

HABILIDAD DE ESTIMACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA UNA ZONA SEMIÁRIDA DEL CENTRO DE MÉXICO*

SUITABILITY OF EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION METHODS FOR SEMIARID CENTRAL MEXICO

Rebeca Vásquez-Méndez^{1§}, Eusebio Jr. Ventura-Ramos¹ y Jorge A. Acosta-Gallegos²

¹Posgrado en Ingeniería de Recursos Hídricos y Ambiental. Universidad Autónoma de Querétaro. Cerro de las Campanas, Querétaro, México. C. P. 76010. Tel. 01 442 1921200. Ext. 6023. (eventura@uaq.mx). ²Campo Experimental Bajío. INIFAP. Carretera Celaya-San Miguel de Allende, km 6.5. Colonia Roque, Celaya, Guanajuato, México. C. P. 38110. Tel. 01 46 16115323. Ext. 164. (acosta.jorge@prodigy.net.mx). [§]Autora para correspondencia: rebecavm@gmail.com.

RESUMEN

En zonas áridas y semiáridas, el proceso de evapotranspiración constituye una gran pérdida de agua hacia la atmósfera, por lo que existe una necesidad por entender y cuantificar este proceso, especialmente en los ambientes semiáridos donde los recursos hídricos son escasos. Muchos métodos para estimar la evapotranspiración están disponibles; sin embargo, su desempeño bajo un ambiente específico tiene que ser evaluado antes de realizar una selección. Se utilizó una estación meteorológica para tomar datos de una zona semiárida del centro de México, con el propósito de evaluar ocho diferentes métodos a una escala de observación diaria, semanal y mensual. Los resultados estimados se compararon con datos medidos de un ET gage company, ya que este instrumento ha sido calibrado y probado de estar estrechamente asociado a los datos de evapotranspiración de referencia. El error absoluto medio, el error de la media cuadrática, la intercepción y pendiente de la regresión lineal y el coeficiente de determinación R^2 , fueron obtenidos para evaluar estadísticamente el desempeño de los métodos evaluados. Se encontró un bajo desempeño para todas las escalas de tiempo de los métodos Oudin, McGuinness, Jensen y Haise, y Romanenko, con altos valores de error absoluto medio y error de la media cuadrática. Parámetros

ABSTRACT

In arid and semiarid areas, the evapotranspiration process constitutes a major loss of water to the atmosphere, prompting the need for a better understanding and quantification of this phenomenon, especially in semiarid environments where water resources are scarce. There are many available methods to estimate evapotranspiration; however, their performance in specific environments must be evaluated before making a selection. A weather station was used to collect data from a semiarid zone of Central Mexico with the purpose to evaluate eight different methods for daily, weekly and monthly periods of observation. The estimated results were compared with measured data from an ET gage company, as this device has been calibrated and proven to be closely associated to reference evapotranspiration data. The mean absolute error, root mean squared error, regression line intercept and slope, as well as determination coefficient R^2 , were obtained to statistically evaluate the performance of evaluated methods. A poor performance for all time scales was found for the Oudin, McGuinness, Jensen and Haise, and Romanenko methods, with high values of mean absolute error and root mean squared error. Low values of the intercept, slope and R^2 parameters

* Recibido: octubre de 2010
Aceptado: abril de 2011

de valores bajos de intercepción, pendiente y R^2 ; fueron obtenidos también para estos métodos, haciéndolos impropios y por lo tanto no recomendables para el área de estudio. Por otra parte, los métodos Penman-Monteith y Penman, mostraron el mejor desempeño a diferentes escalas de tiempo. Resultados similares se han encontrado por otros autores, apoyando el método de referencia de Penman-Monteith. Se obtuvo una ecuación de regresión múltiple para predecir la evapotranspiración de referencia derivada de las variables climáticas, con valores de $R^2=0.8, 0.82$ y 0.91 para escalas diarias, semanales y mensuales, respectivamente, indicando la posibilidad de usar modelos de regresión para condiciones semiáridas.

Palabras clave: variables meteorológicas, evapotranspiración, ambiente semiárido.

INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración (ET) constituye una de las principales pérdidas de agua en regiones semiáridas, de tal manera que su evaluación o predicción es crucial para el análisis de los balances hídricos en terrenos agrícolas y con vegetación natural (Domingo *et al.*, 1999). Dado que la disponibilidad de los recursos hídricos para la agricultura se vuelve cada vez más limitante, debido al crecimiento de la población, la competencia por parte de otros usos de agua, la ocurrencia de sequía y degradación de la calidad del agua, la importancia de la evapotranspiración como un componente mayor del uso de agua en la agricultura es cada vez más significativa (García *et al.*, 2004). La cuantificación de la evapotranspiración es importante para el desarrollo de estrategias efectivas para la conservación del suelo y agua (Aydin, 2008).

Los modelos de predicción pueden ser usados para estimar las pérdidas de agua para diferentes ambientes y clima, pero su desempeño, tanto espacial y temporalmente, tiene que ser evaluado antes de que se usen en condiciones específicas. Aunque varios métodos han sido propuestos para estimar ET, no hay un consenso universal sobre la adecuabilidad de alguna ecuación específica para un clima dado, y normalmente requieren de calibraciones locales rigurosas (DehghaniSanij *et al.*, 2004; Ahmadi y Foodlandmand, 2008).

El modelo de Penman-Monteith es probablemente el método más ampliamente aceptado para la estimación mensual de la evapotranspiración de referencia (ET_0). Aunque este

were also obtained for such methods, making them not suitable and consequently not suited for the study area. On the other hand, the Penman-Monteith and Penman methods, showed the best performance in different time scales. Similar results have been found by other authors, supporting Penman-Monteith as a method of reference. A multiple regression equation to predict reference from climatic variables was also obtained with $R^2=0.8, 0.82$ and 0.91 for daily, weekly and monthly scales, respectively, indicating the possibility of using regression models for semiarid conditions.

Key words: climatic variables, evapotranspiration, semiarid environment.

INTRODUCTION

Evapotranspiration (ET) constitute a major source of water loss in semiarid areas; thus, its evaluation or prediction is crucial for the analysis of water balances in naturally vegetated and agricultural lands (Domingo *et al.*, 1999). As the water resources available for agriculture become limiting due to population growth, competition from other water uses, droughts and water quality degradation, the importance of evapotranspiration as a major component of water use in agriculture is more significant (García *et al.*, 2004). The quantification of evapotranspiration is important for the development of effective strategies to conserve soil and water (Aydin, 2008).

Prediction models can be used to estimate water losses for different climates or environments, but their performance, both timely and spatially, has to be evaluated before they are used in specific conditions. Although several methods have been proposed to estimate ET, there is no universal consensus on the suitability of any given equation for a given climate, and normally they require rigorous local calibrations (DehghaniSanij *et al.*, 2004; Ahmadi and Foodlandmand, 2008).

Penman-Monteith is probably the most widely accepted method for estimating monthly reference evapotranspiration (ET_0). Although this method is appropriate for different climates, the calculation of ET_0 requires several input data, such as minimum and

método es apropiado para diferentes climas; el cálculo de ET_0 requiere de varios datos de entrada, tales como valores mínimos y máximos de temperatura, humedad relativa, horas de insolación, velocidad del viento, y radiación solar (Allen *et al.*, 2006; Ahmadi y Foodlandmand, 2008).

La radiación solar es importante y ha sido considerado como uno de los principales parámetros de entrada en muchos estudios de simulación (Bandyopadhyay *et al.*, 2008). Varios investigadores han caracterizado los sitios de estudio con el propósito de predecir ET usando diferentes modelos de ET (Oudin *et al.*, 2005; Douglas *et al.*, 2009). Una muestra de 308 cuencas localizados en Australia, Francia y los Estados Unidos fue utilizada para el estudio de Oudin *et al.* (2005) con el propósito de optimizar un método para la evapotranspiración potencial (ETP) en un modelo lluvia-escurrimiento.

La selección del método para áreas semiáridas no es tarea sencilla; en tales regiones, la precipitación presenta típicamente una gran variabilidad espacial y temporal, y la cuantificación de la ET es difícil y constituye una fuente significativa de incertidumbre en el balance regional hídrico (Contreras *et al.*, 2008). El componente de evapotranspiración ha sido probablemente el componente más difícil de cuantificar y medir experimentalmente (Cui y Zornberg, 2008). Uno de los métodos utilizados más simples es de Thornthwaite, el cual requiere sólo de datos de temperatura. Sin embargo, se ha encontrado que este método subestima la ET en zonas áridas y la sobreestima en climas húmedos ecuatoriales (Ahmad y Foodlandmand, 2008). Además, el método necesita la calibración del factor k para diferentes climas (Al-Ghobari, 2000).

El método de Priestley-Taylor usa el coeficiente α , el cual necesita ser calibrado para diferentes áreas y variables climáticas (Lhomme, 1997). Las redes neuronales artificiales (RNA) usadas en el norte de Irán, consideran variables como la temperatura mínima y máxima, así como la radiación extraterrestre (Rahimikhoob, 2009). En general, la cuantificación de la ET ha sido conducida típicamente usando aproximaciones de balance de energía o métodos indirectos de balance hídrico. En el semiárido central mexicano, las mediciones de ET son muy limitadas o no están disponibles.

Por lo tanto, es necesaria una evaluación de modelos selectos aplicables en zonas semiáridas, así como su desempeño para diferentes intervalos de tiempo. El objetivo de este

maximum values of both air temperature and relative humidity, sunshine hours, windspeed, and solar radiation (Allen *et al.*, 2006; Ahmadi and Foodlandmand, 2008).

Solar radiation is important and has been considered a major input in many simulation studies (Bandyopadhyay *et al.*, 2008). Several researches have characterized the study site with the purpose of predicting ET using different ET models (Oudin *et al.*, 2005; Douglas *et al.*, 2009). A sample of 308 catchments located in Australia, France and the United States of America was used for the study of Oudin *et al.* (2005) with the purpose optimizing a method for potential evapotranspiration (PET) in a rainfall-runoff model.

The single selection of a method for semiarid areas is not an easy task. In those areas, precipitation is typically highly variable in space and time, and the quantification of ET is difficult and constitutes a major source of uncertainty in the regional water balance (Contreras *et al.*, 2008). The evapotranspiration component has probably been the most difficult component to quantify and measure experimentally (Cui and Zornberg, 2008). One of the simplest used methods is the Thornthwaite Method, which requires only temperature data. However, it has been found that it underestimates ET in arid areas and overestimates it in the equatorial humid climates (Ahmadi and Foodlandmand, 2008). Also, the method needs a calibrated k factor for different climates (Al-Ghobari, 2000).

The Priestley-Taylor method utilizes the α coefficient, which needs to be calibrated for different areas and climatic variables (Lhomme, 1997). The artificial neural networks (ANNs) used in north of Iran, considers variables like maximum and minimum air temperature and extraterrestrial radiation (Rahimikhoob, 2009). In general, quantification of ET has been typically conducted using energy balance approaches or indirect water balance methods. In semiarid Central Mexico, measurements of ET are very limited or they are not available.

Then, an evaluation of selected models to be applied in semiarid areas and their performance for different time intervals is necessary. The objective of this study was to evaluate different methods to estimate the reference evapotranspiration (ET_0) and compared it with the observed evapotranspiration measured with an atmometer (ET gage, model E), for different time scales in

estudio fue evaluar diferentes métodos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_0) y comparar los resultados con la evapotranspiración medida con un atmómetro (ET gage, model E), para diferentes escalas de tiempo en un ambiente semiárido. En adición, se realizó un análisis de regresión entre los datos observados de ET y variables climáticas relacionadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se localiza en Cadereyta de Montes, en el estado de Querétaro, en un ambiente semiárido típico del Centro de México (clima BS, en la clasificación de Köppen), localizado en las coordenadas 99° 46' 46" longitud oeste y 20° 43' 49" latitud norte a 2 069 msnm. La vegetación predominante en la región son el bosque tropical caducifolio y nopaleras. La temperatura y precipitación media anual son 17 °C y 480 mm respectivamente, tal como lo reporta INEGI (1996).

Toma de datos

La evapotranspiración se midió con un atmómetro (ET gage, Modelo E), instalado a una altura de 1.2 m. Los atmómetros han sido usados exitosamente en la estimación de la evapotranspiración bajo diferentes ambientes (Shanon, 1968; Broner y Law, 1991; ErvinyKoski, 1997; Gavilan y Castillo-Llanque, 2009). Los periodos de monitoreo incluyeron de mayo a noviembre de 2006 y de mayo a octubre de 2008, en concordancia con la estación de lluvias y como consecuencia con mayor dinámica de la humedad del suelo. Los datos de temperatura del aire, humedad relativa, presión barométrica, velocidad de viento y radiación solar, fueron obtenidos usando una estación meteorológica con datalogger (CR1000, Campbell Scientific Co.), localizada en el sitio de estudio.

La evapotranspiración del ET gage y todos los datos climáticos fueron registrados automáticamente cada 20 min. Ocho modelos de evapotranspiración potencial fueron usados para estimar ET y fueron comparados con los valores observados. Las ecuaciones generales para los métodos seleccionados se observan en la Cuadro 1.

a semiarid environment. In addition, a regression analysis between observed PET values and climatic variables was performed.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The study site is located in Cadereyta de Montes, Querétaro, in a typical semiarid environment of Central Mexico (BS, Köppen definition), located at 99° 46' 46" west longitude, 20° 43' 49" north latitude and 2 069 masl. The tropical deciduous forest and prickly forest are the predominant vegetation in the region. Mean annual temperature and precipitation are 17 °C and 480 mm, respectively; as reported by INEGI (1996).

Collection of data

Measured evapotranspiration was collected using an atmometer (ET gage, model E) installed at a height of 1.2 m. Atmometers have long been used in estimating evapotranspiration under different environments successfully (Shanon, 1968; Broner and Law, 1991; Ervin and Koski, 1997; Gavilan and Castillo-Llanque, 2009). Monitoring periods included from May to November in 2006 and from May to October in 2008, in agreement with the rainy season and consequently with a more significant dynamic of soil moisture. Air temperature, relative humidity, barometric pressure, wind velocity and solar radiation data was obtained using a meteorological station with datalogger (CR1000, Campbell Scientific Co.), located in the study site.

Evapotranspiration from the ET gage and the entire climate data were automatically recorded every 20 min. Eight potential evapotranspiration models were used to estimate ET from these climate parameters and compared with observed values. General equations for the selected methods are observed in Table 1.

Methods description

The Penman (1948) method was developed with an aerodynamic basis in which evaporation is regarded as due to turbulent transport of vapor by a process of eddy

Cuadro 1. Modelos de evapotranspiración potencial y sus ecuaciones.
Table 1. Potential evapotranspiration equations.

| Modelo | Ecuación | Referencia |
|---------------------|--|----------------------------|
| Penman | $ET = \frac{\Delta R_n + \lambda(e_s - e_d)(2.6(1+0.536U))}{\lambda\rho(\Delta + \lambda)}$ | Penman (1948) |
| Romanenko | $ET = 4.5 \left[1 + \frac{T}{25} \right]^2 \left[1 - \frac{e_d}{e_s} \right]$ | Romanenko (1961) |
| Jensen y Haise | $ET = \frac{R_e}{\lambda\rho} \frac{T}{40}$ | Jensen y Haise (1963) |
| McGuinnessy Bordne | $ET = \frac{R_e}{\lambda\rho} \frac{T + 5}{68}$ | McGuinness y Bordne (1972) |
| Hargreaves y Samani | $ET = 0.0023 \frac{R_e}{\lambda\rho} (T_{\max} - T_{\min})^{\frac{1}{2}} (T + 17.8)$ | Hargreaves y Samani (1982) |
| Kimberly-Penman | $ET = \frac{\Delta R_n + \lambda(e_s - e_d) \left[0.4 + 0.14 \exp \left(- \left[\frac{J_D - 173}{58} \right]^2 \right) \right] + \left[0.605 + 0.345 \exp \left(- \left[\frac{J_D - 243}{80} \right]^2 \right) \right] U}{\lambda\rho(\Delta + \gamma)}$ | Wright (1982) |
| Penman-Monteith | $ET = \frac{0.408\Delta R_n + \gamma U(e_s - e_d) \left(\frac{900}{T + 237} \right)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U)}$ | Allen <i>et al.</i> (1998) |
| Oudin | $ET = \frac{R_e}{\lambda\rho} \frac{T + 5}{100}$ | Oudin <i>et al.</i> (2005) |

ET= evapotranspiración (mm día⁻¹); Rn= radiación solar neta (J día⁻¹ m⁻²); Re= radiación extraterrestre (J día⁻¹ m⁻²); es= presión de saturación de vapor (kPa); ed= presión actual de vapor (kPa); U= velocidad del viento (m s⁻¹); Jd= día juliano (día); T= temperatura promedio del aire (°C); T_{max}= temperatura máxima del aire (°C); T_{min}= temperatura mínima del aire (°C); Δ= pendiente de la curva de la presión de vapor (kPa °C⁻¹); γ= constante psicométrica (kPa °C⁻¹); λ= calor latente de vaporización (MJ kg⁻¹); ρ= densidad del agua (g cm⁻³).

Descripción de los métodos

El método de Penman (1948) fue desarrollado con una base aerodinámica, en la cual se considera que la evaporación se debe al transporte turbulento de vapor por un proceso de difusión tipo Eddy y una base de energía, de tal manera que la evaporación es uno de los mecanismos de degradación de la radiación incidente. Fue originalmente probado en América y Europa, pero usado posteriormente en el resto del mundo. Los datos de entrada son: horas de insolación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

Jensen y Haise (1963) desarrollaron un método para su uso en campos irrigados de zonas áridas y semiáridas del oeste de los Estados Unidos, cuyo desempeño fue adecuado en la región húmeda del este central. Expresaron los componentes verticales individuales en una ecuación de balance de energía para una zona con vegetación de cultivos. Así mismo, introdujeron el componente ET/Rs, que representa los efectos combinados de reflectancia. La ecuación combina un enfoque

diffusion and an energy basis, in which evaporation is regarded as one of the ways of degrading incoming radiation. It was originally proven in America and Europe, but later used in the rest of the world. The input data are sun hours, temperature, relative humidity and wind velocity.

Jensen and Haise (1963) developed a method for use in irrigated fields of arid and semiarid conditions of the westerns United States of America, but performed adequately in the humid east central region. They expressed the individual vertical components in an energy balance equation for a vegetated crop zone. They introduced the ET/Rs component that represents the combined effects of reflectance. The equation combines an energy balance approach with empirically determined coefficients. The method is widely used and its simplicity is appealing. The input variables that this method uses are radiation and mean temperature.

de balance de energía con coeficientes determinados empíricamente. El método es ampliamente usado por su simplicidad. Este método usa como variables de entrada la radicación y la temperatura media.

McGuinness y Bordne (1972) compararon varios métodos para estimar la ETP a partir de curvas “estándar” obtenidas de lisímetros, como una forma de seleccionar los métodos más apropiados de estimación para áreas húmedas (Parmele y McGuinness, 1974). El método usa temperatura y radiación extraterrestre.

Hargreaves y Samani (1982) observaron que los parámetros más importantes en la estimación de ET son la temperatura y radiación solar. Su método utiliza la temperatura y latitud en una ecuación simple para su determinación. Su desempeño fue evaluado en una escala semanal y mensual, para diferentes latitudes.

Wright (1982) propuso el método de Kimberly-Penman, el cual es un enfoque modificado del método de Penman, que incluye el efecto del viento y depende del movimiento diario de éste, considerando factores empíricos relacionados con la aerodinámica de la superficie de la vegetación (α), la naturaleza general de la localidad y la velocidad del viento en 24 horas a una altura z . El método fue utilizado en un ambiente árido con estimaciones diarias.

El método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) también se basa en el método de Penman (1948). El modelo usa el balance y flujo de energía, y considera la ecuación de referencia a nivel mundial. Este método utiliza un gran número de variables. La información de entrada es la radiación neta, la velocidad del viento, temperatura, presión de saturación de vapor y presión real del vapor.

Oudin *et al.* (2005) propuso un método con el objetivo de desarrollar una ecuación simple dentro de un modelo lluvia-escurrimiento. Los autores encontraron que los modelos de McGuinness y Bordne, Jensen y Haise eran más relevantes para la modelación lluvia-escurrimiento que los modelos tipo Penman. El método fue evaluado en varias localidades utilizando parámetros mensuales.

Estimación del error

Los valores de ET estimados con los modelos, fueron comparados con los valores observados utilizando

McGuinness and Bordne (1972) compared several methods for estimating PET from a lysimeter-derived “standard” PET curve as an aid in selecting appropriate estimating methods for humid areas (Parmele and McGuinness, 1974). The method uses temperature and extraterrestrial radiation.

Hargreaves and Samani (1982) observed that the most important parameters in estimating ET_0 are temperature and solar radiation. This method uses temperature and latitude in a simple equation to determine ET_0 . The performance was evaluated in a weekly and monthly time scale; and for different latitudes.

Wright (1982) proposed the Kimberly-Penman method, which is a modified Penman approach that includes the effect of wind and is dependent upon daily wind travel that involved empirical factors of aerodynamic vegetation surface (α), the general nature of the location, and the 24 h daily wind at height z . It was evaluated in an arid environment with daily estimates.

The Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) method is also based on the Penman (1948) method. The model uses energy balance and fluxes and it is considered the reference equation all over the world. This method uses a great number of variables. The inputs are net radiation, wind velocity, temperature, saturation vapor pressure and actual vapor pressure.

Oudin *et al.* (2005) proposed a method with the objective of developing a simple equation within a rainfall-runoff model. They found that the McGuinness and Bordne, Jensen and Haise models are more relevant for rainfall-runoff modeling than the Penman-type models. The method was been evaluated at many locations using monthly temperatures.

Error estimation

Model estimate ET values were compared to the observed values using standard statistics and regression analysis. Mean absolute error (MAE) and root mean squared error (RMSE) were computed as:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |ET_{mod,i} - ET_{obs,i}|$$

estadísticos estándar y análisis de regresión. El error medio absoluto (EMA) y la raíz del error de la media cuadrática (REMC), fueron calculados con:

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |ET_{\text{mod},i} - ET_{\text{obs},i}|$$

$$REMC = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{\text{mod},i} - ET_{\text{obs},i})^2}$$

Donde: $ET_{\text{mod},i}$ y $ET_{\text{obs},i}$ = valores del modelo y datos observados respectivamente, para cada día i , y n es el número total de días (semana o mes). EMA y REMC, están en unidades de mm día^{-1} , son indicadores agregados del desempeño del modelo, mientras que los estadísticos de regresión (pendiente, intercepto, R^2) son indicadores de predicción de los modelos de la ET en una escala de tiempo (Douglas *et al.*, 2009; Gavilán y Castillo-Llanque, 2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Información climática

Para los dos años de evaluación, la información climática registrada tuvo el siguiente comportamiento: 2006 fue un año húmedo por arriba de la normal, con una precipitación total de 774 mm, mientras que 2008 fue un año normal con 504 mm. La temperatura del aire varió de 5 a 26°C y de 4 a 22°C para el 2006 y el 2008 respectivamente, con una media de 15 °C en ambos años. La humedad relativa varió de 17 a 86% en 2006 y de 35 a 87% en 2008. Por otro lado, la radiación neta medida para 2006 varió de 0.12 a 16.14 $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, mientras que el rango correspondiente para 2008 fue de 0.89 a 18.8 $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Las horas de insolación variaron de 3 a 12 h día^{-1} para ambos años. Estas condiciones climáticas son comparables con las condiciones existentes en otras regiones semiáridas del mundo con latitudes similares (Al-Ghobari, 2000; Bayala *et al.*, 2008).

En general, los valores de evapotranspiración medidos con el atmómetro variaron de 1 a 8.5 mm día^{-1} , con un promedio de 3.5 mm día^{-1} durante el periodo de monitoreo en ambos años. Estos valores caen dentro del rango reportado para ambientes áridos y semiáridos con clima moderado (2-4 mm) y clima cálido (4-8 mm) por Allen *et al.* (1998) y

$$REME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{\text{mod},i} - ET_{\text{obs},i})^2}$$

Where: $ET_{\text{mod},i}$ and $ET_{\text{obs},i}$ = modeled and observed ET values, respectively, for each day i and n is total number of days (week or month). MAE and RMSE, both in mm day^{-1} , are aggregate indicators of model performance whereas regressions statistics (slope, intercept, R^2) are indicators of how well models predict ET in time scale (Douglas *et al.*, 2009; Gavilán and Castillo-Llanque, 2009).

RESULTS AND DISCUSSION

Climate information

For the two years of evaluation, the registered climate information was as follow: 2006 was an above normal humid year with a total rainfall of 774 mm, while 2008 was a regular year with 504 mm. Air temperature ranged 5 to 26 °C and from 4 to 22 °C for 2006 and 2008 year, respectively, with a mean temperature of 15 °C in both years. Relative humidity varied from 17 to 86% in 2006, and from 35 to 87% in 2008. On the other hand, measured net radiation for 2006, varied from 0.12 to 16.14 $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, while the corresponding range for 2008 was from 0.89 to 18.80 $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$. Sunshine hours varied from 3 to 12 h day^{-1} for both years. This climate conditions are comparable with the conditions existing along semiarid areas of the world with similar latitudes (Al-Ghobari, 2000; Bayala *et al.*, 2008).

Overall, the evapotranspiration values, as measured by the atmometer, varied from 1 to 8.5 mm day^{-1} , with an average of 3.5 mm day^{-1} in the monitoring period for both years. These values fall between ranges reported for arid and semiarid areas with moderate climate (2-4 mm) and warm climate (4-8 mm) by Allen *et al.* (1998) and Rahimikhoob (2009). Cumulative evapotranspiration was 525 and 413 mm, in 2006 and 2008, respectively, for the corresponding period.

Models performance

The mean absolute error and root mean square error on a daily, weekly and monthly basis, for each model are observed in Table 2. For the analysis, the evaluated methods

Rahimikhoob (2009). La evapotranspiración acumulada fue de 525 y 413 mm, en 2006 y 2008 respectivamente para el periodo correspondiente.

Desempeño de los modelos

El error medio absoluto y la raíz del error de la media cuadrática a nivel diario, semanal y mensual, para cada modelo se pueden observar en la Cuadro 2. Para el análisis, los métodos evaluados fueron agrupados en tres categorías con base en los valores de EMA y REMC: i) menor de 1 mm día⁻¹; ii) entre 1-2 mm día⁻¹; y iii) más de 2 mm día⁻¹.

were grouped into three categories based on the MAE and RMSE values: i) less than 1 mm day⁻¹; ii) between 1-2 mm day⁻¹; and iii) more than 2 mm day⁻¹.

On a daily basis (n= 272), the Penman model was the only member of the less than 1 mm day⁻¹, indicating the best performance at this level among the evaluated methods, with a MAE value of 0.98. The second group was formed by the Penman Monteith, Oudin, Hargreaves, and McGuinness models with MAE values of 1.09, 1.1, 1.2 and 1.6 mm day⁻¹, respectively. These models performed relatively well, however their application

Cuadro 2. Estadísticos del error medio absoluto y raíz del error de la media cuadrática a nivel diario, semanal y mensual.
Table 2. Statistical results of mean absolute error and root mean square error for daily, weekly and monthly basis.

| Modelo | Diario | | Semanal | | Mensual | |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | EMA | REMC | EMA | REMC | EMA | REMC |
| Penman | 0.98* | 1.27** | 0.84 | 1.08** | 0.71 | 0.89* |
| Penman-Monteith | 1.09** | 1.31** | 0.93* | 1.09** | 0.78* | 0.95* |
| Oudin | 1.1** | 1.44** | 0.92* | 1.23* | 0.76* | 0.99* |
| Hargreaves y Samani | 1.2** | 1.43** | 1.05** | 1.27** | 0.91* | 1.09** |
| McGuinness y Bordne | 1.59** | 1.83** | 1.36** | 1.57** | 1.22** | 1.45* |
| Kimberly-Penman | 2.17*** | 2.57*** | 2.24*** | 2.54*** | 2.21*** | 2.41*** |
| Jensen y Haise | 2.66*** | 2.97*** | 2.56*** | 2.76*** | 2.56*** | 2.69*** |
| Romanenko | 2.66*** | 2.96*** | 2.5*** | 2.77*** | 2.5*** | 2.7*** |

*= primer grupo, menor a 1 mm día⁻¹; **= segundo grupo; entre 1 y 2 mm día⁻¹; ***= tercer grupo, entre 2 y 3 mm día⁻¹.

A escala diaria (n= 272) el modelo de Penman, con un valor de EMA de 0.98, fue el único incluido en el grupo de menos de 1 mm día⁻¹, con el mejor desempeño a este nivel dentro de los métodos evaluados. El segundo grupo estuvo conformado por los modelos de Penman-Monteith, Oudin, Hargreaves y Samani, y McGuinness y Bordne con valores de EMA de 1.09, 1.1, 1.2 y 1.6 mm día⁻¹ respectivamente. Estos modelos se desempeñaron relativamente bien; sin embargo, su aplicación debe considerar otros elementos de análisis. El grupo con valores de EMA mayores de 2 mm día⁻¹ lo conformaron los modelos Kimberly-Penman, Jensen & Haise y Romanenko con valores de EMA de 2.17, 2.66 y 2.66 mm día⁻¹ respectivamente. El desempeño de los últimos modelos no se considera satisfactorio para una estimación a nivel diario en las condiciones de estudio.

A escala semanal (n=47) los valores de EMA se redujeron en alrededor de un 14.5% (± 1.4) para los grupos de menos de 1 y de entre 1-2 mm día⁻¹. En consecuencia, los valores de EMA

has to consider other elements of analysis. The group with MAE values greater than 2 mm day⁻¹ was formed by the Kimberly, Jensen and Haise and Romanenko models, with values of 2.17, 2.66 and 2.66 mm day⁻¹, respectively. The performance of the late models was considered not satisfactory for daily estimations for the studied conditions.

On a weekly basis (n= 47), the MAE values were reduced by about 14.5% (± 1.4) for the less than 1 and the between 1-2 mm day⁻¹ groups. In consequence, the MAE values for the Penman, Oudin and Penman-Monteith methods were 0.84, 0.92 and 0.93 mm day⁻¹, respectively. These methods can be recommended for similar semiarid areas based on the MAE values. The corresponding MAE values for the Hargreaves and Samani, McGuinness and Bordne methods were 1.05 and 1.36 mm day⁻¹, respectively. No significant reduction on the MAE values were obtained for the greater than 2 mm day⁻¹ group, which does not imply an improvement in their performance at this interval and their use under this conditions has to be considered with caution.

para los métodos de Penman, Oudin y Penman-Monteith fueron 0.84, 0.92 y 0.93 mm día⁻¹ respectivamente. Así, estos métodos pueden ser recomendados para regiones semiáridas similares en base a los valores del EMA. Los valores de EMA correspondientes para los métodos Hargreaves y Samani, McGuinness y Bordne fueron 1.05 y 1.36 mm día⁻¹ respectivamente. No se observó una reducción significativa en los valores de EMA a nivel semanal para el grupo de más de 2 mm día⁻¹, que no implicó una mejora en su desempeño a este intervalo; su uso bajo estas condiciones debe hacerse con precaución.

A escala mensual (n= 12) los valores de EMA se redujeron alrededor de 27% (± 3.1) en comparación con los datos diarios para los grupos de menos de 1 y de entre 1-2 mm día⁻¹. Los modelos Penman, Oudin, Penman-Monteith, Hargreaves y Samani presentaron valores de EMA de 0.71, 0.76, 0.78 y 0.91 mm día⁻¹ respectivamente, mientras que los valores de EMA para el modelo McGuinness y Bordne fueron de 1.22 mm día⁻¹. De forma similar a la escala semanal, no se observó una reducción significativa en los valores de EMA para los modelos de Kimberly-Penman, Romanenko, Jensen y Haise, los cuales presentaron valores de EMA de 2.2, 2.5 y 2.6 mm día⁻¹ respectivamente. Los modelos de Jensen y Haise, Kimberly-Penman fueron desarrollados para condiciones semiáridas; sin embargo, su desempeño a nivel diario, semanal y mensual no fue satisfactorio.

La REMC es un indicador de la habilidad de desempeño de un modelo en un periodo de tiempo dado (Douglas *et al.*, 2009). La REMC fue calculada a nivel diario, semanal y mensual. A nivel diario, los mejores modelos fueron Penman, Penman-Monteith, Hargreaves y Samani, Oudin, McGuinness y Bordne con valores REMC de 1.27, 1.31, 1.43, 1.44 y 1.83 mm día⁻¹; mientras que el desempeño de los modelos Kimberly-Penman, Romanenko, y Jensen y Haise no fueron satisfactorios, presentando valores de REMC de 2.57, 2.96 y 2.97 mm día⁻¹.

La ampliación del periodo de observación a una semana mejoró el desempeño del primer grupo, reduciendo los valores de REMC en alrededor de 14.3% (± 2). Los nuevos valores de REMC para los modelos Penman, Penman-Monteith, Oudin, Hargreaves y Samani, y McGuinness y Bordne fueron de 1.08, 1.09, 1.23, 1.27 y 1.57 mm día⁻¹ respectivamente. El desempeño

On a monthly basis (n = 12), the MAE values were reduced by about 27 mm day⁻¹ (± 3.1) as compared to the daily data, for the less than 1 and the between 1-2 mm day⁻¹ groups. The Penman, Oudin, Penman-Monteith, Hargreaves and Samani models had a MAE value of 0.71, 0.76, 0.78 and 0.91 mm day⁻¹ (MAE < 1), respectively while, the MAE value for the McGuinness and Bordne model was 1.22 mm day⁻¹. In a similar way to the weekly basis, no significant reduction in the MAE values was observed for the Kimberly-Penman, Romanenko, Jensen y Haise models, with MAE values of 2.2, 2.5 and 2.6 mm day⁻¹, respectively. The Jensen and Haise, Kimberly-Penman methods were developed to be applied in semiarid conditions, however, their performance at the daily, weekly and monthly basis was not satisfactory.

The RMSE is an indicator of a model's ability to perform on a given period of time (Douglas *et al.*, 2009). The RMSE were calculated for daily, weekly and monthly periods. For a daily period, the models performing the best were Penman, Penman-Monteith, Hargreaves and Samani, Oudin and McGuinness and Bordne with a RMSE value of 1.27, 1.31, 1.43, 1.44 and 1.83 mm day⁻¹; while the Kimberly-Penman, Romanenko, Jensen and Haise models, did not performed satisfactorily, with corresponding RMSE values of 2.57, 2.96 and 2.97 mm day⁻¹.

Increasing the observation period to a week, improved the performance of the first groups reducing the RMSE values by about 14.3% (± 2.0), the new RMSE values for the Penman, Penman-Monteith, Oudin, Hargreaves and Samani, McGuinness and Bordne models were 1.08, 1.09, 1.23, 1.27 and 1.57 mm day⁻¹, correspondingly. The performance of the Kimberly-Penman, Jensen and Haise, y Romanenko methods was not improved for the weekly analysis with corresponding values of 2.54, 2.76 and 2.77 mm day⁻¹.

The monthly analysis further increased the performance of the Penman, Penman-Monteith, Oudin, Hargreaves and Samani, McGuinness and Bordne methods with RMSE values of 0.89, 0.95, 0.99, 1.09 and 1.45 mm day⁻¹, respectively. Overall, the RMSE values were reduced by about 30% (± 4.3) for this group of models, as compared to the daily data, making them appropriate to be used in semiarid conditions. Again, the Kimberly-Penman, Jensen y Haise, y Romanenko models showed the greatest RMSE values (2.41, 2.69 and 2.7 mm day⁻¹, respectively), indicating a poor performance in the studied conditions.

de los modelos Kimberly-Penman, Jensen y Haise, y Romanenko no mejoró para el análisis semanal, obteniendo valores de 2.54, 2.76 y 2.77 mm día⁻¹ respectivamente.

El análisis mensual mejoró aún más el desempeño de los métodos Penman, Penman-Monteith, Oudin, Hargreaves y Samani, y McGuinness y Bordne con valores de REMC de 0.89, 0.95, 0.99, 1.09 y 1.45 mm día⁻¹ respectivamente. En general, la reducción en la magnitud de la REMC para este grupo fue de alrededor del 30% (± 4.3) en comparación con los datos diarios, lo que los hace apropiados para su uso en condiciones semiáridas. Nuevamente los modelos Kimberly-Penman, Jensen y Haise, y Romanenko presentaron los más altos valores de la REMC (2.41, 2.69 y 2.7 mm día⁻¹ respectivamente), indicando un desempeño pobre en las condiciones estudiadas.

En general, los métodos Penman y Penman-Monteith presentaron los valores más bajos de EMA y REMC. Estos métodos incluyen un número considerable de variables de entrada, lo que resulta en un mayor desempeño con respecto a los valores observados de ET. Por otro lado, los métodos de Oudin, Hargreaves y Samani, McGuinness y Bordne presentaron un desempeño similar, considerando que incluyen pocas variables, pueden ser una opción para condiciones semiáridas; sin embargo, se deben considerar otros aspectos específicos antes de tomar la decisión final sobre su aplicación. Con base a los valores de EMA y REMC, los métodos Kimberly-Penman, Jensen y Haise, Romanenko, presentaron los índices de error más grandes, a pesar de su simplicidad, están limitados dadas las condiciones del estudio.

La relación entre los valores observados y predichos de evapotranspiración a una escala diaria, semanal y mensual se muestra en la Figura 1. Basado en el análisis de regresión, idealmente se espera un intercepto cerca de cero, pendientes de línea de regresión y coeficientes de determinación cercanos a la unidad (Douglas *et al.*, 2009). Excepto por el método de Kimberly-Penman, el cual obtuvo un valor para el intercepto de la línea de regresión de 0.54, el resto de los métodos presentó valores de 2 a 5, indicando una desviación significativa de este punto, sin diferencias significativas para el análisis diario, semanal y mensual.

Overall, the Penman and Penman-Monteith methods had the lowest MAE and RMSE values. These methods include a considerable number of input variables, resulting in better performance behavior with respect to the observed ET. On the other hand, the Oudin, Hargreaves and Samani, and McGuinness and Bordne methods performed similarly, even though they include a fewer variables, and can be an option for semiarid conditions. However, other specific aspects may need to be considered before a final decision on the application is made. Based on the MAE and RMSE values, the Kimberly-Penman, Jensen and Haise, and Romanenko methods showed the greatest error and their application, in spite of their simplicity, are limited for the studied conditions.

The relationship between predicted and observed values of evapotranspiration on a daily, weekly and monthly basis is shown in Figure 1. Based on regression analysis, ideally, an intercept close to zero, regression line slopes close to one, and determination coefficients approaching the unit are expected (Douglas *et al.*, 2009). Except for the Kimberly-Penman method, which has an intercept value of 0.54, the rest of the methods had values in the range of about 2 to 5, indicating a significant departure from this point, with no significant differences for the daily, weekly and monthly analysis.

When considering the slope of the regression lines, all the values were smaller than 0.5 for the daily data analysis. The slope increased substantially for the Penman-Monteith, Jensen and Haise methods when the regression analysis was performed with weekly and monthly data. The rest of the methods had values smaller than 0.5, far from the expected unit. This indicates a poor correspondence between observed and predicted values, reflected as a departure from the 1-1 line.

The determination coefficient for daily analysis indicated a poor correlation between observed and predicted values for all methods. The greater R² values corresponded to Kimberly-Penman, Penman-Monteith and Penman with R²= 0.61, R²= 0.65 and R²= 0.67, while for Hargreaves and Samani was R²= 0.55 and for Oudin, McGuinness and Bordne, Jensen and Haise, Romanenko were r²= 0.22. Low values of r² for Penman-Monteith were also reported for Irmak *et al.* (2005) in United States of America, but highest values were found in Europe for Gavilan and Castillo-Llanque (2009) for the Penman-Monteith, Hargreaves and Samani methods.

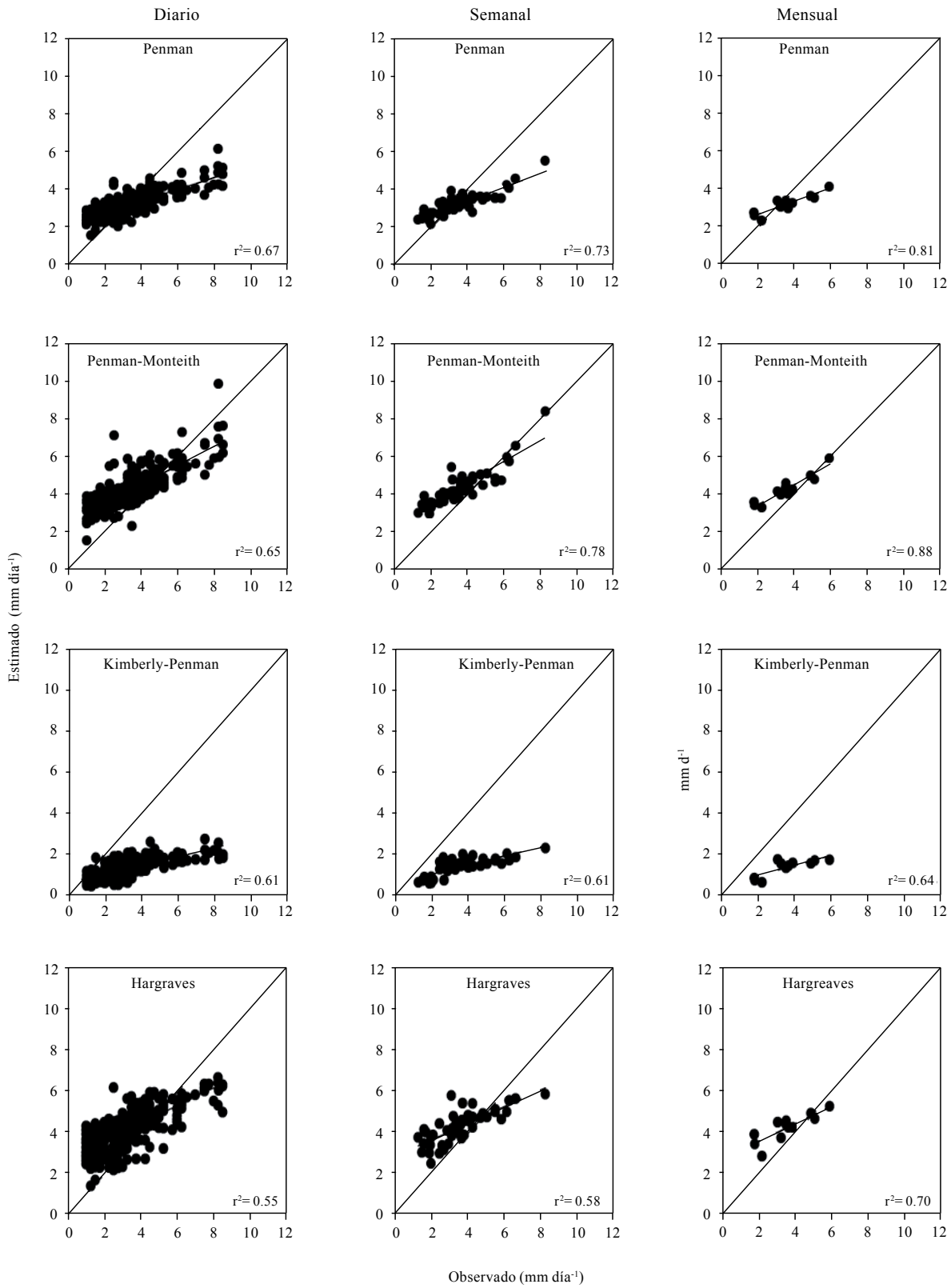


Figura 1. Comparación de la evapotranspiración potencial estimada y observada en series de tiempo diarias, semanales y mensuales.
Figure 1. Comparison of potential evapotranspiration estimated with observed evapotranspiration in day, week and month series time.

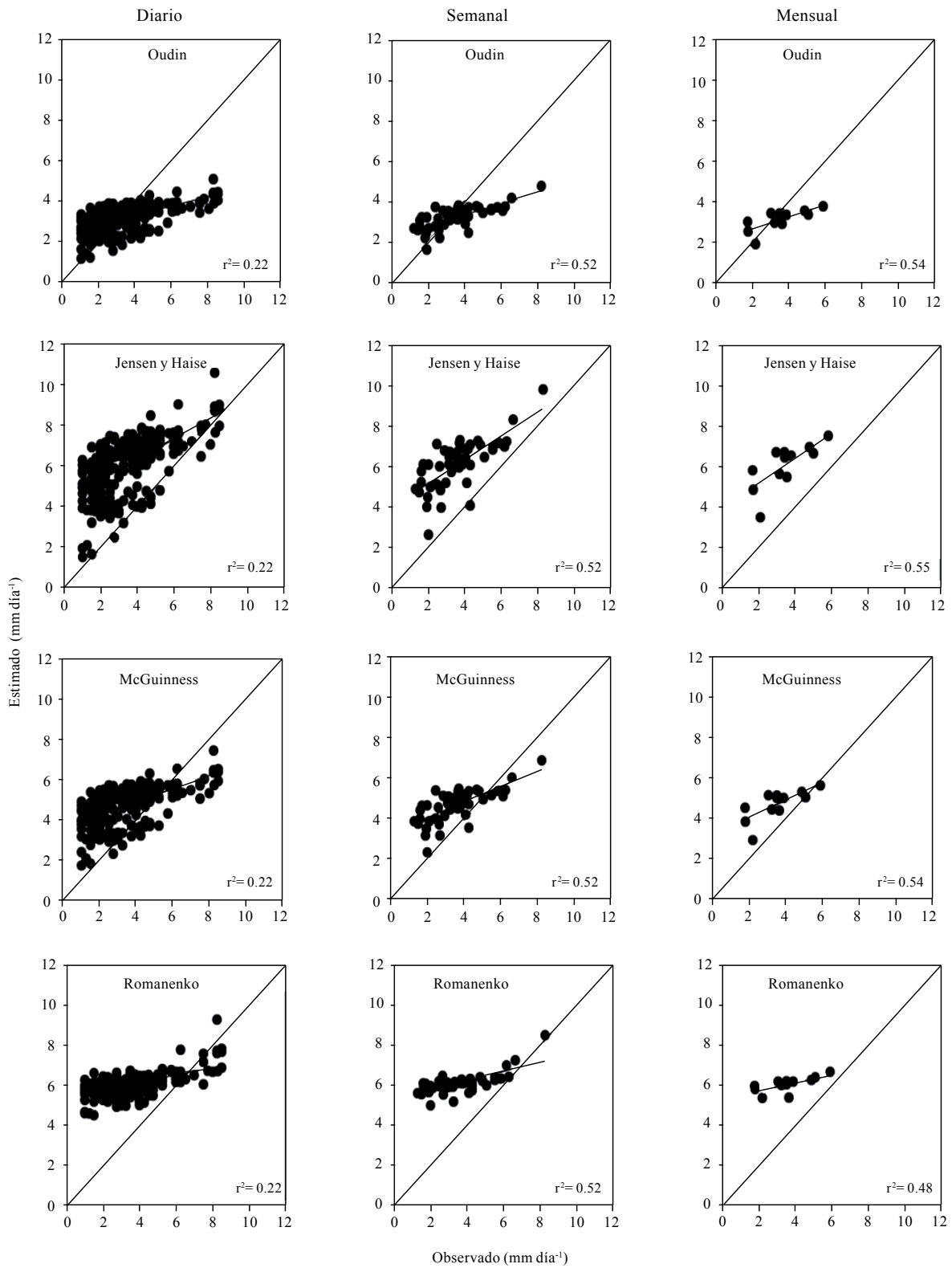


Figura 1. Comparación de la evapotranspiración potencial estimada y observada en series de tiempo diarias, semanales y mensuales (Continuación).
Figure 1. Comparison of potential evapotranspiration estimated with observed evapotranspiration in day, week and month series time (Continuation).

Con respecto a la pendiente de las líneas de regresión, todos los valores fueron menores de 0.5 para el análisis diario de los datos. El valor de la pendiente aumentó sustancialmente para los métodos Penman-Monteith, y Jensen y Haise cuando el análisis de regresión se realizó con datos semanales y mensuales. El resto de los métodos presentaron valores menores a 0.5 lejos del valor unitario esperado. Esto indica una correspondencia pobre entre los valores observados y predichos, reflejados como una desviación de la línea 1-1.

El coeficiente de determinación para el análisis diario indicó una correlación baja entre los valores observados y predichos para todos los métodos. Los valores más grandes de R^2 correspondieron a los métodos de Kimberly-Penman, Penman-Monteith y Penman con un $R^2=0.61$, $R^2=0.65$ y $R^2=0.67$, respectivamente, mientras que para el método de Hargreaves y Samani R^2 fue de 0.55, y para Oudin, McGuinness y Bordne, Jensen y Haise, y Romanenko el valor fue de $R^2=0.22$ para todos los casos. Irmak *et al.* (2005) reportaron valores bajos de R^2 para Penman-Monteith en Estados Unidos, aunque Gavilán y Castillo-Llanque (2009) reportaron valores altos en Europa para los métodos Penman-Monteith, y Hargreaves y Samani.

Gavilán y Castillo-Llanque (2009) observaron que los datos de evapotranspiración en promedios semanales se ajustaron mejor entre el modelo Penman-Monteith y los valores observados con el ET gage, para ambientes semiáridos. A nivel semanal, los valores del coeficiente de determinación incrementaron 10% para los modelos Penman-Monteith y Penman, con valores de $R^2=0.78$ y $R^2=0.73$, respectivamente. Por otro lado, para el método Kimberly-Penman, el valor de R^2 fue 0.61, mientras que para los métodos de Hargreaves y Samani, Oudin, McGuinness y Bordne, Jensen y Haise, y Romanenko, el incremento en los valores de R^2 fueron del orden del 25%, sin que esto significara una correlación significativa entre valores observados y predichos, ya que la magnitud varió entre $R^2=0.58$ y $R^2=0.52$.

A nivel mensual, el coeficiente de determinación incrementó un 20% con respecto a los datos diarios para los métodos Penman-Monteith y Penman, con valores de $R^2=0.81$ y $R^2=0.88$, respectivamente. Por otro lado, el aumento respectivo para Hargreaves y Samani, y Kimberly-Penman fue de aproximadamente 10% con valores de $R^2=0.7$ y $R^2=0.64$, respectivamente. Aunque el valor del coeficiente de determinación aumentó en aproximadamente un 10% para

Gavilán and Castillo-Llanque (2009), suggest for a semiarid environment the use of the evapotranspiration data in average weekly adjusted better between the Penman-Monteith model and the ET gage observed values. The values of determination coefficient increase in 10% for the Penman-Monteith and Penman models with values of $R^2=0.78$ and $R^2=0.73$, respectively. While for the Kimberly-Penman method the value was similar ($R^2=0.61$). For the Hargreaves and Samani, Oudin, McGuinness and Bordne, Jensen and Haise, and Romanenko methods the increments were 25% with respect to the daily analysis, but the determination coefficient were no significant, with values between $R^2=0.58$ and $R^2=0.52$.

The increase in the corresponding values of the coefficient of determination to $R^2=0.81$ and $R^2=0.88$ for Penman-Monteith and Penman methods, represents 20% better performance than the daily performance. While for Hargreaves and Samani, Kimberly-Penman the behavior increased in a 10%, with values of $R^2=0.7$ and $R^2=0.64$, respectively. Even though the values of coefficient of determination increase in a 10%, the values were not significant for Jensen and Haise, Oudin, McGuinness and Bordne, and Romanenko with values between $R^2=0.5$ and $R^2=0.55$. These methods continued not being recommended due to their poor performance in the different time series analysis.

In general, the Jensen and Haise, McGuinness and Bordne, and Oudin methods showed low values of R^2 in the different time scales. These methods are similar with small differences only in the factors (depending on mean temperature and extraterrestrial radiation). The Romanenko method did not changed its performance with time scale either. The association between estimated and observed values increased with time scale when the factors of R_n , e_s , e_d , wind and mean temperature were introduced. The major association was found with the Penman and Penman-Monteith methods, followed by Kimberly-Penman method.

The determination coefficients indicate the degree of association between ET observed and ET measured. However, correspondence of values can only be achieved if an adjustment factor is used. The average adjustment factor estimated for each of the methods is presented in Table 3. The average values were 1.09 for Penman, 0.83 for Penman-Monteith, 2.69 for

los métodos Jensen y Haise, Oudin, McGuinness y Bordne, y Romanenko, con valores no significativos de R^2 entre 0.5 y 0.55. Estos métodos siguen sin poder ser recomendados debido al bajo desempeño en el análisis de series de tiempo.

En general, los métodos Jensen y Haise, McGuinness y Bordne, y Oudin, mostraron valores bajos de R^2 en las diferentes escalas de tiempo. Estos métodos son similares, con pequeñas diferencias en algunos factores (dependiendo de la temperatura media y la radiación extraterrestre). El método de Romanenko tampoco cambió su desempeño respecto a la escala de tiempo. El grado de asociación entre los valores observados y predichos aumentó con la escala de tiempo en los modelos, donde se incluyeron los factores R_n , e_s , e_d , velocidad de viento y temperatura media. Así, el mayor grado de asociación se encontró para los modelos Penman y Penman-Monteith, seguidos del método Kimberly-Penman.

Los coeficientes de determinación indican el grado de asociación entre los valores observados y medidos de ET. Sin embargo, la correspondencia de valores solo puede alcanzarse si se utilizan factores de ajuste. Los factores de ajuste promedio para los métodos estudiados se presentan en la Cuadro 3. Los valores medios fueron 1.09 para Penman, 0.83 para Penman-Monteith, 2.69 para Kimberly-Penman, 0.82 para Hargreaves y Samani, 1.1 para Oudin, 0.75 para McGuinness y Bordne, 0.58 para Jensen y Haise, y 0.58 para Romanenko. El uso de estos factores proporciona más certidumbre si los modelos se usan en condiciones similares, los valores obtenidos por el modelo necesitan dividirse por su respectivo factor de ajuste para obtener un resultado calibrado.

Kimberly-Penman, 0.82 for Hargreaves and Samani, 1.1 for Oudin, 0.75 for McGuinness and Bordne, 0.58 for Jensen and Haise, and 0.58 for Romanenko. The use of this factor gives more certainty if the models are to be used in similar conditions and the values obtained by the model need to be divided by this factor to have a calibrated result.

Evapotranspiration measured and climate variables

The performance of some models was adequate and later improved by the calibration factor. However, another alternative to predict ET_0 is by means of regression analysis with climatic data (Allen *et al.*, 1998). Pearson correlation coefficients were $R^2 = 0.53, 0.58, -0.68$ and 0.72 , for temperature, wind speed, relative humidity and radiation net, respectively (Table 4). No significant correlation was found between ET observed values and atmospheric pressure. Gao *et al.* (2006); Khoob (2008) found evidence indicating that the evapotranspiration process is highly influenced by temperature, relative humidity, wind speed and temperature, and is dependent on the location and seasonal effects.

The significance of the variables was again reflected in a model resulting from multivariable linear regression using the Stepwise Method in SPSS v13 (Table 5). The most significant variables in the regression models obtained were the relative humidity and net radiation net with an R^2 of 0.74. The model can be improved if additional variables are included, as observed in Table 5, where the inclusion of mean temperature and wind velocity increases the R^2 to 0.8.

Cuadro 3. Resultados estadísticos del ajuste y calibración de los modelos estudiados.

Table 3. Statistical results of the adjustment and calibration of the studied models.

| Modelo | Diario | | | | Semanal | | | | Mensual | | | |
|---------------------|--------|------|------|--------|---------|------|------|--------|---------|------|------|--------|
| | Af | Sl | Int | R^2 | Af | Sl | Int | R^2 | Af | Sl | Int | R^2 |
| Penman | 1.08 | 0.31 | 2.14 | 0.67* | 1.09 | 0.34 | 2.05 | 0.73* | 1.09 | 0.34 | 2.01 | 0.81* |
| Penman-Monteith | 0.82 | 0.49 | 2.53 | 0.65* | 0.83 | 0.56 | 2.32 | 0.78* | 0.83 | 0.53 | 2.36 | 0.88* |
| Kimberly-Penman | 2.69 | 0.22 | 0.54 | 0.61* | 2.68 | 0.22 | 0.54 | 0.61* | 2.71 | 0.25 | 0.43 | 0.64* |
| Hargreaves y Samani | 0.81 | 0.43 | 2.77 | 0.55** | 0.83 | 0.41 | 2.86 | 0.58** | 0.82 | 0.43 | 2.75 | 0.7* |
| Oudin | 1.08 | 0.17 | 2.57 | 0.22** | 1.11 | 0.26 | 2.26 | 0.52* | 1.1 | 0.29 | 2.17 | 0.54** |
| McGuinness y Bordne | 0.74 | 0.23 | 3.79 | 0.22** | 0.76 | 0.39 | 3.33 | 0.52** | 0.75 | 0.42 | 3.19 | 0.54** |
| Jensen y Haise | 0.57 | 0.37 | 4.77 | 0.22** | 0.58 | 0.58 | 4.03 | 0.52* | 0.58 | 0.62 | 3.88 | 0.55** |
| Romanenko | 0.57 | 0.13 | 5.56 | 0.22** | 0.59 | 0.25 | 5.19 | 0.52** | 0.58 | 0.2 | 5.29 | 0.48** |

Af= ET_0/PE ; donde: ET_0 = evapotranspiración de referencia; PE= evapotranspiración potencial; Sl= pendiente; Int= intercepto; R^2 = coeficiente de determinación; *= significativo; **= no significativo.

Evapotranspiración medida y variables climáticas

El desempeño de los modelos fue adecuado y posteriormente mejorado usando el factor de calibración. Sin embargo, otra alternativa para predecir ET es por medio de análisis de regresión con datos climáticos (Allen *et al.*, 1998). Los coeficientes de correlación de Pearson (R^2) fueron 0.53, 0.58, -0.68 y 0.72, para la relación entre ET y la temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y radiación neta, respectivamente (Cuadro 4). No se encontró una correlación significativa entre ET y la presión atmosférica. Gao *et al.* (2006); Khoob (2008) encontraron evidencias indicando que el proceso de evapotranspiración es altamente influenciado por la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, y que presentaba efectos locales y estacionales.

La significancia de las variables se vio nuevamente reflejada en el modelo resultante de la regresión lineal múltiple usando el método Stepwise en SPSS v13 (Cuadro 5). Las variables más significativas en los modelos de regresión obtenidos fueron la humedad relativa y la radiación neta, con un R^2 de 0.74. El modelo puede ser mejorado al incluir variables adicionales, tal como se observa en la Tabla 5, donde la inclusión de la temperatura media y la velocidad del viento resultó en un aumento con $R^2=0.8$.

Cuadro 5. Resumen del análisis regresión múltiple entre ET y variables climáticas.

Table 5. Model summary with the variables approach for each model and the statistics performance.

| R^2 (Pearson) | R^2 | Predictores | Coefficientes del modelo |
|-----------------|-------|------------------------|-------------------------------|
| 0.721 | 0.52 | Constant, Rn | 1.05, 0.29 |
| 0.860 | 0.74 | Constant, Rn, Hr | 7.41, 0.22, -0.08 |
| 0.886 | 0.78 | Constant, Rn, Hr, T | 4.67, 0.19, -0.08, 0.17 |
| 0.897 | 0.80 | Constant, Rn, Hr, T, U | 2.93, 0.16, -0.07, 0.18, 1.22 |

Variable dependiente: ET; Rn= radiación solar neta; Hr= humedad relativa; T= temperatura media; U= velocidad del viento.

CONCLUSIONES

La evapotranspiración medida con un ET gage en el sitio de estudio para el periodo de mayo a noviembre del 2006 fue de 525 mm. El valor correspondiente para el periodo de mayo a octubre de 2007 fue de 413 mm. El valor mayor de ET (8.5 mm) fue registrado en mayo del 2006, mientras que el valor más bajo (1 mm) correspondió a noviembre de ambos años. Los valores diarios y mensuales de ET_0 fueron similares a los reportados por otros autores para regiones semiáridas.

Cuadro 4. Correlación de Pearson entre evapotranspiración observada y variables climáticas.

Table 4. Pearson correlation between evapotranspiration observed and climate information.

| Correlaciones | ET | Rn | Hr | P | U | T |
|---------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| ET | 1 | 0.72 | -0.68 | 0.06 | 0.58 | 0.53 |
| Rn | 0.72 | 1 | -0.34 | -0 | 0.44 | 0.41 |
| Hr | -0.68 | -0.34 | 1 | 0.41 | -0.45 | -0.23 |
| P | 0.06 | -0 | 0.406 | 1 | 0.14 | 0.3 |
| U | 0.58 | 0.44 | -0.45 | 0.14 | 1 | 0.17 |
| T | 0.53 | 0.41 | -0.23 | 0.3 | 0.17 | 1 |

ET= evapotranspiración; Rn= radiación neta; Hr= humedad relativa; P= presión barométrica; U= velocidad del viento; T= temperatura.

CONCLUSION

Evapotranspiration measured in the study site for the period of May to November 2006 was 525 mm, as evaluated with the ETgage. The corresponding value for the period of May to October 2007 was 413 mm. The greatest ET value (8.50 mm) was recorded for May 2006, while the lowest corresponded to November in both

years (1 mm). Recorded monthly and daily values of ET_0 were similar to those reported by other author in semiarid areas.

The Oudin, Jensen and Haise, McGuinness and Bordne, Romanenko showed high values of RMSE and MAE, and low values of the intercept, slope and R^2 . The poor performance of these models did not change with the different time scale analysis. In consequence, their use is not recommended for climatic conditions to those prevailing in the study site, unless specific analyses are performed. The Hargreaves and Samani method

Los métodos Oudin, Jensen y Haise, McGuinness y Bordne, Romanenko, mostraron valores altos de REMC y EMA, y valores bajos de pendiente, intercepto y R^2 . El poco desempeño de estos modelos no cambió con el análisis para diferentes escalas de tiempo. En consecuencia, no se recomienda su uso para las condiciones climáticas similares a las dominantes en el sitio de estudio, a menos que se realice un análisis específico. El método Hargreaves and Samani tuvo un mejor desempeño a nivel mensual que el grupo anterior de modelos, con un R^2 de 0.7 y el uso para estimaciones diarias no fue adecuado.

Los modelos tipo Penman (Penman-Monteith y Penman) mostraron el mejor desempeño para las diferentes escalas de tiempo, con valores bajos de REMC y EMA, y con valores más grandes de R^2 . El desempeño de este tipo de modelos mejoró a escala semanal y mensual, como lo indica el incremento en el valor de R^2 .

Los datos climáticos para predecir la evapotranspiración son: radiación solar, temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa; las cuales predicen la evapotranspiración de referencia con valores de R^2 alrededor de 0.8, 0.82 y 0.91 para estimaciones diarias, mensuales y semanales, respectivamente.

LITERATURA CITADA

- Ahmadi, S. H. and Fooladmand, H. R. 2008. Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: a case study, South of Iran. *Irrig. Sci.* 26:303-312.
- Al-Ghobari, H. M. 2000. Estimation of reference evapotranspiration for southern region of Saudi Arabia. *Irrig. Sci.* 19:81-86.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. and Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome, Italy.
- Aydin, M. 2008. A model for evaporation and drainage investigations at ground of ordinary rainfed-areas. *Ecol. Modell.* 217:148-156.
- Bandyopadhyay, A.; Bhadra, A.; Raghuwanshi, N. S. and Singh, R. 2008. Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extremes. *Agric. For. Meteorol.* 148:1707-1718.
- performed better than the previous group, at the monthly level, with an R^2 of 0.7. His use for daily estimation was not as good.
- The Penman type models (Penman-Monteith and Penman methods) showed the best performance in the different time scales, showing low values of RMSE and MAE, and greater R^2 values. The performance of these two models improved at the weekly and monthly scales, as indicated by the increased R^2 value.
- Climatic data can also be used to predict evapotranspiration, especially with variables such as solar radiation, air temperature, wind velocity, and relative humidity, which predicted reference evapotranspiration with R^2 values of about 0.8, 0.82 and 0.91 for a daily, weekly and monthly estimation.

End of the English version



- Bayala, J.; Heng, L. K.; Van Noordwijk, M. and Ouedraogo, S. J. 2008. Hydraulic redistribution study in two native tree species of agroforestry parklands of West African dry savanna. *Acta Oecologica.* 34:370-378.
- Broner, I.; and Law, R. A. P. 1991. Evaluation of a modified atmometer for estimating reference ET. *Irrig. Sci.* 12:21-26.
- Contreras, S.; Boer, M. M.; Alcalá, F. J.; Domingo, F.; García, M.; Pulido-Bosch, A. and Puigdefábregas, J. 2008. An ecohydrological modelling approach for assessing long-term recharge rates in semiarid karstic landscapes. *J. Hydrol.* 351:47-57.
- Cui, Y. J. and Zornberg, J. G. 2008. Water balance and evapotranspiration monitoring in geotechnical and geoenvironmental engineering. *Geotech. Geol. Eng.* 26:783-798.
- DehghaniSanij, H.; Yamamoto, T. and Rasiah, V., 2004. Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semiarid environments. *Agric. Water Manage.* 64(2):91-106.
- Domingo, F.; Villagarcía, L.; Brenner, A. J. and Puigdefábregas, J. 1999. Evapotranspiration model for semi-arid shrub-lands tested against data from SE Spain. *Agric. For. Meteorol.* 95:67-84.

- Douglas, E. M.; Jacobs, J. M.; Sumner, D. M. and Ray, R. L. 2009. A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types. *J. Hydrol.* 373:366-376.
- Ervin, E. H., and Koski, A. J. 1997. A comparison of modified atmometer estimates of turfgrass evapotranspiration with Kimberly-penman alfalfa reference evapotranspiration. *Int. Turfgrass Soc. Res. J.* 8:663-670.
- Gao, G.; Chen, D.; Ren, G.; Chen, Y. and Liao, Y. 2006. Spatial and temporal variations and controlling factors of potential evapotranspiration in China: 1956-2000. *J. Geogr. Sci.* 16(1):3-12.
- García, M.; Raes, D.; Allen, R. and Herbas, C. 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agric. For. Meteorol.* 125:67-82.
- Gavilán, P. and Castillo-Llanque, F. 2009. Estimating reference evapotranspiration with atmometers in a semiarid environment. *Agric. Water Manage.* 96:465-472.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. 1982. Estimating potential evapotranspiration. Technical note. *J. Irrig. Drain. Eng.* 108(3):225-230.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1996. Cuaderno Estadístico Municipal. Cadereyta de Montes, Estado de Querétaro. H. Ayuntamiento Constitucional de Cadereyta de Montes.
- Jensen, M. E. and Haise, H. R. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. Proceedings of the America Society of Civil Engineers. ASCE 89(LR4). *J. Irrig. Drain. Div.* 15-41 pp.
- Khoob, A. R. 2008. Artificial neural network estimation of reference evapotranspiration from pan evaporation in a semiarid environment. *Irrig. Sci.* 27:35-39.
- Lhomme, J. P. 1997. A theoretical basis for the Priestley-Taylor coefficient. *Boundary-Layer Meteorol.* 82:179-191.
- McGuinness, J. L. and Bordne, E. F. 1972. A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values. TB1452. U. S. Department of Agricultural. Technical Bulletin. Num. 1452. 71 pp.
- Oudin, L.; Hervieu, F.; Michel, C.; Perrin, C.; Andréassian, V.; Anctil, F. and Loumagne, C. 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?. Part 2-Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modeling. *J. Hydrol.* 303:290-306.
- Parmele, L. H. and McGuinness, J. L. 1974. Comparison of measured and estimated daily potential evapotranspiration in a humid region. *J. Hydrol.* 22:239-251.
- Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. 193:120-145.
- Rahimikhoob, A. 2009. Estimation of evapotranspiration based on only air temperature data using artificial neural networks for a subtropical climate in Iran. *Theor. Appl. Clim.* 101:83-97.
- Romanenko, V. A. 1961. Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area, Proc. Ukrainian Hydrometeorological Research Institute. Kiev. No. 3.
- Shannon, J. W. 1968. Use of atmometers in estimating evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 94:309-320.
- Wright, J. L. 1982. New evapotranspiration crop coefficients. *J. Irrig. Drain. Eng.* 108:57-74.