

Analysis of reference evapotranspiration behavior during the rainy season at five weather stations in the Lerma-Chapala basin

Análisis del comportamiento de la evapotranspiración de referencia durante el periodo de lluvias en cinco estaciones meteorológicas de la cuenca Lerma-Chapala

Gerardo Núñez-González*; Domingo Velázquez-Pérez;
Francisco Javier Pelayo-Cortés; Pedro Barboza-Jiménez

¹Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa Sur, Departamento de Ingenierías.
Av. Independencia Nacional núm. 151, Autlán de Navarro, Jalisco, C. P. 48900, MÉXICO.

*Corresponding author: gerardo.nunez@cucsur.udg.mx, tel. (317) 382 5010 ext. 57122.

Abstract

Introduction: Estimating evapotranspiration of cultivated areas is commonly based on the calculation of reference evapotranspiration (ET_o), and is essential in climatic and hydrological studies, as well as in projects related to water management in agriculture.

Objectives: To evaluate ET_o and analyze its behavior during the rainy season on a daily, monthly and seasonal basis.

Methodology: Daily data series on temperature, radiation, atmospheric pressure, relative humidity and wind speed from five weather stations in the Lerma-Chapala basin were used. The ET_o calculation was based on the application of the Penman-Monteith method.

Results: ET_o during the rainy season followed a decreasing pattern, characterized by being non-linear. At the beginning of the season, values higher than 6 mm·day⁻¹ were observed, and at the end they were lower than 2 mm·day⁻¹. Correlation analysis showed that ET_o depends on relative humidity and radiation.

Study limitations: The number of stations used was very low for the size of the basin because the network of automatic weather stations is still under development.

Originality: There are very few studies focused on evapotranspiration variation as a function of elevation and meteorological variables, in addition to a specific analysis in the rainy season.

Conclusions: The seasonal behavior of ET_o shows important changes related to the behavior of relative humidity and radiation, which can have a significant impact on crop water needs.

Keywords: evaporative demand, climate change, rainfed agriculture, automatic weather stations.

Resumen

Introducción: La estimación de la evapotranspiración de las superficies cultivadas se basa comúnmente en el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o), y es esencial en los estudios climáticos e hidrológicos, así como en los proyectos relacionados con la gestión del agua en la agricultura.

Objetivos: Evaluar la ET_o y analizar su comportamiento durante la estación de lluvias de manera diaria, mensual y estacional.

Metodología: Se utilizaron series de datos diarios de temperatura, radiación, presión barométrica, humedad relativa y velocidad del viento de cinco estaciones meteorológicas de la cuenca Lerma-Chapala. El cálculo de la ET_o se basó en la aplicación del método Penman-Monteith.

Resultados: La ET_o durante la estación de lluvias siguió un patrón decreciente, caracterizado por ser no lineal. Al inicio de la estación se observaron valores superiores a los 6 mm·día⁻¹, y al final valores inferiores a 2 mm·día⁻¹. El análisis de correlación mostró que la ET_o depende de la humedad relativa y la radiación.

Limitaciones del estudio: El número de estaciones utilizadas fue muy bajo para el tamaño de la cuenca, esto debido a que la red de estaciones meteorológicas automáticas aún se encuentra en desarrollo.

Originalidad: Existen muy pocos estudios enfocados en la variación de la evapotranspiración en función de la altitud y de las variables meteorológicas, además del análisis específico en la temporada de lluvias.

Conclusiones: El comportamiento estacional de la ET_o muestra cambios importantes relacionados con el comportamiento de la humedad relativa y la radiación, que pueden llegar a impactar significativamente en las necesidades de agua de los cultivos.

Palabras clave: demanda evaporativa, cambio climático, agricultura de temporal, estaciones meteorológicas automáticas.



Introduction

The term evapotranspiration is used to describe the sum of evaporation and transpiration. The former takes into account soil water losses, canopy interception and water bodies, while the latter considers water losses in the form of vegetation vapor (Allen, Jensen, Wright, & Burman, 1989; Eslamian, Khordadi, & Abedi-Koupai, 2011). Estimating evapotranspiration from cultivated areas is an essential task in climatic and hydrological studies, as well as in projects related to water management in agriculture (Bakhtiari & Liaghat, 2011). In the latter, estimating evapotranspiration is commonly based on quantifying two parameters: atmospheric demand through the calculation of reference evapotranspiration (ET_o) and the contribution of the surface from the crop coefficient (K_c), thus obtaining crop evapotranspiration (ET_c) (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998; Bakhtiari & Liaghat, 2011).

ET_o is a climate-related parameter that expresses the evaporating power of the atmosphere at a specific locality and time of year (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006), and can be calculated by several methods, although the Penman-Monteith procedure is the standard recommended by the Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations (Allen et al., 1998; Droogers & Allen, 2002). However, one of the main limitations of this method is that it requires information on radiation, temperature, soil heat flux, relative humidity and wind speed, which is not always available (Gong, Xu, Chen, Halldin, & Chen, 2006). Therefore, it is common to use empirical and semi-empirical methods to determine ET_o (Chávez-Ramírez et al., 2013).

In Mexico, studies aimed at the analysis of evapotranspiration are few, in addition to being considered as specific studies. This situation has occurred mainly due to the lack of information on the variables involved in the calculation of ET_o. However, since the late 1990s, Mexico's National Meteorological Service (SMN, for its spanish acronym) has been promoting the installation of a network of automatic weather stations, which consists of 189 weather stations and 87 synoptic ones dedicated to monitoring and gathering information on variables such as temperature, relative humidity, atmospheric pressure, solar radiation, precipitation, and wind speed and direction (SMN, 2016).

In recent years, authors such as Goyal (2004) have pointed out that any change observed in climatic parameters, on which evapotranspiration depends, can significantly affect it, as well as have a specific impact on crop water needs. In this sense, Bakhtiari and Liaghat (2011), Estévez, Gavilán, and Berengena (2009), Gong et al. (2006), and Tabari and Hosseinzadeh (2014) found, in studies carried out using the Penman-Monteith

Introducción

El término evapotranspiración se usa para describir la suma de la evaporación y la transpiración. La primera toma en cuenta las pérdidas de agua del suelo, la interceptación de la vegetación y los cuerpos de agua, mientras que la segunda considera las pérdidas de agua en forma de vapor de la vegetación (Allen, Jensen, Wright, & Burman, 1989; Eslamian, Khordadi, & Abedi-Koupai, 2011). La estimación de la evapotranspiración de las superficies cultivadas es una tarea esencial en los estudios climáticos e hidrológicos, así como en los proyectos relacionados con la gestión del agua en la agricultura (Bakhtiari & Liaghat, 2011). En esta última, la estimación de la evapotranspiración se basa comúnmente en cuantificar dos parámetros: la demanda atmosférica a través del cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y la contribución de la superficie a partir del coeficiente del cultivo (K_c), con lo que se obtiene la evapotranspiración del cultivo (ET_c) (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998; Bakhtiari & Liaghat, 2011).

La ET_o es un parámetro relacionado con el clima, que expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006), y se puede calcular por varios métodos, aunque el de Penman-Monteith es el estándar recomendado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (Allen et al., 1998; Droogers & Allen, 2002). Sin embargo, una de las principales limitaciones de este método es que requiere información sobre la radiación, temperatura, flujo de calor en el suelo, humedad y velocidad del viento, la cual no siempre está disponible (Gong, Xu, Chen, Halldin, & Chen, 2006). Por ello, es común el uso de métodos empíricos y semi-empíricos para determinar la ET_o (Chávez-Ramírez et al., 2013).

En México, los estudios orientados al análisis de la evapotranspiración son pocos, además de ser considerados como estudios puntuales. Esta situación se ha dado principalmente por la carencia de información sobre las variables involucradas en el cálculo de la ET_o. No obstante, desde finales de la década de los noventa, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ha estado promoviendo la instalación de una red de estaciones meteorológicas automáticas, la cual está conformada por 189 estaciones meteorológicas y 87 estaciones sinópticas dedicadas a monitorear y recopilar información de variables como la temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar, precipitación, y velocidad y dirección del viento (SMN, 2016).

En los últimos años, autores como Goyal (2004) han señalado que cualquier cambio observado en los parámetros climáticos, de los que depende la evapotranspiración, puede afectar de manera

method, that ETo is very sensitive to changes in temperature, radiation and relative humidity. In addition, they observed that the degree of ETo sensitivity varies according to the time of year and the geographic location of the site analyzed, which can have a direct impact on rainfed agriculture. Ruiz-Corral, Ramírez-Díaz, Flores-Mendoza, and Sánchez-González (2000) point out that rainfed cropping systems are the most sensitive to climatic variations, since they depend solely on rainwater for production. According to Rockström (2003), a change in climatic conditions can cause serious problems due to the fact that, worldwide, rainfed agriculture accounts for around 80 % of cultivated land.

The Lerma-Chapala basin is home to 11 % of the country's population and partially covers the territory of five states: State of Mexico, Querétaro, Michoacán, Guanajuato and Jalisco (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2006). Historically, this basin has maintained numerous cultures, which adapted their production systems to the natural availability of water. Currently, the basin supplies mainly the services and commerce sector, followed by industry and agriculture (Sotelo et al., 2005). However, the farm sector occupies 56 % of the basin's surface area and is mostly used for rainfed agriculture (DOF, 2006). In this context, and considering that studies conducted in other countries have observed an important effect on the behavior of evapotranspiration when there are significant changes in climatic parameters, the objectives of this work were focused on evaluating ETo by the Penman-Monteith method using data from the network of SMN automatic weather stations and on analyzing the behavior of ETo during the rainy season on a daily, monthly and seasonal basis.

Materials and methods

Description of study area

The Lerma-Chapala basin is located in the central western part of Mexico (Figure 1) and has an area of 51 887 km², which represents approximately 3 % of the country's total area. The average annual precipitation in the Lerma-Chapala River's hydrological zone is 771 mm, considering the average recorded during the period 1940-2001, although this value is very variable in time and space. Available precipitation records show, year by year, a wide range of variation spanning from 460 to 1 070 mm. The average monthly temperature inside the basin varies from 14.6 °C in January to 21.3 °C in May (DOF, 2006).

Information used

For the development of this work, daily data series for temperature, radiation, atmospheric pressure, relative

significativa a la misma, y de manera puntual a las necesidades de agua de los cultivos. En este sentido, Bakhtiari y Liaghat (2011), Estévez, Gavilán, y Berengena (2009), Gong et al. (2006), y Tabari y Hosseinzadeh (2014) encontraron, en estudios realizados con el método de Penman-Monteith, que la ETo es muy sensible a los cambios en la temperatura, radiación y humedad relativa. Además, observaron que el grado de sensibilidad de la ETo varía de acuerdo con la época del año y con la localización geográfica del sitio analizado, lo que puede tener un impacto directo en la agricultura de temporal. Ruiz-Corral, Ramírez-Díaz, Flores-Mendoza, y Sánchez-González (2000) señalan que los sistemas de cultivo de temporal son los más sensibles a las variaciones climáticas, ya que dependen únicamente del agua de lluvia para la producción. De acuerdo con Rockström (2003), un cambio en las condiciones climáticas puede causar serios problemas debido a que, a nivel mundial, alrededor de 80 % de los terrenos de cultivo son de agricultura de temporal.

La cuenca Lerma-Chapala alberga al 11 % de la población del país, y abarca parcialmente el territorio de cinco estados: Estado de México, Querétaro, Michoacán, Guanajuato y Jalisco (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2006). Históricamente, esta cuenca ha mantenido a numerosas culturas, las cuales adaptaron sus sistemas de producción a la disponibilidad natural del agua. Actualmente, la cuenca suministra principalmente al sector servicios y comercio, seguido del industrial y el agrícola (Sotelo et al., 2005). No obstante, este último sector ocupa 56 % de la superficie de la cuenca, y es utilizada en su mayoría para la agricultura de temporal (DOF, 2006). Bajo este contexto, y considerando que en estudios realizados en otros países se ha observado un efecto importante en el comportamiento de la evapotranspiración cuando hay cambios significativos en los parámetros climáticos, los objetivos de este trabajo se enfocaron en evaluar la ETo por el método Penman-Monteith utilizando los datos de la red de estaciones meteorológicas automáticas del SMN y analizar el comportamiento de la ETo durante la estación de lluvias de manera diaria, mensual y estacional.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

La cuenca Lerma-Chapala se ubica en la parte centro occidente de México (Figura 1) y cuenta con un área de 51 887 km², que representa aproximadamente el 3 % de la extensión total del territorio nacional. La precipitación media anual en la zona hidrológica río Lerma-Chapala es de 771 mm, considerando el promedio registrado durante el período 1940-2001, aunque este valor es muy variable en el tiempo y el espacio. Los registros de precipitación disponibles muestran, año con año, un rango amplio de variación que va de 460 a 1 070 mm.

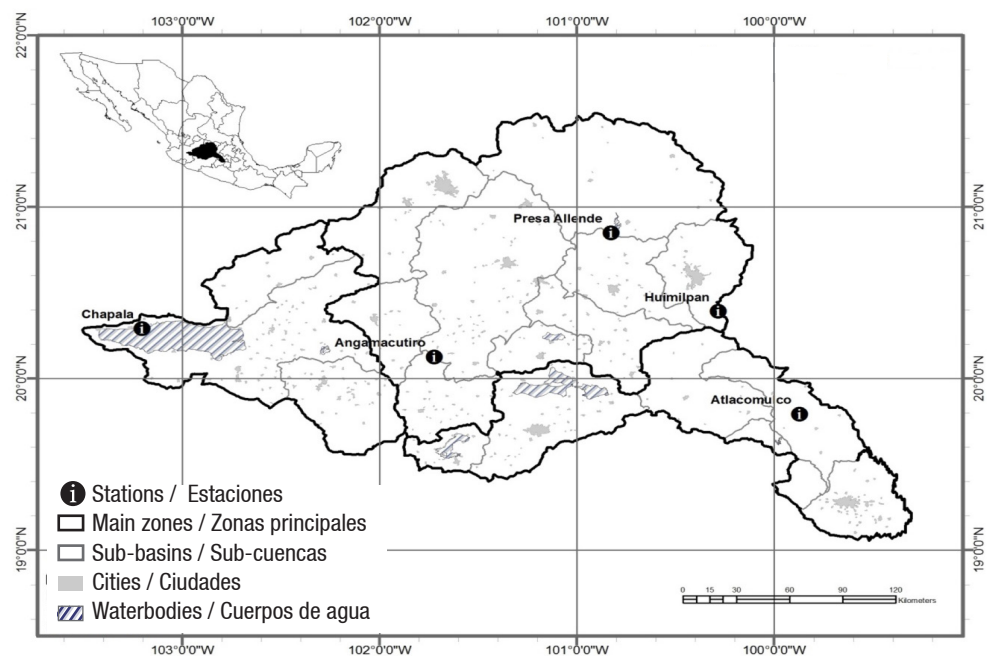


Figure 1. Lerma-Chapala basin and distribution of weather stations.
Figura 1. Cuenca Lerma-Chapala y distribución de estaciones meteorológicas.

humidity and wind speed were obtained from nine SMN-operated automated weather stations, for the period 2001-2010. These data series were analyzed to determine the amount of missing data at each station and to discard those that presented more than 10 % missing data. This is because, according to the World Meteorological Organization (WMO), missing data can decisively affect data-related analyses (OMM, 2011). Considering the above, four stations were discarded, so only the stations described in Table 1 were ultimately used. The data series were divided to take into account, within the calculations, only the months from May to September of each year, since this is the period in which rainfed agricultural activities are commonly carried out and corresponds to the time in which between 75 and 80 % of annual rainfall occurs (Ruiz-Corral et al., 2000).

Analysis method

The Penman-Monteith method quantifies atmospheric demand taking into account a reference crop with

La temperatura promedio mensual al interior de la cuenca varía de los 14.6 °C en enero, a los 21.3 °C en mayo (DOF, 2006).

Información utilizada

Para el desarrollo del presente trabajo se obtuvieron, a través del SMN, series de datos diarios para la temperatura, radiación, presión barométrica, humedad relativa y velocidad del viento de nueve estaciones climatológicas automatizadas, esto para el periodo 2001-2010. Dichas series de datos se analizaron para determinar la cantidad de datos faltantes en cada estación y descartar las que presentaran más de 10 % de datos faltantes. Lo anterior debido a que, de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la falta de datos puede afectar de forma decisiva los análisis relacionados con los mismos (OMM, 2011). Considerando lo anterior, se descartaron cuatro estaciones, por lo que finalmente se trabajó con las estaciones descritas en el Cuadro 1. Las series de datos se dividieron para tomar en

Table 1. Automatic weather stations used to calculate reference evapotranspiration.
Cuadro 1. Estaciones meteorológicas automáticas utilizadas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia.

Station / Estación	Location / Ubicación	Latitude (N) / Latitud (N)	Longitude (O) / Longitud (O)	Elevation (masl) / Altitud (msnm)
Atlacomulco	State of Mexico / Estado de México	19° 47' 30"	99° 52' 11"	2 600
Huimilpan	Querétaro	20° 23' 24"	100° 17' 00"	2 280
Presa Allende	Guanajuato	20° 50' 54"	100° 49' 33"	1 915
Angamacutiro	Michoacán	20° 07' 31"	101° 43' 21"	1 730
Chapala	Jalisco	20° 17' 25"	103° 12' 06"	1 493

a height of 0.12 m, a fixed surface resistance of $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ and an albedo of 0.23 m, which resembles the evaporation that occurs in an extensive surface of green grass of uniform height, actively growing and well irrigated (Allen et al., 2006). The equation established in this model is described below:

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

where ET_o is the reference evapotranspiration ($\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$), Rn is the net radiation at the crop surface ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$), G is the soil heat flux density ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$), T is the mean air temperature ($^{\circ}\text{C}$), u_2 is the wind speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), e_s is the saturation vapor pressure (kPa), e_a is the actual vapor pressure (kPa), Δ is the slope vapor pressure curve ($\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) and γ is the psychrometric constant ($\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Statistical analysis

The results obtained from the ET_o calculation, as well as the temperature, radiation, relative humidity and wind speed records, were subjected to a descriptive statistical analysis consisting of the calculation of the central tendency and dispersion measurements. In addition, an analysis of variance and Tukey's multiple comparison test ($P \leq 0.05$) were performed to determine statistically significant differences among the treatments (stations) in ET_o . Finally, a correlation analysis was carried out to determine the degree of relationship between ET_o and the climatic parameters used in the calculations (Triola, 2013). The open source statistical platform R (R Core Team, 2013) was used to undertake the calculations and graphs.

Results and discussion

The results of the daily-scale ET_o calculation showed important fluctuations during the rainy season at the five stations analyzed, which can be a product of the changing weather conditions from one day to the next due to the decrease in radiation received on cloudy days and the increase in relative humidity resulting from rainy days. These results showed, on average, values higher than $6 \text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ at the beginning of the rainy season and lower than $2 \text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ at its end. ET_o behavior during the rainy season followed a decreasing pattern characterized by being non-linear, showing the most important decrease during the first two months of the season (Figure 2). This behavior is similar in all seasons, which may be due to the presence of a microclimate inside the basin (González-Sosa et al., 2010). Despite this similarity, the magnitude observed among the stations showed statistically significant differences with the exception of the Chapala and Huimilpan stations (Table 2 and 3).

cuenta, dentro de los cálculos, solo los meses de mayo a septiembre de cada año, ya que es el periodo en el que comúnmente se llevan a cabo las actividades agrícolas de temporal y corresponde con el periodo en el que se presenta entre el 75 y 80 % de las precipitaciones anuales (Ruiz-Corral et al., 2000).

Método de análisis

El método Penman-Monteith cuantifica la demanda atmosférica tomando en cuenta un cultivo de referencia con altura de 0.12 m, resistencia de la superficie de $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ y albedo de 0.23 m, lo que asemeja la evaporación que ocurre en una superficie extensa de pasto verde, de altura uniforme, crecimiento activo y bien regado (Allen et al., 2006). La ecuación establecida en dicho modelo se describe a continuación:

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

donde ET_o es la evapotranspiración de referencia ($\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$), Rn es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$), G es el flujo de calor del suelo ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$), T es la temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$), u_2 es la velocidad del viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), e_s es la presión de saturación de vapor (kPa), e_a es la presión de vapor real (kPa), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) y γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Análisis estadístico

A los resultados obtenidos del cálculo de la ET_o , así como a los registros de la temperatura, radiación, humedad relativa y velocidad del viento, se les aplicó un análisis estadístico descriptivo que consistió en el cálculo de las medidas de tendencia central y de dispersión. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de varianza y una comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) para determinar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (estaciones) en la ET_o . Finalmente, se realizó un análisis de correlación para determinar el grado de relación existente entre la ET_o y los parámetros climáticos utilizados en los cálculos (Triola, 2013). Para realizar los cálculos y gráficos se utilizó la plataforma estadística de código abierto R (R Core Team, 2013).

Resultados y discusión

Los resultados del cálculo de la ET_o a escala diaria mostraron fluctuaciones importantes durante la estación de lluvias en las cinco estaciones analizadas, lo cual puede ser producto de las condiciones climáticas cambiantes de un día a otro debido a la disminución de la radiación recibida en días nublados y el aumento de humedad resultante de los días con lluvias. En dichos resultados se observaron, en promedio, valores superiores a los

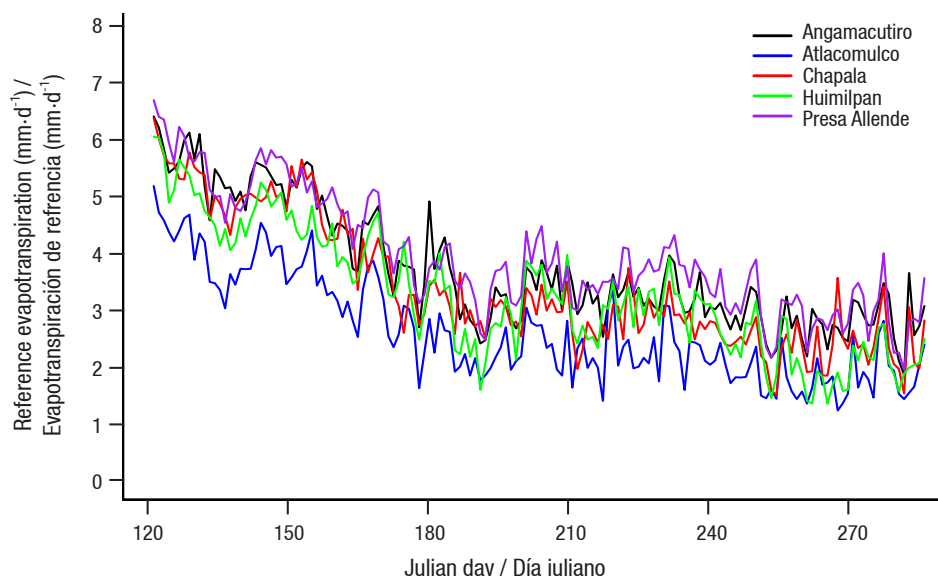


Figure 2. Behavior of average daily reference evapotranspiration for the period 2001-2010 in the Lerma-Chapala basin.

Figura 2. Comportamiento de la evapotranspiración de referencia promedio diaria del periodo 2001-2010 en la cuenca Lerma-Chapala.

Table 2. Analysis of variance of daily reference evapotranspiration.

Cuadro 2. Análisis de varianza de la evapotranspiración de referencia diaria.

	Degrees of freedom / Grados de libertad	Sum of squares / Suma de cuadrados	Root mean square / Media cuadrática	F	P
Stations / Estaciones	4	154.1	38.53	34.02	<2 x 10 ^{-16***}
Residuals / Residuales	755	855.2	1.13		
Total	759	1009.3			

*** = $P \leq 0.001$

Table 3. Comparison of means of the reference evapotranspiration values of the stations studied.

Cuadro 3. Comparación de medias de los valores de evapotranspiración de referencia de las estaciones estudiadas.

Difference in levels / Diferencia de niveles	Difference in means / Diferencia de medias	95 % confidence interval / Intervalo de confianza de 95 %		Adjusted P-value / Valor P ajustado
Atlacomulco – Angamacutiro	-1.0957668	-1.429593	-0.76193988	0.0000000
Chapala – Angamacutiro	-0.3352835	-0.669110	-0.01456619	0.0048396
Huimilpan – Angamacutiro	-0.4546521	-0.788479	-0.12082516	0.0019621
Presa Allende – Angamacutiro	0.2207373	0.113089	0.55456424	0.0036958
Chapala – Atlacomulco	0.7604833	0.426656	1.09431017	0.0000000
Huimilpan – Atlacomulco	0.6411147	0.307287	0.97494162	0.0000019
Presa Allende – Atlacomulco	1.3165041	0.982677	1.65033104	0.0000000
Huimilpan – Chapala	-0.1193685	-0.453195	0.21445835	0.8652756
Presa Allende – Chapala	0.5560209	0.222194	0.88984777	0.0000600
Presa Allende – Huimilpan	0.6753894	0.341562	1.00921632	0.0000004

Differences in means with Tuckey's test ($P \leq 0.05$).

Diferencias de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Table 4 shows the descriptive ETo statistics of the five analyzed stations. The values reported in this table are within the ranges obtained by González-Sosa et al. (2010) and Vásquez-Méndez, Ventura-Ramos, and Acosta-Gallegos (2011) in investigations carried out in Michoacán and Querétaro, respectively, and by Allen et al. (2006) for humid and sub-humid climates in the tropics and subtropics. The most important differences in ETo were found at the Atlacomulco, Chapala and Presa Allende stations, which are located in the upper, lower and middle part of the basin, and the average ETo value was the lowest, intermediate and highest, respectively. These results show that ETo does not depend on the elevation of the site studied, but it can play an important role in evaporative demand, since as the elevation decreases, the temperature increases, which also increases the capacity of the air to retain water vapor (Goyal, 2004). Chávez-Ramírez et al. (2013) reported similar results in the Nazas River basin by obtaining higher ETo values in the lower part of the basin than in the middle part.

Table 5 shows the descriptive statistics of the variables used to calculate ETo. In this table, it can be observed that radiation and temperature have an inversely proportional relationship with the elevation of the site under study. In the case of temperature, this condition is known as vertical thermal gradient (Comino, 2013). According to these results, it can be expected that the middle and lower part of the basin are the regions with the greatest amount of energy available to direct the evapotranspiration process.

Table 6 shows that the highest Pearson linear correlation coefficients were found by relating ETo to relative humidity and radiation. In four of the five stations analyzed, the climatic parameter with the highest correlation coefficient was relative humidity, indicating that this parameter is dominant in the evapotranspiration process at the sites studied. These results coincide with those reported by Eslamian et al. (2011) and Gong et al. (2006) in Iran and China, respectively.

6 mm·día⁻¹ al inicio de la estación lluviosa e inferiores a los 2 mm·día⁻¹ al final de esta. El comportamiento de la ETo durante la estación de lluvias siguió un patrón decreciente caracterizado por ser no lineal, mostrando el descenso más importante durante los dos primeros meses de la estación (Figura 2). Dicho comportamiento es similar en todas las estaciones, lo que puede ser producto de la presencia de un micro-clima al interior de la cuenca (González-Sosa et al., 2010). A pesar de la similitud señalada, la magnitud observada entre las estaciones presentó diferencias estadísticamente significativas con excepción de las estaciones Chapala y Huimilpan (Cuadro 2 y 3).

En el Cuadro 4 se presentan los estadísticos descriptivos de la ETo de las cinco estaciones analizadas. Los valores reportados en este cuadro se encuentran dentro de los rangos obtenidos por González-Sosa et al. (2010) y Vásquez-Méndez, Ventura-Ramos, y Acosta-Gallegos (2011) en investigaciones realizadas en Michoacán y Querétaro, respectivamente, y por Allen et al. (2006) para climas húmedos y subhúmedos en los trópicos y subtropicales. Las diferencias más importantes en la ETo se encontraron en las estaciones Atlacomulco, Chapala y Presa Allende, las cuales están instaladas en la parte alta de la cuenca, la parte baja y la parte media, y el valor promedio de la ETo fue el más bajo, intermedio y el más alto, respectivamente. Estos resultados muestran que la ETo no depende de la altitud del sitio estudiado, pero puede jugar un papel importante en la demanda evaporativa, ya que al disminuir la altura aumenta la temperatura, con lo que también incrementa la capacidad que tiene el aire para retener vapor de agua (Goyal, 2004). Chávez-Ramírez et al. (2013) reportaron resultados similares en la cuenca del río Nazas al obtener valores mayores de la ETo en la parte baja de la cuenca que en la parte media.

En el Cuadro 5 se presentan los estadísticos descriptivos de las variables utilizadas para el cálculo de la ETo. En este cuadro, se observa que la radiación y la temperatura

Table 4. Descriptive statistics of average daily evapotranspiration.

Cuadro 4. Estadísticos descriptivos de la evapotranspiración de referencia promedio diaria.

Station / Estación	Maximum (mm) / Máximo (mm)	Mean (mm) / Media (mm)	Standard deviation (mm) / Desviación típica (mm)	Coefficient of variation (%) / Coeficiente de variación (%)
Atlacomulco	8.18	2.6579	1.57602	59.3
Huimilpan	10.37	3.2969	1.77412	53.8
Presa Allende	10.08	3.9732	1.73415	43.6
Angamacutiro	10.54	3.7532	1.77541	47.3
Chapala	10.57	3.4408	1.69678	49.3

Table 5. Descriptive statistics of climatological variables associated with reference evapotranspiration.**Cuadro 5. Estadísticos descriptivos de las variables climatológicas asociadas con la evapotranspiración de referencia.**

Climatological variable / Variable climatológica	Station / Estación	Minimum / Mínimo	Maximum / Máximo	Mean / Media	Standard deviation / Desviación típica	Coefficient of variation (%) / Coeficiente de variación (%)
Radiation (MJ·m ⁻² ·d ⁻¹) / Radiación (MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)	Atlacomulco	3.53	38.16	13.93	3.91	28.1
	Huimilpan	2.99	45.59	15.40	3.79	24.6
	Presa Allende	3.90	48.80	15.85	3.89	24.5
	Angamacutiro	1.60	52.66	15.91	3.98	25.0
	Chapala	4.99	51.38	16.18	3.63	22.4
Temperature (°C) / Temperatura (°C)	Atlacomulco	10.95	21.70	16.43	1.37	8.3
	Huimilpan	11.60	23.70	17.92	1.56	8.7
	Presa Allende	14.15	27.45	20.94	1.71	8.2
	Angamacutiro	15.80	30.90	21.60	1.93	8.9
	Chapala	14.30	35.45	22.78	1.68	7.4
Relative humidity (%) / Humedad relativa (%)	Atlacomulco	23.50	95.00	68.21	10.18	14.9
	Huimilpan	19.50	97.50	66.39	12.24	18.4
	Presa Allende	24.00	96.00	64.55	11.18	17.3
	Angamacutiro	24.50	97.50	68.17	13.06	19.2
	Chapala	26.50	100.00	66.02	14.14	21.4
Wind speed (km·h ⁻¹) / Velocidad del viento (km·h ⁻¹)	Atlacomulco	0.18	6.04	2.55	0.83	32.5
	Huimilpan	0.19	5.46	2.31	0.70	30.3
	Presa Allende	0	6.00	1.81	0.78	43.1
	Angamacutiro	0	5.57	1.79	0.94	52.5
	Chapala	0.07	4.93	2.14	0.62	28.9

Table 6. Pearson linear correlation of the reference evapotranspiration at each station with the climatological variables used.**Cuadro 6. Correlación lineal de Pearson de la evapotranspiración de referencia en cada estación con las variables climatológicas utilizadas.**

	Atlacomulco	Huimilpan	Presa Allende	Angamacutiro	Chapala
Radiation / Radiación	0.78	0.79	0.84	0.75	0.68
Relative humidity / Humedad relativa	-0.84	-0.85	-0.80	-0.78	-0.80
Temperature / Temperatura	0.45	0.58	0.59	0.66	0.68
Wind speed / Velocidad del viento	0.12	0.09	0.09	0.001	-0.04

Figure 3 shows that the behavior of the monthly-level daily ETo average has a decreasing pattern as the rainy season progresses; in addition, the differences found at each site analyzed are observed. The ETo at the Chapala station is, on average, 30 % higher than that of Atlacomulco, while Presa Allende exhibits an ETo 52 % higher than that of Atlacomulco. The same figure shows the similar behavior of ETo at the Huimilpan and Chapala stations, which did not show statistically significant differences in the average daily magnitude of ETo (Table 3).

presentan una relación inversamente proporcional con la altitud del sitio en estudio. En el caso de la temperatura, esta condición se conoce como gradiente térmico vertical (Comino, 2013). De acuerdo con estos resultados, se puede esperar que la parte media y la parte baja de la cuenca sean las regiones donde se encuentra la mayor cantidad de energía disponible para dirigir el proceso de evapotranspiración.

El Cuadro 6 muestra que los coeficientes de correlación lineal de Pearson más altos se encontraron al relacionar

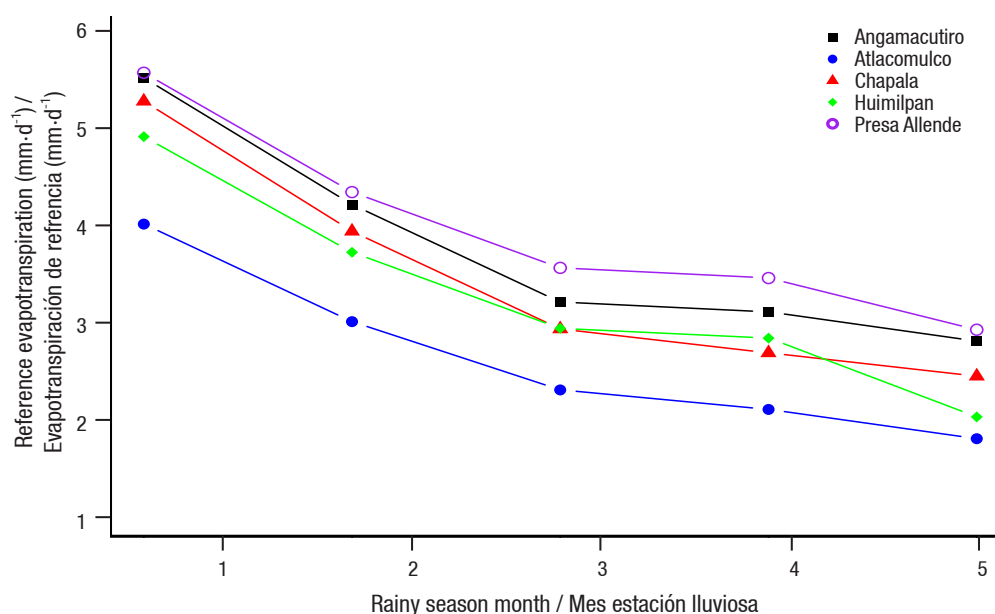


Figure 3. Behavior of the monthly daily average of reference evapotranspiration.

Figura 3. Comportamiento del promedio diario mensual de la evapotranspiración de referencia.

According to the monthly average, it was found that the percentage decrease in ETo during the first two months of the rainy season is within the range of 40 to 50 % of the value calculated at its beginning. This behavior can be viewed as normal if it is considered that, in order for evapotranspiration to occur, there needs to be water availability, energy availability to carry out the water phase change and an air humidity deficit (Allen et al., 2006). Thus, it is to be expected that at the beginning of the rainy season the availability of energy presents its maximum values and relative humidity its low values, which produces high ETo levels. As the rainy season progresses, the available energy decreases due to the presence of cloudiness and the relative humidity increases because of the rainfall that occurs, resulting in a decrease in the magnitude of ETo.

In the interannual behavior of daily ETo, seasonally averaged, it can be seen that during the ten years analyzed the value of the lowest ETo was maintained at the Atlacomulco station, intermediate at Chapala and high at Presa Allende (Figure 4). The same figure shows that all stations exhibit significant fluctuations in the values calculated from one year to the next, which range from -19 to 38 % with respect to the value calculated the previous year in the case of Atlacomulco, between -12 and 26 % at Huimilpan, between -9 and 12 % at Presa Allende, between -12 and 28 % at Angamacutiro and between -31 and 42 % at Chapala.

Figure 4 also shows that the lowest fluctuations occur at the Presa Allende station, suggesting the presence of a homogeneous climate in this part of the basin. The highest fluctuations were found at the Chapala station, where there is the highest energy availability (Table 5),

la ETo con la humedad relativa y la radiación. En cuatro de las cinco estaciones analizadas, el parámetro climático que presentó el mayor coeficiente de correlación fue la humedad relativa, lo que indica que este parámetro es dominante en el proceso de evapotranspiración en los sitios estudiados. Estos resultados coinciden con lo reportado por Eslamian et al. (2011) y Gong et al. (2006), en Irán y China, respectivamente.

En la Figura 3 se puede apreciar que el comportamiento del promedio diario a nivel mensual de la ETo presenta un patrón decreciente conforme avanza la temporada de lluvias, además, se observan las diferencias encontradas en cada sitio analizado. La ETo en la estación Chapala es, en promedio, 30 % mayor que la de Atlacomulco, mientras que la Presa Allende exhibe una ETo 52 % mayor que la de Atlacomulco. En la misma figura se puede observar el comportamiento similar de la ETo en las estaciones Huimilpan y Chapala, las cuales no presentaron diferencias estadísticamente significativas en cuanto a la magnitud promedio diaria de la ETo (Cuadro 3).

De acuerdo con el promedio a nivel mensual, se encontró que el porcentaje de disminución de la ETo durante los dos primeros meses de la estación de lluvias está dentro del rango de 40 a 50 % del valor calculado al inicio del periodo de lluvias. Este comportamiento se puede considerar normal si se toma en cuenta que, para que ocurra la evapotranspiración, se necesita que haya disponibilidad de agua, disponibilidad de energía para llevar a cabo el cambio de fase del agua y un déficit de humedad en el aire (Allen et al., 2006). De esta manera, es de esperarse que al inicio de la temporada de lluvias la disponibilidad de energía presente sus valores máximos y

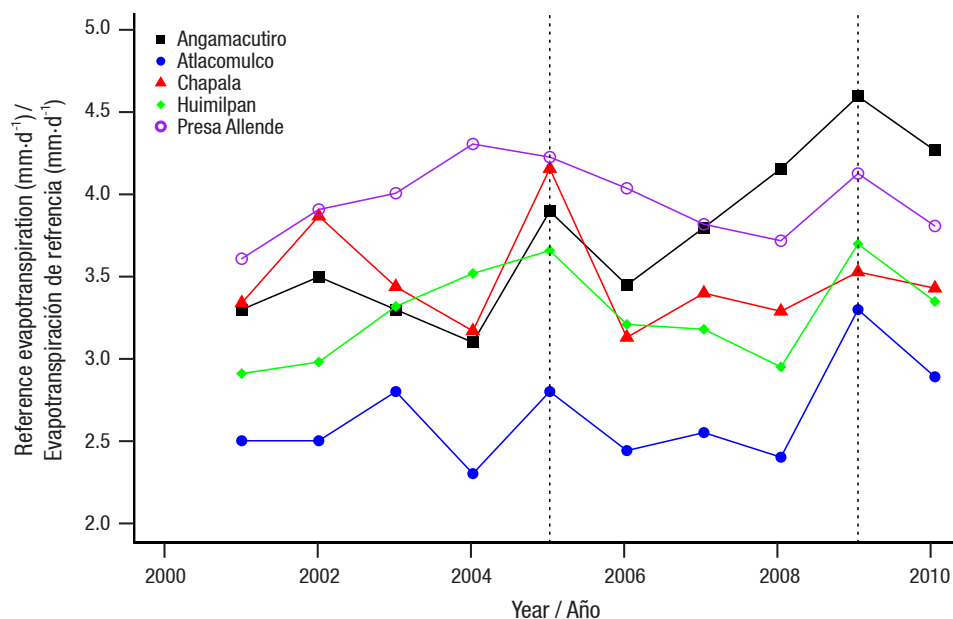


Figure 4. Behavior of the seasonal daily average of reference evapotranspiration.

Figura 4. Comportamiento del promedio diario estacional de la evapotranspiración de referencia.

in addition to the presence of Lake Chapala, which can significantly influence ETo behavior. Among the ETo fluctuations observed, the years 2005 and 2009 stand out, since in the first one significant increases were observed (22 to 42 %) with respect to the value observed the previous year in three of the five analyzed stations, while in the second one the indicated increase (7 to 38 %) was observed at all stations (Figure 4).

On the other hand, the interannual behavior of radiation and relative humidity is presented in Figure 5. In 2005 there were increases in radiation levels ranging from 1.8 to 4.2 % of the values observed the previous year, while in relative humidity there were decreases in the range of 8.7 to 24 % compared to 2004. In 2009, increases in radiation were in the range of 3.4 to 7 %, and the decrease in relative humidity between 3.6 and 8.5 %, both parameters relative to the values measured the previous year. These results show that the peak ETo observed in 2005 was mainly influenced by the decrease in relative humidity, while in 2009 the increase indicated in ETo is a product of both the increase in radiation and the decrease in relative humidity. This shows that the sites under study have experienced significant increases in ETo levels, probably caused by the behavior of radiation and relative humidity.

Goyal (2004) states that changes in climatic parameters may affect evapotranspiration, which is in line with what is reported in this paper, and may specifically affect crop water needs, especially in the case of rainfed agriculture. This type of agriculture has as a limiting factor the lack of sources additional to rain to irrigate crops, which results in low productivity that can even lead to economic losses (Eslamian et al., 2011).

la humedad relativa tenga valores bajos, lo que produce niveles altos de la ETo. Conforme avanza la temporada de lluvias, la energía disponible disminuye debido a la presencia de nubosidad y la humedad relativa aumenta como resultado de las precipitaciones ocurridas, esto propicia una disminución en la magnitud de la ETo.

En el comportamiento interanual de la ETo diaria, promediada estacionalmente, se puede apreciar que durante los diez años analizados se mantuvo el valor de la ETo más bajo en la estación Atlacomulco, intermedio en Chapala y alto en Presa Allende (Figura 4). En la misma figura se observa que todas las estaciones exhiben fluctuaciones importantes en los valores calculados de un año a otro, las cuales van desde -19 a 38 % respecto del valor calculado el año anterior en el caso de Atlacomulco, entre -12 y 26 % en Huimilpan, entre -9 y 12 % en Presa Allende, entre -12 y 28 % en Angamacutiro y entre -31 y 42 % en Chapala.

En la Figura 4 también se observa que las fluctuaciones más bajas se dan en la estación Presa Allende, lo que sugiere la presencia de un clima homogéneo en esta parte de la cuenca. Las fluctuaciones más altas se encontraron en la estación Chapala, donde se tiene la mayor disponibilidad de energía (Cuadro 5), además de la presencia del lago de Chapala, el cual puede influir de manera significativa en el comportamiento de la ETo. Entre las fluctuaciones observadas en la ETo destacan los años 2005 y 2009, ya que en el primero se observaron incrementos importantes (22 a 42 %) respecto del valor observado el año anterior en tres de las cinco estaciones analizadas, mientras que en el segundo el incremento señalado (7 a 38 %) se observó en todas las estaciones (Figura 4).

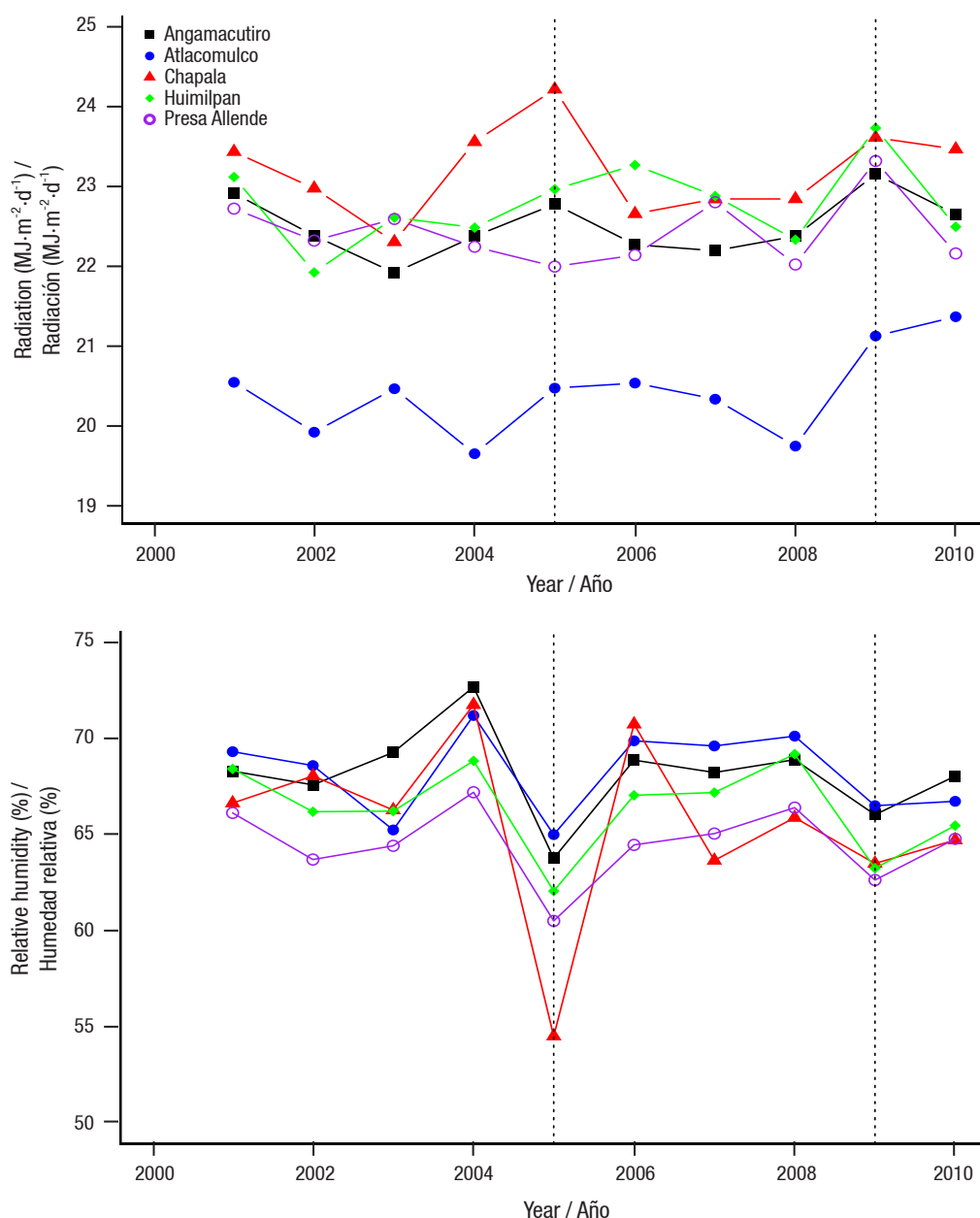


Figure 5. Behavior of the daily average of radiation and relative humidity during the rainy season.

Figura 5. Comportamiento del promedio diario de la radiación y la humedad relativa durante el periodo de lluvias.

Conclusions

Evapotranspiration (ET_o) during the rainy season follows a decreasing pattern characterized by being non-linear, showing the most significant decline during the first two months, which is a product of high energy availability and low relative humidity observed at the start of that season. ET_o showed a similar behavior among the sites studied, which was differentiated only by the magnitude observed, which had statistically significant differences in most of the stations. The observed ET_o values are within the internationally reported ranges for humid and sub-humid climates, in the tropics and subtropics.

Por otro lado, el comportamiento interanual de la radiación y la humedad relativa se presenta en la Figura 5. En 2005 se tuvieron incrementos en el nivel de radiación que van de 1.8 a 4.2 % de los valores observados el año anterior, mientras que en la humedad relativa se presentaron disminuciones en el rango de 8.7 a 24 % respecto de 2004. En 2009, los incrementos en la radiación estuvieron en el rango de 3.4 a 7 %, y la disminución en la humedad relativa entre 3.6 y 8.5 %, ambos parámetros respecto de los valores medidos el año anterior. En estos resultados se puede apreciar que el pico observado en la ET_o en 2005 estuvo influenciado, principalmente, por la disminución de la humedad relativa, mientras

ETo behavior, in the analyzed stations, does not depend on the elevation of the site; however, it was observed that site elevation can have a significant impact on the magnitude of evaporative demand. Results of the ETo correlation analysis, with the climatological variables used, show that ETo behavior in the sites studied mainly depends on the observed relative humidity and solar radiation values.

The results obtained can serve as a basis for determining the water requirements of rainfed crops in areas close to the study sites. In addition, the values obtained show the need to formulate strategies aimed at reducing the probability of crop losses due to fluctuations that can occur in ETo, and thereby meet crop water needs.

End of English version

References / Referencias

- Allen, R. G., Jensen, M. E., Wright, J. L., & Burman, R. D. (1989). Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 81(4), 650-662. doi: 10.2134/agronj1989.00021962008100040019x
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>
- Bakhtiari, B., & Liaghat, A. M. (2011). Seasonal sensitivity analysis for climatic variables of ASCE-Penman-Monteith model in semi-arid climate. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13(7), 1135-1145. Retrieved from http://jast-old.modares.ac.ir/article_4771_bb9ee4b16ca3b2b25677b20acf40402b.pdf
- Chávez-Ramírez, E., González-Cervantes, G., González-Barrios, J. L., Dzúl-López, E., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A., & Chávez-Simental, J. A. (2013). Uso de estaciones climatológicas automáticas y modelos matemáticos para determinar la evapotranspiración. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(4), 115-126. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v4n4/v4n4a7.pdf>
- Comino, J. R. (2013). Cuantificación De los gradientes térmicos a nivel superficial a lo largo del Rheinland-Pfalz (Renania-Palatinado Alemania). *Baetica: Estudios de Arte, Geografía e Historia*, 325, 75-97. doi: 10.24310/BAETICA.2013.v0i35.58
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2006). *Acuerdo por el que se da a conocer el estudio técnico de los recursos hídricos del área geográfica Lerma-Chapala*. México. México: Author. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4925984&fecha=24/07/2006
- Droogers, P., & Allen, R. D. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions.

que en 2009, el incremento señalado en la ETo es producto tanto del incremento en la radiación como del descenso en la humedad relativa. Lo anterior muestra que los sitios estudiados han experimentado aumentos significativos en los niveles de la ETo ocasionados, probablemente, por el comportamiento de la radiación y la humedad relativa.

Goyal (2004) plantea que los cambios en los parámetros climáticos pueden afectar la evapotranspiración, lo que concuerda con lo reportado en este trabajo, y de manera puntual puede afectar las necesidades de agua de los cultivos, especialmente en el caso de la agricultura de temporal. Este tipo de agricultura tiene como factor limitante la carencia de fuentes adicionales a la lluvia para llevar a cabo el riego de los cultivos, lo que trae como consecuencia una baja productividad que incluso puede conducir a pérdidas económicas (Eslamian et al., 2011).

Conclusiones

Durante la estación de lluvias, la ETo sigue un patrón decreciente que se caracteriza por ser no lineal, mostrando el descenso más importante durante los dos primeros meses, lo cual es producto de la alta disponibilidad de energía y de la baja humedad relativa observada al inicio de dicha estación. Además, la ETo presentó un comportamiento similar entre los sitios estudiados, que se diferenció únicamente por la magnitud observada, la cual tuvo diferencias estadísticamente significativas en la mayoría de las estaciones. Los valores observados en este parámetro se encuentran dentro de los rangos reportados internacionalmente para climas húmedos y subhúmedos, en los trópicos y subtrópicos.

El comportamiento de la ETo, en las estaciones analizadas, no depende de la altitud del sitio; sin embargo, se observó que la altitud del lugar puede tener un efecto importante en la magnitud de la demanda evaporativa. Los resultados del análisis de correlación, con las variables climatológicas utilizadas, muestran que en los sitios estudiados el comportamiento de la ETo depende, principalmente, de los valores observados en la humedad relativa y la radiación solar.

Los resultados obtenidos pueden servir como base para determinar los requerimientos de agua de los cultivos de temporal en las zonas cercanas a los sitios de estudio. Además, los valores obtenidos muestran la necesidad de planificar estrategias encaminadas a disminuir la probabilidad de pérdidas de los cultivos debido a las fluctuaciones que se pueden presentar en la ETo, y con ello cumplir con las necesidades de agua de los cultivos.

Fin de la versión en español

- Irrigation and Drainage Systems*, 16(1), 33-45. doi: 10.1023/A:1015508322413
- Eslamian, S., Khordadi, M. J., & Abedi-Koupai, J. (2011). Effects of variations in climatic parameters on evapotranspiration in the arid and semi-arid regions. *Global and Planetary Change*, 78(3-4), 188-194. doi: 10.1016/j.gloplacha.2011.07.001
- Estévez, J., Gavilán, P., & Berengena, J. (2009). Sensitivity analysis of a Penman-Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. *Hydrological Processes*, 23(23), 3342-3353. doi: 10.1002/hyp.7439
- Gong, L., Xu, C. Y., Chen, D., Halldin, S., & Chen, Y. D. (2006). Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 620-629. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.03.027
- González-Sosa, E., Mastachi-Loza, C. A., Rivera-Vázquez, J. B., Gutiérrez-López, A., Lafragua, J., & Guevara-Escobar, A. (2010). La evaporación en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(3), 51-69. Retrieved from <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/articleCms/view/64/60>
- Goyal, R. K. (2004). Sensitivity evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agricultural Water Management*, 69(1), 1-11. doi: 10.1016/j.agwat.2004.03.014
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2011). *Guía de prácticas climatológicas*. OMM-núm. 100. Switzerland: Author. Retrieved from https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_es.pdf
- R Core Team. (2013). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved from <http://www.R-project.org/>
- Rockström, J. (2003). Water for food and nature in drought-prone tropics: vapour shift in rain-fed agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 358(1440), 1997-2009. doi: 10.1098/rstb.2003.1400
- Ruiz-Corral, J. A., Ramírez-Díaz, J. L., Flores-Mendoza, F. J., & Sánchez-González, J. J. (2000). Cambio climático y su impacto sobre la estación de crecimiento de maíz en Jalisco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 23(2), 169-182. Retrieved from <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/23-2/2a.pdf>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2016). *Servicio Meteorológico Nacional - Comisión Nacional del Agua*. México: Author. Retrieved October 5, 2016 from <https://smn.cna.gob.mx/es>
- Sotelo, E., Cardona, N., Fragoso, A., Enriquez, C., Garrido, A., Caire, G., & Cotler, H. (2005). *Acciones estratégicas para la recuperación de la cuenca Lerma-Chapala: recomendaciones técnicas para las diecinueve subcuencas*. México: Instituto Nacional de Ecología. Retrieved from https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2009/03/zonas_priritarias_lerma_chapala.pdf
- Tabari, H., & Hosseinzadeh, T. P. (2014). Sensitivity of evapotranspiration to climatic change in different climates. *Global and Planetary Change*, 115, 16-23. doi: 10.1016/j.gloplacha.2014.01.006
- Triola, M. F. (2013). *Estadística*. México: Pearson Educación.
- Vásquez-Méndez, M. R., Ventura-Ramos, E. J., & Acosta-Gallegos, J. A. (2011). Habilidad de estimación de los métodos de evapotranspiración para una zona semiárida del centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3), 399-415. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2n3/v2n3a8.pdf>

