

**Evaluación del desempeño de sensores de
capacitancia en el monitoreo de humedad en
suelos arenosos de Florida para optimizar el
uso de agua para riego**

Sara Gabriela Cornejo Zepeda

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano

Honduras

Noviembre, 2018

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Evaluación del desempeño de sensores de capacitancia en el monitoreo de humedad en suelos arenosos de Florida para optimizar el uso de agua para riego

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniera en Ambiente y Desarrollo en el Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Sara Gabriela Cornejo Zepeda

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2018

Evaluación del desempeño de sensores en el monitoreo de humedad en suelos arenosos de Florida para optimizar el uso de agua para riego

Sara Gabriela Cornejo Zepeda

Resumen. Los sistemas de riego están diseñados para maximizar la productividad de los cultivos y optimizar el uso de agua. Uno de los avances más prometedores son los sensores de capacitancia, con gran potencial para estimar el contenido volumétrico de agua (θ_v) del suelo. Se realizó un estudio para evaluar la exactitud de varios sensores de capacitancia y establecer ecuaciones de calibración. Se evaluaron 5 suelos arenosos (Pineda, Riviera, Astatula, Candler e Immokalee) divididos en dos profundidades (0 - 30 y 30 - 60 cm). Se usaron doce sensores de capacitancia (CS650, CS616, CS655, GS3, 10HS, 5TE, GS1, TDT-ACC-SEN-SDI, TDR315, TDR315S, TDR135L y Hydraprobe) conectado a un almacenador de datos CR1000X (Campbell Scientific). Se añadió agua de forma incremental para obtener un amplio intervalo θ_v . Se tomaron muestras de 450 cm³ y se secaron en un horno a 75 °C durante 48 h para la determinación de agua gravimétrica. Dichos resultados fueron multiplicados por la densidad aparente para determinar el θ_v y así obtener las ecuaciones de calibración. Los resultados indicaron que las ecuaciones estándar del fabricante son válidas para 5TE, TDR315L y GS1, los que obtuvieron mayor correlación, con un R² igual a 0.92; caso contrario para los sensores 10HS, GS3 e Hydraprobe. Se establecieron las ecuaciones de calibración específicas para cada suelo, permitiendo aumentar la exactitud en la lectura del sensor y la optimización en el uso de agua para riego.

Palabras clave: Contenido volumétrico de agua, sensores de capacitancia, suelos arenosos.

Abstract. Irrigation systems are designed to maximize crop productivity and improve water efficiency. One of the most recent innovations are the capacitance sensors, offering a great potential to estimate soil volumetric water content (θ_v). A laboratory study was conducted to evaluate the accuracy of several capacitance sensors and establish soil-specific equations. Five sandy soils were tested (Pineda, Riviera, Astatula, Candler and Immokalee) divided in two depths (0 - 30 and 30 - 60 cm). Readings were taken using twelve capacitance sensors [(CS650, CS616, CS655, GS3, 10HS, 5TE, GS1, TDT-ACC-SEN-SDI, TDR315, TDR315S, TDR135L and Hydraprobe) connected to a CR1000X datalogger (Campbell Scientific). Known amounts of water were added incrementally to obtain a broad range of θ_v . Small 450 cm³ samples were taken and dried in an oven at 75 °C for 48 h to determine the gravimetric water content. Gravimetric values were multiplied by the bulk density to determine the VWC used to obtain the soil-specific calibration equations. Results indicated that factory-supplied calibration equations performed well for some sensors, especially 5TE, TDR315L and GS1, with higher correlation with an R² equal to 0.92; that was not the case for 10HS, GS3 and Hydraprobe. Soil-specific calibration equations were established, these results allow to increase the accuracy of the sensor and the improvement of irrigation scheduling and water management.

Key words: Capacitance sensors, sandy soils, volumetric water content.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas.....	ii
Resumen.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA.....	4
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
4. CONCLUSIONES.....	21
5. RECOMENDACIONES	22
6. LITERATURA CITADA.....	23
7. ANEXOS	26

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Sensores disponibles en el mercado con las variables relacionadas al θ_v	4
2. Propiedades físicas de suelos comunes encontrados en plantaciones de cítricos en Florida.	6
3. Propiedades físicas de los suelos evaluados.....	11
4. Análisis comparativo de θ_v de sensores y por método gravimétrico: Coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (RMSE) y coeficiente de variación (CV) para cada sensor evaluado.....	12
5. Ecuaciones de calibración para los sensores evaluados en el suelo Immokalee.....	19
6. Error cuadrático medio (RMSE) de θ_v estimado por ecuaciones de calibración específicas.....	20

Figuras	Página
1. Sensores de capacitancia evaluados en la investigación.	5
2. Ubicación de los sitios de recolección de muestras de suelo.	5
3. Profundidades de suelo muestreadas.....	7
4. Diagrama de análisis de muestras.....	8
5. Procedimiento de adición y mezcla de agua a muestras de suelo.	9
6. Comparación de los resultados de θ_v obtenido entre el sensor con ecuación estándar y el obtenido por gravimetría para TDR315, TDR310S, TDT-ACC-SEN-SDI y TDR315L.....	13
7. Comparación de los resultados de contenido volumétrico de agua obtenido por el sensor con ecuación estándar y el obtenido por gravimetría para 5-TE, CS655 y GS1.	14
8. Comparación de los resultados de θ_v obtenidos entre los sensores con ecuación estándar y el obtenido por gravimetría para HydraprobeII y CS616.....	15
9. Comparación de los resultados de contenido volumétrico de agua entre el sensor con ecuación estándar y el obtenido por gravimetría para CS650, GS3 y10HS.....	16
10. Lectura de todos los sensores evaluados para el tipo de suelo Immokalee.	19

Anexos	Página
1. Foto de la recolección de la muestra de suelo Pineda.	26
2. Foto de muestras de suelo en horno de circulación forzada para su completo secado.	26
3. Foto del arreglo de las muestras en laboratorio.	27
4. Foto del método y materiales utilizados para el incrementar y homogenizar el contenido de humedad en las muestras de suelo.	27
5. Método de inserción del sensor 10HS en muestras y toma de datos.	28
6. Foto de muestras de suelo en horno para la determinación gravimétrica de humedad.	28
7. Ecuaciones de calibración.	29
8. Cálculo del incremento en porcentaje en la exactitud de los sensores a través de la ecuación de calibración.	33

1. INTRODUCCIÓN

El uso del agua para fines agrícolas representa alrededor del 70% del consumo mundial de este recurso (Franek, Koncagul, Connor y Hunzinker, 2015). La implementación de sistemas de riego es común en diversos sectores del área agrícola, sobre todo en países desarrollados, en los que más de 40% del área total cultivable está bajo algún tipo de sistema de irrigación (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2004). Indudablemente, la intensa y creciente demanda de agua por el sector agrícola puede crear una crisis en la disponibilidad del recurso hídrico en una determinada región.

El establecimiento y el monitoreo constante del riego en una producción agrícola es básico para evitar la falta o exceso de agua en los cultivos. Cualquiera de estos escenarios genera impactos negativos, tanto económicos como ambientales. El riego en exceso se traduce en un aumento de los costos de producción, erosión de las capas superiores de suelo, pérdida de nutrientes por lixiviación y la contaminación de acuíferos subterráneos por el movimiento de químicos solubles a través del suelo (Datta, Taghvaeian y Stivers, 2017). Además destaca el agotamiento de los recursos hídricos, lo cual puede provocar un aumento en la susceptibilidad de una región a sequías o incluso empeorar el estado de zonas bajo estrés hídrico. Por otro lado, la falta de irrigación resulta en una disminución en la producción, reduciendo los beneficios económicos percibidos por los productores y poniendo en riesgo la seguridad alimentaria de la zona.

El ahorro y la eficiencia deben plantearse como objetivos básicos a fin de mejorar la gestión de los recursos hídricos dentro de todos los sectores productivos. En regiones con escasa disponibilidad de agua, la demanda de ella por los sectores agrícolas e industriales debe ser estrictamente regulada con el fin de no afectar el desarrollo socio económico de dicha región. Por ello, se constituye fundamental el desarrollo e implementación de tecnologías apropiadas que permitan aumentar la eficiencia en el uso del agua que sustituyan la necesidad de implementar medidas restrictivas.

El agua es un factor limitante en los cultivos de cítricos en el Estado de Florida debido a la baja capacidad de retención de humedad de los suelos y la distribución no uniforme de precipitación durante el año. El establecimiento de sistemas de riego es una práctica que se vuelve casi obligatoria para asegurar rentabilidad de la producción. La eficiencia en el uso de agua se logra a través de la implementación de métodos que sean precisos para la programación y aplicación del riego.

Existen diferentes métodos y tecnologías que pueden aplicarse para mejorar la planeación y el manejo del recurso hídrico, ejemplos de estos incluyen la utilización de softwares para modelaciones agroclimáticas como CROPWAT y AquaCrop, ambos desarrollados por FAO. Éstos calculan el requerimiento de agua para riego basándose en información general sobre las condiciones del sitio como suelo, clima y cultivo. Sin embargo, los cálculos que se obtienen son una aproximación a los requerimientos reales del cultivo y se requiere de extensas bases de datos para incrementar la precisión de los resultados.

Una de las tecnologías más prometedoras y con gran potencial para incrementar la eficiencia en el manejo de agua para riego es el uso de sensores de capacitancia (Vaz, Jones, Meding y Tuller, 2013). Estos sensores proveen una medición precisa del porcentaje de humedad contenido en el suelo a través de un método indirecto. Las medidas obtenidas por los sensores son la respuesta a cierta propiedad del suelo relacionada al contenido del agua en él. Evett (2017) afirma que el establecimiento de una ecuación de calibración permite convertir esta medida obtenida por el sensor a una estimación del contenido volumétrico de agua (θ_v) en el suelo.

Los sensores de humedad miden la constante dieléctrica del suelo o permitividad relativa (ϵ), la cual es determinada a través del tiempo en el que un pulso electromagnético transita en el suelo. El tiempo de propagación de la onda en el suelo varía según el contenido de agua en él (Salgado, Romay, Zabala y Genova, 2012), lo cual permite correlacionar la constante dieléctrica con el contenido de humedad en el suelo. El rango de la constante dieléctrica comprende desde 1 en el aire hasta 80 en el agua. De acuerdo a Vaz et al. (2013) Para asegurar el funcionamiento apropiado de cada sensor, este debe calibrarse de acuerdo a las características específicas a cada tipo de suelo para la obtención de datos más precisos.

Los sensores utilizados para esta medición se conectan a un almacenador de datos el cual registra y almacena los datos obtenidos en campo. La información puede enviarse automáticamente de forma inalámbrica hacia un computador a través de antenas, o también conectando directamente el computador al almacenador de datos. Los datos obtenidos brindan ventajas directas a los productores ya que, teniendo información en tiempo real sobre las condiciones de humedad en el campo, se puede mejorar la eficiencia en la aplicación de riego, disminuyendo así el consumo de agua.

La medición de las propiedades físicas, químicas y mecánicas del suelo se han basado en mediciones eléctricas y electromagnéticas, ópticas y radiométricas, mecánicas, acústicas, neumáticas y electroquímicas (Adamchuka, Humme, Morgan y Upadhyayad, 2004). En el presente estudio se evaluaron sensores eléctricos y electromagnéticos debido a su amplio uso en la actualidad y se basan en los siguientes principios: Time Domain Reflectometry (TDR), Frequency Domain Reflectometry (FDR), Transmission Line Oscillation (TLO), Time-Domain Transmissometry (TDT) y Resistencia eléctrica.

Reflectometría del dominio de tiempo (TDR) es un método muy preciso y utilizado para estimar el θ_v en el suelo con base en las propiedades dieléctricas de este. De acuerdo al estudio realizado por Topp et al. (1980), existe una relación muy próxima entre el θ_v del agua en el suelo y la constante dieléctrica. El principio del método TDR se basa en la determinación de la velocidad de propagación y retorno (o reflejo) de una onda

electromagnética en un medio (Paltineanu y Starr, 1997). La presencia de agua en el suelo disminuye la velocidad a la que viaja la onda electromagnética (Murillo, Villafañe, Basso y Trujillo, 2008) esto permite el registro de estos datos y consecuentemente la determinación de humedad.

Transmission Line Oscillation, TLO por sus siglas en inglés, es una técnica utilizada por algunos sensores de humedad, los cuales cuentan con dos varillas paralelas que conforman una línea abierta de transmisión. El tiempo de viaje de dos vías de las ondas electromagnéticas que son inducidas por el oscilador en las varillas varía de acuerdo al contenido de humedad en el suelo (Campbell Scientific Inc, 2011) estos resultados se traducen en un cambio en la constante dieléctrica.

Transmisiometría de dominio de tiempo (en inglés Time-Domain Transmissometry TDT) es una técnica análoga a TDR, la cual mide la transmisión de un pulso eléctrico a lo largo de un circuito cerrado. El principio de esta técnica se basa en la medición del tiempo que toma desde la aplicación del pulso de un extremo de la sonda al llegar al otro extremo de otra sonda (Blonquist, Jones y Robinson, 2005). La principal diferencia de TDR con TDT es que este último mide el tiempo de transmisión y no de reflexión como en TDR.

Por otro lado, otra variedad de sensores utiliza el método de reflectómetro de dominio de la frecuencia (en inglés Frequency Domain Reflectometry, FDR) el cual consiste en un oscilador de corriente alterna el cual genera junto al suelo un circuito eléctrico. Muñoz (2004) menciona que al insertar el sensor en el suelo, el oscilador produce valores de frecuencia que son transmitidos por las sondas del sensor los cuales varían de acuerdo a la cantidad de agua presente en el suelo.

Otro de los métodos utilizados para la determinación del θ_v en el suelo es la medición de la resistencia eléctrica. El principio se basa en la determinación de humedad a partir de la resistencia que ejerce al paso de la corriente eléctrica entre dos electrodos que están en contacto directo con el suelo (Robinson, Gardner y Cooper, 1999). Entre mayor es la cantidad de agua en el medio, más baja será la resistencia registrada.

Estas y muchas otras son las tecnologías desarrolladas que proponen la determinación en tiempo real y de manera continua de la humedad en el suelo a diferentes profundidades y con una mínima alteración de las condiciones naturales del suelo (Paltineanu et al., 1997). Sin embargo, los resultados de estos métodos son afectados por las características físicas del suelo como textura, salinidad, materia orgánica y profundidad (Andrade, Aguera, Upadhyaya, Jenkins y Rosa, 2001). Por tanto, se hace fundamental la evaluación del desempeño de los sensores de capacitancia en la determinación de humedad y con base en las características propias del suelo donde serán utilizados.

Los objetivos del estudio fueron:

- Evaluar la exactitud de los sensores de capacitancia para estimar la humedad del suelo.
- Determinar la ecuación de calibración para cada sensor de acuerdo al tipo y profundidad de suelo analizado.

2. METODOLOGÍA

Selección de sensores de capacitancia.

El estudio se realizó bajo condiciones controladas de laboratorio. Los sensores fueron conectados a un almacenador de datos modelo CR1000X (Campbell Scientific, Logan, UT) el cual emite la señal, provee el voltaje y colecta los datos para su almacenamiento. La comunicación entre los sensores y el almacenador de datos se obtiene a través del software *LoggerNet* 4.5. Doce modelos de sensores de capacitancia fueron evaluados en el presente estudio (Cuadro y Figura 1).

Cuadro 1. Sensores disponibles en el mercado con las variables relacionadas al θ_v .

Fabricante	Técnica de medición	Modelo	Sensor ^β	Variables de respuesta [‡]
Decagon	FDR	10HS	1	Voltaje
	FDR	GS1	2	Voltaje
	FDR	GS3	3	ε , EC_b , T
	FDR	5TE	4	ε , EC_b , T
Campbell Scientific	TLO	CS655	5	ε , EC_b , T
	TLO	CS650	6	ε , EC_b , T
	TLO	CS616	7	Período
Stevens	TDR	Hydraprobe	8	$\varepsilon, \varepsilon'$, EC_b , T
Acclima	TDT	TDT ACC-SEN-SDI	9	ε , EC , T
	TDR	TDR315L	10	ε , EC_b , EC_w , T
	TDR	TDR315	11	ε , EC_b , EC_w , T
	TDR	TDR310S	12	ε , EC_b, EC_w , T

[‡] ε , constante dieléctrica; EC_b , conductividad eléctrica; T , temperatura; EC_w conductividad eléctrica en los poros del suelo; ε' , constante dieléctrica imaginaria.

^βNúmero de identificación para Figura 1.



Figura 1. Sensores de capacitancia evaluados en la investigación.

Sitios de muestreo.

Se seleccionaron cinco tipos de suelo de textura arenosa que representan los suelos más frecuentes y característicos de las zonas productoras de cítricos del Estado de Florida. Basado en la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés), los suelos muestreados son: Riviera (RS), Pineda (PS), Immokalee (IS), Candler (CS), Astatula (AS). En la Figura 2 se muestra la localización geográfica de cada una de las fincas donde fueron colectadas las muestras.

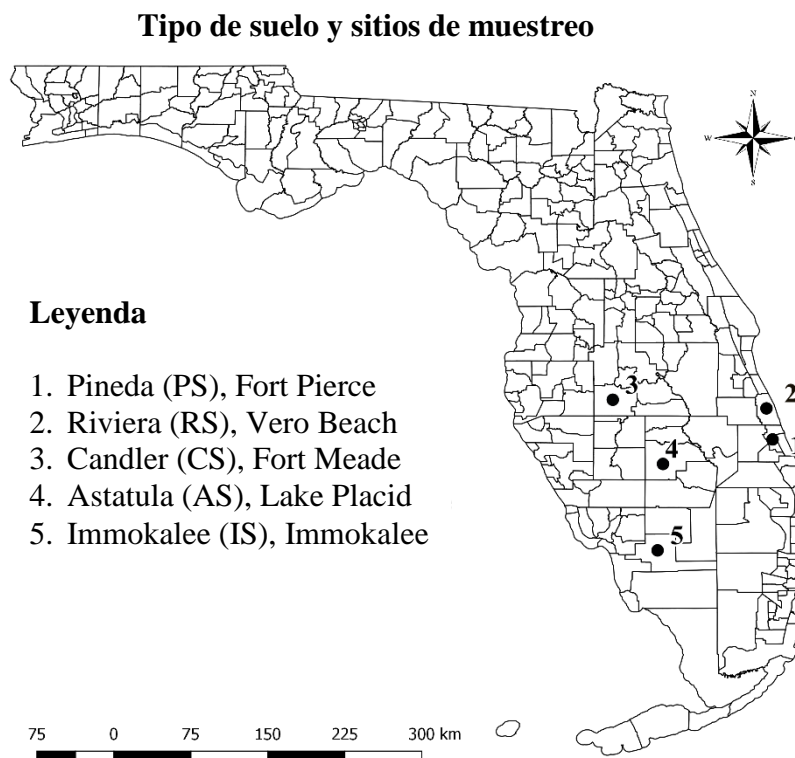


Figura 2. Ubicación de los sitios de recolección de muestras de suelo.

Los suelos evaluados en el estudio se distribuyen en diferentes partes del Estado de Florida. Estos se describen a continuación, de acuerdo a la clasificación y descripción realizada y obtenida en el sitio web del Departamento de Agricultura de Estados Unidos “Official Soil Series Descriptions and Series Classification”.

Los suelos Pineda y Riviera son muy similares, éstos se encuentran principalmente en planicies de inundación, están formados por capas de sedimentos marinos de tipo arenosos y limosos caracterizados por ser suelos profundos y mal drenados. Muchas áreas que corresponden a suelos Pineda y Riviera han sido drenadas y actualmente son utilizados para la producción de cítricos. En su estado original estos suelos se utilizan como pastizales y la vegetación natural consiste de especies de pino, ciprés, mirto y palmas.

Los suelos Candler y Astatula comparten ciertas similitudes, ambos son suelos muy profundos, excesivamente drenados y rápidamente permeables. Están formados por capas gruesas de sedimentos depositados por erosión eólica de sedimentos marinos arenosos. Utilizados principalmente para cítricos y pasturas.

Por otro lado, los suelos Immokalee se caracterizan por ser suelos muy profundos y mal drenados, están formados principalmente por sedimentos marinos arenosos. En condiciones naturales estos suelos son utilizados para la conservación de vida silvestre y forestaría. Bajo un manejo adecuado, estos suelos son ampliamente utilizados para el cultivo de cítricos, hortalizas y pastos.

Caracterización de las muestras de suelo.

Obreza y Collins (2008) realizaron una caracterización de las propiedades físicas y químicas de los suelos más comunes en Florida. En el Cuadro 2 se detallan las propiedades físicas de cada uno de los suelos evaluados, describiendo el porcentaje de cada una de las clases texturales que los componen, así como el porcentaje de materia orgánica.

Cuadro 2. Propiedades físicas de suelos comunes encontrados en plantaciones de cítricos en Florida.

Clasificación	Taxonomía	Textura (%)			Materia orgánica (%)
		Arena	Limo	Arcilla	
Astatula	Entisol	98.5	0.75	0.75	0.5 – 1.0
Candler	Entisol	97.5	1.25	1.25	0.5 – 1.0
Pineda	Espodosol	96.0	2.5	1.5	0.5 – 2.0
Riviera	Espodosol	96.5	2.0	1.5	0.5 – 2.0
Immokalee	Alfisol	98.5	1.0	0.5	1.0 – 2.0

Fuente: Obreza et al., 2008

Toma de muestras de suelo.

Se recolectaron dos muestras de cada tipo de suelo: una de la capa superior (primeros 30 cm) y otra de la capa inferior del mismo (30 - 60 cm) tal como se muestra en la Figura 3. Se seleccionaron estas profundidades ya que de acuerdo a Kadyampakeni (2017), el sistema radicular de un cítrico alcanza los 0.9 metros de profundidad. Mientras que los sistemas de riego tienen una capacidad de alcanzar una dispersión de humedad del 60% del total del área de enraizamiento. Es en esta profundidad del suelo en donde existe la mayor concentración de raíces y hay una mayor dinámica de absorción de humedad por parte de las mismas. Para la toma de muestras se inició con la limpieza del área superficial con un azadón, removiendo todo material orgánico no descompuesto. Posteriormente se colectó el suelo con palas, depositando cada muestra en barriles plásticos de 100 galones.

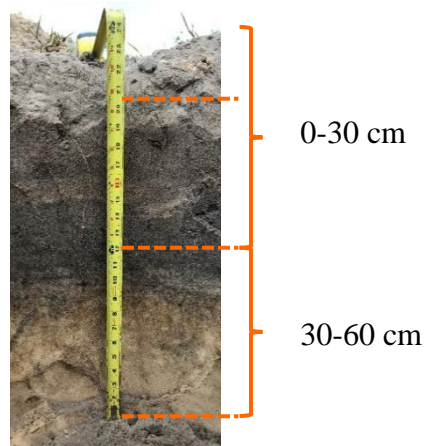


Figura 3. Profundidades de suelo muestreadas

Preparación de muestras de suelo.

Las muestras de suelo se colocaron en un horno de circulación forzada a 75 °C por 5 días para alcanzar un 0% de humedad. Se dividieron las muestras para la obtención de tres repeticiones de cada una (Figura 4). Cada una de éstas se depositó en cubetas de polietileno con capacidad de 5 galones cada uno y se compactaron ligeramente simulando la compactación original del sitio de muestreo.

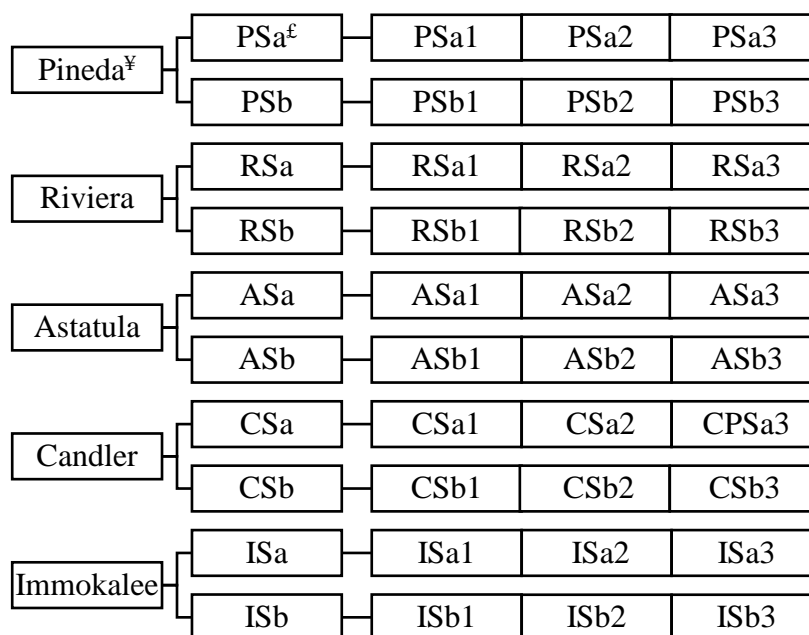


Figura 4. Diagrama de análisis de muestras

[¥]Pineda (PS), Riviera (RS), Astatula (AS), Candler (CS), Immokalee (IS): suelos muestreados.

[£]a: Horizonte superior; b: Horizonte inferior

Cálculo volumétrico inicial de agua.

Para la determinación del volumen de agua a agregar, con un incremento de gradual de 5% de humedad, se utilizaron las ecuaciones [1] y [2] propuestas por Schmugge, Jackson, y McKim (1980) que se describen a continuación. Así se determinó un aumento gradual de humedad en el suelo a cantidades de $0.16 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$.

$$\theta_v = \frac{(\theta_g) (\rho \text{ suelo})}{(\rho \text{ agua})} \quad [1]$$

$$\theta_g = \frac{m \text{ agua}}{m \text{ suelo seco}} \times 100 \% \quad [2]$$

Dónde:

m es masa

θ_v es el contenido volumétrico de agua

θ_g es el contenido gravimétrico de agua.

Sustituyendo la ecuación [2] en la ecuación [1] tenemos que:

$$m \text{ agua} = \frac{\frac{\theta_v}{100\%} * (\rho \text{ agua}) * m \text{ suelo}}{\rho \text{ suelo seco}} \quad [3]$$

$$\text{Volumen de agua} = \frac{m \text{ agua}}{\rho \text{ agua}} \quad [4]$$

Incremento gradual de humedad en el suelo.

La mezcla del contenido de agua determinado se logró vertiendo las 3 repeticiones de la muestra de suelo de acuerdo con su horizonte en un contenedor más grande, mezclándolo y posteriormente depositándolo en los contenedores plásticos de 5 galones (Figura 5). Esto fue repetido cinco veces para cada tipo de suelo, tomando lectura con cada uno de los sensores. Así se obtuvieron porcentajes de humedad desde 0, 5, 10, 15, 20 hasta 25% de humedad.



Figura 5. Procedimiento de adición y mezcla de agua a muestras de suelo.

Determinación gravimétrica de humedad.

El método gravimétrico para la estimación de humedad consiste en tomar una muestra de suelo, pesarla, colocarla a secar en horno y posteriormente volver a pesarla, expresando así el contenido de agua en unidades de masa. De manera alterna, al multiplicar el contenido gravimétrico de agua (θ_g) por la densidad aparente del suelo se obtiene θ_v (Reynolds, 1970).

La determinación gravimétrica de humedad se realizó de acuerdo a la metodología propuesta por Topp y Ferre (2002). Se pesaron cilindros de aluminio de 450 cm³ con y sin la muestra de suelo. Posteriormente se colocaron en un horno a una temperatura de 75 °C por 48 horas y se registró el peso final. Se utilizaron las ecuaciones [5] y [6] establecidas por Schmugge et al. (1980) para la determinación del contenido gravimétrico y volumétrico de agua.

$$\theta_g = \frac{(m \text{ suelo húmedo}) - (m \text{ suelo seco})}{m \text{ suelo seco}} \quad [5]$$

$$\theta_v = (\theta_g) (\rho \text{ suelo}) \quad [6]$$

Análisis estadístico.

Con el propósito de determinar la exactitud en la lectura de los sensores se utilizaron tres parámetros estadísticos: error cuadrático medio, coeficiente de determinación (R^2) y coeficiente de variación. Otros análisis estadísticos descriptivos (diagramas de dispersión y varianza) e inferenciales (t-test) fueron aplicados para examinar diferencias significativas entre las mediciones de los sensores y las mediciones por método gravimétrico.

Se realizó un análisis de regresión lineal bivariada para la obtención de la ecuación de calibración para cada sensor. Para comprobar la validez de las ecuaciones de calibración y determinar si existen diferencias significativas entre la ecuación estándar del sensor y la ecuación de calibración, se aplicó una ANDEVA unifactorial. Posteriormente se realizó una prueba *post hoc* Dunnett que permite comparar el valor de referencia tanto con los resultados del sensor y los obtenidos a través de la calibración. Todas las pruebas se realizaron con un $\alpha=0.05$ en los programas Excel 2013 y “Statistical Analysis System” (SAS® Versión 9.4).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización física de suelos.

Para la obtención de una descripción detallada y específica sobre las características físicas de las muestras, éstas fueron enviadas laboratorio para para la aplicación de distintos análisis. Se determinó la gravedad específica de partículas sólidas de acuerdo al método ASTM D854 y, utilizando el método descrito por ASTM D7263, se determinó la densidad de las partículas (Cuadro 3).

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) es una organización internacional que crea normas de consenso voluntarias. De acuerdo a las normas establecidas por ASTM (2018), el método ASTM D854 se basa en la determinación de la gravedad específica a partir un picnómetro mientras que el método ASTM D7263 calcula la densidad aparente mediante una balanza hidrostática.

Cuadro 3. Propiedades físicas de los suelos evaluados.

Muestra (ID)	Densidad aparente (g/cm ³)	Gravedad específica
PSa	1.65	2.63
PSb	1.56	2.62
RSa	1.54	2.65
RSb	1.51	2.64
ASa	1.49	2.64
ASb	1.52	2.63
CSa	1.51	2.66
CSb	1.54	2.64
ISa	1.38	2.58
ISb	1.37	2.63

Las densidades aparentes de los suelos muestreados se encuentran entre 1.38 - 1.65 g/cm³. La determinación de densidad aparente se realizó con la finalidad de transformar los datos obtenidos a partir del método gravimétrico en θ_v .

Evaluación de los sensores.

Los valores de θ_v medido por los sensores evaluados fueron comparados contra los resultados obtenidos a través de la determinación gravimétrica en laboratorio. Los resultados de las comparaciones estadísticas entre los diferentes sensores se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Análisis comparativo de θ_v de sensores y por método gravimétrico. Coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (RMSE) y coeficiente de variación (CV) para cada sensor evaluado.

Sensor	Técnica de medición	R^2	RMSE (m ³ m ⁻³)	CV
5-TE	FDR	0.92	0.026	20.45
10HS	FDR	0.81	0.041	32.17
CS616	TLO	0.86	0.032	25.46
CS650	TLO	0.86	0.035	27.66
CS655	TLO	0.90	0.029	22.65
GS1	FDR	0.92	0.026	20.48
GS3	FDR	0.72	0.049	39.16
Hydraprobe II	TDR	0.84	0.037	29.11
TDR310S	TDR	0.93	0.023	18.23
TDR315	TDR	0.91	0.028	22.58
TDR315L	TDR	0.92	0.026	20.89
TDT-ACC-SEN-SDI	TDT	0.90	0.029	23.28

De manera general el desempeño los sensores evaluados fue alto; algunos de ellos presentan coeficientes de determinación superiores al 0.90 lo que indica un buen ajuste del modelo y control del error experimental. Sin embargo, también se encontraron sensores que no tuvieron una ejecución tan eficiente para la determinación del θ_v , resultando en coeficientes de determinación bajos y con altos coeficientes de variación con respecto a los demás sensores.

Se reconoce una relación lineal entre θ_v obtenido a través de los sensores y a través del método por gravimetría. Los coeficientes de determinación superiores a 0.9, así como bajo error cuadrado medio se encontraron en los sensores TDR315S, TDR315L, GS1, 5-ET, TDR315, TDT-ACC-SEN-SDI y CS655. La distribución de los datos se observa en la Figuras 6 y 7.

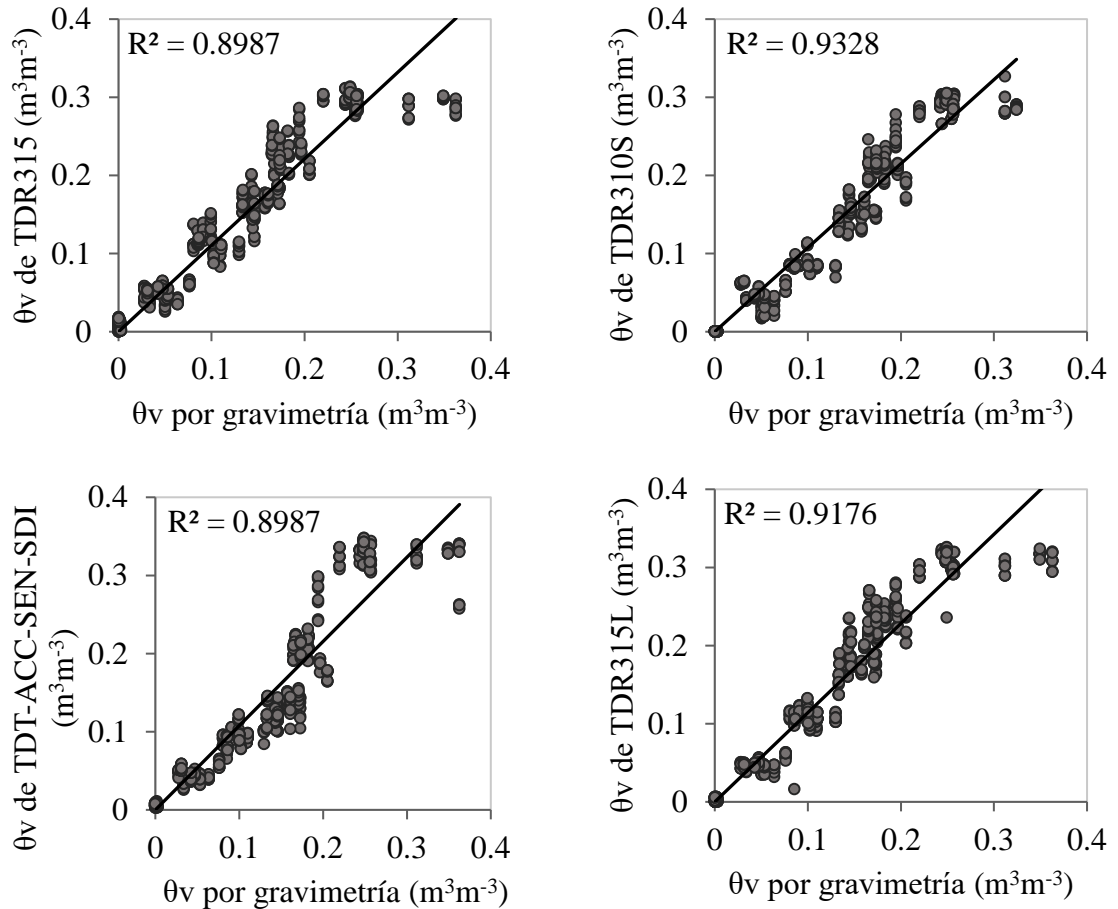


Figura 6. Comparación de los resultados de θ_v obtenido entre el sensor con ecuación estándar y el obtenido por gravimetría para TDR315, TDR310S, TDT-ACC-SEN-SDI y TDR315L.

Entre los sensores que presentaron una menor raíz del error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés) se encuentran aquellos que se basan en el método de medición por TDR. Todos los sensores del fabricante Acclima tuvieron un coeficiente de determinación igual o mayor a 0.90. De ellos, solo el sensor TDT-ACC-SEN-SDI utiliza un método diferente de medición que es “Time domain transmissometry”. Varble y Chávez (2011) explican que el desempeño de los sensores TDT y TDR es similar en suelos de diferentes texturas dado que estos métodos operan con frecuencias electromagnéticas similares.

Debido a que los sensores TDR310S y TDR315L son modelos recientes, no se encuentran disponibles investigaciones que evalúen el desempeño de los mismos. Sin embargo, la precisión establecida por el fabricante de los sensores es de $\pm 0.02 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para la determinación de θ_v , el cual resulta inferior comparado a los datos obtenidos en el presente estudio que indican un RMSE de $0.023 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para TDR310S y $0.026 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para el sensor TDR315L. Los resultados sugieren una sobreestimación con respecto al valor establecido por el fabricante.

Los resultados de RMSE para los sensores GS1 y TDR315 son $0.026 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ y $0.28 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ respectivamente. Adeyemi et al. (2016) determinaron en su estudio una RMSE de $0.03 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para ambos sensores antes mencionados. Dichos resultados fueron obtenidos a través de la evaluación del desempeño de los sensores en un suelo arenoso con características muy próximas a la de los suelos evaluados en el presente estudio.

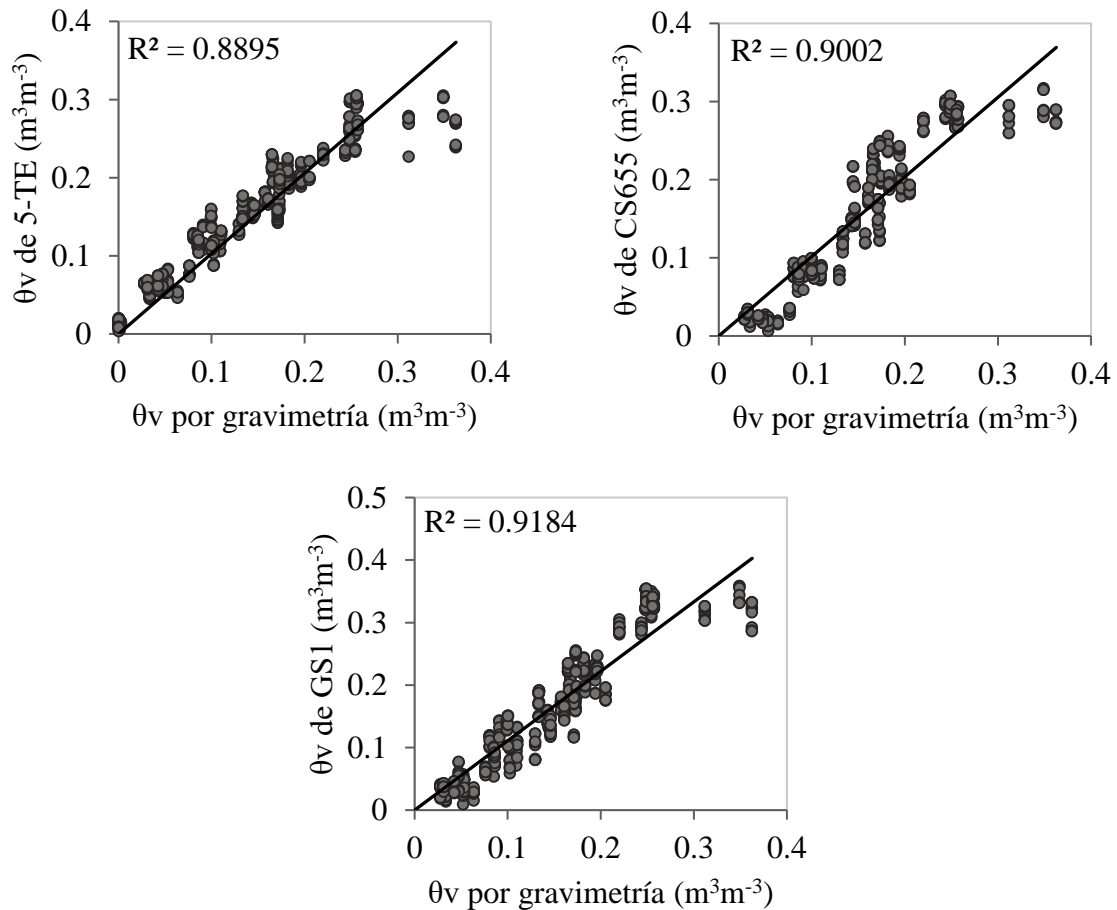


Figura 7. Comparación de los resultados de contenido volumétrico de agua obtenido por el sensor con ecuación estándar y el obtenido por gravimetría para 5-TE, CS655 y GS1.

De acuerdo al estudio realizado por Singh et al. (2017) en suelos francos, los sensores TDR315, CS655 y 5-ET presentaron un RMSE de 0.050 , 0.078 y $0.039 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ respectivamente, sobreestimando el θ_v presente en las muestras evaluadas en dicho estudio. Estos resultados comparados con los obtenidos en la presente investigación, indican que el sensor TDR315, CS655 y 5-ET, con la ecuación estándar, tienen un mejor desempeño en suelos de tipo arenosos presentando menor error cuadrado medio en éstos. Resultados similares fueron encontrados por Varble et al. (2011) con respecto al sensor 5-ET, las pruebas realizadas concluyeron que la ecuación estándar del sensor es bastante precisa en suelos arenoso-franco; presentando un RMSE de $0.025 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, dato muy próximo al RMSE

de $0.026 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ obtenido en el presente estudio. Mencionado autor también indicó que el sensor 5-ET, a mayor cantidad de agua, presenta una mayor dispersión en los datos. Situación similar se obtuvo con los resultados obtenidos, donde a θ_v mayores a $0.3 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ se denota una subestimación y mayor dispersión de los datos.

Los sensores con menor R^2 fueron CS650, CS616, Hydraprobe II, 10HS y GS3, en la Figuras 8 y 9 se observa la distribución de los datos en los cuales se observa una mayor dispersión de los mismos. Vaz et al. (2013) evaluaron los sensores Hydraprobe II, 10HS y CS616 en un suelo compuesto de 92.7% de arena, el cual se aproxima al porcentaje de arena que poseen los suelos evaluados en el presente estudio. Los RMSE que se obtuvieron en dicha investigación fueron $0.058 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para CS616, $0.018 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para Hydraprobe II y $0.077 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para 10HS. De manera general se difiere con los resultados del Hydraprobe II ya que, en el presente estudio, se obtuvo un RMSE mayor ($0.037 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$). Por otra parte, los sensores CS616 y 10HS presentaron datos menores a los antes mencionado, lo cual indica que la ecuación estándar se ajusta más a los suelos evaluados en la presente investigación.

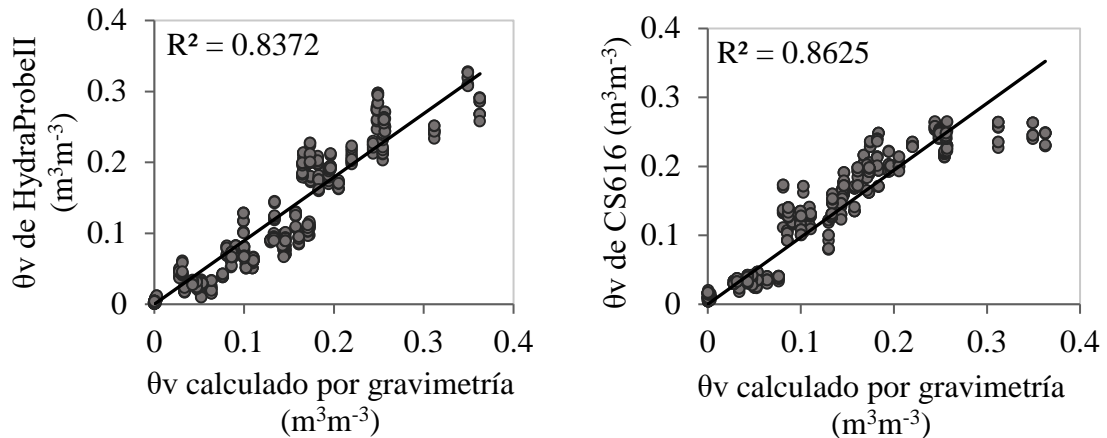


Figura 8. Comparación de los resultados de θ_v obtenidos entre los sensores con ecuación estándar y el obtenido por gravimetría para HydraprobeII y CS616.

De igual manera, en la investigación realizada por Singh (2017) los sensores CS616 e HydraprobeII dieron resultados bastante altos con respecto a RMSE determinada. El sensor CS616 también fue evaluado por Varble et al. (2011) dando como resultados una sobreestimación el contenido volumétrico de agua en $0.03 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para un suelo arenoso franco.

Varble et al. (2011) indicaron también que “para el sensor CS616, en suelos franco arcillo arenosos, se obtuvo una mayor exactitud a menor θ_v , pero no así en altos contenidos θ_v ” (pag. 97). Estos mismos resultados se obtuvieron para los suelos arenosos del presente estudio, en donde los datos presentan un menor ajuste a mayores θ_v (Figura 8).

El sensor que presentó un menor coeficiente de correlación es el GS3, con un R^2 de 0.72 (Figura 9). El RMSE calculado para el sensor fue de $0.049 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ que difiere a la precisión establecida por el fabricante de $\pm 0.03 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Resultados similares con un alto RMSE ($0.038 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) fueron determinados por Straten et al. (2014) en suelos arenosos con una fracción orgánica de 2%. Son et al. (2017) realizaron una evaluación del sensor GS3 en suelos francos, en éste se presentó una sobreestimación de θ_v presentando una RMSE de $0.028 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ indicando que la ecuación estándar del fabricante es más apropiada para suelos francos que suelos de textura arenosa.

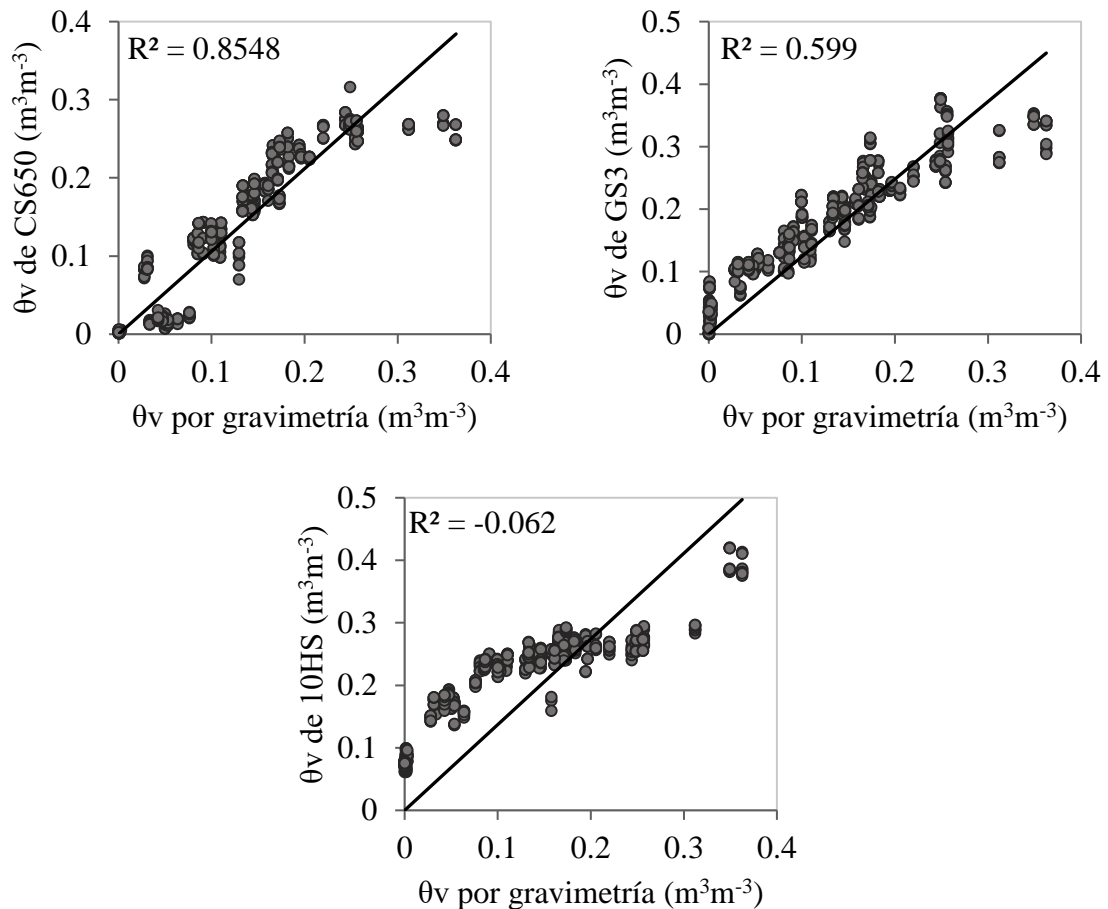


Figura 9. Comparación de los resultados de contenido volumétrico de agua entre el sensor con ecuación estándar y el obtenido por gravimetría para CS650, GS3 Y 10HS.

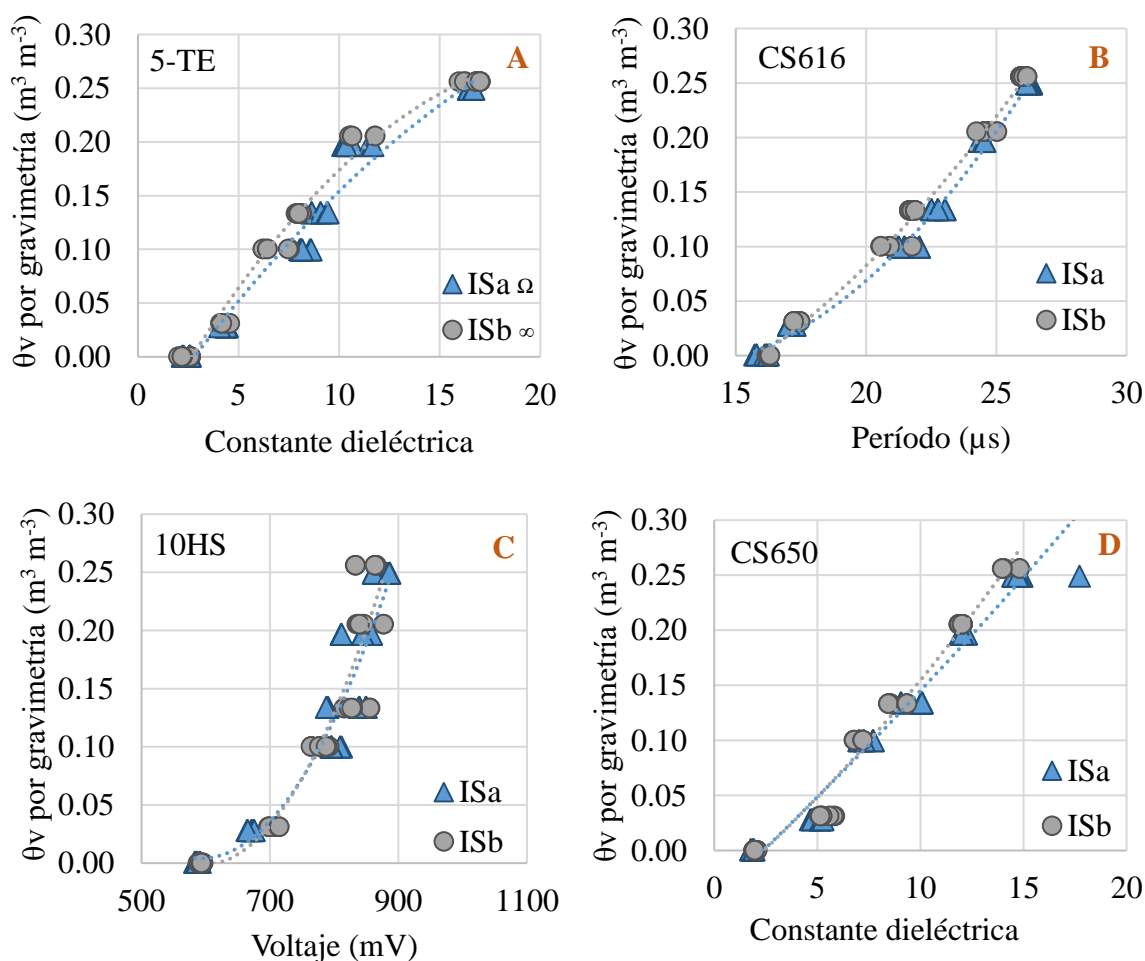
Calibración para cada tipo y profundidad de suelo.

Hignett y Evett (2008) indicaron que “para una gestión de riego efectiva basada en la determinación del contenido de agua en el suelo, la exactitud (no precisión) de las estimaciones del contenido de agua deben ser de entre 0.01 y $0.02 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ” (pag.4). De acuerdo a lo anterior, ninguno de los sensores evaluados se consideraría con la exactitud requerida para la determinación de contenido de agua a partir de la ecuación estándar del fabricante.

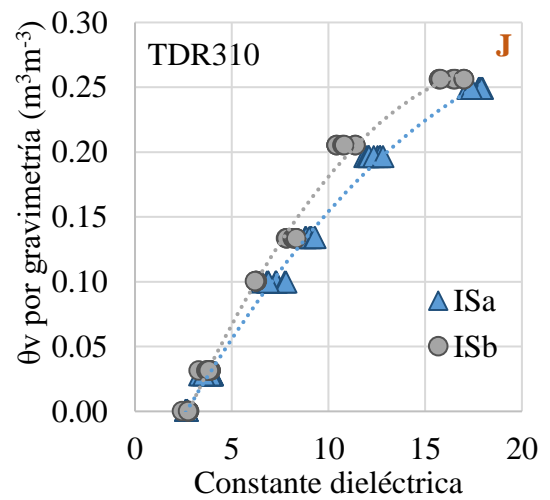
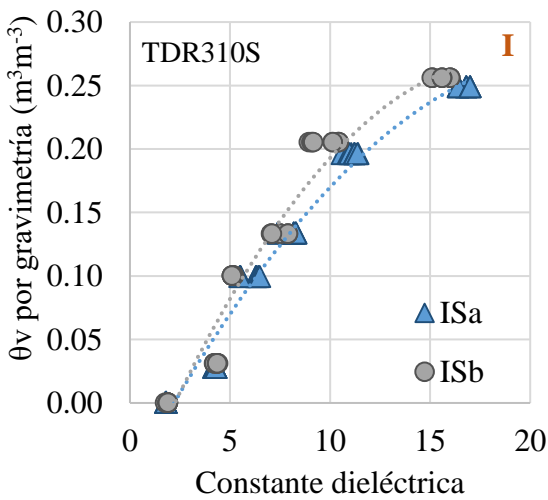
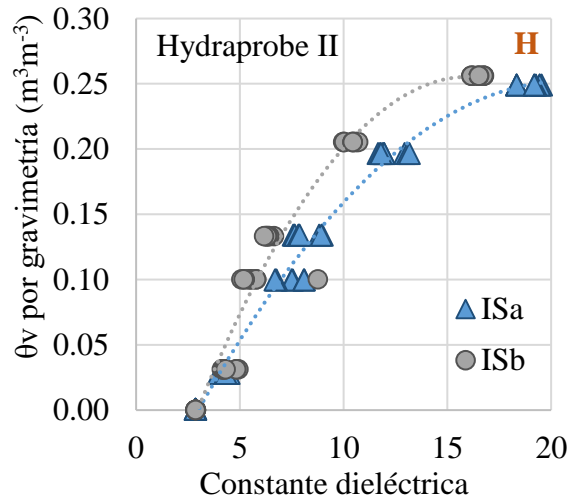
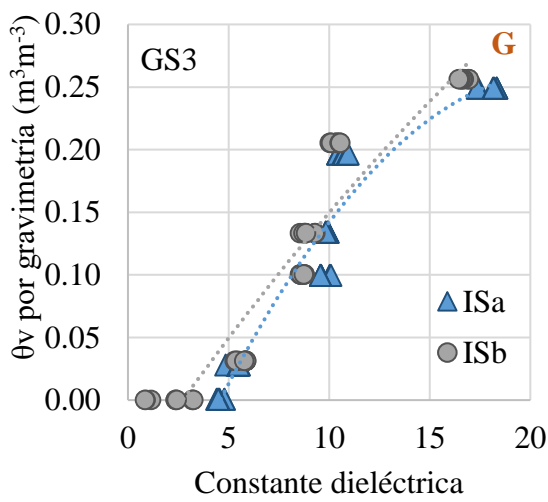
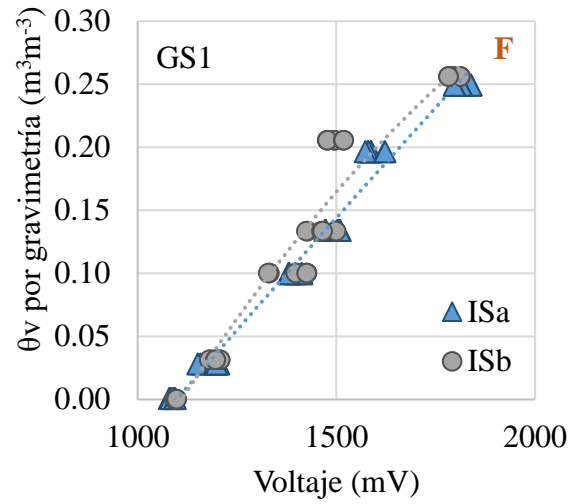
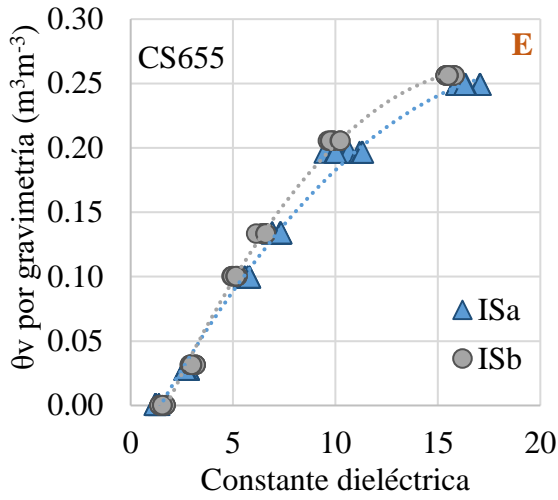
Con la finalidad de reducir al máximo los coeficientes de variabilidad y encontrar el error cuadrático medio más bajo se procedió a la determinación de las ecuaciones de calibración. Las ecuaciones se establecieron de acuerdo a los diferentes factores incluidos en la investigación que consisten en: sensor, tipo de suelo y profundidad del mismo. A través de un análisis de regresión, teniendo como variable independiente la constante dieléctrica, voltaje o período y como variable dependiente el θ_v determinado por gravimetría. Se determinaron los términos cuadráticos, lineales e independientes de cada ecuación.

Las lecturas de los sensores fueron tomadas a contenidos volumétricos de agua de manera incremental, obteniendo así un rango de valores que permite el establecimiento de un análisis de regresión, obteniendo así la calibración específica para cada suelo y profundidad (Figura 10). Todas las calibraciones presentaron un $R^2 > 0.79$, siguiendo una tendencia similar para todos los suelos y sensores; donde el mayor R^2 presentado fue de 0.99.

A continuación, se presenta cada una de las gráficas por las cuales se obtuvieron las ecuaciones de calibración para el suelo Immokalee, para los 12 sensores en las dos profundidades muestreadas. Dicho procedimiento se realizó de manera general para todos los sensores, en todos los suelos, a las dos profundidades muestreadas.



Cont. Figura 10



Cont. Figura 10

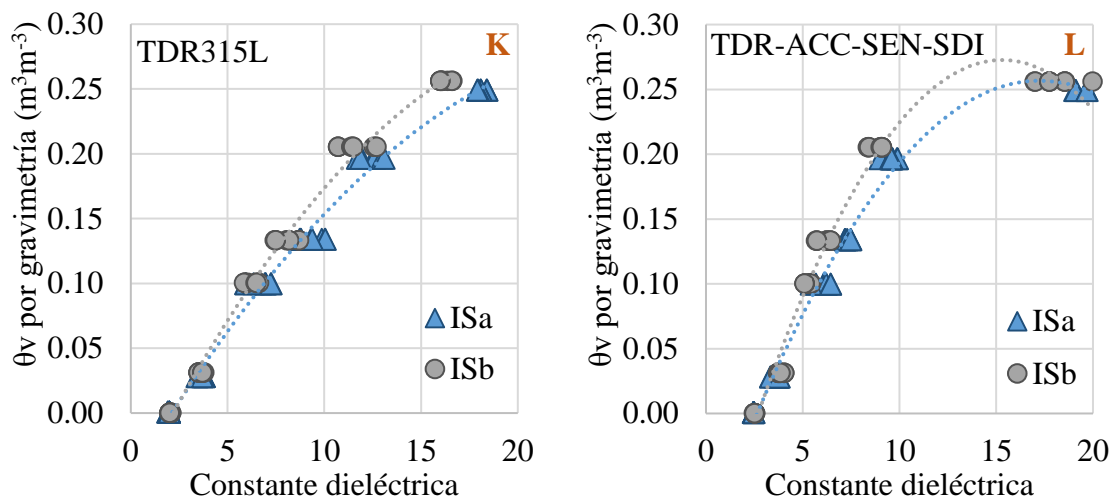


Figura 10. Lectura de todos los sensores evaluados para el tipo de suelo Immokalee.

^Ω ISa: Horizonte superior de suelo Immokalee

[∞] ISb: Horizonte inferior del suelo Immokalee

Los sensores con variable de respuesta en voltaje mostraron un comportamiento particular en el rango de valores de θ_v : el sensor 10HS (Figura 10C) presentó una pendiente de casi el doble comparada con el sensor GS1 (Figura 10E). Todos los sensores que determinan la constante dieléctrica siguieron una tendencia bastante similar, la cual puede observarse entre los sensores Hydraprove II y TDR315L (Figura 10H y 10K), así como también entre CS655 Y TDR310S (Figura 10E y 10I).

En el Cuadro 5 se presentan las ecuaciones de calibración correspondientes para cada uno de los sensores, en el suelo Immokalee para sus dos profundidades, presentando también el respectivo coeficiente de determinación (R^2).

Cuadro 5. Ecuaciones de calibración para los sensores evaluados en el suelo Immokalee.

Modelo	Tipo de suelo	Profundidad de suelo	Ecuación [¥]	R ²
5-TE	Immokalee	0 - 30	$-0.0004x^2 + 0.0271x - 0.0726$	0.96
		30 - 60	$-0.0008x^2 + 0.0335x - 0.0843$	0.98
10HS		0 - 30	$3E-06x^2 - 0.0033x + 0.9862$	0.90
		30 - 60	$3E-06x^2 - 0.0038x + 1.1166$	0.87
CS616		0 - 30	$0.0232x - 0.3776$	0.97
		30 - 60	$0.0252x - 0.4123$	0.98
CS650		0 - 30	$0.0196x - 0.0488$	0.97
		30 - 60	$0.0218x - 0.0584$	0.97
CS655		0 - 30	$0.0007x^2 + 0.0297x - 0.0418$	0.99
		30 - 60	$0.0011x^2 + 0.037x - 0.0616$	1.00
GS1	0 - 30	$0.0004x - 0.3882$	0.98	
	30 - 60	$-1E-07x^2 + 0.0008x - 0.7149$	0.94	

Modelo	Tipo de suelo	Profundidad de suelo	Ecuación [‡]	R ²
GS3		0 - 30	$-0.0009x^2 + 0.0398x - 0.1624$	0.93
		30 - 60	$0.0191x - 0.0463$	0.90
Hydraprobe II		0 - 30	$-0.0008x^2 + 0.0331x - 0.092$	0.99
		30 - 60	$-0.0015x^2 + 0.0478x - 0.1282$	0.96
TDR310S	Immokalee	0 - 30	$-0.0007x^2 + 0.0299x - 0.0629$	0.98
		30 - 60	$-0.001x^2 + 0.0368x - 0.0776$	0.96
TDR315		0 - 30	$-0.0006x^2 + 0.0281x - 0.0707$	1.00
		30 - 60	$-0.001x^2 + 0.0372x - 0.0954$	0.99
TDR315L		0 - 30	$-0.0005x^2 + 0.0251x - 0.0511$	0.99
		30 - 60	$-0.0006x^2 + 0.0298x - 0.0622$	0.99
TDT-ACC-SEN-SDI		0 - 30	$-0.0012x^2 + 0.0416x - 0.1013$	0.99
		30 - 60	$-0.0017x^2 + 0.0526x - 0.1296$	0.99

[‡] La variable x debe sustituirse por el valor de respuesta del sensor (Voltaje, período o constante dieléctrica). El resultado obtenido será igual a θ_v .

A partir de la determinación de las ecuaciones de calibración, se calculó el nuevo error cuadrado medio (Cuadro 6). Todos los sensores excepto 10HS y GS1 tuvieron un valor RMSE menor al presentado por la ecuación estándar del fabricante. Esto indica que, para los demás sensores, el establecimiento de una calibración tiene un notable impacto en mejorar la exactitud en la estimación del θ_v .

Cuadro 6. Error cuadrático medio (RMSE) de θ_v estimado por ecuaciones de calibración específicas.

Sensor	RMSE (m ³ m ⁻³)
5-TE	0.018
10HS	0.129
CS616	0.025
CS650	0.024
CS655	0.020
GS1	0.030
GS3	0.054
Hydraprobe II	0.024
TDR310S	0.019
TDR315	0.022
TDR315L	0.019
TDT-ACC-SEN-SDI	0.022

No se puede determinar con exactitud el factor que incidió en el incremento en el RMSE para los sensores 10HS y GS3; sin embargo, es importante destacar que dichos sensores fueron los que presentaron los mayores coeficientes de variación con respecto a los demás.

4. CONCLUSIONES

- Los sensores que presentaron un mejor desempeño en la estimación de θ_v a través de la ecuación estándar y, específicamente, para los suelos evaluados fueron TDR310S, TDR315L, GS1 y 5-TE. Dichos sensores presentaron los mayores ajustes al modelo y menor error cuadrado medio. De manera contraria, los bajos coeficientes de determinación presentados por los sensores GS3, 10HS e HydraproveII, indican la inexactitud de la ecuación estándar para la determinación de θ_v en los suelos arenosos evaluados.
- Las ecuaciones de calibración presentadas pueden sustituir a las ecuaciones estándar del fabricante, de acuerdo al sensor, tipo de suelo y profundidad, brindando una mayor precisión y datos más exactos sobre el contenido de humedad a tiempo real del suelo.
- Para dos de los sensores evaluados (10HS y GS3) no se obtuvieron buenos resultados a partir de la calibración realizada. Sin embargo, para los demás sensores se obtuvo una mejora en la estimación de θ_v con respecto a la ecuación estándar. Dicha mejora ayuda a obtener datos reales del contenido de humedad en el campo, permitiendo controlar de manera más eficiente la aplicación de riego optimizando así el uso del agua.
- Para los suelos arenosos de Florida evaluados, las ecuaciones de calibración pueden aplicarse con una exactitud aproximada de $0.018 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para el sensor 5-TE y de $0.019 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para los sensores TRD310S y TDR315L, los cuales presentaron un mejor desempeño general en la determinación de humedad.

5. RECOMENDACIONES

- Evaluar los sensores en condiciones de campo para incluir la variabilidad climática, las condiciones geológicas y el contenido de materia orgánica de cada sitio como factores de influencia en el desempeño de los mismos.
- Ejecutar investigaciones posteriores con otros sensores comerciales distintos a los evaluados en la presente investigación, valorando su desempeño en suelos que posean diferentes porcentajes de materia orgánica ya que es otro de los aspectos que tiene alta influencia y que no se estimó en el estudio.
- Realizar la recolección de muestras para suelos de textura no arenosa a partir de barrenos y equipo especializado que evite la alteración en la estructura natural del suelo, ya que este factor puede incidir en el desempeño del sensor.

6. LITERATURA CITADA

- Adamchuka, V., Humme, J., Morgan, M., y Upadhyayad, K. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(1), 71-91.
- Adeyemi, O., Norton, T., Grove, I., y Peets, S. (2016). Performance Evaluation of Three Newly Developed Soil Moisture Sensors. *International Conference of Agricultural Engineering*. Aarhus.
- Andrade, P., Aguera, J., Upadhyaya, S., Jenkins, B., y Rosa, U. (2001). Evaluation of dielectric-based moisture and salinity sensor for in situ applications. *ASAE Meeting*. California: American Society of Association Executives.
- American Society for Testing and Materials. (Agosto de 2018). Standards & Publications: ASTM. Obtenido de ASTM international sitio Web : <https://www.astm.org/Standard/standards-and-publications.html>
- Bilskie, J. (2001). *Soil water status: content and potential*. Utah, United States of America: Campbell Scientific.
- Blonquist, J., Jones, S., y Robinson, D. (2005). A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics. *Journal of Hydrology*, 223(3-4), 235-245.
- Campbell Scientific Inc. (2011). *CS650 and CS655 water content reflectometers, user manuals*. Utah, United States of America: Campbell Scientific, Inc. Obtenido de <https://s.campbellsci.com/documents/es/manuals/cs650.pdf>
- Datta, S., Taghvaeian, S., y Stivers, J. (2017). *Understanding Soil Water Content and Thresholds for Irrigation management*. Oklahoma: Oklahoma State University.
- Evet, S. (2017). Soil Moisture Sensing: Comparing the Technologies. *Irrigation TODAY*, 1(3), 14.
- Fares, A., Safeeq, M., y Jenkins, D. (Octubre de 2009). Adjusting temperature and Salinity Effects on Single Capacitance Sensors. *Pedosphere*, 19(5), 588-596. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002016009601533#bbib16>
- Franek, A., Koncagul, E., Connor, R., y Hunzinker, D. (2015). Agua para un mundo sostenible: Datos y Cifras. Perusa, Italia: UNESCO.

- Geesing, D., Bachmaier, M., y Schmidhalter, U. (2004). Field calibration of a capacitance soil water probe in heterogeneous fields. *Australian Journal of Soil Research*, 289-299.
- Hignett, C., y Evett, S. (2008). Field estimation of soil water content: A practical guide to methods, instrumentation and sensor technology. Viena: International Atomic Energy Agency. Obtenido de: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/079/39079658.pdf
- Iwata, Y., Miyamoto, T., Kameyama, K., y Nishiya, M. (Noviembre de 2017). Effect of sensor installation on the accurate measurement of soil water content. *European Journal of Soil Science*, 68, 817-828. Obtenido de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ejss.12493/abstract>
- Lim, J., Shin, M., Son, J., Song, J., Cho, K., Lee, S. y Cho, J. (2017). Evaluation of soil pore-water salinity using a Decagon GS3 sensor in saline-alkali reclaimed tidal lands. *Computers and Electronics in Agriculture*(132), 49–55.
- Muñoz, R. (2004). *Soil Moisture Sensor Introduction*. Florida: University of Florida. Obtenido de <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/FILES/AE/AE26600.pdf>
- Murillo, J., Villafañe, R., Basso, C., y Trujillo, A. (2008). *Evaluación de un equipo de reflectometría de dominio temporal (TDR) para registros de humedad en un suelo franco*. Universidad Central de Venezuela.
- Obreza, T., y Collins, M. (2008). *Common Soils Used for Citrus Production in Florida*. University of Florida, IFAS Extension .
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2004). *Agricultura Mundial: hacia los años 2015/2030*. Recuperado en Enero de 2018, de <http://www.fao.org/docrep/004/y3557s/y3557s00.htm#TopOfPage>
- Paltineanu, I., y Starr, J. (1997). Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. *61*, 1576-1585.
- Reynolds, S. (1970). The gravimetric method of soil moisture determination. *Journal of Hydrology*(11), 258-273.
- Robinson, D., Gardner, C., y Cooper, J. (1999). Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity. *Journal of Hydrology*, 198-221.
- Salgado, H., Romay, C., Zabala, S., y Genova, L. (2012). *Calibración de campo de un sensor dieléctrico para suelos en la Provincia de Buenos Aires*. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires. Obtenido de http://www.riego y fertirriego.com.ar/VI_Jornadas/VI_JARF_TrabajosCompletos/Salgado.pdf

- Schmugge, T., Jackson, T., y McKim, H. (Diciembre de 1980). Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resources Research*, 16(6), 961-979.
- Shukla, A. (September de 2014). Soil Moisture Estimation using Gravimetric Technique and FDR Probe Technique: A Comparative Analysis. *American International Journal of Research in Formal, Applied & Natural Sciences*, 1(8), 89-92.
- Singha, J., Lo, T., Rudnick, D., Dorr, T., Burr, C., Werle, R., y Muñoz-Arriola, F. (2017). Performance assessment of factory and field calibrations for electromagnetic sensors in a loam soil. *Agricultural Water Management*, 87-98.
- Son, J., Shin, W., y Cho, J. (2017). Laboratory and Field Assessment of the Decagon 5TE and GS3 Sensors for Estimating Soil Water Content in Saline-Alkali Reclaimed Soils. *Communications in soil science and plant analysis*, 48(19), 2268–2279.
- Starr, J., Timlin, D., Downey, P., y McCann, I. (2009). Laboratory evaluation of dual-frequency multisensor capacitance probes to monitor soil water and salinity. *Irrig Sci*, 393-400. doi:10.1007/s00271-009-0154-3
- Straten, G., Vos, A., Vlaming, R., y Oosterbaan, R. (2014). Dielectric sensors in an automated facility for testing salt tolerance of irrigated field crops. *International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering*. Beijing.
- Topp, G., y Ferre, T. (2002). The Soil Solution Phase. En J. Dane, G. Topp, & G. Campbell, *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods* (págs. 417-545). Science Society of America.
- Topp, G., Davis, J., y Annan, A. (June de 1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), 574-582. Obtenido de: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR016i003p00574/epdf>.
- Varble, J., y Chávez, J. (2011). Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. *Agricultural Water Management*(101), 93–106.
- Vaz, C., Jones, S., Meding, M., y Tuller, M. (Mayo de 2013). Evaluation of Standart Calibration Functions for Eight Electromagnetic Soil Moisture Sensors. *Vadose Zone*.

7. ANEXOS

Anexo 1. Foto de la recolección de la muestra de suelo Pineda.



Anexo 2. Foto de muestras de suelo en horno de circulación forzada para su completo secado.



Anexo 3. Foto del arreglo de las muestras en laboratorio.



Anexo 4. Foto del método y materiales utilizados para el incrementar y homogenizar el contenido de humedad en las muestras de suelo.



Anexo 5. Método de inserción del sensor 10HS en muestras y toma de datos.



Anexo 6. Foto de muestras de suelo en horno para la determinación gravimétrica de humedad.



Anexo 7. Ecuaciones de calibración.

Modelo	Tipo de suelo	Profundidad de suelo	a	b	c	R²
5-TE	Astatula	0 - 30	-0.0007	0.0306	-0.0654	0.98
		30 - 60		0.0226	-0.0473	0.94
	Candler	0 - 30	0.0004	0.0159	-0.0264	0.93
		30 - 60	0.0004	0.0151	-0.0318	0.94
	Pineda	0 - 30	0.0011	0.01	-0.0225	0.97
		30 - 60		0.0252	-0.0648	0.97
	Riviera	0 - 30		0.0202	-0.0392	0.98
		30 - 60		0.0194	-0.0293	0.98
	Immokalee	0 - 30	-0.0004	0.0271	-0.0726	0.96
		30 - 60	-0.0008	0.0335	-0.0843	0.98

Modelo	Tipo de suelo	Profundidad de suelo	a	b	c	R²
10HS	Astatula	0 - 30	2.0E-06	-0.0015	0.3451	0.90
		30 - 60	3.0E-06	-0.0033	0.9974	0.86
	Candler	0 - 30	2.0E-06	-0.0017	0.4309	0.79
		30 - 60	3.0E-06	-0.0034	1.0205	0.87
	Pineda	0 - 30	7.0E-07	-0.0003	-0.073	0.99
		30 - 60	7.0E-07	0.0004	-0.0569	0.92
	Riviera	0 - 30	3.0E-06	0.0033	0.9585	0.81
		30 - 60	1.0E-06	0.0009	0.1272	0.80
	Immokalee	0 - 30	3.0E-06	0.0033	0.9862	0.90
		30 - 60	3.0E-06	-0.0038	1.1166	0.87

Modelo	Tipo de suelo	Profundidad de suelo	a	b	c	R²
CS616	Astatula	0 - 30	0.0006	-0.0062	-0.0367	0.96
		30 - 60	0.0026	-0.0854	0.7171	0.92
	Candler	0 - 30	0.0013	-0.0364	0.2672	0.89
		30 - 60	0.0016	-0.0416	0.2687	0.96
	Pineda	0 - 30	0.0014	-0.031	0.1481	0.85
		30 - 60	0.0036	-0.1221	1.0634	0.93
	Riviera	0 - 30	0.0018	-0.0555	0.4373	0.95
		30 - 60	0.0015	-0.0419	0.3169	0.91
	Immokalee	0 - 30		0.0232	-0.3776	0.97
		30 - 60		0.0252	-0.4123	0.98

Modelo	Tipo de suelo	Profundidad de suelo	a	b	c	R²	
CS650	Astatula	0 - 30		0.0151	0.0007	0.94	
		30 - 60	0.0008	0.0076	0.01	0.90	
	Candler	0 - 30			0.0156	-0.0015	0.90
		30 - 60	0.0006	0.0085	0.005	0.94	
	Pineda	0 - 30	0.0015	0.0009	0.0183	0.89	
		30 - 60	0.0017	-0.006	0.0313	0.94	
	Riviera	0 - 30			0.0169	-0.0214	0.95
		30 - 60			0.0164	-0.0028	0.88
	Immokalee	0 - 30			0.0196	-0.0488	0.97
		30 - 60			0.0218	-0.0584	0.97

Modelo	Tipo de suelo	Profundidad de suelo	a	b	c	R²
CS655	Astatula	0 - 30		0.0149	0.0083	0.92
		30 - 60	0.0006	0.0081	0.015	0.90
	Candler	0 - 30	-0.0007	0.0275	-0.0226	0.94
		30 - 60		0.0171	-0.0045	0.96
	Pineda	0 - 30		0.0244	-0.0245	0.95
		30 - 60		0.0208	-0.0207	0.94
	Riviera	0 - 30	-0.0003	0.0212	-0.0186	0.97
		30 - 60	-0.0004	0.0219	-0.0087	0.92
	Immokalee	0 - 30	-0.0007	0.0297	-0.0418	0.99
		30 - 60	-0.0011	0.037	-0.0616	1.00

Modelo	Tipo de suelo	Profundidad de suelo	a	b	c	R²	
GS1	Astatula	0 - 30	-4.0E-07	0.0014	-1.0537	0.98	
		30 - 60		0.0004	-0.4846	0.98	
	Candler	0 - 30			0.0004	-0.408	0.95
		30 - 60			0.0004	-0.3722	0.98
	Pineda	0 - 30	3.0E-07	-0.0003	-0.0012	0.96	
		30 - 60			0.0005	-0.5327	0.96
	Riviera	0 - 30	-2.0E-07	0.0009	-0.7506	0.98	
		30 - 60			0.0003	-0.3489	0.96
	Immokalee	0 - 30			0.0004	-0.3882	0.98
		30 - 60		-1.0E-07	0.0008	-0.7149	0.94

Cont. Anexo 7

Modelo	Tipo de suelo	Profundidad de suelo	a	b	c	R²	
GS3	Astatula	0 - 30	-0.0015	0.0468	-0.1455	0.93	
		30 - 60	0.0005	0.0175	-0.0573	0.87	
	Candler	0 - 30			0.0263	-0.0845	0.96
		30 - 60	0.001	0.0085	-0.0213	0.89	
	Pineda	0 - 30			0.0287	-0.0935	0.96
		30 - 60			0.0274	-0.0964	0.99
	Riviera	0 - 30	-0.0014	0.0485	-0.2247	0.97	
		30 - 60	-0.0009	0.0354	-0.1071	0.91	
	Immokalee	0 - 30	-0.0009	0.0398	-0.1624	0.93	
		30 - 60		0.0191	-0.0463	0.90	

Modelo	Tipo de suelo	Profundidad de suelo	a	b	c	R²
Hydraprobe II	Astatula	0 - 30	-0.0027	0.0601	-0.1251	0.90
		30 - 60	-0.0003	0.0236	-0.0237	0.83
	Candler	0 - 30	-0.0012	0.0395	-0.0825	0.91
		30 - 60	-0.001	0.0351	-0.0707	0.90
	Pineda	0 - 30	-0.0004	0.0311	-0.0694	0.97
		30 - 60	-0.0007	0.0342	-0.0742	0.96
	Riviera	0 - 30	-0.0011	0.0364	-0.0777	0.94
		30 - 60	-0.0013	0.0399	-0.0718	0.84
	Immokalee	0 - 30	-0.0008	0.0331	-0.092	0.99
		30 - 60	-0.0015	0.0478	-0.1282	0.96

Modelo	Tipo de suelo	Profundidad de suelo	a	b	c	R²
TDR310S	Astatula	0 - 30	-0.0008	0.028	-0.0285	0.98
		30 - 60		0.0188	-0.0151	0.93
	Candler	0 - 30	-0.0008	0.0295	-0.0376	0.96
		30 - 60	-0.0004	0.0233	-0.0271	0.98
	Pineda	0 - 30	-0.0011	0.0358	-0.0576	0.98
		30 - 60	-0.001	0.0336	-0.0568	0.98
	Riviera	0 - 30	-0.0006	0.027	-0.0431	1.00
		30 - 60	-0.0006	0.0259	-0.0257	0.96
	Immokalee	0 - 30	-0.0007	0.0299	-0.0629	0.98
		30 - 60	-0.001	0.0368	-0.0776	0.96

Modelo	Tipo de suelo	Profundidad de suelo	a	b	c	R²
TDR315	Astatula	0 - 30	-0.001	0.0329	-0.0511	0.95
		30 - 60	-0.0002	0.0224	-0.0309	0.86
	Candler	0 - 30	-0.0006	0.0276	-0.0471	0.94
		30 - 60	-0.0004	0.025	-0.0447	0.95
	Pineda	0 - 30		0.0238	-0.046	0.94
		30 - 60		0.0208	-0.0457	0.91
	Riviera	0 - 30	-0.0006	0.0272	-0.0556	0.98
		30 - 60	-0.0006	0.0278	-0.0422	0.95
	Immokalee	0 - 30	-0.0006	0.0281	-0.0707	1.00
		30 - 60	-0.001	0.0372	-0.0954	0.99

Modelo	Tipo de suelo	Profundidad de suelo	a	b	c	R²
TDR315L	Astatula	0 - 30	-0.0006	0.0251	-0.0322	0.97
		30 - 60	0.0007	0.0045	0.0167	0.90
	Candler	0 - 30	-0.0006	0.0263	-0.039	0.97
		30 - 60	-0.0001	0.0182	-0.0217	0.98
	Pineda	0 - 30	0.0003	0.0163	-0.0195	0.95
		30 - 60	0.0003	0.0143	-0.017	0.95
	Riviera	0 - 30	-0.0002	0.0199	-0.03	0.99
		30 - 60	-0.0003	0.0205	-0.0197	0.96
	Immokalee	0 - 30	-0.0005	0.0251	-0.0511	0.99
		30 - 60	-0.0006	0.0298	-0.0622	0.99

Modelo	Tipo de suelo	Profundidad de suelo	a	b	c	R²
TDT-ACC-SEN-SDI	Astatula	0 - 30	-0.0011	0.0352	-0.0556	0.92
		30 - 60	-0.0005	0.0276	-0.0399	0.95
	Candler	0 - 30	-0.0011	0.037	-0.0649	0.93
		30 - 60	-0.0006	0.0274	-0.0353	0.93
	Pineda	0 - 30	-0.0005	0.0328	-0.064	0.94
		30 - 60	-0.0002	0.023	-0.0315	0.89
	Riviera	0 - 30	-0.001	0.0349	-0.0656	0.97
		30 - 60	-0.001	0.0341	-0.053	0.94
	Immokalee	0 - 30	-0.0012	0.0416	-0.1013	0.99

30 - 60	-0.0017	0.0526	-0.1296	0.99
---------	---------	--------	---------	------

Anexo 8. Cálculo del incremento en porcentaje en la exactitud de los sensores a través de la ecuación de calibración.

Sensor	RMSE (m ³ m ⁻³) Estándar	RMSE (m ³ m ⁻³) Calibración	Diferencia	Incremento (%)
5-TE	0.026	0.018	0.008	30.77
CS616	0.032	0.025	0.007	21.88
CS650	0.035	0.024	0.011	31.43
CS655	0.029	0.02	0.009	31.03
GS1	0.049	0.03	0.019	38.78
Hydraprobe II	0.037	0.024	0.013	35.14
TDR310S	0.023	0.019	0.004	17.39
TDR315	0.028	0.022	0.006	21.43
TDR315L	0.026	0.019	0.007	26.92
TDT-ACC-SEN-SDI	0.029	0.022	0.007	24.14
Promedio				27.89