

# **DETERMINACION DEL REGIMEN DE RIEGO PARA MANZANO BAJO MICROASPERSION MEDIANTE EL USO DE ESTACIONES METEOROLOGICAS Y SONDAS DE CAPACITANCIA (FDR)**

Alfonso Luis Orozco Corral. Investigador. Grupo La Norteña. Departamento de Investigación, Desarrollo, Innovación y Transferencia Tecnológica. Km. 98.5 Carr. Chihuahua-Cuauhtémoc. Fracc. Real del Monte. C.P. 31552 Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México. Tel. +52 (625) 590-2537. Fax +52 (625) 590-2538. [alfonsoorozco@grupolanorteña.com](mailto:alfonsoorozco@grupolanorteña.com) [www.grupolanorteña.com](http://www.grupolanorteña.com)

## **INTRODUCCION**

En la cuenca No. 34 de La Laguna de Bustillos existen aproximadamente 4230 pozos, con una extracción anual de 360 millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>), una recarga de 87 Mm<sup>3</sup>, con déficit anual de 273 Mm<sup>3</sup> (CNA, 2007). Esto ha originado que cientos de pozos se encuentren secos, en otros tantos se ha bajado el nivel estático y algunos han llegado a perforar hasta una profundidad de mas de 800 pies. (Parra y Ortiz, 2004).

El abatimiento de los mantos acuíferos en la región de Cuauhtémoc, Chihuahua es preocupante, si no se toman las medidas adecuadas para optimizar el uso del agua de irrigación, se puede llegar a la perdida de miles de hectáreas dedicadas al cultivo del manzano, ya que el agua es el factor mas limitante para la fruticultura.

La evapotranspiración es un parámetro importante para determinar los requerimientos hídricos del cultivo. Debido a las dificultades que siempre ha presentado su medición directa, ésta se ha estimado generalmente a partir de datos climáticos. Alteraciones en las curvas de evapotranspiración diaria pueden indicar que se está produciendo un stress hídrico para el cultivo. Ante este tipo de eventualidad, la observación en tiempo real permite realizar modificaciones en el manejo del cultivo para evitar situaciones no deseables que pueden afectar a la producción.

Es importante tener presentes consideraciones de tipo ambiental en el diseño y operación de los sistemas de irrigación, ya que el agua en exceso se infiltra mas por debajo de la zona radicular, arrastrando residuos de fertilizantes u otras sustancias químicas, contaminando así los mantos acuíferos.

El manejo apropiado del agua debe estar en relación con el sistema de irrigación utilizado. En la irrigación de los huertos manzaneros, el ajuste de las cantidades de agua a aplicar, el tiempo de riego apropiado, el drenaje del suelo, la operatividad de labores culturales y medioambientales, constituyen las características más importantes que deben ser optimizadas. La utilización 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 de irrigación y reducir o eliminar las pérdidas por lixiviación y/o escurrimientos y consecuentemente hacer un mejor manejo del recurso agua. La toma de decisiones para dar respuesta a las interrogantes sobre disponibilidad y conservación del agua, debe basarse en el conocimiento preciso del Balance Hidrológico con todas sus consideraciones, no solo en términos de flujo de agua, sino también con las repercusiones económicas, productivas, ecológicas y sociales que se producen en los esquemas de manejo y uso del agua.

El mantenimiento del contenido de agua adecuado durante el periodo de cultivo es necesario para obtener el óptimo crecimiento de la planta, su producción y calidad.

## OBJETIVOS

El objetivo general fue determinar el régimen de riego para manzano irrigado por microaspersión, en el Rancho Experimental El Rosario, en el Municipio de Guerrero, Chihuahua, a través de métodos capacitivos que hacen uso de la “Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia” (FDR) como lo son las sondas de capacitancia para medir y monitorear continuamente la humedad del suelo en la zona radicular y de estaciones meteorológicas para la captura de datos climáticos, para de este modo programar, optimizar y manejar eficientemente los riegos, de acuerdo a las características del suelo y a las necesidades del cultivo en todo su ciclo fenológico, lo cual permite hacer un uso racional de los recursos agua y suelo, logrando la sostenibilidad de las unidades de producción.

### Objetivos específicos:

- Manejar eficientemente el agua de irrigación, a través de una programación de riegos.
- Disminuir el volumen de agua de extracción que se usa para riego.
- Evaluar el comportamiento de la sonda de capacitancia (FDR).
- Mejorar el aprovechamiento de los nutrientes aportados evitando su lixiviación.

## ANTECEDENTES

Un buen manejo de irrigación se basa en optimizar la distribución espacial y temporal del agua aplicada con el objeto de incrementar la producción y calidad de los cultivos y en consecuencia obtener el máximo retorno económico. Las buenas prácticas de irrigación, están diseñadas para mantener un adecuado nivel de humedad en esta zona y minimizar la contaminación difusa, es decir, lixiviación del agua y nutrientes por debajo de la zona radicular. (Fares, et al. 2000).

El conocimiento del contenido de agua en el suelo es fundamental para explicar una serie de procesos, tales como: balance del agua, velocidad de infiltración, escurrimientos, abatimiento de mantos acuíferos, crecimiento y desarrollo de cultivos, diseño de sistemas de irrigación, etc. (Dasberg y Dalton, 1985).

Varios factores afectan la permitividad efectiva del suelo. Es el caso del contenido en humedad, la porosidad (Weitz et al., 1997), la frecuencia de la onda electromagnética utilizada (Campbell, 1990), la temperatura (Or y Wraith, 1999), la salinidad (Campbell, 2002), la mineralogía (Olhoeft, 1989), el contenido en materia orgánica (Topp et al., 1980; Roth et al., 1992), o el tamaño y forma de las partículas y poros presentes en el suelo (Sen, 1981; Knight y Endres, 1990).

Desde hace dos décadas, la metodología indirecta para estimar el agua del suelo “Reflectometría en el Dominio del Tiempo” (TDR), ha sido la que más difusión ha alcanzado para medir la humedad del suelo hasta superar los métodos tradicionales (gravimetría, sonda de neutrones, tensión). Muchos investigadores han utilizado esta metodología para medir el volumen de agua del suelo a partir de la influencia de la humedad sobre las propiedades eléctricas del suelo. (Dalton, 1992; Cassel et al, 1994).

El desarrollo de mejores prácticas de manejo para hacer los cultivos más eficientes y reducir el impacto sobre las aguas superficiales y subterráneas, requiere gran conocimiento de los factores que afectan la dinámica del agua en el suelo. Por ello es necesario conocer con precisión, en tiempo real, cuales son las variaciones de las reservas

de agua en la zona radicular, midiendo continuamente desde el inicio del ciclo y determinar su comportamiento a lo largo del mismo. De ser posible, necesitamos realizar estas medidas en suelo sin alterar su estructura. Sin embargo, muchos de los métodos conocidos para medir las variaciones del agua en el suelo, presentan varias limitaciones que impiden cumplir todos los requerimientos. Se han utilizado algunas de las técnicas más comunes, tales como la gravimetría, tensiómetros, sonda de neutrones y TDR, las cuales por diversos motivos han sido sustituidas. También, es preciso conocer los aportes de agua de lluvia mediante el apoyo de una estación meteorológica, para poder realizar los balances de agua y finalmente determinar las pérdidas de agua por evapotranspiración y drenaje. (Fares et al. 2000).

La situación actual del agua en el mundo corresponde a un panorama de escasez, sobreexplotación y contaminación, de tal forma que ya se considera un factor limitante para un desarrollo sustentable. Lo anterior obliga a buscar formas de incrementar la eficiencia en el uso del agua, para así impactar en aquellos aspectos donde el efecto del rescate del recurso, tanto en cantidad como en calidad, sea el mayor posible. (Barth, 1995; Phene, 1999).

De los procesos de entrada la precipitación es fácil de cuantificar y según datos obtenidos por diversos autores y organismos, la acumulación de lluvia anual en el Estado de Chihuahua es del orden de los 200 – 800 mm., existiendo una variabilidad espacial, la cual esta relacionada con la latitud y altitud; también existe una variabilidad temporal ya que según se observa en los registros meteorológicos históricos, la cantidad de lluvia se redujo de manera significativa en el Estado en el periodo 1992 – 2005, mientras que a partir del 2006 se observó un importante e inusual incremento. El componente de los procesos de salida de mayor importancia relativa, es la evapotranspiración, que puede representar del 60 – 80 % de la lluvia anual, la cual se compone del agua que intercepta el follaje, una parte de la cual se evapora inmediatamente y otra es absorbida por los tejidos vegetales, y el agua que se almacena en la zona radicular, en la cual, una parte es transpirada y la otra es evaporada. (Jasso et al., 2001; Jasso y Royo, 2005; Jasso-Ibarra et al., 2007).

El aprovechamiento del agua en un gradiente hidrológico se divide en zonas de captación y zonas de consumo; en las primeras, el agua se aprovecha directamente debido a que la precipitación pluvial es significativa y/o existen presas de captación, como la actividad forestal maderable y sus derivados, mientras que en las segundas, se practica la irrigación en sistemas de producción tecnificados, como la actividad frutícola, que generan bienes para consumo directo y su industrialización. (Brooks et al., 1993).

La mayor parte el agua consumida por las plantas es evaporada a la atmósfera a partir de la superficie foliar en un proceso denominado transpiración y la evaporación es el agua perdida a través de la superficie del suelo. A la combinación simultanea de estos dos procesos se le conoce como evapotranspiración (ET), según Hargreaves y Samani, (1991). La ET es variable a lo largo del ciclo de cultivo a medida que la cobertura del área foliar o copa del árbol, proyecta mas o menos sombra sobre el suelo, a este proceso cambiante con el ciclo fonológico se le denomina factor de cobertura. (Ortiz, 2004).

La Evapotranspiración de referencia o potencial ( $ET_0$ ) se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, cuyo cultivo este en crecimiento activo y que no sufre escasez de agua. Es un parámetro relacionado con los factores climáticos que expresa el poder evaporante de la atmósfera. Su determinación se realiza

a partir de datos climáticos, empleando ecuaciones que deben ser calibradas localmente, tales como las de Penman-FAO, Penman-Montheith, Hargreaves, Blaney-Criddle, Priestly-Taylor, Radiación. (Avidan, A. 1994).

Cuando la ET se produce sin ninguna restricción de agua en el suelo se conoce como Evapotranspiración del Cultivo o Real ( $ET_c$ ). La  $ET_c$  corresponde con la cantidad de agua que debe ser aportada al suelo mediante lluvia y/o riego. (Doorembos y Pruitt, 1976). La  $ET_c$  se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes, en huertos con excelente manejo, adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas y requiere generalmente de correcciones, cuando no existe un manejo adecuado y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento óptimo de los árboles y que restringen la ET. (Avidan, A. 1994).

El Coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) es el coeficiente que relaciona  $ET_c$  con  $ET_o$  y representa la  $ET_c$  en condiciones óptimas de crecimiento vegetativo y rendimiento. (Doorembos y Pruitt, 1976). Los  $K_c$  varían con el desarrollo vegetativo de la planta, clima y sistema de riego; dichos valores se deben obtener para cada región y para cada sistema de riego. Según Doorembos y Pruitt, (1976), los  $K_c$  para el manzano se divide en tres etapas, el inicio ( $K_{c\text{ ini}}$ ), mediados ( $K_{c\text{ med}}$ ) y final ( $K_{c\text{ fin}}$ ) del ciclo fenológico. Existen otros factores que se deben de tomar en cuenta para definir la lamina de riego a aplicar, tales como: precipitación efectiva, eficiencia de aplicación, eficiencia de uniformidad, eficiencia de percolación y requerimiento de lavado. (Hargreaves y Samani, 1991; Rincón y Sáenz, 1996).

Las variaciones de humedad en el suelo definen ciertos conceptos conocidos como Punto de Saturación (PS), Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP) y Humedad Aprovechable (HA), conceptos que deben tenerse presente para lograr la máxima eficiencia en los riegos. (Ortiz, 2004).

El agua en el suelo está afectada por diversas fuerzas que tienen su origen en la presencia de sales disueltas en el agua, en un fenómeno de interfase entre los poros y las partículas coloidales del suelo, y otras como la gravedad, presión hidrostáticas y presión barométrica. La fuerza (potencial mátrico) con que el agua es retenida por el suelo depende de la cantidad de agua presente en el sustrato. Mientras más seco está el suelo, mayor es la tenacidad con que el agua es retenida y más es el esfuerzo que debe hacer la planta para absorberla. Por el contrario, si el suelo está muy húmedo, parte del agua no puede ser retenida y se infiltra en profundidad, según lo dicho por Avidan, (1994). Tales fuerzas hacen que el agua sea adsorbida (retenida en la superficie de las partículas por fuerzas eléctricas) temporalmente por el suelo, que sea transferida o distribuida de un punto a otro del perfil, que drene o percole, que fluya a la superficie y sea evaporada o que se desplace hacia las raíces de las plantas y sea transpirada hacia la atmósfera. En este contexto se establecen los niveles de contenido de agua en el suelo que se denominan el PS, CC y PMP. La diferencia entre estos dos últimos niveles definen lo que se conoce como HA. (Doorembos y Pruitt, 1976).

El PS es el nivel de saturación que se registra inmediatamente después de una lluvia fuerte o de un riego profundo y es cuando el agua ha llenado todos los poros, desplazando el aire del suelo. En dicho nivel, cualquier cantidad adicional de agua escurrirá, provocará encharcamiento o se eliminará por efecto de la gravedad hacia las capas más profundas del suelo. El PS se obtiene en el laboratorio y se considera como la máxima

cantidad de agua que el suelo puede adsorber. Esta directamente relacionado con la clase textural del suelo y se ve influenciado por el contenido y tipo de arcilla, además de la concentración de materia orgánica que este tenga. (Ortiz, 2004).

La CC representa la cantidad de agua que puede ser retenida en el suelo contra la fuerza de la gravedad, después de una precipitación fuerte o un riego pesado. Un suelo a su CC es la condición de humedad más adecuada para el desarrollo de las plantas. (Ortiz, 2004).

El PMP es el porcentaje de humedad de un suelo en el cual las plantas se marchitan y ya no se pueden recuperar, aun siendo sometidas a una atmósfera del 100 % de humedad, según lo dicho por Ortiz, (2004). A medida que el contenido de humedad en el suelo disminuye, para las plantas es cada vez más difícil absorberla, llegando a un nivel en que, si no reciben agua adicional, se ponen mustias y ya no pueden recuperarse. Dicho nivel se denomina PMP, el cual no debe esperarse para dar un nuevo riego. (Avidan, A. 1994).

La HA es la diferencia del contenido de agua retenida entre CC y PMP, la cual que es mayor en suelos arcillosos que en los arenosos. En la práctica, es oportuno regar cuando las plantas han extraído el 40 - 50 % de esta humedad. (Ortiz, 2004).

Según Clark, et al. (1995), es difícil generalizar acerca de la frecuencia del riego porque hay innumerables factores que deben considerarse; cultivo, profundidad y distribución radicular, características de retención de humedad del suelo, patrón de humedad del goteo y grado de automatización. Sin embargo, según Chávez y Berzoza, (2003), la aplicación de dos reglas básicas puede ser de gran ayuda: Agotar no más del 40% al 50% de la humedad del suelo disponible en la zona radicular activa y limitar las aplicaciones a 10 cm. o menos. Esto limita el grado de saturación de la zona radicular y minimiza la cantidad de agua que pueda drenar por debajo de la zona radicular activa. La frecuencia del riego varía con la etapa de crecimiento del árbol y de las variables específicas del lugar como clima y suelo, lo que concuerda con lo dicho por Hartz, (1995), Davis et al., (1985), Phene et al., (1985).

El productor frecuentemente se enfrenta a interrogantes para determinar las necesidades de riego, tales como: Cuando regar?, Cuanto tiempo regar?, Cual es el volumen de agua a aplicar?, Cual es el intervalo entre riegos?. Las respuestas correctas a estas preguntas permitirán hacer un uso racional y eficiente del agua de irrigación, evitando así riegos excesivos o deficientes, condiciones que repercuten negativamente sobre el suelo, los árboles, los mantos acuíferos y la productividad.

Para poder responder correctamente estas preguntas, debemos partir del cálculo de los parámetros ya descritos:  $ET_o$ ,  $ET_c$ ,  $K_c$ ,  $PS$ ,  $CC$ ,  $PMP$  y  $HA$ . Además necesitamos conocer algunas variables, tales como: Temperaturas mínimas y máximas diarias, Precipitación pluvial efectiva ( $P_{Pe}$ ), Densidad aparente del suelo ( $D_a$ ), Velocidad de infiltración ( $V_i$ ), Profundidad del suelo donde se localiza el 80 - 90 % de las raíces adventicias ( $P_s$ ) y se requiere realizar otros cálculos; Requerimientos Hídricos diarios ( $RH_{día}$ ), Requerimientos Hídricos mensuales ( $RH_{mes}$ ), Requerimientos Hídricos anuales o Uso Consuntivo ( $RH_{año}$ ), Déficit de Humedad o Humedad Abatida ( $DH$ ) y Porcentaje de Horas de sol mensuales ( $P_{hl}$ ).

## METODOLOGIA

Los estudios se realizaron en el *Rancho El Rosario*, propiedad del Grupo La Norteña, ubicado en el municipio de Guerrero en el Estado de Chihuahua, México, con una superficie de 570 hectáreas y se divide en 30 lotes, los cuales tienen diferentes marcos de plantación, densidades, variedades y portainjertos.

La instrumentalización de los huertos constó de una sonda de capacitancia FDR portátil para la monitorización de las reservas de agua en el suelo, a tres profundidades (0-30, 30-60 y 60-90 cm.). Los sensores de esta sonda envían sus mediciones a un aparato (capacitor-*datalogger*), donde fueron almacenados. El trabajo de campo con la sonda de capacitancia consistió en tomar semanalmente las lecturas a las tres profundidades citadas, en cada uno de los 680 tubos de acceso instalados. La sonda permite conocer el contenido volumétrico de agua en el suelo mediante medidas de capacitancia; es de forma cilíndrica y se inserta, a cada uno de las profundidades citadas, conectada a través de un cable coaxial al capacitor-*data-logger*, la cual recorre el interior del tubo de PVC previamente instalado en el suelo.

Los datos climáticos del 2005 al 2007 de: radiación solar, velocidad y horas de viento, temperaturas máximas y mínimas, humedades relativas máximas y mínimas, presión barométrica y precipitación pluvial, se obtuvieron de una estación meteorológica instalada en el Rancho El Rosario.

La Sonda de Capacitancia FDR es un sistema de alta tecnología para monitorear la humedad de los suelos. La capacitancia de un capacitor depende de su geometría y del material dieléctrico que separa los conductores. En nuestro caso, el dieléctrico es el suelo, el aire, el agua, la materia orgánica del suelo. Las variaciones de capacitancia se deben a los cambios en el dieléctrico del medio circundante, es decir, la frecuencia de oscilación es proporcional a la relación aire/agua en el suelo. La ecuación de calibración almacenada en el capacitor-*datalogger* permite la conversión de las medidas de capacitancia en mediadas de contenido volumétrico de agua en el suelo. Cada sensor recoge información que cubre un estrato de 10 cm. de suelo, con un radio exterior al tubo de 5-10 cm.



**Figura 1.** Capacitor-*datalogger*, Sonda de Capacitancia FDR y el Sensor utilizado para la Medición y Monitoreo de la Humedad del Suelo.

La técnica FDR utiliza la correlación existente entre una onda de electromagnética (radiofrecuencia) dispersada en el suelo, la constante dieléctrica de éste y el contenido volumétrico de humedad del mismo. Esta técnica está basada en la medida de la constante dieléctrica del medio suelo aire y agua, cuya determinación se realiza a través de su capacitancia, debido a que la constante dieléctrica del agua es  $\theta = 75$ , comparada

con la del suelo que es  $\theta = 5$  y con la del aire que es  $\theta = 1$ . El procedimiento establece que los dipolos permanentes del agua en el medio dieléctrico del suelo están alineados por un campo eléctrico polarizado. La medida de capacitancia nos da la constante dieléctrica y a partir de esta, el contenido de agua del suelo. La señal de radiofrecuencia se convierte en porcentaje de humedad volumétrica (Hv) mediante la ecuación de calibración propuesta por Paltineanu y Starr (1997) la cual es facilitada por el *software de calibración* de la sonda.

La distribución y cantidad de los tubos de acceso fue cuidadosamente planificada en base a las siguientes variables de cada lote: área, dimensiones (ancho y largo), marco y densidad de plantación, pendiente, variedades y portainjertos, clase textural de suelos, sistema de irrigación, distancia entre emisores y número de bloques de riego. Se instalaron un total de 680 tubos de acceso de PVC (cedula 40 y 280 PSI), de 1.20 metros de longitud, los cuales van enterrados 1.00 metro, lo que nos permitió tomar lecturas a los 20, 45 y 75 cm. de profundidad. Al mismo tiempo que se fue alcanzando las profundidades antes citadas durante la instalación de los tubos de acceso, se tomaron muestras de suelo de cada profundidad y de cada tubo, siendo en total 2,040 muestras para determinar la clase textural y el porcentaje de humedad del suelo con respecto a su capacidad de campo. Estos datos fueron documentados en la bitácora de campo.

Las lecturas, se tomaron semanalmente para una adecuada toma de datos del proyecto tecnológico Manejo Eficiente del Agua de Irrigación y Mejoramiento del Suelo.

La determinación de la clase textural del suelo a las tres profundidades en campo se realizó por el método de tacto y apariencia, realizándose comprobación a través de análisis de suelos en laboratorio. La humedad se determinó en campo a través del uso de papel sensible a la humedad por colorimetría.

Se efectuó una validación de los datos arrojados por los sensores en las diferentes profundidades y clases de textura del suelo, efectuándose una comparación con los datos obtenidos de un análisis de laboratorio mediante el método volumétrico.

Se realizaron cálculos sobre el Coeficiente de Cultivo ( $K_c$ ), la Evapotranspiración del Cultivo ( $ET_c$ ), la Evapotranspiración de Referencia ( $ET_o$ ) y el Factor de Cobertura ( $F_c$ ) de cada lote. Así mismo, se calcularon los siguientes parámetros: Punto de saturación (PS), Capacidad de campo (CC), Punto de marchitez permanente (PMP), Humedad aprovechable (HA), Déficit de humedad o humedad abatida (DH), Momento de riego (MR), Densidad aparente ( $D_a$ ), Velocidad de Infiltración ( $V_i$ ), Lámina de riego al 50% de abatimiento (LR), Requerimientos hídricos mensuales ( $RH_{mes}$ ), Requerimientos hídricos diarios ( $RH_{día}$ ), Porcentaje de horas luz ( $P_{hl}$ ), Precipitación pluvial al 80% de probabilidad (PP), Número de riegos (NR), Frecuencia de riegos (FR) y el Tiempo de riego por sección (TR).

**Evapotranspiración de Referencia ( $ET_o$ ).** El método de estimación que se utilizó es el de Penman modificado por la FAO (Doorembos y Pruitt, 1976), en el que la  $ET_o$  viene dada por la ecuación siguiente:

$$ET_o = C \times [ (W \times R_n) + (1 - W) \times [F_v \times (P_{vs} - P_{va})] ] \quad (1)$$

Donde:  $ET_o$  = Evapotranspiración de referencia o potencial (mm/día).  $C$  = Factor de ajuste de Penman (basado en la humedad relativa máxima, la radiación solar y la relación entre la velocidad del viento durante las horas del día (7:00 a 19:00 hrs.) y las horas de la noche.  $W$  = Factor de ponderación de Penman.  $R_n$  = Radiación solar neta (por medición

directa de estación meteorológica).  $F_v$  = Función del viento (por medición directa de estación meteorológica) (Km./día).  $P_{vs}$  = Presión del vapor de agua a saturación (por medición directa de estación meteorológica) (mbar).  $P_{va}$  = Presión del vapor de agua ambiente (por medición directa de estación meteorológica) (mbar).

**Evapotranspiración del Cultivo o Real ( $ET_c$ ).** Para determinarla se utilizó el método Penman-FAO (*Doorembos y Pruitt, 1976*), en el que la  $ET_c$  se calculó mediante la ecuación siguiente:

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (2)$$

Donde:  $ET_c$  = Evapotranspiración del cultivo (mm/día).  $ET_o$  = Evapotranspiración potencial o de referencia (mm/día).  $K_c$  = Coeficiente de cultivo.

**Factor de Cobertura ( $F_c$ ).** En cultivos arbóreos la  $ET$  es a su vez función del porcentaje de la superficie de suelo sombreada por el árbol. Para su determinación se aplicó un coeficiente denominado  $F_c$  cuyo valor depende del porcentaje de superficie sombreada. Para la determinación del  $F_c$  en frutales, se procedió a introducir el diámetro medio de la copa de los árboles de la plantación. (*Zazueta, 1992*).

$$F_c = 0.1 (P_c \div 0.8)^{0.5} \quad (\text{Para } P_c \text{ menor al } 80\%) \quad (3)$$

$$F_c = 1 \quad (\text{Para } P_c \text{ mayor al } 80\%)$$

Donde:  $P_c$  = Porcentaje de cobertura. Superficie del suelo sombreada por la copa del árbol.

**Coeficientes de Cultivo ( $K_c$ ).** Para determinarla se utilizó el método *FAO*, en el que la  $K_c$  se calculó mediante la ecuación siguiente: (*Doorembos y Pruitt, 1976*).

$$K_c = ET_c \div ET_o \quad (4)$$

Donde:  $K_c$  = Coeficiente de cultivo.  $ET_c$  = Evapotranspiración del cultivo (mm/día).  $ET_o$  = Evapotranspiración potencial o de referencia (mm/día).

**Punto de Saturación (PS).** Se obtuvo en el laboratorio a través de los análisis de suelo, para lo cual se utilizaron los servicios del laboratorio de análisis de suelos.

**Capacidad de Campo (CC).** Para calcularla se consideró la ecuación propuesta por *Palacios y Jaspeado (1980)*, citada por *Ortiz (2000)*.

$$CC = (PS \div 1.84) - 0.48 \quad (5)$$

Donde: CC = Capacidad de Campo (%). PS = Punto de Saturación (%).

**Punto de Marchitez Permanente (PMP).** Se calculó mediante la ecuación propuesta por *Uvalle (1984)* y mencionada por *Ortiz (2000)*.

$$PMP = CC \times 0.595 \quad (6)$$

Donde: PMP = Punto de Marchitez Permanente (%). CC = Capacidad de Campo (%).

**Humedad Aprovechable (HA).** Su cálculo se efectuó mediante la siguiente ecuación. (*Ortiz, 2000*).

$$HA = CC - PMP \quad (7)$$



Donde: HA = Humedad Aprovechable (%). CC = Capacidad de Campo (%). PMP = Punto de Marchitez Permanente (%).

**Déficit de Humedad (DH).** Su calculo se realizó a partir de la siguiente ecuación. (Ortiz, 2000).

$$DH = (CC - PMP) \div P_{pah} \quad (8)$$

Donde: DH = Déficit de Humedad (%). CC = Capacidad de Campo (%). PMP = Punto de Marchitez Permanente (%).  $P_{pah}$  = Porcentaje Permitido de Abatimiento de Humedad (%).

**Lámina de Riego (LR).** Es el volumen de agua que debemos aplicar para reponer el 40 – 50 % de la Humedad Abatida o Déficit de Humedad, y se calculó usando la siguiente ecuación. (Ortiz, 2000).

$$LR = [(CC - DH) \times D_a] \times P_f \quad (9)$$

Donde: LR = Lámina de Riego (mm). CC = Capacidad de Campo (%). DH = Déficit de Humedad o Humedad Abatida (%).  $D_a$  = Densidad Aparente del Suelo (gr/cm<sup>3</sup>).  $P_f$  = Profundidad del Suelo (m). Se refiere a la zona donde se localiza el 80-90 % de las raíces adsorbentes.

**Momento de Riego (MR).** Es el momento en que para la optimización del agua de irrigación para manzano se hace cuando se permiten abatimientos del 40 – 50 % de la Humedad Aprovechable ( $P_{pah}$ ). Es cuando debemos regar para reponer la Humedad Abatida o Déficit de Humedad, y su cálculo se realizó usando la siguiente ecuación. (Ortiz, 2000).

$$MR = CC - DH \quad (10)$$

Donde: MR = Momento de Riego (%). CC = Capacidad de Campo (%). DH = Déficit de Humedad o Humedad Abatida (%).

**Densidad Aparente ( $D_a$ ).** Se calculó con la siguiente ecuación. (Doorembos y Pruit, 1976).

$$D_a = P_s \div V_t \quad (11)$$

Donde:  $D_a$  = Densidad Aparente del Suelo (gr/cm<sup>3</sup>).  $P_s$  = Peso seco de la muestra de suelo (gr).  $V_t$  = Volumen total de la muestra de suelo [40 x 40 x 40] (cm<sup>3</sup>).

**Humedad Gravimétrica ( $H_g$ ).** Su calculo fue realizado utilizando la siguiente ecuación. (Doorembos y Pruit, 1976).

$$H_g = [(P_h - P_s) \div P_s] \times 100 \quad (12)$$

Donde:  $H_g$  = Humedad gravimétrica del Suelo (%).  $P_s$  = Peso seco de la muestra de suelo (gr).  $P_h$  = Peso húmedo de la muestra de suelo (gr).

**Humedad Volumétrica ( $H_v$ ).** La humedad volumétrica es el porcentaje de agua que contienen el suelo, con respecto al volumen total de la muestra y se calculó con la siguiente ecuación. (Doorembos y Pruit, 1976).

$$H_v = H_g \times D_a \quad (13)$$

Donde:  $H_v$  = Humedad volumétrica del Suelo (%).  $H_g$  = Humedad gravimétrica del suelo (%).  $D_a$  = Densidad aparente del suelo (gr/cm<sup>3</sup>).

**Velocidad de Infiltración ( $V_i$ ).** Para determinarla se empleó el método del anillo infiltrómetro, utilizando la siguiente ecuación. (Doorembos y Pruit, 1976).

$$V_i = V \div t \quad (14)$$

Donde:  $V_i$  = Velocidad de Infiltración (mm/h).  $V$  = Volumen de agua infiltrado (mm).  $t$  = Tiempo que tarda en infiltrarse el agua (h).

**Requerimientos Hídricos Mensuales ( $RH_{mes}$ ).** Es el volumen optimo mensual de agua que necesita el árbol para su mantenimiento, el cual debemos aplicar y se calculó usando la ecuación propuesta por Blaney y Criddle. (Doorembos y Pruit, 1976).

$$RH_{mes} = \{ [(T_{med} + 17.8) \div 21.8] \times P_{hl} \} \times K_c \quad (15)$$

Donde:  $RH_{mes}$  = Requerimientos Hídricos Mensuales (mm).  $T_{med}$  = Temperatura Media Mensual ( $^{\circ}C$ ).  $P_{hl}$  = Porcentaje de Horas Luz (%).  $K_c$  = Coeficiente de Cultivo.

**Requerimientos Hídricos Diarios ( $RH_{día}$ ).** Es el volumen optimo diario de agua que necesita el árbol para su mantenimiento, el cual debemos aplicar y se calculó usando la ecuación propuesta por Blaney y Criddle. (Doorembos y Pruit, 1976).

$$RH_{día} = (\{ [(T_{med} + 17.8) \div 21.8] \times P_{hl} \} \times K_c) \div N_{dm} \quad (16)$$

Donde:  $RH_{día}$  = Requerimientos Hídricos Diarios (mm).  $T_{med}$  = Temperatura Media Mensual ( $^{\circ}C$ ).  $P_{hl}$  = Porcentaje de Horas Luz (%).  $K_c$  = Coeficiente de Cultivo.  $N_{dm}$  = Número de días del mes.

**Número de Riegos (NR).** Es el número de riegos que necesita un tipo de suelo y de cultivo mensualmente para cubrir sus requerimientos hídricos, y su cálculo fue usando la siguiente ecuación. (Ortiz, 2000).

$$NR = (RH_{mes} - PP) \div LR \quad (17)$$

Donde: NR = Número de Riegos.  $RH_{mes}$  = Requerimientos Hídricos Mensuales (mm). PP = Precipitación Pluvial Mensual (mm). LR = Lámina de Riego (mm).

**Frecuencia de Riegos (FR).** Es el tiempo en días que se estima para reponer el volumen de agua que necesita el cultivo, y se calculó usando la siguiente ecuación. (Ortiz, 2000).

$$FR = N_{dm} \div NR \quad (18)$$

Donde: FR = Frecuencia de Riegos (días).  $N_{dm}$  = Número de días del mes. NR = Número de Riegos.

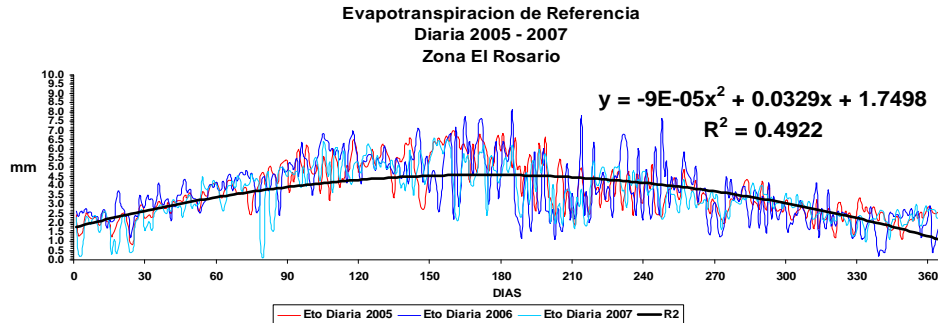
**Tiempo de Riego por Sección (TR).** Es el tiempo que debe durar nuestro riego de acuerdo a las necesidades del cultivo y a el gasto de agua de los emisores y a la eficiencia del sistema de irrigación. (Ortiz, 2000).

$$TR = (\{ [(RH_{mes} - PP) \div E] \times A \} \div G) \div NR \quad (19)$$

Donde: TR = Tiempo de Riego (h).  $RH_{mes}$  = Requerimientos Hídricos Mensuales (mm). PP = Precipitación Pluvial (mm). E = Eficiencia del Sistema de Riego (%). A = Area de la Sección de Riego (has). G = Gasto del Sistema de Irrigación (LPM). NR = Número de Riegos.

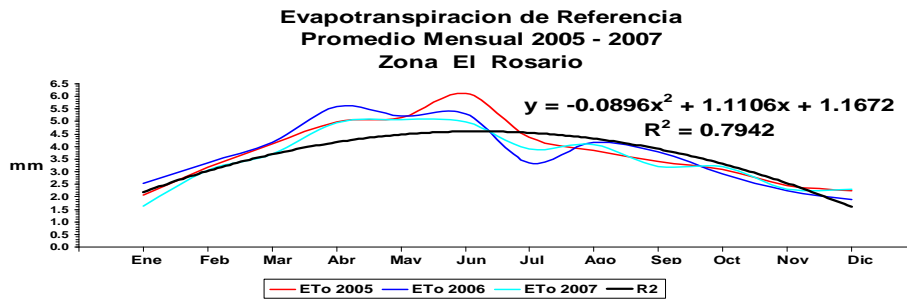
## RESULTADOS Y DISCUSION

**Evapotranspiración de Referencia (ET<sub>o</sub>).** En la figura 2 se muestran los valores diarios de ET<sub>o</sub> obtenidos en la zona El Rosario del 2005 al 2007, encontrándose escasa relación entre los valores diarios ( $R^2 = 0.4922$ ) y cuya ecuación de ajuste polinómica es:  $y = -9E-05x^2 + 0.0329x + 1.7498$ . Esto nos indica que la variabilidad de los valores diarios de ET<sub>o</sub> son influenciados por la variabilidad climática de radiación solar, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, temperaturas máximas y mínimas, estado de las coberteras, porcentaje de cobertura y precipitación pluvial.

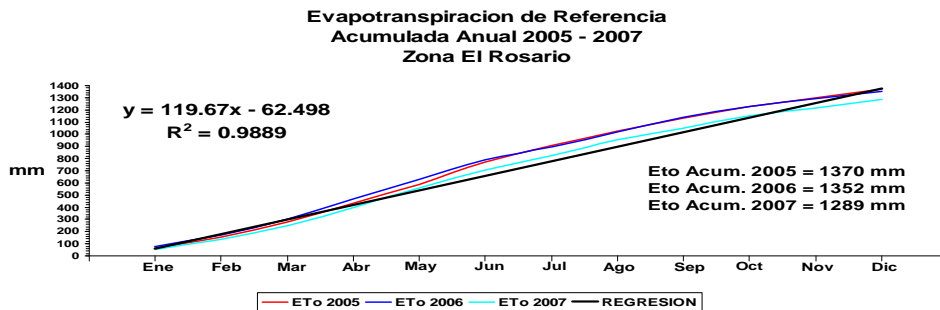


**Figura 2.** ET<sub>o</sub> diaria del 2005 al 2007.

Sin embargo, los coeficientes de correlación son mayores cuando los valores de ET<sub>o</sub> son analizados en promedios mensuales ( $R^2 = 0.7942$ ) y la ecuación de ajuste polinómica es:  $y = -0.0896x^2 + 1.1106x + 1.1672$ , como se muestra en la figura 3. En la figura 4, se observa una excelente correlación entre la ET<sub>o</sub> según los valores de acumulación anual ( $R^2 = 0.9889$ ), cuya ecuación de ajuste polinómica es:  $y = 119.67x - 62.498$ .

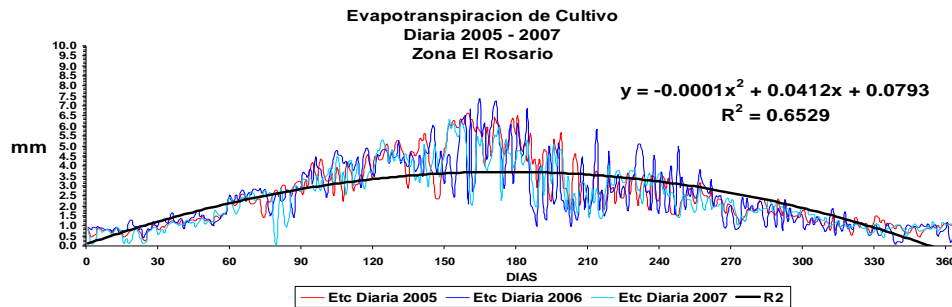


**Figura 3.** ET<sub>o</sub> promedio mensual del 2005 al 2007.



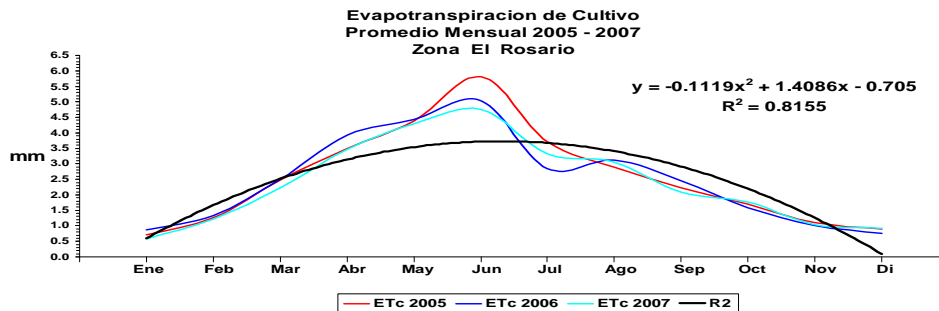
**Figura 4.** ET<sub>o</sub> acumulada anual del 2005 al 2007.

**Evapotranspiración del Cultivo o Real (ET<sub>c</sub>).** En la figura 5 se observa la ET<sub>c</sub> diaria en la zona El Rosario del 2005 al 2007, encontrándose moderada correlación entre los valores diarios ( $R^2 = 0.6529$ ) y cuya ecuación de ajuste polinómica es:  $y = -0.0001x^2 + 0.0412x + 0.0793$ . Esto nos indica que la variabilidad de los valores diarios de ET<sub>c</sub> son un poco menos influenciados por la variabilidad climática de radiación solar, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, temperaturas máximas y mínimas, estado de las coberteras, porcentaje de cobertura y precipitación pluvial.

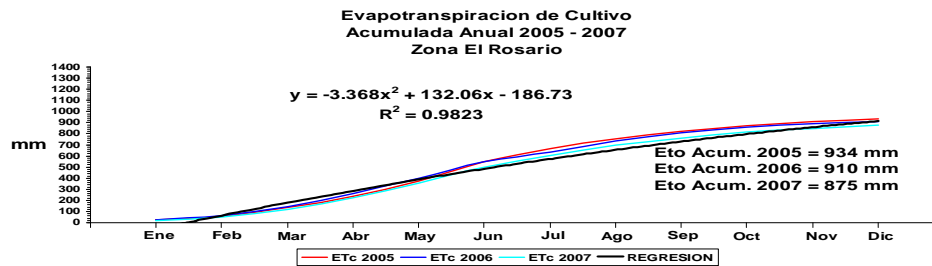


**Figura 5.** ET<sub>c</sub> diarias del 2005 al 2007.

Sin embargo, los coeficientes de correlación son mayores cuando los valores de ET<sub>o</sub> son analizados en promedios mensuales ( $R^2 = 0.8155$ ) y la ecuación de ajuste polinómica es:  $y = -0.1119x^2 + 1.4086x + 0.705$ , como se muestra en la figura 6. En la figura 7, se observa una excelente correlación entre la ET<sub>o</sub> según los valores de acumulación anual ( $R^2 = 0.9823$ ), cuya ecuación de ajuste polinómica es:  $y = -3.368x^2 + 132.06x - 186.73$ .

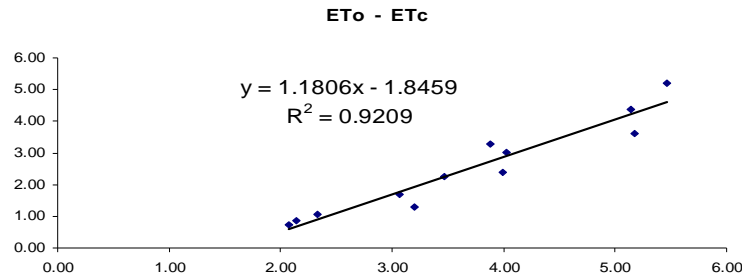


**Figura 6.** ET<sub>c</sub> promedio mensual del 2005 al 2007.



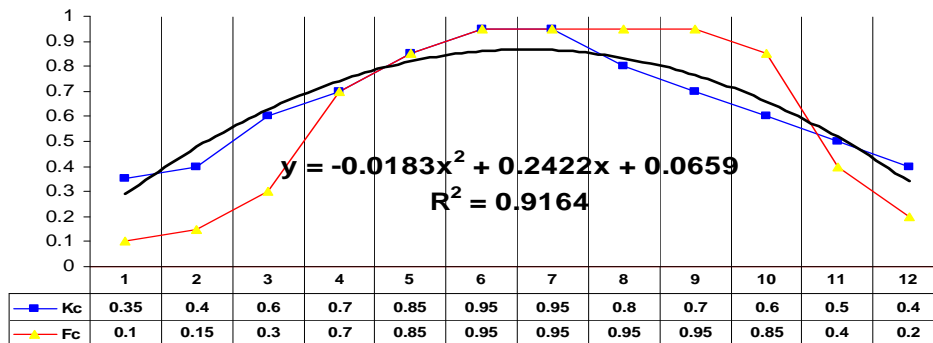
**Figura 7.** ET<sub>c</sub> acumulada anual del 2005 al 2007.

En la figura 8 se puede observar la  $ET_o$  y  $ET_c$  en la zona El Rosario, promedios mensuales durante los años 2005 – 2007, donde se aprecia que la  $ET_o$  supera a la real  $ET_c$ , observándose la ecuación lineal de ajuste  $y = 1.1806x - 1.8459$  y el coeficiente de regresión ( $R^2 = 0.9209$ ), lo que nos sugiere que existe una correlación alta entre ambas, debido a que en los meses de mayor evapotranspiración la dispersión de los puntos es menor que en los meses de menor demanda.



**Figura 8.** Valores mensuales promedio de  $ET_o$  y  $ET_c$  durante los años 2005 – 2007.

**Factor de Cobertura ( $F_c$ ).** En la figura 9 se pueden observar los valores del  $F_c$  obtenidos para los meses de Enero a Diciembre. Así mismo, se observan los valores de  $K_c$  para el mismo período. Existe una fuerte correlación entre ambas variables, donde la ecuación polinómica de ajuste es  $y = -0.0183x^2 + 0.2422x + 0.0659$  y el coeficiente de regresión ( $R^2 = 0.9164$ ) lo que nos indica que la superficie sombreada esta estrechamente relacionada con las necesidades hídricas según el ciclo fenológico.

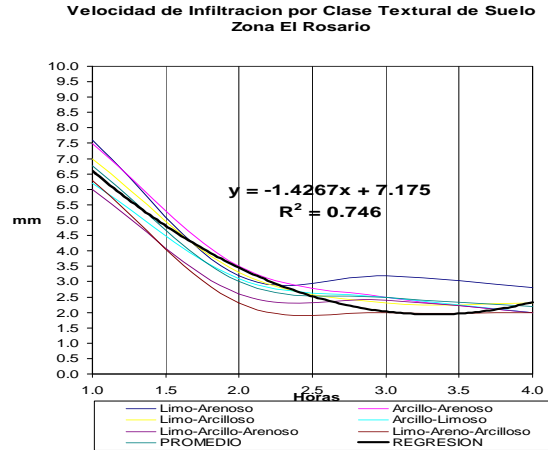


**Figura 9.** Valores mensuales promedio de  $F_c$  y  $K_c$  durante los años 2005 – 2007.

**Coefficientes de Cultivo ( $K_c$ ).** Para el caso de las regiones manzaneras de Cuauhtémoc y Guerrero, Chihuahua, al estimar el  $K_c$  para manzano, se obtuvieron los siguientes valores:  $0.35, 0.4, 0.6, 0.7, 0.85, 0.95, 0.95, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5$  y  $0.4$  para los meses de Enero a Diciembre, respectivamente como se puede apreciar en la figura 9.

**Punto de Saturación (PS), Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP), Humedad Aprovechable (HA), Déficit de Humedad (DH), Lámina de Riego (LR), Momento de Riego (MR), Densidad Aparente ( $D_a$ ), Humedad Gravimétrica ( $H_g$ ) y Humedad Volumétrica ( $H_v$ ).** En el cuadro 3 se expresan los valores de la capacidad de almacenamiento de agua, donde se observa la variabilidad de estos parámetros hídricos de los lotes comprendidos en la zona El Rosario. Dicha variabilidad es debida a las diferentes clases texturales del suelo.

**Velocidad de Infiltración ( $V_i$ ).** En la figura 10 se aprecia la  $V_i$  para las diferentes texturas encontradas en la zona El Rosario, observándose la ecuación de ajuste lineal  $y = -1.4267x + 7.175$  y el coeficiente de regresión ( $R^2 = 0.746$ ), lo que nos indica que la  $V_i$  se ve afectada por el contenido de arcilla.



**Figura 10.** Velocidad de Infiltración para las diferentes texturas en la zona El Rosario.

**Requerimientos Hídricos Mensuales ( $RH_{mes}$ ), Requerimientos Hídricos Diarios ( $RH_{día}$ ), Número de Riegos (NR), Frecuencia de Riegos (FR) y Tiempo de Riego por Sección (TR).** En el cuadro 1 se muestran los valores obtenidos de la Programación del Riego para la zona El Rosario, donde se aprecia el Uso Consuntivo del manzano y el número de riegos requeridos para cubrir esos requerimientos. En el cuadro 2 se puede observar el NR, LR, PPe, y LT (lámina total), aplicadas durante el 2005 – 2008, en los lotes de la zona El Rosario.

**Cuadro 1.** Programación del Riego para la zona El Rosario

Mes	$RH/Mes$ (mm)	$RH/Día$ (mm)	NR	FR (Días)	TR (h)
Enero	18.56	0.58	0.8	39.7	5.78
Febrero	30.52	1.04	1.3	21.5	5.78
Marzo	60.11	1.94	2.6	11.9	5.78
Abril	106.37	3.55	4.6	6.5	5.78
Mayo	168.08	5.42	7.3	4.3	5.78
Junio	208.31	6.79	8.8	3.4	5.78
Julio	181.94	3.47	4.7	6.7	5.78
Agosto	147.94	2.37	3.2	9.7	5.78
Septiembre	104.48	1.76	2.3	13.0	5.78
Octubre	69.24	2.17	2.9	10.7	5.78
Noviembre	41.28	1.29	1.7	17.6	5.78
Diciembre	19.27	0.60	0.8	38.4	5.78
TOTAL	1156.11		41		6

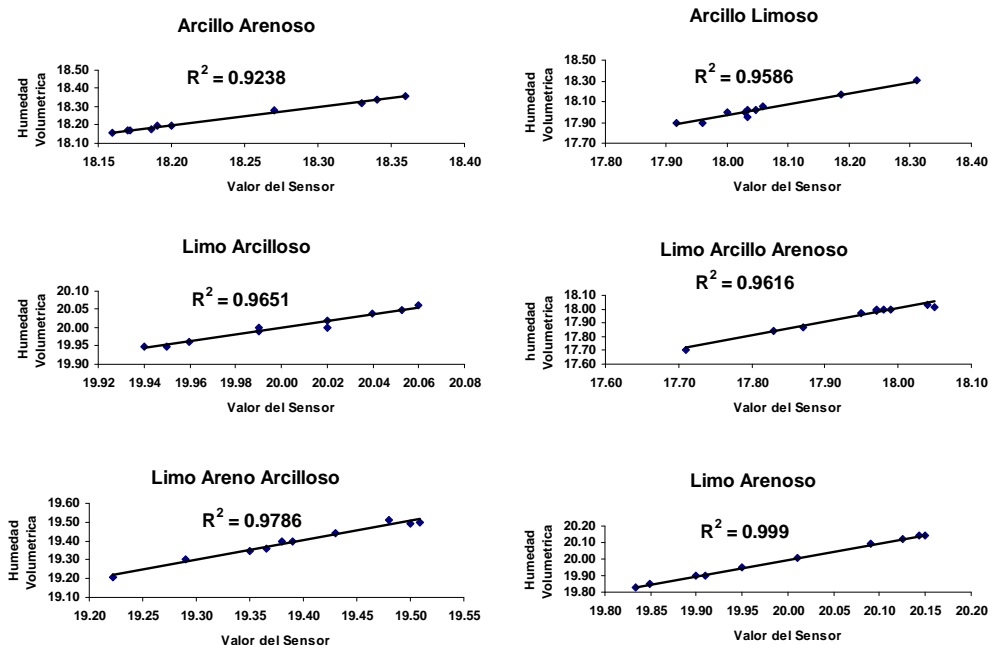
**Cuadro 2.** NR, LR, PPe y LT durante el 2005–2008 en la zona El Rosario.

Número Riegos (NR)				Lámina Riego (LR)				Precipitación Efectiva (PPe)				Lámina Total (LT)			
2005	2006	2007	2008	2005	2006	2007	2008	2005	2006	2007	2008	2005	2006	2007	2008
68	65	62	41	1720	1645	1570	948	311	594	491	212	2031	2239	2061	1160

**Cuadro 3.** Capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la zona El Rosario

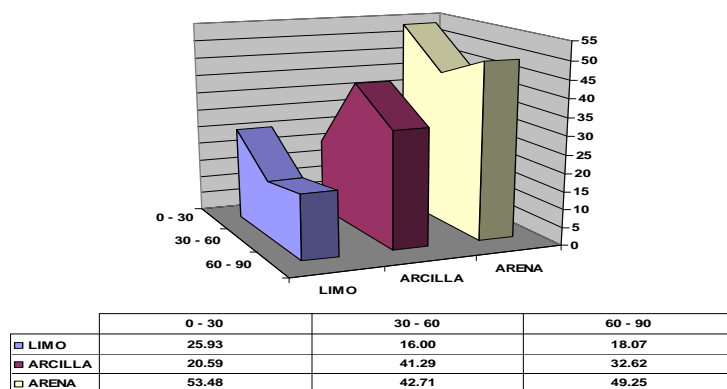
LOTE	(PS) (%)	(CC) (%)	(PMP) (%)	(HA) (%)	(DH) (%)	(Da) (gr/cm <sup>3</sup> )	(Hg) (%)	(Hv) (%)	(MR) (%)	(LR) (mm)	CLASE TEXTURAL
Pozo 3	42.00	22.35	13.30	9.05	4.52	1.31	13.87	18.17	17.83	21.02	Arcillo-arenoso
Pozo 2 A	43.50	23.16	13.78	9.38	4.69	1.30	13.99	18.19	18.47	21.61	Arcillo-arenoso
Pozo 2 B	37.50	19.90	11.84	8.06	4.03	1.33	13.40	17.82	15.87	19.00	Limo-arcillo-arenoso
Pozo 4	43.50	23.16	13.78	9.38	4.69	1.27	15.30	19.44	18.47	21.11	Limo-arcilloso
Pozo 9	30.66	16.18	9.63	6.55	3.28	1.39	14.70	20.44	12.90	16.14	Limo-arenoso
Pozo 6	39.33	20.90	12.43	8.46	4.23	1.37	14.58	19.98	16.67	20.55	Limo-arenoso
Frentes 9	38.50	20.44	12.16	8.28	4.14	1.31	13.52	17.71	16.30	19.22	Limo-arcillo-arenoso
Pozo 13	44.66	23.79	14.16	9.64	4.82	1.26	14.11	17.78	18.97	21.51	Arcillo-limoso
Pozo 8	46.66	24.88	14.80	10.08	5.04	1.30	15.18	19.74	19.84	23.21	Limo-arcilloso
Pozo 5	58.50	31.31	18.63	12.68	6.34	1.29	14.11	18.20	24.97	28.99	Arcillo-limoso
Frentes 5, 8 y 13	51.58	27.55	16.39	11.16	5.58	1.28	13.87	17.76	21.97	25.31	Arcillo-limoso
Pozo 12	61.33	32.85	19.55	13.30	6.65	1.29	13.99	18.05	26.20	30.42	Arcillo-limoso
Pozo 7	46.66	24.88	14.80	10.08	5.04	1.28	14.11	18.06	19.84	22.85	Arcillo-limoso
Pozo 10	62.50	33.49	19.92	13.56	6.78	1.30	14.94	19.43	26.71	31.25	Arcillo-limoso
Pozo 11	39.16	20.80	12.38	8.43	4.21	1.31	13.99	18.33	16.59	19.56	Arcillo-limoso
Pozo 1	40.50	21.53	12.81	8.72	4.36	1.29	14.23	18.35	17.17	19.94	Arcillo-limoso
La Estación	39.40	20.93	12.46	8.48	4.24	1.40	14.82	20.75	16.69	21.03	Limo-arenoso
Mayo Verde	31.66	16.73	9.95	6.77	3.38	1.33	14.46	19.24	13.35	15.98	Limo-areno-arcilloso
M.V. Frentes	34.75	18.41	10.95	7.45	3.72	1.34	14.35	19.22	14.69	17.71	Limo-areno-arcilloso
M.V. Laterales	51.16	27.32	16.26	11.07	5.53	1.31	13.29	17.40	21.79	25.70	Limo-arcillo-arenoso
M.V. Presa	40.50	21.53	12.81	8.72	4.36	1.30	13.64	17.73	17.17	20.09	Limo-arcillo-arenoso
M.V. Compuerta	44.66	23.79	14.16	9.64	4.82	1.32	13.52	17.85	18.97	22.54	Limo-arcillo-arenoso
M.V. Cuchilla	39.16	20.80	12.38	8.43	4.21	1.33	15.42	20.52	16.59	19.86	Limo-arcilloso
M.V. CH-P	43.64	23.24	13.83	9.41	4.70	1.32	13.87	18.31	18.54	22.02	Arcillo-limoso
M.V. Vivero	34.75	18.41	10.95	7.45	3.72	1.36	14.35	19.51	14.69	17.98	Limo-areno-arcilloso
M.V. Corrales	39.16	20.80	12.38	8.43	4.21	1.31	15.55	20.37	16.59	19.56	Limo-arcilloso
Páramo Alto	30.83	16.28	9.68	6.59	3.30	1.38	14.58	20.13	12.98	16.12	Limo-arenoso
Páramo Bajo	53.33	28.50	16.96	11.54	5.77	1.37	14.70	20.14	22.73	28.03	Limo-arenoso
El Crucifijo	53.50	28.60	17.01	11.58	5.79	1.33	14.11	18.76	22.81	27.30	Arcillo-limoso
El Escapulario	49.20	26.26	15.62	10.63	5.32	1.32	13.87	18.31	20.94	24.88	Arcillo-limoso
PROMEDIO	43.74	23.29	13.86	9.43	4.72	1.32	14.28	18.86		22.18	

El sensor utilizado por la sonda de capacitancia FDR muestra una buena respuesta a la humedad de suelo medida en forma volumétrica, con una excelente precisión. En las figuras 11-16 se puede observar la respuesta de los sensores dieléctricos de la sonda de capacitancia FDR, a la variación de la humedad volumétrica del suelo, se puede apreciar el coeficientes de regresión ( $R^2$ ). Los coeficientes de correlación fueron levemente menores en aquellos suelos con mayor porcentaje de arcillas. Esta dificultad de ajuste lineal concuerda con lo observado por *Ponizovsky et al. (1999)*, donde sostienen que hay un aumento del agua confinada en aquellos suelos con mayor cantidad de arcilla.



**Figuras 11-16.** Respuesta del sensor dieléctrico de la sonda FDR a la humedad volumétrica del suelo en las diferentes clases texturales encontradas.

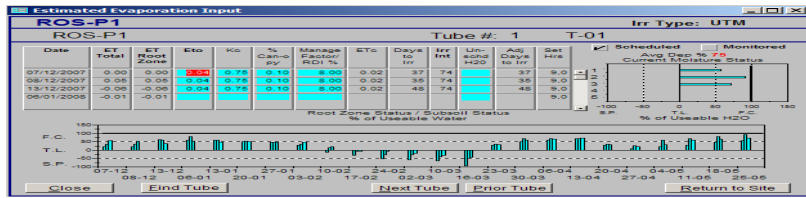
Otro factor que tiene injerencia en la eficiencia del riego es el efecto de la variación del suelo sobre la capacidad de retención de humedad. En la zona de estudio, se encontró que diferentes partes del suelo retienen diferentes cantidades de agua en la zona radicular, como se puede observar en la figura 17, donde el análisis granulométrico promedio encontrados en la zona El Rosario, nos indica que existe un contenido alto de arcilla en el horizonte sub-superficial de 30-60 cm., lo que ocasiona una baja velocidad de infiltración influyendo directamente sobre la capacidad de retención de humedad.



**Figura 17.** Análisis granulométrico promedio en la zona El Rosario.

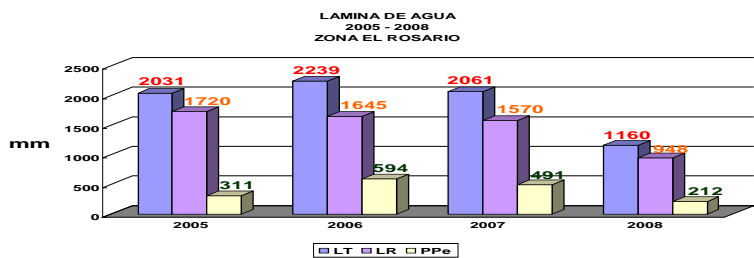
La representación gráfica de la dinámica de la humedad en los tres perfiles del suelo que se genera a partir de las lecturas con la sonda de capacitancia FDR en cada tubo de acceso (figura 18), permite conocer la humedad volumétrica en la zona radicular en cada momento.





**Figura 18.** Dinámica de la humedad en los tres perfiles del suelo.

En la figura 19 se observan las láminas totales (LT) de agua aplicadas durante los años 2005 al 2007 y en la que se puede apreciar el cálculo del uso consuntivo de agua para el manzano en la zona El Rosario. (1160 mm), la LR a aplicar en 41 riegos (948 mm) y la precipitación pluvial efectiva (212 mm) en el 2008. El volumen de agua de extracción que se regó fue de 9,480 m<sup>3</sup>/ha. , multiplicado por 570 ha. que comprenden los treinta huertos de la zona El Rosario donde se aplicó esta programación, nos dio un total de 5.4 Mm<sup>3</sup>, contra lo regado en los años: 2005 (9.8 Mm<sup>3</sup>), 2006 (9.4 Mm<sup>3</sup>) y 2007 (9.0 Mm<sup>3</sup>), lo que representa un respectivo ahorro en el volumen de agua de: 4.4, 4.0 y 3.5 Mm<sup>3</sup>. Al manejar eficientemente el agua de irrigación se obtuvieron ahorros significativos de agua de extracción. Los porcentajes de ahorro para la lámina total son 42.88 %, 48.19 % y 43.68 % para el 2008, comparado con los años 2005, 2006 y 2007.



**Figura 19.** Láminas de agua aplicadas durante los años 2005 – 2008.

En el cuadro 4 se observan las LR aplicadas durante los años 2005 – 2008 y lo que se regó en: m<sup>3</sup>/ha., Mm<sup>3</sup>/570 ha. y el excedente de Mm<sup>3</sup> en 570 ha., lo que representa un ahorro promedio de 4 Mm<sup>3</sup> anuales (44.9 %).

**Cuadro 4.** Láminas de Riego y volúmenes aplicados durante los años 2005 – 2007

	mm	m <sup>3</sup> /ha	Mm <sup>3</sup> /570 ha	Volumen Excedente (Mm <sup>3</sup> )
LR 2005	1,720	17,200	9.8	4.4
LR 2006	1,645	16,450	9.4	4.0
LR 2007	1,570	15,700	9.0	3.5
LR 2008	948	9,480	5.4	-----

El uso de microaspersores Antelco Verdes, trabajando a una presión de 20 PSI, nos dan un gasto de 65 lph. En la zona El Rosario, en el área bajo estudio, se utilizaron 340,000 microaspersores para cubrir las 570 hectáreas, lo que represento un gasto de 22,100,000 lph. El tiempo de riego calculado fue de 6 horas, lo que nos arrojó un gasto de 132,600,000 litros / riego; y el total de riegos programados fue de 41 riegos, dando como resultado final 5,436,600 m<sup>3</sup>. Comparando este volumen calculado en función de los emisores del sistema de irrigación, con el volumen regado en base a la programación del riego (5,400,471.6 m<sup>3</sup>), nos indicó que ambos cálculos, efectuados por diferente metodología son similares, reflejando la veracidad y confiabilidad de la programación.

## CONCLUSIONES

Las sondas de capacitancia FDR ofrecen medidas muy precisas, en tiempo real, del contenido de agua en el suelo, cuya frecuencia y distribución espacial depende sólo del diseño experimental inicial.

Para evitar desajustes en el cálculo, es muy importante realizar una revisión previa y una calibración adecuada del sistema de riego y de la sonda de capacitancia FDR.

La precisión de los sensores de la sonda de capacitancia FDR, debe ser confirmada con validaciones de calibración en campo.

Esta técnica ofreció una serie de ventajas entre las que destacaron:

- Facilidad de efectuar mediciones con rapidez en varios puntos de forma continuada, debido a su carácter portátil.
- Determinar el perfil de humedad de un suelo a diferentes profundidades.
- Conocer detalladamente las clases texturales de los diferentes horizontes del suelo.
- Tiene un alto grado de precisión de las mediciones.
- Ejerce un mínimo impacto sobre el suelo.

La relación lineal observada entre el valor entregado por el sensor de la sonda de capacitancia FDR y la humedad volumétrica en las distintas texturas de suelo es muy alta, lo que demuestra que el uso de esta tecnología simplifica de manera importante los métodos de medición de la humedad utilizados anteriormente, por lo que se debe incorporar esta metodología en la programación de riegos.

La utilización de sondas de capacitancia FDR proporciona información que permite la optimización de los riegos, la corrección de estados de stress hídrico en los cultivos y el estudio de la dinámica del suelo.

La programación del riego debe usarse para determinar de manera exacta las cantidades de agua que necesita el cultivo.

No se observaron lixiviaciones profundas debido a que la programación del riego nos permitió obtener balances hídricos ajustados y a que el suelo tiene una alta capacidad de retención de humedad por su alto contenido de arcillas, principalmente en el horizonte sub-superficial de 30 – 60 cm., lo que representa que se tiene una eficiencia de fertilización al no percolarse los nutrientes aportados y consecuentemente no hay transporte de solutos contaminantes a los acuíferos.

Se obtuvieron ahorros significativos de agua de riego del 45 % (6,970 m<sup>3</sup>/ha y 4 Mm<sup>3</sup> en 570 ha.). Asumiendo que existen 30,000 ha. de cultivo manzano en la región de Cuauhtémoc y Guerrero en el Estado de Chihuahua, si esta metodología se adoptara significaría un ahorro de 209 Mm<sup>3</sup> anuales para el acuífero, lo que impactaría significativamente sobre el déficit de recarga existente, minimizando los impactos ambientales negativos e incrementando las expectativas de vida del acuífero (25 años) y contribuyendo al desarrollo socioeconómico de la región.

Finalmente podemos concluir que la programación eficiente del riego a través de sondas de capacitancia FDR y el monitoreo en tiempo real del clima, nos indican que se trata de herramientas indispensables en la gestión y desarrollo sustentable de los ecosistemas agrícolas, permitiendo integrar la productividad y la conservación de los recursos hídricos y edáficos, por lo que debe adoptarse en todos los cultivos.

## LITERATURA CITADA

1. Avidan, A. (1994), *Cálculo de las necesidades de riego: Determinación del régimen de riego de los cultivos; factores que influyen sobre el régimen de riego y la evapotranspiración de los cultivos*. Fascículos 1-3. CINADCO. Ministerio de Agricultura. Servicio de de Extensión Agrícola. Departamento de Riego y Suelos. Israel.
2. Brooks, K.N., P.F. Folliott, H.M. Gregersen y J.L. Thames (1993), *Hydrology and the management of watersheds*. Iowa University Press. p. 392. USA.
3. Campbell, J.E. (1990), *Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz*. Soil Sci. Soc. Am. Journal 54: 332-341.
4. Campbell, J.E. (2002), *Salinity effects in capacitive soil moisture measurement transactions*. First International Symposium on Soil Water Measurement using Capacitance and Impedance, pp. 1-12. I. C. Paltineau (Ed.), Paltin International Inc., Maryland, USA
5. Cassel, D.K., R.G. Kachanoski y G.C. Topp (1994), *Practical consideration for using a TDR cable tester*. Soil Technology. 7:113-126.
6. Chávez N. y M. Berzoza (2003), *Manejo y operación de sistemas de riego presurizado*. Campo Experimental Delicias, Centro de Investigación Regional Norte Centro, INIFAP-SAGARPA. Cd. Delicias, Chihuahua, México.
7. Clark, G.A., C.D. Stanley, A.G. Smajstrla, y F.S. Zazueta, (1995), *Consideraciones para el diseño de la microirrigación para la producción de hortalizas*. El uso de la plasticultura para la producción intensiva de cultivos hortícolas. Curso Nacional de Fertirrigación. INIFAP. México.
8. Dalton, F.N. (1992), *Development of time domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity*. *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*. Soil Sci. Soc. Am. Special Pub. No. 30. pp. 143-167.
9. Davis, K.R., C.J. Phene, R.L. McCormick, R.B. Hutmancher, y D.W. Meek (1985), *Trickle irrigation frequency and installation depth effects on tomatoes*. Third International Drip/Trickle Irrigation Congress, Fresno, California, USA. pp. 986-902.
10. Dasberg, S. y F.N. Dalton (1985), *Time domain reflectometry measurements of soil water content and electrical conductivity*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:293-297.
11. Doorembos J. y W.O. Pruitt (1976), *Las necesidades de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego y Drenaje, Manual n° 24. Roma, Italia.
12. FAO (2006), *Evapotranspiración del cultivo*. Guía para la determinación de agua de los cultivos. Estudio Riego y Drenaje. FAO. Manual n° 56. Roma, Italia.
13. Fares A. y A.K. Alva (2000), *Soil water components based on capacitance probes in sandy soil*. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 64:311-318.
14. Hartz, T.K. (1995), *Manejo del agua en la producción de hortalizas con riego por goteo*. El uso de la plasticultura para la producción intensiva de cultivos hortícolas. Curso Nacional de Fertirrigación. INIFAP. México.
15. Hargreaves, G.H. y Z.A. Samani (1991), *Programación del riego*. Manual Bilingüe. Universidad de Las Cruces, New México, U.S.A.
16. Jasso I., R., J. Villanueva, J.L. González y I. Sánchez (2001), *Comportamiento histórico de la relación escurrimiento-precipitación en el Norte de México*. Memoria de la Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED. pp. 125-129.

17. Jasso I., R. y M. H. Royo (2005), *Análisis espacio-temporal de la precipitación en el Estado de Chihuahua*. AGROFAZ 5 (1): pp. 125-129. México.
18. Jasso-Ibarra, R., I. Sánchez, J. Stone, M. Velásquez, M. H. Royo, J. Estrada y J. L. Gonzáles (2007), *Los pastizales como productores de agua*. Memorias Científicas del II Simposium Internacional de Manejo de Pastizales. Zacatecas, Zacatecas. pp. 38-50.
19. Knight, R.J. y A.L. Endres, (1990), *A new concept in modeling the dielectric response of sandstones: Defining a wetted rock and bulk water system*, Geophysics, 55:586-594.
20. Olhoeft, G.R. (1989), *Electrical properties of rocks*. Physical Properties of Rocks and Minerals vol. II-2. Y.S. Touloukian, W.R. Judd, R.F. Roy, ed. New York: Hemisphere Pub. Corp.
21. Or, D. y J.M. Wraith (1999), *Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model*. Water Resources. Res., 35:371-383.
22. Ortiz, P. (2000), *Programación práctica del riego*. Campo Experimental Sierra de Chihuahua, Centro de Investigación Regional Norte Centro, INIFAP-SAGARPA. Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México.
23. Paltineanu I. C. y J. Starr (1997), *Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration*. Soil Sci. Soc. Amer. J., 61:1576
24. Parra, R. y P. Ortiz (2004), *Manejo del riego en manzano mediante déficit de riego controlado (DCR)*. Campo Experimental Sierra de Chihuahua, Centro de Investigación Regional Norte Centro, INIFAP-SAGARPA. Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México.
25. Phene, D.J., R.J. McCormick, J.M. Miyamoto, D.W. Meek, y K.R. Davis (1985), *Evapotranspiration and crop coefficient trickle irrigated tomatoes*. Third. International Drip/Trickle Irrigation Congress, Fresno, California, USA. pp. 923-831.
26. Ponizovsky A.A. , Chudinova S.M. y Y.A. Pachepsky (1999), *Performance of TDR calibration modesl as affected by soil texture*. Journal of Hidrology 218:35-43.
27. Rincón, L. y Sáenz, J. (1996), *Determinación de la evapotranspiración y de los coeficientes de cultivo en lechuga iceberg con riego por goteo*. Actas del Congreso Ibérico. Murcia, España. pp. 193-202.
28. Roth, C.H., M.A. Malicki y R. Plagge (1992), *Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR*. J. Soil Sci., 43:1-13.
29. Sen, P.N. (1981), *Relation of certain geometrical features to the dielectric anomaly of rocks*. Geophysics, pp. 46, 1714-1720.
30. Topp, G.C., J.L. Davis y A.P. Annan (1980), *Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines*. Water Resources. Res., 16: 574-582.
31. Weitz, A.M., W.T. Grauel, M. Keller y E. Veldkamp (1997), *Calibration of time domain reflectometry technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin*. Water Resources. Res., 33:1241-1249.
32. Zazueta, R. F. S. (1992), *Micro-Irrigación*. ICFA Internacional, Inc. Gainesville, Florida.,USA.