

Evaluación de un equipo de reflectometría de dominio temporal (TDR) para registros de humedad en un suelo franco

Evaluation of an equipment of time domain reflectometry (TDR) for moisture registration in a loam soil

J. Murillo, R. Villafañe¹, C. Basso y A. Trujillo

Universidad Central de Venezuela

Resumen

La técnica de la reflectometría de dominio temporal (TDR) está siendo usada para registros de humedad en el suelo, pero la calibración del fabricante no necesariamente se ajusta a cada condición específica de suelo. Por eso se hace necesario evaluar el equipo en cada suelo donde se prevea su uso. En este estudio, se realizó una evaluación para un amplio rango de humedad, en un suelo franco fertirrigado, ubicado en el campo experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, comparando el contenido volumétrico de agua obtenida con TDR con el contenido de humedad determinado a partir de muestras de suelo tomadas a dos profundidades: 0-10 cm y 0-20 cm. Los análisis de correlación permitieron comprobar la existencia de una estrecha relación entre las medidas suministradas por el equipo y los valores de humedad obtenidos en las muestras de suelo ($r = 0,88$ y $0,95$ para las profundidades de 0-10 cm y 0-20 cm; respectivamente). Por otra parte, las ecuaciones de predicción de la regresión (R^2 ajustado = 77,6% y 90,5% para las profundidades consideradas) mostraron que las lecturas del equipo superan los valores obtenidos en las muestras de suelo; para la profundidad de 0-10 cm los porcentajes promedios entre las lecturas del equipo y las determinaciones en muestras variaron entre 140% y 148%, y para la profundidad de 0-20 cm entre 164% y 170%, corroborando la conveniencia de la calibración.

Palabras clave: Reflectometría de dominio temporal (TDR), contenido de humedad del suelo, calibración.

Abstract

The technique of time domain reflectometry (TDR) is being used to monitor soil water content, but manufacturer's calibration does not necessarily agree with each specific soil condition. Therefore, it is important to assess the probe in each soil where its use be planned. In this study, an evaluation was carried out for a wide range of moisture content, in a fertirrigated loam soil located at the experimental field at the School of Agronomy in Maracay, Venezuela, comparing the volumetric water content (VWC) obtained by TDR with the VWC determined in soil samples taken depth 10 cm and 20 cm below the soil surface. It was found a strong linear correlation between VWC measured in samples and VWC obtained by TDR probe ($r = 0.88$ for depth 10 cm and 0.95 for depth 20 cm; respectively). Otherwise, regression equations (R^2 adjusted = 77.6% for depth 10 cm and 90.5% for depth 20 cm) showed that TDR must overestimate soil water content; its lectures were higher (140-148% in top 10 cm and 164-170% in top 20 cm) than those were measured in soil samples, making it clear calibration is necessary.

Key words: Time Domain Reflectometry (TDR), soil water content, calibration.

Introducción

El reflectómetro de dominio temporal (TDR) ha demostrado ser un equipo confiable para medir el contenido volumétrico del agua del suelo (θ_v), porque se ha encontrado una buena relación entre θ_v y la constante dieléctrica aparente medida por el aparato (K_a), en un amplio rango de textura y porosidad del suelo (Jones *et al.*, 2002; Toop *et al.*, 1980). En las evaluaciones del mismo la relación empírica entre ambas variables resultó ser un polinomio de tercer grado, para valores de $\theta_v \leq 0,6$:

$$\theta_v = 5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} K_a - 5,5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4,3 \times 10^{-6} K_a^3$$

También se ha reportado que la relación θ_v - K_a antes descrita se cumple para suelos no salinos y de textura media a gruesa (Torres *et al.*, 2006). Otros estudios han señalado la conveniencia de asegurar que las mediciones que suministre el equipo se

Introduction

Time domain reflectometry (TDR) has show be an reliable equipment to measuring the volumetric content of water in soil (θ_v), because there is a good relationship between the apparent dielectric constant measured by the apparatus (K_a), in a wide rank of texture and porosity of soil (Jones *et al.*, 2002; Toop *et al.*, 1980). In these evaluations the empirical relationship between both variables resulted to be a third degree polynomial, for values of $\theta_v \leq 0.6$:

$$\theta_v = 5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} K_a - 5,5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4,3 \times 10^{-6} K_a^3$$

Also, it has been reported that relationship θ_v - K_a previously described is accomplished for no-salty soils and of medium to thick texture (Torres *et al.*, 2006). Other studies have reported the convenience of insuring that measurements that

correspondan con los contenidos de humedad existentes en el suelo, ya que la calibración de manufactura no necesariamente se ajusta a los sitios específicos de utilización del mismo (Akhwale *et al.*, 2006; Chandler *et al.*, 2004; García e Santos 1996; Serrarens *et al.*, 2000; Zegelin *et al.*, 1992).

Con el propósito de corroborar la necesidad de calibración reportada por varios investigadores, el Field Scout TDR 300, marca Spectrum Technologies, adquirido para registros de humedad en un ensayo de fertirrigación en lechosa fue evaluado para asegurar la confiabilidad de sus lecturas en el área del ensayo.

Materiales y métodos

La evaluación consistió en la comparación de las lecturas del equipo con los valores de humedad volumétrica calculados a partir de la humedad gravimétrica y la densidad aparente, en un ensayo de fertirrigación localizado en el campo experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, sobre un suelo Fluventic Haplustolls, francosa gruesa, mixta, Isohipertérmica (Torres *et al.*, 2006), coordenadas geográficas 10° 17' 03" de Latitud Norte y 67° 36' 16" de Longitud Oeste, a una altitud de 454 msnm.

Los sitios de muestreo se ubicaron en el campo a partir de diez registros previos obtenidos con el TDR en 144 puntos regularmente distribuidos en toda el área del ensayo (2.264 m²). Dichos registros se obtuvieron después de una lluvia y antes y después de un fertirriego. A cada uno de los registros se le calculó la media y la desviación

supply the equipment correspond with moisture content existents in soil, because manufacturer's calibration it is not necessarily adjusted to the specific places of its use (Akhwale *et al.*, 2006; Chandler *et al.*, 2004; García e Santos 1996; Serrarens *et al.*, 2000; Zegelin *et al.*, 1992).

With the purpose of corroborating calibration necessity reported by several researchers, the Field Scout TDR 300, mark Spectrum Technologies, acquired for registers of moisture in a fertirrigation essay in papaya was evaluated for assuring the reliability of its lectures in the essay area.

Materials and methods

The evaluation consisted in the comparison of readings of equipment with values of volumetric moisture calculated from gravimetric moisture and the bulk density, in a fertirrigation essay localized in the experimental field of the Agronomy Faculty of the Central de Venezuela University, on a Fluventic Haplustolls soil, thick loam, mixed, isohyperthermal (Torres *et al.*, 2006), geographic coordinates 10° 17' 03" North latitude and 67° 36' 16" West length, at an altitude of 454 msnm.

Sampling places are located in filed from ten previous registrations obtained with TDR in 144 points regularly distributed in all the essay area (2.264 m²). These registrations were obtained after a rainfall and before and after a fertirrigation. At each registration, mean and standard deviation was estimated. With these statistics data were classified into

estándar. Con estos estadísticos se clasificaron los datos en tres categorías: los superiores a la media más la desviación (más húmedos), los inferiores a la media menos la desviación (menos húmedos) y los comprendidos entre la media más la desviación y la media menos la desviación (intermedios). De cada categoría se seleccionaron diez puntos de muestreo, obteniendo así tres grupos de 10 puntos cada uno, asegurando un rango prudente de humedad que permitiera una comparación confiable.

En cada uno de los 30 puntos seleccionados se realizaron lecturas con el TDR, utilizando primero varillas de 12 cm y luego de 20 cm. Simultáneamente, se tomaron muestras de suelo con un toma muestra tipo Hoffer a las profundidades de 0-10 cm (estrato 1) y 10-20 cm (estrato 2), así como muestras no alteradas de suelo para la determinación de la densidad aparente, utilizando para ello un toma muestras tipo Uhland. Estas últimas se tomaron a las profundidades 2,5-7,5 cm y 12,5-17,5 cm; es decir un cilindro de 5 cm de largo en el estrato 1 y otro de igual longitud en el estrato 2. En las muestras alteradas se determinó la humedad gravimétrica y en las muestras no alteradas densidad aparente. La humedad volumétrica se obtuvo a partir de la humedad gravimétrica y la densidad aparente, utilizando la ecuación que relaciona el contenido gravimétrico del agua con la densidad específica aparente del suelo (Hillel, 1980):

$$\theta_v = \theta_g Da/Dw$$

donde:

θ_v = contenido volumétrico de agua (adimensional)

three categories: Those superior to mean plus deviation (more humid), those inferior to mean less than deviation (less humid) and those between mean more deviation and mean less than deviation (intermediates). From each category ten sampling points were selected, by obtaining three groups of 10 point each, securing a prudent rank of moisture that would permit a reliable comparison.

In each of 30 points selected, readings were accomplished with TDR by using sticks of 12 cm first and after of 20 cm. Simultaneously, soil samples were taken with a sample taker type Hoffer at depths 0-10 cm (stratum 1) and 10-20 cm (stratum 2), like no altered soil samples for determination of bulk density, by using for that a samples taker type Uhland. The last ones were taken at depths 2.5-7.5 cm and 12.5-17.5 cm; it means a cylinder of 5 cm long in stratum 1 and other of the same length in stratum 2. In samples altered the gravimetric moisture was determined and in those no altered, was determined the bulk density. The volumetric moisture was obtained from the gravimetric moisture and the bulk density by using equation that relates the gravimetric content of water the apparent specific density of soil (Hillel, 1980):

$$\theta_v = \theta_g Da/Dw$$

Where:

θ_v = Water volumetric content (no dimensional)

Da = Soil bulk density ($Mg\ m^{-3}$)

Dw = Water density (it is equally assumed to $1\ Mg\ m^{-3}$)

Da/Dw = Apparent specific density (no dimensional)

Da = densidad aparente del suelo (Mg m^{-3})

Dw = densidad del agua (se asume igual a 1 Mg m^{-3})

Da/Dw = densidad específica aparente (adimensional)

En los 30 puntos de muestreo se tomaron muestras adicionales para textura y chequeo de la salinidad, a ambas profundidades con un barrenado tipo holandés, para precisar el grado de interferencia de las variaciones texturales en la humedad del suelo bajo estudio. Con los porcentajes de arena, limo y arcilla, obtenidos por sedimentación (Bouyoucos, 1962), se determinó el índice textural (Sillanpää, 1982):

$$IT = \% A + 0,3 (\% L) + 0,1 (\% a)$$

donde:

IT = índice textural (adimensional)

% A = porcentaje de la fracción arcilla

% L = porcentaje de la fracción limo

% a = porcentaje de la fracción arena

Este índice, como expresión cuantitativa de la textura, permite considerar esta propiedad física en la estadística paramétrica.

Los valores de humedad volumétrica obtenidos con el TDR para los primeros 12 cm de suelo se compararon con los valores de humedad volumétrica calculados para los primeros 10 cm, y los obtenidos con el TDR para los 20 cm se compararon con los valores promedios de humedad calculados para ambos estratos. La humedad volumétrica no se determinó directamente en los cilindros tomados con el Uhland porque el espesor muestreado

In the 30 sampling point additional samples were taken for texture and salinity check, at both depths with an auger Dutch type, for precise the interference degree of texture variations in soil moisture under study. With sand, limo and clay percentages, obtained by sedimentation (Bouyoucos, 1962), the texture index was determined (Sillanpää, 1982):

$$IT = \% A + 0,3 (\% L) + 0,1 (\% a)$$

Where:

IT = texture index (no dimensional)

% A = clay fraction percentage

% L = limo fraction percentage

% a = sand fraction percentage

This index, like quantitative expression of texture, permits to consider this physical property in parametric statistic.

The volumetric moisture values obtained with TDR for the first 12 cm of soil were compared with volumetric moisture values estimated for the first 10 cm, and the obtained with TDR for the 20 cm were compared with moisture mean values calculated for both stratum. The volumetric moisture determined directly in the cylinders taken from with Uhland because the thickness sampled with it only covered 5 cm. Therefore, soil cylinder taken for depth 0-10 was captured in depth 2.5-7.5 cm and those taken for depth 10-20 cm was captured in depth 12.5-17.5 cm, whereas with Hoffer sampler, 10 entire cm were taken in each stratum.

Subsequently, correlation and regression analysis were accomplished between volumetric moisture values calculated and those obtained with TDR for evaluating the

con él sólo cubría 5 cm. Por ello, el cilindro de suelo tomado para la profundidad 0-10 se capturó en la profundidad 2,5-7,5 cm y el tomado para profundidad 10-20cm se capturó en la profundidad 12,5-17,5 cm, mientras con el muestreador Hoffer se tomaron 10 cm completos en cada estrato.

Posteriormente se realizaron análisis de correlación y regresión entre los valores de humedad volumétrica calculados y los valores de humedad volumétrica obtenidos con el TDR para evaluar el grado y tipo de asociación entre estas dos variables.

Complementariamente se realizaron análisis de varianza y pruebas de media de rango múltiple de Tukey a las variables humedad gravimétrica, índice textural y densidad aparente en ambos estratos, y análisis de correlación y regresión entre las variables humedad gravimétrica e índice textural, y entre las variables densidad aparente y humedad gravimétrica, para obtener alguna explicación sobre las diferencias de humedad entre los tres grupos de muestras.

Resultados y discusión

Relación humedad volumétrica calculada-humedad volumétrica TDR

Los valores de salinidad obtenidos en los extractos de la pasta saturada resultaron inferiores $0,2 \text{ dS m}^{-1}$ en ambos estratos, lo que descarta la interferencia de la salinidad en las lecturas del aparato. En las figuras 1 y 2 se ilustra la relación entre la humedad volumétrica calculada y la humedad volumétrica arrojada por el TDR. La relación entre ambas medi-

degree and association type between these two variables.

Analysis of variance and Tukey mean test of multiple ranks were accomplished on the variables gravimetric moisture, textural index and bulk density in both stratum and correlation and regression analysis between the variables gravimetric moisture and textural indexes, and between the variables bulk density and gravimetric moisture, to obtain some explanation about the moisture differences between the three sampling groups.

Results and discussion

Relationship between volumetric moisture calculated-volumetric moisture TDR

Salinity values obtained from saturated pasta resulted inferior to 0.2 dS m^{-1} in both stratum, which rules out the interference of salinity in the apparatus readings. In figures 1 and 2 the relationship between the volumetric moisture calculated and volumetric moisture showed by TDR is illustrated. Relationship between measurements was lineal, but values obtained with TDR were superior to moisture values calculated with product of volumetric gravity by apparent specific density. The correlation analysis showed association between these variables, according to the Pearson r values obtained: $r_{(0-10 \text{ cm})} = 0.88$ and $r_{(0-20 \text{ cm})} = 0.95$ ($P < 0.0001$ in both cases). The prediction equations showed by the regression analysis resulted with values of R^2 adjusted to high for both depths. The higher disposition

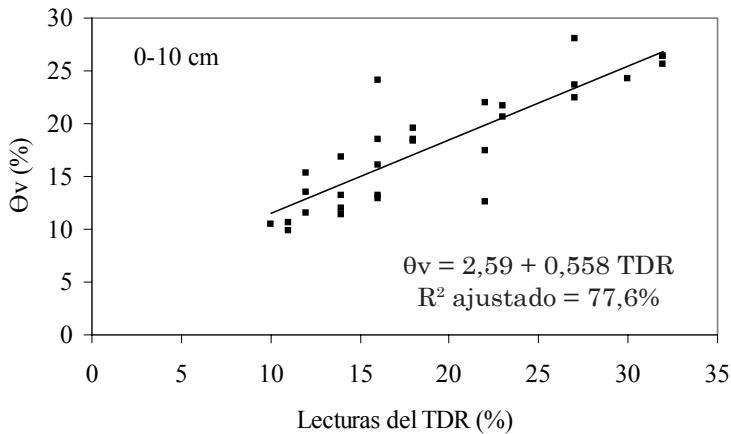


Figura 1. Relación entre el contenido volumétrico de humedad calculado y el contenido volumétrico medido con el TDR para la profundidad 0-10 cm.

Figure 1. Relationship between the volumetric content estimated and those measured with TDR for 0-10 cm depth.

ciones resultó lineal, pero los valores obtenidos con el TDR resultaron superiores a los valores de humedad calculados con el producto humedad gravimétrica por densidad específica aparente. El análisis de correlación mostró asociación entre estas variables, de acuerdo con los valores de r de Pearson obtenidos: $r_{(0-10 \text{ cm})} = 0,88$ y $r_{(0-20 \text{ cm})} = 0,95$ ($P < 0,0001$ en ambos casos). Las ecuaciones de predicción arrojadas por el análisis de regresión resultaron con valores de R^2 ajustado altos para ambas profundidades. La mayor dispersión observada en la profundidad 0-10 cm pudo obedecer a que las varillas cortas del TDR registraron la humedad de 12 cm de espesor de suelo mientras el muestreo con el Hoffer cubrió los primeros 10 cm.

En las ecuaciones de regresión, el intercepto (término independiente

observed in depth 0-10 cm could be caused by the short sticks of TDR registered moisture of 12 cm soil thickness whereas sampling with Hoffer covered the first 10 cm.

In the regression equations, the intercept (independent term of prediction equations) not tended to zero and straight pending did not tended to one, despite both variables were expressed in the same way (volumetric content, in percentage) and a wide measuring rank as illustrated in figures 1 and 2. If results are indicating the calibration necessity, it is possible that it have to be implemented with frequency for evaluating the functionality in the equipment time, even measurements are always made in the same soil. On the other hand, when new sticks are acquired because they are damaged

de las ecuaciones de predicción) no tendió a cero y la pendiente de las rectas no tendió a uno, a pesar que ambas variables estaban expresadas de igual manera (contenido volumétrico, en porcentaje) y el rango de medición fue lo suficientemente amplio como se desprende de los valores ilustrados en las figuras 1 y 2. Si los resultados están indicando la necesidad de calibración, es posible que ésta tenga que ser implementada con frecuencia para evaluar la funcionalidad en el tiempo del equipo, aunque las mediciones se realicen siempre en el mismo suelo. Por otra parte, cuando se adquieran nuevas varillas porque las mismas se deterioran con el uso, será necesaria también una calibración ya que se desconoce la variabilidad originaria de fabricación. Todas estas interrogantes tendrán que ser evalua-

with the use, it will be necessary one calibration because the originated manufacturer's variability is unknown. All these questions have to be evaluated because the experience in use of this equipment is scarce, particularly in country. Similar results have been reported by other researchers with other equipments (Akhwale *et al.*, 2006, Chandler *et al.*, 2004).

It is opportune detach that even though theoretically the equipment is able to measure until 0% of volumetric moisture, in conditions of little soil moisture, sticks could not be penetrated by the high resistance that soil would offer to their penetration. Particularly in the studied soil, sticks could not be penetrated in soil when the volumetric moisture was inferior to 8%.

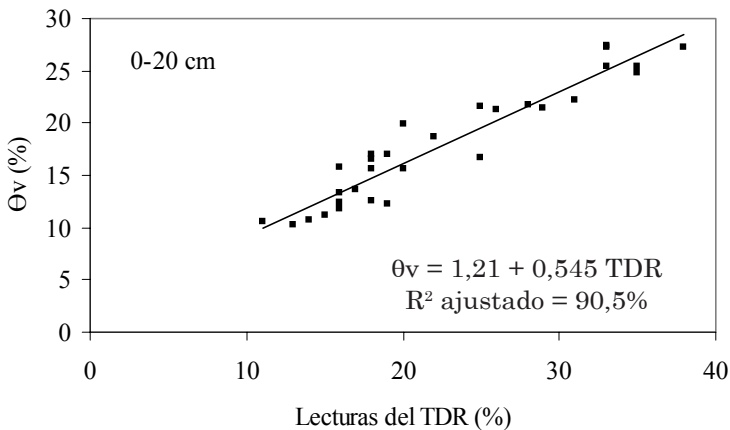


Figura 2. Relación entre el contenido volumétrico de humedad calculado y el contenido volumétrico medido con el TDR para la profundidad 0-20 cm.

Figure 2. Relationship between the moisture volumetric content and those measured with TDR for the depth 0-20 cm.

das ya que la experiencia en el uso de estos equipos es escasa, particularmente en el país. Resultados similares han sido reportados por otros investigadores con otros equipos (Akhwale *et al.*, 2006, Chandler *et al.*, 2004).

Es oportuno señalar que aún cuando el equipo teóricamente puede medir hasta 0% de humedad volumétrica, en condiciones de baja humedad del suelo las varillas no podrían ser penetradas por la alta resistencia que el suelo ofrecería a la penetración de las mismas. Particularmente en el suelo del ensayo las varillas no pudieron ser penetradas en el suelo cuando éste tenía una humedad volumétrica inferior a 8%.

Humedad gravimétrica, índice textural y densidad aparente

En el cuadro 1 se muestran los valores medios de las variables físicas determinadas. Los grupos de muestras resultaron diferentes en cuanto a los resultados de humedad gravimétrica en ambos estratos, pero no en el caso del índice textural. Esto último está indicando que el suelo bajo estudio es significativamente uniforme en cuanto a textura se refiere, aun cuando las muestras cayeron en las clases texturales FL, F y Fa, pero esto es comprensible porque las diferencias entre las clases texturales es abrupta.

La densidad aparente por su parte mostró una ligera diferencia en el primer estrato, posiblemente por el laboreo. En general todos los valores se correspondieron con la textura del suelo.

En el cuadro 2 se muestran las relaciones entre la humedad gravimétrica y el índice textural y entre la densidad aparente y la hu-

Gravimetric moisture, textural index and bulk density

In table 1 the mean values of determined physical variables. Samples groups were different in relation to results of gravimetric moisture in both stratum, but not in case of textural index. This last one is indicating that soil studied is significantly uniform in relation to texture even though samples were in textural classes FL, F and Fa, but this is comprehensible because the differences between textural classes is abrupt.

The bulk density showed a lightly difference in the first stratum, possibly by the work. In general all the values corresponded with soil texture.

In table 2 the relationships between the gravimetric moisture and the textural index and between the bulk density and the volumetric moisture are shown. Results of the analysis show that there is no relationship between moisture and textural changes. In relation to the bulk density, in the stratum 0-10 cm was found a light relationship between this and moisture. This was waited because it can be observed that in field that soil showed expansion or contraction according to moisture changes.

Conclusions

In the equipment evaluation of TDR 300 mark Spectrum Technologies it could be checked that there is a high degree of association between the probe readings and the volumetric content of soil moisture, by

Cuadro 1. Resultados de los análisis de varianza y pruebas de medias de la humedad gravimétrica (θg), índice textural (IT) y densidad aparente (Da).**Table 1. Results of the analysis of variance and mean tests of gravimetric moisture (θg), textural index (IT) and apparent density (Da).**

Grupo de datos	θg (%)		IT		Da ($Mg\ m^{-3}$)	
	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20
	cm					
Más húmedos	18,08 ^a	18,75 ^a	31,57	28,83	1,31 ^a	1,29
Intermedios	11,75 ^b	12,50 ^b	29,07	25,89	1,37 ^b	1,32
Menos húmedos	10,14 ^b	9,81 ^b	30,57	26,03	1,36 ^b	1,32
F calculado	24,01	30,07	1,32	2,97	4,12	0,82
p	0,00	0,00	0,28	0,06	0,03	0,45

Letras distintas indican diferencias significativas entre medias (Tukey, $P \leq 0,05$).

medad gravimétrica. Los resultados de los análisis indican que no existe relación entre los de humedad y los cambios texturales. Con relación a la densidad aparente, se encontró en el estrato de 0-10 cm una ligera relación

proving that this technique constitutes a practical and rapid procedure for soil moisture registrations.

Particularly, TDR evaluated over esteemed moisture values

Cuadro 2. Resultados de los análisis de correlación y regresión entre las variables contenido gravimétrico de humedad (θg) - índice textural (IT) y densidad aparente (Da) - contenido gravimétrico de humedad (θg).**Table 2. Results of the correlation and regression analysis between the variables moisture gravimetric content (θg) - textural index (IT) and apparent density (Da) - moisture gravimetric content (θg).**

Estratos	Variables	Correlación		Regresión			
		r	p	Fc	p	R ²	Predicción
0-10 cm	θg - IT	0,29	0,12	2,6	0,11	0,05	$\theta g = 2,33 + 0,36 IT$
	Da - θg	-0,31	0,09	2,93	0,09	0,06	$Da = 1,40 - 0,004 \theta g$
10-20 cm	θg - IT	0,26	0,16	2,04	0,16	0,03	$\theta g = 3,76 + 0,37 IT$
	Da - θg	-0,33	0,07	3,46	0,07	0,07	$Da = 1,37 - 0,004 \theta g$

entre ésta y la humedad. Esto era de esperar ya que se pudo observar en campo que el suelo se expandía o contraía con los cambios de humedad.

Conclusiones

En la evaluación del equipo TDR 300 marca Spectrum Technologies se pudo comprobar que existe un alto grado de asociación entre las lecturas de la sonda y el contenido volumétrico de humedad del suelo, comprobando que esta técnica constituye un procedimiento práctico y rápido para registros de humedad en el suelo.

Particularmente el TDR evaluado sobreestimó los valores de humedad respecto de los medidos en muestras de suelo, resultando necesaria su calibración para las dos profundidades de registros del equipo.

El suelo resultó estadísticamente uniforme en su comportamiento textural, no influyendo sus variaciones en las lecturas del equipo.

El equipo puede presentar limitaciones para su uso en suelos con bajo contenido de humedad por la resistencia que ofrece el suelo seco a la penetración de las varillas.

Agradecimientos

Los autores agradece al Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Fonacit) por el cofinanciamiento a este proyecto No. S1-2002000339.

Literatura citada

Akhwale, M., T. Pfeiffer, O. Wendroth, and R. Walton. 2006. Comparison

respect to those measured in soil samples, by resulting necessary its calibration for the two depths of equipment registration.

Soil was statistically uniform in its textural behavior, its variations did not influencing on the equipment readings.

Equipment can show limitations for its use in soils with little moisture content by resistance that dry soil offers to sticks penetration.

Acknowledgements

Authors want to express their thanks to the Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Fonacit) by the co-financing to this project No. S1-2002000339.

End of english version

of two techniques of measuring soil water content in the field. [On line] <http://www.uky.edu/WaterResources/akhwale.pdf>. (Consulta 9 de Febrero)

Bouyoucos, G. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. Agron. J. 54:464-465.

Chandler, D., M. Seyfried, M. Murdock and J. McNamara. 2004. Field calibration of water content reflectometers. Soil Sci. Soc. Am. J. 68: 1501-1507.

Garcia, J. e O. Santos. 1996. Calibração de um TDR utilizando modelos empíricos para cinco solos paulistas. En: Memórias XIII Congresso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Aguas de Lindoia, Brasil. 4 p.

Hillel, D. 1980. Applications of soils physics. Academic Press. New York, USA.385 p.

- Jones, S., J. Wraith and D. Or. 2002. Time domain reflectometry measurement principles and applications. *Hydrol. Proc.* 16: 141-153
- Serrarens, D., J. MacIntyre, J. Hopmans and L. Bassoi. 2000. Soil moisture calibration of TDR multilevel probes. *Scientia Agricola* 57:349-354.
- Sillanpää, M. 1982. Micronutrients and nutrient status of soil: a global study. *FAO Soils Bulletin* 48. Rome, Italy. 444 p.
- Toop, G., J. Davis and A. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil-water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16: 574-582.
- Torres, S., L. Madero y C. Perdomo. 2006. Colección de suelos de Referencia del Centro de información y Referencia de Suelos del Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 120 p.
- Zegelin, S., I. White and G. Russell. 1992. A critique of the time domain reflectometry technique for determining field soil-water content. In: *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory in Practice*. SSSA Special Publication 30. 187-208.