

EVAPOTRANSPIRACIÓN Y SU RELACIÓN CON LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A EQUILIBRIO DE UNA HUERTA DE NOGAL PECANERO (*Carya illinoensis*) DEL NORTE DE MÉXICO

EVAPOTRANSPIRATION AND ITS RELATION TO EQUILIBRIUM EVAPOTRANSPIRATION OF A PECAN NUT ORCHARD (*Carya illinoensis*) OF NORTHERN MÉXICO

Alejandro **Zermeño-González**^{1*}, Jaime A. **Flores-Guerrero**¹, Juan P. **Munguía-López**², José A. **Gil-Marín**³, Raúl **Rodríguez-García**¹, Ernesto A. **Catalán-Valencia**⁴, Luis **Ibarra-Jiménez**², Héctor **Zermeño-González**⁵

¹Departamento de Riego y Drenaje, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, 25315, México. (azermeno@uaaan.mx). ²Departamento de Plásticos en la Agricultura, Centro de Investigación en Química Aplicada, Blvd. E. Reyna No. 140, Saltillo, Coahuila, 25100, México. (jmunguia@ciqua.mx). ³Escuela de Ingeniería Agronómica, Núcleo Monagas, Universidad de Oriente, Avenida Universidad, Campus Los Guaritos, Venezuela. ⁴CENID RASPA INIFAP, km 6.5 margen derecha canal de Sacramento Gómez Palacio, Durango, 35060, México. ⁵Instituto Tecnológico de Torreón, Carretera Torreón-San Pedro km 7.6.

RESUMEN

La determinación de la evapotranspiración diaria es importante para programar adecuadamente el riego en la producción del nogal pecanero [*Carya illinoensis* (Wangehn.)]. En una huerta de nogal pecanero ubicada en la Comarca Lagunera del estado de Coahuila, en el norte de México, se realizaron mediciones (método de la covarianza de remolinos) de flujo de calor sensible y latente sobre el dosel de los árboles durante mayo, junio y julio de 2008. También se midió la radiación neta y el flujo de calor en el suelo. Con esta información se determinó la lámina de agua evapotranspirada (*ET_r*) y la lámina de evapotranspiración a equilibrio (*ET_{equ}*) para 30 min y diaria (de 08:00 a 20:00 h). Se observó que *ET_r* y *ET_{equ}* fueron similares entre los días evaluados. Esto indicó un efecto poco significativo de advección local en la tasa de evapotranspiración de la superficie vegetal y que la evapotranspiración a equilibrio podría utilizarse para determinar el consumo diario de agua de los árboles de la huerta.

Palabras clave: covarianza de remolinos, advección, calor sensible, calor latente, riego.

INTRODUCCIÓN

El agua es el factor principal de manejo agronómico que permite al nogal pecanero [*Carya illinoensis* (Wangehn.) K. Koch] alcanzar una eficiencia fotosintética alta, para un mayor

ABSTRACT

The determination of daily evapotranspiration is important to properly program irrigation in the production of pecan trees [*Carya illinoensis* (Wangehn.)]. In a pecan nut orchard located in the la Comarca Lagunera, State of Coahuila in northern México, measurements (eddy covariance method) of sensible and latent heat flux were carried out on the canopy of trees during May, June and July 2008. The net radiation and the soil surface heat flux were also measured. With this information the evapotranspired water depth (*ET_r*) and the amount of the equilibrium evapotranspiration (*ET_{equ}*) were determined daily (from 08:00 to 20:00 h) and for 30 min. It was noted that *ET_r* and *ET_{equ}* were similar between the days tested. This indicated a small effect of local advection in the evapotranspiration rate of the vegetated surface and that the equilibrium evapotranspiration could be used to determine the daily water consumption of trees in the orchard.

Key words: eddy covariance, advection, sensible heat, latent heat, irrigation

INTRODUCTION

Water is the primary factor of agronomic management allowing the pecan nut tree [*Carya illinoensis* (Wangehn.) K. Koch] to achieve a high photosynthetic efficiency, for an increased yielding and fruit quality (Godoy-Ávila and López-Montoya, 2000), as water consumption of pecan trees is high compared with

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Octubre, 2009. Aprobado: Octubre, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 44: 885-893. 2010.

rendimiento y calidad del fruto (Godoy-Ávila y López-Montoya, 2000), ya que el consumo de agua del nogal es alto comparado con el de otros cultivos (Wang *et al.*, 2007; Andales *et al.*, 2006).

Debido a la importancia comercial del nogal pecanero, su consumo hídrico alto, así como la calidad pobre y baja disponibilidad del agua de riego en algunas regiones de mayor producción en México, es evidente la necesidad de determinar la demanda hídrica (evapotranspiración real) de este cultivo (Chavez *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007). Aunque se han desarrollado numerosas ecuaciones empíricas y semi-empíricas para determinar la evapotranspiración (*ET*) de cultivos, éstas requieren información meteorológica que generalmente no está disponible en la mayor parte de las estaciones de México (Jiyane y Zermeño-González, 2003).

El método micrometeorológico de mayor precisión para determinar la *ET* de diferentes condiciones y tipos de vegetación es el de la covarianza de remolinos (Warland y Taillon, 2002). Sin embargo, el costo alto del equipo requerido por este método, así como la complejidad del diseño del sistema, su implementación y el procesamiento de grandes volúmenes de datos, representan una seria limitación para realizarlo (Burba and Anderson, 2007; Castellví, 2007). Por tanto, este método se ha utilizado principalmente para evaluar y calibrar modelos menos complejos y que requieren menos mediciones (Simmons *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2007).

Con base en la ecuación de Penman-Monteith, la evaporación a equilibrio se define como la máxima tasa de evapotranspiración de una superficie vegetal cuando se encuentra en equilibrio con su entorno (Zermeño-González y Hipps, 1997; Howell *et al.*, 1998). Sin embargo, cuando hay condiciones de advección local fuerte, la evaporación a equilibrio se debe multiplicar por un factor de advección para compensar el incremento de la tasa de evapotranspiración debido a la transferencia hacia la superficie vegetal por un déficit de presión de vapor (Priestley y Taylor, 1972; Leite *et al.*, 1990). La ventaja del método de evaporación a equilibrio es que únicamente requiere mediciones de la energía disponible sobre la superficie vegetal (diferencia entre la radiación neta y el flujo de calor en el suelo) para determinar la evapotranspiración real del cultivo (Jiyane y Zermeño-González, 2003). El objetivo de este estudio fue determinar la evapotranspiración instantánea y diaria

other crops (Wang *et al.*, 2007; Andales *et al.*, 2006).

Due to the commercial importance of the pecan nut tree, its high water consumption, as well as the poor quality and low availability of irrigation water in some major production regions in México, it is a clear need to determine the water demand (actual evapotranspiration) of this crop (Chavez *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007). Although many empirical and semi-empirical equations have been developed to determine evapotranspiration (*ET*) of crops, they require meteorological data which is not generally available in most of the weather stations in México (Jiyane and Zermeño-González, 2003).

The micrometeorological method of major accuracy to determine the *ET* of different conditions and vegetation types is the eddy covariance approach (Warland and Taillon, 2002). However, the high cost of equipment required by this method, and the complexity of the system design, its implementation and the processing of large volumes of data, represent a serious limitation to do it (Burba and Anderson, 2007; Castellví, 2007). Therefore, this method has been used primarily to evaluate and calibrate less complex models that require fewer measurements (Simmons *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2007).

Based on the Penman-Monteith equation, the equilibrium evaporation is defined as the maximum rate of evapotranspiration of a vegetated surface when in equilibrium with its environment (Zermeño-González and Hipps, 1997; Howell *et al.*, 1998). However, when there are strong local advection conditions, the equilibrium evaporation must be multiplied by a factor of advection to offset the increase in the rate of evapotranspiration due to the transfer to the vegetated surface by a vapor pressure deficit (Priestley and Taylor, 1972; Leite *et al.*, 1990). The advantage of the equilibrium evaporation method is that only requires measurements of the available energy over the vegetated surface (difference between the net radiation and the soil surface heat flux) to determine the actual crop evapotranspiration (Jiyane and Zermeño-González, 2003). This study was aimed to determine the instant and daily evapotranspiration of a pecan nut orchard with the eddy covariance method and its relation with the equilibrium evapotranspiration.

de una huerta de nogal pecanero con el método de la covarianza de remolinos y su relación con la evapotranspiración a equilibrio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y características del sitio de estudio

El estudio se realizó durante mayo, junio y julio de 2008, en una huerta de nogal pecanero de la propiedad Tierra Blanca, en el ejido Mieleras, municipio de Matamoros, Coahuila, México, ubicado en 25° 25' N, 103° 18' O con una elevación de 1200 m. Las dimensiones del área de estudio en la huerta fueron 1120 m en la dirección Norte-Sur por 400 m Este-Oeste. Los árboles evaluados son de los cultivares Wichita y Western, de 50 años de edad y altura promedio de 14 m.

Los árboles están plantados en tresbolillo con una separación de 15 m. La huerta se riega diariamente entre marzo y noviembre con un sistema de riego por goteo subsuperficial. El volumen de riego mensual varía entre los meses (Cuadro 1).

Determinación de la evapotranspiración real del cultivo con el método de la covarianza de remolinos

Las mediciones del flujo de calor latente (LE), evapotranspiración real de los árboles de la huerta y del flujo de calor sensible (H), se realizaron con el método de la covarianza de remolinos usando las siguientes relaciones (Ham y Heilman, 2003):

$$LE = \overline{Lw'\rho_{wv'}} \quad (1)$$

$$H = \rho_a C_p \overline{w'T_s'} - 0.51Ta \frac{\rho_a C_p}{L} LE \quad (2)$$

donde, ρ_a y C_p = densidad y capacidad calorífica del aire; L = calor de vaporización del agua; Ta = temperatura del aire. Los productos $w'\rho_{wv'}$ y $w'T_s'$ representan la covarianza entre la velocidad vertical del viento (w) y la densidad del vapor de agua (ρ_{wv}) y la temperatura sónica (T_s). La temperatura sónica (°C) se obtiene de las mediciones de la velocidad del sonido y la velocidad tridimensional del viento. La barra horizontal representa el valor medio del producto de las desviaciones en un intervalo de tiempo.

La velocidad vertical del viento y la temperatura sónica se midieron con un anemómetro sónico tridimensional (CSI-CSAT3, Campbell, Sci, Inc, Logan, Utah, USA), mientras que ρ_{wv} fue medido con un analizador abierto de bióxido de carbono y vapor de agua (open path CO₂/H₂O analyzer, LI-7500; LI-COR; Lincoln, NE, USA). Ambos sensores se montaron en una torre

MATERIALS AND METHODS

Location and characteristics of the study site

The study was conducted during May, June and July 2008, in a pecan nut orchard of Tierra Blanca holdings, in the Mieleras ejido, municipality of Matamoros, Coahuila, México. It is located at 25° 25' N and 103° 18' W, with an elevation of 1200 m. The dimensions of the study area in the orchard were 1120 m in the north-south direction by 400 m east-west. The evaluated trees are Wichita and Western cultivars, 50 years old and average height of 14 m.

The trees are planted in staggered rows with spacing of 15 m. The orchard is watered daily between March and November with a subsurface drip irrigation system. The volume of monthly irrigation varies between months (Table 1).

Determination of the actual crop evapotranspiration with the eddy covariance method

Measurements of latent heat flux (LE), actual evapotranspiration of the trees of the orchard and sensible heat flux (H), were carried out with the eddy covariance method using the following relations (Ham and Heilman, 2003):

$$LE = \overline{Lw'\rho_{wv'}} \quad (1)$$

$$H = \rho_a C_p \overline{w'T_s'} - 0.51Ta \frac{\rho_a C_p}{L} LE \quad (2)$$

where, ρ_a and C_p = air heat density and air heat capacity; L = heat of vaporization of water; Ta = air temperature. The

Cuadro 1. Volúmenes mensuales de agua aplicados (m³ ha⁻¹) durante 2008 en una huerta nogalera, en Tierra Blanca, Matamoros, Coahuila, México.

Table 1. Monthly volumes of water applied (m³ ha⁻¹) during 2008 in a pecan nut orchard, in Tierra Blanca, Matamoros, Coahuila, México.

Mes	Volumen (m ³)
Marzo	600
Abril	900
Mayo	1 500
Junio	1 800
Julio	1 950
Agosto	1 900
Septiembre	1 700
Octubre	900
Noviembre	850
Total annual	12 100

de 16 m de alto (2 m sobre el dosel de los árboles) e instalada en el punto medio del área de estudio dentro de la huerta. El anemómetro sónico tridimensional se orientó hacia el noreste (45°), para obtener una distancia horizontal desde la ubicación de los sensores al límite del área de estudio (fetch) 200 m en un ángulo de $\pm 90^\circ$ respecto a la orientación del anemómetro sónico tridimensional. Por esta razón, sólo se consideraron válidos los datos correspondientes a vientos de esta dirección. La velocidad vertical del viento, la temperatura sónica y la densidad del vapor de agua se midieron con una frecuencia de 10 Hz, y las covarianzas se calcularon cada 30 min. El flujo de vapor de agua se corrigió por efectos de densidad (Webb *et al.*, 1980).

Los flujos de H y LE se corrigieron para cerrar el balance de energía, ya que el método de la covarianza de remolinos es una determinación adecuada de la relación Bowen (H/LE) (Ham y Heilman, 2003). La lámina de agua evapotranspirada para un tiempo determinado se obtuvo dividiendo LE de intervalo entre el calor de vaporización del agua. La temperatura del aire se midió a la misma altura que T_s , con un sensor de temperatura y humedad relativa (HP45C, Vaisala, Inc., Woburn, MA, USA), en una frecuencia de 1 Hz y se promedió cada 30 min.

Para evaluar la precisión de las mediciones de H y LE se determinó el balance de energía sobre el dosel de los árboles:

$$R_n - G = H + LE \quad (3)$$

donde, R_n = radiación neta y G = flujo de calor en la superficie del suelo. La radiación neta se midió con un radiómetro neto (modelo Q7.1, REBS, Inc., Woburn, MA, USA), colocado en la torre a 2 m sobre la copa de los árboles. El flujo de calor en la superficie del suelo se midió con dos transductores de calor (modelo HFT3, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) colocados a 0.08 m bajo la superficie del suelo, uno de ellos en condiciones de sombra y suelo húmedo y el otro en suelo seco expuesto a la radiación solar directa. Esto se hizo para tener un valor promedio de G de la superficie de estudio con el área total sombreada ponderada. A cada valor de G medido a 0.08 m, se sumó el cambio de energía del estrato de suelo sobre el transductor por cambios de temperatura del perfil de suelo (T_s) sobre el sensor (Kanemasu *et al.*, 1992; Kustas *et al.*, 2000). La temperatura del suelo se midió con un termopar (chromel-constantan) de cuatro puntas. Las mediciones (de R_n , G y T_s) se realizaron en una frecuencia de 1 Hz y se generaron promedios de 30 min.

Determinación de la evapotranspiración a equilibrio

El flujo de calor latente a equilibrio (LE_{eq}) (Perez y Catellví, 2002) se obtuvo con la siguiente relación

products $w'\rho_{wv}$ and $w'T_s'$ represent the covariance between the vertical wind speed (w) and the density of water vapor (ρ_{wv}) and the sonic temperature (T_s). The sonic temperature ($^\circ\text{C}$) is obtained from the measurements of the sound speed and the tridimensional wind speed. The horizontal bar represents the mean value of the product of deviations in a time segment.

Vertical wind speed and sonic temperature were measured with a 3-D sonic anemometer (CSI-CSAT3 Campbell, Sci, Inc, Logan, Utah, USA), while pwv was measured with an open path analyzer of carbon dioxide and water vapor (open path $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ analyzer, LI-750; LI-COR; Lincoln, NE, USA). Both sensors were mounted on a tower 16 m high (2 m above the canopy of trees) and installed at the midpoint of the study area within the orchard. The 3-D sonic anemometer was oriented toward the northeast (45°), to obtain a horizontal distance from the location of sensors to the limit of the study area (fetch) of 200 m at an angle of $\pm 90^\circ$ in regard to the orientation of the 3-D sonic anemometer. For this reason, only data corresponding to winds in this direction were considered valid. Vertical wind speed, sonic temperature and density of water vapor were measured with a frequency of 10 Hz and covariances were calculated every 30 min. Water vapor flux was corrected by effects of density (Webb *et al.*, 1980)

H and LE fluxes were corrected to the energy balance closure, since the eddy covariance method is an accurate determination of the Bowen ratio (H/LE) (Ham and Heilman, 2003). The amount of evapotranspired water for a given time was obtained by dividing LE of interval between the heat of vaporization of water. The air temperature was measured at the same height that T_s , with a temperature sensor and relative humidity (HP45C, Vaisala, Inc., Woburn, MA, USA), at a frequency of 1 Hz and averaged every 30 min.

To evaluate the accuracy of measurements of H and LE the energy balance over the canopy of the trees was determined:

$$R_n - G = H + LE \quad (3)$$

where, R_n = net radiation and G = soil surface heat flux. Net radiation was measured using a net radiometer (model Q7.1, REBS, Inc., Woburn, MA, USA), located at 2 m above the canopy of the trees. The soil surface heat flux (G) was measured with two heat transducers (model HFT3, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) which were placed at 0.08 m below the soil surface, one of them under shadow conditions and humid soil and the other in dry soil exposed to direct solar radiation. This was done to have an average value of G of the study surface with a total shaded, pondered area. For each value of G measured at 0.08 m, the energy exchange

$$LE_{equ} = \frac{S}{S + \gamma} [R_n - G] \quad (4)$$

donde, S = pendiente de la curva de presión de vapor a saturación a la temperatura del aire (Pa K^{-1}); R_n y G = radiación neta y el flujo de calor en el suelo (W m^{-2}) medidos como ya se describió; γ = constante psicrométrica de la localidad (Pa K^{-1}), la que se obtuvo con la relación:

$$\gamma = \frac{PC_p}{0.622 L} \quad (5)$$

donde, P = la presión barométrica de la localidad (Pa); C_p = capacidad calorífica del aire ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$); y L = calor de vaporización del agua (J Kg^{-1}). La lámina de agua correspondiente a la evapotranspiración a equilibrio (ET_{equ}) se obtuvo dividiendo el flujo de calor latente a equilibrio integrado de un determinado intervalo de tiempo entre el calor de vaporización del agua.

Cuando en una determinada localidad hay un efecto fuerte de advección local en la tasa de evapotranspiración de la superficie vegetal, el flujo de calor latente a equilibrio es multiplicado por un factor de advección para obtener la evapotranspiración de la superficie en función de la evapotranspiración a equilibrio (Priestley y Taylor, 1972; Pérez y Castellví, 2002; Jiyane y Zermeno-González, 2003).

El enfoque de la evapotranspiración a equilibrio se podría utilizar para evaluar la eficiencia del riego en una determinada superficie vegetal (Rana *et al.*, 1997). Así, una evapotranspiración medida (ET_r), aproximadamente igual a la evapotranspiración a equilibrio (ET_{equ}), indicaría un efecto mínimo o nulo de la advección local en la tasa de evapotranspiración de la superficie vegetal, y que el volumen de agua aplicado en los riegos es adecuado para la demanda hídrica del cultivo. Por el contrario, si ET_r es mucho menor que ET_{equ} , representaría un déficit del riego aplicado a la superficie vegetal. Cuando ET_r es mucho mayor que ET_{equ} muestra un efecto fuerte de la advección local en la tasa de evapotranspiración de la superficie vegetal, y debe considerarse un factor de advección para determinar ET_r en función de ET_{equ} . Si el resultado de multiplicar ET_{equ} por el factor de advección es aproximadamente igual a ET_r se supone una buena programación de las láminas de agua aplicadas en los riegos.

La ET_r y ET_{equ} total del día (de 08:00 a 20:00 h) se obtuvo integrando los datos promediados en intervalos de 30 min de ET_r y ET_{equ} en el intervalo de tiempo mencionado. Se consideraron únicamente los días cuando la evapotranspiración se obtuvo para intervalos de tiempo de aproximadamente las 08:00 a las 20:00 h (ET diaria). El análisis de varianza entre los valores integrados de ET_r y ET_{equ} de los días de cada mes se realizó con la prueba

of the soil layer on the transducer was added by temperature changes of the soil profile (T_s) on the sensor (Kanemasu *et al.*, 1992; Kustas *et al.*, 2000). The soil temperature (T_{soil}) was measured with a soil thermocouple (chromel-constantan) of four ends. The measurements (of R_n , G and T_{soil}) were carried out in a frequency of 1 Hz and 30 min averages were generated.

Determination of equilibrium evapotranspiration

The equilibrium latent heat flux (LE_{equ}) (Perez and Catellví, 2002) was obtained with the following relationship

$$LE_{equ} = \frac{S}{S + \gamma} [R_n - G] \quad (4)$$

where, S = slope of the curve relating saturation vapor pressure to air temperature (Pa K^{-1}); R_n and G = net radiation and the soil heat flux (W m^{-2}) measured as already described; γ = psychrometric constant of the locality (Pa K^{-1}), which was obtained with the relation:

$$\gamma = \frac{PC_p}{0.622 L} \quad (5)$$

where, P = the barometric pressure of the locality (Pa); C_p = air heat capacity ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$); and L = heat of the vaporization of water (J Kg^{-1}). The amount of water corresponding to the equilibrium evapotranspiration (ET_{equ}) was obtained dividing the latent heat flux in the integrated equilibrium of a given time segment by the heat of vaporization of water.

When in a given locality there is a strong effect of local advection on the evapotranspiration rate of the vegetated surface, the equilibrium latent heat flux is multiplied by an advection factor to obtain the evapotranspiration of the surface based on the equilibrium evapotranspiration (Priestley and Taylor, 1972; Pérez and Castellví, 2002; Jiyane and Zermeno-González, 2003).

The equilibrium evapotranspiration approach may be used to evaluate the efficiency of irrigation in a given vegetated surface (Rana *et al.*, 1997). Thus, a measured evapotranspiration (ET_r) approximately similar to the equilibrium evapotranspiration (ET_{equ}), would indicate a minimal or null effect of local advection on evapotranspiration rate of the vegetated surface, and the volume of water applied in irrigation is adequate for the crop water demand. On the contrary, if ET_r is much lower than ET_{equ} , it would represent a deficit in irrigation applied to the vegetated surface. When ET_r is much higher than ET_{equ} , a strong effect of the local advection on evapotranspiration rate of the vegetated surface is shown, and must be considered an advection factor determining ET_r in function of ET_{equ} . If the result of

t -student ($p \leq 0.01$), donde las repeticiones fueron el número de días considerados en cada mes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos de mayo, junio y julio, correspondientes al periodo de mayor desarrollo foliar, fueron analizados. En promedio, el error del cierre del balance de energía de los flujos integrados (R_n , H , LE , y G) de 08:00 a 20:00 h fue menor de 15 %. Esto indicó que la medición de los flujos de calor sensible y latente por el método de la covarianza de remolinos fue adecuada (Foken *et al.*, 2006; Foken, 2008).

Las curvas de la Figura 1 corresponden a diferentes fechas de mayo, junio y julio (patrones similares se observaron en los otros días de cada mes) y muestran gran similitud entre el flujo de LE y el flujo de LE_{equ} a través del día. En ellas se aprecia el efecto

multiplying ET_{equ} by the advection factor is approximately equal to ET_r , it is assumed a good programming of the amount of water applied in irrigation.

The total ET_r and ET_{equ} of the day (from 08:00 to 20:00 h) was obtained integrating the data averaged in 30 min of ET_r and ET_{equ} in the time interval mentioned. Only the days when evapotranspiration was obtained for time intervals of about 08:00 to 20:00 h (daily ET) were considered. The analysis of variance between the integrated values of ET_r and ET_{equ} of the days of each month was performed with the student's t -test ($p \leq 0.01$), where replications were the number of days considered in each month.

RESULTS AND DISCUSSION

The data for May, June, and July, for the period of greatest foliar development, were analyzed. On average, the error of the close of energy balance of the

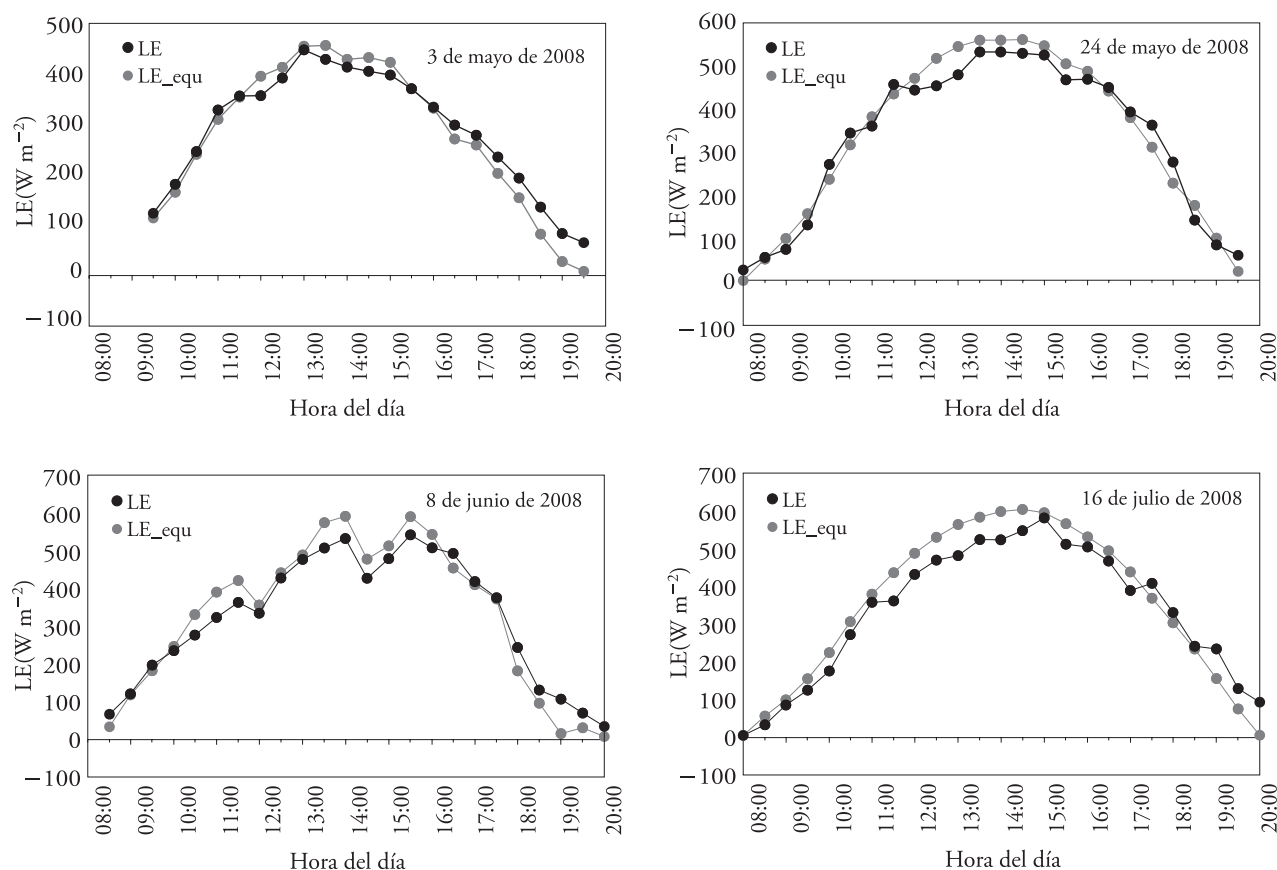


Figura 1. Distribución del flujo de calor latente medido (LE) y de calor latente a equilibrio (LE_{equ}) a través del día, observada los días 3, 24 de mayo, 8 de junio y 16 de julio de 2008, en una huerta de nogal pecanero en Tierra Blanca, Matamoros, Coahuila, México.

Figure 1. Distribution of the measured latent heat flux (LE) and equilibrium latent heat flux (LE_{equ}) through the day, observed during the days May 3, 24, June 8, and July 16, 2008, in a pecan nut orchard in Tierra Blanca, Matamoros, Coahuila, México.

de advección local pequeño a partir de las 17:30 h ($LE > LE_{equ}$). Este resultado se debió a un desplazamiento de masas de aire caliente y seco de los alrededores (superficies secas y calientes) hacia el interior de la huerta, que se presentó cíclicamente por las tardes y que afectó ligeramente el flujo de LE (Tolk *et al.*, 2006). Lee *et al.* (2004) mencionan que el flujo de LE de cultivos bien regados puede exceder la radiación neta, por el exceso de energía, proveído por una advección de calor sensible proveniente de campos adyacentes secos. Debido a que en este estudio el efecto de la advección local fue pequeño, no se requirió incluirlo como factor para determinar el flujo de calor latente real en función del flujo de calor latente a equilibrio. En superficies agrícolas de zonas áridas se ha observado un efecto elevado de advección local en la tasa de evapotranspiración, principalmente en cultivos y superficies vegetales de porte bajo, con factor de advección mayor a 1.20 (Priestley y Taylor, 1972; Leite *et al.*, 1990; Jiyane y Zermeño-González, 2003). En este estudio el efecto de la advección local fue pequeño, aunque se realizó en una zona árida. Este resultado puede indicar que en las zonas agrícolas con riego, de las zonas áridas, el efecto de la advección local en cultivos de porte alto es menor que en los cultivos de porte bajo.

Con los valores integrados de flujo de LE y LE_{equ} medidos en diferentes intervalos de tiempo, entre las 08:00 y las 20:00 h (sólo se consideraron los datos con dirección del viento en el intervalo indicado), se obtuvo la evapotranspiración real o medida (ETr) y la evapotranspiración a equilibrio ($ETequ$) para los mismos intervalos de tiempo. Esto se logró para la mayoría de los días de mayo, junio y julio.

El análisis de varianza entre los valores integrados diarios de ETr y $ETequ$ de mayo, junio y julio mostró similitud significativa entre ellos. Los valores medios de ETr y $ETequ$ fueron iguales entre los meses ($p > 0.01$). La relación $ETr/ETequ$ para esos meses fue 1.015, 0.996 y 0.936 con coeficientes de determinación (R^2) de 0.950, 0.869 y 0.931 (Figura 2). Esto mostró que la advección local tuvo efecto mínimo en la tasa de evapotranspiración de los árboles de la huerta, y que el enfoque de la evapotranspiración a equilibrio podría implementarse para determinar el consumo de agua de la huerta.

En mayo el valor promedio de ETr fue 5.12 mm d^{-1} , por lo que el volumen de agua evapotranspirado por ha para este mes (31 d) fue 1587.2 m^3 . El

integrated fluxes (Rn , H , LE , and G) from 08:00 to 20:00 h was less than 15 %. This indicated that the measurement of the sensible and latent heat fluxes by the eddy covariance method was adequate (Foken *et al.*, 2006; Foken, 2008).

The curves in Figure 1 correspond to different dates of May, June, and July (similar patterns were observed in the other days of each month) and they show great similarity between LE flux and LE_{equ} flux through each day. In them the small effect of local advection can be appreciated starting from the 17:30 h ($LE > LE_{equ}$). This result was due to an input of hot and dry air masses of the surroundings (dry and hot surfaces) into the orchards which were cyclically presented in the evenings and slightly affected the LE flux (Tolk *et al.*, 2006). Lee *et al.* (2004) mention that the LE flux of well-irrigated crops can exceed net radiation, by the energy excess, supplied by an advection of sensible heat from adjacent dry fields. Because in this study the effect of the local advection was small, it was not required to include it as a factor in determining the actual latent heat flux in function of the equilibrium latent heat flux. In arid agricultural areas, a large effect of local advection has been observed on the evapotranspiration rate, particularly in crops and vegetated areas of low growing plants with an advection factor greater than 1.20 (Priestley and Taylor, 1972; Leite *et al.*, 1990; Jiyane and Zermeño-González, 2003). In this study the advection effect was small, although it was conducted in an arid area. This result may indicate that in agricultural areas under irrigation of the arid areas, the effect of local advection on tall growing crops is lower than in low growing crops.

With the integrated values of LE and LE_{equ} fluxes measured at different time intervals between 08:00 and 20:00 h (only data with wind direction at the specified interval were considered), the actual or measured evapotranspiration (ETr) and equilibrium evapotranspiration ($ETequ$) were obtained for the same time intervals. This was achieved for most days of May, June, and July.

The analysis of variance between the integrated daily values ETr and $ETequ$ of May, June and July showed significant similarity between them. The mean values of ETr and $ETequ$ were similar between the months ($p > 0.01$). The $ETr/ETequ$ ratio for those months was 1.015, 0.996 and 0.936 with coefficients of determination (R^2) of 0.950, 0.869 and 0.931

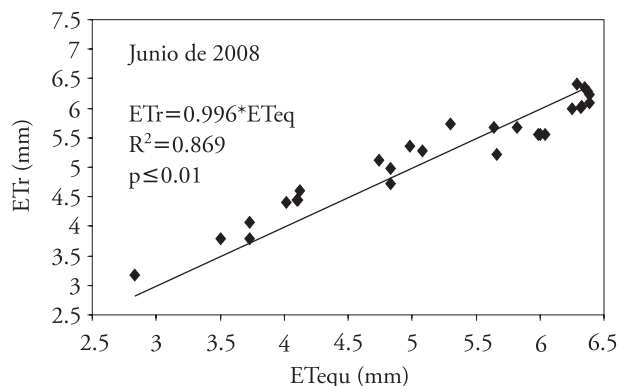
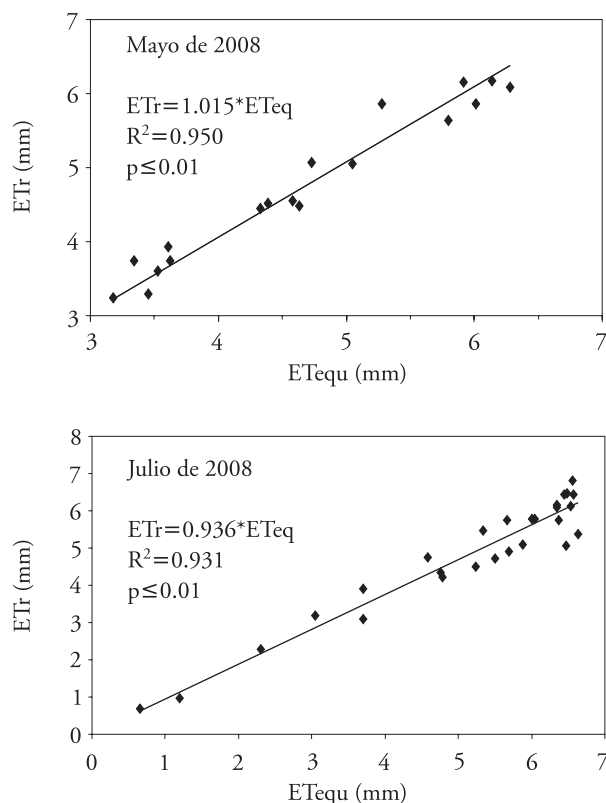


Figura 2. Relación entre evaporación real (ETr) y evapotranspiración a equilibrio ($ETeq$) observados en mayo, junio y julio de 2008 en una huerta de nogal pecanero en Tierra Blanca, Matamoros, Coahuila, México.

Figure 2. Relation between actual evaporation (ETr) and equilibrium evapotranspiration ($ETeq$) observed in May, June, and July 2008 in a pecan nut orchard in Tierra Blanca, Matamoros, Coahuila, México.

volumen de agua aplicado (Cuadro 1) fue 1500 m^3 , de lo que se deduce que hubo un pequeño déficit de agua ($87 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) que los árboles de la huerta consumieron de una fuente diferente al riego.

En junio la ETr promedio diaria fue 5.89 mm , y la $ETeq$ promedio diaria fue 6.01 mm , lo que correspondió a un volumen de agua evapotranspirado de 1767 y $1803 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. En junio se aplicó un volumen de riego de 1800 m^3 ; es decir, hubo un manejo adecuado del riego en ese mes.

Durante julio la ETr promedio diaria fue 5.5 mm , y la $ETeq$ promedio diaria fue 5.9 mm , lo que correspondió a un volumen de agua evapotranspirado de 1705 y 1829 m^3 . En julio se aplicó un volumen de riego de 1950 m^3 (Cuadro 1). Si se considera que $ETeq$ corresponde a la máxima tasa de evaporación de la superficie vegetal, entonces hubo un exceso de $120 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de agua aplicados en julio, lo que fue equivalente al 6.6% de exceso de riego.

CONCLUSIONES

La ETr fue similar a $ETeq$, que se obtuvo midiendo la energía disponible sobre el dosel de los árboles de la huerta. Esto mostró la posibilidad de utilizar

(Figure 2). This showed that local advection had minimal effect on the evapotranspiration rate of the trees of the orchard, and that the approach of equilibrium evapotranspiration could be implemented to determine the water consumption of the orchard.

In May the average value of ETr was 5.12 mm d^{-1} , so that the volume of evapotranspired water per ha for this month (31 days) was 1587.2 m^3 . The volume of water applied (Table 1) was 1500 m^3 , which suggests that there was a small deficit of water ($87 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) that the orchard trees consumed from a source different to that of irrigation.

In June the average daily ETr was 5.89 mm , and the average daily $ETeq$ was 6.01 mm , corresponding to a volume of evapotranspired water of 1767 and $1803 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. In June a volume of irrigation of 1800 m^3 was applied; that is, there was proper management of irrigation in that month.

During July the average daily ETr was 5.5 mm , and the average daily $ETeq$ was 5.9 mm , corresponding to a volume of evapotranspired water of 1705 and 1829 m^3 . In July a volume of irrigation of 1950 m^3 was applied (Table 1). Assuming that $ETeq$ corresponds to the maximum evaporation rate of the

el enfoque de *ET_{equ}* para determinar el consumo de agua (*ET_r*) de la huerta.

Se observó efecto pequeño o nulo de advección local en la tasa de evapotranspiración de la huerta. Esto posiblemente indicó que el efecto de advección local en la agricultura de riego de las zonas áridas es menos pronunciado en cultivos de mayor altura que en cultivos de porte bajo.

LITERATURA CITADA

- Andales, A., J. Wang, T. W. Sammis, J. G. Mexal, L. J. Simmons, D. R. Miller, and V. P. Gutschick. 2006. A model of pecan tree growth for the management of pruning and irrigation. *Agric. Water Manage.* 84: 77-88.
- Burba, G. G., and D. J. Anderson. 2007. Introduction to the eddy covariance method: General guidelines and conventional workflow. LI-COR Biosciences. 141 p.
- Castellví, F. 2007. La estimación del flujo de calor latente. Una reflexión de futuro. *Tethys*. 4: 19-27.
- Chávez, E., G. González, M. Rivera, J. Estrada, y J. L. González. 2006. El consumo hídrico en nogal pecanero, a partir del monitoreo ambiental y el uso de la telemetría. *Agrofaz* 6(3): 315-322.
- Foken, T. 2008. The energy balance closure problem: An overview. *Ecol. Appl.* 18(6): 1351-1367.
- Foken, T., F. Wimmer, M. Mauder, C. Thomas, and C. Liebethal. 2006. Some aspect of the energy balance closure problem. *Atmos. Chem. Phys.* 6: 4395-4402.
- Godoy-Avila, C., e I. López-Montoya. 2000. Desarrollo de la almendra y germinación del fruto del nogal pecanero bajo cuatro calendarios de riego. *Terra Latin*. 18(4): 305-311.
- Ham, J. M., and Heilman J. L. 2003. Experimental test of density and energy-balance corrections on carbon dioxide flux as measured using open-path eddy covariance. *Agron. J.* 95: 1393-1403.
- Howell, T. A., S. R. Evett, A. D. Schneider, R. W. Todd, and J. A. Tolk. 1998. Evapotranspiration of irrigated fescue grass in a semi-arid environment: ASAE Meeting Presentation, paper No. 982117.
- Jiyane, J., y A. Zermeno-González. 2003. Aplicación del enfoque de evapotranspiración a equilibrio en la agricultura de riego en zonas áridas. *Agrociencia* 37: 553-563.
- Kanemasu, E. T., S. B. Verma, S. A. Smith, L. J. Frittschen, M. Wesely, R. T. Field, W. P. Kustas, H. Weaver, J. B. Stewart, R. J. Gurney, G. Panon, and J. B. Moncrieff. 1992. Surface flux measurements in FIFE: an overview. *J. Geophysics Res.* 97: 18547-18555.
- Kustas, W. P., J. H. Prueger, and J. L. Hatfield. 2000. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. *Agric. For. Meteorol.* 103: 249-264.
- Leite, M. L., G. C. Sediya, D. T. Coelho, y H. A. Vieira. 1990. Determinação da evapotranspiração de equilibrio numa superfície cultivada com Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em duas densidades de plantio. *Rev. Ceres* 37: 99-110.
- Lee, X., Q. Yu, X. Sun, J. Liu, Q. Min, Y. Liu, and X. Zhang. 2004. Micrometeorological fluxes under the influence of

vegetated surface, then there was an excess of 120 m³ ha⁻¹ of water applied in July, which was equivalent to 6.6 % of over-watering.

CONCLUSIONS

ET_r was similar to *ET_{equ}*, which was obtained by measuring the available energy on the canopy of the orchard trees. This showed the possibility of using the *ET_{equ}* approach to determine the consumptive water (*ET_r*) in the orchard.

It was observed little or null effect of local advection on the evapotranspiration rate of the orchard. This possibly indicated that the effect of local advection on irrigate agriculture in arid zones is less pronounced in taller crops than in low growing crops.

—End of the English version—



- regional and local advection: A review. *Agric. For. Meteorol.* 122: 111-124.
- Pérez, P. J., y F. Castellví. 2002. Análisis de la evapotranspiración a escala local y regional en Cataluña. *Ingeniería del Agua* 9(1): 59-72.
- Priestley, C. H. B., and R. T. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Rev.* 100: 81-92.
- Rana, G., N. Katerji, M. Mastrorilli, M. El Moujabber, and N. Brisson. 1997. Validation of a model of actual evapotranspiration for water stressed soybeans. *Agric. For. Meteorol.* 86: 215-224.
- Simmons, L. J., J. Wang, T. W. Sammis, and D. R. Miller. 2007. An evaluation of two inexpensive energy-balance techniques for measuring water use in flood-irrigated pecans (*Carya illinoensis*). *Agric. Water Manage.* 88(1-3): 181-191.
- Tolk, J. A., S. R. Evett, and T. A. Howell. 2006. Advection on evapotranspiration of alfalfa in a semiarid climate. *Agron. J.* 98: 1646-1654.
- Wang, J., T. W. Sammis, A. A. Andales, L. J. Simmons, V. P. Gutschick, and D. R. Miller. 2007. Crop coefficients of open-canopy pecan orchards. *Agric. Water Manage.* 88(1-3): 253-262.
- Warland, J., and K. Taillon. 2002. Spatial variability of eddy covariance measurements: A comparison of two identical eddy correlation systems in adjacent plots. *In: 15th Conference on Boundary Layer and Turbulence. Wageningen, The Netherlands.* pp: 1-2.
- Webb, E. K., G. I. Pearman, and R. Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 106: 85-100.
- Zermeno-González, A., and L. E. Hipps. 1997. Downwind evolution of surface fluxes over a vegetated surface during local advection of heat and saturation deficit. *J. Hydrology* 192: 189-210.