta, rápida y no destructiva para estimar el contenido de humedad basada en su relación directa con la permitividad dieléctrica relativa del suelo. Sin embargo, su aplicabilidad en suelos específicos ha sido cuestionada en varias investigaciones (Bravo-Espinosa et al., 2009; Miyamoto y Shikuchi, 2000) dado que este tipo de equipamiento utiliza modelos matemáticos de relación humedad-permitividad dieléctrica del suelo que privilegian el papel del contenido de agua en el sistema. Es por ello que algunos autores han profundizado en el estudio de la influencia sobre la permitividad dieléctrica de propiedades del suelo tales como su porosidad, densidad, superficie específica, etc. (Beliaev, 2008; Sudakova, 2007; Malicki et al., 1996).

En Cuba la Reflectometría dieléctrica fue introducida recientemente en distintos campos de investigación y la tecnología (García, 2014). En el caso de la medición de la humedad del suelo, es conocido que equipos TDR han sido utilizados y se utilizan con este fin en la producción e investigaciones (López, 2015; Cabrera, 2015). Sin embargo, no han sido publicados trabajos acerca de su efectividad real en suelos cubanos.

El objetivo de esta investigación es valorar la factibilidad del uso de la técnica de Reflectometría de Dominio Temporal en suelos ferralíticos rojos de la provincia Ciego de Ávila mediante la comparación de los valores de humedad dados por el

modelo universal de Topp et al. (1980) y el equipo TDR modelo TNH-5D con los obtenidos por el método gravimétrico

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se utilizó un equipo TDR modelo TNH-5D, de procedencia china. Fueron investigados suelos ferralíticos rojos (SFR) bajo bosque y frutales (guayaba) pertenecientes a la Empresa Citrícola de Ceballos, provincia Ciego de Ávila.

Las mediciones de humedad en el campo, con el equipo TDR y con aplicación del método gravimétrico, se realizaron simultáneamente a partir de la saturación del suelo en condiciones naturales y días apropiados hasta valores cercanos al punto de marchitez. La recolección de muestras para la determinación gravimétrica se realizó manualmente con una barrena helicoidal. La densidad del suelo se determinó *in situ*, mediante el método de los cilindros en tanto el método picnométrico fue aplicado en el cálculo de la densidad de la fase sólida siguiendo la metodología de Vadiunina y Korcháguina (1986). A partir de estas densidades, se calculó la porosidad total del suelo. La fracción mecánica menor de 0,02 mm se obtuvo por el método de Bouyoucos modificado, usando pirofosfato para la eliminación de los microagregados y NaOH como dispersante.

Con ayuda del medidor LCR modelo XJ2811C, procedencia china, se obtuvieron los valores de la permitividad dieléctrica relativa ε (constante dieléctrica) del SFR y su contenido de humedad θ por el método gravimétrico. Con estos valores se obtuvo el modelo empírico que relacionan estos parámetros para el SFR en estudio con ayuda del programa Excel 2003.

Por otra parte, los valores de permitividad dieléctrica relativa ε obtenidos posibilitaron calcular los contenidos de humedad volumétrica del suelo θ correspondientes predichos por el modelo de Topp et al., (1980):

$$\theta_T = 4,3 \cdot 10^{-6} \varepsilon^3 - 5,5 \cdot 10^{-4} \varepsilon^2 + 2,9 \cdot 10^{-2} \varepsilon - 5,3 \cdot 10^{-2} \quad (1)$$

De este modo se obtuvo el gráfico comparativo de humedad volumétrica por gravimetría (θ_g) vs humedad predicha por Topp (θ_T), Para estas dos series de valores se calculó el coeficiente de desigualdad (CD) mediante la expresión:

$$CD = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_1^n (\theta_g - \theta_T)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{1}{n} \sum_1^n (\theta_g)_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{1}{n} \sum_1^n (\theta_T)_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

Este parámetro mide la desviación entre las tendencias de los valores observados θ_g y los predichos θ_T (Bravo-Espinosa et al., 2009) y su valor oscila entre 0 y 1. A medida que el CD se acerca a 0, el ajuste de la dependencia estudiada es perfecto en tanto que su alejamiento de este valor implica que no tiene valor predictivo.

Para valorar la efectividad del equipo TDR a distintas profundidades del SFR, se obtuvieron tres perfiles comparativos de humedad hasta profundidades de 0,60 m con el equipo y el método gravimétrico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades de los suelos investigados

En la tabla 1 se muestran algunas de las propiedades físicas de los suelos mencionados.

Prof. (m)	Densidad, (Mg/m ³)	Densidad fase sólida (Mg/m ³)	Porosidad Total (%)	Fracciones <0,02 mm, %
Campo I (guayaba)				
0,00-0,05	0,97	2,62	62	67,04
0,10-0,20	1,01	2,69	62	63,04
0,22-0,40	1,08	2,71	60	84,04
0,41-0,60	1,06	2,78	61	85,04
Campo II (bosque)				
0,00-0,7,	0,95	2,61	63	62,04
0,10-0,18	1,02	2,70	62	64,04
0,21-0,38	1,06	2,76	61	71,04
0,40-0,60	1,04	2,78	62	76,25

Tabla 1: Propiedades físicas de los suelos investigados.

La densidad de ambos suelos es menor de 1 Mg/m³, y se mantiene relativamente baja hasta la profundidad de 60 cm. Con valores típicos de densidad de la fase

sólida a través de todo el perfil analizado, el volumen total de poros es alto y propio de suelos arcillosos con un alto contenido de la fracción mecánica menor de 0,02 mm. En resumen, los valores que caracterizan estas propiedades físicas son típicos para SFR bajo acción antrópica de cierta intensidad.

Relación empírica humedad volumétrica vs permitividad dieléctrica relativa del suelo. La figura 1 muestra la dependencia de la contenido de humedad volumétrica θ del suelo de su permitividad dieléctrica relativa ϵ .

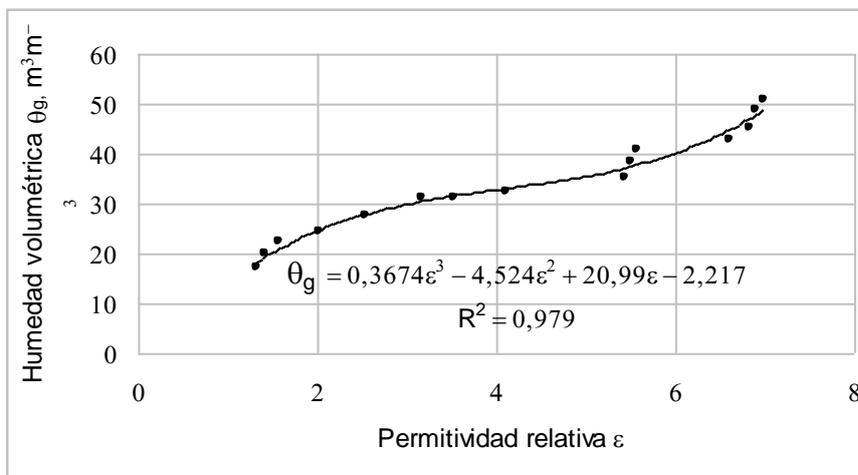


Fig. 1: Comportamiento de la humedad volumétrica del suelo θ en función de la permitividad dieléctrica relativa ϵ .

Ella muestra que existe una relación directa entre la humedad volumétrica del SFR y la permitividad dieléctrica relativa, dependencia descrita por un polinomio de tercer grado con un alto coeficiente de determinación. Obsérvese que, aunque el tipo de polinomio es el mismo, los parámetros que lo caracterizan difieren del modelo (1) desarrollado por Topp et al. (1980).

Según este autor, el contenido de humedad es el factor determinante del valor de la permitividad dieléctrica del suelo. Otros factores como la temperatura, el tipo de suelo, la densidad de la muestra y contenido de sales tienen un efecto insignificante. Trabajos más recientes (Sudakova, 2007; Beliaev, 2003) confirman la dependencia de ϵ de la humedad del suelo aunque no son determinantes respecto al rol de otros factores. Malicki et al. (1996) y Perdok et al. (1996) concluyeron que una función que no incorpore en su estructura el efecto de la porosidad, densidad aparente o la superficie específica, producirá errores significativos en la estimación dieléctrica

del contenido de humedad, en particular en suelos de textura franca o arcillosa. Por su parte, García y Santo-Bacchi (2001), durante el estudio de varios tipos de suelos brasileños, concluyeron que el uso de un modelo único general, ajustado con datos de diferentes suelos, compromete la precisión de las determinaciones cuando es aplicado a un suelo específico.

De modo general, la mayoría de los autores consultados coincide en la necesidad del uso de modelos empíricos específicos para la dependencia $\theta = f(\varepsilon)$ dada la complejidad del sistema suelo y la relación estrecha existente entre sus propiedades.

Gráfico comparativo de humedades volumétricas del suelo.

La figura 2 muestra los valores de humedad del suelo predicha por el modelo de Topp en relación con la humedad medida por el método gravimétrico.

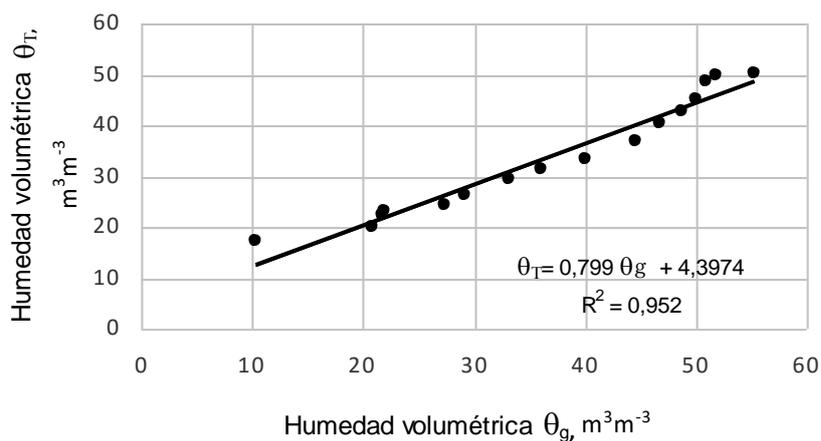


Fig.2: Comportamiento de la humedad predicha por modelo de Topp relacionada con la humedad gravimétrica.

Como se observa, existe una relación lineal entre la humedad del SFR obtenidos por ambos métodos con un buen ajuste de acuerdo al valor del coeficiente de determinación reportado. Sin embargo, el valor de la pendiente de la recta (0,799) resulta algo alejada de la unidad lo que puede estar motivado por imprecisiones del modelo utilizado para la determinación de la humedad del suelo. En este sentido apunta también el valor significativo obtenido para el coeficiente de desigualdad CD, calculado según (Bravo, 2002). Su valor es 0,307 y no tiende a cero como debería esperarse para un modelo preciso.

Perfiles de humedad.

Es conocido que la mayoría de los equipos TDR para la determinación de la humedad del suelo utiliza el modelo polinómico de tercer grado propuesto por Topp et al., (1980). Algunos de ellos, como el equipo estudiado, hacen la salvedad entre suelos francos y arcillosos y aplican modelos generalizados diferentes para cada uno de ellos. En este caso, el productor no aclara que modelo teórico emplea por lo que se supone que es utilizado el modelo universal de Topp (1).

En los gráficos de la figura 3 se muestran 3 perfiles de humedad obtenidos en los SFR investigados con ayuda del método experimental (gravimétrico) y con el equipo TDR. Las muestras fueron tomadas hasta una profundidad de 0,5 m, espesor de suelo donde crece y se desarrolla la mayor parte de las raíces de los cultivos. Queda claro que en todos los casos, los valores que reporta el TDR subestiman los valores reales de contenido de humedad del suelo con las consiguientes consecuencias que podría traer ello durante las aplicaciones prácticas de este parámetro.

La obtención y aplicación de funciones que permitan el cálculo preciso de la humedad de suelos específicos a partir de los valores reportados por la técnica TDR parece ser una necesidad que hace viable y confiable en la práctica esta novedosa técnica. Es por ello que varios autores abogan por la realización de estudios de calibración para generar funciones específicas a los tipos de suelo y condiciones de uso del equipo TDR (Bravo-Espinosa et.al., 2009; Jackson, 2004).

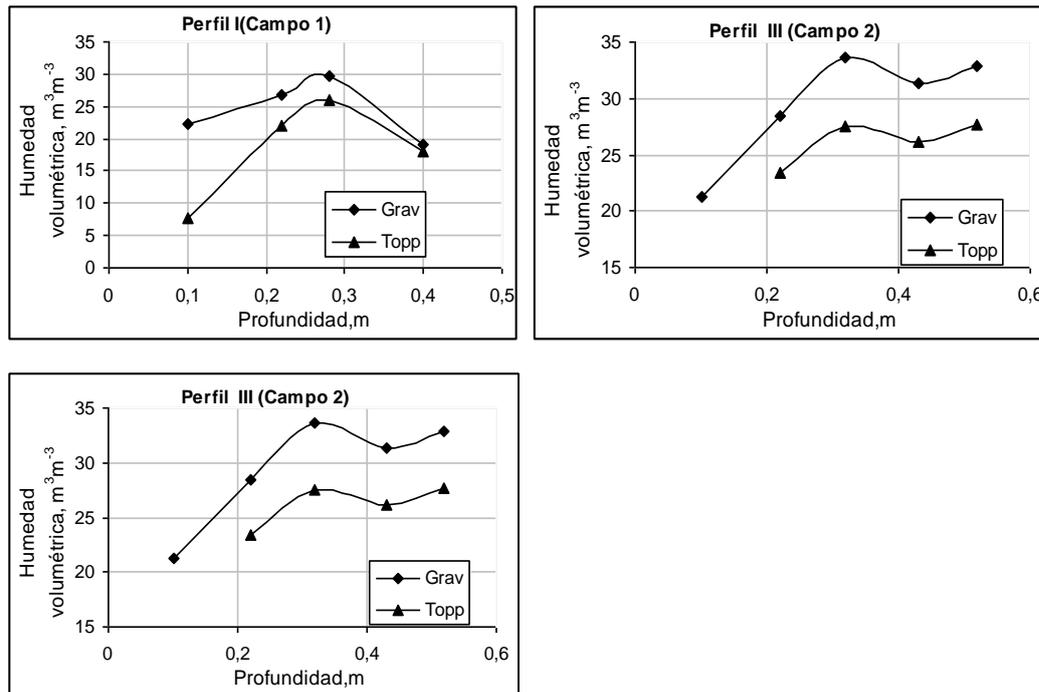


Fig. 3. Perfiles de humedad del suelo en los dos campos estudiados.

CONCLUSIONES

No hay convergencia definida entre los valores de humedad predichos por el modelo de Topp et al., (1980) y los obtenidos mediante gravimetría en los SFR investigados. Durante el análisis de los resultados obtenidos en la determinación del contenido de humedad de los SFR estudiados mediante la sonda TDR modelo TNHY-5D aparecen indicios de imprecisión que obligan a ser cautelosos con su uso práctico.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- BELIAEV, T.A.; BOBROV, V.N. Y MANDRIGUINA: «Zavisimost dielectricheskoj pronisaemosti sviazannoi vadoi at yiyó kalischestva», *Isliedobanue Zemlí at kosmosa*, pp. 28-34., No. 5, Mockva, 2003.
- BRAVO, E.M., SERRATO, B.B., FRAGOSO, T.L. Y MEDINA, D.L.: «Evaluación empírica de la Reflectometría de Dominio Temporal para estimar la humedad en dos suelos de origen volcánico», *Rev. Terra Latinoamericana*, Vol. 27, No.3, pp.171-176, C. México, 2009.
- CABRERA, M.S.; BROWN, M.O.; PÉREZ, O.C. Y RODRÍGUEZ, V.K.: «Método dieléctrico de determinación del contenido de humedad del suelo», *Rev. Universidad & Ciencia*, Vol. 4, No.1, pp.15-19, Ciego de Ávila, Cuba, 2015.

- GARCÍA, R.F.: «Magnetic treatment effects on sorption process of soybean seed», *Bioelectromagnetics*, pp. 56-61, Wiley InterScience, 2014.
- FELLNER FELDEGG, J.: «The measurement of dielectrics in the time domain», *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 73, pp. 616-623, Washington, 1969.
- LÓPEZ, S.M.: *Modelación matemática para el diseño hidráulico y manejo de los sistemas de riego de pivote central eléctrico en la Empresa Agropecuaria CUBASOY de la provincia Ciego de Ávila*, Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnica Agropecuarias, CEGIC, Universidad de Ciego de Ávila, 2015.
- MALICKI, M.A.; PLAGGE, M. Y ROTH, C.H.: "Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil". *Eur. J. Soil Sci* 47, pp.357-366, 1996
- MIYAMOTO, T.R. Y CHIKUSHI, J.: *Relation beteen soil water content and apparente dielectric constant evaluated by dielectric mixing models*, *Trans. Jpn. Irrigation, Drainajge Reclamation Eng.*, pp. 57-62, 2000.
- PERDOCK,U.D.; KOESBERGEN, B. Y HILHORST, A: «Influence of gravimetric watwr content ald bulk density on the dielectric properties of soil», *Eur. J. Soil Sci.* 47, 367-371, 1996.
- SUDAKOVA, M.S.: *Razrabotka:Primenienie metodiki dielectrichskij izmerienii s ispolzovaniem palievova geodarta v laboratornij uslovijaj*, Avtoreferat disertaksii na saiskanie uchonoi stepeni kandidata fisico-matematicheskij nauk. MGU. Moskvá, Rossía, 2007.
- GARCIA, T.J. Y OLIVEIRA, S.B.: «Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos», *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Vol. 36, No. 9, pp.23-29, 2001.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L. Y ANNAN, A.P.: «Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission», *Water Resour. Res.*, No.16, pp. 574-582, USA, 1980.
- VADIUNINA , A.F. Y KORCHAGUINA , Z.A.: *Mietodi isliedovanua fisicheskij sboistv pohcv*, 416 p, Izd. MIR Moskva, 1986.