

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**



Determinación del contenido de agua de sustratos con sondas  
electromagnéticas

por:

**NEMESIO ATANACIO HIPOLITO**

**TESIS**

**presentada como requisito parcial para  
obtener el título de:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

Buenavista, Saltillo. Coahuila, México.

Junio, 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Determinación del contenido de agua de sustratos con sondas  
electromagnéticas

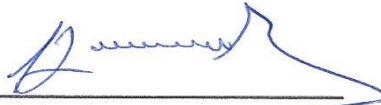
Por:  
**NEMESIO ATANACIO HIPOLITO**

TESIS

Que se somete a consideración del H. Jurado examinador como requisito parcial para  
obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

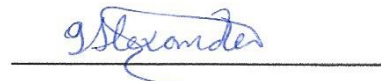
Aprobada por:



Dr. Alejandro Zermeño González  
Asesor principal



Dr. Armando Hernández Pérez  
Coasesor



Dr. José Alexander Gil Marín  
Coasesor externo



M.C. Aaron J. Meléndres Álvarez  
Coasesor



M.C. Sergio Sánchez Martínez  
Coordinador de la división de ingeniería

Buenavista, saltillo, Coahuila, México. junio 2022

## **AGRADECIMIENTO**

**A mi alma terra mater, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por completar mi formación y darme la oportunidad de tener una nueva familia.**

A los diferentes profesores que impartieron sus enseñanzas y conocimientos; especialmente a los docentes que se encuentra en el departamento de riego.

A mis padres Juan Atanacio y Oliva por ser los principales motores, por su comprensión, por ser pacientes, por tener la visión y deseo que estudiáramos; por no dejarme solo en las diferentes situaciones que me he enfrentado.

A mi hermano Arnulfo por ser un hombre íntegro y honorable, su apoyo y consejos fueron adecuados en momentos oportunos y a mi hermanita Celia por demostrarme de que se puede ser valiente.

Al Dr. Alejandro Zermeño por permitirme compartir sus conocimientos y sabidurías, por su tiempo y dedicación para poder realizar esta investigación.

Por los compañeros Juan Trinidad y Felipe Cruz por la colaboración en este trabajo, nunca podré pagar el tiempo y espacio que le dedicaron.

Al compañero Armando por compartir el trabajo.

Al Dr. Armando por permitir un espacio para poder realizar el trabajo, por la revisión del trabajo, también al Dr. Alexander sus aportaciones; sus consejos y ayuda fueron importantes y al Mc. Aaron por su revisión.

# TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO .....	I
INDICE DE FIGURAS .....	II
INDICE DE CUADROS .....	II
RESUMEN .....	III
ABSTRAC.....	IV
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
HIPÓTESIS.....	2
REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
Sustratos y sus características.....	3
Propiedades del sustrato .....	3
Fases del sustrato.....	4
Clasificación de sustratos.....	5
Sustrato de turba y perlita .....	5
Sondas electromagnéticas para determinar la humedad del suelo .....	6
Estudios previos sobre el uso de las sondas TDR para determinar el contenido de agua en el suelo .....	8
Estudios previos sobre la determinación del contenido de agua en sustratos con el uso de sondas electromagnéticas.....	11
MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
Sonda TDR Fieldscout.....	16
Sonda TDR Campbell con varillas de 20cm .....	18
Sonda TDR Campbell con varillas de 12 cm .....	19
Comparación de las ecuaciones de corrección de las sondas.....	21
CONCLUSIONES .....	22
BIBLIOGRAFÍA.....	23

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre el contenido de humedad del sustrato (% en volumen) obtenido con el método del lisímetro de pesada y con la sonda TDR (Fieldscout) de varillas de 20 cm de longitud.....	17
Figura 2. Relación entre el contenido de humedad del sustrato (% en volumen) obtenido con el método del lisímetro de pesada y con la sonda TDR (Campbell Sci.) de varillas de 20 cm de longitud.....	18
Figura 3. Relación entre el contenido de humedad del sustrato (% en volumen) obtenido con el método del lisímetro de pesada y con la sonda TDR (Campbell Sci.) de varillas de 12 cm de longitud.....	20

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Estadísticos para evaluar el grado de ajuste de las ecuaciones lineales de corrección de las tres sondas, usadas para determinar el contenido de agua en el sustrato (70% peat moss y 30 % perlita) a partir de las lecturas de las sondas.....	21
---	----

## RESUMEN

En la producción de cultivos hortícolas en invernadero el suelo se remplaza por sustratos que tienen alta capacidad de retención de agua y que se encuentra fácilmente disponible para las plantas. Dado que los sustratos son inertes, es necesario proporcionar una solución nutritiva en los riegos a una determinada frecuencia. Generalmente, para la aplicación de los riegos no se conoce cuál es el contenido de agua en el sustrato ni el volumen de agua por aplicar. Por lo que, el riego se aplica hasta tener un determinado porcentaje de drenado. Esto puede resultar en desperdicio de agua y nutrientes que pueden tener impacto en el ambiente. Por lo que, el objetivo de este estudio fue evaluar el funcionamiento de sondas electromagnéticas “Time Domain Reflectometry” (TDR) para determinar el contenido de agua en los sustratos y mejorar la eficiencia del uso del agua. Se evaluaron tres sondas: Campbell TDR portátil (Hydrosense II P) de 12 y 20 cm de longitud de varillas y la sonda TDR300 Fieldscout. El estudio se realizó en 36 recipientes de PVC de 19.4 cm de diámetro interior y 20 cm de altura, a los que se les agregó 800 g de sustrato (peso en seco) compuesto de 70% peat moss y 30% de perlita. Para el consumo de agua se sembró en cada contenedor una planta de fresa cv Frontera. Se usaron tres valores de la CE de la solución Steiner (0.5, 0.75 y 1.0 dS/m) y tres niveles de consumo del agua del sustrato (300, 600 y 900 mL). La calibración de las sondas se realizó por un procedimiento de regresión lineal simple con los valores diarios de las lecturas del contenido de agua de las sondas (promedio de tres lecturas) contra el valor del contenido de agua en el sustrato que se obtuvo con mediciones directas por diferencia de peso de los contenedores. Los resultados obtenidos mostraron que el rango de CE que se usó no afectó el funcionamiento de las sondas. De las tres sondas evaluadas, la Campbell móvil de 12 cm de longitud de varillas fue la más apropiada, ya que la ecuación lineal que se obtuvo para la corrección de los datos de contenido de agua en el sustrato a partir de las lecturas de la sonda fue la de mayor coeficiente de determinación y menor dispersión de los datos, Seguida por la sonda Campbell TDR con varillas de 20 cm. La ecuación lineal de corrección de la sonda TDR300 Fieldscout tuvo una gran dispersión de datos y un bajo coeficiente de determinación por lo que, no es apropiada para su uso en la determinación del contenido de agua en sustratos compuestos de peat moss y perlita.

**Palabras clave:** Sondas TDR, sustrato, humedad, calibración, peat moss, perlita

## ABSTRAC

For the growing of horticultural crops in greenhouses, the soil is replaced by substrates which have high water capacity retention and of easy availability for the plants. Because the substrates are inert, it is necessary to apply a nutritive solution when watering the plants. Generally, when irrigation is applied the substrate water content, neither the volume to apply are known. Therefore, water is applied until a certain percentage of drainage is observed. This can result in a waste of water and nutrients that may have an impact on the environment. Thus, the objective of this study was to evaluate the performance of TDR electromagnetic probes, for determining the substrates water content and to improve the water use efficiency. Three probes were evaluated: Campbell TDR portable (Hydrosense II P) of 12 and 20 cm of rods length and the TDR300 Fieldscout probe. The study was conducted in 36 containers of PVC of 19.4 cm of interior diameter and 20 cm height, 800 g of substrate (dry weight) composed of 70% of peat moss and 30% of perlite were added to each container. For water consumption a strawberry plant (cv Frontera) was planted in the containers. Three values of CE of the Stainer solution (0.5, 0.75 y 1.0 dS/m) and three levels of the substrate water deflation (300, 600 y 900 mL) were used. The probes calibration was performed by a linear regression procedure, using the daily values of the probe readings of soil moisture (average of three readings) against the daily values of the substrate water content obtained by direct measurements of weight difference of the containers. The results of this study showed that the range of CE levels that was used had no effect on the probes performance. Of the three probes evaluated, the Campbell movil of 12 cm of rods length was the most appropriated, because the lineal equation obtained for the data correction of the substrate water content from the probe readings, had the highest determination coeficiente and less data dispersion, followed by the Campbell TDR movil probe of 20 cm of rods length. The lineal equation for the correction of the TDR300 Fieldscout probe had a large data dispersion and a low determination coefficient and therefore, is no appropriated for using in the determination of water content of substrates composed of peat moss and perlite.

**Key words:** TDR probes, substrate, water content peat moss perlite

## INTRODUCCIÓN

Los sustratos son materiales generalmente inertes que se elaboran con la combinación de diferentes compuestos orgánicos y minerales de origen natural o sintéticos (Abad *et al.*, 2004; Gayosso-Rodríguez *et al.*, 2016; Barbaro *et al.*, 2019). Son ampliamente usados para la producción de cultivos (principalmente hortícolas), sin suelo y bajo condiciones de invernadero. Por lo que, al reponer el agua del sustrato consumido por la planta se debe aplicar con cierta frecuencia una solución nutritiva, de una determinada conductividad eléctrica y pH (Insuasti, 2017; Gómez, 2021; Rojas, 2009). Los sustratos deben tener alta capacidad de almacenamiento de agua, pero el agua retenida debe estar altamente disponible para su absorción por las raíces de la planta (Gayosso-Rodríguez *et al.*, 2021; Cruz-Crespo *et al.*, 2013), por lo que el agua se drena fácilmente a bajos valores de tensión (no más de 10 kPa) (Pérez-De-Los-Reyes *et al.*, 2018; Casanova, 2018)

Cuando se aplican los riegos a las plantas que crecen en sustratos, generalmente no se conoce el contenido de agua ni el volumen de agua que se debe aplicar para reponer la humedad al valor de la máxima capacidad de retención del sustrato, por lo que, el agua se aplica hasta obtener un determinado porcentaje de drenado. Si la solución drenada no se recicla, esto puede resultar en pérdidas de agua y nutrientes, que al no controlarse adecuadamente puede tener un impacto negativo en el medio ambiente (Orozco, 2007)

Las sondas electromagnéticas son dispositivos que se usan para determinar el contenido de agua en el suelo, su funcionamiento se basa en la determinación de la permisividad dieléctrica del suelo, ya que de los constituyentes del suelo (minerales, materia orgánica, aire y agua), el agua tiene el mayor valor ( Kostadinović *et al.*, 2021; Kargas *et al.*, 2013), de tal forma que, se establece una relación entre la permisividad dieléctrica del suelo con el tiempo de tránsito de las ondas, la capacitancia o la impedancia y el contenido volumétrico del agua en el suelo (Martin, 2017; Casanova, 2018).

Las sondas electromagnéticas se han utilizado ampliamente para determinar el contenido de agua en diferentes tipos de suelos y aplicaciones. (Suchorab *et al.*, 2018; Cerny 2009, Abdullah *et al.*, 2020; Hong *et al.*, 2019). Aunque las sondas electromagnéticas se



desarrollaron para determinar el contenido de agua en suelos, también se podrían usar para obtener el contenido de agua en diferentes tipos de sustratos, para esto se debe considerar la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva, ya que la propagación de las ondas electromagnéticas en el medio poros se afecta por la CE del medio.

## **OBJETIVO GENERAL**

Obtener los coeficientes de corrección de ecuaciones lineales, para determinar el contenido de agua de sustratos de diferentes valores de CE de la solución nutritiva, a partir de las lecturas de las sondas TDR.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Obtener la relación entre el contenido de agua de los sustratos (que se obtiene por mediciones de diferencias de peso) y la humedad que se obtiene con las lecturas de las sondas

Generar ecuaciones lineales simples para relacionar el contenido de agua de los sustratos con las lecturas de las sondas

Obtener los coeficientes estadísticos para evaluar el funcionamiento de las ecuaciones lineales de corrección de cada una de las sondas evaluadas.

## **HIPÓTESIS**

Las sondas electromagnéticas se pueden usar para determinar el contenido de agua de sustratos, que se usan para el crecimiento de plantas de diferentes cultivos hortícolas.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Sustratos y sus características

Actualmente, en la producción de cultivos bajo invernadero el suelo es sustituido por sustratos para tener mejor control de los aspectos físicos, químicos y biológicos del medio de cultivo, para que las plantas se desarrollen en mejores condiciones hídricas y nutrimentales, para incrementar el rendimiento y calidad de las cosechas (Pineda-Pineda *et al.*, 2012; Romenus, 2020).

Un sustrato se puede definir como un medio compuesto de uno o más combinaciones de materiales (depositados en un contenedor) que proporciona al sistema radicular de las plantas anclaje, oxígeno y agua adecuados para su óptimo desarrollo (Cruz-Crespo *et al.*, 2012). También se puede definir como un medio poroso (diferente del suelo) para el desarrollo de las raíces de las plantas (Kämpf *et al.*, 2006)

### Propiedades del sustrato

En general un medio de cultivo debe tener propiedades físicas relevantes, debido a que una vez que coloca el material vegetal en el contenedor es difícil modificar sus propiedades (Abad *et al.*, 2004). La porosidad de un sustrato es el espacio que puede ser ocupado por aire y/o dentro de la matriz del medio (compuesta por partículas orgánicas y/o minerales). Es importante que el sustrato contenga un adecuado volumen de poros para que las raíces de las plantas puedan realizar un adecuado intercambio de gases (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) (Barbaro, 2021). Lo ideal es que el volumen de poros sea del 70 al 85% del volumen total del sustrato (Iskander, 2002).

La densidad aparente (bruta) del sustrato se define como la relación entre el peso seco y el volumen aparente que ocupan tanto las partículas como el aire. Su función es mantener la planta en posición vertical y evitar su caída. Mientras que, la densidad de partículas es la relación entre la masa y el volumen de sólidos donde se considera que no hay porosidad alguna.

La porosidad del material tiene relación directa con la capacidad de retención de agua, ya que ayuda a tener la humedad disponible para la planta por mayor tiempo. Cuando esta capacidad es bajo se debe aplicar riegos frecuentes de menor volumen. Un sustrato ideal debe tener una capacidad de retención de agua de 55 a 70 % con base a volumen (Iskander, 2002).

Las propiedades químicas se pueden cambiar con el tiempo ya que dependen principalmente de la interacción entre la capacidad de intercambio catiónico (CIC), pH, nutrimento, así como la conductividad eléctrica (CE). El pH indica la acidez o alcalinidad de una solución. La disponibilidad de nutrientes para las plantas depende el valor del pH, este se debe mantener de 5.5 – 7.0; también influye directamente las necesidades y etapa del cultivo. Mientras que la CE debe mantenerse en niveles bajos que no afecten los rendimientos de los cultivos (Barbaro, 2021), pero esto depende principalmente la fertilización o nutrición que se efectuó en la planta. Se puede expresar en mS/cm, dS/m,  $\mu$ S/cm o ppm. El método del extracto de saturación del sustrato (Warnecke y Krauskopf, 1983) para la interpretación de concentración de sales menciona que de 0-1, 1-2 y >3 dS/m son bajos, adecuados y alto respectivamente.

La CIC es un indicador para retener o intercambiar los cationes en los sustratos estos valores son muy bajos y principalmente están determinadas por la concentración de  $\text{NH}_4$ , Ca, Mg, K. La relación C/N se utiliza como un indicador del origen, el grado de madurez y la estabilidad de la materia orgánica (Domeño *et al.*, 2011). Sin embargo, Abad *et al.* (2005) indican que una relación C/N mayor de 30 es la adecuada para cultivar bajo sustrato por la estabilidad del material, siendo estos tratamientos recomendables para ciclos de cultivo más prolongados.

### **Fases del sustrato**

Un sustrato está conformado por tres fases principalmente, una sólida, formada por un tipo de material o de composición variada, con estructura interna determinada, que se puede denominar el esqueleto del sustrato. La fase líquida y gaseosa es la proporción ocupada por aire o por agua en los poros y microporos. Al momento de un riego, todo el espacio poroso

es ocupado por agua y conforme pasa el tiempo decrece la humedad y la cantidad de aire aumenta. La relación entre el porcentaje de la fase líquida y gaseosa depende las características y necesidades de cada cultivo (Villegas *et al.*, 2017)

### **Clasificación de sustratos**

Los sustratos pueden ser químicamente inertes como: arena silíceo o granítica, grava, roca volcánica, perlita, lana de roca y arcilla expandida. Químicamente activos como: turbas rubias y negras, orujos, residuos de la industria maderera, vermiculita (Villegas *et al.*, 2017; Urrestarazu, 2004).

De acuerdo con su origen, los sustratos se pueden clasificar como orgánicos e inorgánicos (Abad *et al.*, 2004). A su vez, los sustratos orgánicos pueden ser de origen natural (turba, peat moss, fibras de coco), de síntesis, que son polímeros de la industria de los plásticos y son no biodegradables (espuma de poliuretano, poliestireno expandido), y de residuos y subproductos de diferentes actividades, aunque este tipo de materiales deben ser previamente acondicionados mediante un proceso de compostaje o vermicompostaje.

Los sustratos inorgánicos o minerales pueden ser de origen natural, que se obtienen a partir de rocas o minerales de origen diverso (rocas de tipo volcánico como el tezontle, piedra pómez, arena, grava); materiales transformados o tratados industrialmente, que se obtienen a partir de rocas o minerales mediante tratamientos físicos y/o químicos, que modifican las características de los materiales originales (perlita, vermiculita, arcilla expandida y lana de roca); residuos y subproductos industriales, como las escorias de horno alto, estériles de carbón.

### **Sustrato de turba y perlita**

En México, uno de los sustratos orgánicos de origen natural más empleados es el peat moss o también denominado turba, el cual es un material fosilizado y considerado como un recurso no renovable (Hanson, 2003). La turba de la especie *Sphagnum sp.* (turba denominada genéricamente rubia) es el material más importante y ampliamente utilizado en los medios de cultivo de las plantas ornamentales en contenedor. La versatilidad de la turba

rubia se debe a sus características intrínsecas, destacando sus excelentes propiedades físicas. La densidad aparente se encuentra entre 70-170 kg/m<sup>3</sup>, la porosidad 0,90-0,96 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> y capacidad de retención de agua (0,51-0,66 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) y la densidad de partículas 1,54-1,83 g/cm<sup>3</sup>(Valenzuela, 2015).

La perlita es uno de los sustratos más usados a nivel mundial, está formado por roca de origen volcánica, que, por la intervención del hombre, se convierte en uno de los sustratos más utilizados. Debido a su alta porosidad, retiene agua hasta cinco veces su peso propio, garantizando una aireación adecuada. La densidad es en general inferior a 100 kg/m<sup>3</sup>. Con relación a su capacidad de intercambio catiónico (C.I.C) es prácticamente inerte o nula (1.5-2.5 meq/100 g). Su pH está casi neutro (7-7.5) de fácil neutralización por su buena inercia química.

Actualmente, no existe un proceso por el que la perlita pueda ser degradada y debido a su naturaleza tampoco es biodegradable. El reciclaje o reúso de la perlita no es recomendable debido a las grandes cantidades de humedad que la perlita almacena, y que son consideradas como un foco de contenido de hongos y bacterias, que pueden afectar el desarrollo de los cultivos, reduciendo los niveles de producción (Chong, 2005)

### **Sondas electromagnéticas para determinar la humedad del suelo**

El conocimiento directo y continuo de la variación espacio temporal del agua en el suelo es de gran valor para las técnicas relacionadas con la agricultura de precisión en general, y el manejo del agua en particular (Starr, 2005). Para determinar el contenido de agua en el suelo de forma rápida y precisa se usan las sondas electromagnéticas, cuyo funcionamiento se basan en dos enfoques. Sondas TDR (reflectancia en el dominio del tiempo); y sondas FDR (reflectancia en el dominio de la frecuencia) (Martin, 2017). El funcionamiento de las sondas TDR y FDR se basan en la medición de la constante dieléctrica del suelo, ya que, de los componentes de este el agua (80.1), minerales del suelo (4), materia orgánica (4) y aire (1), el agua tiene el mayor valor (Orozco, 2007).

Las sondas TDR funcionan bajo el principio de que la presencia de agua en el suelo afecta la velocidad de propagación de una onda electromagnética (reduce su velocidad). La sonda envía una onda electromagnética a través de una guía (generalmente un par de varillas paralelas de metal) colocada en el suelo a una determinada profundidad. El sensor mide el tiempo que demora la onda en viajar por la guía hacia el suelo y regresar. El dispositivo registra el tiempo y lo convierte a una lectura de la humedad del suelo. Entre más húmedo esté el suelo, más tiempo requiere la onda magnética en viajar por el suelo y regresar por la guía (Martin, 2017).

Sánchez-Pérez *et al.* (1999) menciona que el método TDR consiste básicamente en medir la velocidad de transmisión de una onda en una línea de transmisión. La señal del TDR se mide a la salida de un generador de impulsión y representa la suma de las tensiones incidentes y reflejadas. La amplitud de esta señal depende del tiempo ya que a cada instante la onda encuentra diferentes discontinuidades de impedancia durante la propagación en el medio, una fracción de la energía es reflejada hacia el generador. Los generadores más comúnmente utilizados tienen tiempo de subida del orden de 200 Ps ( $200 \cdot 10^{-12}$  s), lo que corresponde a una frecuencia de 10 GHz. Cuando la onda encuentra una discontinuidad a una distancia L se puede establecer después de un tiempo  $\Delta t$  que:

$$\Delta t = L/V \quad (1)$$

siendo V la velocidad de la onda.

La velocidad de la onda es función de la velocidad de la luz “c” ( $3 \times 10^8$  m/s) y de la permitividad eléctrica relativa K del material dieléctrico por el que circula la onda.

$$V = C/\sqrt{K} \quad (2)$$

Comúnmente, K se denomina “constante dieléctrica” aunque esta definición no es del todo correcta ya que K varía en función de la frecuencia, temperatura, y humedad del medio. Combinando la ecuación (1) y (2) se obtiene la ecuación básica de las sondas TDR:

$$\Delta t = \frac{L}{c} \sqrt{K} \quad (3)$$

Despejando K se obtiene la expresión para obtener la permisividad dieléctrica del medio poroso

$$K = \left( \frac{c \cdot \Delta t}{L} \right)^2 \quad (4)$$

Esta última ecuación permite evaluar K a partir del análisis de una señal del TDR. En este sentido, para un material, desde el punto de vista TDR, se puede considerar que se trata de un método de medida de la permitividad eléctrica de los materiales dieléctricos. (Sánchez-Pérez *et al.*, 1999). Una vez que se tiene el valor de K, el valor correspondiente del contenido de agua en el suelo, se obtiene con la ecuación de Topp *et al.* (1980)

$$\theta_v = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \cdot K - 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot K^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \cdot K^3 \quad (5)$$

Las principales ventajas de este método son:

- Es posible obtener un gran número de mediciones en diferentes puntos de forma continuada sin disturbar las propiedades del suelo.
- Se tiene un alto grado de precisión de las mediciones
- Su manejo es sencillo de respuesta inmediata y de forma digital.

Sus posibles limitaciones son:

1. Problemas de funcionamiento con valores muy altos de conductividad eléctrica (suelos salinos,  $CE > 3 \text{ dS m}^{-1}$ ).
2. Limitaciones en suelo con alto contenido de cuarzo (Suelos muy arcillosos,  $> 30\%$ )
3. Dificultades con suelos de alto contenido de materia orgánica (Suelos muy polares,  $> 5\%$ )

### **Estudios previos sobre el uso de las sondas TDR para determinar el contenido de agua en el suelo**

El método de la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) se usa ampliamente entre los investigadores para la determinación del contenido del agua del suelo debido a su simplicidad y rapidez. Es una herramienta no destructiva para realizar ensayos en suelos. El

TDR tiene la capacidad de medir el contenido de agua del suelo en el lugar sin necesidad de trasladar una muestra física al laboratorio. Abdullah *et al.* (2020) señalan que la técnica del TDR en estudios previos ha demostrado una buena precisión en la determinación del contenido de humedad de suelos arenosos y francos. Sin embargo, en suelos arcillosos, aún no se ha determinado su precisión. Identificaron varios factores que afectaron significativamente la precisión de las mediciones en suelos arcillosos especialmente cuando el contenido de humedad aumenta.

Por otra parte, Lopez Silva *et al.* (2018) operando un sistema de riego de pivote central en el cultivo del maíz sobre un suelo Ferralítico Rojo Típico, mediante el análisis de las precipitaciones y el contenido volumétrico de humedad en el suelo, obtenidos con el Pluviómetro Digital Portátil TPJ-32 y el uso de una sonda TDR portátil señalan que esta técnica les permitió evaluar el comportamiento del contenido volumétrico de humedad en el suelo entre el límite superior y límite inferior de la reserva fácilmente utilizable para el cultivo. Se logró un aumento del 15% de los rendimientos del cultivo con el ajuste del intervalo de riego de cuatro y cinco días y una disminución del volumen de agua aplicada de 31.13% y de la energía eléctrica consumida para el riego en 25%.

Sifuentes-Ibarra *et al.* (2016) también para el cultivo de maíz en el estado de Sinaloa, reportaron el desarrollo de una metodología con TDR portátiles que integra: 1) constantes hídricas del suelo, capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), 2) fenología del cultivo, 3) profundidad de raíz y coeficiente de cultivo (Kc) para cada fase fenológica, 4) valores promedio diarios, decenales y mensuales de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) de estaciones climáticas automatizadas y 5) contenido volumétrico de la humedad del suelo (H<sub>v</sub>), medida con sensores de humedad portátiles TDR calibrados para suelos predominantes. La tecnología permitió lograr mayor eficiencia en la planeación, predicción, supervisión (aplicación) y evaluación del riego. Es una excelente herramienta para el aprovechamiento de la humedad residual de lluvias en siembras tempranas. En ciclos con baja disponibilidad hídrica ayuda a priorizar la asignación de riegos a nivel de predio y a nivel módulo de riego para evitar conflictos por la competencia por el agua.



Otro trabajo importante de señalar es el de Lopez-Sejias *et al.* (2018) quienes calibrando sondas electromagnéticas para estudios de riego en diferentes zonas agrícolas de Cuba reportaron ecuaciones ajustadas a un modelo lineal con coeficientes de determinación mayores de 0.8 y sus coeficientes (pendiente y ordenada al origen) varían en función de las características texturales y estructurales del suelo. La comparación de éstas con las ecuaciones internas de las sondas representa una subestimación de 2 al 30% de la humedad del suelo, que corresponde a errores en el cálculo de las láminas de riego por aplicar de 4 a 60 mm.

Quichimbo *et al.* (2016) evaluando el contenido de humedad en suelos arcillosos a nivel de parcela con el uso de dos tipos de sensores TDR, uno de registro automático y el otro de registro manual; calibrados con el método gravimétrico, que es el método estándar de calibración, evaluando tres profundidades del suelo: 0-20; 20-40, y 40-60 cm. Señalan que los resultados mostraron diferencias entre los valores de humedad dados por los sensores TDR y el método gravimétrico, siendo el TDR de medición manual el que mostró diferencias significativas, tendiendo a subestimar el contenido de humedad del suelo en las tres profundidades. Mientras que el TDR de medición automática mostró una mayor asociación con los valores dados obtenidos con las mediciones gravimétricas. Sin embargo, las estimaciones dadas por los dos equipos resultan ser variables por lo que se concluye que la recomendación del uso o restricción de este tipo de sensores de humedad en suelos arcillosos se tiene que realizar previo a un estudio de evaluación y calibración.

Martínez y Ceballos, (2001) trabajaron en el diseño de una sonda TDR durante los cuales se llevaron a cabo mediciones diarias de la humedad con un TDR (ecómetro modelo Tektronix® 1502C) y mediciones gravimétricas. en 6 monolitos (5 tipos de texturas: Areno-arcilloso-franco, Arcilloso-franco, Arenoso-franco, Arena, Franco arenoso, Arena) donde las principales desviaciones se dieron en los suelos con mayor contenido de arcilla y los finales de la curva de secado.

## **Estudios previos sobre la determinación del contenido de agua en sustratos con el uso de sondas electromagnéticas**

La mayoría de los sustratos para la producción de cultivos hortícolas tienen un pequeño rango de agua fácilmente disponible (AFD) para un crecimiento óptimo de las plantas y por lo tanto, requieren riegos frecuentes. La mayoría de los sustratos generalmente contienen AFD en el rango de 0 a -10 KPa de potencial matricial ( $\psi_m$ ), con la mayor parte del agua disponible para las plantas en el rango de 0 a -5 KPa. El conocimiento del contenido volumétrico de agua ( $\theta_v$ ) de un sustrato se puede utilizar para definir con precisión las aplicaciones de riego, si se dispone de un método preciso para detectar  $\theta_v$ . Hasta ahora, no ha existido ninguna tecnología para hacer esto en sustratos con algún grado de precisión.

El monitoreo y control precisos del agua de riego deberían retener los nutrientes en la zona de las raíces y maximizar el crecimiento de las plantas, al mismo tiempo que se minimizan los volúmenes de lixiviación. Se ha demostrado que la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) mide con precisión  $\theta_v$  en algunos sustratos, pero no hay información sobre la variabilidad de dichos datos o cómo se correlacionan el  $\theta_v$  del sustrato y el uso de agua de la planta. En este sentido, Murray *et al.* (2004) estudiando una variedad de sustratos, incluido Pro-Mix 'BX', una mezcla comercial de corteza de pino, una mezcla comercial de corteza de madera dura, perlita de grado medio, lana de roca y arena tamizada en una variedad de experimentos diseñados para probar estas suposiciones, utilizando varias alturas de columna (contenedor) encontraron coeficientes de variación medios de TDR entre 0.8 % y 7.9 % en todas las alturas de sustrato y columna, lo que demuestra que TDR puede medir con precisión el contenido de agua en sustratos en la mayoría de las condiciones.

Las curvas de liberación de agua y las lecturas del TDR para cada sustrato indican que  $\theta_v$  está determinado principalmente por las características del sustrato, pero también por la altura del contenedor. Experimentos con azalea en cámara de crecimiento y experimentos de invernadero mostraron que un sistema de riego controlado y monitoreado por TDR controló con precisión los eventos de riego cíclico, con inicio a -10 kPa y terminación del riego a -1 kPa.

Los sensores TDR deben colocarse verticalmente en la zona de la raíz, especialmente con emisores de goteo. Los volúmenes de lixiviación de agua y nutrientes se redujeron significativamente en comparación con un método de riego basado en el peso del contenedor. Lopez *et al.* (2008) actualizaron las propiedades físicas e hidrodinámicas de un sustrato en condiciones organopónicas, utilizaron sensores TDR que les permitió garantizar la optimización del manejo del agua y la fertirrigación del sustrato estudiado.

Charpentier *et al.* (2004) utilizaron el método de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) para medir el contenido de agua y la conductividad eléctrica en contenedores con sustrato y cultivos. La calibración del contenido de agua y la conductividad eléctrica se realizó en sustratos de turba y turba-perlita (50/50). Se utilizó sondas cortas (80 mm) en un cultivo en contenedor de 4 litros de capacidad, regado con un gotero por maceta para seguir la heterogeneidad en el volumen del sustrato y la variación en el tiempo del contenido de agua y la conductividad eléctrica. La heterogeneidad espacial inducida por el riego por goteo sobre el contenido de agua fue mayor que la variabilidad entre repeticiones y las fluctuaciones diarias. Se discuten las importantes fluctuaciones diarias de la conductividad eléctrica en relación con los suministros. Aparte de la influencia directa del gotero, la conductividad eléctrica media diaria se duplica en quince días.

Kargas *et al.* (2013) estudiaron la precisión de dos sensores dieléctricos de tecnologías diferentes (sensor dieléctrico de dominio de frecuencia y dominio de tiempo) para medir el contenido de humedad en seis sustratos de textura gruesa. Desarrollaron ecuaciones de calibración para ambos sensores y determinaron el efecto de la conductividad eléctrica (CE) en el cálculo del contenido de humedad del sustrato. Se encontró que para el sensor de dominio de frecuencia la relación entre la raíz cuadrada de la permitividad dieléctrica y el contenido de humedad real del sustrato fue fuertemente lineal para todos los sustratos probados. Sin embargo, para cada sustrato se requería una ecuación de calibración específica distinta. La correlación entre la permitividad del sustrato y la CE fue lineal para el sensor de dominio de frecuencia en todos los niveles de humedad (0% a 35%). En el caso del sensor en el dominio del tiempo, cada sustrato también se describió a partir de una curva de

calibración diferente entre el contenido de humedad real del sustrato y el período de tiempo registrado por el dispositivo. Se encontró que su relación era cuadrática para todos los sustratos. La salida del sensor en el dominio del tiempo respondió de manera cuadrática a niveles crecientes de EC. Se encontró que esta respuesta también interactúa con el contenido real de humedad del sustrato. Concluyen que los resultados más confiables para la determinación del contenido de humedad de los sustratos estudiados se obtienen de curvas de calibración específicas del sustrato para cada tipo de sensor dieléctrico.

Murillo (2008) menciona que a las sondas TDR se deben realizar calibraciones frecuentes para evaluar el funcionamiento de las mismas, aunque se trate del mismo suelo y cuando y cuando se cambien las varillas. También porque los fabricantes no se ajustan a las diferentes condiciones de suelo. Mientras que, Magán *et al.* (2001) citan que las sondas TDR no funcionan en suelos con gran contenido de sales. La atenuación de la señal es tal que apenas puede distinguirse el pulso reflejado pero el error es mayor a menor contenido de humedad.

Pablo Quichimbo *et al.* (2016) indican que las sondas TDR presentan ciertos inconvenientes en la estimación de la humedad cuando se trabaja en suelos orgánicos, volcánicos y de textura fina; y por lo tanto la calibración se requeriría para optimizar la precisión de las mediciones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en un invernadero de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México cuyas coordenadas son 25° 21' N y 101° 29' O, y una altitud de 1760 m. El trabajo se desarrolló de septiembre de 2021 a enero de 2022.

Para el estudio se elaboraron 36 contenedores de PVC (NMX-E-199/1) de 19.4 cm de diámetro interior y 20 cm de altura. En uno de los extremos de cada contenedor se fijó una malla plástica (doble capa) de 1 mm de diámetro y sobre esta se colocó un papel filtro (80 gr/m<sup>2</sup>). Con el propósito de usar los contenedores como lisímetros de pesada, cada uno de ellos se igualó a un mismo peso de 950 g (usando pequeños anillos metálicos).

En cada contenedor se depositaron 800 g (peso en seco) de un sustrato compuesto de 70% peat moss y 30% perlita (con base a volumen), que cubrieron una altura de 17 cm en los contenedores, y un volumen promedio de sustrato de 5.025 L. El peso en seco promedio del contenedor con el sustrato fue 1 750 g. Para el consumo de agua, en cada recipiente se sembró una planta de fresa (*Fragaria sp.*). Se establecieron tres valores de abatimiento de la humedad del suelo a partir del sustrato saturado: 300, 600 y 900 mL y tres niveles de la conductividad eléctrica de la solución Steiner aplicada en cada riego, que correspondió a 9 combinaciones, que se repitieron 4 veces para un total de 36 contenedores, donde se realizaron las mediciones de contenido de humedad.

La máxima retención de agua del sustrato se obtuvo colocando los contenedores en cajas de plástico de 51 cm largo, 33 cm ancho y 26.5 cm de altura, con agua a una altura de 20 cm, para saturar el sustrato (por acenso capilar). Después de que el agua alcanzó la superficie del sustrato (espejo de agua en la superficie) se retiraron los contenedores, se permitió el drenado del exceso de agua y se pesaron nuevamente los contenedores. La diferencia del peso saturado y el peso seco inicial correspondió al peso promedio del agua del sustrato saturado, que fue de 3.1 kg (equivalente a 3.1 L). Con esta información se obtuvo el contenido de humeado (por ciento en volumen) del sustrato saturado que correspondió a 59.05 %.

El contenido de agua (con base a volumen) de los sustratos de las diferentes combinaciones de abatimiento de la humedad y la CE de la solución Steiner se obtuvo con la siguiente ecuación.

$$\theta_V = \frac{V_{as}-V_{ac}}{V_{sust}} * 100 \quad (6)$$

Donde:

$\theta_V$  = contenido de agua en el sustrato (por ciento en volumen).

$V_{as}$  = volumen de agua en el sustrato a saturación (3.1 L).

$V_{sust}$  = volumen promedio del sustrato en los contenedores (5.025 L).

$V_{ac}$  = volumen de agua consumido (L) que se obtuvo por la diferencia de peso de los contenedores del día de la medición respecto al día anterior.

Las sondas electromagnéticas que se usaron en este estudio fueron la sonda TDR (reflectancia en el dominio del tiempo) Campbell de 20 y 12 cm de longitud de varillas (modelo hs2P, Campbell Sci., Inc, Logan, Utah, USA), y la sonda TDR Spectrum con varillas de 20 cm (modelo TDR350, Spectrum Technologies, Inc., Aurora, IL, USA). Para generar las ecuaciones de corrección de las lecturas de las sondas en los diferentes sustratos, se realizaron regresiones lineales con el promedio diario de las lecturas de la humedad del sustrato (tres en cada contenedor) con cada una de las tres sondas, y mediciones del contenido de agua en los mismos contenedores con la ecuación (6), utilizando una báscula digital de 6.0 kg de capacidad. Estas mediciones se consideraron como base de comparación para generar las ecuaciones de corrección

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El rango de fluctuaciones de la humedad en los sustratos fue de hasta 65.4 % en volumen, que correspondió a condiciones de saturación, y tan bajos como 37.5 % en volumen, que representó un consumo de 1.215 L de agua por las plantas, de los 3.1 L del Sustrato en condiciones de saturación. Para el mismo contenido de agua en el sustrato, las sondas registraron el mismo valor, sin importar el valor de la conductividad eléctrica (0.5, 0.75 y 1.0 dS/m) de la solución Steiner. Por lo que, solo se generó una ecuación para cada una de las tres sondas (Fieldscout con varillas de 20 cm de longitud, Campbell con varillas de 20 y de 12 cm). La función que se evaluó para cada sonda fue una relación lineal simple entre los valores de contenido de humedad del sustrato medidos con el método del lisímetro de pesada y la humedad obtenida con las sondas.

### Sonda TDR Fieldscout

La estimación del contenido de humedad del sustrato que se obtendría con mediciones lisimétricas (que se consideraron como de base para las correcciones de las sondas), a partir de las lecturas de la sonda TDR Fieldscout con varillas de 20 cm de longitud fue muy inconsistente, con un rango muy alto de variación que se reflejó en un valor muy bajo del coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.486$ ) (Figura 1). La ecuación que se obtuvo fue:

$$\theta_{v\_lisim} = 40.38 + 0.272 * \theta_{v\_TDR} \quad (1)$$

Donde:  $\theta_{v\_lisim}$ , corresponde al contenido de humedad en el Sustrato (% en volumen), que se obtiene a partir del contenido de agua que se obtiene con la lectura de la sonda ( $\theta_{v\_TDR}$ ), 40.38 es el coeficiente de regresión que corresponde a la ordenada al origen y 0.2772 el coeficiente que representa la relación de cambio (pendiente).

A pesar de que los coeficientes de regresión, ordenada al origen y relación de cambio fueron altamente significativos ( $p < 0.001$ ), la gran dispersión de los datos indica que se tendría un gran margen de error al tratar de estimar el contenido de agua en el sustrato a partir de las lecturas de la sonda. Nótese también la presencia de un gran número de datos

observados fuera de las bandas de confianza ( $\alpha \leq 0.001$ ), por lo que su uso en sustratos no sería muy recomendable.

Estudios previos sobre el uso de la sonda TD300 (Fieldscout) se han realizado en suelo de diferentes texturas y pocos para su uso en sustratos sin suelo. Por ejemplo, Murillo *et al.*, (2008) reportaron coeficientes de determinación de 0.905 y 0.776 en la determinación del contenido de agua en el suelo con varillas de 20 y 12 cm respectivamente, en un suelo de textura franca con valores de CE menores de 2 dS/m. En otro estudio con la misma sonda y en un suelo Ferralítico rojo los coeficientes de determinación fueron 0.94, 0.93 y 0.96 para las profundidades de 0-20, 20-40 y 30 – 40 cm respectivamente (Lopez-Silva, 2018).

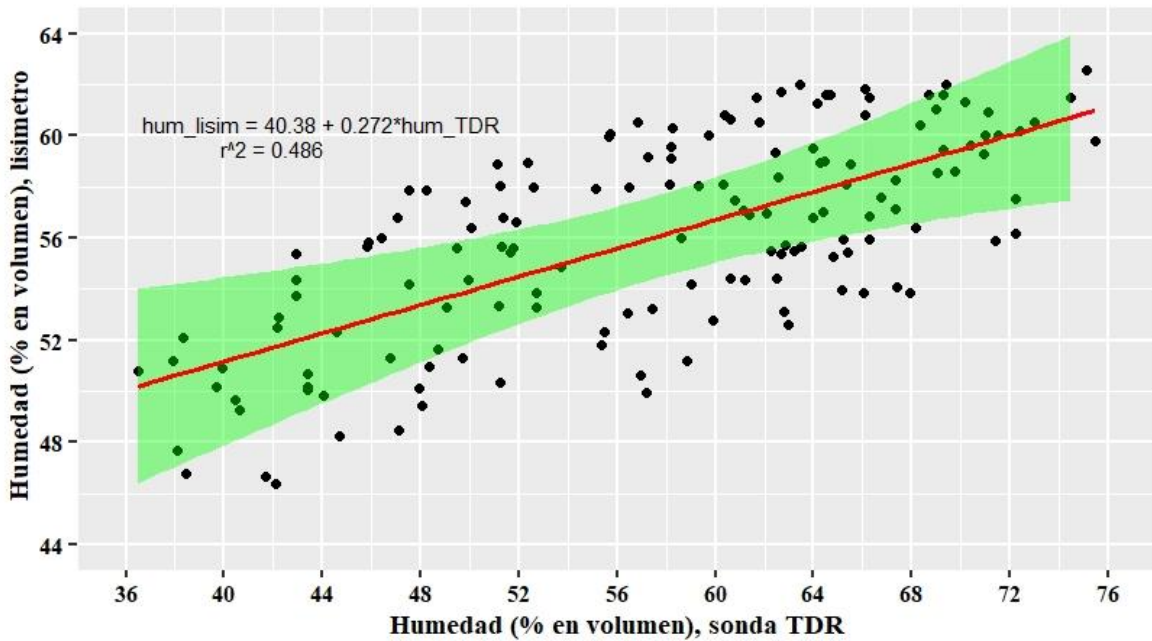


Figura 1. Relación entre el contenido de humedad del sustrato (% en volumen) obtenido con el método del lisímetro de pesada y con la sonda TDR (Fieldscout) de varillas de 20 cm de longitud, con sus banas de confianza ( $\alpha \leq 0.001$ ).



## Sonda TDR Campbell con varillas de 20cm

La ecuación para estimar el contenido de humedad del sustrato (que se obtiene con mediciones lisimétricas) a partir de las lecturas de la sonda con varillas de 20 cm fue:

$$\theta_{v\_lisim} = 15.66 + 0.963 \cdot \theta_{v\_TDR} \quad (2)$$

Donde el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue 0.777 y los dos coeficientes de regresión fueron altamente significativos ( $p < 0.001$ ). Se observa una menor dispersión de los puntos observados respecto a la sonda TDR Fieldscout (Figura 2).

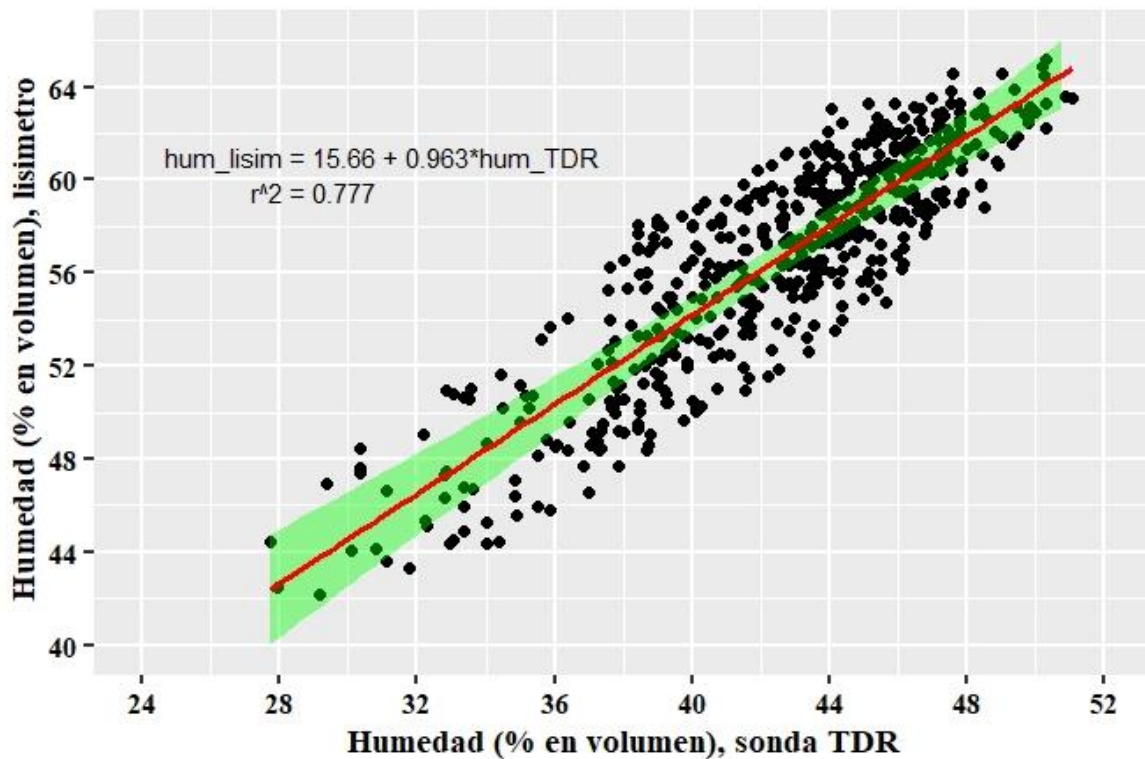


Figura 2. Relación entre el contenido de humedad del sustrato (% en volumen) obtenido con el método del lisímetro de pesada y con la sonda TDR (Campbell Sci.) de varillas de 20 cm de longitud, con sus banas de confianza ( $\alpha \leq 0.001$ ).

El mayor coeficiente de determinación de esta sonda indica un menor rango de variación de las estimaciones del contenido de agua en el sustrato. Nótese que la medición que se obtiene con la sonda es aproximadamente 15.52 % y que esta diferencia se mantiene en todo

el rango de medición de la sonda (28 % a 50%) Figura 2. Estos resultados indican que esta sonda se puede usar para determinar el contenido de agua en el sustrato para determinar el momento del riego.

Otros estudios han reportado el uso de sondas TDR para determinar el contenido de agua de diferentes tipos de sustratos. Por ejemplo, Rubio *et al.* (2007) indican haber obtenido un buen monitoreo de la humedad de un sustrato compuesto de grava y arena, usando una sonda TDR de tres varillas de 20 cm de longitud.

### **Sonda TDR Campbell con varillas de 12 cm**

La ecuación para inferir el contenido de agua en el sustrato correspondiente a las mediciones lisimétricas, a partir de las lecturas de la sonda fue:

$$\theta_{v\_lisim} = 13.58 + 0.988 * \theta_{v\_TDR} \quad (3)$$

Con un coeficiente de determinación de 0.931, donde también los dos coeficientes de regresión fueron altamente significativos ( $p < 0.001$ ). Esta sonda tiene el coeficiente de determinación más alto y mucho menor dispersión de los datos observados (Figura 3). Debido a que el coeficiente de regresión que representa la relación de cambio es muy cercano a la unidad (0.988), a la lectura de la sonda se debe sumar 13.58% para obtener el contenido de agua en el sustrato correspondiente al valor obtenido con mediciones lisimétricas. Por su alto valor de coeficiente de determinación y muy baja dispersión de los datos, esta es la sonda que más se recomendaría para obtener el contenido de agua en el sustrato a partir de las lecturas de la sonda.

Otros estudios también han demostrado la necesidad de corregir los valores de humedad del sustrato al usar sondas electromagnéticas. Al respecto, Mora *et al.* (2007), mostraron que, al tener la ecuación de corrección, fue posible determinar la humedad de un sustrato compuesto de lana de roca y fibra de coco con una sonda electromagnética FDR (modelo E-5, Decagon Devices, Inc), mencionando que, si solo se usa la ecuación del fabricante, se pueden obtener grandes errores en la determinación de la humedad del sustrato.

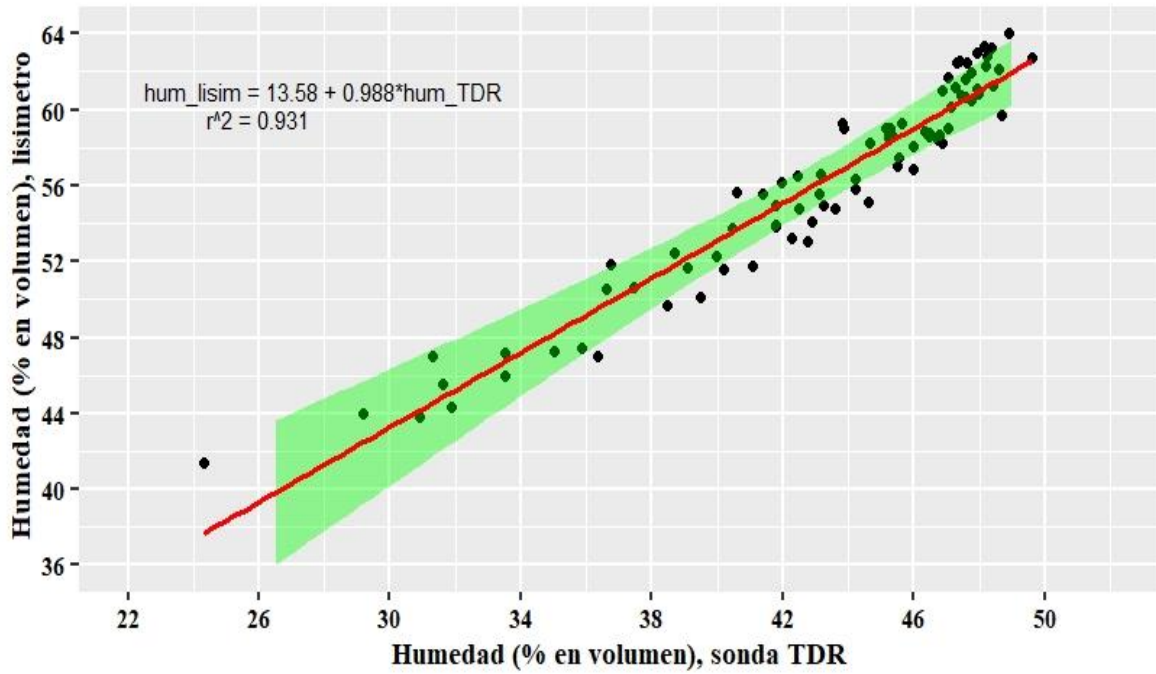


Figura 3. Relación entre el contenido de humedad del sustrato (% en volumen) obtenido con el método del lisímetro de pesada y con la sonda TDR (Campbell Sci.) de varillas de 12 cm de longitud, con sus banas de confianza ( $\alpha \leq 0.001$ ).

## Comparación de las ecuaciones de corrección de las sondas

Para evaluar el funcionamiento de la ecuación lineal de corrección de cada sonda, se obtuvieron además del coeficiente de determinación ( $r^2$ ), la raíz cuadrada media del error absoluto (RMS) y el error medio absoluto (MAE) (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Estadísticos para evaluar el grado de ajuste de las ecuaciones lineales de corrección de las tres sondas, usadas para determinar el contenido de agua en el sustrato (70% peat moss y 30 % perlita) a partir de las lecturas de las sondas.**

<b>Estadístico</b>	<b>Sonda Fieldscout 20 cm</b>	<b>Sonda Campbell 20 cm</b>	<b>Sonda Campbell 12 cm</b>
$R^2$	0.486	0.778	0.931
RMSE	2.807	2.273	1.438
MAE	2.392	1.878	1.202

Con base a los datos del cuadro 1, se puede deducir que, la sonda Campbell con varillas de 12 cm de longitud es la más apropiada para obtener el contenido de humedad del sustrato con base a las lecturas del dispositivo, ya que la ecuación de corrección tiene el valor mayor del coeficiente de determinación y los menores de la raíz cuadrada media del error absoluto y el error medio absoluto.

## CONCLUSIONES

De las tres sondas evaluadas, la Campbell móvil de 12 cm de longitud fue la más apropiada, ya que la ecuación lineal que se obtuvo para la corrección de los datos de contenido de agua en el sustrato a partir de las lecturas de la sonda fue la de mayor coeficiente de determinación y menor dispersión de los datos, Seguida por la sonda Campbell TDR con varillas de 20 cm. La ecuación lineal de corrección de la sonda TDR300 Fieldscout tuvo una gran dispersión de datos y un bajo coeficiente de determinación por lo que, no es apropiada para su uso en la determinación del contenido de agua en sustratos compuestos de peat moss y perlita.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abad M., P. Noguera, C. Carrión. 2004, los sustratos en cultivo sin suelos, In: Urrestarazu M. (Ed.). Tratado del cultivo sin suelo, Madrid, Ediciones Mundiprensa, 113 - 158.
- Abdullah, N. H. H., Kuan, N. W., Ibrahim, A., Ismail, B.N., Majid, M. R. A., Ramli, R., & Mansor, N. S. (2020). Determination of Soil Water Content Using Time Domain Reflectometer (TDR) for Clayey Soil. AIP Conference Proceedings 2020, 020016 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5062642>.
- Barbaro L., M. Karlanian, P. Rizzo, N. Riera, 2019, Caracterización de diferentes compostas para uso como componente de sustratos, Chilean J. Agric. Anim. Sci., 35(2): 126 - 136.
- Barbaro, Lorena. (2021). Sustratos para producción de plantas. Cultivos Intensivos Bajo Cubierta. Investigación, Desarrollo e Innovación En El Marco Del PEI009. 2 (2): 13-17. (2021)., 13–17. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/8918>
- Casanova M, J. E. (2018). Modelación Elastoplástica de la Curva de Retención de Agua en Suelos Parcialmente Saturados. (tesis de maestría, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puerto de Barcelona). 38-44
- Cerny, R. (2009). Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: A review. *Measurement*. 42(3), 329–336.
- Charpentier, S., Guérin V., Morel P., Tawegoum R. (2004) Measuring water content and electrical conductivity in substrates with tdr (time domain reflectometry). DOI:10.17660/ActaHortic.2004.644.38
- Chong, C. 2005. Experience with waste and compost in nursery industry. Ontario: American society for Horticulture Science. Horticulture Technology Publications. 15:10 p

Cruz-Crespo E., M. Sandoval-Villa, V. H. Volke-Haller, A. Can-Chulim y J. Sánchez-Escudero (2012) Efecto de mezclas de sustratos y concentración de la solución nutritiva en el crecimiento y rendimiento de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3:1361-1373.

Cruz-Crespo, E., Can-Chulim, A., Sandoval-Villa, M., Bugarín-Montoya, R., Robles-Bermúdez, A., & Juárez-López, P. (2013). Sustratos en la horticultura substrates in horticulture. *Revista Biociencias*, 2(2), 17–26.

Delgado, M., De imperial, R., Masaguer A., Martin,J. (2021). Study of peats and poultry manure from broiler as a. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32 (4)(Mexico), 1–3.

Domeño, I., I. Irigoyen, y J. Muro. 2011. Comparison of traditional and improved methods for estimating the stability of organic growing media. *Sci. Hort.* 130: 335-340.

Gayosso-Rodríguez S., L. Borges-Gómez, E. Villanueva-Couh, M.A. Estrada-Botello y R. Garuña-Hernandez. (2016). Sustratos para produccion de flores. *Agrociencia* 50(5): 617-631.

Gayosso-Rodríguez S., M. del C. Gutierrez-Castorena, M.A. Estrada-Botello and R. Sánchez-Hernandez. (2021). Micromorphological characteritics of organic substares and their relationship with water retention and root growth. *Agrociencia* 55(3): 195-208.

Gómez Tunque, G. S. J. (2021). Efecto de dos enmiendas retentivas de humedad con dos frecuencias en riego por goteo para el cultivo pimiento en invernadero. (tesis, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú). 20-27,46-55.

Hanson J. B. (2003) Counting on coir. *Greenhouse Product News*; 48-54.

Hong, W-T., Yu, J-D., Kim, S.Y., & Lee, J-S. (2019). Dynamic Cone Penetrometer Incorporated with Time Domain Reflectometry (TDR) Sensors for the Evaluation of

Water Contents in Sandy Soils. *Sensors*. 19(18).1-17.  
<https://doi.org/10.3390/s19183841>.

Insuasti, J. (2017). Efecto de los fertilizantes triple 20 y nitrato de potasio en pH, conductividad eléctrica en el sustrato y crecimiento de plántulas de lechuga y tomate. Zamorano, 16. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/6100/1/CPA-2017-057.pdf>

Iskander Cabrera, Raul (2001). Manejo de sustratos para la producción de plantas ornamentales en maceta. *Avances En Periodoncia e Implantología Oral*, 13(1).  
<https://doi.org/10.4321/s1699-65852001000100003>

Kämpf, AN; R Jun Takane & PT Vital de Siqueira. 2006. Floricultura, Técnicas de preparo de sustratos. LK editora, Brasilia, 132pp.

Kargas, G., Ntoulas, N., & Panayiotis, A. (2013). Water content Measurements of Green Roof Substrates Using Two Dielectric Sensors. *HortTechnology*, 23(2), 177-186.

Kostadinović, D.M., Dimitrijević-Jovanović, D.G., Vučićević, B.S., Jovanović, M.P. & Konjikušić, S.M. (2021). Smart Capacitive Moisture Sensor Calibration In Mineral Wool and Green Roof Soil Substrate. *Thermal Science*, 25(3a), 1827-1836.

López-Seijas, Teresa; Ustariz A., Cisnero-Zayas E., Rodríguez-González A., Herrera-Puebla J., y González-Robaina 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, 2018.

López Teresa; Duarte, C.; González, F.; Cid, Greco Actualización de propiedades físicas e hidrodinámicas para un sustrato en condiciones de organopónico *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 17, núm. 3, 2008, pp. 1-5 Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez La Habana, Cuba.



López Silva; Maiquel., Carmenates Hernández D.; Mujica Cervantes A..2018. evaluación de la dinámica de humedad en suelo con sondas tdr para la operación del sistema de riego de pivote central. Artículo: COMEII-18013 IV Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII 2018 Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018.

Martin, E. C. (2017). Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego ¿Cuándo? *Extensión Cooperativa de La Universidad de Arizona, AZ1220s*, 1–8. <http://hdl.handle.net/10150/625275>

Martínez, J y Ceballos, A. (2001). Diseño y validación de una sonda TDR para la medición de la humedad del suelo. *Temas de Investigación En Zona No Saturada*, 3(5), 37–47. [http://abe.ufl.edu/faculty/carpena/files/pdf/zona\\_no\\_saturada/temas\\_de\\_investigacion\\_v5/10.pdf](http://abe.ufl.edu/faculty/carpena/files/pdf/zona_no_saturada/temas_de_investigacion_v5/10.pdf)

Mora, C. D, A. Ritter, A. Machín, N, Regalado, C. M, y Cid M.C. 2008. Caracterización hidrológica y curvas de calibración específica del sensor de humedad EC-5 en sustratos de lana de roca y fibra de coco. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. Pg 1-5

Murillo, J., Villafañe, R., Basso, C., & Trujillo, A. (2008). Evaluación de un equipo de reflectometría de dominio temporal (TDR) para registros de humedad en un suelo franco Evaluation of an equipment of time domain reflectometry (TDR) for moisture registration in a loam soil. *Revista de La Facultad de Agronomía*, 25(2), 211–222.

Murray, J.D, Lea-Cox, J.D . Ross. D.S (2004). La reflectometría en el dominio del tiempo supervisa y controla con precisión las aplicaciones de agua de riego en sustratos sin suelo. [10.17660/ActaHortic.2004.633.8](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.633.8).

Orozco Corral Luis Alfonso. (2007). Bajo Microaspersión Mediante El Uso De Estaciones Meteorológicas Y Sondas De Capacitancia (Fdr). December. <https://www.researchgate.net/publication/329844270>

- Pineda-Pineda, Joel, Del Castillo, F. S., Ramírez-Arias, A., Castillo-González, A. M., Valdés-Aguilar, L. A., & Del Carmen Moreno-Pérez, E. (2012). Aserrín de pino como sustrato hidropónico. I: Variación en características físicas durante cinco ciclos de cultivo. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 18(1), 95–111.
- Quichimbo, Pablo; Guamán, J.; Cajamarca, M.; Aguirre, A.J. (2016). Evaluación Del Contenido De Humedad Del Suelo Por Gravimetría Y Reflectometría. Ecuador es calidad: *Revista Científica Ecuatoriana*, 4(1). <https://doi.org/10.36331/revista.v4i1.25>
- Romenus, K. D. A. (2020). *Revista mexicana de ciencias agrícolas Artículos Análisis de crecimiento del cultivo de tomate en invernadero \**. 1–10.
- Rojas Acosta , Miguel (2009). Determinación del momento de riego mediante la temperatura de la cobertura foliar en el cultivo de jitomate bajo condiciones de invernadero. Tesis de doctoardo, Colegio de Postgraduados, Mexico. 151 p.
- Rubio C, González-Flor, C & Josa R. 2007. Monitorización del contenido de agua en los sustratos de restauración minera: calibración de las medidas de TDR en laboratorio y campo. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VIII*. Pg 161-165
- Sánchez-Pérez, J. M., Laurent, J. P., Bohy, M., Auzet, A. V, & Thony, J. L. (1999). Evaluación de un nuevo método de caracterización del perfil hídrico del suelo a partir de la inversión de una sola señal TDR. *Estudios de La Zona No Saturada Del Suelo, Tenerife*, 33–38.
- Sifuentes-Ibarra; E., Macías-Cervantes J.; González-Hernández F.; Flores-Gallardo H.; Borbón-Gracia A.; Preciado-Rangel P..2016. Artículo: COMEII-16040 II Congreso Nacional De Riego Y Drenaje COMEII 2016 Chapingo, Edo. de México, del 08 al 10 de septiembre.

- Starr, G.C. (2005). Assessing temporal stability and spatial variability of soil water patterns with implications for precision water management. *Agriculture Water Management* 72 (2005) 223-243
- Suchorab, Z., Konrad-Widomski, M., Łagód, G., Barnat-Hunek, D., & Majerek, D. (2018). A Noninvasive TDR Sensor to Measure the Moisture Content of Rigid Porous Materials. *Sensors*, 18(1), 2-20.
- Topp, G.C., Davis, I.L. y Annan, A.P., (1980). Electromagnetic determination of Soil water content: mesurement in coaxial transmission lines. *Water Resour.*16: pg 582
- Urrestarazu, M. (2004). Tratado de cultivo sin suelo (3a ed.). Mundi-Prensa Madrid. 914 p.
- Valenzuela, O. R. (2015). Tecnología de sustratos: propiedades de los diferentes componentes. Conferencia 1º Simposio Regional de Viveros Cítricos Bajo Cubierta. 14 Al 16 de Mayo 2015, pg 6.
- Villegas Torres, Domínguez Patiño, O. G., Albavera Pérez, M. L., Andrade Rodríguez M., Sotelo Nava, M., Martínez Rangel, H., Aguilar Cortés, M. G., Castillo Carpintero, M., & Magadan Salazar (2017). Sustratos como material de última generación. In *Sustratos como material de última generación (OmniaScien)*. (Omnia Publisher SL. <https://doi.org/10.3926/oms.364>
- Warnecke, D.D.; Krauskopf, D.M. (1983). Greenhouse growth media: Testing and nutrition guidelines, Extension Bulletin E-1736. Cooperative Extension Service, Michigan State University. Pg 2-6
- Yadav, I.; Singh, J.; Meena, B.; Singh, P.; Meena, S.; Neware, S.; Patidar, D.K. 2017. Strawberry Yield and Yield Attributes after Application of Plant Growth Regulators and Micronutrients on Cv. Winter Dawn. *Chemical Science Review and Letters* 6(21): 589-594.