






CALIBRACIÓN DE SENSORES DE REFLECTOMETRÍA DE DOMINIO TEMPORAL EN SUELOS ULTISOLES DE SABANA

Calibration of time domain reflectometry sensors in ultisol savanna soils

José Gil-Marín^{1*}; María Cordova-Rodriguez²; Alejandro Zermeño-Gonzalez³

¹ Departamento de Ingeniería Agrícola, Núcleo Monagas, Universidad de Oriente, Estado Monagas, Venezuela.

² Facultad de la Salud Humana, Universidad Nacional de Loja, Ecuador.

³ Division de Riego y Drenaje. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

* E-mail: jalexgil2005@hotmail.com

Recibido: 06/01/2022; Aceptado: 15/07/2022; Publicado: 31/07/2022

ABSTRACT

The time domain reflectometry method (TDR) estimates the soil water content by getting the soil dielectric permittivity (K_a) and a third order polynomial that relates the K_a with the volumetric water content. However, in many applications an *in-situ* calibration must be performed for a particular soil type. The objectives of this study were to perform the calibration and determine the specific equations of a CS616 humidity sensor, in savanna Ultisols soils of different textures, collected in different agricultural areas of the Maturín Municipality, Monagas state, Venezuela, to correct the measurements of the TDR sonda. The study was carried out in square stainless-steel containers with a side of 10 cm and a height of 32 cm, implemented under controlled conditions in a postgraduate greenhouse at the Universidad de Oriente, where daily monitoring of soil moisture measurements was carried out for 30 days, from saturated humidity to natural drying. The CS616 sensors presented a linear response to the variation of soil moisture obtaining $R^2 > 0,90$. The RMSE values before and after calibration ranged from 0,119 to 0,012 m^3m^{-3} . The Willmott (d) and performance (c) indexes indicate that the equation of best fit was found in the clay loam soil. It is concluded that the calibration equations obtained were more precise than the factory equations in this type of soil.

Keywords: soil moisture probe | capacitance | CS616 | TDR.

Forma de citar el artículo (Formato APA):

Gil-Marín, J., Cordova-Rodriguez, M., & Zermeño-Gonzalez, A. (2022). Calibración de sensores de reflectometría de dominio temporal en suelos ultisoles de sabana. *Anales Científicos*. 83(1), 57-66. <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v83i1.1884>.

Autor de correspondencia (*): José Alexander Gil-Marín. Email: jalexgil2005@hotmail.com

© Los autores. Publicado por la Universidad Nacional Agraria La Molina.

This is an open access article under the CC BY

RESUMEN

El método de determinación del contenido de agua en el suelo a través de sondas TDR (Time Domain Reflectometry) estima el contenido de agua con base a la permisividad dieléctrica del suelo, utilizando un polinomio de tercer orden. Sin embargo, en algunas aplicaciones deben realizarse graduaciones in situ, que culminen en funciones individuales de calibración para cada tipo de suelo. Los objetivos de este estudio consistieron en realizar la calibración y determinar las ecuaciones específicas de un sensor de humedad CS616, en suelos Ultisoles de sabana de distintas texturas, colectados en diferentes zonas agrícolas del Municipio Maturín, estado Monagas, Venezuela. El estudio se llevó a cabo en recipientes cuadrados de acero inoxidable de 10 cm de lado y 32 cm de alto, implementados en condiciones controladas de un invernadero del postgrado de la Universidad de Oriente, donde se realizó el monitoreo diario de la humedad del suelo durante 30 días, desde la humedad de saturación hasta el secado natural. Los sensores CS616 presentaron una respuesta lineal a la variación de humedad de suelo obteniendo $R^2 > 0,90$. Los valores de RMSE antes y después de la calibración variaron de 0,119 a 0,012 m^3m^{-3} . Los índices de Willmott (d) y de rendimiento(c) indican que la ecuación de más ajuste se encontró en el suelo Franco arcilloso. Se concluye que las ecuaciones de calibración obtenidas fueron más precisas que las ecuaciones de fábrica en estos tipos de suelo.

Palabras clave: sonda de humedad del suelo | capacitancia | CS616 | TDR.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se han desarrollado varios sensores para medir el contenido de agua del suelo utilizando sus propiedades dieléctricas. Estos sensores se basan en el hecho de que la constante dieléctrica o permitividad dieléctrica cambia predominantemente con cambios en el contenido de agua de los suelos, ya que la constante dieléctrica (ϵ) del agua es mucho mayor ($\epsilon = 80,4$ a $20^\circ C$) que la de otros componentes de los suelos ($\epsilon = 1$ para aire y $\epsilon = 3-5$ para partículas de suelo). La reflectometría de dominio temporal (TDR) se utiliza para determinar la constante dieléctrica mediante el análisis del tiempo de propagación de las ondas electromagnéticas, que viajan a lo largo de las varillas de la sonda incrustadas en el suelo (Caicedo-Rosero *et al.* 2021). Dado que el agua es el único constituyente del suelo que tiene un alto valor para la permitividad dieléctrica y es el único componente distinto del aire que cambia de concentración, se puede utilizar un dispositivo sensible a la permitividad dieléctrica para estimar el contenido volumétrico del agua.

Para predecir el contenido volumétrico de humedad del suelo (θ) con un equipo TDR, se requiere de una función que relacione la constante dieléctrica aparente (K_a) con θ . La función más usada ha sido la polinómica

de tercer grado desarrollada por Topp *et al.* (1980), conocida como ecuación universal, cuya principal ventaja es que no requiere de la determinación de ningún parámetro del suelo. Los equipos TDR son entregados por el fabricante con esta función de calibración:

$$\theta_{Pred} = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} K_a - 5,5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4,3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad (1)$$

Sin embargo, esta ecuación no ha mostrado buena aplicabilidad en suelos volcánicos (Miyamoto y Chikushi, 2000) ni en suelos de textura fina (Dasberg y Hopman, 1992; Yu *et al.*, 1999). Por ello, se ha sugerido que se realicen estudios de calibración para generar funciones específicas a los tipos de suelo y condiciones de uso del equipo TDR (Jackson, 2004).

En el caso de sensores CS616 para medir el contenido de agua de la capa superior del suelo, se introducen en el suelo dos varillas metálicas paralelas que actúan como líneas de transmisión de las ondas electromagnéticas que se envían desde el reflectómetro. El volumen de suelo muestreado por el par de varillas es aproximadamente cilíndrico, su radio es la separación que existe entre las dos varillas. La longitud de éstas es la profundidad muestreada. La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas se

determina con base en el tiempo de tránsito desde el extremo de las varillas hasta el reflectómetro. El valor de la constante dieléctrica aparente (K_a) se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$K_a = (t c/L)^2 \quad (2)$$

donde: t = el tiempo de tránsito de la onda electromagnética (ns, nanosegundos); c = la velocidad de la luz (cm ns⁻¹); L = la longitud de la línea de transmisión (cm).

A medida que aumenta el contenido de agua, la velocidad de propagación disminuye porque la polarización de las moléculas de agua lleva tiempo. Se mide esencialmente el tiempo de viaje de la señal aplicada a lo largo de dos veces la longitud de la varilla (Suzuki et al. 2012). La señal aplicada viaja a lo largo de las varillas de la sonda y se refleja desde los extremos de las varillas que viajan de regreso al cabezal de la sonda. Una parte del circuito detecta el reflejo y activa el siguiente pulso. La frecuencia de pulsación con las varillas de la sonda al aire libre es de unos 70 MHz. Esta frecuencia se reduce en las etapas de salida del circuito del reflectómetro de contenido de agua a una frecuencia que se puede medir fácilmente con un registrador de datos. La frecuencia o período de salida de la sonda se relaciona empíricamente con el contenido de agua mediante una ecuación de calibración (Suzuki et al., 2012). Es bien sabido que los sensores de humedad del suelo generalmente requieren una calibración específica del tipo de suelo para garantizar que su interpretación represente correctamente el contenido volumétrico de agua en diferentes sitios de campo (Seyfried y Murdock, 2001; Blonquist *et al.*, 2005; Western y Seyfried, 2005; Kizito *et al.*, 2008). Como las ecuaciones proporcionadas por los fabricantes generalmente se limitan a un tipo de suelo específico (a menudo franco) en condiciones de laboratorio, por lo general no se pueden aplicar a las mediciones tomadas en otros tipos de suelo. En consecuencia, se deben desarrollar ecuaciones para una aplicación genérica a suelos que normalmente se encuentran en el campo, a fin de que la interpretación de los datos de humedad del suelo de grandes redes a través de diversos tipos de suelos sea prácticamente manejable (Rüdiger et al., 2010). La calibración específica de este tipo de sensor permite obtener datos volumétricos fiables de humedad del suelo. Una alternativa de calibración es realizarla en

suelos representativos de cada sector para que los resultados de las ecuaciones de calibración se puedan extrapolar a suelos cuyas características físicas y químicas sean similares. Esto permitirá a los agricultores alcanzar el máximo rendimiento del sensor, además de obtener lecturas del contenido de humedad del suelo con mayor precisión y exactitud. Debido a la importancia de conocer la humedad del suelo con mayor precisión para el manejo eficiente del riego en los cultivos y la existencia de escasos estudios de calibración de sensores de humedad en suelos de clima tropical y de sabana, se estableció esta investigación con el objetivo de calibrar sensores CS616 para ser utilizados en la medición de la humedad en suelos Ultisoles del oriente agrícola de Venezuela.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El presente trabajo se desarrolló con tres suelos de diferente textura. Las muestras de dos tipos de suelo fueron tomadas en el sistema de Riego Perú-San Vicente, con coordenadas geográficas de 63° 25' 35" - 63° 27' 50" longitud Oeste y 09° 35' 57" - 9° 36' 28" latitud Norte, localizadas al norte de la ciudad de Maturín, estado Monagas. Según Urriola (2007) y MARN (1996) en esta zona, el relieve corresponde a llanos bajos, intercalados por mesas con una pendiente general inferior al dos por ciento, esta zona tan plana posee como relieve principal los producidos por ríos que, al nacer en las mismas mesas, la disentan formando farallones o pendientes fuertes y ocasionalmente sistemas de terrazas. La topografía más local de las planicies está limitada a relieves suavemente ondulados, a colinas bajas ocasionales y a roturas de pendientes con restos de laterita, los minerales dominantes en la zona son cuarzo, micas, caolinita y circón. Los paisajes fisiográficos característicos del sector son: mesa llana, mesa disectada, planicie aluvial de desborde, planicie; desde el punto de vista hidrográfico presenta numerosas corrientes fluviales, entre los más importante están: Río Guarapiche, Guanipa, Amana; Punceres, Tigre y Morichal Largo. El clima de la zona según Holdridge citado por Gil et al. (2021), es del tipo Bosque Seco Tropical, caracterizado por presentar un periodo lluvioso de mayo a diciembre y una estación seca de enero a abril, con una precipitación media anual de 1291,6 mm; una temperatura media anual de 25,9 °C, con una

evapotranspiración potencial de 1372 mm y una evaporación de 1573 mm. Los suelos predominantes en la zona son de texturas arenosas y existen sectores con horizontes argílicos a profundidades de 50 cm o más, los cuales constituyen las mejores condiciones físicas para la actividad agropecuaria, presenta drenajes rápidos con pH moderadamente ácidos (4,5 - 5,5) con baja capacidad de intercambio de cationes y bajo porcentaje de materia orgánica. Los usos del suelo predominantes son el agrícola y ganadero. Los cultivos que se practican son: maíz, yuca, hortalizas y como frutal la lechosa. El tercer tipo de suelo fue muestreado en las adyacencias de la actual autopista Vinotinto, al norte del estado Monagas, específicamente en la localidad Amarili, con ubicación geográfica de 9°39'52" latitud norte y 63°23'54" longitud oeste, a 117msnm.

Colecta de muestras de suelo. Para la calibración de los sensores fueron colectadas muestras no disturbadas de suelo en tubos cuadrados rígidos de acero, con dimensiones de 32 cm de altura y 10 cm de lado, los cuales se enterraron en el suelo húmedo con ayuda de una placa de acero y martillo. Antes de la colecta, la superficie del suelo fue limpiada de restos vegetales. Seguidamente, fueron tomadas las muestras a la profundidad de 0-32 cm. Por cada tipo de suelo se tomaron cuatro muestras de suelo sin disturbar. Las muestras fueron identificadas según el tipo de suelo, muestra A: suelo Franco, muestra B: suelo Franco arcilloso y suelo C: suelo Areno francoso. Las muestras de cada tipo de suelo se obtuvieron al azar en una superficie representativa, uniforme y homogénea de cada tipo de suelo, donde se tomaron cuatro muestras para tener cuatro repeticiones por tratamiento (textura de suelo). El análisis textural se realizó en el laboratorio de suelos de la Universidad de Oriente con el Método del densímetro Bouyoucos.

Saturación y Calibración de las muestras de suelo.

Las muestras sin disturbar se llevaron al Invernadero de Postgrado de la Universidad de Oriente, ubicadas en Juanico, Maturín donde inmediatamente, se les determinó el peso inicial. Cada tubo muestreador fue protegido con paños permeables para evitar la pérdida de suelo y también para facilitar la entrada de agua por capilaridad para provocar que el agua desplazara la mayor cantidad de aire de los poros; luego las muestras fueron colocadas en bandejas con agua destilada hasta

2/3 de la altura de los tubos. Después de 10 días, las muestras llegaron al punto de saturación, periodo en que fue observado un brillo uniforme en la superficie de cada muestra de suelo dentro de los cilindros. En este punto de saturación, muestra por muestra fue retirada de las bandejas e inmediatamente fue pesada, seguidamente los sensores TDR modelo CS616 marca Campbell Scientific fueron introducidos hasta 30 cm de profundidad, para obtener las lecturas de la humedad volumétrica. Las lecturas de humedad volumétrica de la sonda TDR fueron almacenadas en un equipo Datalogger, modelo CR1000 también de la Campbell Scientific. El datalogger se programó para tomar las lecturas del sensor cada segundo, pero solo almacenó los datos de la media de lecturas ocurridas en una hora. Se utilizaron cuatro sensores por cada tipo de suelo. La densidad aparente de cada suelo se determinó a la profundidad de 0 – 20 cm con el método de Uhlund. Se realizaron dos repeticiones de la densidad aparente distribuidas en puntos cercanos al lugar donde se tomaron las muestras de suelo sin disturbar.

La humedad volumétrica del suelo se calculó con base en la humedad gravimétrica del suelo usando la Ec. (3):

$$\theta_v = \theta_m \times D_a \tag{3}$$

Donde θ_v es la humedad volumétrica del suelo expresada en $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, θ_m es la humedad gravimétrica del suelo expresada en g g^{-1} y D_a es la densidad aparente del suelo expresada en g cm^{-3} .

Los datos de la humedad gravimétrica se obtuvieron por diferencias de peso de los cilindros a lo largo del proceso de secado. Los cilindros se utilizaron como lisímetros de pesada. Se realizaron pesajes y lecturas diarias de la humedad del suelo a las 8:00 a.m. Las sondas TDR estimaron la humedad volumétrica del suelo en $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, y las lecturas se tomaron durante 45 días, cuando la masa del conjunto (envase y suelo) se convirtió en constante.

Para el análisis de regresión lineal, se relacionó la humedad volumétrica del suelo medida o real, θ_r (m^3m^{-3}), y la estimada por los sensores, θ_p ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Se utilizaron los siguientes índices estadísticos para comparar los datos volumétricos de humedad del suelo medidos y estimados por los sensores: coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (RMSE),

calculado por la Ec. (4) definido por Stockle et al. (2004), y el índice de concordancia de Willmott, expresado a través de la Ec. (5) determinado por Willmott, (1981):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_p - \theta_r)^2}{n}} \quad (4)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_p - \theta_r)^2}{\sum_{i=1}^n (|\theta_p - \theta| + |\theta_r - \theta|)} \right] \quad (5)$$

Donde n es el número de observaciones, θ_r y θ_p son los valores observados y estimados, respectivamente ($i = 1, 2, \dots, n$), θ son los promedios de los valores observados y estimados, respectivamente.

El índice de Willmott varía entre 0 y 1; un valor de 1 indica una coincidencia perfecta entre los valores medidos y estimados, mientras que 0 indica que no hay acuerdo alguno entre esos valores (Walker *et al.* 2004). Para determinar el desempeño de los métodos propuestos, se utilizó el índice de desempeño (c) de acuerdo con la Ec. (6), propuesto por Camargo y Sentelhas, (1997).

$$c = r \times d \quad (6)$$

Donde r es el coeficiente de correlación y del índice de concordancia. Para la interpretación de los valores del coeficiente de rendimiento (Tabla 1), se utilizó la clasificación propuesta por Camargo y Sentelhas, (1997). Después de este análisis, y considerando la

necesidad de calibración se procedió al ajuste de los datos generando modelos matemáticos para toda la serie de datos de cada textura, luego fue seleccionado el mejor ajuste o modelo matemático en función del mayor coeficiente de determinación R^2 y menor RMSE calculado con el programa Excel. Finalmente fue realizada una nueva verificación de la exactitud con el modelo seleccionado en la calibración con el objetivo de aproximar los datos para la recta 1:1.

Tabla 1. Clasificación del Rendimiento según el valor del coeficiente “c”

Valor de "c"	Rendimiento
> 0,85	Excelente
0,76 a 0,85	Muy bueno
0,66 a 0,75	Bueno
0,61 a 0,65	Moderado
0,51 a 0,60	Tolerable
0,41 a 0,50	Malo
≤ 0,40	Pésimo

Fuente: Camargo y Sentelhas,1997)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2, se observan algunas características físicas de los suelos estudiados. El análisis textural indica que son tres tipos de suelos muy diferentes desde el punto de vista textural, donde se destaca un Franco arcilloso, uno Franco, y otro Areno francoso, respectivamente.

Tabla 2. Características físicas de los suelos estudiados

Muestra	% arena (a)	% limo (L)	% arcilla (A)	Clase textural	Da (gr/cm ³)
1	22,07	46,03	31,90	FA	1,42
2	46,58	40,52	12,90	F	1,6
3	85,58	7,52	6,90	aF	1,78

Considerando la densidad aparente de cada suelo y comparando estos valores obtenidos, con los valores teóricos establecidos para cada clase textural, el suelo Franco arcilloso es el que mejor se ajusta a los parámetros reportados para este tipo de textura (1,35 – 1,49 gr/cm³). En el caso del suelo Franco los valores observados sobrepasan los valores teóricos (Franco: 1,34 – 1,50 gr/cm³), por lo tanto, podemos inferir de que en este tipo de suelo posiblemente esté ocurriendo un proceso de compactación del suelo que está disminuyendo su porosidad natural. En general todos

los valores se correspondieron con la textura del suelo. En la Figura 1 se muestra la dispersión de toda la serie de datos de humedad volumétrica real y medida, en las diferentes texturas estudiadas (0 a 30 cm) antes de la calibración de los sensores TDR CS616.

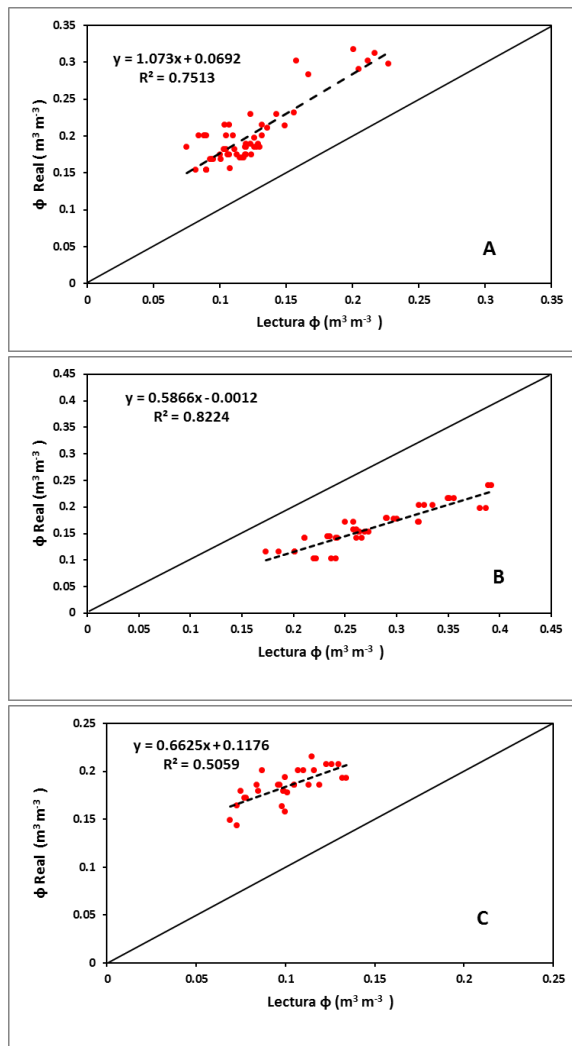


Figura 1. Datos brutos de humedad volumétrica obtenidos por las lecturas de los sensores de humedad para la serie de datos de todas las texturas de suelo. **A** Suelo franco. **B** Suelo Franco Arcilloso. **C** Suelo areno francoso

Se observa que los datos brutos de humedad volumétrica no coincidieron con la recta 1:1, es decir, presentaron comportamiento divergente, indicando la necesidad de los sensores. Para el caso de los suelos Franco y areno francoso la dispersión de datos está por encima de la recta 1:1, mientras que en el suelo Franco arcilloso los datos están por debajo de la recta, esto nos indica que en el primer caso el sensor subestima los

valores de humedad volumétrica y para suelos franco arcillosos hay una sobrestimación de los datos. Resultados similares donde los valores medidos antes de la calibración siempre quedaron debajo de la recta 1:1, fueron reportados por Abanto et al., (2020), Silva et al. (2012) y Silva Junior et al. (2013), en un suelo textura franco-arcillosa en la determinación de la exactitud y calibración de sonda de capacitancia en suelos Rhodic Ferralsol.

Por otro lado, Vera et al. (2016) en suelos franco-arcillosos de Murcia, España señala posibles sobrestimaciones de la humedad si no se utilizan las ecuaciones específicas para cada sitio con valores entre 55 % y 200 %. Mientras López et al. (2018) en suelos franco arenosos de Cuba, señala que las ecuaciones de calibración específicas obtenidas en comparación con las ecuaciones internas de las sondas evidencia que su no aplicación implicaría una subestimación de la humedad del suelo en las condiciones evaluadas entre 2 -30 %, lo que conllevaría a errores en los cálculos de las láminas de riego en un rango de 4 mm – 60 mm. Del mismo modo, Barbosa (2015) al realizar la calibración de los datos obtenidos por sensores TDR observó que los datos registrados no se ajustaron con la recta 1:1. Seguidamente, después de haber comprobado la necesidad de calibración, fueron generados modelos matemáticos (lineal y cuadrático), calculando el coeficiente de determinación (Tabla 3).

Dada la mayor sencillez de cálculo de una recta en comparación con una polinomial y por tener mayor facilidad para ser comparadas, se proponen calibraciones lineales para los suelos aquí estudiados. Curvas de calibración presentadas en otros trabajos se han ajustado a funciones polinomiales (Campbell Scientific, 1996) o sigmoidales (Bruno et al., 2006) para el modelo CS615, así como a rectas para otros modelos de equipos TDR (Herkelrath et al., 1991; Schaap et al., 1996). Los sensores respondieron linealmente a los cambios de humedad para todos los suelos bajo estudio y las calibraciones quedaron ajustadas a ecuaciones de rectas diferentes para cada tipo de suelo (Figura 1).

Tabla 3. Ecuaciones de calibración y coeficientes de determinación (R^2) obtenidas para el monitoreo de la humedad en las diferentes texturas del suelo.

Textura	Ecuación	Modelo	R^2
Franco	$Y = 1,00027x - 0,00012647$	Lineal	0,7514
	$Y = 4,15641x^2 + 0,15938x - 0,15297$	Polinomial cuadrático	0,7731
Franco-Arcillosa	$Y = 1,00028x + 0,00000949$	Lineal	0,8224
	$Y = 0,11084x^2 + 0,52266x - 0,00769$	Polinomial cuadrático	0,8225
Franco-Arenosa	$Y = 1,00715x - 0,00177$	Lineal	0,508
	$Y = -6,83758x^2 + 2,04428x - 0,0505$	Polinomial cuadrático	0,5262

Después de la calibración fue calculado los nuevos índices estadísticos para toda la serie de datos y para cada uno de los tipos de suelos, y se observa que el nuevo RMSE fue considerablemente menor después de la calibración, y que los valores de Willmott (d) y de rendimiento (c) mejoraron significativamente (Tabla 4). La Tabla 4 muestra que para el sensor CS616 hay

una diferencia significativa entre la precisión de las lecturas volumétricas de humedad del suelo antes y después de la calibración, en el caso de suelos Franco arenosos con valores de RMSE de 0,085 y 0,012 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, respectivamente, vario la escala de precisión del sensor de pobre a moderado según la clasificación presentada por Fares et al., 2011.

Tabla 4. Índices estadísticos para el sensor CS616 antes y después de la calibración

Parámetros	Franco		Franco Arcilloso		Franco Arenoso	
	Calibración en fabrica	Calibración	Calibración en fabrica	Calibración	Calibración en fabrica	Calibración
RMSE	0,081	0,021	0,119	0,016	0,085	0,012
Willmott (d)	0,941	0,992	0,903	0,996	0,926	0,994
Rendimiento (c)	0,816	0,86	0,819	0,903	0,658	0,708

Resultados semejantes con relación a los valores de RMSE para la calibración específica en campo fueron reportados por Qi y Helmers (2010), quienes encontraron valores de 0,037 a 0,069. Del mismo modo, Irmak y Irmak (2005), calibrando una sonda PR2/6 para cuatro suelos de diferentes texturas obtuvieron valores de RMSE entre 0,040 y 0,050. En la Tabla 4 también se observa para suelos Franco arcillosos que los valores del coeficiente de rendimiento (c) antes y después de la calibración fueron 0,819 y 0,903, respectivamente, variando de muy bueno (calibración de fábrica) a excelente (calibración de laboratorio) según la clasificación de Fares et al. (2011).

Asimismo, los índices de concordancia variaron de 0,903 a 0,996 antes y después de la calibración, mostrando mayor precisión entre los valores volumétricos de humedad de los suelo medidos y estimados por el sensor CS616. Estudios realizados por Varble y Chávez (2011), reportan un coeficiente de desempeño de 0,99 luego de la calibración para un suelo de textura arcillo arenosa, evaluando un sensor

5TE en la estimación de la humedad del suelo, corroborando los resultados obtenidos en el presente estudio, lo que lleva a la conclusión de que la calibración aplicada a este sensor mejoró las lecturas de humedad del suelo usando la ecuación de calibración. De esta manera, después de haber realizado el ajuste, se observó que los datos quedaron concentrados cercanos a la recta 1:1, y los coeficientes de determinación se elevaron levemente. Resultados semejantes fueron encontrados por Abanto et al. (2020), y Silva et al. (2012), al mostrar que después de la calibración los datos se ajustaron a la recta 1:1 y disminuyó el RMSE, con lo cual obtuvieron ganancias significativas de precisión en la medición del contenido de la humedad en el suelo (Figura 2). La precisión de las mediciones con estas sondas puede mejorar grandemente si se realiza su calibración para cada condición específica donde serán utilizadas, ya que las propiedades físicas de los suelos pueden variar significativamente de las consideradas para su calibración de laboratorio, donde se unifican en dos tipos fundamentales de suelos: minerales y de alto contenido orgánico. Como puede observarse, la

humedad del suelo determinada por un sensor CS616 se puede estimar con mayor exactitud tras una calibración específica del mismo y la mejor calibración se encuentra en suelos del tipo Franco arcillosos.

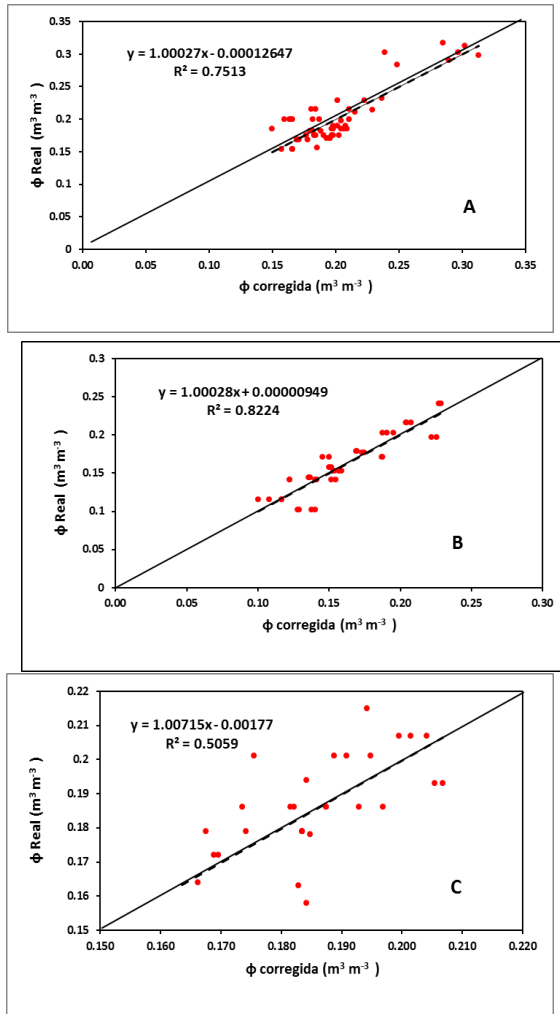


Figura 2. Verificación de la exactitud de la humedad volumétrica con el modelo generado por la calibración de toda la serie de datos. A Suelo franco. B Suelo Franco Arcilloso. C Suelo Franco arenoso.

4. CONCLUSIONES

En este estudio, se determinaron las ecuaciones de calibración para el sensor CS616 en tres suelos característicos ultisoles de Sabana, que pueden reemplazar las ecuaciones de fábrica, aumentando la precisión de las lecturas de humedad del suelo, contribuyendo así a un manejo más eficiente del agua

de riego y con la agricultura sostenible. Las ecuaciones generadas con los datos antes de la calibración sobreestimaron la humedad volumétrica en los suelos Franco arcillosos y la subestimaron en los Francos y Francos arenosos. La correlación entre los valores de humedad volumétrica del suelo corregidos con las ecuaciones de calibración obtenidas y los de la humedad volumétrica del suelo obtenida por el método estándar fue significativa, con coeficientes de determinación entre 0,50 y 0,82. Los valores de RMSE para el sensor CS616 antes y después de la calibración variaron de 0,119 a 0,012 $m^3 m^{-3}$. Los índices de Willmott (d) y de rendimiento(c) indican que la ecuación de más ajuste se encontró en el suelo Franco arcilloso.

Conflictos de intereses

Los autores firmantes del presente trabajo de investigación declaran no tener ningún potencial conflicto de interés personal o económico con otras personas u organizaciones que puedan influir indebidamente con el presente manuscrito

Contribuciones de los autores

Preparación y ejecución: JAG, MXC; Desarrollo de la metodología: JAG, MXC, AZG; Concepción y diseño: JAG, AZG; Edición del artículo: JAG, MXC, AZG; Supervisión del estudio: JAG.

5. REFERENCIAS

- Abanto-Rodríguez, C., Farias-Araújo, W., Cardoso-Chagas, P., Alves Chagas, E., Da Silva Siqueira, R., Monteiro N, J. L., Barbosa, S. M., Ferreira Melo, V., & Maffei-Valero, M. A. (2020). Calibración De Sensores De Reflectometría De Dominio De Frecuencia Para Estimar La Humedad En Un Suelo Geric Xanthic Ferralsol. *Bioagro*, 32 (2): 123-130.
- Barbosa, S. M. (2015). Condicionamento físico hídrico do solo como potencializador do crescimento inicial do cafeeiro. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras, UFLA, MG. 67 p. Accesado 10/02/2020. <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/8483>.
- Blonquist, J., Jones, S., & Robinson, D. (2005). Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors: Part 2. Evaluation of seven

- sensing systems. *Vadose Zone Journal*, 4, 1059–1069. <http://doi.org/10.2136/vzj2004.0141>.
- Bruno, R. D., Da Rocha, H. R., De Freitas, H. C., Goulden, M. L., & Miller, S. D. (2006). Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. *Hydrol. Proc.* 20: 2477-2489. <https://doi.org/10.1002/hyp.6211>.
 - Caicedo-Rosero, L. C., Méndez-Ávila, F. J., Gutiérrez-Zeferino E. & Flores-Cuautle J. J. A. (2021). Medición de humedad en suelos: Revisión de métodos y características. *Publicación Semestral Pädi*, 9(17):1–8. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9i17.7035>.
 - Camargo, A.P. & Sentelhas, P.C. (1997). Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5(1): 89-97.
 - Campbell Scientific (1996). CS615 Water Content Reflectometer. Instruction manual. Ver. 8221-07, Rev. 10/96. Campbell Scientific Inc. Logan, UT, EEUU.
 - Campbell Scientific Inc. (2004). CS616 and CS625 water content reflectometers instruction manual. Campbell Scientific Inc., Logan, UT.
 - Dasberg, S. & Hopman J. W. (1992). Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1341-1345. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600050002x>.
 - Fares, A., Abbas, F., Domingos, M. & Mair, A. (2011) Improved calibration functions of three capacitance probes for the measurement of soil moisture in tropical soils. *Sensors*, 11(5), pp. 4858-4874. DOI: 10.3390/s110504858.
 - Gil-Marín, J. A., Montaña-Mata, N. J & Pérez-Córcega, G. J. (2021). Requerimiento hídrico y edad de trasplante de la berenjena *Solanum melongena L.* bajo riego por goteo en el Valle del Rio Guarapiche. *Agronomía Tropical*, 71:1-10.
 - Herkelrath, W. N., Hamburg, S. P., & Murphy, F. (1991) .Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resource. Res.* 27: 857-864. <https://doi.org/10.1029/91WR00311>.
 - Irmak, S. & A. Irmak. (2005). Performance of frequency-domain reflectometer, capacitance, and pseudo-transit time-based soil water content probes in four coarse-textured soils. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(6): 999-1008.
 - Jackson, S. H. (2004). In situ calibration of time domain reflectometry sensors in multiple soils. *Comm. Soil Sci. Plant. Anal.*, 35: 865-878. <https://doi.org/10.1081/CSS-120030363>.
 - Jiménez, A. A. C., Almeida, C. D. G. C, Santos Júnior, J. A. & Dos Santos, C. S. (2020). Calibration of two capacitive soil moisture sensors in Ultisol. *DYNA*, 87(213), pp. 75-79, April - June. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n213.75361>.
 - Kizito, F., Campbell, C. S., Campbell, G. S., Cobos, D. R., Teare, B. L., & Carter, B. (2008). Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, 352, 367–378. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.01.021.
 - López-Seijas, T., Ustariz, A., Cisnero-Zayas, E., Rodríguez-González, A., Herrera-Puebla, J., & González-Robaina, C.F. (2018). Calibración de sondas electromagnéticas para estudios de riego en diferentes zonas agrícolas. *Revista Ingeniería Agrícola*, ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761, Vol. 8, No. 3 (julio-agosto-septiembre), pp. 31-39. Recuperado de <https://rcta.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/974>.
 - Miyamoto, T. & J. Chikushi. (2000). Relations between soil water content and apparent dielectric constant evaluated by dielectric mixing models. *Trans. Jpn. Irrigation, Drainage Reclamation Eng.*, 206: 57-62.
 - Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (1996). *Atlas del Estado Monagas*. Caracas, Venezuela: Ministerio del Poder Popular Para El Ambiente. 78 pp.
 - Qi, Z. & Helmers, M.J. (2010). The conversion of permittivity as measured by a PR2 capacitance probe into soil moisture values for Des Moines loess soils in Iowa. *Soil Use and Management*, 26(1): 82-92. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00256.x>.
 - Rüdiger, C., Western, A. W, Walker, J. P, Smith A. B, Kalma, J. D & Willgoose G. R. (2010). Towards a general equation for frequency domain reflectometers. *J. Hydrol.* doi:10.1016/j.jhydrol.2009.12.046.

- Schaap, M. G., De Lange, L., & Heimovaara, T. J. (1996). TDR calibration of organic forest floor media. *Soil Technol.* 11: 205-217. [https://doi.org/10.1016/S0933-3630\(96\)00128-6](https://doi.org/10.1016/S0933-3630(96)00128-6).
- Seyfried, M. S., & Murdock, M.D. (2001). Response of a new soil water sensor to variable soil, water content, and temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 28–34. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.65128x>.
- Silva, B. M., Oliveira, G. C., Serafim, M. E., Silva Júnior, J. J., Colombo, A. & Lima, J. M. I. (2012). Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. *Pesq. Agropec. Bras.*, 47(2): 277-286.
- Silva Junior, J.J., Colombo, A., Scalco, A.S., Silva, B.M. & Lima, P.T. (2013). Calibração de sondas de capacitância para determinação de umidade em Latossolo Vermelho Distroférico. *Irriga, Botucatu*, 18(4): 743-755. doi = 10.15809/irriga.2013v18n4p743.
- Stockle, C.O., Kjelgaard, J. & Bellocchi, G. (2004). Evaluation of estimated weather data for calculating Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Irrigation Science*, 23(1): 39-46. DOI: 10.1007/s00271-004-0091-0.
- Suzuki, S, Hirota T. & Iwata Y.(2012). Experimental Study on Sample Size for Laboratory Calibration Tests of Commercial Dielectric Soil Water. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 46(1), 73-79. <https://doi.org/10.6090/jarq.46.73>.
- Urriola Barrios, P. L. (2007). *La Agricultura En El Estado Monagas: el Ayer, El Hoy Y El Mañana*. Volumen 02. Cumaná, Venezuela. Universidad de Oriente.
- Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content measurement in coaxial transmission line. *Water Resour. Res.* 16: 574-582. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>.
- Varble, J. L. & Chávez, J. L. (2011). Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. *Agricultural Water Management*, 101(1): 93-106, 2011. DOI: 10.1016/j.agwat.2011.09.007.
- Vera, J., Abrisqueta, J. M., Quezada, R., Munguía, J., Callejas, R., Gálvez, R. A., Abrisqueta, I., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2016): Calibración de sondas capacitivas para estimar la humedad del suelo en condiciones de campo: efecto de la pedregosidad. [en línea] 2016, Disponible en: www.plasticos-agricoles.com/wp-content/uploads/2016/06/Irrigation-07.pdf [Consulta: julio 08 2020].
- Walker, J. P., Willgoose, G. R. & Kalma, J. D. (2004). In situ measurement of soil moisture: a comparison of technique. *Journal of Hydrology*, 293(1-4):85-99. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.01.008.
- Western, A. W., & Seyfried, M. S. (2005). A calibration and temperature correction procedure for the water-content reflectometer. *Hydrological Processes*, 19:3785–3793. <https://doi.org/10.1002/hyp.6069>.
- Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, pp.184-194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>.
- Yu, C., W. Warrick, & M. H. Conklin. 1999. Derived functions of time domain reflectometry for soil moisture measurements. *Water Resour. Res.* 35: 1789-1796. <https://doi.org/10.1029/1999WR900025>.