

COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA DETERMINAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN Y OPORTUNIDAD DE RIEGO EN NOGAL PECANERO

Comparisson of Methods for Determining Evapotranspiration of Pecans Trees and its Use for Scheduling Irrigation

G. González-Cervantes^{1‡}, E. Chávez-Ramírez¹, J. L. González-Barríos¹, A. Dzul-López², I. Sánchez-Cohen¹ y M. C. Potisek-Talavera¹

RESUMEN

Con el propósito de manejar eficientemente el agua de riego y aumentar el nivel tecnológico en el sector agrícola, para incrementar su rentabilidad y sustentabilidad, se determinó la evapotranspiración de referencia para nogal pecanero y se realizó la comparación de tres métodos de Penman-Monteith, Doorembos-Pruit y Hargreaves-Samani a partir del monitoreo de las variables meteorológicas con estaciones agroclimáticas automatizadas en red, ubicadas en dos subregiones de la Cuenca del Nazas. Los resultados, con base en la comparación de métodos, indican que el modelo de Penman-Monteith presenta mejor correlación de la evapotranspiración de referencia con respecto al método basado en la evaporación del tanque tipo A y por lo tanto, determina mejor la evapotranspiración del cultivo, seguido del modelo de Doorembos-Pruit y, por último, el de Hargreaves-Samani. Estos modelos, indican que el consumo hídrico del nogal pecanero es ligeramente superior en la cuenca baja con respecto al de la cuenca media del Río Nazas.

Palabras clave: estaciones climáticas, telemetría, agricultura de precisión, frutales caducifolios.

SUMMARY

In order to provide timely irrigation to walnut pecan, and to increase technical level of agricultural sector for

¹ CENID-RASPA-INIFAP. Kilómetro 6+500 margen derecha canal Sacramento. 35140 Gómez Palacio, Durango, México.

[‡] Autor responsable (gonzalez.guillermo@inifap.gob.mx)

² Instituto Tecnológico de la Laguna. Blvd. Revolución y Czda. Cuauhtémoc s/n. 27000 Torreón, Coahuila, México.

Recibido: mayo de 2011. Aceptado: octubre de 2011.

Publicado en Terra Latinoamericana 30: 29-38.

increasing sustainability and productivity, reference evapotranspiration was determined by three methods: Penman-Monteith Doorembos-Pruit and, Hargreaves-Samani and from monitoring of agro-climatic variables with an automated meteorological stations network, located in two subregions of the Nazas basin. The results based on a comparison of methods, indicate that Penman-Monteith model presented a better correlation with the reference evapotranspiration calculated by the evaporation method based on tank type A evaporation observations was the best model to determine the crop evapotranspiration, followed by Doorembos-Pruit and finally by the Hargreaves-Samani. These models indicate that water consumption of the pecan walnut is slightly higher downstream relative to that of the middle basin of the Nazas River.

Index words: weather stations, telemetry, precision agriculture, deciduous fruit trees.

INTRODUCCIÓN

El interés económico, social y ambiental por el agua en los diferentes componentes del ciclo hidrológico para los diversos usos, se ha acrecentado de manera acelerada tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo. Uno de los usos relevantes, particularmente en las zonas semiáridas y áridas, se refiere al sector agropecuario que consume más del 80% del agua dulce disponible a nivel mundial; asimismo, en México se consume el 77.8% del agua que se extrae de ríos, lagos y acuíferos (FAO/AQUASTAT, 2006; Becerra *et al.*, 2004).

Una de las estrategias para mejorar el uso del agua para la producción agrícola es la implementación de tecnologías, que incorporen técnicas y métodos cuantitativos que permitan tomar decisiones adecuadas en la programación del riego en tiempo real a nivel

parcelario (Ojeda, 1999; Rosano *et al.*, 2001; Gutiérrez, *et al.*, 2005). Sin embargo, para que estas tecnologías se consideren adecuadas es necesario que ayuden a resolver los cuestionamientos elementales del riego como: fechas y cantidades de riego (cuándo y cuánto) con cierto grado de precisión. En este sentido es importante la cuantificación de los requerimientos hídricos diarios por superficie de cultivo, que tiene su origen en la evapotranspiración (López *et al.*, 1991; Allen *et al.*, 1998; Jiyane y Zermeño, 2003). La medición de este proceso se realiza mediante sensores y controles electrónicos (estación agroclimática telemétrica), los cuales constituyen sistemas para monitorear, en forma precisa y casi continua, las condiciones atmosféricas. Además, las variables climáticas registradas integradas a modelos matemáticos dentro de un programa informático en red permiten mejorar el procesamiento y uso de esta información de vital importancia en los procesos agrícolas a nivel regional y nacional, para cuantificar la demanda hídrica de los cultivos en los tiempos óptimos requeridos (Ojeda, 1999; Tijerina, 2000).

Uno de los cultivos aprovechado comercialmente en las zonas áridas y semiáridas del norte del país que consume altas cantidades de agua es el nogal pecanero (*Carya illinoensis* Koch), con una superficie mayor a 80 mil ha, de las cuales el 97% son de riego por gravedad con agua del subsuelo (Godoy y López, 2000; SAGARPA, 2009). El manejo del agua para este cultivo, es un factor que determina el comportamiento fisiológico denominado alternancia productiva que consiste en presentar rendimientos fluctuantes de un año, lo que impacta en la productividad y calidad de la nuez. Cuando se presenta una deficiencia de agua, la primera función fisiológica afectada es el crecimiento celular, se inhibe el transporte de nutrimentos, fotosíntesis y translocación de los fotosintatos dentro de la planta y, por consecuencia, una disminución de brotes florales y finalmente una reducción en la cantidad y calidad de nuez (Herrera, 1990; Godoy y López, 2000; Godoy *et al.*, 2005; Allan *et al.*, 2006).

En las huertas del nogal pecanero del país, usualmente, la programación del riego se realiza con base al criterio del productor o para el mejor de los casos con base en un calendario fijo llamado receta de riego fundamentado en una lámina total anual dividida en ocho riegos durante el ciclo reproductivo del nogal (Godoy *et al.*, 2000; Godoy y López, 2000). Este modo de aplicar el riego no considera el desfase en el tiempo de las variables ambientales que se suscitan en el entorno del

cultivo. Sin embargo, la aplicación del riego en este cultivo debe ser lo suficientemente dinámica y cercana a la realidad para compensar las variaciones agroclimáticas (Sammis *et al.*, 2004). La particularidad principal de la programación del riego es predecir la cantidad de agua requerida y el momento óptimo de su aplicación a lo largo del ciclo fenológico, considerando factores de cultivo, climáticos, edáficos y de manejo (Olalla y De Juan, 1993; Ojeda, 1999).

El objetivo de este trabajo fue determinar la evapotranspiración mediante la comparación de tres métodos y su uso para el riego oportuno en el cultivo del nogal pecanero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y Descripción de Área de Estudio

El trabajo se realizó en las subregiones cuenca baja y media del Río Nazas, localizada en la región hidrológica 36 (RH-36), al norte de México, entre los meridianos 24° y 26° de latitud norte y los paralelos 106° y 102° de longitud oeste. La Cuenca del Nazas se delimita en tres subregiones, con base al análisis de precipitaciones anuales utilizando el método de vector regional y con base en un análisis de componentes principales: como variable dependiente la precipitación y como variable independiente la altitud, la longitud y la densidad de vegetación (Descroix *et al.*, 1997; Descroix *et al.*, 2004).

Parte alta. Se ubica y abastece de agua la presa Lázaro Cárdenas, con lluvia promedio anual superior a los 500 mm, clasificada como una zona subhúmeda de producción y almacenamiento de agua de lluvia en la presa. La superficie establecida y cultivada del nogal pecanero en esta subregión es reducida, inferior al 2% de la total cultivada en la Cuenca del Río Nazas.

Parte media. Se ubica la presa Francisco Zarco, con precipitación media anual de 300 a 500 mm, considerada como una zona semi-árida de almacenamiento, conducción y aprovechamiento de agua hacia la parte baja de la cuenca. Donde se ubica el 21% de superficie cultivada del nogal pecanero.

Parte baja. Formada por los lechos de las otras Lagunas de Mayran y Viesca, así como el Bolsón de Mapimí, donde la precipitación promedio anual es inferior a los 300 mm. Se clasifica como zona de árida con un consumo de agua proveniente de la parte alta y media

de la cuenca y la extracción de pozos profundos. En esta subregión se concentra el 77% de la superficie sembrada con nogal pecanero.

En la Cuenca del Río Nazas, al igual que otras cuencas del país y del mundo, es de notarse que acorde al gradiente hidrológico más del 80% de los recursos hidráulicos disponibles se producen en la parte alta en donde habita alrededor del 4% de la población, Sánchez-Cohen *et al.* (2006) y se localiza el 2% de la superficie cultivada con nogal.

Instrumentos y Mediciones

Con el objeto de monitorear en periodos cortos el ambiente climático y posteriormente calcular la ET_0 con fines de aplicar el riego en tiempo oportuno se instalaron tres estaciones climáticas automatizadas marca Davis, Motorola y Adcon, equipadas con sensores electrónicos de misma marca, exceptuando para la estación Motorola, la marca de sensores es Decagon ECH2O. Estos sensores miden temperatura del aire, humedad atmosférica, velocidad y dirección del viento, radiación solar y precipitación pluvial a una altura de 2 m sobre el nivel del suelo, y temperatura del suelo a 30 cm de profundidad. Las estaciones se programaron para registrar las variables climáticas en periodos de un minuto y considerar el promedio de 15 minutos, para su almacenamiento en la base de datos local propia de cada estación. Posteriormente, la información es solicitada mediante un programa de computadora que conecta a las estaciones en red vía telemetría; a intervalos de 15 min utilizando frecuencia de radio para la estación Davis y Motorola, en tanto, para la estación Adcon es vía módem cada 24 horas. Este sistema computacional que permite monitorear, almacenar, usar y observar en tiempo real variables climáticas suscitadas en cada punto de estudio, fue desarrollado e instalado en una computadora central ubicada dentro de las instalaciones del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA).

La distribución espacial de las estaciones fue de la siguiente manera: se instalaron dos estaciones Davis en la cuenca baja; instalada en condiciones estándar al cultivo de referencia y Motorola instalada en condición no estándar. La primera se localiza en las coordenadas 25° 35' 18.090" N, 103° 27' 01.523" O, con una altitud de 1129 m (CENID-RASPA), la segunda se localiza entre los 25° 37' 02.136" N y 103° 24' 11.952" O,

a 1126 m de altitud (P. P. Las Villas, Torreón, Coahuila). En tanto, en la cuenca media la estación Adcon se encuentra instalada en condiciones estándar al cultivo de referencia, ubicada entre los 25° 14' 43.928" N y 104° 07' 06.230" O, con una altitud de 1243 m (P. P. Santa Bárbara, Nazas, Durango).

Por otra parte, se encuentra instalado un tanque evaporímetro tipo A distante 10 m de la estación Davis, mismo que fue empleado para medir la evaporación, considerando los días con precipitación, a las 8:00 a.m. diariamente y posteriormente calcular la ET_0 . La estructura y dimensiones del tanque así como las condiciones del sitio, cumple con las condiciones estándar establecidas por la FAO (Allen *et al.*, 1998). El uso de este método ha probado su valor práctico y ha sido con éxito para calcular la ET_0 , dado que la medida de la evaporación integra el efecto de la radiación, viento, temperatura y humedad para un lugar específico. En algunos trabajos experimentales, los valores de evaporación medidos en el tanque tipo A afectados por sus correspondientes factores de corrección, se han utilizado para calcular el volumen de agua de riego a reponer en los cultivos (Tijerina, 2000; González y Hernández, 2000) y en nogal pecanero no ha sido la acepción (Godoy y López, 1997).

Procesamiento de Datos

La información climática registrada mediante las estaciones, fue usada para calcular la ET_0 en periodos diarios utilizando las ecuaciones de Penman-Monteith FAO, Hargreaves-Samani y Doorenbos-Pruitt. Así también, los datos de la evaporación fueron usados para calcular la ET_0 en periodos diarios utilizando la ecuación propuesta por Cuenca (1989) para determinar el coeficiente del tanque. Posteriormente, sólo para la cuenca baja, se realizó una comparación estadística entre valores promedio mensual de ET_0 aplicando las ecuaciones e información obtenido con las estaciones climáticas contra observados en el tanque tipo A. Utilizando índices estadísticos como coeficiente de regresión y coeficiente de correlación que miden la relación lineal (sentido y fuerza) entre dos variables cuantitativas.

Método de Penman-Monteith FAO

Las variables utilizadas en esta ecuación son radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa

atmosférica y velocidad del viento a 2 m de altura sobre la superficie del suelo (Allen *et al.*, 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

Método de Hargreaves y Samani

Esta ecuación para su funcionamiento necesita únicamente datos de temperatura del aire y radiación solar (Hargreaves y Samani, 1985).

$$ET_0 = 0.0023(t_{med} + 17,78)R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (2)$$

Método de Doorenbos y Pruitt

Las variables de ingreso requeridas por la ecuación son temperatura del aire, humedad relativa atmosférica y velocidad del viento durante horas diurnas, p porcentaje medio diario anual de insolación durante el periodo bajo análisis, a y b coeficientes de calibración climática en función de humedad relativa y velocidad del viento durante horas diurnas, y del factor f_e en función de la elevación del sitio sobre el nivel del mar (Doorenbos y Pruitt, 1977).

$$ET_0 = f_e \{a + b[p(0.46 * T + 8.13)]\} \quad (3)$$

Método del Tanque Evaporímetro Tipo A

Los datos diarios de evaporación observados en el tanque evaporímetro tipo A, pueden expresarse a datos de ET_0 (Doorenbos y Pruitt, 1977) mediante la siguiente Ecuación:

$$ET_0 = K_p E_{pan} \quad (4)$$

El coeficiente de tanque (K_p) fue derivado de la ecuación propuesta por Cuenca (1989), utilizando los valores promedio de velocidad del viento y humedad relativa del sitio donde se ubica el tanque.

El siguiente paso fue programar el riego en tiempo real, aplicando la metodología del balance de agua en

el suelo. Esta metodología consiste en realizar un balance riguroso a través del tiempo de los componentes relacionados con el cambio en el contenido de humedad en el perfil de suelo ocupado por raíces del cultivo, y así, planificar la cantidad de agua requerida y momentos de aplicación del riego.

Partiendo del principio del balance del agua en la naturaleza, una forma de expresar el balance de agua en el suelo (Bh) es considerando las salidas (S) y entradas (E) del sistema, como se muestra en la siguiente Ecuación:

$$Bh = E(\downarrow) - S(\uparrow) \quad (5)$$

Para zonas áridas y balances diarios de agua en el suelo, se puede presentar de manera simplificada. Considerando únicamente a la evapotranspiración del cultivo salidas del sistema, la precipitación pluvial efectiva y el riego entradas al sistema.

Evapotranspiración del Nogal Pecanero

El método empleado para determinar indirectamente el consumo hídrico del cultivo es la recomendada por la FAO (Allen *et al.*, 1998), donde la evapotranspiración del cultivo (ET_c) se estima en función de ET_0 , la cual es corregida por un coeficiente de cultivo (K_c) específico para cada especie agrícola:

$$ET_c = ET_0 * K_c \quad (6)$$

En el caso concreto del nogal pecanero, las investigaciones coinciden en que el consumo de agua a partir del tercer año depende del diámetro de tronco, del número de árboles por hectárea, de la etapa fenológica del cultivo y de la localización espacial de la huerta (Miyamoto, 1983; Worthington *et al.*, 1992; Godoy y López, 1997; Godoy y López, 2000). Por esta razón, el K_c se obtuvo utilizando ecuaciones que operan con el diámetro de tronco, densidad de árboles por hectárea y días grados crecimiento (DGC) determinados con temperatura del aire registrada para cada estación. Estas ecuaciones se definieron mediante regresión lineal de tipo polinomial por Miyamoto (1983), posterior al análisis de humedad del suelo en huertos de nogal pecanero con diferente densidad de plantación y longevidad (diámetro del tronco).

Precipitación Efectiva

Su estimación ha sido sujeta a una diversidad de estudios, sin embargo debido a la complejidad, la precipitación o lluvia efectiva (P_e) se estima mediante funciones empíricas ($P_e \geq 5.1$ mm) derivadas de análisis estadísticos de precipitación (Cahoon *et al.*, 1990).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evapotranspiración de Referencia en la Cuenca Baja y Media del Río Nazas

Con las variables meteorológicas, medidas en las estaciones automáticas, se procedió en primer lugar a determinar ET_0 para realizar una comparación de métodos. La Figura 1 presenta el comportamiento de ET_0 promedio diaria de periodos mensuales determinada utilizando el modelo de Penman-Monteith FAO (P-M), Doorenbos-Pruitt (D-P) y Hargreaves-Samani (H-S), durante el periodo enero-diciembre de 2005, para dos localidades geográficas de la Cuenca del Nazas:

1.- Para la cuenca baja (estación Davis) se observa la ET_0 calculadas con P-M ligeramente inferiores a la calculados con H-S a razón de 0.5 mm d^{-1} , mientras que la máxima diferencia la presenta los valores de ET_0 determinados con D-P a razón de 1.7 mm d^{-1} , con respecto a los otros dos métodos. Sin embargo, los tres modelos coinciden en que la ET_0 máxima se presenta durante los meses de mayo, junio y julio.

2.- Para la cuenca media (estación Adcon), el patrón de ET_0 durante el periodo marzo-diciembre de 2005, se presenta de manera notoria una diferencia entre valores

de ET_0 determinados con P-M y los determinados con H-S y D-P, a razón de 2 mm d^{-1} durante todo el periodo observado. Mientras que los valores con H-S difieren ligeramente en 0.5 mm d^{-1} contra los valores de D-P para este mismo periodo.

La tendencia en el patrón de este fenómeno durante el periodo observado se presenta de manera similar en ambas partes de la cuenca con los diferentes modelos utilizados, presentándose la máxima demanda evapotranspirativa de referencia durante los meses de mayo, junio y julio. Sin embargo, esta demanda hídrica se muestra ligeramente superior para la cuenca baja con respecto de la cuenca media, excepto los valores determinados con D-P en los meses de mayo, junio y julio donde se presenta de manera inversa. En la cuenca baja presenta patrones de tendencia de ET_0 similar con Doorenbos-Pruitt y Penman-Monteith FAO, con valores mínimos al inicio del ciclo (enero) y máximos en la parte media del ciclo (junio) a razón de 3 y 8 mm d^{-1} , respectivamente, decreciendo este último valor al final del ciclo (diciembre) entre 3 y 4 mm d^{-1} . A diferencia de lo anterior con Hargreaves-Samani, con valores de 2.5 (al inicio y final del ciclo), 6.2 y 4 mm d^{-1} (parte media del ciclo) como máximos y mínimos, respectivamente, se desfasa en tiempo (mayo) el valor máximo de evapotranspiración, periodo donde se señala mayor incidencia de radiación solar. Sin embargo, los tres modelos coinciden en que el periodo crítico de mayor evapotranspiración es a partir del mes de abril hasta septiembre. También es este periodo donde se aprecia una diferencia considerable de evapotranspiración resultante con los tres modelos (hasta de 1.8 mm d^{-1}).

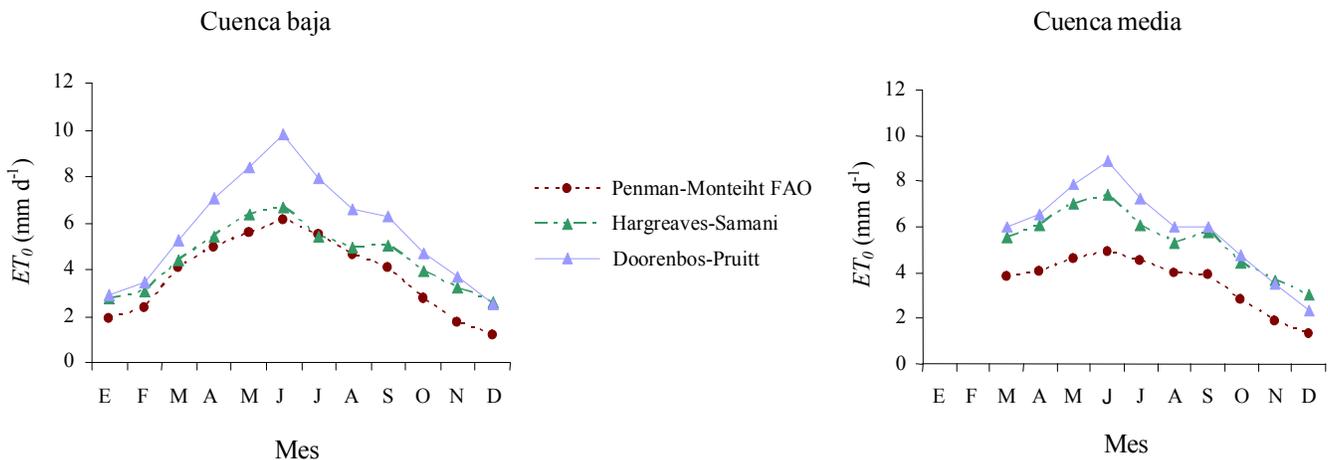


Figura 1. Comportamiento de la ET_0 en la cuenca baja y media del Río Nazas.

En la cuenca media se presentan patrones de tendencia parecidos a los que se presentan en la cuenca baja, con el periodo crítico a partir del mes de abril hasta septiembre y con discrepancia de evapotranspiración resultante con los tres modelos para este mismo periodo, pero con mayor contraste (hasta de 2.5 mm d⁻¹). Es evidente que el modelo de Penman-Monteith FAO presentó mayor variación, debido a que las variables climáticas como: temperatura, velocidad del viento y radiación solar mostraron valores superiores en la cuenca baja con respecto de la cuenca media.

Comparación de Métodos

Con la finalidad de utilizar y sugerir un modelo que determine la ET_0 apropiadamente para el área de estudio. Se realizó una comparación de los tres métodos de cálculo de ET_0 contra ET_0 estimada con los datos de evaporación del tanque tipo A, únicamente para el periodo comprendido entre los meses de mayo, junio, julio y agosto de 2005. Considerando que los tres métodos utilizados manifiestan la máxima demanda de agua por el cultivo de referencia durante los meses de mayo, junio y julio tanto en la cuenca baja como para la media del Río Nazas, y es también el periodo que presenta una divergencia considerable en la ET_0 calculada con las tres ecuaciones, además el periodo mayo-agosto (crecimiento de la nuez y llenado de almendra) es trascendental para el manejo adecuado del agua de riego en el nogal pecanero. El Cuadro 1, muestra los resultados de dicho análisis, donde el coeficiente de correlación que oscilan entre 0.72 a 0.93, y coeficiente de regresión de 0.452 a 0.87. Siendo ambos coeficientes más altos para P-M, acorde a estos datos, este método calcula mejor la ET_0 en condiciones estándar a diferencia de los otros métodos analizados en la cuenca baja y, por lo tanto, se puede considerar de igual forma para la cuenca media. Así también lo exhibió la Figura 1, donde el modelo de P-M muestra mayor variación

al cambio de las condiciones climáticas que afectan a la evapotranspiración. En contraste, coeficientes bajos obtenidos para el método de H-S, a pesar de haber analogía con los valores mensuales de ET_0 determinados con P-M.

Determinación del Consumo Hídrico en Nogal Pecanero

A continuación se presentan los resultados del consumo hídrico del nogal pecanero obtenidos en la parte baja y media de la Cuenca del Río Nazas para el ciclo fenológico 2005 (Figura 2), aplicando la Ecuación 6 y un coeficiente de cultivo que consideró los siguientes datos agronómicos: diámetro de tronco de 40 cm correspondiente a árboles de 30 años de longevidad y densidad de plantación de 70 árboles por hectárea. Los datos anteriores sugieren utilizar una de las cuatro ecuaciones propuesta por Miyamoto (1983):

$$K_c = 3.16E-01 + 5.31E-04(DGC) + 7.24E-07(DGC)^2 - 4.84E-10(DGC)^3 \quad (7)$$

Aplicando esta ecuación con los DGC determinados a partir de la temperatura del aire registrada para cada estación, se tienen K_c de 0.3, 0.8, 1.2 y 0.7 para etapas fenológicas de brotación, crecimiento de la nuez, llenado de almendra y apertura del pericarpio, respectivamente.

La Figura 2 presenta valores de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) diaria en promedio mensual correspondientes a los datos mencionados con anterioridad, para la cuenca media y baja del Río Nazas.

Para la cuenca baja se observa una ET_c inferior a 3.5 mm d⁻¹ para los meses de marzo, abril y octubre, noviembre considerando los tres métodos. Este consumo corresponde al periodo fenológico de antes y durante la brotación y apertura del pericarpio. Posteriormente, considerando P-M y H-S se incrementa de 3.5 hasta 6 mm d⁻¹ durante los meses de abril hasta junio

Cuadro 1. Comparación de ET_0 en la cuenca baja, en el periodo de máximos requerimientos hídricos.

Método	ET_0 mm d ⁻¹ promedio mensual				Coeficiente de regresión	Coeficiente de correlación
	Mayo	Junio	Julio	Agosto		
Tanque tipo A	6.3	7.6	6.9	5.7	-	-
Penman-Monteith	5.6	6.1	5.7	4.7	0.87	0.93
Doorenbos-Pruitt	8.4	9.8	7.9	6.8	0.79	0.89
Hargreaves-Samani	6.3	6.7	5.5	5.1	0.52	0.72

que corresponde a la etapa de crecimiento de la nuez. El incremento de D-P para este mismo periodo se presenta notablemente superior con valores de 3.5 hasta 9.5 mm d⁻¹. Enseguida disminuye de 6 hasta 4.2 mm d⁻¹ con P-M y H-S y de 9.5 hasta 6 mm d⁻¹ con D-P para los meses de junio hasta septiembre que correspondiente al llenado de la almendra y apertura del ruezno.

Para la cuenca media, el comportamiento de la ET_c fue diferente con respecto a la parte baja de la cuenca, para ese mismo año de observación, es decir los valores de ET_c fueron de 2.5 mm d⁻¹ para el mes de marzo (brotación) alcanzando su mayor incremento en 5, 6.5 y 8 mm d⁻¹ considerando el modelo de P-M, H-S y D-P, respectivamente. Para disminuir en ese mismo orden a 4, 6 y 6.2 mm d⁻¹ para el mes de septiembre (apertura del ruezno).

Los valores obtenidos de ET_c con P-M y H-S presentan una similitud entre sí, pero notablemente diferentes a los valores de D-P para la cuenca baja. A diferencia, en la cuenca media una analogía se presenta entre H-S y D-P aunque con menor cohesión, y notándose una diferencia marcada con P-M. El comportamiento del patrón de la evapotranspiración del nogal pecanero, se observa parecido en ambas partes de la cuenca, sin embargo, ligeramente superior para la cuenca baja. Esto significa que la aplicación en cantidad (volumen o lámina) y tiempo (intervalo entre riegos) será diferente para cada subregión estudiada, esto obedece las condiciones climáticas que prevalecen para cada una de estas.

Resultados de estudios por Godoy y López (1997) y Godoy *et al.* (2000) recomiendan que para proporcionar el riego a este cultivo, está en función del diámetro

de tronco y número de árboles por hectárea. Mencionan un consumo promedio diario de agua a razón de 3.4, 6, 7.4 y 7.8 mm d⁻¹ para los meses de mayo, junio, julio y agosto, respectivamente, utilizando datos de cultivo anteriormente propuestos. Estos valores se presentan de forma ascendente de mayo a agosto, mientras que los valores obtenidos con los tres métodos se presentan de forma ascendente de mayo a junio, y descendente de julio a agosto; esta variación se debe a condiciones atmosféricas por eventos de lluvia durante los meses de julio y agosto, los cuales son el factor cambiante a través del tiempo, no así, a la cuestión propia del cultivo. Con respecto a los resultados del consumo hídrico obtenido con P-M y H-S, es similar al encontrado por Godoy *et al.* (2000) para los meses de mayo y junio, y con marcada diferencia para los meses de julio y agosto. Por su parte D-P, una diferencia marcada respecto a Godoy *et al.* (2000) durante los meses de mayo y junio, pero, similar durante los meses de julio y agosto; esto por la tendencia de D-P a sobrestimar la ET_0 .

Aproximación del Riego Oportuno

Aplicando la Ecuación 5, antes descrita, utilizada para determinar la humedad en el suelo con fines de riego oportuno, considerando el monitoreo de las variables agroclimáticas y la comparación de métodos para establecer la evapotranspiración en nogal pecanero, es necesario precisar los cambios cotidianos de humedad durante el ciclo vegetativo y la humedad mínima tolerable durante las diferentes etapas fisiológicas del cultivo, partiendo con un valor del contenido de humedad inicial medido directamente en el terreno al inicio del ciclo

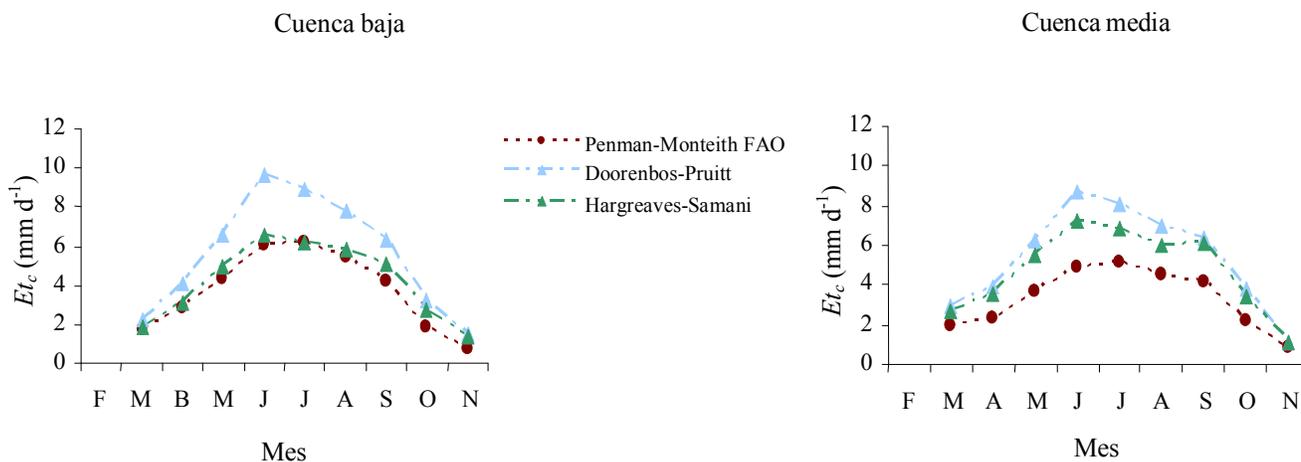


Figura 2. Comportamiento de ET_c en la cuenca baja y media del Río Nazas.

vegetativo (antes de brotación). El cambio (Δ) en el contenido de humedad o humedad residual en porcentaje de masa para un día i (θ_i), se calcula restando a la humedad residual del día anterior (θ_i) la humedad del suelo al final del día i (θ_{i+1}), con la siguiente Ecuación:

$$\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{i+1} \quad (8)$$

La θ_{i+1} será función del balance de agua durante el día, es decir, de la ET_o , P_e y del riego. Así, cuando se presenta una precipitación efectiva la humedad del suelo se incrementa, o bien, después de cada riego, y cuando el suelo alcanza humedad a capacidad de campo (θ_{cc}), se cumple a una profundidad de 40 cm:

$$\theta_i = \theta_{CC} \quad (9)$$

Al contrario, cuando el suelo pierde humedad por evapotranspiración, la humedad del perfil del suelo empieza a descender. Sin embargo, para no afectar al cultivo, la humedad residual no debe descender por debajo de la humedad mínima permisible (θ_c) por éste, por lo tanto se debe verificar que:

$$\theta_c \geq \theta_i \quad (10)$$

Estimada utilizando la siguiente Ecuación:

$$\theta_c = \theta_{cc} - \frac{f}{100}(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad (11)$$

En nogal pecanero, para determinar la humedad mínima permisible o punto de recarga del riego, es importante mantener una fracción de abatimiento (f) de humedad aprovechable (HA) no mayor al 50%, 35%, 25% y 50% durante la etapas fisiológicas de brotación, crecimiento de la nuez, llenado de almendra y apertura del pericarpio, respectivamente (Godoy *et al.*, 2000). El Cuadro 2 presenta un ejemplo del balance de agua en el suelo, partiendo de un valor de θ_i posterior a un riego a capacidad de campo. Este ejemplo fue realizado con datos de cultivo y clima corresponden a los citados con anterioridad y para cuenca baja del Río Nazas, específicamente durante el periodo mayo-julio (entre

las etapas de crecimiento de nuez y llenado de almendra), considerando un suelo arcilloso a una profundidad de raíces de 1 m, con las siguientes propiedades físicas: capacidad de campo de 43%, punto de marchitez permanente de 26% y densidad aparente de 1.25 g cm⁻³. Para las condiciones antes señaladas, el riego es mandado a intervalos entre 11 días (al 65% de HA) y 10 días (al 75% de HA) cuando no hay precipitaciones que impacten en la humedad del suelo, pero, si esto ocurre los intervalos de riego se prolongan según la magnitud de la lluvia. En este sentido, un estudio realizado por Godoy *et al.* (2005) en la cuenca baja para circunstancias de cultivo y suelo similares a las planteadas en este trabajo encontró que intervalos de riego no mayores a 14 días (al 25% de HA) mantienen una condición hídrica adecuada, lo que permite mejor crecimiento de la almendra, mayor velocidad en la acumulación de peso, altos porcentajes de almendra y tiene un efecto positivo en la apertura del pericarpio.

CONCLUSIONES

- Los métodos utilizados para calcular la evapotranspiración de referencia, el modelo de Penman-Monteith FAO (P-M) presenta los mejores resultados, seguido de Doorembos-Pruitt y por último el modelo de Hargraves-Samani (H-S). Estos métodos, excepto H-S, señalan que el consumo hídrico del nogal pecanero, correspondiente al ciclo agrícola 2005, se manifestó ligeramente superior para la cuenca baja con respecto a la cuenca media del Río Nazas; es decir, el aporte de agua de riego debe de ser ligeramente menor para la cuenca baja.
- El uso de estaciones climáticas autónomas y en red permitió registrar, manejar y usar variables ambientales circundantes al cultivo eficientemente, con el propósito de comparar métodos para determinar la evapotranspiración y determinar el consumo hídrico del nogal pecanero y, programar el riego en tiempo oportuno a una escala de micro regiones, como se exhibió en este trabajo para la cuenca baja y media del Río Nazas. Para optimizar el recurso hídrico como una aproximación de una agricultura de precisión. Lo anterior, sustenta la importancia de incrementar el nivel tecnológico en el sector agrícola a través del uso de estaciones climáticas automatizadas, para el manejo eficiente del agua de riego de forma oportuna, e incrementar su rentabilidad y sustentabilidad.

Cuadro 2. Balance de agua en el suelo y cálculo de fecha y lámina de riego.

Día Juliano	Et_c	Pe	Bh	θ_{i-1}	θ_i	Riego	Riego	Día Juliano	Et_c	Pe	Bh	θ_{i-1}	θ_i	Riego	Riego
	mm			- - - % - - -	- - - % - - -	Si-No	cm		mm			- - - % - - -	- - - % - - -	Si-No	cm
				43 = θ_{cc}								43 = θ_{cc}			
165	7.231	0	7.231	0.578	42.422	NO	0.723	193	7.454	0	7.454	0.596	41.753	NO	1.559
166	6.285	0	6.285	0.503	41.919	NO	1.352	194	6.369	0	6.369	0.51	41.244	NO	2.196
167	6.258	0	6.258	0.501	41.418	NO	1.977	195	7.081	0	7.081	0.566	40.677	NO	2.904
168	5.910	0	5.910	0.473	40.945	NO	2.568	196	6.152	0	6.152	0.492	40.185	NO	3.519
169	7.165	0	7.165	0.573	40.372	NO	3.285	197	4.818	0	4.818	0.385	39.799	NO	4.001
170	7.413	0	7.413	0.593	39.779	NO	4.026	198	6.365	0	6.365	0.509	39.290	NO	4.637
171	7.282	0	7.282	0.583	39.196	NO	4.754	199	6.788	0	6.788	0.543	38.747	SI	5.316
172	5.495	0	5.495	0.44	38.757	NO	5.304	200	7.831	0	7.831	0.626	43.000	NO	0.000
173	6.349	0	6.349	0.508	38.249	NO	5.939	201	7.432	6.8	0.632	0.051	42.949	NO	0.063
174	5.887	0	5.887	0.471	37.778	NO	6.528	202	3.200	20	-16.800	-1.344	43.000	NO	0.000
175	5.493	0	5.493	0.439	37.339	NO	7.077	203	5.893	0	5.893	0.471	42.529	NO	0.589
176	5.269	0	5.269	0.422	36.917	SI	7.604	204	6.792	0	6.792	0.543	41.985	NO	1.269
177	5.364	0	5.364	0.429	43.000	NO	0.000	205	7.026	0	7.026	0.562	41.423	NO	1.971
178	7.326	0	7.326	0.586	42.414	NO	0.733	206	6.509	0	6.509	0.521	40.902	NO	2.622
179	5.672	0	5.672	0.454	41.960	NO	1.300	207	4.830	0	4.830	0.386	40.516	NO	3.105
180	6.712	0	6.712	0.537	41.423	NO	1.971	208	4.667	57.5	-52.833	-4.227	43.000	NO	0.000
181	6.889	0	6.889	0.551	40.872	NO	2.660	209	5.031	0	5.031	0.402	42.598	NO	0.503
182	7.530	0	7.530	0.602	40.270	NO	3.413	210	6.082	0	6.082	0.487	42.111	NO	1.111
183	6.692	0	6.692	0.535	39.734	NO	4.082	211	5.706	0	5.706	0.457	41.654	NO	1.682
184	7.861	0	7.861	0.629	39.105	NO	4.868	212	5.863	0	5.863	0.469	41.185	NO	2.268
185	7.275	0	7.275	0.582	38.523	NO	5.596	213	4.818	0	4.818	0.385	40.800	NO	2.750
186	8.327	0	8.327	0.666	37.857	NO	6.428	214	5.584	0	5.584	0.447	40.353	NO	3.309
187	7.045	0	7.045	0.564	37.294	NO	7.133	215	4.558	0	4.558	0.365	39.989	NO	3.764
188	2.173	0	2.173	0.174	37.120	NO	7.350	216	5.235	0	5.235	0.419	39.570	NO	4.288
189	4.783	0	4.783	0.383	36.737	SI	7.828	217	5.583	0	5.583	0.447	39.123	NO	4.846
190	5.131	0	5.131	0.411	43.000	NO	0.000	218	3.738	0	3.738	0.299	38.824	NO	5.220
191	4.446	0	4.446	0.356	42.644	NO	0.445	219	5.447	0	5.447	0.436	38.388	SI	5.765
192	3.687	0	3.687	0.295	42.349	NO	0.813								

ET_c = evapotranspiración calculada utilizando el modelo Penman-Monteith. Pe = precipitación efectiva ≥ 5.1 mm. Bh = balance de agua en el suelo de acuerdo a la Ecuación 5. θ_{i-1} = humedad del suelo en un tiempo posterior. θ_i = humedad residual del suelo.

LITERATURA CITADA

Allan, A., W. Junming, T. W. Sammis, J. G. Mexal, L. J. Simmons, D. R. Miller, and V. P. Gustschick. 2006. A model of pecan tree growth for the management of pruning and irrigation. *Agric. Water Manage.* 84: 77-88.

Allan, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. FAO irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Cahoon, J., J. Fergunson, D. Edwards, and P. Tacker. 1990. A microcomputer-based irrigation scheduler for the humid mid-south region. *Appl. Eng. Agric.* 6: 289-295.

Cuenca, R. H. 1989. Irrigation system design: An engineering approach. Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ, USA.

Descroix, L., J. F. Nouvelot y J. Estrada. 1997. Geografía de lluvias en una cuenca del norte de México: Regionalización de las precipitaciones en la región hidrológica 36. Folleto Científico n° 10. CENID RASPA INIFAP – ORSTOM. México, D. F.

Descroix, L., J. L. González y J. Estrada. 2004. La sierra madre occidental, un château d'eau menacé. IRD editions. Paris, France.

Doorenbos, S. and W. O. Pruitt. 1997. Crop water requirements. Irrigation and drainage. Paper 24. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

FAO/AQUASTAT (Sistema de Información sobre el Uso del Agua en la Agricultura y el Medio Rural de la FAO). 2006. Sistema de información mundial sobre agua y agricultura, con especial énfasis en los países en vías de desarrollo y en los países en transición (estadísticas, perfiles de países, mapas y SIG-Sistemas de Información Geográfica). Sistema mundial de

- información sobre el agua y la agricultura de la FAO, Roma Italia. www.fao.org/ag/aquastat (Consulta: octubre 15, 2007).
- Godoy A., C. y J. C. López C. 1997. Patrón de extracción y requerimientos de agua en diferentes etapas fenológicas en el nogal. *Terra* 15: 1-6.
- Godoy A., C., I. Reyes J. y J. Morales V. 2000. Necesidades de agua por el nogal. Respuesta del nogal a la disponibilidad del agua. pp. 21-34. *In*: C. Godoy A., I. Reyes J., C. A. Torres E., M. V. Huitrón R., J. C. Chiquito y J. Morales V. Tecnología de riego en nogal pecanero. Libro científico INIFAP. México, D. F.
- Godoy, C. y I. López. 2000. Desarrollo de la almendra y germinación del fruto del nogal pecanero bajo cuatro calendarios de riego. *Terra* 18: 305-311.
- Godoy, C., Z. Xopiyaxtle, I. Reyes y C. A. Torres. 2005. Comportamiento hídrico de hojas y frutos de nogal pecanero y su relación con la calidad y germinación de fruto. *Terra Latinoamericana* 23: 505-513.
- González M., A. y B. A. Hernández L. 2000. Estimación de las necesidades hídricas del tomate. *Terra* 18: 45-50.
- Gutiérrez, J., R. Khosla, S. Searcy, G. González, E. Aranda, A. Dzul y M. Rivera. 2005. La sostenibilidad de los recursos para la producción de nuez de pecana mediante el uso de nuevas tecnologías. *Rev. Transferencia ITESM* 18.
- Herrera, E. 1990. Fruit growth and development of Ideal and Western pecans. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 115: 915-923.
- Jiyane, J. y A. Zermeño. 2003. Aplicación del enfoque de evapotranspiración a equilibrio en la agricultura de riego en zonas áridas. *Agrociencia* 37: 553-563.
- López, J., L. Tijerina, G. Haro y R. Arteaga. 1991. Calibración de fórmulas de evapotranspiración mediante un cultivo de alfalfa como referencia en el área de Montecillo, Estado de México. *Agrociencia* 2: 55-72.
- Miyamoto, S. 1983. Consumptive water use of irrigated Pecans. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 108: 676-681.
- Ojeda, B. W., E. Sifuentes, J. M. González, J. A. Guillen y H. Unland. 1999. Pronóstico del riego en tiempo real. Manual de capacitación técnica. Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Olalla, M. y J. De Juan. 1993. *Agronomía del riego*. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Rosano M., L., L. Rendón P., P. Pacheco H., J. D. Etchevers B., J. Chávez M. y H. Vaquera H. 2001. Calibración de un modelo hidrológico aplicado en el riego tecnificado por gravedad. *Agrociencia* 35: 577-588.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2009 Sistema de información agropecuaria de consulta. www.sagarpa.gob.mx/agricultura/info/da/pa/boletin/bol_inf_040806.swf. (Consulta: septiembre 18, 2009).
- Sammis, T. W., J. G. Mexal, and D. Miller. D 2004. Evapotranspiration of flood-irrigated pecans. *Agric. Water Manage.* 69: 179-190.
- Sánchez C., I., E. Catalán V., G. González C., J. Estrada A. y D. García A. 2006. Indicadores comparativos del uso del agua en la agricultura. *Rev. Agric. Téc. Méx.* 32: 333-340.
- Sánchez, C. I., J. Alfredo, C. Hernández, M. Fortis, L. Maeda, C. López, J. L. González, M. Briones, J. Estrada, G. González, I. Orona, M. Rivera, A. Cueto, J. Villanueva, A. Izaguirre, E. Serrano y G. Contreras. 2006. Manejo integral de la R. H. 36. Un enfoque de planeación de objetivos múltiples. www.imacmexico.org/. (Consulta: agosto, 2008).
- Tijerina C., L. 2000. Requerimientos hídricos de cultivos bajo sistemas de fertirrigación. *Terra* 17: 237-245.
- Worthington, J. W., J. Lasswell, L. A. Stein, and M. J. McFarland. 1992. Now that you've decided to irrigate... How?... How much?... When? *Pecan South* 22: 6-18.