

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



ECUACIONES DE HUMEDAD-TENSIÓN PARA EL USO DE TENSIÓMETROS  
EN SUELOS DE DIFERENTE TEXTURA

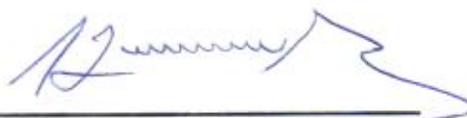
## **Tesis**

Que presenta SAÚL NEFTALÍ CERVANTES ZÚÑIGA  
Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

ECUACIONES DE HUMEDAD-TENSIÓN PARA EL USO DE TENSIÓMETROS  
EN SUELOS DE DIFERENTE TEXTURA

Tesis

Elaborada por SAÚL NEFTALÍ CERVANTES ZÚÑIGA como requisito parcial  
para obtener el Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE  
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN con la supervisión y aprobación del Comité de  
Asesoría



Dr. Alejandro Zermeño-González

Asesor principal



Dr. Martín Cadena Zapata

Asesor



Dr. Homero Ramírez Rodríguez

Asesor



M.C. Aarón Isaín Melendres Álvarez

Asesor



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente  
Subdirector de Postgrado

UAAAN

## AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por la oportunidad tan grande que me ha dado para formarme como un gran profesionalista de tan distinguida universidad.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT** por el apoyo económico que me brindo durante mi periodo en la maestría.

Al **Dr. Alejandro Zermeño González** por haberme brindado su confianza y apoyo durante toda la maestría, la accesibilidad y paciencia para poder realizar el experimento.

Al **Dr. Homero Ramírez Rodríguez** por el apoyo que me brindo durante mi estancia en el programa, en la tesis y por brindarme su amistad.

Al **Dr. Martin Cadena Zapata** por el apoyo brindado en la maestría y por su amistad.

Al **M.C. Aarón Isaín Melendres Álvarez** por haberme apoyado en mi proyecto de investigación y su amistad brindada.

## DEDICATORIAS

A **Dios**, porque sin su voluntad yo no estaría aquí, por darme la oportunidad de vivir a pesar de las adversidades y que yo pudiera realizar este proyecto de investigación, por darme sanidad y no dejarme solo, darme sabiduría alimentándome con su palabra.

A mi hija **Zoemy Cervantes Molina** por ser mi motor para salir adelante, porque por ella es que estoy echándole ganas y superándome día con día, y gracias a su llegada he visto la vida de diferente manera, en la cual todo ha sido para bien y voy a luchar siempre para sacarla adelante, TE AMO mi Zoemy.

A mis padres **Ascensión Cervantes Cabada** y **Victoria Zúñiga Valles** por darme la vida, por estar siempre ahí conmigo apoyándome incondicionalmente toda la vida, darme consejos para que me vaya bien la vida, espero algún día poder regresarles un poco de lo mucho que me dieron, toda la vida estaré muy agradecido.

A mis Hermanos **María Magdalena Cervantes Zúñiga**, **Erika Yahanara Jazmín Núñez Zúñiga** y **Luis Donald Cervantes Zúñiga**, por el apoyo que me dieron en mi formación como profesional y en mi vida, los amo hermanos.

A mi novia y futura esposa **Brenda Janine Molina Ibáñez**, ya que sin ella esto no hubiera sido posible, me alegra que estés en mi vida, gracias por el apoyo y la paciencia que me tenías, eres una maravillosa mujer muy lista y siempre te voy amar.

A mis amigos **Heriberto**, **Juan Carlos** y **David** por haber formado parte de mi formación y apoyado emocionalmente y enseñarme la amistad verdadera.

## ÍNDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	III
<b>DEDICATORIAS</b> .....	IV
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	VII
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	VIII
<b>RESUMEN</b> .....	IX
<b>ABSTRACT</b> .....	XI
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>OBJETIVOS</b> .....	3
<b>HIPÓTESIS</b> .....	3
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	4
<b>Importancia de la agua en la agricultura</b> .....	4
<b>(Métodos directos e indirectos para medir la humedad del suelo)</b> .....	4
<b>Tensiómetro</b> .....	5
<b>Ventajas y desventajas del uso de tensiómetros</b> .....	6
<b>Normas para el manejo e instalación de tensiómetros</b> .....	7
<b>Tensiómetros en la programación de riego en diferentes cultivos</b> .....	9
<b>Ecuaciones tensión-humedad para el uso de tensiómetros en la     determinación del volumen de agua por aplicar en el riego</b> .....	9
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	11
<b>Suelos y sus características físicas</b> .....	11
<b>Contenido de humedad y tensión correspondiente</b> .....	11
<b>Ecuaciones de humedad del suelo en función de la tensión</b> .....	12
<b>Evaluación estadística de las funciones</b> .....	13
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	14
<b>Características físicas de los suelos evaluados</b> .....	14
<b>Funciones humedad-tensión en el suelo franco arcilloso</b> .....	15
<b>Evaluación estadística de las funciones en el suelo franco arcilloso</b> .....	17
<b>Relación entre el contenido de humedad y la tensión en el suelo     arcilloso</b> .....	18
<b>Evaluación estadística de las funciones en el suelo arcilloso</b> .....	20

<b>Relación entre el contenido de humedad y la tensión en el suelo franco arenoso .....</b>	<b>22</b>
<b>Evaluación estadística de las funciones en el suelo franco arenoso .....</b>	<b>24</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>26</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>27</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Proporción del tamaño de partículas y clasificación textural de los suelos utilizados en el estudio. ....	14
<b>Cuadro 2.</b> Propiedades físicas de los suelos de diferente textura usados en el estudio. ....	15
<b>Cuadro 3.</b> Coeficientes de regresión de las funciones evaluadas para el suelo franco arcilloso, con el uso de tensiómetros. ....	16
<b>Cuadro 4.</b> Estadísticos del ajuste de los modelos evaluados en el suelo franco arcilloso, con el uso de tensiómetros. ....	17
<b>Cuadro 5.</b> Contenido de humedad y abatimiento del agua del espacio poroso para diferentes valores de tensión (medida con tensiómetros) en un suelo franco arcilloso. ....	18
<b>Cuadro 6.</b> Coeficientes de regresión de los modelos evaluados para el suelo arcilloso, con el uso de tensiómetros. ....	20
<b>Cuadro 7.</b> Estadísticos del ajuste de las funciones evaluadas en el suelo arcilloso, con el uso de tensiómetros. ....	21
<b>Cuadro 8.</b> Contenido de humedad y abatimiento del agua del espacio poroso para diferentes valores de tensión (con el tensiómetro) en un suelo arcilloso. .	22
<b>Cuadro 9.</b> Coeficientes de regresión de los modelos evaluados para el suelo franco arenoso con el uso de tensiómetros. ....	23
<b>Cuadro 10.</b> Estadísticos del ajuste de los modelos evaluados en el suelo franco arenoso, en el uso de tensiómetros. ....	24
<b>Cuadro 11.</b> Contenido de humedad y abatimiento del agua del espacio poroso para diferentes valores de tensión (medida con tensiómetros) en un suelo franco arenoso. ....	25

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Funciones que describen la relación entre el contenido de humedad y la tensión registrada por el tensiómetro en un suelo franco arcilloso.....	16
<b>Figura 2.</b> Funciones que describen la relación entre el contenido de humedad y la tensión registrada por el tensiómetro en un suelo arcilloso. ....	19
<b>Figura 3.</b> Funciones que describen la relación entre el contenido de humedad y la tensión registrada por el tensiómetro en un suelo franco arenoso.....	23

# RESUMEN

ECUACIONES DE HUMEDAD-TENSIÓN PARA EL USO DE TENSIÓMETROS  
EN SUELOS DE DIFERENTE TEXTURA

POR

SAÚL NEFTALÍ CERVANTES ZÚÑIGA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ALEJANDRO ZERMEÑO GONZÁLEZ

SALTILLO, COAHUILA

MARZO 2021

Los tensiómetros son dispositivos que se usan para medir la tensión con que el agua es retenida por el suelo. Estos se han usado ampliamente para definir el momento de aplicación del riego. Sin embargo, con dicha medición, no se puede determinar el volumen de agua que se debe aplicar para reponer la humedad consumida por las plantas. Por lo que, el objetivo de estudio fue evaluar cuatro funciones para describir la relación entre el contenido de agua en el suelo y la tensión correspondiente, en tres suelos de diferente textura. La humedad del suelo se midió con una sonda TDR y la tensión con el uso de tensiómetros. Los coeficientes de las funciones se obtuvieron con procedimientos de regresión lineal y no lineal usando RStudio versión 3.3.3. Los resultados del estudio mostraron que, la línea de tendencia de la función hiperbólica tiene un mejor ajuste a los datos observados de contenido de humedad vs tensión que las otras funciones, en el suelo arcilloso y el franco arcilloso. Para el suelo franco arenoso la mejor función fue el polinomio de segundo orden seguido por la ecuación hiperbólica, aunque, para valores altos de tensión, la función hiperbólica mostró mejor ajuste. Con la ecuación de humedad-tensión de mejor ajuste, se pudo obtener el contenido de agua en el suelo para cada valor de tensión, y el volumen de agua correspondiente que se debe aplicar para reponer la humedad en los suelos de diferente textura.

**Palabras clave:** tensión de humedad, tensiómetro, textura, porosidad.

# **ABSTRACT**

HUMIDITY-TENSION EQUATIONS FOR USING TENSIO METERS IN SOILS  
OF DIFFERENT TEXTURE

POR

SAÚL NEFTALÍ CERVANTES ZÚÑIGA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ALEJANDRO ZERMEÑO GONZÁLEZ

SALTILLO, COAHUILA

MARZO 2021

Tensiometers are devices for measuring soil moisture tension, that have been used widely for irrigation timing. However, with this measurement, the volume of water to be applied to replenish the soil moisture consumed by the plants cannot be determined. Therefore, the objective of this study was to evaluate four functions to describe the relation between soil water content and the corresponding tension, in three soils of different texture. The soil moisture was measured with a TDR probe and the soil tension by using tensiometers. The coefficients of the functions were obtained by lineal and no lineal regression procedures using RStudio version 3.3.3. The results of the study showed that, the tendency line of the hyperbolic function had a better fitting to the observed data of soil water content vs moisture tension than the other functions in the clay and clay loam soils. For the sandy loam soil, the second order polynomial had the better fitting, followed by the hyperbolic function, although, for high values of soil humidity tension, the hyperbolic equation had a better fit. With the equation of humidity-tension of best fitting, it is possible to obtain the soil water content for each tension value, and the corresponding volume of water to apply to replenish the humidity of the soils of different texture.

**Key words:** water tension, tensiometer, soil texture, porosity.

## INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso más importante para el crecimiento y desarrollo de las plantas, y en las regiones áridas y semiáridas la disponibilidad de esta, es el factor más limitante para la agricultura por lo que, en estas zonas el uso eficiente del agua es indispensable. Para mejorar la eficiencia del uso del agua, se debe saber el momento oportuno para aplicar los riegos y los volúmenes de agua que se deben aplicar, para reponer la humedad del suelo al punto de máxima retención. Al mantener un nivel adecuado de agua en el suelo durante el ciclo de crecimiento de las plantas, se tiene un adecuado crecimiento, para obtener los máximos rendimientos posibles (Hansen y Pasian, 1999; Kim *et al.*, 2009).

Para determinar el momento oportuno de aplicación del riego, se pueden utilizar los tensiómetros (Leib *et al.*, 2003; Zermeño *et al.*, 2007; Marković *et al.*, 2016), que son dispositivos para determinar el estado energético del agua en el suelo (potencial mátrico) o la tensión con que el agua es retenida por el suelo (Hubbell y Sisson, 2003; Pardossi *et al.*, 2009). Para que el agua pueda fluir hacia el interior de las raíces el valor absoluto del potencial o tensión de estas debe ser mayor al del suelo circundante (Pardossi *et al.*, 2009; Shock y Wang, 2011).

Los tensiómetros consisten de una capsula de cerámica con poros muy finos permeable al agua, pero no a las partículas del suelo, que se conecta a un vacuómetro por un tubo de una determinada longitud, donde la tensión se genera por el vacío que se establece en el tubo cuando el agua sale de la capsula (Thalheimer, 2013; Freire *et al.*, 2018). A medida que el suelo se seca, el potencial hídrico decrece (aumenta la tensión) y la lectura del vacuómetro aumenta; cuando el suelo se moja por riego o lluvia, el flujo ocurre en la dirección inversa, disminuye la tensión y la lectura del indicador decrece (Or, 2001; Maughan *et al.*, 2015). Cuando el suelo está saturado, el valor del vacuómetro es cero.

Los tensiómetros se usan para indicar la necesidad de aplicar el riego, principalmente en los cultivos hortícolas y frutales con sistema de riego de alta frecuencia (riego por goteo, y microaspersión). Zermeño *et al.* (2007) reportaron

que al regar arboles de limón italiano (*Citrus limón L.*), Limonaria 8A, se tiene la mayor eficiencia del uso del agua con relación a rendimiento y diámetro de frutos. Para un cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en un suelo franco limoso, el máximo rendimiento se obtiene al aplicar el riego a un rango de tensión de 25 a 30 kPa (Wang et al., 2007). En otro estudio, Kukal et al., (2005) reportaron que para obtener mejores rendimientos en el cultivo de arroz (*Oryza sativa L.*) se debe de mantener una lectura de tensión de 16 kPa aplicados en suelo franco arenoso. Marouelli y Silva, (2007) determinaron que el momento oportuno de riego para un mejor rendimiento en el cultivo de tomate en un suelo arcilloso, fue en el rango de 12 a 35 kPa.

Una limitate del uso de los tensiómetros es que los fabricantes no proporcionan la información respecto al contenido de agua en el suelo para cada valor de tensión, ya que esto depende de las características físicas de cada suelo en particular (textura, porosidad, densidad aparente). De tal forma que, no se puede determinar el volumen de agua por aplicar para reponer la humedad del suelo para los diferentes valores de tensión.

Al disponer de una función que describa la relación entre el contenido de agua y la tensión, es posible obtener el grado de abatimiento de la humedad del suelo y definir el volumen de agua que se debe aplicar para reponer la humedad consumida por el cultivo, por lo que, el objetivo de este estudio fue evaluar cuatro funciones (potencial, logarítmica, polinomio de segundo orden e hiperbólica) para estimar el contenido de agua, en función de la tensión registrada por tensiómetros en suelos de diferente textura y seleccionar la de mejor ajuste para cada textura de suelo.

## **OBJETIVOS**

### General

- Evaluar ecuaciones para determinar el contenido de agua en el suelo en función de la tensión registrada por los tensiómetros.

### Específicos

- Evaluar el ajuste de un polinomio de segundo orden, una ecuación potencial, logarítmica e hiperbólica.
- Medir la tensión del agua en suelos de diferente textura (arena, limo y arcilla).

## **HIPÓTESIS**

La ecuación hiperbólica es la que mejor describe la relación entre la tensión y el contenido de agua en el suelo, con respecto a las ecuaciones a evaluar, en suelos de diferente textura.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### **Importancia de la agua en la agricultura**

El agua, un recurso natural escaso, es fundamental para la vida, los medios de subsistencia, la seguridad alimentaria y el desarrollo. El mundo, en la actualidad, se enfrenta a una escasez de agua que obstaculiza el desarrollo de la agricultura y, por tanto, la producción de alimentos. Por tanto, es necesario un uso prudente del agua y, en particular, en la agricultura, es necesario un uso óptimo del agua. La escasez de agua es el mayor desafío para la producción de cultivos en ambientes semiáridos (Zhao *et al.*, 2010; Payero *et al.*, 2008). El crecimiento de las plantas está controlado por la tasa de división y agrandamiento celular y por el suministro de compuestos orgánicos e inorgánicos necesarios para la síntesis de nuevos protoplasmas y paredes celulares (Salisbury y Ross, 1992), en procesos metabólicos que requieren agua como disolvente. La agricultura consume el 70% del agua dulce a nivel mundial (Goodwin y O'Connell, 2008; Dowgert, 2010). En la actualidad, los agricultores riegan manualmente sus tierras a intervalos regulares mediante el riego de superficie. A pesar de su amplio uso, el método se caracteriza por una baja eficiencia de riego que da como resultado un riego excesivo o insuficiente que conduce a una reducción del rendimiento de los cultivos (Adamala *et al.*, 2014). La eficiencia del riego depende del tipo de riego utilizado (por ejemplo, el riego de superficie desperdicia mucha más agua que el riego por aspersión o por goteo presurizado) y de la programación del riego, que es el método utilizado para determinar la cantidad de agua que se aplicará a un cultivo y determinara el tiempo de aplicación. Dado que determina el uso de agua del cultivo e influye en su rendimiento, la programación del riego tiene un efecto notable en la eficiencia del uso del agua (Pardossi *et al.*, 2009). Existe una gran necesidad de modernizar las prácticas agrícolas para mejorar la productividad del agua y la conservación de los recursos.

### **Métodos directos e indirectos para medir la humedad del suelo**

Los sensores de humedad del suelo son instrumentos muy productivos para medir la humedad del suelo para evaluar el crecimiento de los cultivos (Scherer

*et al.*, 2013). Los sensores de humedad del suelo miden el contenido de agua en la zona de las raíces y son útiles en la programación del riego (Clarke *et al.*, 2008), agricultura de precisión e hidrología (Skierucha *et al.*, 2010)

Existen métodos directos e indirectos para determinar la humedad del suelo. el método directo más conocido es el método gravimétrico y, entre los indirectos, tiene los bloques de resistencia eléctrica, sonda de neutrones, radiación gamma, tensiometría, psicrometría, tomografía computarizada y reflectometría en el dominio del tiempo (Albuquerque & Durães, 2008; Leib *et al.*, 2002; 2003; McCann y Star, 2007; McCready *et al.*, 2009).

### **Tensiómetro**

Un tensiómetro es un dispositivo sellado lleno de agua que intercambia agua con el suelo a través de una taza de porcelana ( Cassel y Klute, 1986 ; Hubbell y Sisson, 2003 ; Smajstrla y Koo, 1986). A medida que las plantas eliminan el agua del suelo, el agua se extrae de la taza de porcelana, desarrollando un vacío parcial en los tensiómetros. El vacío parcial se registra como kPa [kPa = centibares (cbar)] de tensión de agua del suelo en un manómetro mecánico o mediante un dispositivo de salida electrónico. Dadas las consideraciones teóricas y las limitaciones discutidas, los tensiómetros proporcionan una medición directa (la fuerza física que las plantas ejercen al eliminar el agua del suelo) de la tensión hídrica del suelo de 0 a 85 kPa.

Los tensiómetros son adecuados para la recopilación de datos manual o electrónica. La lectura manual de un tensiómetro no requiere energía eléctrica. Los tensiómetros pueden equiparse con transductores de presión u otros dispositivos para lecturas automáticas ( Cassel y Klute, 1986 ; Hubbell y Sisson, 2003 ; Strebel *et al.*, 1973 ). El tensiómetro está en el centro de atención ya que guía a los agricultores sobre cuándo regar (Karimi *et al.*, 2015) midiendo la tensión del agua del suelo.

De los diferentes métodos para medir el contenido de agua en el suelo, el tensiómetro se adapta muy bien a los sistemas de riego por goteo y microaspersión (riegos localizados de alta frecuencia) (Baker, 1990) y es

apropiado para su aplicación en cítricos (Campbell, 1990; Paramasivam *et al.*, 2000; Boman *et al.*, 1999), funciona bajo el principio de vacío parcial, el cual se produce en una cámara cerrada por la salida de agua a través de una cápsula porosa (generalmente porcelana o cerámica) en contacto con el suelo. El agua se filtra a través de la cápsula porosa (membrana) hasta que el potencial mátrico del agua en el suelo y la cápsula porosa se equilibran (Campbell, 1990). Una adecuada calibración y operación de los tensiómetros permite una eficiente programación del riego para determinar cuándo y cuánta agua aplicar (Alam y Rogers, 1997; Tyson y Curtis, 1998; Hensley y Deputy, 1999, Hanson *et al.*, 2000).

### **Ventajas y desventajas del uso de tensiómetros**

Entre las ventajas, lectura directa del potencial matricial del suelo, económica, no destructiva, automática para lectura continua, confiabilidad relativa en comparación con otros métodos. (Shock y Wang, 2011).

#### **Ventajas**

- a) Los tensiómetros son sencillos, rápidos, económicos y fáciles de usar (Enciso-Medina *et al.*, 2007).
- b) Se pueden utilizar diferentes tipos de líquido como la solución de etilenglicol para obtener datos durante las condiciones de congelación y descongelación (Schmugge *et al.*, 1980).
- c) Un tensiómetro es ideal para suelos franco arenosos o de textura ligera (Alam y Rogers, 1997).

#### **Desventajas**

- a) Se requiere un mantenimiento periódico ya que las burbujas de aire se acumulan con el uso normal (Hensley *et al.*, 1999).
- b) Es propenso a sufrir daños debido a las temperaturas bajo cero (Alam y Rogers, 1997).

- c) Se requieren varios tensiómetros para medir porque miden el potencial hídrico del suelo solo en las proximidades del tensiómetro (Goodwin, 2009).
- d) El rango utilizable es sólo entre 0-85 kPa de tensión por encima del cual el medidor funcionará mal (Werner, 1992).
- e) Los tensiómetros registran la tensión de la humedad del suelo, pero no el contenido de humedad, por lo que no se puede determinar el volumen de agua que se debe aplicar al suelo para reponer la humedad consumida.

### **Normas para el manejo e instalación de tensiómetros**

Buttaro (2015) indica que los tensiómetros deben ser operados cuidadosamente para evitar la formación de burbujas de aire en el eje; Deben estar protegidos de las heladas y necesitan un mantenimiento regular, por ejemplo para rellenar el agua del tubo y evitar la contaminación por algas. La posible cavitación en condiciones muy secas es también un inconveniente, posiblemente ocurriendo cuando el suelo se seca a valores de potencial matricial inferiores a aproximadamente - 850 hPa o cuando el aire fluye a través de la copa porosa (Taiz & Zeiger, 2013). Aunque la técnica tensiométrica es sencilla, relativamente fácil de usar y su rango de medida es adecuado para la mayoría de las aplicaciones agronómicas (Young y Sisson, 2002), no cubre toda la gama de interés y no es adecuado para algunas aplicaciones donde el agua del suelo limita el crecimiento de las plantas, por ejemplo (Durner y Or, 2006).

Primeramente, 24 horas previas a la instalación se debe colocar la cápsula porosa en un recipiente con agua destilada. Al transportar el instrumento hay que proteger la punta de cerámica de la sequedad del aire con un paño húmedo o similar y al llegar al lugar se debe agregar 10 ml de solución anti alga dentro del tensiómetro y rellenar con agua destilada. Realizar leves golpes con la palma de la mano en la abertura para facilitar el llenado.

Seleccionar una planta representativa de su cultivo. En la zona del bulbo húmedo (evitando cercanía a un emisor de riego) se debe perforar un agujero con un barreno hasta una profundidad deseada (determinada por la ubicación de la

cápsula porosa). El suelo debe estar húmedo para facilitar esta labor (Fueyo, 1998).

Introducir el tensiómetro hasta la profundidad perforada, rellenar con tierra los alrededores del tubo y compactarla para evitar que agua o aire ocupen espacios vacíos que distorsionen la lectura. Es imprescindible que haya buen contacto entre la parte enterrada del tensiómetro (especialmente la punta de cerámica) y el suelo para obtener lecturas precisas. En un suelo suelto podemos colocar tensiómetros irrometer cortos, simplemente empujándolos con la mano sin presionarlos demasiado. Así, simplemente obtendrá un buen contacto con el suelo sin estropear las estructuras del suelo o del sistema radicular.

Para extraer el aire del tensiómetro se utiliza una bomba de vacío, la cual debe succionar hasta que el manómetro indique lecturas de 85 o 90 centibares.

Finalmente, enroscar el tapón hasta girarlo un cuarto de vuelta, una vez que el cierre de caucho haya tocado su asiento.

Las lecturas deben realizarse en forma diaria y antes del riego, recomendándose evaluar nuevamente durante el periodo de mayor consumo del cultivo, es decir, a partir de mediodía para fines comparativos (Villablanca et al., 2015). Después de instalar los instrumentos a la profundidad apropiada, la superficie del suelo o tierra suelta, se debe amontonar alrededor del tubo de plástico; Se amontona de 3 - 4" (7.5 - 10 cm). Esto asegura un buen contacto entre el suelo y el instrumento, esto también genera un sentido de drenaje llevando el agua superficial en la dirección contraria del tensiómetro irrometer.

Estos aparatos se colocan de 2 o más elementos a diferentes profundidades y distancias de las líneas de aplicación del agua de riego, con el fin de conocer la humedad en distintos puntos de la zona de raíces. Existen tensiómetros de distintas longitudes, adoptando unas u otras en función del sistema radicular de las plantas. Para cítricos y frutales, los más usuales son los de 12" (30 cm) y 24"(60 cm). Para hortalizas generalmente se utilizan los de 6" y 12" (Del Amor et al., 1989)

### **Tensiómetros en la programación de riego en diferentes cultivos**

El criterio de riego de la tensión del agua del suelo específico elegido para cada cultivo debe basarse en la experiencia con ese cultivo en una región determinada. Para cualquier cultivo, el clima, el tipo de suelo, el sistema de riego y la ubicación del sensor afectan el criterio de riego óptimo. La lluvia es el principal factor climático que afecta el régimen hídrico del suelo y, por lo tanto, la programación del riego (Shock y Wang, 2011). Coelho et al. (1996) determinaron que para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) en suelo arenoso la tensión correspondiente para un óptimo rendimiento es de 8.5 kPa, similar a lo que presentó Abreu et al. (1980) con un valor de tensión de 10 kPa, para el suelo franco arcillo arenoso (Hedge, 1986) concluyó que a 45 kPa se obtienen mejores rendimientos en cultivo de cebolla (*Allium cepa*). El cultivo de brócoli (*Brassica oleracea, capitata*) medido con tensiómetros en suelo franco arenoso para óptimos crecimientos y producción, requiere de un rango de tensión de 10 a 12 kPa medidos con tensiómetros Thompson et al. (2002a, 2002b), en otro estudio Thompson et al. (2000) determinaron que el rango para coliflor (*Brassica oleracea, Botrytis*) en suelos franco arenosos la tensión óptima es de 10 a 12 kPa. Rivera et al. (2009) recomendó el riego adecuado para maíz dulce (*Zea Mays*) en México a una tensión de 30 kPa utilizando tensiómetros. El criterio ideal para riego en papa (*solanum tuberosum*) en suelo franco limoso es en un rango de tensión de (25 a 30 kPa) utilizando tensiómetros (Kang et al., 2004), para suelos arenosos el rango ideal es de 20 a 30 kPa (Hegney y Hoffman, 1997). Jeranyama (2009) informa que los arándanos (*Vaccinium macrocarpon*) requieren humedad en un suelo franco arcillo arenoso en un rango de 2 a 6 kPa por la mañana y de 2 a 10 kPa por la tarde, en cual se midieron con tensiómetros.

### **Ecuaciones tensión-humedad para el uso de tensiómetros en la determinación del volumen de agua por aplicar en el riego**

Arias (2019) realizó un experimento en suelo franco arenoso en el cual obtuvieron una ecuación logarítmica para determinar el contenido de humedad en función de la tensión con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.99. Por su parte Calderón et al. (2002), realizaron un experimento en suelo arcilloso en el cual

obtuvo una ecuación lineal para determinar curva obtenida a partir del contenido de humedad volumétrico y la tensión registrada por tensiómetros. En el estudio de Pérez et al. (2008) obtuvieron una ecuación lineal para determinar el volumen de agua a aplicar haciendo uso de tensiómetros colocados a una profundidad de 20 cm en suelo franco arenoso. En otra investigación Olivas (1990) obtuvo una función exponencial para determinar el contenido de humedad utilizando tensiómetros en suelo arcilloso, franco arcilloso y franco arenoso con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.98, 0.95 y 0.96 respectivamente. Por otra parte Chino (2018) obtuvo una función exponencial humedad-tensión en un suelo franco arenoso con un coeficiente de determinación de 0.98.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Suelos y sus características físicas

Para el estudio se utilizaron tres suelos que se obtuvieron de diferentes localidades para que la textura correspondiera a franco arenosa, franco arcillosa y arcillosa. La textura de los suelos se determinó por el método del hidrómetro (Bouyoucos, 1962), realizando tres repeticiones por textura de suelo. Para cada suelo de diferente textura se obtuvo la densidad bruta (aparente), la densidad de sólidos y la porosidad. La densidad aparente se determinó por el método de la probeta ya que el suelo se cribó para posteriormente colocares en contenedores. La densidad de solidos se determinó con el método del picnómetro (Villaseñor, 2016); la porosidad del suelo ( $\eta$ ) se obtuvo a partir de los valores de densidad bruta ( $\rho_b$ ) y densidad de solidos ( $\rho_s$ ) con la siguiente relación:

$$\eta = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (1)$$

### Contenido de humedad y tensión correspondiente

Para tener mejor control de las mediciones del contenido de agua en el suelo y la tensión correspondiente, se usaron nueve contenedores de PVC (NMX-E-199/1) de 19.3 cm de diámetro interior y 25 cm de altura. En uno de los extremos se fijó una malla metálica (doble capa) de 1 mm de diámetro y sobre esta se colocó un papel filtro (80 gr/m<sup>2</sup>). Se usaron tres contenedores por textura de suelo, los suelos se cribaron en una malla de 2 mm antes de depositarse en los contenedores. El volumen de agua ( $V_{\text{agua}}$ ) que se aplicó a los suelos de diferente textura, para saturar el espacio poroso se determinó con la siguiente relación:

$$V_{\text{agua}} = V_s * (\eta - \theta_{v_{\text{inic}}}) \quad (2)$$

Dónde:  $V_s$  es el volumen de suelo en el contenedor (cm<sup>3</sup>),  $\eta$  es la porosidad del suelo y  $\theta_{v_{\text{inic}}}$  es el contenido inicial de agua en el suelo.

Al día siguiente de la saturación, se insertó un tensiómetro (de 30 cm de longitud, marca Irrrometer, USA) al centro de cada contenedor a una profundidad de 15 cm.

Diariamente a las 8:00 h, se registró la tensión de cada tensiómetro de cada textura del suelo. Al mismo tiempo, se determinó el contenido de agua ( $\theta_v$ ) en el suelo con una sonda TDR (HS2P, Campbell, Sci, Inc., USA) con varillas de 12 cm de longitud. Para cada contenedor, el contenido de agua en el suelo fue el promedio de tres mediciones de la sonda. Las mediciones de contenido de humedad y tensión correspondiente se realizaron hasta el punto de cavitación de los tensiómetros o al punto donde no hubo cambios de tensión. Para el ajuste de las ecuaciones se usaron los datos promedio de tensión de cada textura (tres valores) con los promedios correspondientes del contenido de agua en el suelo de los tres contenedores de cada textura (nueve valores).

### **Ecuaciones de humedad del suelo en función de la tensión**

Se evaluaron cuatro ecuaciones para describir la relación entre el contenido de agua en el suelo (medida con la sonda TDR) y la tensión de humedad (obtenida con los tensiómetros). Las ecuaciones evaluadas fueron: potencial, logarítmica, polinomio de segundo orden y una ecuación hiperbólica. Estas ecuaciones se describen con las siguientes relaciones:

Ecuación Potencial:

$$\theta_v = b_0 * \Psi^{b_1} \quad (3)$$

Ecuación logarítmica:

$$\theta_v = b_0 + b_1 * \ln(\Psi) \quad (4)$$

Polinomio de segundo orden:

$$\theta_v = b_0 + b_1 * \Psi + b_2 * \Psi^2 \quad (5)$$

Ecuación hiperbólica:

$$\theta_v = \frac{b_0 * \Psi}{b_1 + \Psi} + b_2 \quad (6)$$

Dónde:  $\theta_v$  es el contenido de humedad con base a volumen ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $\Psi$  es la tensión (kPa),  $b_0$ ,  $b_1$  y  $b_2$  son los coeficientes de regresión de las ecuaciones. Los coeficientes de las primeras tres ecuaciones se obtienen con procedimientos

de regresión lineal. Para la función hiperbólica, los coeficientes se obtuvieron con un procedimiento de regresión no lineal, con interacciones de funciones Jacobianas. Para la obtención de los coeficientes de las ecuaciones se utilizó el software RStudio, versión 3.3.3, usando los paquetes “lm” y “nlmrt”.

### **Evaluación estadística de las funciones**

El ajuste de las ecuaciones a los datos observados en las diferentes texturas de suelo, se evaluó determinado el error medio absoluto, cuadrado medio del error y el coeficiente de determinación. Además, para cada ecuación se realizó un análisis de extremos, es decir, cual es el comportamiento de las predicciones a valores bajo y altos de la variable independiente. Para estas determinaciones se elaboraron scripts usando RStudio, versión 1.3

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Características físicas de los suelos evaluados

Los suelos evaluados corresponden a la clasificación textural de: arcilla, franco arcilloso y franco arenoso (Cuadro 1). Las propiedades físicas de dichos suelos se presentan en el Cuadro 2. El alto contenido de arena y bajo de limo del suelo franco arenoso indican que el suelo puede tener baja capacidad de retención de agua. El suelo arcilloso está constituido por agregados de silicatos de aluminio hidratado, procedentes de la descomposición de minerales de aluminio. Puede presentarse de diferentes colores según las impurezas que contiene, siendo más blanco cuando es más pura. El diámetro de las partículas de los agregados de arcilla es inferior a 0.002 milímetros (Higuera *et al.*, 2012). Los suelos arenosos se caracterizan por retener menor humedad y sus densidades aparentes son altas (1.4 a 1.5 g cm<sup>-3</sup>), (García *et al.*, 2009). Los suelos arcillosos tienen mayor porosidad y pueden retener más humedad (Porta *et al.*, 1994), son de menor peso y de baja densidad (1.1 a 1.2 g cm<sup>-3</sup>). Mientras que, los suelos francos quedan en lugar intermedio de estas características físicas (Brady y Weil, 1996). Los suelos limosos tienen buena capacidad de retención de agua, que queda disponible para el crecimiento de las plantas (Buckman y Brady, 1966).

**Cuadro 1.** Proporción del tamaño de partículas y clasificación textural de los suelos utilizados en el estudio.

Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Clasificación textural
52	24	24	Arcilla
37.6	26	36.4	Franco arcilloso
15.6	8	76.4	Franco arenoso

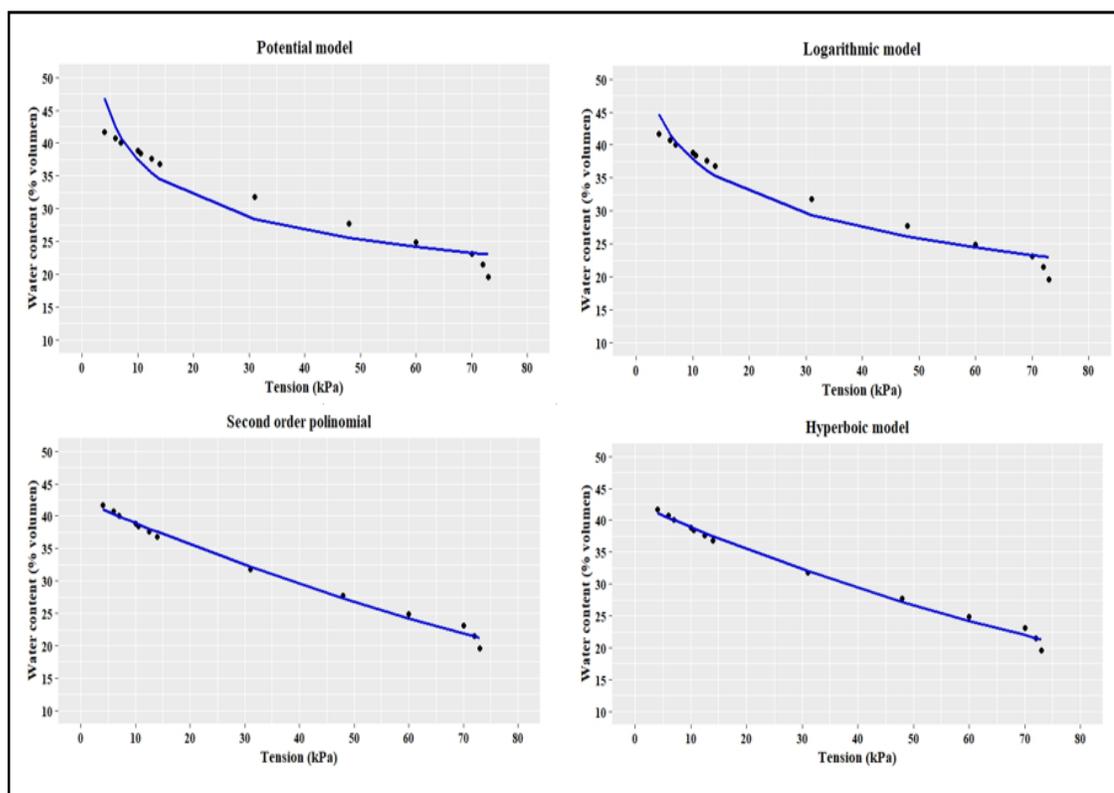
**Cuadro 2.** Propiedades físicas de los suelos de diferente textura usados en el estudio.

Suelo	Densidad de sólidos (g cm <sup>-3</sup> )	Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	Porosidad (%)
Arcilloso	2.03	1.159	43.05
Franco arcilloso	2.06	1.231	40.53
Franco arenoso	2.06	1.324	35.63

### **Funciones humedad-tensión en el suelo franco arcilloso**

Para el suelo franco arcilloso, la función hiperbólica y el polinomio de segundo orden muestran una mejor relación entre el contenido de agua en el suelo y la tensión registrada por los tensiómetros (Figura 1). Nótese que en ambas funciones la línea de tendencia se ajusta adecuadamente a los datos observados en todo el rango de valores de tensión (bajos y altos). Por el contrario, la línea de tendencia de la función potencia y logarítmica muestran mayor dispersión (menor ajuste) a los datos observados (Figura 1). Para la altitud sobre nivel del mar donde se realizó este estudio (1740 m), la tensión máxima registrada por los tensiómetros fue 74 kPa. A menor altitud sobre nivel del mar mayor es el valor que pueden registrar los tensiómetros antes del punto de cavitación. Al respecto, Shock et al. (2016) observaron una tensión de 79 kPa al punto de cavitación a una altura de 676 msnm. En otro estudio Sun et al. (2010) reportaron una tensión máxima de 80 kPa para un suelo franco arcilloso a una elevación de 44 msnm. En el Cuadro 3 se muestran las ecuaciones de las diferentes funciones con los coeficientes de regresión correspondientes. El valor del coeficiente  $b_0$  de la función potencial, logarítmica y el polinomio de segundo orden representa el valor del contenido de humedad cuando la tensión tiende a cero (suelo saturado), mientras que, para la función hiperbólica corresponde al coeficiente  $b_2$ ; por lo que, dichos coeficientes deben tener relación con la porosidad del suelo. Nótese que el coeficiente  $b_0$  del polinomio de segundo orden y el coeficiente  $b_2$  de la función hiperbólica son parecidos entre ellos y semejantes al valor de la

porosidad del suelo (Cuadro 3). Mientras que, los coeficientes  $b_0$  de la función potencial y logarítmica son muy diferentes a la porosidad del suelo. Con esta base, la función hiperbólica es la más adecuada para estimar el contenido de agua en el suelo en función de la tensión en suelos de textura franco arcillosa.



**Figura 1.** Funciones que describen la relación entre el contenido de humedad y la tensión registrada por el tensiómetro en un suelo franco arcilloso.

**Cuadro 3.** Coeficientes de regresión de las funciones evaluadas para el suelo franco arcilloso, con el uso de tensiómetros.

Función	Coeficientes			Ecuación
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	
Potencial	65.793	-0.244		$\theta_v = b_0 * \Psi^{b_1}$
Logarítmica	55.018	-7.463		$\theta_v = b_0 + b_1 * \ln(\Psi)$
Polinomio de 2° orden	42.443	-0.362	0.00983	$\theta_v = b_0 + b_1 * \Psi + b_2 * \Psi^2$
Hiperbólica	-81.470	205.057	42.701	$\theta_v = \frac{b_0 * \Psi}{b_1 + \Psi} + b_2$

### Evaluación estadística de las funciones en el suelo franco arcilloso

La ecuación hiperbólica tuvo el mejor ajuste a los datos observados, ya que presentó los valores menores del error medio absoluto (EMA) y menor raíz del cuadrado medio del error (RCME), de las cuatro funciones evaluadas (Cuadro 4). El coeficiente de determinación más alto ( $R^2 = 0.992$ ), lo tuvieron la función hiperbólica y el polinomio de segundo orden. Estos resultados nuevamente sugieren que la función hiperbólica sería la mejor opción para determinar el contenido de humeado en función de la tensión, para suelos de textura franco arcillosa, con el uso de tensiómetros. Estudios previos han reportado estas y otras funciones humedad-tensión para el uso de tensiómetros. Por ejemplo, Zermeño et al. (2007) ajustaron una función logarítmica para determinar el contenido de agua en función de la tensión para la programación del riego de una huerta de limón italiano con el uso de tensiómetros. En otro estudio, usaron un polinomio de segundo orden (con un  $R^2 = 0.740$ ) para aplicación del riego en un suelo franco arcilloso, con el uso de tensiómetros (Majhi y Sarkar, 2019). Shock et al. (2016) obtuvieron un polinomio de segundo orden para determinar el contenido de agua en el suelo en función de la tensión (medida con tensiómetros) con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.720.

**Cuadro 4.** Estadísticos del ajuste de los modelos evaluados en el suelo franco arcilloso, con el uso de tensiómetros.

Función	EMA	RCME	$R^2$
Potencial	2.030	2.411	0.911
Logarítmica	1.446	1.730	0.951
Polinomio de 2º orden	0.549	0.712	0.992
Hiperbólica	0.509	0.693	0.992

EMA = error medio absoluto, RCME = raíz del error cuadrático medio,  $R^2$  = coeficiente de determinación

Considerando la función hiperbólica (mejor ajuste), es posible definir diferentes valores de la humedad del suelo y el abatimiento correspondiente de la humeado retenida en el espacio poros para diferentes valores de tensión registrada por los

tensiómetros (Cuadro 5). Por ejemplo, si se define una tensión de 30 kPa para la aplicación del riego, el contenido volumétrico de agua en el suelo es 33.3 % que corresponde a un abatimiento de 26.58 % de la humedad retenida en el espacio poroso del suelo. Para reponer dicho abatimiento de la humedad a una profundidad de 40 cm en una ha, se debe aplicar un volumen de 289.2 m<sup>3</sup> de agua. De igual forma, se pueden establecer diferentes valores de tensión para obtener los volúmenes de agua requeridos para reponer la humedad del suelo. Esto muestra la aplicación que se puede realizar al disponer de una función tensión-humedad para el uso de los tensiómetros en la programación de la irrigación.

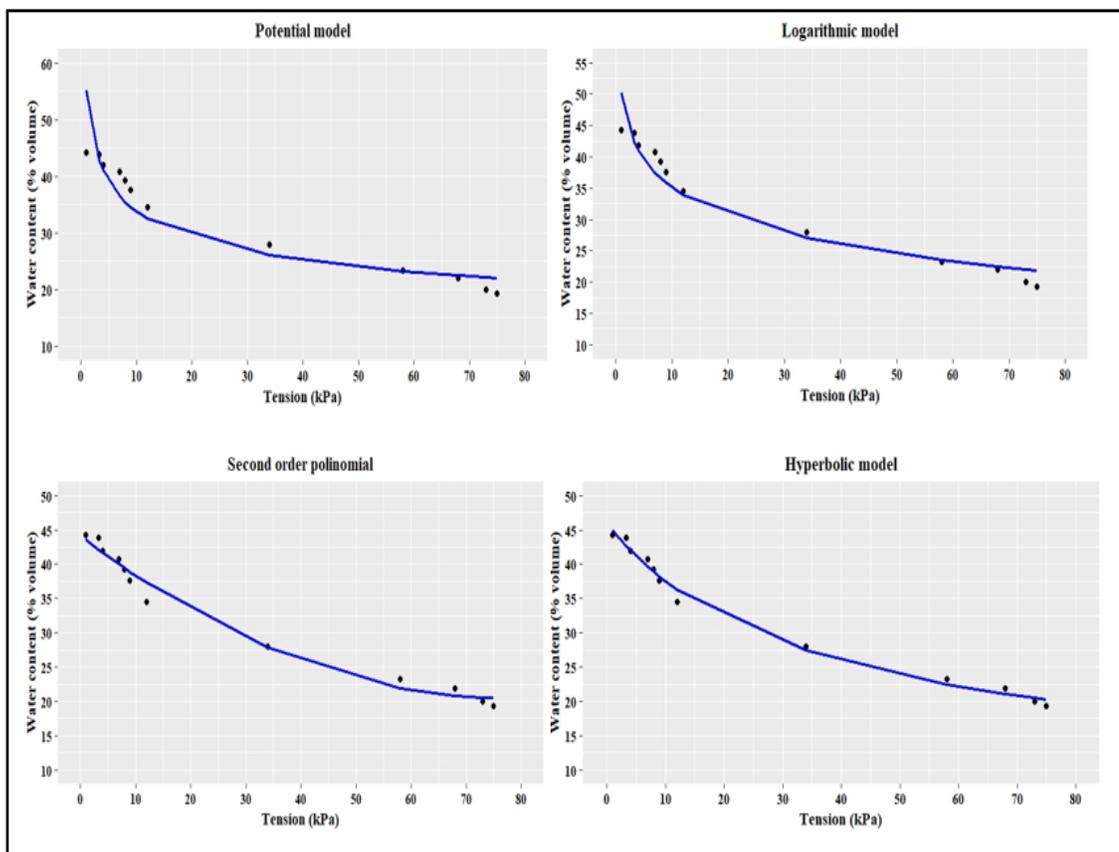
**Cuadro 5.** Contenido de humedad y abatimiento del agua del espacio poroso para diferentes valores de tensión (medida con tensiómetros) en un suelo franco arcilloso.

Tensión (kPa)	Contenido volumétrico de agua (%)	Abatimiento de la humedad del espacio poroso (%)
5	40.76	7.36
10	38.91	11.56
20	35.46	19.41
30	33.30	26.58
40	29.40	33.18
50	26.73	39.25
60	24.26	44.87
70	21.97	50.07

### **Relación entre el contenido de humedad y la tensión en el suelo arcilloso**

Al igual que para el suelo franco arcilloso, en el suelo arcilloso la función hiperbólica y el polinomio de segundo orden muestran la línea de tendencia que mejor se ajusta a los datos observados de la relación entre el contenido de humedad y la tensión (Figura 2). Nótese que para valores bajos y altos de tensión el ajuste de la función hiperbólica es ligeramente mejor que el del polinomio de

segundo orden. Mientras que, la función potencial y la logarítmica muestran mayor dispersión (menor ajuste) a valores bajos y altos de tensión (Figura 2). Para el suelo arcilloso y la elevación del sitio (1740 m), la máxima tensión registrada por los tensiómetros antes de cavitación fue 75 kPa. Para una elevación de 1767 m, la máxima lectura alcanzada por los tensiómetros fue 66 kPa (Villalobos *et al.*, 2005). En el Cuadro 6 se muestran los coeficientes de regresión de las funciones evaluadas. Otros estudios también han reportado el ajuste de estas y otras funciones a los datos de humedad-tensión con el uso de tensiómetros. Por ejemplo, Covarrubias *et al.* (2019) obtuvieron un  $R^2$  de 0.99 para una función logarítmica humedad-tensión en un suelo arcilloso. Mientras que, Godoy (2020) ajusto una ecuación lineal con un  $R^2$  de 0.891 en un suelo arcilloso.



**Figura 2.** Funciones que describen la relación entre el contenido de humedad y la tensión registrada por el tensiómetro en un suelo arcilloso.

**Cuadro 6.** Coeficientes de regresión de los modelos evaluados para el suelo arcilloso, con el uso de tensiómetros.

Función	Coeficientes			Ecuación
	b0	b1	b2	
Potencial	55.265	-0.213		$\theta_v = b_0 * \Psi^{b_1}$
Logarítmica	50.244	-6.3569		$\theta_v = b_0 + b_1 * \ln(\Psi)$
Polinomio 2° orden	44.133	-0.618	0.00404	$\theta_v = b_0 + b_1 * \Psi + b_2 * \Psi^2$
Hiperbólica	-37.438	34.664	45.937	$\theta_v = \frac{b_0 * \Psi}{b_1 + \Psi} + b_2$

### Evaluación estadística de las funciones en el suelo arcilloso

Para el suelo arcilloso, la función hiperbólica fue estadísticamente la que mejor se ajustó a los datos observados, debido a que tuvo el valor menor del error medio absoluto, menor raíz del cuadrado medio del error y el valor mayor del coeficiente de determinación (Cuadro 7). Después de la función hiperbólica, el polinomio de segundo orden fue la función de mejor ajuste. Como se mencionó anteriormente, el valor del coeficiente de regresión b0 de las tres primeras funciones y el coeficiente b2 de la función hiperbólica, representan el valor del contenido de humedad cuando la tensión tiende a cero, por lo que, dicho coeficiente debe tener relación con la porosidad del suelo. Nótese que b0 del polinomio de segundo orden y b2 del polinomio de segundo orden (Cuadro 6) son más parecidos a la porosidad del suelo (Cuadro 2) que el coeficiente b0 de la ecuación potencial y logarítmica (Cuadro 6). De igual forma que para el suelo franco arcilloso, con base a los estadísticos de ajuste y la línea de tendencia, se recomienda la función hiperbólica para determinar el contenido de agua en el suelo en función de la tensión medida con tensiómetros. Estas y otras funciones han sido reportadas por otros estudios, como los de Medina et al., (2018) que obtuvieron funciones logarítmicas para un suelo arcilloso con un R<sup>2</sup> en un rango de 0.93 a 0.97, y un coeficiente de variación de 4.22 a 5.34. En otro estudio Játiva

et al. (2019), ajustaron una ecuación exponencial con un  $R^2$  de 0.955 para un suelo arcilloso.

Considerando la función hiperbólica por ser la del mejor ajuste, se pueden definir diferentes valores de tensión y determinar el valor correspondiente del contenido de agua en el suelo y el abatimiento correspondiente de la humedad (Cuadro 7). Nuevamente, si, por ejemplo, se establece una tensión de 30 kPa, el contenido agua en el suelo y abatimiento de la humedad correspondiente son 28.57 % y 41.94 %. Para reponer la humedad del suelo a una profundidad de 40 cm, se debe aplicar un volumen de agua de  $579.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . De forma similar, se podría definir cualquier valor de tensión para determinar el volumen de agua correspondiente en el suelo y el volumen de agua por aplicar. Esto demuestra la utilidad de tener una función de humedad-tensión como apoyo en la programación de la irrigación con el uso de tensiómetros. En un estudio similar, Villalobos et al. (2005) ajustaron una función lineal para determinar el contenido de agua en un suelo arcilloso en función de la lectura del tensiómetro, observando que, una tensión de 5 kPa, correspondió a un contenido de humedad de  $0.44 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ .

**Cuadro 7.** Estadísticos del ajuste de las funciones evaluadas en el suelo arcilloso, con el uso de tensiómetros.

Función	EMA	RCME	$R^2$
Potencial	2.772	3.922	0.898
Logarítmica	1.912	2.452	0.931
Polinomio de 2º orden	1.012	1.240	0.982
Hiperbólica	0.791	0.893	0.991

EMA = error medio absoluto, RCME = raíz del error cuadrático medio,  $R^2$  = coeficiente de determinación

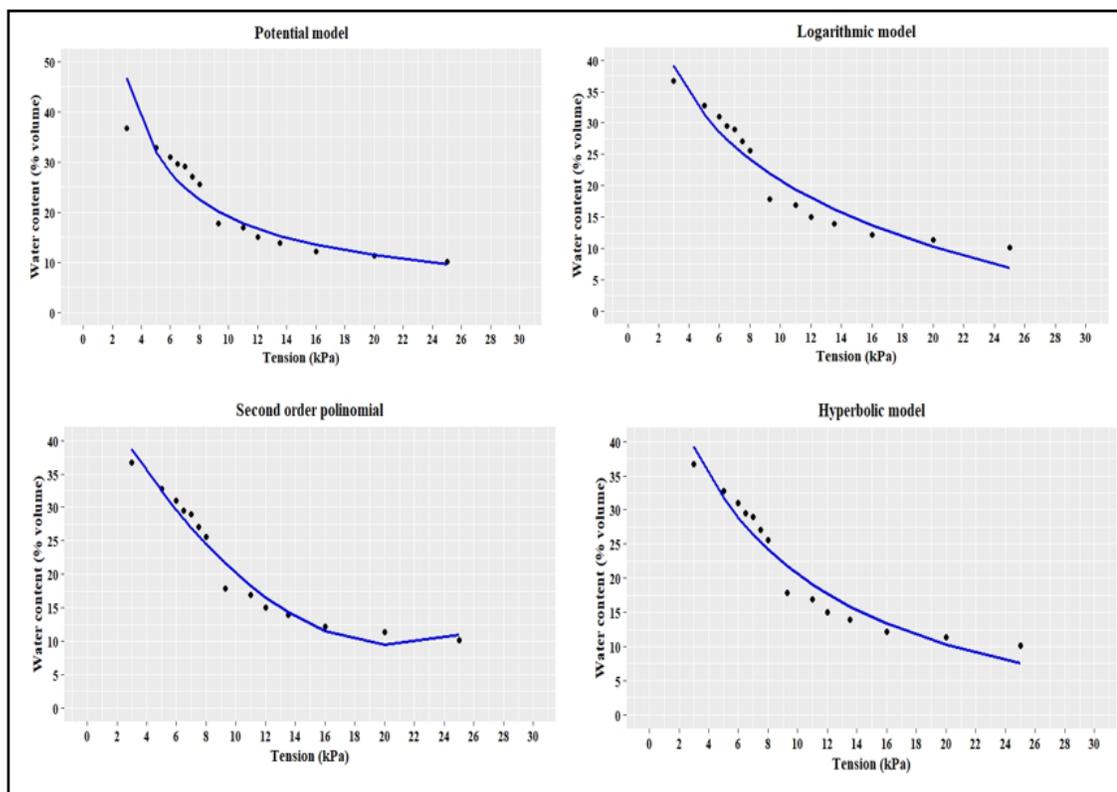
**Cuadro 8.** Contenido de humedad y abatimiento del agua del espacio poroso para diferentes valores de tensión (con el tensiómetro) en un suelo arcilloso.

Tensión (kPa)	Contenido de humedad volumétrico (%)	Abatimiento de la humedad del espacio poros (%)
5	41.22	16.22
10	37.55	23.67
20	32.24	34.47
30	28.57	41.94
40	25.88	47.40
50	23.83	51.57
60	22.21	54.86
70	20.90	57.52

#### **Relación entre el contenido de humedad y la tensión en el suelo franco arenoso**

Para el suelo franco arenoso, la máxima tensión que pudieron registrar los tensiómetros fue 25 kPa, que correspondió a un abatimiento de la humedad del 78% (Cuadro 11). Esto probablemente se debió a que, en el suelo franco arenoso se tiene una menor superficie específica (relación entre el área superficial total de las partículas por unidad de masa), que afecto la relación entre las fuerzas de adhesión y cohesión dentro del espacio poroso del suelo, limitando la capacidad de retención de agua de los poros del suelo. La línea de tendencia de la función logarítmica, polinomio de segundo orden y la función hiperbólica muestran un buen ajuste a los datos observados del contenido de agua en el suelo vs la tensión de humedad (Figura 3). Nótese que la línea de tendencia de la función potencial muestra un buen ajuste a valores altos de tensión, pero mayor dispersión a valores bajos. (Figura 3). Las líneas de tendencia de la función logarítmica y la hiperbólica son muy similares, mientras que la línea del polinomio de segundo orden muestra una tendencia ligeramente creciente después de 20 kPa de tensión (Figura 3), esto se debe a las propiedades de parábola de dicha función. Esta tendencia limitaría el uso de esta función para tensiones mayores

de 20 kPa. En el Cuadro 9 se muestran las ecuaciones de las funciones evaluadas con los coeficientes de regresión correspondientes.



**Figura 3.** Funciones que describen la relación entre el contenido de humedad y la tensión registrada por el tensiómetro en un suelo franco arenoso.

**Cuadro 9.** Coeficientes de regresión de los modelos evaluados para el suelo franco arenoso con el uso de tensiómetros.

Función	Coeficientes			Ecuación
	b0	b1	b2	
Potencial	105.440	-0.742		$\theta_v = b_0 * \Psi^{b_1}$
Logarítmica	55.890	-15.220		$\theta_v = b_0 + b_1 * \ln(\Psi)$
Polinomio 2° orden	49.369	-3.843	0.0923	$\theta_v = b_0 + b_1 * \Psi + b_2 * \Psi^2$
Hiperbólica	-65.628	7.556	57.941	$\theta_v = \frac{b_0 * \Psi}{b_1 + \Psi} + b_2$

### Evaluación estadística de las funciones en el suelo franco arenoso

En el suelo franco arenoso, el polinomio de segundo orden fue la función que estadísticamente presentó el mejor ajuste a los datos observados (contenido de humedad vs tensión), ya que tuvo el valor menor del error medio absoluto, raíz del cuadrado medio del error y mayor valor del coeficiente de determinación (Cuadro 10); seguido por la función hiperbólica. Sin embargo, al realizar el análisis de extremos, se observó que para valores mayores de 20 kPa, la línea de tendencia del polinomio de segundo orden muestra una tendencia creciente (Figura 3), por lo que, dicha función no sería adecuada para estimar el contenido de agua en el suelo para tensiones mayores de 20 kPa. Por ejemplo, al extrapolar para una tensión de 27 kPa, el valor del contenido de humedad del suelo para el polinomio de segundo orden es 12.87 %, mientras que, para la función hiperbólica es 6.66 %. El valor del contenido de humedad medido para la tensión de 25 kPa fue 10.17%; debido a que el contenido de humedad para una tensión de 27 kPa no puede ser mayor que a la tensión de 25 kPa, el polinomio de segundo orden sobre estima el contenido de humedad para tensiones mayores de 20 kPa. Por lo que, es más recomendable el uso de la función hiperbólica. Estudios previos han reportado el uso de diferentes funciones de tensión-humedad para el uso de tensiómetros. Al respecto, Abd El-Baset et al. (2017) obtuvieron un  $R^2$  de 0.964 para un polinomio de segundo orden en un suelo franco arenoso. El Marazky et al. (2011) reportaron un  $R^2$  de 0.97 para una función lineal en suelo franco arenoso.

**Cuadro 10.** Estadísticos del ajuste de los modelos evaluados en el suelo franco arenoso, en el uso de tensiómetros.

Función	EMA	RCME	$R^2$
Potencial	2.554	3.496	0.925
Logarítmica	2.286	2.430	0.922
Polinomio de 2 <sup>o</sup> orden	1.405	1.641	0.965

Hiperbólica	2.057	2.199	0.936
-------------	-------	-------	-------

EMA = error medio absoluto, RECM = raíz del error cuadrático medio,  $R^2$  = coeficiente de determinación

Considerando la función hiperbólica, se pueden establecer valores de tensión para obtener el valor correspondiente del contenido humedad y el abatimiento correspondiente de la humedad (Cuadro 11). Por ejemplo, si se establece un valor de tensión de 8 kPa, el contenido agua en el suelo y abatimiento de la humedad correspondiente será 24.19 % y 35.66 %, respectivamente, Para reponer la humedad del suelo de una ha a una profundidad de 40 cm, se deben aplicar 457.6 m<sup>3</sup> de agua, De igual manera, se podría definir cualquier valor de tensión para determinar el contenido de agua y el volumen de agua por aplicar. Nuevamente, esto muestra la utilidad de disponer de una función humedad-tensión para la planeación del riego con el uso de tensiómetros. Al respecto, Kumari et al. (2017) reportaron que una tensión de 14 kPa en un suelo franco arenoso correspondió a un contenido de humedad volumétrico de 12% y un abatimiento de 65% de la humedad disponible. En otro estudio, Sun et al. (2010) mencionan que el contenido de humedad volumétrico a saturación de un suelo franco arenoso fue 32%, y que una tensión de 12 kPa, correspondió a un contenido de humedad de 25%.

**Cuadro 11.** Contenido de humedad y abatimiento del agua del espacio poroso para diferentes valores de tensión (medida con tensiómetros) en un suelo franco arenoso.

Tensión (kPa)	Contenido de humedad volumétrico (%)	Abatimiento del agua del espacio poros (%)
4	35.22	6.32
8	24.19	35.66
12	17.67	53.01
16	13.36	64.46
20	10.31	72.58
24	8.03	78.65

## CONCLUSIONES

La función hiperbólica mostró estadística y gráficamente mejor ajuste a los datos observados, del contenido de agua en el suelo (medido con una sonda TDR) vs la tensión de humedad (medida con tensiómetros), en suelos de textura arcillosa y franco arcillosa, que el ajuste de una función potencial, logarítmica y de un polinomio de segundo orden. Para los suelos de textura franco arenosa, la función correspondiente a un polinomio de segundo orden fue la del mejor ajuste, seguida por la función hiperbólica. Sin embargo, para valores altos de la tensión, el polinomio de segundo orden tiende a sobre estimar el contenido de humedad, por lo que, para los suelos de textura franco arenosa también se recomienda la función hiperbólica. Con la ecuación de mejor ajuste que describe la relación entre el contenido de agua en el suelo y la tensión de humedad, es posible determinar la humedad del suelo para cualquier valor de tensión, con lo que, además de establecer el momento de la aplicación del riego (en función de la tensión), es posible determinar el volumen de agua que se debe aplicar para reponer la humedad del suelo.

## REFERENCIAS

- Abd El-Baset, M. M., Eid, A. R., Wahba, S., El-Bagouri, K., & El-Gindy, A. G. (2018). Scheduling Irrigation using automatic tensiometers for pea crop. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 19(5), 174-183.
- Abreu, T.A.S., Millar, A.A., Choudhury, E.N. & Choudhury, M.M. (1980). Analyses of onion production under variable irrigation. *Pesquisa Agropecu. Bras.* 15, 233-236.
- Adamala, S., Raghuwanshi, N.S. & Mishra, A. (2014). Development of surface irrigation systems design and evaluation software. *Computer and Electronics in Agriculture*, 100, 100-110.
- Alam M, D H Rogers (1997) Tensiometer use in scheduling irrigation. *Irrigation Management Series*. Kansas State University.
- Albuquerque, P. E., & Durães, F. M. (2008). Uso e manejo de irrigação. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 528 p.
- Angeles Alegre, J. L. (2019). Determinación del coeficiente de cultivo (kc) del cultivo de holantao (*Pisum Sativum*) utilizando lisímetro de drenaje en el centro de investigación y producción agrícola (CIPA) Cañasbamba–2018. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo”, Huaraz, Perú.
- Arias, C. A. (2019). *Distribución espacial de las propiedades físicas y de la curva de retención de humedad en suelos con cultivo de banano*. Tesis de Licenciatura. Universidad Técnica de Machala. Machala, Ecuador.
- Baker J M (1990) Measuring water potential in soils and plants. *Remote Sensing Rev.* 5(1), 263-279. DOI: 10.1080/02757259009532134
- Boman, B., Levy, Y., & Parson, L. (1999). Water management, physiological response of citrus to irrigation and water stress. In: *Citrus Health Management*. L W Timer, L W Duncan (eds). APS Press. University of Florida, USA. 72-81.
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method for making particle analysis of soil. *Agron. J.* 54, 464-465. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Brandy, N. C., & Weil, R. R. (1996). *The nature and properties of Soils*, Prentice Hill. Inc, New Jersey, 890-897.

- Buckman, H., & Brady, N. (1966). The nature and properties of soil. Ed. Mc Millan Company NY, 92-95.
- Buttaro, D., Santamaria, P., Signore, A., Cantore, V., Boari, F., Montesano, F. F., & Parente, A. (2015). Irrigation management of greenhouse tomato and cucumber using tensiometer: Effects on yield, quality and water use. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 440-444.
- Calderón, F. S., Ambrosio, R., Medina, J. P., & Medina, W. (2002). Evaluación de diferentes métodos para determinar la humedad del sustrato en un cultivo hidropónico de clavel en la sabana de Bogotá mediante la utilización de 5 subsistemas de riego. *Departamento Técnico Dr. Calderón Laboratorios Ltda.* Bogotá, Colombia.
- Cambell, G. S., & Mulla, D. J. (1990). Measurement of soil water content and potential. *Agronomy*, 30, 127-142.
- Cassel, D. K., y Klute, A. (1986). Water potential: Tensiometry. P. 563-596. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9, ASA, and SSSA, Madison, WI.
- Chino, W. A. (2018). *Influencia de las diferentes tensiones de humedad y distanciamiento en el cultivo de pepinillo (Cucumis sativus L.) sobre el rendimiento del fruto en Jayllihuaya–Puno.* Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Clark, M., & Acomb, G. (2008). Florida field guide to low impact development. University of Florida, 4p.
- Coelho, E. F., & Or, D. (1996). Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. *Transactions of the ASAE*, 39(6), 2007-2016.
- Covarrubias, J. M., Zermeño, A., Parga, V. M., Briones, G., & Troyo, E. (2019). Aplicación de Días grado de crecimiento en el cultivo de Papa (*Solanum tuberosum* L.) para estimar el abatimiento del agua en el suelo. *Acta universitaria*, 29, e2033. DOI: <http://doi.org/10.15174.au.2019.2033>
- Del Amor F.; León A.; Torrecillas, A.; 1986. El riego en la región de Murcia. Apuntes para una historia reciente. Ed. Consejería de 83 Agricultura, Ganadería y Pesca de Murcia. Consejo superior de Investigaciones Científicas.

- Dowgert, M. F. (2010). Impact of irrigated agriculture on a stable food supply, The. In Proceedings of the 2010 Central Plains irrigation conference, Kearney, Nebraska, February 24-25. Colorado State University. Libraries.
- Durner, W., & Or, D. (2006). Soil water potential measurement. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Braunschweig, Germany.
- Enciso MJ, Porter D, Périès X (2007) Irrigation monitoring with soil water sensors. Cooperative Extension, B-6194, The Texas A&M University System.
- Freire, A. G., de Alencar, T. L., Chaves, A. F., Nascimento do, Í. V., de Assis Júnior, R. N., van Lier, Q. D., & Mota, J. C. (2018). Comparison of devices for measuring soil matric potential and effects on soil hydraulic functions and related parameters. *Agricultural Water Management*, 209, 134-141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.008>
- Fueyo 1998 Manejo del riego con tensiómetros. *Tecnología Agrolimentaria*. CIATA. 8-10.
- García, A. J. H., Jaime, Y. N. M., Bastardo, L. D. S., Llovera, F. A. S., & Contreras, A. M. Z. (2009). Humedad compactante y sus implicaciones agrícolas en dos suelos franco arenoso de sabana del estado Monagas, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 9(4), 937-950.
- Godoy, C. A. (2020). Monitoreo de la humedad edáfica en cultivos de arándanos en el pedemonte del sistema de Tandilia. *Agronomía & Ambiente*, 40(1), 33-37.
- Goodwin, L. & O'Connell, M.G. (2008). The future of irrigated production horticulture- world and Australian perspective. *Acta Horiticulturae*, 792: 449-458.
- Goodwin, L. (2009). How to use tensiometers?. Department of environment and primary industries, *Agriculture Victoria*: ISSN, 1329-8062.
- Hansen, R. C., & Pasian, C. C. (1999). Using tensiometers for precision microirrigation of container-grown roses. *Applied Engineering in Agriculture*, 15(5), 483. DOI: 10.13031/2013.5807
- Hanson, B.R., Orloff, S. and Peters, D. (2000). Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *California Agriculture*, 54(3), 38-42.
- Hegde, D. M. (1986). Effect of irrigation regimes on drymatter production, yield, nutrient uptake and water use of onion. *Indian Journal of Agronomy*, 31(4), 343-348.

- Hegney, M.A. & Hoffman, H.P. (1997). Potato irrigation—Development of irrigation scheduling guidelines *Final Report, Hort. Res. and Dev Corporation Project NP 6*. Agr Western Australia.
- Hensley D, Deputy J (1999) Using tensiometers for measuring soil water and scheduling irrigation. Cooperative Extensive Service. *Department of horticulture*, College of tropical agriculture & human resources, University of Hawaii at Manoa. Landscape L-10.
- Higuera, C.H., Gomez, J., & Pardo, O. (2012). Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. *Revista facultad de ingeniería, UPTC*, 21(32), 26-27.
- Hubbell, J. M., & Sisson, J. B. (2003). Soil water potential measurement by tensiometers. *The Encyclopedia of Water Science, Marcel Dekker, New York*, 904-907.
- Játiva, M. F., Paredes, N. J., Bonilla, A. E., & Barrera, A. L., (2019). Determinación de los requerimientos de riego por aspersión en el cultivo de la achira (*Canna edulis*) y la influencia en sus etapas fenológicas. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 4(8), 908-939.
- Jeranyama, P. 2009 Irrigation water management 53 54 *Cranberry 2009 chart book, management guide for Massachusetts Univ. of Mass. Amherst, Cranberry StaAmherst, MA*.
- Kang, Y., Wang, F.X., Liu, H.J. & Yuan, B.Z. 2004 Potato evapotranspiration and yield under different irrigation regimes *Irrig. Sci.* 23, 133-143.
- Karimi, H., Ghassemzadeh, H. R., Pashae, P., & Shahamat, E. Z. (2015). Proposing an appropriate soil water content estimation technique for Iran. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 17(2), 1-10.
- Kim, H. J., Son, D. W., Hur, S. O., Roh, M. Y., Jung, K. Y., Park, J. M., & Lee, D. H. (2009). Comparison of wetting and drying characteristics in differently textured soils under drip irrigation. *Protected Horticulture and Plant Factory. Journal of Bio-Environment Control*, 18(4), 309-315.
- Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of Soil Analysis. Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 687-734. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c28>
- Kukul, S. S., Hira, G. S., & Sidhu, A. S. (2005). Soil matric potential-based irrigation scheduling to rice (*Oryza sativa*). *Irrigation Science*, 23(4), 153-159. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0103-8>

- Kumari, A., Patel, N., & Mishra, A. K. (2017). Field evaluation and calibration of Tensiometer and Gypsum block sensors in drip irrigated Broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*). *Journal of Soil and Water Conservation*, 16(3), 267-273. DOI: 10.5958/2455-7145.2017.00039.X
- Leib B.G., Jabro J. D., & Matthews, G. R. 2003. Field Evaluation and Performance Comparison of Soil Moisture Sensors. *Soil Science*, 168(6), 396-408. DOI: 10.1097/01.ss.0000075285.87447.86
- Leib, B. G., Hattendorf, M., Elliott, T., & Matthews, G. (2002). Adoption and adaptation of scientific irrigation scheduling: trends from Washington, USA as of 1998. *Agricultural water management*, 55(2), 105-120.
- Majhi, T., & Sarkar, N. (2019). Study on soil moisture variations in responding to Tensiometer and soil moisture meter with respect to gravimetric method. *International Journal of Chemical Studies*, 7(4), 3179-3188.
- Marazky El, M. S., Mohammad, F. S., & Al-Ghobari, H. M. (2011). Evaluation of soil moisture sensors under intelligent irrigation systems for economical crops in arid regions. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 6(2), 287-300. DOI: 10.3844/ajabssp.2011.287.300
- Marković, M. P., Josipović, M. A., Šoštarić, J. I., Zebec, V. B., & Rapčan, I. A. (2016). Effectiveness of granular matrix sensors in different irrigation treatments and installation depths. *Journal of Agricultural Sciences (Belgrade)*, 61(3), 257-269. DOI: 10.2298/JAS1603257M
- Marouelli, WA & Silva, WL (2007). Water tension thresholds for processing tomatoes under drip irrigation in Central Brazil. *Irrigation Science*, 25 (4), 411-418. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0056-6>
- Maughan, T., Allen, L. N., & Drost, D. (2015). Soil moisture measurement and sensors for irrigation management, Utah state university. 1-6.
- McCann, I. R., & Starr, J. L. (2007). Field evaluation of dual frequency multi-sensor capacitance probes for water and nutrient management in drip irrigation. In *2007 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- McCready, M. S., Dukes, M. D., & Miller, G. L. (2009). Water conservation potential of smart irrigation controllers on St. Augustinegrass. *Agricultural water management*, 96(11), 1623-1632.

- Medina, A., García, M. A., Varela, S. E., Ramírez, J. A., & Ruvalcaba, L. G. (2018). Calibración de sensores de resistencia en la medición del potencial mátrico en tres tipos de suelos en condiciones de invernadero. *AGROProductividad*, 11(9), 137-143. DOI: <https://doi.org/10.32854/agrop.v11i9.1226>
- Olivas, T. J. (1990). *Determinación de las curvas de retención de humedad del suelo para diez texturas diferentes en el rango de 10 a 100 centíbar de potencial mátrico*. Tesis de Licenciatura, Universidad de Sonora, Sonora, México.
- Or, D. (2001). Who invented the tensiometer?. *Soil Science Society of America Journal*, 65(1), 1-3. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6511>
- Paramasivam, S., Alva, A. K., & Fares, A. (2000). An evaluation of soil water status using tensiometers in a sandy soil profile under citrus production1. *Soil Science*, 165(4), 343-353.
- Pardossi, A., Incrocci, L., Incrocci, G., Malorgio, F., Battista, P., Bacci, L., & Balendonck, J. (2009). Root zone sensors for irrigation management in intensive agriculture. *Sensors*, 9(4), 2809-2835. DOI: <https://doi.org/10.3390/s90402809>
- Payero, J. O., Tarkalson, D. D., Irmak, S., Davison, D., & Petersen, J. L. (2008). Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate. *Agricultural water management*, 95(8), 895-908.
- Pérez-Gutiérrez, A., Pineda-Doporto, A., Latournerie-Moreno, L., Pam-Pech, W., & Godoy-Ávila, C. (2008). Niveles de evapotranspiración potencial en la producción de chile habanero. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 53-59.
- Pinmanee, S., Spreer, W., Spohrer, K., Ongprasert, S., & Muuml, J. (2011). Development of a low-cost tensiometer driven irrigation control unit and evaluation of its suitability for irrigation of lychee trees in the uplands of Northern Thailand in a participatory approach. *Journal of Horticulture and Forestry*, 3(7), 226-230.
- Porta J., López M., & Roquero C. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 807 p.
- Rivera-Hernandez, B., Carrillo-Avila, E., Obrador-Olan, J.J. & Aceves-Navarro, L.A. 2010 Morphological quality of sweet corn (*Zea mays* L.) ears as response to soil moisture tension and phosphate fertilization in Campeche, Mexico *Agr. Water Mgt.* 97, 1365-1374.

- Scherer FT, Franzen D, & Cihacek L (2013) Soil, water and plant characteristics important to irrigation. Extension Service, North Carolina State University, AE 1675 (Revisado). <https://www.ag.ndsu.edu/pubs/ageng/irrigate/ae1675.pdf>
- Schmugge, T. J., Jackson, T. J., & McKim, H. L. (1980). Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resources Research*, 16(6), 961-979.
- Shock, C. C., & Wang, F. X. (2011). Soil water tension, a powerful measurement for productivity and stewardship. *HortScience*, 46(2), 178-185.
- Shock, C. C., Pereira, A. B., Feibert, E. B., Shock, C. A., Akin, A. I., & Unlunen, L. A. (2016). Field comparison of soil moisture sensing using neutron thermalization, frequency domain, tensiometer, and granular matrix sensor devices: relevance to precision irrigation. *Journal of Water Resource and Protection*, 8(2), 154-167. DOI: 10.4236/jwarp.2016.82013
- Shock, C. C., Stewart, B. A., & Howell, T. A. (2003). Soil water potential measurement by granular matrix sensors. *The Encyclopedia of water science*, 899, 904-907.
- Skierucha, W., & Wilczek, A. (2010). A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10–500 MHz frequency range. *Sensors*, 10(4), 3314-3329. DOI: 10.3390/s100403314.
- Smajstda, A. G., & Koo, R. C. (1986). Use of tensiometers for scheduling of citrus trickle irrigation. *In Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 99, pp. 51-56.
- Strebel, O., Renger, M., & Giesel, W. (1973). Soil-suction measurements for evaluation of vertical water flow at greater depths with a pressure transducer tensiometer. *Journal of Hydrology*, 18(3-4), 367-370.
- Sun, Y., Ren, S., Ren, T., & Minasny, B. (2010). A combined frequency domain and tensiometer sensor for determining soil water characteristic curves. *Soil Science Society of America Journal*, 74(2), 492-494. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0047N>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2013). *Plant Physiology= Fisiologia Vegetal. Editora Artemed: Porto Alegre, Brazil.*
- Thalheimer, M. (2013). A low-cost electronic tensiometer system for continuous monitoring of soil water potential. *Journal of Agricultural Engineering*, 44(3), 114-119. DOI: 10.4081/jae.2013.e16

- Thompson, T. L., Doerge, T. A., & Godin, R. E. (2000). Nitrogen and water interactions in subsurface drip-irrigated cauliflower II. Agronomic, economic, and environmental outcomes. *Soil Science Society of America Journal*, 64(1), 412-418.
- Thompson, T.L., Doerge, T.A. & Godin, R.E. 2002a Subsurface drip irrigation and fertigation of broccoli. I. Yield, quality, and nitrogen uptake. *Soil Science Society of America Journal*. 66(1), 186-192.
- Thompson, T.L., Doerge, T.A. & Godin, R.E. 2002b Subsurface drip irrigation and fertigation of broccoli. II. Agronomic, economic, and environmental outcomes. *Soil Science Society of America Journal* J. 66(1), 178-185.
- Tyson, T. W., & Curtis, L. M. (1998) Scheduling irrigation using soil moisture tension. The Alabama Cooperative Extension System Publication No. ANR-467.
- Villablanca, A., Cajias, E., & Allende, M. (2015). Uso e instalacion de tensiometros. *Informativo INIA Ururi*.
- Villalobos-Reyes, S., Castellanos, J. Z., Tijerina-Chávez, L., & Crespo-Pichardo, G. (2005). Efecto de la tensión de humedad en el suelo sobre rendimiento y calidad del brócoli con riego por goteo. *Terra Latinoamericana*, 23(3), 321-328.
- Villaseñor, D. (2016). Fundamentos y procedimientos para análisis físicos y morfológicos del suelo. Universidad Técnica de Machala. Machala, Ecuador, 53-56.
- Wang, F. X., Kang, Y., Liu, S. P., & Hou, X. Y. (2007). Effects of soil matric potential on potato growth under drip irrigation in the North China Plain. *Agricultural water management*, 88(1-3), 34-42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.08.006>
- Werner, H. (1992). *Measuring soil moisture for irrigation water management*. Cooperative Extension Service, South Dakota State University, US Department of Agriculture.
- Young, M., & Sisson, J. (2002). Tensiometry. In: *Methods of soil analysis, Part 4, Physical Methods*, Dane JH, Topp GC (Eds.), SSSA Book Series No. 5. *Soil Science Society of America: Madison*, 5, 575-608.
- Zermeño, A. G., Delgado, M. Á., Meza, B. I., & Rodríguez, H. (2007). Tensión de humedad del suelo y rendimiento de fruto en limón italiano. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(3), 295-303.

Zhao, W., Liu, B., & Zhang, Z. (2010). Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China. *Agricultural Water Management*, 97(2), 215-223.