

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**Evaluación de tres métodos para determinar el contenido de humedad
del suelo**

Por:

Ernesto Hernández López

Tesis

Presentada como requisito parcial

Para obtener el grado de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Abril de 2011

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

Evaluación de tres métodos para determinar el contenido de humedad
del suelo

POR:

Ernesto Hernández López

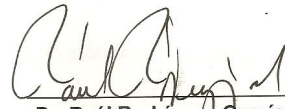
TEISIS


Que somete a consideración del H Jurado Examinador
Como requisito parcial para obtener el título de:
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN.

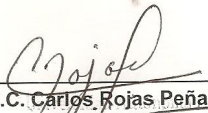
Aprobada

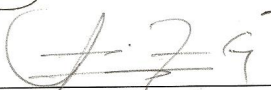
El Presidente del Jurado


Dr. Alejandro Zermeño González
Asesor Principal


Dr. Raúl Rodríguez García
Asesor


Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho
Asesor


M.C. Carlos Rojas Peña
Asesor


M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez
Coordinador de la División de Ingeniería



Coordinación de
Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Abril de 2011

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, fuente de toda sabiduría, por darme la oportunidad de seguir en esta etapa de superación y formación profesional.

Agradezco a la institución. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro “Alma Mater” por otorgarme una gran oportunidad por contribuir a mi desarrollo profesional.

A mi asesor principal, Dr. Alejandro Zermeño González por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia científica en un marco de confianza, afecto y amistad, fundamentales para la concreción de este trabajo.

Al Dr. Raúl Rodríguez García por su apoyo en la revisión de este trabajo.

Al Dr. Javier de Jesús Cortes Bracho, por su apoyo en la realización y revisión de este trabajo.

Al M.C. Carlos Rojas Peña por su colaboración en el presente trabajo.

Al Dr. Gerónimo Landeros Flores por su apoyo y colaboración de este trabajo.

A los laboratorios de departamento de riego y drenaje de esta universidad por todo el apoyo brindado para realizar los análisis correspondiente en esta investigación.

DEDICATORIAS

A mis padres:

Antonio Hernández Gómez y Micaela López López

Por el gran amor que me brindan y por estar conmigo en los momentos más difíciles en que los necesito.

Con cariño y amor doy gracias a sus apoyos y consejos he llegado a realizar la más grande de mis metas, la cual constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir, fruto del inmenso apoyo y confianza que en mi se depositó para que los esfuerzos y sacrificios hechos por mí no fueran en vano. Con admiración y respeto. A quienes nunca podré pagar todos sus desvelos ni aún con las riquezas más grandes del mundo. Por esto y más ¡Gracias!

Como un testimonio de gratitud ilimitada, a mi hija Britany Sarahi, porque su presencia ha sido y será siempre el motivo más grande que ha impulsado para lograr esta meta, a mi esposa por su comprensión y tolerancia.

A mis hermanos, por el apoyo moral, su amistad incondicional que me brindaron y por compartir conmigo cada logro.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE	Página
ÍNDICE DE CONTENIDO	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE CUADROS	VI
RESUMEN	VII
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo del trabajo.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Uso del acolchado plástico y riego con cintilla en la producción de cultivos hortícolas.	4
2.2 Tipos de acolchado plástico y sus características ventajas del uso de acolchado	6
2.3 Efecto del acolchado plástico en la mitigación de la evaporación de la superficie del suelo.	9
2.4 Importancia del conocimiento del contenido de la humedad del suelo en la programación de riego.	11
2.5 Métodos para medir la humedad del suelo y sus características	12
2.6 Descripción del método del TDR (Time Domain Reflectometry) (Reflectometría en el dominio del tiempo).....	21
Principio del TDR:.....	21

III.	MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1	Lugar y fecha de establecimiento	24
3.2	Características climáticas y el sitio de estudio	25
3.3	Materiales y equipos utilizados	25
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
4.1	Método del TDR.....	29
4.2	Método del Tensiómetro	31
4.3	Método del Block de resistencia eléctrica	32
V.	CONCLUSION.....	38
VI.	BIBLIOGRAFÍA	39

ÍNDICE DE FIGAS

ÍNDICE DE FIGURAS	Página
Figura 1 Curva de retención de agua.....	18
Figura 2. Localización del sitio de investigación.....	24
Figura 3. Estación de tres sensores instalados para determinar el contenido de humedad del suelo en un cultivo de tomate: 1. tensiómetro, 2. block de resistencia, 3. TDR.....	27
Figura 4 Datalogger (modelo CR7 Campbell Sci., Inc., Logan, Utah, USA), donde se conectaron los TDR para un registro continuo de la humedad del suelo.	27
Figura 5 Representación esquemática de las diferentes condiciones de cobertura plástica donde se colocaron los sensores para medir la humedad del suelo.....	28
Figura 6 Relación entre el contenido de humedad (g/g) y la lectura de la sonda del TDR (ms), de la ecuación de ajuste correspondiente.....	30
Figura 7 Relación entre el contenido de de humedad (g/g) y la lectura del tensiómetro (kPa).....	32
Figura 8 Relación entre el contenido de humedad (g/g) y la lectura del block de resistencia (kPa)	34

ÍNDICE DE CUADROS

ÍNDICE DE CUADROS	Página
Cuadro 1. Interpretación de las lecturas del Tensiómetro.....	18
Cuadro 2. Lamina de agua estimada (mm) con cada método indirecto en el rango de medición extremos promedio de cada sensor.....	37

Evaluación de tres métodos para determinar el contenido de humedad del suelo

Ernesto Hernández López

RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar tres métodos indirectos para determinar el contenido de agua en el perfil superior del suelo. Con el propósito de observar variaciones del contenido de agua en el suelo en función del tiempo, la evaluación se realizó en un cultivo de tomate con acolchado plástico y riego con cintilla. Los métodos que se evaluaron fueron: Tensiómetro, block de resistencia eléctrica y el método de la resonancia magnética en el dominio del tiempo (TDR).

Se encontró una relación lineal inversamente proporcional entre el contenido de humedad gravimétrico (θ_w) y la tensión registrada por el tensiómetro y el block de resistencia eléctrica (Tens), mientras que con el TDR se observó una relación directamente proporcional con la lectura del sensor (ms). Se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) mayor de 0.75 en las tres ecuaciones, indicando un buen ajuste de cada método.

La ecuación de ajuste de cada método fue:

Sonda TDR:	$\theta_w = -0.346 + 0.458*ms$	$R^2 = 0.758$
Tensiómetro:	$\theta_w = 0.247 - 0.0013*Tens$	$R^2 = 0.857$
Block de resistencia:	$\theta_w = 0.215 - 0.005*Tens$	$R^2 = 0.853$

Con la ecuación de ajuste, en función de los valores mínimos y máximos promedios obtenidos con los sensores se calculó el contenido de humedad mínimo ($\theta_{mínimo}$) y máximo ($\theta_{máximo}$) y posteriormente se calculó la lámina de agua en el suelo. Para el TDR con 1.10 y 1.25 ms se obtuvo $\theta_{mínimo} = 0.156$; $\theta_{máximo} = 0.225$, la lámina de agua en suelo fue 25.10 mm, Para el tensiómetro con 22 y 66 kPa se obtuvo $\theta_{mínimo} = 0.161$; $\theta_{máximo} = 0.218$.y la lámina de agua en suelo fue 20.62 mm, Para el block de resistencia eléctrica con 25 y 125 kPa se obtuvo $\theta_{mínimo} = 0.153$; $\theta_{máximo} = 0.203$.y la lámina de agua en suelo fue 18.10 mm, con un estrato de 0 - 30 cm, para una densidad aparente de suelo (ρ_a) de 1.206 g cm^{-3}

Palabras claves: evaluación de sensores, TDR, block de resistencia y tensiómetro, calibración

I. INTRODUCCIÓN

Tanto para cultivos a cielo abierto como para cultivos protegidos, la medición y control del contenido hídrico y de nutrientes en el suelo son requerimientos necesarios para optimizar el uso de los recursos y aumentar la productividad de los cultivos. Cuando en zonas desérticas se produce un aumento creciente de la demanda de agua por los sectores agrarios e industrial y por el crecimiento demográfico, es necesario ajustar la demanda a la disponibilidad, para no afectar el desarrollo socio económico de la región. El desarrollo de tecnología apropiada es una herramienta para superar las limitaciones que puedan surgir de una demanda creciente de agua. El control del riego (frecuencia y volumen) permite aumentar la eficiencia de uso del agua y reducir o eliminar las pérdidas (lixiviación, escorrentía) y consecuentemente hacer un mejor manejo del recurso agua. (Brandelik y Hubner., 1997)

Un adecuado suministro de agua al suelo es fundamental para el normal desarrollo del cultivo, para alcanzar cosechas abundantes y de alta calidad. Esta situación hace necesario supervisar constantemente la cantidad de agua aplicada y presente en el suelo, que permita hacer un manejo técnico de los riegos y por tanto es necesario contar con sensores o sistemas de medición del agua del suelo confiables y precisos.

Para mejorar la eficiencia del uso del agua es necesario determinar la lámina de agua que se debe aplicar a los cultivos a través de su ciclo de desarrollo. Esto es función del contenido de humedad a capacidad de campo (θ_{wcc}), contenido de humedad actual ($\theta_{wactual}$), densidad aparente del suelo (ρ_a) y la profundidad por irrigar. De estos, el contenido de humedad actual es una variable muy dinámica que se debe medir frecuentemente para conocer el abatimiento de la humedad del suelo y el momento de aplicar el siguiente riego.

Existen varios métodos indirectos para determinar el contenido de humedad actual en el suelo, entre los cuales se pueden mencionar: a). Tensiómetro, b). Emisor de neutrones, c). Block de resistencia, d). TDR, y otros. Para su uso y aplicación en el campo, cada uno de estos debe previamente calibrarse con el método directo (gravimétrico), en el sitio donde se van a utilizar, ya que las características físicas y químicas de los suelos son muy variables. De tal forma que cada uno de los métodos indirectos puede tener sus ventajas y limitaciones sobre los otros, esto en función de sus características y las propiedades del suelo. Por lo que es necesario evaluar su funcionamiento y operación para las condiciones del cultivo de tomate en camas con acolchado y riego por goteo.

Objetivo del trabajo

Evaluar el funcionamiento y operación del método del tensiómetro, block de resistencia y el TDR para determinar el contenido de humedad del suelo, en un cultivo de tomate con acochado plástico y riego por goteo, y obtener las ecuaciones de ajuste para determinar el contenido de agua en el suelo en función de la lectura de cada sensor

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Uso del acolchado plástico y riego con cintilla en la producción de cultivos hortícolas.

A partir de los años cuarenta, el uso de materiales plásticos en las actividades agrícolas inició una modificación profunda en la tecnificación de la producción de frutas, hortalizas y plantas ornamentales. En los años siguientes se lograron notables mejoras tecnológicas que ampliaron la durabilidad y la aplicación de los materiales plásticos. En la actualidad, se aplican técnicas de agroplasticultura a más de 300 mil hectáreas de cultivos de alto ingreso económico en todo el mundo (Soltani *et al.*, 1995; Hallidri, 2001).

Esta tecnología se estudia para incrementar la eficiencia de los cultivos en el uso de los insumos de producción, como nutrimentos, agua de riego y agroquímicos principalmente, con el fin de maximizar rendimientos, calidad del fruto y precocidad a la cosecha (Tarara, 2000; Fan *et al.*, 2005).

La implementación de nuevas tecnologías aplicables a la producción agrícola, como son el riego por goteo, el uso de acolchados plásticos y el fertirriego, hace posible el incremento en la producción, precocidad, calidad del producto y la eficiencia en el uso del agua, principalmente, en las regiones donde este recurso es tan limitado. Todas las ventajas mencionadas deben balancear favorablemente a corto y largo plazo dado el

mayor costo de inversión inicial que implica el uso de agroplásticos. Por ello estos sistemas productivos requieren de un manejo y un control mucho más intensivo que los sistemas tradicionales (Molinar *et al.*, 2000).

Las características microambientales son definidas por los intercambios de energía y materia que se llevan a cabo entre las superficies de suelo desnudo o con vegetación y la atmósfera y espacio circundantes (Zermeño, 2001). Dichos intercambios dan lugar a un balance energético cuya dinámica depende de la radiación incidente, la temperatura y humedad del aire, la velocidad del viento y el grado de cobertura por vegetación.

Al colocar una película plástica entre el suelo y la atmósfera ésta actúa como una barrera amortiguadora, disminuyendo las variaciones en los factores ambientales. Las características de la película tales como el color, grosor y transparencia a la radiación, influyen sobre el intercambio energético en la superficie de la cubierta plástica y consecuentemente sobre el balance energético del suelo bajo ella. Adicionalmente, la presencia de la película restringe la difusión de vapor de agua y CO₂ desde el suelo hacia la atmósfera consiguiéndose de esa manera un microambiente adecuado para el crecimiento de las plantas (Ghawi y Battikhi., 1986).

2.2 Tipos de acolchado plástico y sus características ventajas del uso de acolchado

Es muy variado el tipo de acolchado en el mercado actual, a continuación se describen algunos de los tipos de acolchados, (Martínez, *et al.*, 2007):

1.- Acolchado reflectivo: Este posee color aluminio en la parte superior reduciendo el ataque de áfidos que transmiten virus. Además, eficientiza la difusión de la luz provocando que las porciones inferiores de las hojas también realicen la fotosíntesis.

2.- Acolchados color blanco: Este color tiene poco efecto en la temperatura. Además, eficientiza la difusión de la luz provocando que las porciones inferiores de las hojas también realicen la fotosíntesis.

3.- Acolchado IRT (Transmisor de infrarrojos): Transmite solo los rayos infrarrojos para el incremento de la temperatura en el suelo, pero no la luz visible que es la que utilizan las plantas para realizar la fotosíntesis. Por lo tanto, no hay desarrollo de malezas, pero eleva la temperatura del suelo.

4.- Acolchado con cara inferior negra: Utilizado para el control de malezas.

5.- Combinación de colores: Normalmente la cara inferior es color negro para el control de malezas y la cara superior puede ser de color gris, blanco, aluminio, etc. Para acumular calor, control de insectos, captación de luz, etc.

Características de acolchados: Las medidas comunes del acolchado son de entre 1.2 a 1.5m de ancho y de 1.25 a 1.50 milésimas de pulgada de grosor, con rollos de 730m de longitud. Las perforaciones normalmente son entre 5 y 10cm de diámetro; a una distancia normalmente entre 30 a 50cm que pueden ser a doble hilera o hilera sencilla. Cuando son a doble hilera se colocan las perforaciones en tresbolillo.

Ventajas del uso de acolchado:

1.- Incrementa la temperatura del suelo; a una profundidad de 5cm se incrementa la temperatura aproximadamente 3°C con acolchado negro y de 6°C con acolchado claro. El efecto del incremento de temperatura se refleja en cosecha precoz e incremento en rendimiento total.

2.- Reduce la compactación del suelo permaneciendo el suelo suelto y bien aireado; Por lo tanto, las raíces tienen mayor cantidad de oxígeno disponible y la actividad microbiana se incrementa mejorando la estructura del suelo e incrementando la disponibilidad de los nutrientes.

3.- Reduce la lixiviación de fertilizantes; debido a que el agua de la lluvia escurre por el acolchado y entre las camas. El fertilizante se coloca en las camas, por lo tanto, el fertilizante no se lixivia y es aprovechado por el cultivo.

4.- Reduce el ahogamiento de la planta por exceso del agua; esto debido a que el agua de la lluvia escurre por el acolchado hacia la parte inferior de los surcos.

5.- Reduce la evaporación del agua; normalmente hay un crecimiento de hasta el doble de la planta. Debido al mayor crecimiento, la planta requiere de mayor cantidad de agua, por lo que el acolchado no sustituye el riego de hecho en ocasiones se requiere mayor cantidad de agua.

6.- Se obtienen productos más limpios; con el acolchado se reduce la pudrición de frutos causados el contacto con el suelo húmedo o gotas que salpican suelo al caer la lluvia.

7.- No se requiere cultivar; por lo tanto, no hay daño mecánico con los aperos utilizados. Además, no hay poda de raíces. Estos daños o poda son muy peligrosos debido a que son fuente de infección de insectos o enfermedades.

8.- Reduce la presencia de malezas; en el caso del acolchado negro provee un buen control de malezas. El acolchado claro requiere del uso de herbicidas o fumigación debido a que deja pasar la luz visible, necesarios para la fotosíntesis de las malezas. Su principal uso es para elevar la temperatura de suelo. Es común utilizar acolchado de color negro por la parte inferior para el control de malezas y reflectivo en la parte superior para optimizar la fotosíntesis en las plantas.

9.- Precocidad; con el uso de acolchado negro se puede adelantar la cosecha entre 2 y 14 días y en el caso de acolchado claro puede ser de hasta 21 día de precocidad en la cosecha.

10.- Incremento en concentraciones de CO₂; El acolchado no permite el paso del CO₂ por lo tanto, el CO₂ producido por la respiración de las raíces

se concentra y salen por la perforación por debajo de las plantas ayudando a la parte aérea de las plantas. Este efecto se le denomina efecto chimenea.

2.3 Efecto del acolchado plástico en la mitigación de la evaporación de la superficie del suelo.

Desde el punto de vista térmico, el acolchado se comporta como un filtro de doble efecto, que acumula calor en el suelo durante el día y deja salir parte de éste durante la noche, lo que evita o disminuye el riesgo de heladas por bajas temperaturas del aire. Durante la noche, el filme detiene, en cierto grado, el paso de las radiaciones de onda larga (calor) del suelo a la atmósfera. (De la Cerda., 2007)

Usando acolchado de polietileno, se logran efectos importantes en la economía de agua, ya que por su impermeabilidad a esta, impide la evaporación desde la superficie del suelo cubierta con el filme, quedando esa agua a disposición del cultivo, beneficiándose con una alimentación constante y regular.

Adentuji (1993), trabajando con acolchado orgánico en lechuga encontró que redujo la temperatura diurna del suelo y conservo la humedad de este, produciendo un rendimiento significativamente mayor que en suelo desnudo. Los resultados indican que la lechuga requiere suelo húmedo, no menor del 60% de la humedad aprovechable del suelo en los 12 primeros

cm para un óptimo rendimiento. Esta humedad puede ser proporcionada con la mitad del agua de riego al utilizar acolchado en el cultivo, en comparación con suelo desnudo.

Existen otros autores que han cuantificado el ahorro de agua logrado con el uso de acolchado de polietileno, tal es el caso de Renquist, *et al.* (1982), quienes señalan que al cultivar frutilla con acolchado de polietileno en verano, se requiere un tercio del agua en comparación a la que necesita cuando es cultivada sin acolchado y concluyen que el acolchado mejora la eficiencia del uso del agua y se expresa en un mayor rendimiento de frutos; esto como resultado de la mejor conservación de la humedad del suelo, e indirectamente, por las mayores temperaturas de suelo registradas al usar acolchado.

Haddad y Villagran (1988), afirman que con el uso de acolchado plástico se logró distanciar los riegos a una vez cada quince días, en lugares donde se regaba dos veces por semana. Por otra parte, los plásticos oscuros, al impedir el desarrollo de malezas al no dejar pasar luz para que realicen su proceso de fotosíntesis, se ahorra también el agua que estas pudieran consumir. (Robledo y Martín, 1988)

2.4 Importancia del conocimiento del contenido de la humedad del suelo en la programación de riego.

La cuantificación del grado de humedad del suelo es fundamental para el normal desarrollo del cultivo, ya que con un suministro adecuado de agua al cultivo, se pueden alcanzar cosechas abundantes y de alta calidad. Esta situación hace necesario supervisar constantemente la cantidad de agua aplicada y presente en el suelo, que permita hacer un manejo técnico de los riegos y por tanto es necesario contar con aparatos o sistemas de medición del agua del suelo confiables y precisos. Para que se pueda saber cuánta humedad hay en el suelo para que así se le pueda aplicar una determinada lámina de riego de acuerdo a lo requerido (Dirksen, 1999).

La utilización de agua para riego es un factor importante en el desarrollo de cualquier cultivo. Es por ello que el riego artificial, particularmente el riego por goteo, es visto como un importante recurso tecnológico a la hora de suministrar el agua necesaria para que los cultivos se desarrollen y crezcan adecuadamente. En este sentido, es imprescindible que el agua destinada al riego agrícola se utilice con cuidado y sin derroches, considerando que este recurso es escaso en los valles precordilleranos. Por ello, el uso racional de un recurso vital y escaso, como lo es el agua, genera beneficios sociales y económicos de gran importancia (Godoy, *et al.*, 2004).

El desarrollo de nuevas tecnologías referidas al control de riego agrícola, que sean apropiadas para realizar la gestión eficiente de suministro de agua,

se presentan hoy en día como herramientas estratégicas altamente necesarias para superar las limitaciones que surgen de la demanda creciente de agua y/o por falta de la misma. El adecuado control del sistema de riego no solo permite aumentar la eficiencia del uso del agua reduciendo o eliminando las pérdidas por lixiviación, escorrentía u otros, sino que también, consecuentemente, hacer un mejor manejo y aprovechamiento de este recurso. Por ello, será necesario conocer el contenido del agua en el suelo de forma continua y en tiempo real, a fin de programar en línea los periodos y dosis de riego necesarios para cubrir el consumo hídrico real del cultivo (Topp y Davis., 1985)

2.5 Métodos para medir la humedad del suelo y sus características

Los métodos para determinar la humedad del suelo se divide en dos grandes grupos:

- **Método directo**

- **Método indirecto**

Los métodos directos miden la cantidad de agua que hay presente en el suelo, mientras que los métodos indirectos estiman la humedad mediante una calibración entre humedad y una propiedad física que es más fácil de medir, por ejemplo, la tensión con la que el agua se adhiere al suelo. (Ponizovsky *et al.*, 1999)

Métodos directos.

Método Gravimétrico

Es el más exacto de todos, de hecho se utiliza para calibrar otros, pero tiene la desventaja de ser muy lento y además inevitablemente se destruye la muestra del suelo.

Método de campo

Este método es el más básico de todos ya que consisten en tomar una muestra y analizarla cualitativamente, de forma de asociar un rango de humedad a la muestra de suelo que permite comparar con algún otro método más preciso.

Métodos Indirectos.

Otra forma de identificar el nivel de humedad de un suelo es mediante equipos más completos que se han venido desarrollando en las últimas décadas, estos se caracterizan por su rapidez y alto grado de precisión, dentro de estos se encuentran; los tensiómetros, bloques de resistencia eléctrica, TDR y el emisor de neutrones.

Método de Tensiómetro

Este instrumento mide la tensión con la que el agua se encuentra adherida al suelo (potencial matricial). El rango en que funciona un tensiómetro generalmente es de 0 100cbares. No son adecuados para suelos secos. La humedad se obtiene relacionando la tensión con el contenido de humedad mediante lo que se denomina curva de retención de agua. (Villalobos *et al.*, 2005)

Metodología para determinar el contenido de humedad mediante Tensiómetros

Como se mencionó anteriormente, los tensiómetros son instrumentos que permiten obtener directamente el contenido de humedad del suelo puesto que miden la tensión o energía a la que el agua esta retenida por las partículas del suelo y no la humedad directa.

Para obtener el contenido de humedad del suelo en la zona no saturada mediante los tensiómetros se hace necesario de una relación entre la tensión de succión del suelo o potencial matricial y su contenido de humedad, la cual puede ser obtenida mediante la confección de una curva de retención de agua.

Determinación del potencial matricial o fuerza de retención del suelo

El tensiómetro es un instrumento que se introduce en el suelo y permite medir la energía o tensión con la que el agua se encuentra retenida por las partículas del suelo.

Está constituido por cuatro partes principales:

- a. Depósito de agua: se atornilla en la parte superior del tensiómetro. Contiene una goma sellante que permite el cierre hermético del depósito.
- b. Manómetro o vacuómetro: se ubica en el extremo superior del tubo. Este dispositivo permite medir succión (o tensión) al generarse un vacío dentro del tensiómetro. Posee una escala de 0 a 100 cbar.
- c. Vástago (tubo): este tubo se llena totalmente de agua y se cierra de forma hermética.
- d. Capsula de cerámica porosa: ubicada en el extremo inferior del tubo. Debe estar en íntimo contacto con el suelo para permitir la salida y entrada del agua, desde y hacia el tensiómetro.

Existen tensiómetros de diferentes magnitudes según la necesidad (30, 60, 90cm, etc.).

Una vez que el tensiómetro es llenado con agua y se le inserta en el suelo, el agua se puede mover dentro y fuera del instrumento a través de los poros de la punta conforme se va secando el suelo, el agua se mueve hacia fuera del tensiómetro, creando un vacío dentro del instrumento el cual es indicado en el manómetro.

Cuando el vacío producido equivale a la succión del suelo, el agua deja de fluir fuera del tensiómetro. El manómetro leerá lo que es conocido como una medida directa de la fuerza requerida para remover el agua del suelo. Si el suelo se seca más, mas agua se moverá hacia fuera hasta que alcance un nivel de vacío más alto.

Cuando se agrega agua al suelo se lleva a cabo el proceso opuesto. El agua es devuelta al tensiómetro a través de los poros de la punta de cerámica reduciendo el nivel de vacío hasta igualar el valor de succión más bajo. En este punto el movimiento de agua se detiene. Si es agregada suficiente agua al suelo hasta el punto de saturación, la lectura del manómetro en el tensiómetro bajara a cero.

En el Cuadro 1 se presentan rangos de tensión del suelo para distintos condiciones de disponibilidad de agua. (Cartes y Vargas, 2007)

Cuadro 1 Interpretación de las lecturas del Tensiómetro

Lectura (kPa)	Condicion de suelo
0 - 10	Saturado
10 - 25	Capacidad de campo
25 - 50	Zona intermedia, buena disponibilidad de agua
50 - 80	Seco

En la Figura 1 muestra la curva característica para un suelo arcilloso y uno arenoso. Ambos suelos a capacidad de campo, (CC), tienen distinto contenido de humedad, siendo mayor en el suelo arcilloso que en el arenoso, sin embargo, la tensión o potencial matricó a que esta retenida esta agua es el mismo, -0.33 bares. De igual forma ambos suelos a (PMP), tienen distinto contenido de humedad, siendo mayor en el suelo arcilloso que en el arenoso.

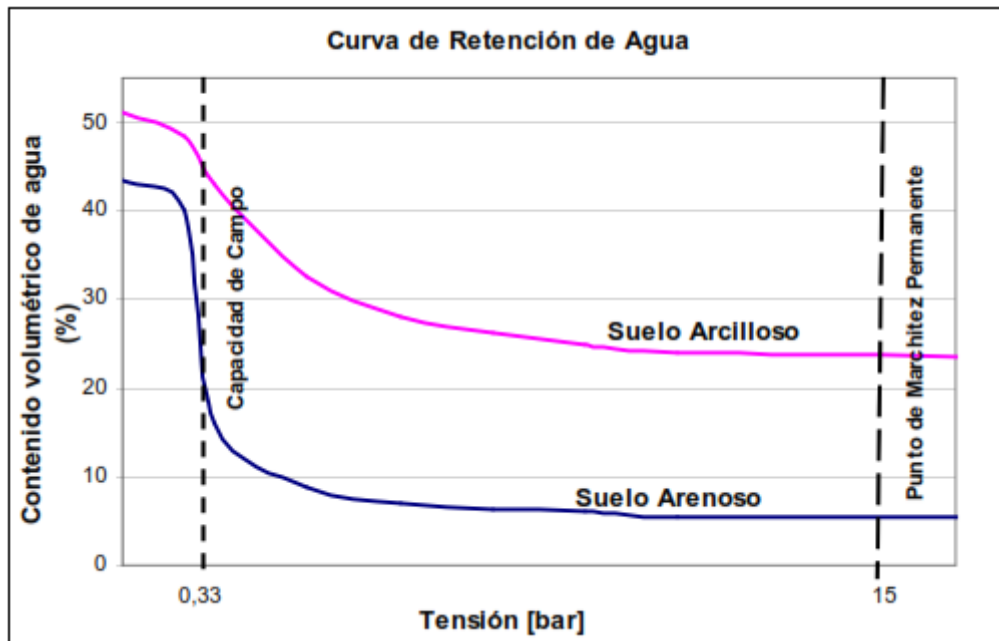


Figura 1 Curva de retención de agua

Método de la resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica, responden a los cambios de humedad del suelo de acuerdo a la profundidad en que éstos son colocados en el suelo al medir la resistencia eléctrica entre dos círculos de malla de alambre que están conectados por un material poroso.

Funcionamiento

Aunque la resistencia eléctrica se mide en ohms, el medidor portátil convierte automáticamente la lectura a centibars. (1 bar = 100 centibars). La resistencia eléctrica aumenta a medida que se incrementa la succión del agua en el suelo, o a medida que disminuye la humedad del suelo. El sensor Watermark funciona similarmente al sensor de bloques de yeso, sin embargo difiere de éste porque es más duradero en el suelo y puede responder mejor

a los cambios de humedad del mismo. El medidor portátil del sensor Watermark mide la tensión de la humedad del suelo en un rango de 0 a 199 centibars. La tensión debe ser interpretada cuidadosamente de acuerdo a las propiedades del suelo. Por ejemplo una lectura de 10 cb puede corresponder a capacidad de campo en suelos de textura gruesa (arena), mientras que 30 cb pueden corresponder a la capacidad de campo en suelos de textura más fina (limosos, arcillosos). Las lecturas altas en el medidor indican que el suelo se está secando. Por lo tanto una lectura de 75 cb puede corresponder a un déficit de 90 por ciento para suelos de textura gruesa, pero solamente de 30 por ciento para suelos de textura fina. Por esta razón es recomendable calibrar los sensores Watermark a cada tipo específico de suelo. Estos sensores se ven afectados ligeramente por la temperatura y la salinidad. El sensor también puede ajustarse de acuerdo a la temperatura del suelo.

Instalación y lectura

Para obtener una lectura más precisa de la humedad de suelo, es importante instalar varias estaciones de sensores Watermark por terreno, especialmente si el terreno tiene varios tipos de suelos. Una estación debe consistir en la instalación de varios sensores enterrados a diferentes profundidades, según el tipo de cultivo (a la profundidad efectiva de la raíz), con el fin de evaluar el movimiento y la extracción de la humedad a lo largo de la temporada del cultivo. La colocación de los sensores variará ligeramente de acuerdo al método de riego. Además, los sensores deben de colocarse en un área representativa, tal como dentro de una hilera de

plantas para cultivos que se siembran en hileras, o en la cama para cultivos hortícolas o bien en áreas mojadas bajo riego por goteo. La profundidad a la que se colocará el sensor también debe ser representativa de la zona efectiva de la raíz. Los sensores deben instalarse mojados para mejorar la respuesta de los sensores al primer riego. Para colocarlos dentro del suelo y a una profundidad apropiada, se utiliza una broca de 7/8 de pulgada para perforar un hoyo en el suelo hasta la profundidad deseada. Se empuja el sensor con una varilla dentro del agujero, se agrega agua y tierra para rellenar el agujero, dejando accesible el alambre por encima del terreno (Edward, 2010)

Método del emisor de neutrones.

La sonda de neutrones se ha utilizado extensamente en trabajos de investigación para determinar la humedad del suelo. Una sonda de neutrones contiene una fuente radioactiva que envía una cierta cantidad de neutrones rápidos. Estos neutrones rápidos son aproximadamente del tamaño de un átomo de hidrógeno, un componente esencial del agua. Cuando los neutrones rápidos chocan contra los átomos de hidrógeno, se vuelven más lentos. Un detector dentro de la sonda mide la proporción de los neutrones rápidos que salen y de los neutrones lentos que regresan. Esta relación se usa entonces para estimar el contenido de la humedad en el suelo. Sin embargo, debido a que cada suelo tiene otras fuentes de hidrógeno que no están relacionadas con el agua, es importante calibrar la

sonda para cada suelo. Para medir la humedad del suelo con una sonda de neutrones, se instala un tubo de acceso en el suelo. Entonces, la sonda (la cual contiene la fuente radioactiva y el detector) se baja hasta la profundidad deseada). Estas sondas son bastante caras, debido a que contienen material radioactivo, se necesita una licencia para operarlas (Viena, 2003)

2.6 Descripción del método del TDR (Time Domain Reflectometry) (Reflectometría en el dominio del tiempo)

Principio del TDR:

Básicamente, el contenido volumétrico del agua en el suelo se obtiene determinando la constante dieléctrica aparente del suelo, K_{ab} , al medir el tiempo requerido por una onda electromagnética para recorrer un par de varillas metálicas (electrodos) introducidas en el suelo (Jones *et al.*, 2002).

La medición del tiempo se realiza por los cambios más o menos bruscos producidos por las variaciones en la impedancia cuando la onda pasa del cable al suelo al inicio de las varillas, lo que produce una reflexión parcial de la onda que regresa al reflectómetro, y un segundo reflejo que se produce cuando dicha onda alcanza el campo abierto al salir del extremo final de las varillas. En consecuencia, el camino recorrido es dos veces la longitud (L , m) de las líneas o varillas.

Descripción del TDR:

El TDR consiste de un equipo capaz de generar una serie de pulsos eléctricos de duración precisamente limitada, con un amplio rango de altas frecuencias usadas por diferentes equipos (Ej. 0,02 -3GHz), los cuales viajan a través de las varillas conectadas a un cable coaxial y una sonda. Esta alta frecuencia genera una respuesta menos dependiente de las propiedades específicas del suelo tales como textura, salinidad o temperatura.

La sonda TDR usualmente consiste de 2 a 3 electrodos metálicos que se insertan en el suelo y que actúan como guías de la onda. Los electrodos forman una línea de transmisión con una velocidad de propagación que es dependiente de la permitividad dieléctrica del medio alrededor de los electrodos. Al mismo tiempo, el TDR mide y digitaliza el nivel de energía de las varillas metálicas a intervalos alrededor de 100 picosegundos. Cuando el pulso electromagnético encuentra una discontinuidad, parte del pulso es reflejado, lo cual produce un cambio en el nivel de energía de las líneas de transmisión, por lo cual el tiempo de recorrido se determina por el análisis de los niveles de energía digitalizados. Debido a la posible influencia de la salinidad en las medidas con TDR, muchos equipos hoy día incluyen también la posibilidad de medir simultáneamente el contenido de agua y la salinidad del suelo.

Las varillas pueden tener diferentes tamaños según la profundidad a la cual se quiera medir la humedad. Las dos o tres varillas se juntan mediante una resina sintética y se unen al equipo por medio de un cable

coaxial con impedancia constante (50 Ohms) para evitar la reflexión que puede alterar la señal.

Ventajas del TDR:

- No destructivo.
- Permite medidas continuas y automatizadas.
- Usualmente no se requiere calibración específica; solo en algunos casos.
- Es muy preciso.
- Se puede medir a cualquier profundidad en el perfil y en capas de suelo muy delgadas ya que permite también la inserción horizontal en el perfil de suelo.
- Puede medirse también la salinidad del suelo.
- Amplia disponibilidad de tipos de TDR.

Limitaciones:

- Relativamente costoso, aunque en los últimos años son más accesibles.
- Aplicabilidad potencialmente limitada en suelos altamente salinos o en suelos arcillosos muy pesados.
- Requiere calibración específica en algunas condiciones (Ej. Suelos orgánicos y volcánicos).
- Considera un pequeño volumen de suelo (alrededor del largo de las varillas).
- Para cada profundidad de medición se necesita insertar varillas metálicas, ya que por diferencia se va a obtener la humedad correspondiente a cada capa o espesor de suelo (Medina, *et al.*, 2006)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar y fecha de establecimiento

El presente trabajo se realizó de abril a agosto de 2010 en el campo agrícola experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, situado geográficamente a 25° 22' latitud norte, 101° 00' longitud oeste y altura de 1740 msnm.(Figura 2)



Figura 2. Localización del sitio de investigación.

3.2 Características climáticas y el sitio de estudio

La temperatura media anual es 19.8°C. En los días más cálidos del verano pueden alcanzarse temperaturas de hasta 35 °C, y cuando el invierno es crudo la temperatura puede alcanzar los -10 °C.

Las características del sitio de estudio son: suelo no salino, medianamente alcalino, medianamente rico en materia orgánica, medianamente pobre en nitrógeno (N), muy rico en fosforo (P), extremadamente pobre en potasio (K), presenta una textura arcillosa con una densidad bruta de 1.206 g cm³.

3.3 Materiales y equipos utilizados

Con el propósito de observar fluctuaciones en la humedad del perfil superior del suelo, la evaluación de los diferentes métodos para medir el contenido de agua se realizó en un cultivo de tomate con acolchado plástico y riego por cintilla.

Las plantas de tomate (*Lycopersicum esculentum*) se trasplantaron el 17 de mayo de 2010, en camas de 80 cm de ancho por 35 m de longitud. Las plantas se colocaron en tresbolillo a una distancia de 40 cm. El riego del cultivo se realizó con un sistema de riego por goteo superficial, con líneas regantes de 16 mm de diámetro. El espaciamiento entre emisores fue 30 cm, con un gasto de aplicación de 340 LPH/100 m. Los riegos se aplicaron cada tercer día, con un tiempo de aplicación de 2 hrs. con una lámina de 8 mm.

Se evaluaron tres métodos indirectos para determinar el contenido de humedad del suelo: 1. tensiómetro, 2. block de resistencia, 3. TDR. (Figura 3). Para esto, se instaló en cuatro tratamientos: 1. testigo (sin acolchado y sin plástico subsuperficial), 2. Con acolchado, 3. Con plástico subsuperficial, y 4. Con acolchado y plástico subsuperficial (Figura 5) uno de los sensores mencionados. El tensiómetro y block de resistencia se enterraron a una profundidad de 20 cm bajo la superficie del suelo, mientras que las varillas del TDR se colocaron en forma vertical a una profundidad de 30 cm. El TDR (Time Domain Reflectometry) se conectó a un Datalogger (modelo CR7 Campbell Sci., Inc., Logan, Utah, USA), (Figura 4) que se programó para registrar el contenido de humedad cada media hora. El registro de datos del tensiómetro y el block de resistencia se realizó diariamente durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Las mediciones del TDR, tensiómetro y block de resistencia se calibraron con las mediciones directas del contenido de humedad del suelo, que se obtuvieron cada tercer día con el método de la barrena.



Figura 3. Estación de tres sensores instalados para determinar el contenido de humedad del suelo en un cultivo de tomate: 1. tensiómetro, 2. block de resistencia, 3. TDR



Figura 4 Datalogger (modelo CR7 Campbell Sci., Inc., Logan, Utah, USA) donde se conectaron los TDR para un registro continuo de la humedad del suelo.

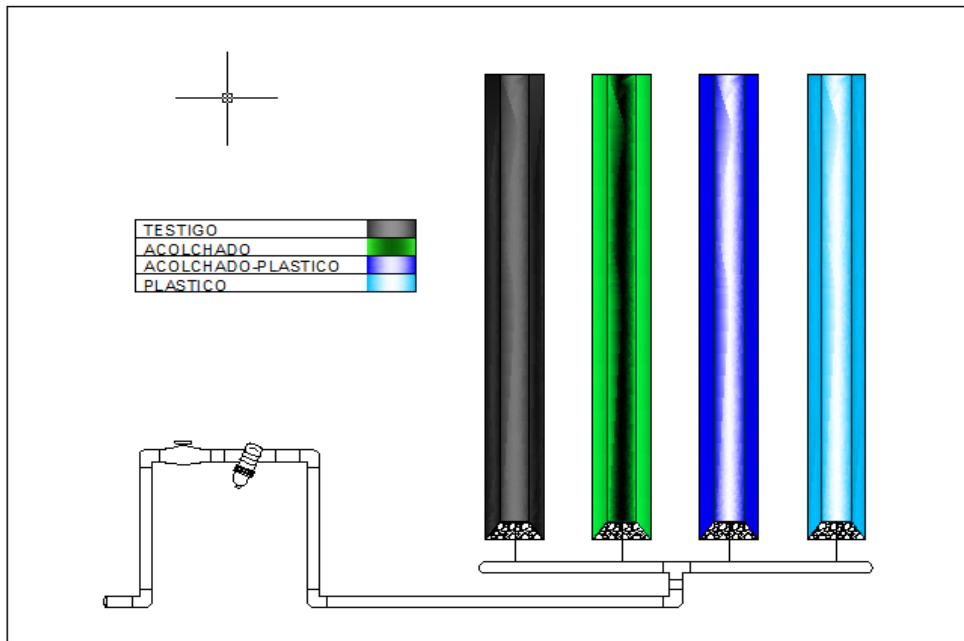


Figura 5. Representación esquemática de las diferentes condiciones de cobertura plástica, donde se colocaron los sensores para medir la humedad del suelo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Método del TDR

Se observó una relación lineal directamente proporcional entre el contenido de humedad gravimétrico y la lectura registrada por el TDR en mili segundos (Figura 6). La ecuación de ajuste fue:

$$\theta_w = -0.346 + 0.458 * ms \dots \dots \dots (1)$$

Donde: θ_w es el contenido de agua en el suelo (g/g), ms es la lectura en milisegundo de la sonda del TDR (ms).

El coeficiente de determinación (R^2) fue 0.758, indicando un buen ajuste del sensor para estimar el contenido de humedad del suelo. Nótese que la ordenada al origen de la ecuación de ajuste es negativa (-0.346), esto representaría un contenido de agua en el suelo negativo si el sensor registrara una lectura de cero, lo cual no es posible. A partir de la ecuación de ajuste se determinó el mínimo valor que debe registrar el TDR para que el contenido de agua en el suelo sea igual o mayor que cero. Este valor corresponde a 0.755 ms, por lo que el sensor calibrado es confiable solo para lecturas iguales o mayores de este valor.

A partir de la información de la Figura 6, se determinó la lámina de agua en el suelo, en función de los valores mínimos y máximos promedio obtenidos con la sonda del TDR, y la ecuación para determinar la lámina de agua en el suelo. El valor mínimo promedio fue 1.10 ms y el máximo promedio 1.25 ms. Con estos datos y la ecuación de ajuste del TDR, se obtuvo: $\theta_{\text{mínimo}} = 0.156$; $\theta_{\text{máximo}} = 0.225$. La profundidad del suelo fue 30 cm y la densidad aparente del suelo (ρ_a) 1.206 g cm^{-3} , con esta información, la lámina de agua en el suelo máxima que se puede registrar con este sensor fue:

$$L = [\theta_{\text{máximo}} - \theta_{\text{mínimo}}] * \rho_a * \text{Prof} \dots \dots \dots (2)$$

$$L = [0.225 - 0.156] * 1.206 * 30$$

$$L = 25 \text{ mm de agua}$$

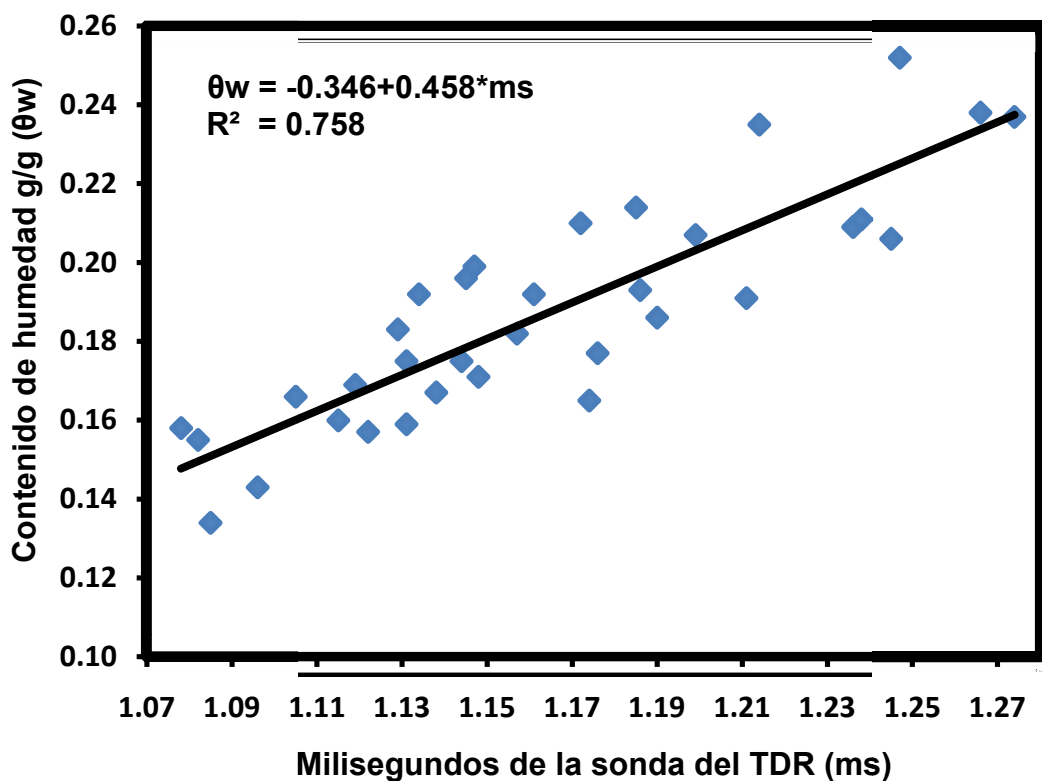


Figura 6 Relación entre el contenido de humedad (g/g) y la lectura de la sonda del TDR (ms), de la ecuación de ajuste correspondiente.

4.2 Método del Tensiómetro

Se observó una relación lineal inversamente proporcional entre el contenido de humedad gravimétrico y la tensión registrada por el tensiómetro en kPa (Figura 7). La ecuación de ajuste fue:

$$\theta_w = 0.247 - 0.0013 * \text{Tens} \dots \dots \dots (1)$$

Donde: θ_w es el contenido de agua en el suelo (g/g), Tens es la tensión registrada por el tensiómetro (kPa)

El coeficiente de determinación (R^2) fue 0.857, indicando un buen ajuste del sensor para estimar el contenido de humedad del suelo.

A partir de la información de la Figura 7, se determinó la lámina de agua en el suelo, en función de los valores mínimos y máximos promedio obtenidos con el tensiómetro, y la ecuación para determinar la lámina de agua en el suelo. El valor mínimo promedio fue 22 kPa y el máximo promedio 66 kPa. Con estos datos y la ecuación de ajuste del tensiómetro, se obtuvo: $\theta_{\text{mínimo}} = 0.161$; $\theta_{\text{máximo}} = 0.218$. La profundidad del suelo fue 30 cm y la densidad aparente del suelo (ρ_a) de 1.206 g cm^{-3} , con esta información, la lámina de agua el suelo máxima que se puede registrar con este sensor fue:

$$L = [\theta_{\text{máximo}} - \theta_{\text{mínimo}}] * \rho_a * \text{Prof} \dots \dots \dots (2)$$

$$L = [0.218 - 0.161] * 1.206 * 30$$

$$L = 20.62 \text{ mm de agua}$$

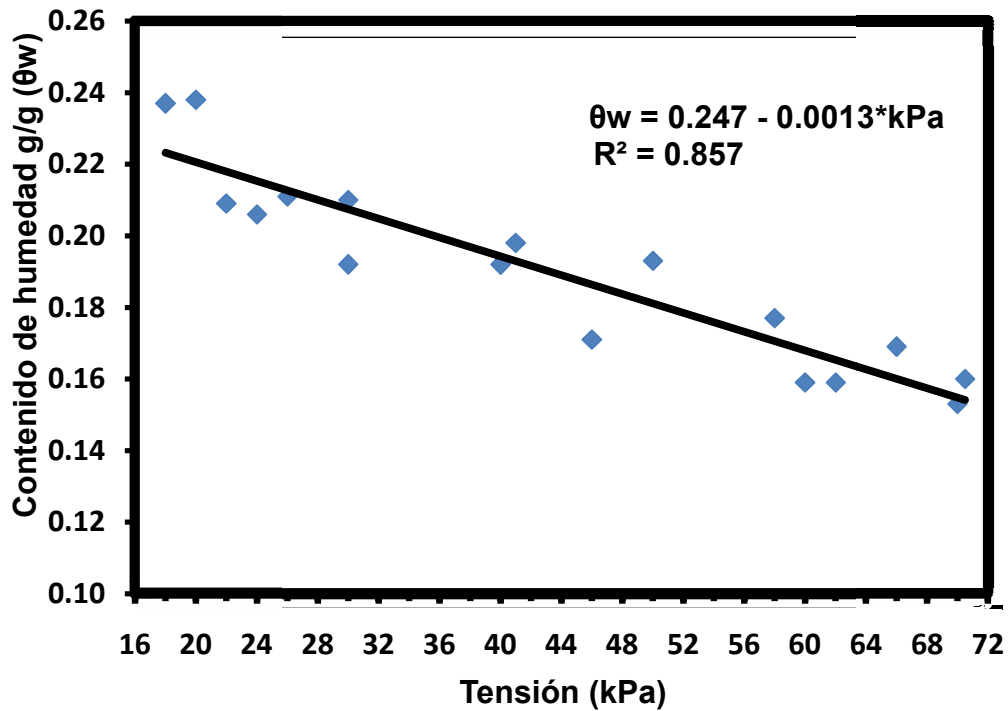


Figura 7 Relación entre el contenido de de humedad (g/g) y la lectura del tensiómetro (kPa)

4.3 Método del Block de resistencia eléctrica

Se observó una relación lineal inversamente proporcional entre el contenido de humedad gravimétrico y la tensión registrada por el block de resistencia eléctrica en kPa (Figura 8). La ecuación de ajuste fue:

$$\theta_w = 0.215 - 0.0005 \cdot \text{Tens} \quad (1)$$

Donde: θ_w es el contenido de agua en el suelo (g/g), Tens es la tensión registrada por el block de resistencia eléctrica (kPa),

El coeficiente de determinación (R^2) fue 0.853, indicando un buen ajuste del sensor para estimar el contenido de humedad del suelo.

A partir de la información de la Figura 8, se determinó la lámina de agua en el suelo, en función de los valores mínimos y máximos promedio obtenidos con el block de resistencia eléctrica, y la ecuación para determinar la lámina de agua en el suelo. El valor mínimo promedio fue 25 kPa y el máximo promedio 125 kPa. Con estos datos y la ecuación de ajuste del block de resistencia eléctrica, se obtuvo: $\theta_{\text{mínimo}} = 0.153$; $\theta_{\text{máximo}} = 0.203$. La profundidad del suelo fue 30 cm y la densidad aparente del suelo (ρ_a) de 1.206 g cm^{-3} , con esta información, la lámina de agua el suelo máxima que se puede registrar con este sensor fue:

$$L = [\theta_{\text{máximo}} - \theta_{\text{mínimo}}] * \rho_a * \text{Prof} \dots \dots \dots (2)$$

$$L = [0.203 - 0.153] * 1.206 * 30$$

$$L = 18.10 \text{ mm de agua}$$

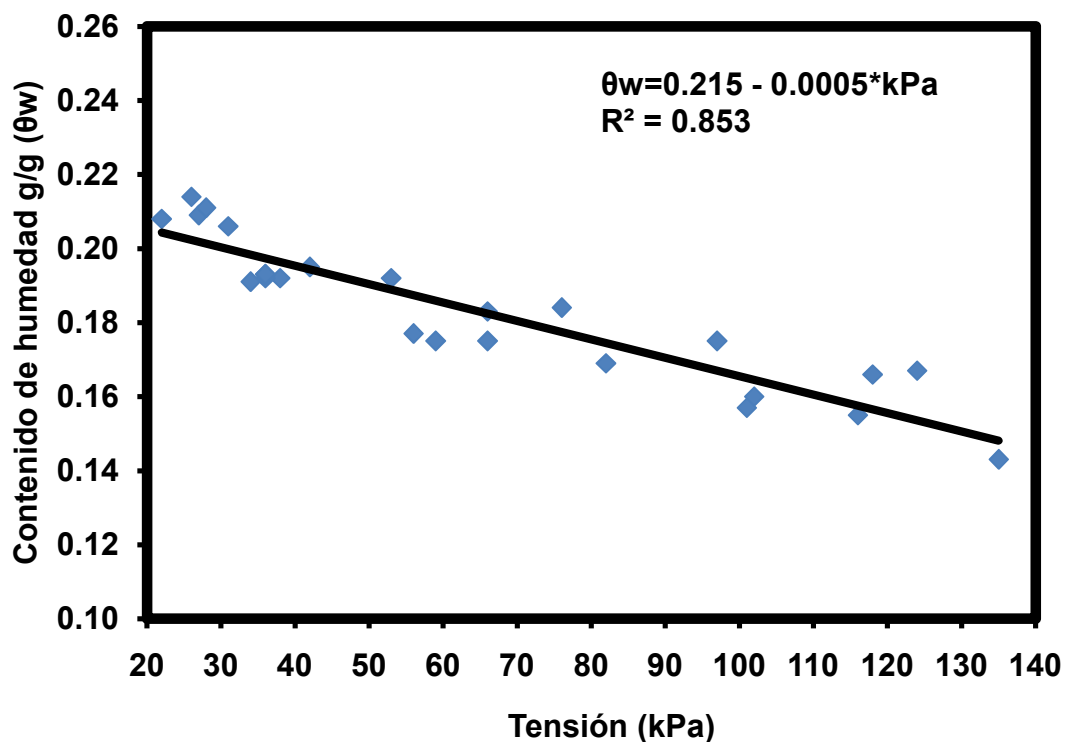


Figura 8 Relación entre el contenido de humedad (g/g) y la lectura del block de resistencia (kPa)

Las ecuaciones de ajuste y el coeficiente de determinación (R^2) obtenidos en los diferentes sensores representa una buena correlación entre los valores registrados por el sensor y la humedad gravimétrica, para cada uno de los métodos evaluados. Esto muestra una buena respuesta de los sensores a las variaciones de humedad gravimétrica, como además, asegura las bondades de la técnica de calibración utilizada.

En el Cuadro 2 se muestra la máxima lámina de agua en el suelo que se puede determinar, a una profundidad de 30 cm y una densidad aparente de 1.206 g cm^{-3} , en función de la lectura mínima y máxima promedio que cada sensor puede registrar. Nótese que con el método del TDR se obtiene

la lámina mayor (25.00 mm), mientras que con el método del block de resistencia se obtiene la menor (18.10 mm). El valor del contenido de humedad a capacidad de campo (CC) de dicho suelo, obtenido con el método de campo fue 0.25 g/g y el de punto de marchites permanente (PMP), obtenido con el método de las plantas indicadoras fue 0.14 g/g, de tal forma que la lámina de agua máxima aprovechable (entre CC y PMP) para la misma profundidad y densidad aparente fue 39.8 mm. Debido a que con el método del TDR se obtienen los valores mayores de lámina de agua en el suelo, este podría ser el más recomendable para las condiciones de suelo y cultivo de este estudio. Además el método del TDR se puede automatizar para mediciones continuas del contenido de agua en el suelo.

Cuadro 2 Lámina de agua estimada (mm) con cada método indirecto en el rango de medición extremos promedio de cada sensor.

Método	Lectura menor	Lectura mayor	θ_w menor (g/g)	θ_w mayor (g/g)	ρ_a (g/cm³)	Prof. (cm)	Lámina de agua (mm)
TDR	1.10	1.25	0.156	0.225	1.206	0 - 30	25.00
Tensiómetro	22	66	0.161	0.218	1.206	0 - 30	20.62
Block de R.	25	125	0.153	0.203	1.206	0 - 30	18.10

V. CONCLUSION

Los tres sensores evaluados muestran una buena respuesta en las ecuaciones de ajuste y el coeficiente de determinación (R^2), en el tensiómetro y block de resistencia se obtuvo un poco mayor el (R^2), que el DTR, lo que indica que cualquiera de los tres sensores se puede utilizar en la determinación del contenido de agua en el suelo. Pero con el método del TDR se pueden obtener valores mayores de la lámina de agua en el suelo y ofrece la ventaja de que se puede automatizar para mediciones continuas del agua en el suelo.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Adentuji, I. 1993. Effect of mulches and irrigation on growth and yield of lettuce in semi-arid region. (Resumen). Horticultural Abstracts 63:1147. 20-35
- Brandelik A and Hubner C. (1997) Soil moisture determination-Accurate, large and deep. Phys. Chem. Earth. Vol.21, N° 3 pp. 157-160.
- Cartes, M. y Vargas, X. 2007. Modernización e Integración Transversal de la Enseñanza de Pregrado en Ciencias de la Tierra 15p. 4-8
- De la Cerda, J. M. 2007. Acolchado en hortalizas. Facultad de Agronomía, UANL: <http://www.agronuevoleon.gob.mx/oeidrus/hortalizas/8alcolchado.pdf> (fecha de consulta octubre de 2011)
- Dirksen, C. 1999. Soil Physics Measurements. GeoEcology paperback. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany. 49p.
- Edward, C. M. 2010. Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego: <http://cals.arizona.edu/pubs/water/az1220S.pdf> (fecha de consulta 31 de enero 2011)

- Fan, T., B. A. Stewart, W. A. Payne, Y. Wang, S. Song, J. Luo y C. A. Robinson. 2005. Supplemental irrigation and water–yield relationships for plasticulture crops in the loess plateau of China. *Agron.* 515 p.
- Fitzjohn, C., Ternan, J.L. y Williams, A.G. (1998): Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: implications for runoff and erosion control. *Catena.* 32. p.
- Ghawi, G. 1986. Acolchado plástico de color en sandía con riego por goteo. (<http://redalyc.uaemex.mx/pdf/573/57324409.pdf> 516 p. consulta enero 2011)
- Gómez, P. A. 2000: Variabilidad espacio-temporal del contenido de humedad del suelo en una zona mediterránea semiárida. Efectos de las condiciones antecedentes en la respuesta hidrológica. Tesis Doctoral. ETSI de Montes. Madrid. 185 pp.
- Godoy, A. C., Reyes, J. I, Torres E.C.A. 2004. Fertirriego en cultivos anuales y perennes. Libro científico núm. 2. Campo Experimental La Laguna CIRNOCINIFAP. 161 p.
- Hanson, B., Orloff S., P. Douglas. 2000. California Agriculture [Agricultura Californiana], Volumen 54, No. 3:38-42.

- Hadaddad, R. y VILLAGRAN, V. 1988. Uso de acolchado plástico en plantaciones de frutillas. Chile Agrícola 13(134): 128-130.
- Medina, J.L., y J.B. Castillo. 2006. Revista de la Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo. 63 p.
- Molinar, R. y M. Yang. 2000. Plásticos agrícolas. Selección de colores. Revista mensual. Agosto: 38–40. Productores de hortalizas. Fresno, CA, USA. 516p.
- Morán, P 2001. Respuesta de la sandía (*citrullus lanatus* t.) a diferentes Colores de acolchado plástico y riego por goteo cintilla (<http://uruza.edu.mx/revista/Vol.3%20Num.2,2004.pdf#page=25>)
- Martínez, F. J. y López Bermúdez, F. (1996): Métodos para el estudio de las propiedades hídricas de suelos y formaciones superficiales. Cuadernos Técnicos de la S.E.G. nº 9. Geoforma Ediciones. 30 p.
- Ponizovsky A. A.; S.M. Chudinova; Y.A. Pachepsky. 1999. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. Journal of Hydrology. 218(1-2):35-43
- Renquis, B. y Martin. 1982. Effect of polyethylene mulch and summer irrigation regimes on subsequent flowering and fruiting of "Olympus"

strawberry. *Journal of the American Society for Horticultural Science*
107(2): 373-376.

Robledo, F. y Martin. L. 1988. *Aplicación de los plásticos en la agricultura*.
Madrid. Ediciones Mundi-Prensa. 573 p.

Tarara, J. M. 2000. Microclimate modification with plastic mulch. *HortScience*
35: 169-179.

Topp, G.C., J.L. Davis; A.P. Annan, 1980. Electromagnetic determination of
soil water content: Measurements of coaxial transmission lines. *Water
Resour. Res.*, 16: 574-582.

Soltani, N., J. L. Anderson y A. R. Hamson. 1995. Growth analysis of
watermelon plants grown with mulches and rowcovers. *J. Am. Soc.
Hortic. Sci.* 60 (1-2):35-43

Viena, M. 2003. *Sondas de neutrones y gamma: sus aplicaciones en
agronomía* segunda edición. 25 p.

Villalobos, R.S.; J. Z. Tijerina. Y C. P. Guillermo. 2005. Efecto de la tensión
de humedad en el suelo sobre rendimiento y calidad del brócoli con
riego por goteo *TERRA Latinoamérica*, 23(3):321-328.

Zermeño-González, H. 2001. Colores de acolchado plástico y riego por goteo cintilla: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/573/57324409.pdf> (fecha de consulta enero 2011)