

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



**Evaluación del consumo de agua de una huerta de manzano (*Malus domestica*) por el método del balance hídrico**

**POR:**

**José Napoleón Gómez Gómez**

**TESIS:**

**Presentada Como Requisito Parcial  
Para Obtener el Título de:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México  
Mayo de 2013**

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

**Evaluación del consumo de agua de una huerta de manzano (*Malus domestica*) por el método del balance hídrico.**

**POR:**

**José Napoleón Gómez Gómez**

**TESIS**

**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 Zermeno González  
Asesor principal**



**Dr. Juan Manuel Covarrubias Ramírez  
Asesor externo**

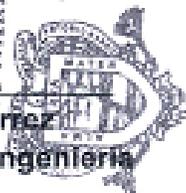


**MC. Gregorio Briones Sánchez  
Asesor**



**MC. Luis Rodríguez Gutiérrez  
Coordinador de la División de Ingeniería**

Universidad Autónoma Agraria  
"ANTONIO NARRO"



Coordinación de  
Ingeniería

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.  
Mayo, 2013**

## AGRADECIMIENTOS

*A **Dios Yahvé** todopoderoso, doy las gracias por la vida, por el deseo de superarme día a día, porque sin su presencia nada soy, él estuvo todos los días hasta llegar al final de mi carrera y seguirá estando, gracias Dios por ser mi amigo, por darme todo lo que tengo, una familia hermosa, por tantas pruebas que me has puesto que me han hecho mejor ser humano, nunca podre compensar tanta dicha.*

*A mi **Alma Mater** por haber cobijado durante estos años, por brindarme los conocimientos para formarme como Ingeniero Agrónomo en Irrigación.*

*A mi asesor principal **Dr. Alejandro Zermeño González** por su generosidad al brindarme la oportunidad de trabajar con él, por su confianza, sugerencias y disponibilidad brindada para la revisión del presente trabajo de tesis.*

*Al **Dr. Juan Manuel Covarrubias Ramírez**, por su apoyo y colaboración que ha compartido conmigo en este trabajo de investigación; y la revisión de este trabajo de tesis.*

*Al **M.C. Gregorio Briones Sánchez** por su apoyo en la revisión de este trabajo de tesis.*

*A mis compañeros de **generación CXIV**, por esa amistad que nos tuvimos y por ayudarnos unos a otros en aquellos trabajos difíciles.*

## DEDICATORIA

*A mis padres:*

**Sr. Benito Gómez Hernández**  
**Sra. María Gómez Díaz**

*Por guiarme, educarme, comprenderme, ayudarme, apoyarme y la paciencia que me tienen; quiero darles un tributo a todo lo que han hecho por mi siendo una mejor persona y este logro es de ustedes y nadie se los podrá quitar y les dedico de todo corazón mis queridos padres.*

*A mis abuelitos:*

*En memoria de:*  
**Mi abuelo Antonio Gómez Núñez (+)**  
**Mi abuela Juana Hernández (+)**

*Por brindarme su apoyo y confianza para concluir mí estudio.*

*A mis hijos **Alan Dariel** y **José Hugo**, porque sus presencias han sido y serán siempre el motivo más grande que ha impulsado para lograr esta meta, a mi esposa **Eleuteria** por su comprensión y el apoyo que me ha brindado.*

*A mis hermanos **Hugo Seberiano** y **Beatriz**, por su apoyo, su amistad incondicional que me brindaron y por compartir conmigo este logro.*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	III
DEDICATORIA .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE CUADROS.....	VIII
RESUMEN.....	IX
I. INTRODUCCION .....	1
OBJETIVO.....	3
II. REVISION DE LITERATURA.....	4
2.1 Importancia económica y social del manzano .....	4
2.2 Métodos para determinar el contenido de agua en el suelo .....	4
2.3 Métodos para determinar el consumo de agua por los cultivos.....	16
2.4 Método del balance hídrico para determinar el consumo de agua por los cultivos.....	22
2.5 Estudios previos del uso del método del balance hídrico para determinar el consumo de agua de diferentes cultivos.....	24
2.6 Estudios previos del método del balance hídrico para determinar el consumo de agua por huerta del manzano. ....	25
III. MATERIALES Y METODOS.....	27
3.1 Área de estudio.....	27
3.2 Características del huerto.....	27
3.3 Frecuencia de riegos y láminas aplicadas .....	28
3.4 Medición del contenido de agua en el suelo.....	28

3.5 Modelo de balance hídrico.....	32
3.6 Densidad bruta del suelo.....	34
3.7 Obtención y manejo de la información requerida por el modelo.....	35
3.8 Aplicación del modelo para determinar el consumo diario de agua por los árboles de la huerta.....	37
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	38
4.1 Frecuencia de riegos y láminas aplicadas.....	38
4.2 Propiedades físicas del suelo del sitio de estudio.....	39
4.3 Evolución del contenido de agua del perfil superior del suelo.....	40
4.4 Consumo de agua por los arboles de la huerta.....	44
V. CONCLUSIONES.....	47
VI. BIBLIOGRAFIA.....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pagina</b>
Figura 1.- Evapotranspirómetro de Thornthwaite.....	18
Figura 2.- Balance de agua en el suelo de la zona radicular.....	23
Figura 3.- Marco de plantación de la huerta de estudio.....	28
Figura 4.- Representación esquemática de los componentes del balance hídrico sin considerar flujos horizontales, ni aportaciones de la capa freática..	32
Figura 5.- Evolución del contenido de humedad del suelo (C.V) en la zona radicular del cultivo del manzano, (promedio de 20 min) a las profundidades de 10, 20, 30, 40 y 50 cm; observados del 4 a 8 de Marzo, Jame, Municipio de Arteaga, Coahuila, México.....	41
Figura 6.- Evolución del contenido de humedad del suelo (C.V) en la zona radicular del cultivo del manzano, (promedio de 20 min) a las profundidades de 10, 20, 30, 40 y 50 cm; observados del 6 a 9 de mayo, Jame, Municipio de Arteaga, Coahuila, México.....	42
Figura 7. Evolución del contenido de humedad del suelo (C.V) en la zona radicular del cultivo del manzano, (promedio de 20 min) con profundidades de 10, 20, 30, 40 y 50 cm; observados del 20 a 23 de mayo, Jame, Municipio de Arteaga, Coahuila, México.....	43

## ÍNDICE DE CUADROS

	<b>Pagina</b>
Cuadro 1. Relación de riegos y láminas de agua aplicadas a los arboles de la huerta los meses del ciclo de producción.....	39
Cuadro 2. Propiedades físicas del suelo del sitio de estudio.....	39
Cuadro 3. Lámina de agua evapotranspirada, de lluvia, aplicada, consumida y el balance hídrico correspondiente en una huerta de manzano (cv. golden viga) de marzo-septiembre de 2012. Jame, municipio de Arteaga, Coahuila, México.....	46

## **Evaluación del consumo de agua de una huerta de manzano (*Malus domestica*) por el método del balance hídrico.**

José Napoleón Gómez Gómez

### **RESUMEN**

El objetivo de este estudio fue evaluar el método del balance hídrico para determinar el consumo de agua de una huerta de manzano (*Malus domestica*) cv. golden vigas y su aplicación en la programación del riego. El estudio se realizó en la localidad de Jame, municipio de Arteaga, Coahuila, México. Para estimar el consumo diario de agua para los árboles de la huerta, se utilizó una sonda de capacitancia tipo (FDR) y los datos de densidad bruta del suelo a diferentes profundidades. El balance se calculó diariamente de las 8:00 del día previo a las 8:00 del día siguiente, utilizando los datos de contenido de agua en el suelo, generados por la sonda FDR cada 1,200 s, a las profundidades de 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 y 0.50 m. La información agroclimática en frecuencia y cantidad se obtuvo de la estación La Rosita, en la red de clima del INIFAP. La lámina de riego y las fechas de aplicación fueron obtenidas por el productor cooperante. El balance hídrico indica que los meses de marzo, junio, julio, agosto y septiembre se tuvieron agua en exceso, porque la lámina de riego aplicada más la lámina de lluvia fue mayor que la lámina de agua consumida por los árboles. En abril y mayo los árboles estuvieron en una condición de déficit hídrico. El balance hídrico para todo el ciclo de producción del cultivo (marzo a septiembre) indicó un exceso de 160.4 mm de agua.

**Palabras clave:** Balance hídrico, sensor FDR, datos climatológicos, Manzano.

## I. INTRODUCCION

En México el manzano es uno de los frutales de clima templado de mayor importancia. La producción de manzana se ha incrementado notablemente en los últimos años, esto debido a una mayor demanda del producto a nivel nacional e internacional (SAGARPA, 2011).

En 2011 La superficie sembrada del cultivo del manzano a escala nacional fue de 61,491 ha, con una producción de 339,950 toneladas y con un rendimiento promedio de 6.596 t/ha (SIAP, 2012). Los estados que cuentan con condiciones favorables para la producción intensiva de manzana son: Chihuahua (26,666 has), Durango (10,890 has), Coahuila (7,028 ha) y Puebla (8,499 ha); también se le puede encontrar en menor producción en Nuevo León (1 959 ha), Zacatecas (1,206 ha) y Chiapas (1,192 ha) (SIAP, 2012).

Para mejorar la eficiencia del agua en la huerta, es necesario evaluar el consumo de agua diario por las superficies de cultivo (evapotranspiración), y así determinar el momento oportuno de riego y la lámina de agua por aplicar (Martínez *et al.*, 2007). El consumo de agua por un determinado cultivo se puede evaluar aplicando el método del balance hídrico que es la diferencia entre la cantidad de agua que entra (riego y precipitación) y la cantidad de agua que sale (evapotranspiración y percolación) del perfil del suelo donde se desarrolla la actividad radicular (Leonard and Barnes, 1986., Carrillo *et al.*, 2003)

Existen distintos métodos para estimar la humedad del suelo tanto en campo como en laboratorio (Ponizovsky *et al.*, 1999., Seyfried y Murdock, 2004) los cuales se clasifican en métodos directos e indirectos. Los directos permiten medir directamente el contenido de agua en el suelo (Florentino, 2006), para ello existe el método gravimétrico (Raj, 2007) y el lisímetro de pesada (Tuñón, 2000). Los indirectos se basan en la medida de alguna propiedad física del suelo que depende del contenido de agua (Florentino, 2006), como el uso de tensiómetros (Raj, 2007), bloques de resistencia (Hanson *et al.*, 2004), Reflectometría en el dominio del tiempo (Cassel *et al.*, 1994) y Reflectometría en el dominio de las frecuencias (Ferre y Topp, 2002).

Castro *et al.*, (2008); desarrollaron un trabajo con el objetivo de tener un sistema de riego automatizado en tiempo real para determinar el momento oportuno y cantidad de riego que se le aplica el cultivo de calabaza. Se implementaron tres estrategias de riego (lisímetro, Reflectometría de Dominio Temporal {TDR} y balance hídrico); concluyeron que la estrategia de TDR presento mayor producción y menor cantidad de agua utilizado. Flores y Ruiz, (1998). Estimaron la humedad del suelo del cultivo de maíz mediante el modelo del balance hídrico; la lámina de agua contenida en el suelo se cuantifico con el método de gravimétrico y los resultados de la humedad disponible observada y estimada promedio para cada año (1985-1988) en estudio, la comparación de las medias de humedad disponible observada índico diferencias no significativas entre ellas. Orozco, (2009). Comparo dos diferentes de programación de riego en una huerta de manzano, en 2008, la programación de

riego se hizo mediante un modelo de balance hídrico mientras que en 2007, no se aplicó ningún modelo. Los resultados que se obtuvo encontró ahorros significativos de agua de riego de 45% aplicando el modelo de balance hídrico.

## **OBJETIVO**

El objetivo de este estudio fue evaluar el método del balance hídrico para determinar el consumo de agua de una huerta de Manzano (*Malus domestica*) cv. golden vigas y su aplicación en la programación del riego.

## **HIPOTESIS**

El consumo de agua de los arboles de una huerta de manzano se puede obtener realizando un balance hídrico en el perfil del suelo de mayor actividad radicular.

## **II. REVISION DE LITERATURA**

### **2.1 Importancia económica y social del manzano**

En México, el manzano es el frutal de clima templado de mayor importancia. En los últimos años la producción de esta fruta ha aumentado notablemente debido a su alta demanda a nivel nacional e internacional. El consumo per cápita de manzana en México paso de 3.7 a 7.9 kg de 1980 a 2011 (SAGARPA, 2011).

En 2011, el total de superficie sembrada del cultivo del manzano a escala nacional fue de 61,491 ha, con una producción de 339,950 toneladas y con un rendimiento promedio de 6.596 t/ha. Los estados que cuentan con condiciones favorables para la producción intensiva de manzana son: Chihuahua (26,666 has), Durango (10,890 has), Coahuila (7,028 has) y Puebla (8,499 has)); también se le puede encontrar en menor producción en Nuevo León (1 959 has), Zacatecas (1,206 has) y Chiapas (1,192 has) (SIAP, 2012)

### **2.2 Métodos para determinar el contenido de agua en el suelo**

A través de los años se han desarrollado métodos e instrumentos de varios tipos para determinar la humedad del suelo. La información requerida sirve de guía al agricultor o empresario agrícola para determinar la necesidad

de riego de sus cultivos. La misma es de gran utilidad para realizar un manejo de riego eficiente que proporcione las cantidades adecuadas de humedad. Esto a largo o corto plazo significara un ahorro de tiempo y dinero ya que no incurre perdidas en rendimiento o consecuencia de exceso o insuficiencia de riego (Raj, 2007). La determinación de la humedad del suelo se puede realizar con métodos directos e indirectos.

### **Métodos directos.**

#### **Gravimétrico.**

Es un método que consiste en la determinación del contenido de agua de una muestra de suelo mediante su desecación de horno. Este método requiere el uso de ciertos equipos de laboratorio que sean precisos para obtener una buena determinación y también requiere de cierta destreza por parte del operador para poder realizar un procedimiento confiable (Rivera *et al.*, 2007).

El procedimiento consiste en tomar muestras de suelo en el campo, se colocan en envases herméticamente cerrados y se trasladan al laboratorio; se pesan en húmedo, se colocan en estufa a 105 °C, mínimo por 24 h, hasta peso constante. Con esto se calcula el contenido de humedad (%H). Es el método más utilizado para medir agua en el suelo y es una técnica estándar usada comúnmente para obtener datos referenciales de contenido de agua en el

suelo, y para la construcción de las curvas de calibración, cuando se utilizan otros métodos y equipos (Florentino, 2006 y Raj, 2007).

El contenido total de agua en el suelo se obtiene de la siguiente ecuación:

$$PW = \frac{(SW - Sd)}{Sd} \times 100 \quad (1)$$

Dónde:

PW: porcentaje de humedad por peso;

SW: peso de la muestra humedad;

Sd: peso de la muestra seca al horno a 105 °C por 24 horas.

Ecuación para determinar el porcentaje de humedad por volumen es la siguiente:

$$P.V. = PW \times \frac{Da}{D(H_2O)} \quad (2)$$

Donde

P.V: Porcentaje de agua por volumen;

Pw: porcentaje de humedad por peso;

Da: densidad aparente;

D(H<sub>2</sub>O): densidad del agua.

La ventaja de este método es su precisión si el mismo se realiza con destreza y cuidado. La desventaja principal es el gran tiempo requerido (24 hr)

para llevar a cabo el procedimiento y se requiere una gran cantidad de muestras si no hay homogeneidad del suelo (Rivera *et al.*, 2007).

### **TDR (Time Domain Reflectometry).**

La técnica TDR confluyen diversas aplicaciones industriales en el campo de la electrónica, ideadas en su momento para detectar anomalías en las líneas de transmisión eléctrica, y la respuesta del campo eléctrico de los constituyentes del suelo. En las dos últimas décadas, muchos investigadores han utilizados esta metodología para medir el volumen de agua edáfica a partir de la influencia de la humedad sobre las propiedades eléctricas del suelo. Topp *et al.* (1980), Topp y Davis (1985), Dasberg y Dalton (1985), establecieron los principios que relacionaban la constante dieléctrica del suelo ( $K$ ) con el volumen de agua ( $\Theta$ ) contenido en sus poros. El principio se basa en el alto valor de la constante dieléctrica del agua (80), frente a la de otros elementos como el aire (1) y las fracciones minerales y orgánica (entre 3 y 7) presentes en el suelo.

La técnica TDR utiliza la correlación existente entre el tiempo de tránsito de una onda electromagnética introducida en el suelo, la constante dieléctrica de este y el contenido volumétrico de humedad (Cassel *et al.*, 1994).

La velocidad de propagación,  $V_p$  de la onda generada por el TDR o ecómetro viene dada por:

$$V_p = \frac{L}{t} \quad (3)$$

Donde

L: es la distancia a la que viaja la onda a lo largo de la línea de transmisión;

t: es el tiempo requerido.

El ecómetro registra el viaje de ida y vuelta a lo largo de las líneas de transmisión, quedaría:

$$V_p = \frac{2l}{t} \quad (4)$$

Donde

l: longitud de las varillas de la sonda o líneas de transmisión.

La velocidad de propagación de una onda también puede escribirse como

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (5)$$

Donde

c: Velocidad de la luz en el vacío; K: constante dieléctrica relativa del medio.

Despejando K, resulta:

$$K = \left( \frac{ct}{2l} \right)^2 \quad (6)$$

Topp *et al.* (1980), a partir de la experimentación con un amplio rango de materiales porosos y contenidos de humedad, obtuvieron la siguiente ecuación empírica que relación  $K$  y el contenido de humedad volumétrica del suelo,  $\Theta$  ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ):

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K - 5.5 \times 10^{-4} K^2 + 4.3 \times 10^{-6} K^3 \quad (7)$$

La técnica TDR ofrece una serie de ventajas entre las que destacan la rapidez de las mediciones, la posibilidad de realizarlas en un mismo punto de forma continuada, establecer el perfil de humedad de un suelo mediante sondas instaladas a diferentes profundidades, un alto grado de precisión de las mediciones y un mínimo impacto sobre el terreno. La desventaja que tiene es el alto costo del aparato, muy difícil de instalar correctamente y abarca un pequeño volumen de suelo (Dalton, 1992 y García, 1980).

### **Emisor de neutrones**

La sonda emisora de neutrones es una técnica de prueba eficaz para medir el contenido total de agua en el suelo por volumen de suelo al calcular la cantidad de hidrogeno presente (Zermeño-González *et al.*, 2012).

Las sondas de neutrones consisten en una unidad hecha de una fuente de neutrones rápidas y de alta energía (fuente de radioactividad en capsulada)

y de un detector. Esta sonda se introduce en un tubo de acceso de PVC o aluminio a la profundidad deseada con la ayuda de sujetadores unidos a un cable. Una unidad de control, la cual permanece en la superficie, se conecta al cable

Los neutrones rápidos son termalizados cuando ellos chocan con un cuerpo de masa similar, tales como los núcleos de hidrogeno. La energía de los neutrones es transmitida a los protones y el “rebote o choque” neutrónico es mucho más bajo. Este principio ha sido adoptado para estimar la densidad del núcleo de hidrogeno en el suelo. En la mayoría de los suelos el hidrogeno es asociado con el agua del suelo, aunque en suelos orgánicos o densamente enraizados este no sería el caso. Los neutrones rápidos son emitidos desde una fuente (Am–Be) en un tubo instalado en el suelo; los neutrones lentos son contabilizados por un detector. El número de neutrones lentos detectados es proporcional al número de colisiones entre neutrones y núcleos de hidrogeno, los cuales reflejan el contenido de agua del suelo (Vanbavel *et al.*, 1954).

Las técnicas neutrónicas han sido utilizadas en una amplia variedad de sistemas especialmente agrícolas, ecosistemas naturales y pastizales. Esta técnica es más adecuada para suelos profundos, en suelos con estructura fina donde los tubos de acceso para la sonda sean fácilmente instalados. Los tubos de acceso pueden ser de acero, aluminio o PVC y los diámetros usados generalmente son de 4 o de 5 cm que es de mayor disponibilidad. Dependiendo

de las propiedades del suelo, el contenido de agua del suelo y el tipo de material del tubo utilizado (acero, cobre o PVC) los neutrones de la sonda muestrean una esfera de suelo con un radio de 10-30 cm. Este radio hace difícil una medida adecuada del contenido de agua del suelo en la superficie, obteniéndose conteos extremadamente bajos (Hanna y Siam, 1980).

Las ventajas son: se pueden sondear un volumen mayor de suelo y es relativamente independiente del tipo de suelo y es posible determinar el porcentaje de humedad del suelo por volumen a cualquier profundidad, sin necesidad de extraer muestras. Las principales desventajas son: que el equipo es caro y aplicable únicamente con fines de investigación, envuelve el uso de una fuente radioactiva por lo cual el operador debe de tener grado de destreza y conocimiento para operar (Raj, 2007 y Zermeño-González *et al.*, 2012).

## **Tensiómetro**

Es un instrumento que indica la tensión con que el agua está adherida a las partículas del suelo. Es uno de los métodos usados para indicar, en forma relativa, si en el suelo existe suficiente humedad disponible para el crecimiento de las plantas. Los cambios que ocurren en el espesor de la capa (película) de agua que rodea las partículas del suelo alteran la tensión del agua en el mismo. Estos cambios se expresan en fluctuaciones de tensión de la humedad en el

suelo. En la práctica, el tensiómetro mide los rangos de humedad de suelo bajo las cuales las raíces de las plantas absorben activamente el agua. (Raj, 2007)

Las ventajas del tensiómetro son: buena guía para determinar cuándo aplicar el agua de riego; puede utilizarse para determinar el movimiento vertical y horizontal de la humedad del suelo; proporciona una medida directa de la tensión de retención de agua en el suelo. Las desventajas son: después de 80 kPa de tensión entra aire a la copa cerámica porosa, al ocurrir esto las lecturas ya no son confiables; se colocan en un sitio fijo y no puede moverse de un lugar a otro, debido a que no mide el contenido de agua en el suelo, es necesario contar con la relación entre contenido de humedad y tensión para determinar la lámina de agua por aplicar (Rivera *et al.*, 2007).

### **Bloques de Resistencia Eléctrica**

El uso de bloques de resistencia eléctrica, o “bloques de yeso” como se les conoce normalmente, se basa en los cambios de resistencia eléctrica o conductividad de soluciones en un bloque poroso de yeso. Estos cambios son causados por las variaciones en el contenido de agua de los bloques, controladas por la tensión relativa de la solución

Los bloques de yeso solamente pueden utilizarse con cultivos que tengan sistemas radiculares bien desarrollados y que se distribuyan uniformemente en

el perfil, ya que se requiere un cierto tiempo de respuesta del bloque frente a variaciones en el contenido de agua en el suelo. (Gurovich, 1985)

Su uso consiste en humedecer el bloque a saturación antes de su instalación en campo. Se entierra el bloque a la profundidad de lectura deseada procurando que el suelo quede bien compactado alrededor del bloque, pero perturbando mínimamente el suelo. Pasando un tiempo en el que se deja equilibrar con la solución del suelo, se pueden hacer lecturas. La lectura se efectúa directamente sobre la escala y se interpola el valor en la gráfica de calibración (Muñoz y Ritter, 2005).

Las ventajas de este método son: provee ayuda para estimar el contenido de agua en el suelo; son fiables; bajo costo; permite automatización de los registros, almacenar lecturas en data-logger; lecturas continuas y rápidas medidas *in situ*. Las desventajas son: la vida útil del bloque es limitada; son inefectivos cuando la tensión del suelo es menor de 100 kPa; deben ser calibrado individualmente, corta vida útil, es difícil precisar la exactitud de las medidas debido a las fuentes de error (calibración, materiales, instalación, etc.). (García-Petillo, 2008 y Zermeño-González *et al.*, 2012).

## Psicómetro de termocuplas

El potencial hídrico total del suelo (mátrico más osmótico) puede ser determinado usando psicómetros de suelos. Estos son psicómetros de termocuplas encerrados en un bulbo cerámico. El bulbo permite el equilibrio entre la solución del suelo y la atmosfera al interior del bulbo. En el equilibrio, la humedad relativa en el interior del bulbo es igual a la de atmosfera de la muestra. Dado que ambas fuerzas, mátrica y de soluto contribuyen al equilibrio de la humedad relativa, el aparato mide el potencial hídrico total del suelo, no considerando el gravitacional. El psicómetro de termocuplas es efectivo para suelos húmedos a suelos secos. Los suelos húmedos están cercanos a saturación, suelos sobre  $-1.2$  MPa no son efectivamente monitoreados. En realidad, en el rango de disponibilidad de agua para las plantas, la humedad relativa del suelo varia solo entre 0.99 y 1.00 (Rawlins y Campbell, 1986).

En tales situaciones las medidas psicométricas debieran realizarse dos veces durante el día cuando los gradientes térmicos son cercanos a 0 a una profundidad dada. La psicometría de termocuplas se basa en que la presión de vapor de agua en una atmosfera en equilibrio con una muestra, tiene un potencial conocido definido por la ecuación 8 y que es igual al potencial hídrico de la muestra. La forma en la cual los solutos y otros componentes reducen el potencial hídrico puede ser expresada en términos de sus efectos en la actividad química del agua. La actividad, es la tendencia del agua a reaccionar

o moverse en el sistema y su valor afecta directamente a la presión de vapor del agua en el sistema (Brown y Oosterhuis, 1992).

Por lo tanto, el potencial hídrico es descrito en términos de presión de vapor del agua en el sistema en comparación a aquel del agua libre a la misma temperatura y presión que se expresa a través de la ecuación:

$$\psi = \frac{RT}{V} \left( \ln \frac{e_a}{e_s} \right) \quad (8)$$

Dónde

$\psi$ : Potencial hídrico en MPa;

R: Constante universal de gases ( $8.31 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ MPa mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );

T: Temperatura en grados Kelvin;

V: Volumen molal del agua a la temperatura T ( $18.069 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$ );

$e_a$ : Presión actual de vapor (kPa);

$e_s$ : Presión de vapor a saturación (kPa).

Las ventajas son: muy exactos, facilidad de medir el potencial hídrico del suelo y de varios tejidos vegetales, tiene la facilidad de medir in situ de potencial hídrico en raíces y tallos, Las desventajas son: dificultad en el manejo del equipo, gran sensibilidad a la construcción y geometría de la cámara y es un equipo costoso (Busso, 2008).

## **2.3 Métodos para determinar el consumo de agua por los cultivos**

Para lograr un uso eficiente del agua en la agricultura, es necesario determinar el consumo de agua por los cultivos establecidos, para determinar el momento oportuno del riego y la lámina de agua por aplicar. La determinación del consumo de agua se puede realizar a través de métodos directos e indirectos. Los directos proporcionan directamente el consumo total del agua por los cultivos en un determinado tiempo, utilizando para ello aparatos e instrumentos para su medición. Los indirectos se basan en la utilización de fórmulas empíricas, para determinar el consumo de agua a través del ciclo vegetativo del cultivo. (Agorio, 1988).

### **Métodos directos**

#### **Lisímetro**

Un lisímetro es un gran recipiente que encierra una determinada porción de suelo con superficie desnuda o con cubierta vegetal, ubicado en campo para representar condiciones naturales y que se utiliza para determinar la evapotranspiración de un cultivo en crecimiento, de una cubierta vegetal de referencia, o la evaporación de un suelo desnudo (Santa-Olalla *et al.*, 2005).

Los lisímetros pueden ser divididos en dos grandes grupos, los lisímetros de pesada y los de drenaje, dentro de los drenajes se pueden encontrar con o sin succión, la diferencia entre estos es que los de drenaje sin succión recolectan el agua del suelo que se filtra naturalmente hacia abajo por los suelos, es decir, el agua que se mueve por efecto de la gravedad y en los lisímetros de drenaje con succión se aplica una succión para extraer el agua del suelo despacio a través de un material poroso.

Los lisímetros fueron diseñados para captar el agua de infiltración, y los de pesada, (mucho más costosos que los de drenaje), fueron concebidos para el cálculo de la evapotranspiración. El lisímetro de pesada se apoya sobre un sistema hidráulico o una balanza de precisión. Los lisímetros de drenaje tienen una salida en el fondo, de manera que el agua que se infiltra es recogida en un recipiente que se pueda aforar (Tuñón, 2000).

La gran diferencia entre ambos lisímetros es que los de drenaje miden la evapotranspiración de forma indirecta, resolviendo la ecuación de balance del suelo, mientras en los de pesada la evaporación se mide directamente, y según la exactitud de la balanza puede dar precisiones de hasta 0.1 mm (Gee & Hillel, 1988).

## Evapotranspirómetro de Thornthwaite

Con este aparato se determina en forma directa la evapotranspiración potencial de los cultivos. El evapotranspirómetro consiste en un tanque de aproximadamente 0.90 m de profundidad, por 3.0 m de largo y 1.30 de ancho, conectado a otro tanque regulador que permite mantener en el primero, un nivel de humedad constante; este último a su vez es alimentado por un tercer tanque en el que se mide el consumo de agua. El tanque grande se llama evapotranspirador y es donde se coloca la tierra donde es sembrado el pasto como cubierta vegetal (Valverde, 2007)

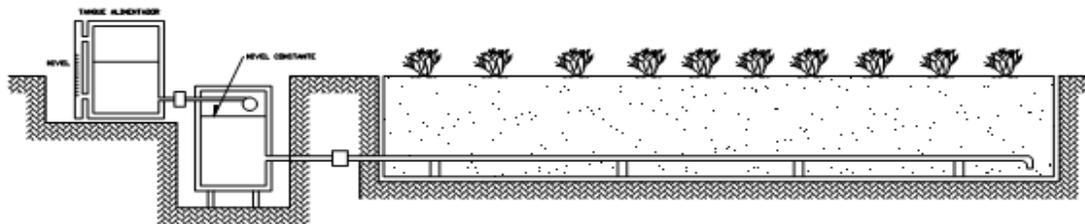


Figura. 1. Evapotranspirómetro de Thornthwaite.

Para el buen funcionamiento del aparato se recomienda que los tanques alimentador, regulador y de excedentes, estén bajo una caseta, para disminuir los efectos de evaporación, además alrededor del tanque evapotranspirador, deberá estar sembrado el cultivo que está en estudio.

Las dificultades que presenta la operación del equipo, el hecho de no poder aplicarse a más de un solo cultivo, hacen que su utilización sea altamente costosa (Ildefonso, 1987).

La cantidad de agua consumida ( $U_c$ ) será la que se agrega al tanque alimentador ( $v_a$ ) más la lluvia ( $v_{ll}$ ), menos la cantidad medida en el tanque de excedentes ( $v_e$ ).

$$U_c = v_a + v_{ll} - v_e \quad (9)$$

### **Métodos indirectos o empíricos.**

#### **Penman – Monteith (FAO)**

Esta ecuación fue presentada por primera vez en el año 1989 por Allen et al. Y desde entonces ha recibido una amplia aceptación para estimar la ETo (Ventura *et al.*, 1999).

La ecuación está definida para calcular la ETo de una superficie extensa de pasto verde (festuca o alfalfa) de altura uniforme, en activo crecimiento, que cubre completamente el suelo y que permanece en óptimas condiciones de humedad de suelo. Además, considera los siguientes parámetros fijos: una altura de 0.12 m, una rugosidad de la cubierta vegetal que se opone a la transferencia de vapor ( $Z_{oh}$ ) igual al 10% de la rugosidad que opone la cubierta vegetal al movimiento del viento ( $Z_{om}$ ), una altura del plano de referencia aerodinámico ( $d$ ) igual a 0.08 m, una resistencia de la cubierta vegetal ( $r_{cv}$ ) de 70 s/m y un albedo igual a 0.23. Estos parámetros fijos se basan en algoritmos

relacionados con el índice de área foliar y  $r_{cv}$  de pasto de una altura promedio (Allen et al., 1994, 1998).

Las ecuaciones para calcular la  $r_a$  y la  $r_{cv}$  han sido combinadas con el método Penman-Monteith para formar una sola expresión que describe la ETo diaria de una referencia de pasto hipotética tal como sigue (Allen et al., 1994, 1998):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (10)$$

Donde

ETo: Evapotranspiración sobre el cultivo de referencia (mm/día).

Rn: Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m<sup>2</sup>/día).

G: Flujo de calor del suelo (MJ/m<sup>2</sup>/día).

T: Temperatura promedio del aire a 2 metros de altura (°C).

U<sub>2</sub>: Velocidad promedio diaria del viento a 2 metros de altura (m/s).

e<sub>s</sub>: Presión de vapor en saturación (kPa).

e<sub>a</sub>: Presión de vapor actual (kPa).

Δ: Pendiente de la curva de presión de vapor versus temperatura (kPa/°C).

γ: Constante Psicométrica (kPa/°C).

A partir de la ecuación anterior la estimación de la ETo horaria viene dada por la siguiente expresión (Allen *et al.*, 1994).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (11)$$

Donde

ETo: Evapotranspiración sobre un cultivo de referencia (mm/h).

Rn: Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m<sup>2</sup>/h).

G: Flujo de calor del suelo (MJ/m<sup>2</sup>/h).

Para asegurar la integridad de la estimación, las mediciones climáticas se deben realizar a 2 metros de altura y no debe existir otro tipo de vegetación que no sea el cultivo de referencia ya que eventualmente podrían afectar las mediciones de temperatura y humedad relativa, provocando de esta manera estimaciones erróneas de la ETo (Allen *et al.*, 1994, 1998; Irmak *et al.*, 2002; Ventura *et al.*, 1999).

Con el propósito de evitar estimaciones diarias erróneas, Allen *et al.*, (1994, 1998) propone usar la ecuación (11).

Debido a la consistencia en las estimaciones de la ETo mostrada por el modelo FAO-PM bajo diferentes condiciones edafoclimáticas, este ha comenzado a ganar gran aceptación a nivel mundial, lo que lo ha consolidado

como un método altamente confiable para ser utilizado en variadas aplicaciones e investigaciones (Smith *et al.*, 1992; Temesgen *et al.*, 1999; Allen *et al.*, 2000; Irmak *et al.*, 2002)

## **2.4 Método del balance hídrico para determinar el consumo de agua por los cultivos**

### **Balance hídrico**

El balance de humedad para el volumen de suelo dado es la diferencia entre la cantidad de agua añadida y la cantidad de agua extraída (Hillel, 1971).

El balance hídrico es una representación teórica de los intercambios de agua entre las plantas, el suelo y la atmosfera, que es fácil de modelización, y sujeta a aplicarse por medio de simulación a toda clase de situaciones climáticas, edáficas y de los cultivos (Jiménez, 1994)

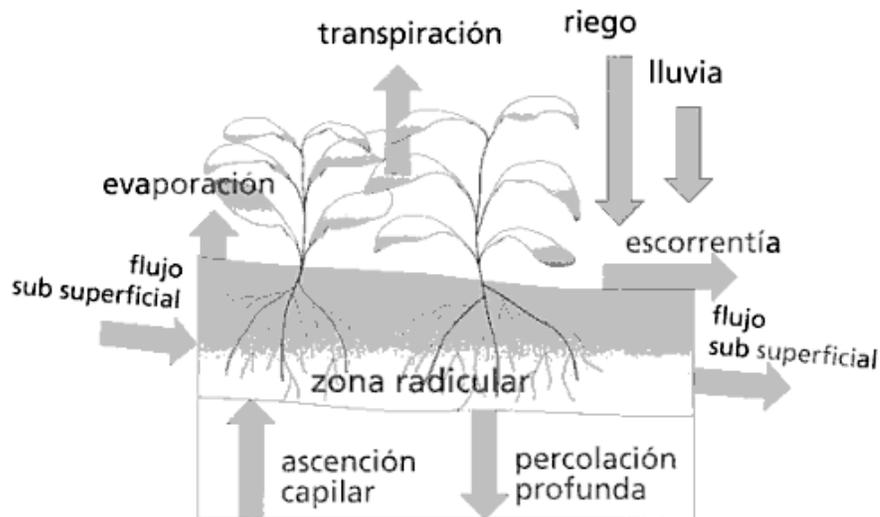


Figura 2. Balance de agua en el suelo de la zona radicular

El balance hídrico de un área de drenaje, se expresa como la diferencia de volumen de agua que se encuentra en el área, una vez desarrollados los procesos hidrológicos, precipitación pluvial, escurrimiento, infiltración, intercepción, evaporación y transpiración (Hewlett, 1969).

$$PP - Q - F - I - EV - T = 0 \quad (12)$$

Donde

PP: Precipitación,

E: Escurrimiento,

F: Infiltración,

I: Intercepción,

Ev: Evaporación,

T: Transpiración.

El balance hídrico decenal propuesto por FAO se establece como la diferencia entre la precipitación y las necesidades hídricas de la vegetación o cultivo (Torres, 1995).

$$Lp + Rs - Nh = D \text{ ó } E \quad (13)$$

Donde

Lp: Lamina precipitada.

Rs: Reservas hídricas del suelo.

Nh: Necesidades hídricas de la planta.

D: Déficit.

E: Exceso.

## **2.5 Estudios previos del uso del método del balance hídrico para determinar el consumo de agua de diferentes cultivos.**

Castro *et al.*, (2008). Desarrollo un trabajo con el objetivo de tener un sistema de riego automatizado en tiempo real para determinar el momento oportuno y cantidad de riego en el cultivo de calabaza, se implementaron tres estrategias de riego (lisímetro, TDR y balance hídrico). Concluyeron que la estrategia de TDR presento mayor producción del cultivo y menor cantidad de agua utilizado.

Flores y Ruiz, (1998) estimaron la humedad del suelo en el cultivo de maíz mediante el modelo de balance hídrico, la lámina de agua contenida en el suelo se cuantificó con el método gravimétrico, y los resultados obtenidos de la humedad disponible observada y estimada promedio para cada año (1985-1988) en estudio, la comparación de las medias de humedad disponible observada indicó diferencias no significativas entre ellas.

Echeverría *et al.*, (2007). Realizaron un estudio para determinar el consumo de agua en dos especies de árboles (roble-olivillo y pradera) bajo las mismas condiciones, utilizando el modelo de balance hídrico. Observaron que el árbol roble-olivillo consume el 20 % más agua que el árbol de pradera.

## **2.6 Estudios previos del método del balance hídrico para determinar el consumo de agua por huerta del manzano.**

Orozco, (2009). Comparo dos sistemas de programación de riego en una huerta de manzano, el año 2008 la programación de riego se hizo mediante un modelo de balance hídrico mientras que el año 2007 no se aplicó ningún modelo. Los resultados que se obtuvo de esta comparación que hubo ahorros significativos de agua de riego de 45% aplicando el modelo de balance hídrico.

Dapena y Fernández, (2006). Evaluaron una huerta de manzano para determinar la humedad del suelo utilizando el modelo de balance hídrico, para

corroborar si el cultivo se encuentra en condiciones óptimas, sobre riego o en déficit hídrico. El resultado final se obtuvo que el cultivo de manzano se encuentra en condiciones de déficit hídrico.

Zegbe *et al.*, (2006). Compararon dos tratamientos del cultivo de manzano utilizando el modelo de balance hídrico ambos tratamientos, que fueron riego completo (RC) y riego parcial de la raíz (RPR); con el objetivo de ahorrar agua en la aplicación de riego. Los resultados obtenidos muestran que los rendimientos fueron estadísticamente iguales para ambos tratamientos, pero la eficiencia en el uso de agua fue significativamente mejorada en 70% con RPR en relación al RC. El RPR ahorro 44% de agua.

### **III. MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1 Área de estudio.**

El estudio se realizó en la localidad de Jame, municipio de Arteaga, Coahuila, México. Dicha localidad se localiza en la parte sureste del estado de Coahuila, dentro de la zona montañosa que forma parte de la Sierra Madre Oriental. Las coordenadas geográficas son latitud 25° 20' N, longitud 100° 36' 48" W y una altura de 2534 msnm.

#### **3.2 Características del huerto.**

La huerta tiene arboles establecidas de la variedad Golden Bigas, injertados en el patrón MM 111, de 15 años de edad y de 2.5 metros de altura promedio.

El marco de plantación es de 3.0 m de espaciamiento entre árboles y 4.0 m entre hileras.

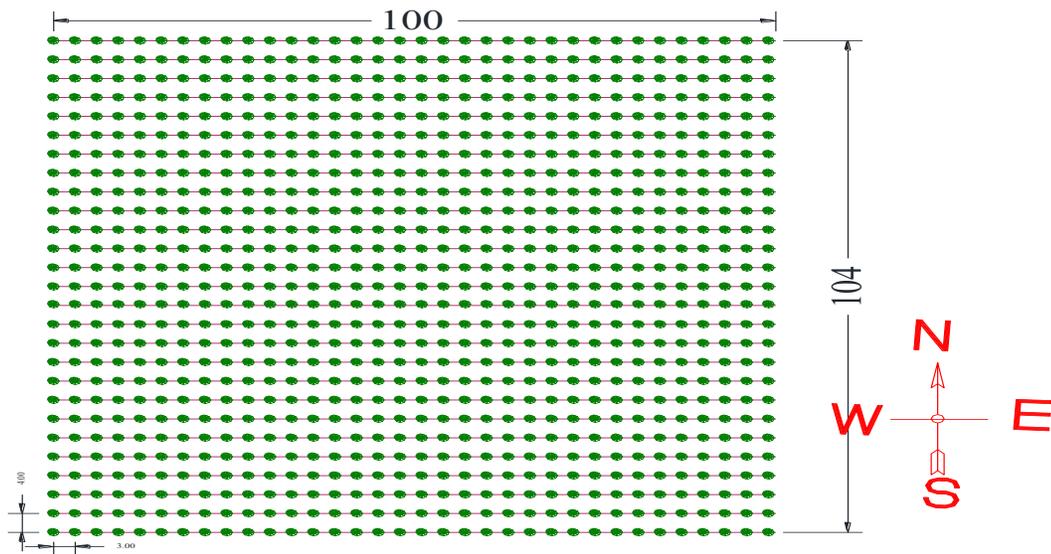


Figura 3. Marco de plantación de la huerta de estudio.

### 3.3 Frecuencia de riegos y láminas aplicadas

Los árboles de la huerta se riegan con un sistema de riego por goteo, con goteros a cada metro y un gasto de aplicación de 1.95 LPH. Los riegos se aplican cada tercer día, con 8 h/día (que corresponde a una lámina de agua de 5.2 mm) de marzo a septiembre.

### 3.4 Medición del contenido de agua en el suelo

El contenido de agua en el suelo se midió con una sonda de reflectometría en el dominio de las frecuencias o capacitancia (FDR). Este método se basa en la relación existente entre el contenido volumétrico de humedad y la constante dieléctrica aparente del medio poroso. Dicha constante

se determina a partir del tiempo de tránsito de una señal electromagnética a lo largo de una sonda metálica introducida en el suelo (Ferre y Topp, 2002).

### **Características del sensor.**

La sonda utilizada en el estudio (SM1 de Adcon Telemetry) es un sistema flexible de medición de humedad de suelos basados en capacitancia. Está disponible en una variedad de longitudes, a partir de 30 cm hasta 150 cm con un sensor de humedad del suelo a cada 10 cm. Se instalan en el suelo dentro de un tubo PVC sellados de 32 mm de diámetro. La esfera de influencia de los sensores es de aproximadamente 10 cm de radio alrededor del tubo.

### **Especificaciones técnicas del sensor.**

La sonda proviene de la marca Adcon Telemetry, con diámetro de tubo de 32 mm y 82 mm de tapa superior, cable de polyethylene de 5 m de longitud, sonda de PVC resistente a la radiación de ultravioleta y señal de salida SDI-12.

### **Características de la medición de la humedad del suelo por el sensor.**

El sensor abarca un rango de medición de 0 a 100%, con una resolución de 0.1%, una precisión de +/- 2%, utilizando la capacitancia como método de medición.

## **Telemetría**

La sonda de humedad del suelo se conecta a una unidad de Telemetría Remota (RTU) A755 addSDI GSM/GPRS de funcionamiento autónomo con batería interna. Esta unidad almacena los datos cada 20 minutos y los transmite automáticamente a través del sistema GSM/GPRS al software addVANTAGE Pro 6.2. Este software es el encargado del procesamiento, almacenamiento y distribución de la información, la información puede ser consultada fácilmente a través del internet. El software convierte las unidades de frecuencia (SFU) a contenido volumétrico de agua (VSW).

## **Calibración.**

Este tipo de sondas permiten la obtención de un registro de datos en continuo a lo largo de todo el perfil del suelo, ofreciendo medidas más o menos precisas pero que necesitan de una calibración previa en suelos arcillosos o con altos contenidos en materia orgánica. (Paltineanu y Starr, 1997; Sentek, 1999; Fares y Alva, 2000; Sentek, 2001; Starr y Paltineanu, 2002; Ferre y Topp, 2002).

Previamente deben ser calibrados antes de la instalación por medio de lecturas de frecuencia específicas en agua y en aire seco. La frecuencia normalizada o universal se calcula entonces de la siguiente manera:

$$SF = \frac{(SF_a - SF_s)}{(SF_a - SF_w)} \quad (14)$$

Dónde

SF<sub>a</sub>: Lecturas de frecuencia del sensor en el aire seco.

SF<sub>s</sub>: Lecturas de frecuencia del sensor en el suelo.

SF<sub>w</sub>: Lecturas de frecuencia del sensor en el agua.

El contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\theta_v$ ) es entonces una función exponencial de SF:

$$\theta_v = \left( \frac{SF - c}{a} \right)^{1/b} \quad (15)$$

Dónde: a, b y c son coeficientes que varían según la calibración.

Dependiendo de los coeficientes de calibración se puede obtener la humedad gravimétrica o volumétrica. La calibración de fábrica es válida para un amplio intervalo de valores en distintos tipos de suelo y condiciones, pero no es aplicable en los casos de arenas gruesas, arcillas expansibles, suelos con contenidos en materia orgánica altos y suelos salinos (Starr y Paltineanu, 2002).

### 3.5 Modelo de balance hídrico.

El balance de humedad en un determinado volumen de suelo es la diferencia entre la cantidad de agua añadida y la cantidad de agua perdida (Hillel, 1971).

El balance hídrico (Figura 4) en una relación entre las entradas y salidas de agua al perfil del suelo donde se desarrolla la actividad radicular de las plantas.

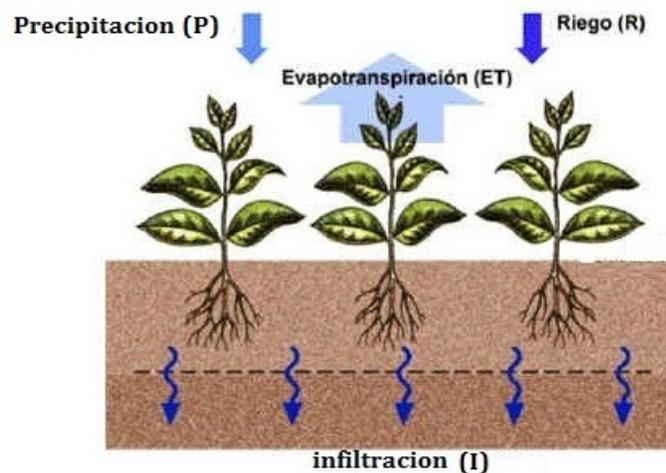


Figura 4. Representación esquemática de los componentes del balance hídrico sin considerar flujos horizontales, ni aportaciones de la capa freática.

El balance hídrico se puede representar con la siguiente relación (Allen *et al.*, 1998)

$$L_f = L_i + P + R - I - ET \quad (16)$$

Dónde:

$L_f$  es la lámina de agua (mm) al final del periodo de tiempo en el perfil del suelo,

$L_i$  es la lámina de agua (mm) al inicio del periodo,

$P$  es la precipitación (mm) registrada durante el periodo de tiempo,

$R$  es el riego (mm) registrado en el periodo,

$I$  es la lámina de agua infiltrada (mm) fuera del perfil del suelo de referencia,

$ET$  es la evapotranspiración (mm) registrada en el periodo.

Despejando  $ET$  de la ecuación anterior tenemos:

$$ET = (L_i - L_f) + P + R - I \quad (17)$$

La lámina de agua inicial y final se obtiene con las siguientes relaciones:

$$L_i = \theta_{wi} * \rho_b * \text{prof.} \quad (18)$$

$$L_f = \theta_{wf} * \rho_b * \text{prof.} \quad (19)$$

Dónde:

$\theta_{wi}$  es el contenido inicial de agua (g/g) en el perfil del suelo,

$\theta_{wf}$  es el contenido de agua (g/g) al final del periodo de tiempo considerado,

$\rho_b$  es la densidad bruta en el perfil del suelo ( $\text{g cm}^{-3}$ )

Prof. es as la profundidad del perfil del suelo (mm).

En ausencia de lluvia, riego e infiltración, la ET corresponde a la diferencia entre la lámina de agua al inicio y al final del periodo de tiempo considerado, de acuerdo con la siguiente relación.

$$ET = [L_i - L_f] = (\theta_{wi} - \theta_{wf}) * \rho_b * \text{prof.} \quad (20)$$

### 3.6 Densidad bruta del suelo.

La densidad bruta del suelo se determinó con el método de cilindro. Se tomaron dos muestras a las profundidades de: 00-0.20, 0.20-0.40 y 0.40-0.60 m. Para extraer el agua de las muestras de suelo, estas se secaron en un horno a una temperatura de 105 °C durante 48 horas aproximadamente y en una balanza se obtuvo el valor del suelo en peso seco.

La densidad bruta del suelo se obtuvo con la siguiente relación:

$$\rho_b \text{ (g / cm}^3\text{)} = \frac{\text{masa de suelo}}{\text{volumen de cilindro}} \quad (21)$$

El volumen de cilindro se puede calcular de la siguiente manera.

$$\text{Vol. cilindro (cm}^3\text{)} = \pi * r^2 * L \quad (22)$$

Dónde:

r es el radio del cilindro (cm) y

L es la altura del cilindro (cm).

### **3.7 Obtención y manejo de la información requerida por el modelo.**

#### **Variación de humedad en el suelo.**

Los registros de humedad en el suelo se llevaron a cabo mediante sondas de capacitancia tipo FDR, colocada dentro de un tubo de pvc instalado a 0.30 m del tronco del árbol. La sonda consta de 9 sensores capacitivos ubicados a 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80 y 0.90 m de profundidad donde se concentra el 90 % del sistema radicular. El sensor está conectado a un sistema de almacenamiento de datos, que registra medidas a cada 1200 segundos.

Con los datos obtenidos con el método FDR se calcula la lámina consumida durante los meses que se estudió para evaluar el balance hídrico del manzano.

## **Evapotranspiración.**

Se utilizó la información de una estación meteorológica ubicada en la misma huerta, para estimar la evapotranspiración por el método de Penman – Monteith modificado por la FAO. Los cálculos se realizaron con un programa desarrollado en “Mathcad” para obtener la ET diaria durante los 7 meses del estudio (Díaz-Leyva, 2013).

## **Riego.**

La información del riego consistió en una fila de árboles de 100 metros con una distancia de 1 metro cada gotero, con un caudal de 1.95 litros por hora, por lo tanto con esta información se pudo calcular la lámina aplicada para cada día, la aplicación del riego de los 7 meses, con diferentes tiempos de riego.

## **Precipitación.**

Los datos de la precipitación o lluvia se obtuvieron de la estación meteorológica ubicada en la huerta.

### **3.8 Aplicación del modelo para determinar el consumo diario de agua por los árboles de la huerta.**

Para estimar el consumo diario de agua para el árbol de manzano, se usaron los datos de contenido de agua en el suelo generados por la sonda de capacitancia instalada en la huerta del manzano. También se utilizaron los datos de densidad bruta de las diferentes profundidades a las que la sonda reporta los datos de contenido de humedad: 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80 y 0.90 m.

La evapotranspiración por los árboles de la huerta, se obtuvo aplicando el balance hídrico (Ec. 17), considerando una profundidad radicular activa de 0.50 m. El balance se calculó diariamente de las 8:00h del día previo a la 8:00 h del día siguiente, utilizando los datos de contenido de agua en el suelo, generados por la sonda (FDR) cada 1200 s a las profundidades de 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 y 0.50 m. Los datos de cantidad de lluvia y fecha de ocurrencia se obtuvieron de la estación climatológica localizada dentro de la huerta, mientras que las láminas de riego y fechas de aplicación fueron proporcionadas por el jefe de operación de la huerta.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Frecuencia de riegos y láminas aplicadas.

En el Cuadro 1 se muestran las láminas de agua aplicada de marzo a septiembre, que corresponden a los meses del ciclo de producción del manzano en esta región. Los meses de mayor aplicación son de abril a julio, debido al desarrollo de los árboles y a la demanda evaporativa de la atmósfera. En septiembre la aplicación de riego disminuye por la ocurrencia de lluvias y porque la huerta esta en cosecha. Durante los meses de mayor consumo, los riegos se aplican cada tercer día con 8 h de duración.

Las láminas mensuales de agua aplicada, se obtuvieron dividiendo el volumen de agua mensual aplicado en una superficie correspondiente a una longitud de 100 m y un ancho de 3 m (diámetro de copa de los árboles). El volumen mensual de agua aplicada se obtuvo con base al gasto del emisor (1.95 LPH/m) y las horas de riego aplicadas en cada mes para una longitud de 100 m.

Las láminas aplicadas (Cuadro 1) son razonablemente apropiadas, ya que para el mes de menor demanda (marzo), la lámina aplicada permite mantener una tasa diaria de evapotranspiración (ET) de 1.82 mm. Y para los meses de mayor consumo las láminas aplicadas (67.6 mm) (Cuadro 1), permiten una tasa diaria de ET de 2.25 mm. Sin embargo, es necesario

considerar la lámina por lluvia aportada al suelo, para completar el balance hídrico y poder evaluar la eficiencia del riego.

Cuadro 1. Relación de riegos y láminas de agua aplicadas a los árboles de la huerta los meses del ciclo de producción.

Mes	No de riego	Hrs de riego	Vol. (m <sup>3</sup> ) en 100 m lineales	Lamina aplicada (mm)
Marzo	12	84	16.38	54.60
Abril	13	104	20.28	67.60
Mayo	13	104	20.28	67.60
Junio	13	104	20.28	67.60
Julio	13	104	20.28	67.60
Agosto	14	100	19.5	65.00
Septiembre	12	84	16.4	54.60

#### 4.2 Propiedades físicas del suelo del sitio de estudio.

En el Cuadro 2 se muestran las propiedades del suelo de los estrato de 0 a 30 y 30 a 60 cm; la textura del suelo es migajón arcilloso con 31% de arcilla.

Cuadro 2. Propiedades físicas del suelo del sitio de estudio.

ESTRATOS	Densidad bruta (gr/cm <sup>3</sup> )	Textura	Capacidad de campo (%)	Marchitez permanente (%)	Porosidad (%)
00 - 30 cm	1.42	Migajón arcilloso	23.1	12.6	49
30 - 60 cm	1.51		24.2	13.7	47.3

Los datos se obtuvieron de Saquelares-olea (2001)

### **4.3 Evolución del contenido de agua del perfil superior del suelo.**

En las Figuras 5, 6 y 7 se muestran los cambios del contenido de agua en el suelo a 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 y 0.50 m de profundidad (promedios de 1200 s). Durante el mes de Marzo (4 a 8) (Figura 5) y Mayo (6 a 9 y 20 a 23). Figuras 5 y 6

A principios de marzo, el mayor contenido de agua en el suelo se observó en el perfil superior del suelo (10, 20 y 30 cm). Los mayores cambios del contenido de agua se observaron a 10 cm de profundidad. Esto debido al riego y a la evaporación directa desde la superficie, ya que los árboles tenían poco desarrollo foliar y poco efecto de sombreado (Arauzo *et al.*, 2003 y Mestas, 2011) El menor contenido de agua en el suelo se observó a mayor profundidad (40 y 50 cm) con inapreciables fluctuaciones del contenido de humedad (Mestas, 2011). Esto debido a que en esa fecha se iniciaba el riego a los árboles y la humedad todavía no penetraba a los estratos más profundos.

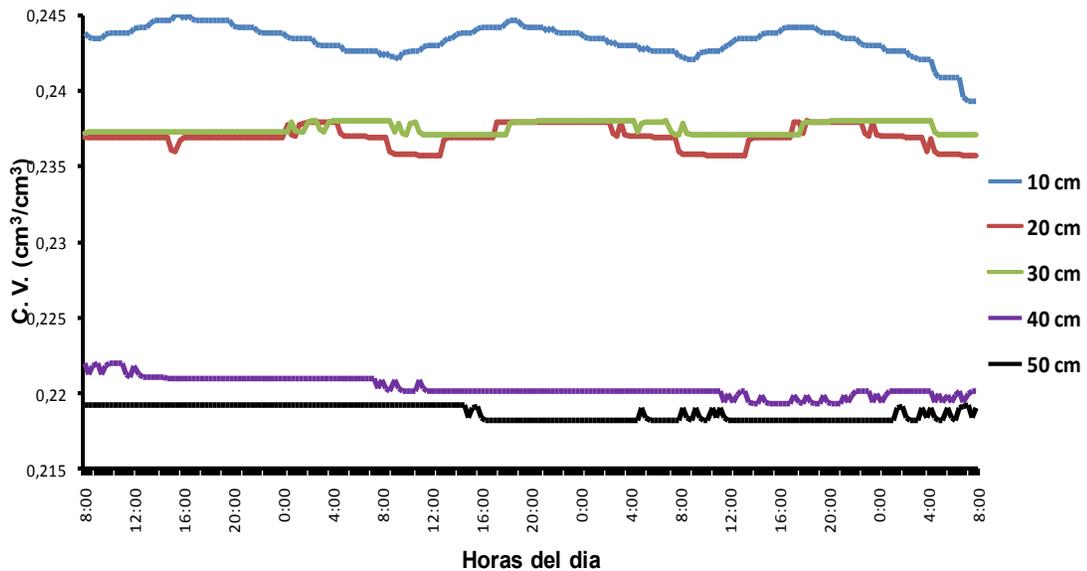


Figura 5. Evolución del contenido de humedad del suelo (C.V) en la zona radicular del cultivo del manzano, (promedio de 20 min) a las profundidades de 10, 20, 30, 40 y 50 cm; observados del 4 a 8 de Marzo, Jame, Municipio de Arteaga, Coahuila, México.

En la Figura 6 se muestra que en mayo, la distribución de la humedad del suelo se invirtió con respecto a la distribución observada en marzo, ya que ahora, el mayor contenido de agua se observa en las profundidades de 40 y 50 cm, pero con cambios poco apreciables en el contenido de humedad. Esto fue el resultado de la infiltración desde la superficie por efecto de los riegos y a la poca actividad de las raíces a esta profundidad. Las fluctuaciones mayores en el contenido de agua en el suelo se observan en las profundidades de 10 y 20 cm. Esto se debió a una mayor actividad de las raíces de los árboles y al efecto de la evaporación desde la superficie del suelo (Arauzo *et al.*, 2003).

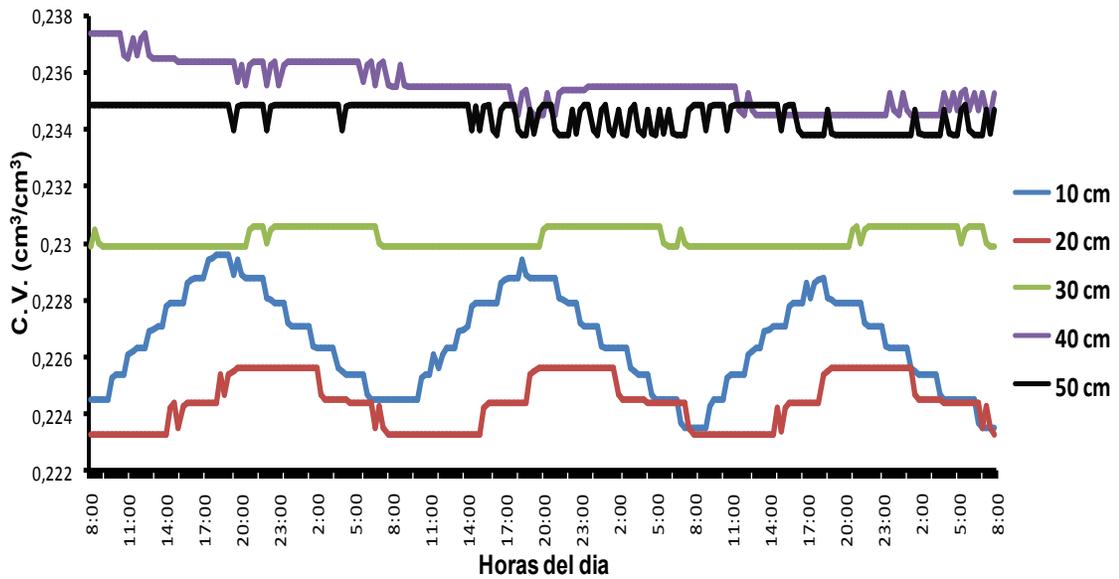


Figura 6. Evolución del contenido de humedad del suelo (C.V) en la zona radicular del cultivo del manzano, (promedio de 20 min) a las profundidades de 10, 20, 30, 40 y 50 cm; observados del 6 a 9 de mayo, Jame, Municipio de Arteaga, Coahuila, México.

Del 20 al 23 de mayo se observó una distribución de la de la humedad en el suelo y fluctuaciones de la misma (Figura 7) muy similares a las observadas en la Figura 6. Nótese que en la Figura 7. Se observa que aproximadamente a las 17 h ocurrió un flujo de agua de estrato de 40 cm al de 50 cm, ya que a partir de esa hora, el contenido a 50 cm aumento, mientras que a 40 cm decreció. Al igual que en la Figura 6, las fluctuaciones mayores de la humedad se presentaron en la profundidad de 10 cm. Nótese también que a 30 cm de profundidad el contenido de agua en el suelo se mantiene casi constante.

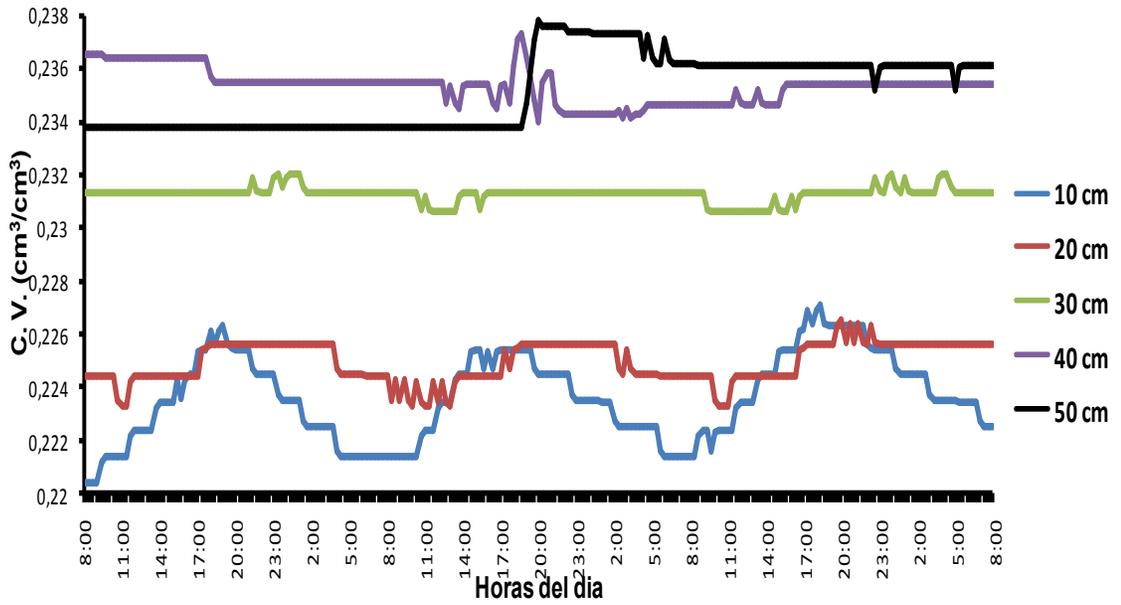


Figura 7. Evolución del contenido de humedad del suelo (C.V) en la zona radicular del cultivo del manzano, (promedio de 20 min) con profundidades de 10, 20, 30, 40 y 50 cm; observados del 20 a 23 de mayo, Jame, Municipio de Arteaga, Coahuila, México.

#### 4.4 Consumo de agua por los arboles de la huerta.

En el cuadro 3 se muestran los valores de las láminas de agua aplicadas en el riego, láminas por lluvia y las láminas consumidas por los árboles de la huerta. Nótese que solo en abril y mayo se observa un déficit de agua para los árboles, mientras que en el resto de los meses del ciclo de producción se observa un exceso. En Julio, agosto y septiembre se observó el mayor exceso de agua, que coincide con los meses de mayor precipitación pluvial. Estos resultados también muestran que es posible reducir la lámina de riego aplicada, sin afectar el rendimiento de los árboles de la huerta (Castro *et al.*, 2008). Por ejemplo, en septiembre la tasa de evapotranspiración estimada con el método FAO Penman Monteith fue 109.3 mm, la lámina consumida de acuerdo con las mediciones realizadas con la sonda de FDR fue 86 mm, y se presentó una lluvia de 146 mm. El resultado fue que la lluvia fue mayor que la tasa de ET y por consiguiente durante septiembre no fue necesario regar. Sin embargo, se aplicó un riego de 54.6 mm. De acuerdo con el balance que se muestra en el Cuadro 3, el mejor uso del agua se realizó en marzo y junio, ya que se observó un menor exceso de agua. El déficit de agua que se observó en abril y mayo puede ocasionar un déficit hídrico en los árboles de la huerta. Para todo el ciclo de producción del cultivo se observó un exceso de 160.4 mm de lámina de agua.

Estudios previos (Flores y Ruiz, 1998; Echeverría *et al.*, 2007) reportan que el método de balance hídrico, es apropiado para estimar el consumo de

agua en los cultivos. Dapena y Fernández, (2006) aplicaron el método del balance hídrico en una huerta de manzano para determinar las condiciones hídricas del cultivo. Los resultados indicaron una condición de déficit hídrico. Orozco (2009) reporto un ahorro de hasta un 45 % agua al aplicar el método del balance hídrico en una huerta de manzano en Cuauhtémoc, Chihuahua.

Cuadro 3. Lámina de agua evapotranspirada, de lluvia, aplicada, consumida y el balance hídrico correspondiente en una huerta de manzano (c.v. golden vigas) de marzo-septiembre de 2012. Jame, municipio de Arteaga, Coahuila, México.

Mes	No de días	ET (mm)		Lamina aplicada (mm)	Lluvia (mm)	Lamina consumida (mm)	Balance (mm)
		Pen-Mont	ET*Kc (mm)				
Marzo	16	60.2	49.4	31.9	33.8	63.1	2.6
Abril	30	117.7	113.4	67.6	0.6	107.2	-39.0
Mayo	31	133.7	146.9	67.6	24.4	140.9	-48.9
Junio	26	105.1	123.4	57.2	49.2	95.6	10.8
Julio	21	71.6	86.1	46.8	92.2	45.5	93.5
Agosto	31	115.7	135.7	65.0	39.0	77.2	26.8
Septiembre	30	100.5	109.3	54.6	146.0	86.0	114.6
		<b>704.4</b>	<b>764.2</b>	<b>390.7</b>	<b>385.2</b>	<b>615.5</b>	<b>160.4</b>

ET Pen-Mont: evapotranspiración de referencia estimada con el método FAO Penman-Monteith; ET\*Kc: evapotranspiración de referencia multiplicado con el coeficiente del cultivo

## V. CONCLUSIONES

Se demostró que con la aplicación del método del balance hídrico, se puede mejorar la eficiencia del uso del agua de riego en las huertas de manzano.

La técnica de FDR monitorea rápidamente la humedad del suelo con una precisión de +/- 2% y el balance de agua basado en sus lecturas se puede aprovechar para tomar decisiones sobre el ¿Cuándo? y ¿Cuánto? regar o en un futuro establecer la lectura crítica (“variable criterio”) para automatizar el sistema de riego de goteo. En la huerta del estudio se estuvo regando a una lectura crítica de  $0.22 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  en el estrato de 00-20 cm de suelo.

En los meses de marzo, junio, julio agosto y septiembre del ciclo de producción del cultivo se observó un exceso de agua, ya que la suma de la lámina de agua aplicada con la lámina de lluvia fue mayor que la lámina de agua consumida. Mientras que en abril y mayo se observó un déficit de agua para los árboles de la huerta. El exceso de agua mayor se observó en Julio, Agosto y Septiembre. El balance hídrico para todo el ciclo de producción indica que es posible reducir hasta en 160.4 mm la lámina de riego aplicada sin afectar la productividad de la huerta.

## VI. BIBLIOGRAFIA

- Agorio, C., G. Cardellino, W. Corsi, & J. Franco. 1988. Estimación de las necesidades de riego en Uruguay: I. Magnitud y frecuencia de la lámina neta total. DUMA-MGAP, Montevideo, Uruguay. 110 p.
- Allen, R. G., I. A. Walter, R. Elliott, B. Mecham, M. E. Jensen, D. Itenfisu, T. A. Howell, R. Snyder, P. Brown, S. Echings, T. Spfford, M. Hattendorf, R. H. Cuenca, J. L. Wright, and D. L. Martin. 2000. Issues, requirements, and Challenges in selecting and specifying a standardized ET equation. In Proc. 4<sup>th</sup> Natl. Irrig. Symp. St. Joseph, Mich: ASAE.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing crop Cater Requeriments, FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy. 300 p.
- Arauzo, M. J. A. Diez y P. Hernaiz. 2003. Estimación de balances hídricos y lixiviación de nitratos en sistemas agrícolas. En: Investigación de la zona no saturada, vol. VI, ZNS 03 (J. Alvarez-Benedi y P. Marinero, eds). Instituto Técnico Agrario de Castilla León, Universidad Europea Miguel de Cervantes. Valladolid, 408 p.

- Allen, R. G., M. Smith, L. S. Pereira, and A. Premier. 1994. An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bull.* 43(2), 35-92.
- Brown, R. W., & D. M. Oosterhuis. 1992. Measuring Plant and soil water potentials with thermocouple psychrometers; Some concerns, *agronomy journal* (84): 78-86.
- Busso, C. A. 2008. Uso de la cámara de presión y los psicrómetros a termocoplas en la determinación de las relaciones hídricas en tejidos vegetales. *Phyton* (B. aires). 77:327-350.
- Carrillo, R. J., G. A. Serrano, y S. Martínez. 2003. Balance hídrico y la relación entre agua superficial y subterránea, servicios ambientales. Morelia, México. 22 p.
- Cassel, D.K., R. G. Kachanoski, y G. C. Topp. 1994. Practical consideration for using a TDR cable tester. *Soil Technology.* 7:113-126.
- Castro, M. P., F. A. Marín, A. Q. Nolasco, S. Kleisinger, L. T. Chávez, y E. M. Saenz. 2008. Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro. *Agricultura técnica de Mexico.* (34): 459-470.

Dalton, F. N. 1992. Development of Time-Domain-Reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity. En: advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice. Soil Sci. Soc. Am. Special pub. 30:143-167.

Dapena, E., Fernandez-Ceballos, A. 2006. Consecuencias de la evolución climática en la producción de manzana en Austria. Publicaciones (SERIDA). No 197. [en línea] disponible en: <http://www.serida.org/publicacionesdetalle.php?id=2112&anyo=>

Dasberg, S., and F. N. Dalton. 1985. Time Domain Reflectometry measurements of soil water content and electrical conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J. 49:293-297.

Echeverría, C., A. Huber, y F. Taberlet. 2007. Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile. Bosque. 28: 271-280.

Ferre, P. A., y G. C. Topp. 2002. Time Domain Reflectometry. En: Dana, J. H. & Topp, G. C. (Eds), Methods of soil analysis, Part 4-Physical Methods, pp. 434-446. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.

Florentino, A. 2006. Métodos para medir el contenido de agua en el suelo. Bioagro. Venezuela14: 48-70

Flores, E. H., y J. A. Ruiz. 1998. Estimación de la humedad del suelo para maíz de temporal mediante en balance hídrico. TERRA Latinoamericana. 16(3):219-229.

García-Petillo, M. 2008. Manejo del riego: uso de instrumentos de medición de agua del suelo y del estado hídrico de los cultivos, presentación de casos de estudio incluso en riego deficitario. Red riegos, CYTED Y AECID. 40:277-280

Gavande, S. A. 1968. Introducción a la física de suelo. Instituto interamericano de ciencias agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. 265 p.

Gee, G., & D. Hillel. 1988. Groundwater recharge in arid regions: Review and critique of estimation methods. Hydrology Processes, 2: 255-266.

Gurovich, L A. 1985. Fundamentos y diseño de sistemas de riego. Primera Edición, San José, Costa Rica, 433 p.

Hanna, G. W., and Siam. 1980. The estimation of moisture content in the top 10 cm of soil using a neutron probe. J. Agr. Sci. 94: 251-254.

Hewlett, J. D. 1969. Principles of forest hydrology. The University of Georgia Press Athens, Georgia. USA. 183 p.

Hillel, D. 1971. Soil and water physical principles and processes. En: Kuzlowski, T. T. Ed. Physiological ecology: A series of monographs. Texts and treatises. Academic Press. USA. 288 p.

Ildefonso, P. 1987. Manual del uso y manejo del agua de riego. Patronato para la producción y extensión agrícola y ganadera. Cd. Obregón, Sonora, México. 186 p.

Irmak, S., D. Z. Haman, y J. W. Jones. 2002. Evaluation of Class a pancoefficients for estimating reference evapotranspiration in humid location. J Irrig Draing Eng ASCE 128(3): 153-159.

Jiménez, O. F. 1994. Planificación y manejo de los recursos hidrológicos en la agricultura mediante el balance hídrico. Turrialba, Costa Rica. 36 p.

Leonard, J. L., and F. J. Barnes. 1986. Water balance calculations in southwestern woodlands. The Pinyon-juniper conference. Reno, NV. January 13-16.

Martínez, C. A., P. Romero, J. I. Fernández. 2007. Técnicas de riego deficitario en el cultivo de la vid. *Vida rural* 444:17-21.

Mestas, V. R. 2011. Régimen hídrico del suelo y evapotranspiración en áreas agrícolas y forestales. Tesis doctoral, Universidad la Coruña. 203 p.

Muñoz, C. R., y R. A. Ritter. 2005. Hidrología agroforestal. Edición Mundi-prensa, 339 p.

Orozco, A. C. 2009. Determinación del régimen de riego para manzano bajo micro aspersión mediante el uso de estaciones meteorológicas y sondas de capacitancia (FDR). Departamento de Investigación, Desarrollo, Innovación Y transferencia Tecnológica. (2): 56-66.

Ponizovsky, A. S., S. M. Chudinova and A. Pachepsky. 1999. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. *Journal of Hydrology* 218:35-43.

Raj, G. M., M. L. Rivera, y R. M. Crespo. 2007. Manejo de riego por goteo. Editado General, Mayagüez, Puerto Rico, 107p

Rawlins, S.L., & G.S. Campbell. 1986. Water potential: thermocouple psychrometry En: A. Klute (ed) *Methods of soil analysis, part 1 Physical*

and mineralogia methods, 2da edn. Agronomy number 9. American society of agronomy, Madison, pp 558-597.

Rivera, L. M., M. R. Goyal, y M. C. Ruiz. 2007. Manejo de riego por goteo. Segunda Edición. Puerto Rico. 519 p.

Santa-Olalla, F. M., P. L. Foster, y A. C. Belmonte. 2005. Agua y agronomía. Edicion Mundi-prensa. 583 p.

SAGARPA, 2011. Anuario estadístico de la producción Agrícola. <http://www.siap.sagarpa.gob.mx> (consultado en Febrero 2013).

Seyfried, M. S., M. D. Murdock. 2004. Measurement of soil water content with a 50 Mhz soil dielectric sensor. Soil Sci. Am. J. 68:394-403.

SIAP. 2012. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [en línea] disponible en: [http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=347](http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=347) (consultado en Marzo 2013).

Smith, M., R. G. Allen, J. L. Monteith, L. S. Pereira, A. Perrier and W. O. Pruitt. 1992. Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requeriments. Land and water

development division, United Nations Food and Agriculture Service, Rome, Italy. 45 p.

Temesgen, B., R. G. Allen and D. T. Jensen. 1999. Adjusting temperature parameters to reflect well-watered conditions. *J. Irrig. and Drain. Eng.* ASCE 125 (1): 26-33.

Topp, G.C., J. L. Davis, y A. P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*. 16: 574-582.

Topp, G. C., and J. L. Davis. 1985. Measurement of soil water content using time-domain Reflectometría (TDR): A field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:19-24.

Torres, R. E. 1995. *Agrometeorología*. Ed. Trillas. México. 15 p.

Tuñón, J. 2000. Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas. Departamento de Ciencias Experimentales, Universitat Jume I, Catellon, Tesis Doctoral. 367 p.

Valverde, C. J. 2007. Riego y drenaje. Primera Edición. San José C. R: EUNED, 224 p.

Vanbavel, CHM., Ec. Hood, & N. Underwood. 1954. Vertical resolution in the neutron method for measuring soil moisture. Trans. Am. Geophys, union 35:595-600.

Ventura, F., D. Spano, P. Duce, and R. L. Snyder. 1999. An evaluation of common evapotranspiration equations, Irrig. Sci. 18: 163-70.

Zegbe, J. A., A. S. Pérez, y A. G. Bravo. 2006. Riego parcial de la raíz en manzano "Golden Delicious" en un ambiente semi-arido. Fitotec. Mex. 29:69-73.

Zermeño-González, A., J. Munguia-Lopez, M. Cadena-Zapata, S. G. Campos-Magaña, L. Ibarra-Jiménez, and R. Rodriguez-Garcia. 2012. Critical evaluation of different techniques for determining soil water content. En: M. Kumar. Problems, perspectives and challenges of agricultural water management. (Eds.), INTECH. Pp. 200-214.