

Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud

• Miguel Angel Segura-Castruita* •

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Torreón, México

Autor para correspondencia

• Carlos Alberto Ortiz-Solorio •

Colegio de Postgraduados, México

Resumen

Segura-Castruita, M. A., & Ortiz-Solorio, C. A. (mayo-junio, 2017). Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(3), 93-110.

La estimación de la evapotranspiración potencial (ETP) es importante en el uso del agua con aplicaciones agrícolas, ecológicas y otras actividades de planeación. La carencia de datos en estaciones meteorológicas (EM) de países en vías de desarrollo conduce a la búsqueda de modelos sencillos que permitan estimar la ETP. Los objetivos de este estudio fueron 1) relacionar las variables temperatura máxima (TX) y temperatura mínima (TN) mensuales, altitud (AL) y meses del año (ME), con resultados de ETP obtenidos con el modelo de Hargreaves y Samani (HS) en México, mediante regresiones lineales multivariadas, y 2) evaluar la precisión de los modelos obtenidos respecto a la ETP de HS y Penman (PN). Datos mensuales de 81 EM (972 datos) fueron utilizados para deducir la ETP mensual con el modelo HS. Los resultados se relacionaron con las variables TX, TN, AL y ME, para generar dos modelos de regresión lineal múltiple, a fin de calcular la ETP mensual, uno general (ETP_g) y otro para cada mes (ETP_m), que se emplearon para determinar la ETP en 12 EM diferentes a las usadas inicialmente. Los resultados demostraron que los modelos ETP_g y ETP_m tienen un poder predictivo mayor que 75%; asimismo, el modelo ETP_m tiene el menor error y estimó valores de evapotranspiración potencial similares a los que se obtienen con HS y PN. Por lo tanto, el modelo ETP_m es un modelo sencillo que es aplicable para México sin utilizar la latitud ni la radiación.

Palabras clave: ETP, pérdida de agua, evaporación, transpiración, Hargreaves y Samani, Penman, Penman-Monteith.

Abstract

Segura-Castruita, M. A., & Ortiz-Solorio, C. A. (May-June, 2017). Modeling monthly potential evapotranspiration from maximum-minimum temperature and altitude. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 8(3), 93-110.

The estimate of potential evapotranspiration (PET) is important in the use of water for agricultural, environmental applications and other planning activities. The lack of data on meteorological stations (MS) of developing country leads to the search for simple models to estimate the PET. The objectives of this study were 1) to relate the variables maximum temperature (TX) and minimum temperature (TN) monthly, altitude (AL) and months (ME), with results of PET, obtained with the model Hargreaves and Samani (HS) in Mexico, using multivariate linear regressions and 2) to evaluate the accuracy of the models obtained with respect to HS and Penman (PN) PET. Monthly data from 81 MS (972 data) were used to derive the monthly PET with the HS model, the results were related to the TX, TN, AL and ME variables, to generate two models of multiple linear regression to calculate the monthly PET, one general model (PET_g) and one for each month model (PET_m), which were used to determine the PET in 12 MS, different to those initially used. The results show that PET_g and PET_m models have a greater than 75% predictive power; also, the PET_m model has the smallest error and estimated values of potential evapotranspiration similar to those obtained with HS and PN. Therefore, the model PET_m is a simple model that is applicable to Mexico, without using of latitude nor radiation.

Keywords: PET, water loss, evaporation, transpiration, Hargreaves and Samani, Penman, Penman-Monteith.

Recibido: 21/01/2016
Aceptado: 14/11/2016

Introducción

La evapotranspiración (*ET*) es la transmisión de agua de la tierra a la atmósfera por procesos de evaporación de la superficie del suelo y transpiración de las plantas (Wang & Dickinson, 2012). La *ET* es un fenómeno complejo que controla el intercambio de masa y energía en el sistema atmosférico global y se considera como una herramienta útil para el monitoreo del cambio de energía y transferencia de humedad del suelo a la atmósfera, pues es gobernado por diversas variables climáticas, como radiación, temperatura, velocidad del viento, humedad atmosférica y su efecto en la humedad del suelo, y el albedo (Chen, Liu, & Thomas, 2006; Kousari & Ahani, 2012). Dos conceptos relacionados con la *ET* son la evapotranspiración real o de referencia (ET_0), y la evapotranspiración potencial (*ETP*). La ET_0 es definida como la cantidad de agua perdida por el complejo suelo-planta en las condiciones meteorológicas, edáficas y biológicas existentes; mientras que la *ETP* es la máxima cantidad de agua capaz de ser perdida por una capa continua de vegetación que cubre todo el terreno, cuando la cantidad de agua suministrada al suelo es ilimitada (Ortiz-Solorio, 2011). Aun cuando se reconoce que estos conceptos son diferentes, ambos indican cantidades máximas de agua perdida en favor de la atmósfera; por ello, en algunos estudios, han sido considerados como equivalentes (McKenney & Rosenberg, 1993; Henríquez-Dole & Miner-Vega, 2014). La estimación precisa de la *ETP* es importante para asegurar el uso del agua con aplicaciones agrícolas y ecológicas, manejo de recursos naturales y otras actividades de planeación (Villa-Nova, Pereira, & Shock, 2007; Bates, Kundzewics, Wu, & Palutikof, 2008; Suleiman & Hoogenboom, 2009). Existen diferentes ecuaciones empíricas y teóricas para estimar el valor de la *ETP* bajo ciertas condiciones climáticas (El-Nashar & Hussein, 2013), por ejemplo, los métodos de Penman (*PN*) (Penman, 1948), Penman-Monteith (*PM*) (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998), y Hargreaves y Samani (*HS*) (1985), entre

otros. No obstante, la selección de la ecuación a emplear depende de la disponibilidad de datos climáticos en una región determinada y la precisión requerida (El-Nashar & Hussein, 2013). En este sentido, las ecuaciones de *PN* y *PM* se basan en un balance de energía, siendo *PM* la más utilizada y considerada como método estándar; sin embargo, tienen la desventaja de requerir parámetros específicos (radiación solar, temperatura del aire, humedad, presión de vapor y velocidad del viento), que en muchas ocasiones no se encuentran en estaciones meteorológicas (*EM*) comunes, problema que se incrementa en países en vías de desarrollo (Droogers & Allen, 2002). Al respecto, la ecuación *HS* es una alternativa cuando los datos son escasos, ya que sus resultados se ajustan a los de *PM* (Trezza, 2008; Vásquez-Méndez, Ventura-Ramos, & Acosta-Gallegos, 2011; De Melo & Fernandes, 2012; Moeletsi, Walker, & Hamandawana, 2013; Chen *et al.*, 2014). Para México, el método de *HS* se recomienda para estimaciones de *ETP* cuando el método de *PN* no es aplicable por falta de datos meteorológicos (Campos-Aranda, 2005). El método de *HS* utiliza la temperatura media y la amplitud estacional a partir de datos de temperaturas máximas (*TX*) y mínimas (*TN*), además de datos geográficos, como la latitud de las *EM* o del sitio de estudio, para la estimación de la radiación extraterrestre (Hargreaves & Samani, 1985). Aunque, para la obtención de la radiación, también pueden utilizarse mapas de radiación solar incidente (Campos-Aranda, 2005), poco comunes en México. Las *TX* y *TN* son trascendentes en el modelo de *HS*, mientras que en el modelo de *PN* son útiles en el cálculo del déficit de vapor a saturación (Allen *et al.*, 1998; Ortiz-Solorio, 2011), lo cual resalta la importancia de la temperatura en el comportamiento de la *ETP*. Asimismo, diferentes investigadores han planteado que la altitud (*AL*) influye en la *ETP*, pues ésta tiende a disminuir cuando la *AL* aumenta (Jaramillo-Robledo, 2006; Vega & Jara, 2009; Henríquez-Dole & Miner-Vega, 2014), a consecuencia del gradiente alto-térmico (Velázquez-Ruiz, Martínez, & Carrillo-González, 2012), lo

que afecta la distribución y comportamiento de la vegetación, organismos e incluso de los cultivos (Romo-Benito, 2008; Robertson, Edlinb, & Edwards, 2010; Yu *et al.*, 2013). Por tal motivo, la influencia de la *AL* en la temperatura puede considerarse relativamente similar a la influencia de la latitud (Ortiz-Solorio, 2011), lo que permite deducir que la *AL* es otra variable en el cálculo de la *ETP*. Un factor más que afecta el comportamiento de la temperatura y, por consiguiente, de la *ETP* es el tiempo que transcurre durante el año o los meses (*ME*), al provocar una variación estacional de tales elementos climáticos (Ruiz-Álvarez, 2014). Sin embargo, modelos multivariados que involucren la *TX*, *TN*, *AL* y *ME* como variables independientes son escasos. México cuenta con 4 027 estaciones climáticas con 60 años de datos, que ofrecen información para la aplicación de modelos empíricos tradicionales que se basen en datos de temperatura y latitud, principalmente; no obstante, en muchas ocasiones, la falta de datos provoca la búsqueda de alternativas para la obtención de datos climáticos (Ortiz-Solorio, 2011) o la generación de nuevos modelos que puedan utilizarse en lugares donde no existan estaciones climáticas e incluso que puedan emplearse en invernaderos. Al respecto, Martí y Zarzo (2012) mencionaron que los procesos estadísticos multivariados son efectivos en el análisis de datos climáticos cuando se conocen valores previos de la variable a estimar. Si se considera lo anterior, es probable que al relacionar la *TX*, *TN*, *AL* y los *ME*, con los resultados de *ETP* del método de *HS* (ETP_{HS}) como método estándar, mediante regresiones lineales múltiples, se obtengan modelos sencillos y con aplicabilidad para México, sin el uso de la latitud ni la radiación. Por tal motivo, los objetivos del presente trabajo fueron los siguientes: 1) relacionar las variables *TX*, *TN*, *AL* y *ME* con resultados de ETP_{HS} en México, mediante regresiones lineales para obtener modelos multivariados (general y para cada mes) que estimen *ETP* mensual, y 2) evaluar la precisión de los modelos obtenidos respecto a la *ETP* de *HS* y *PN*, con el fin de determinar su utilización.

Materiales y métodos

Zona de estudio

El estudio se realizó en México (figura 1), que se localiza entre los 14° 32' y 32° 43' latitud norte y 86° 42' y 118° 27' longitud oeste; ocupa un área de 1 964 375 km². Este país tiene una geología que, por su origen, presenta rocas sedimentarias (64%), ígneas (32%) y metamórficas (4%) de distintas eras geológicas; 6% Precámbrica; 3% Paleozoica; 62% Mesozoica, y 29% Cenozoica (Ortiz-Villanueva & Ortiz-Solorio, 1990). Asimismo, tiene diferentes tipos de fisiografía debido a los procesos de orogenia y vulcanismo, el intemperismo y otros factores modeladores del paisaje (González-Medrano, 2003). Cuenta con diversos climas, siendo los principales el cálido húmedo (4.7%), cálido subhúmedo (23.0%), templado húmedo (2.7%), templado subhúmedo (20.6%), seco (24.3%) y muy seco (24.7%) (García, 2004). La vegetación natural domina en México con una extensión de 61%, donde abundan bosques (templado y tropical), que cubren una superficie de 29%, y los matorrales con 26% (Rzedowski, 2006). El uso del suelo es predominantemente agrícola y pecuario (25% de la superficie total del país), mientras las zonas urbanas cubren tan sólo 0.23% (INEGI, 1999).

Métodos

Un total de 81 *EM* pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2015) fueron seleccionadas dentro del territorio de México (figura 1). El número de *EM* se obtuvo mediante el cálculo del tamaño de muestra (*n*) proporcional finita (Pérez-López, 2005), con un universo (*N*) de 4 027 (total de *EM* en México); nivel de confianza de 95% ($Z = 1.96$); margen de error máximo (*e*) de 4.7%, y una proporción (*p*) que se esperaba encontrar de 50%. El número de estados que se utilizaron para distribuir las *EM* también se estimó con *n*, donde $N = 31$, pues no se consideró la Ciudad de México, $Z = 1.96$, $e = 12.1\%$ y $p = 50\%$, dando un total de nueve.

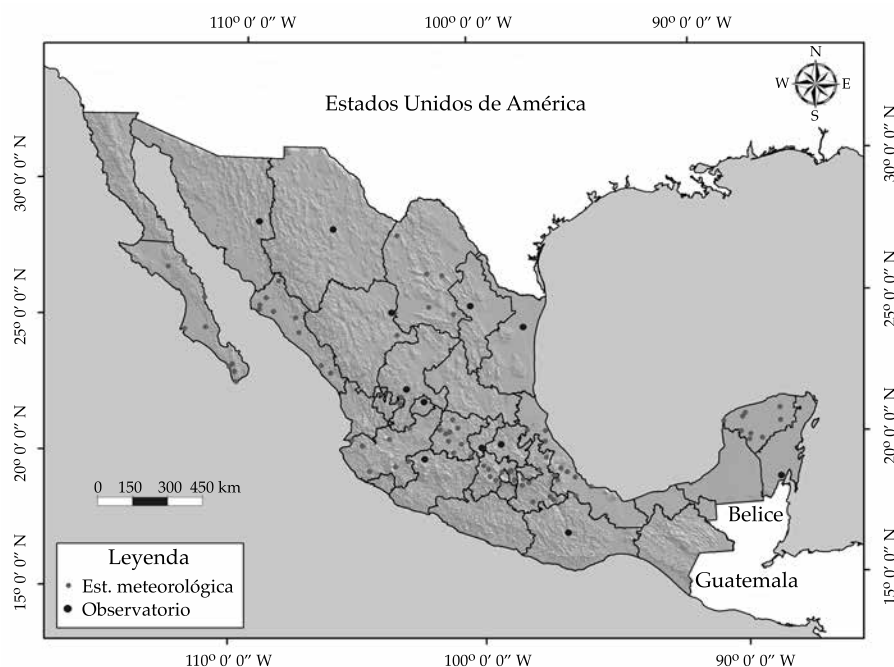


Figura 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas en el área de estudio.

Las EM se distribuyeron en los estados siguiendo el método de muestreo aleatorio estratificado, por lo cual, en cada entidad se ubicaron nueve estaciones al azar, con el fin de tenerlas en diferentes AL y latitudes (cuadro 1), para captar las variaciones de los elementos climáticos que se utilizaron en el estudio. Así se obtuvieron las TX y TN de cada mes, y la AL de cada estación. Es importante resaltar que estos datos son promedios de registros de 60 años (1951-2010).

Los datos de las estaciones se usaron para calcular la ETP_{HS} (ecuación (1)) con el método de Hargreaves y Samani (1985):

$$ETP_{HS} = 0.0023 \times Ra \times (TX - TN)^{0.5} \times (T_m + 17.8) \quad (1)$$

donde ETP_{HS} es la evapotranspiración potencial dada en mm/día, que para este estudio se estimó para el día 15 de cada mes; después se multiplicó por los días que corresponden a cada mes para obtener la ETP mensual; Ra es la radiación extraterrestre para el día 15 de cada

mes; T_m , la temperatura media mensual; TX, la temperatura máxima, y TN es la temperatura mínima para el día 15 de cada mes.

Un grupo de 81 datos de AL correspondientes al total de las estaciones meteorológicas y 972 grupos de datos de TX, TN y ETP_{HS} que se obtuvieron de los doce meses del año por el total de las estaciones, se usaron para proponer funciones multivariadas, donde se tuvieron variables dependientes e independientes (Martínez-Rodríguez, 2005).

Modelación de la ETP, en función de TX, TN, AL y ME

Se generaron dos modelos de regresión lineal múltiple (MRLM) para establecer la relación de un conjunto de variables independientes X_1, X_2, \dots, X_n , y una variable dependiente Y, que se representan en la siguiente expresión general (Salinas & Silva, 2007):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_n X_{in} + U_i$$

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas utilizadas en la generación de los modelos para estimar ETP.

Estación	Número	Nombre	AL (m)	Latitud N	Estación	Número	Nombre	AL (m)	Latitud N
1	00003005	Cabo San Lucas	15.0	22° 52' 55"	42	00015145	Plan Lago de Texcoco	2 260.0	19° 27' 02"
2	00003010	El Álamo	81.0	27° 06' 00"	43	00015148	San Felipe P. (DGE)	2 583.0	19° 42' 45"
3	00003035	Loreto (DGE)	20.0	26° 00' 46"	44	00015170	Chapingo (DGE)	2 250.0	19° 29' 05"
4	00003045	Puerto San Carlos	10.0	24° 47' 30"	45	00015372	Ixtlahuaca (DGE)	2 540.0	19° 34' 08"
5	00003061	Santa Rosalía (DGE)	10.0	27° 20' 20'	46	00021004	Acatlán de J. (DGE)	1 427.0	18° 17' 48"
6	00003064	Sierra de la Laguna	85.0	23° 32' 55"	47	00021012	Atlixco	1 904.0	18° 55' 18"
7	00003066	Todos Santos (DGE)	10.0	23° 26' 55"	48	00021025	Chilchotla (CFE)	2 194.0	19° 15' 18"
8	00003067	Yeneka	160.0	23° 16' 15"	49	00021027	Ciudad Serdán (DGE)	2 569.0	19° 56' 40"
9	00003173	San Pedrito (CFE)	170.0	24° 54' 00"	50	00021035	Puebla (DGE)	2 122.0	19° 00' 45"
10	00005018	Las Nieves	1 140.0	25° 43' 47"	51	00021046	Huejotzingo	2 454.0	19° 09' 43"
11	00005019	Monclova (OBS)	615.4	26° 54' 30"	52	00021083	Tehuacán	2 416.0	18° 27' 50"
12	00005025	Piedras Negras (OBS)	249.7	28° 42' 00"	53	00021113	Zinacantepec (SMN)	2 521.0	18° 20' 00"
13	00005026	Presa Coyote	1 223.0	25° 32' 32"	54	00021119	Libres (SMN)	2 897.0	19° 30' 01"
14	00005027	El Cuije	1 120.0	24° 41' 48"	55	00025008	Topolobampo (SMN)	4.0	25° 37' 47"
15	00005040	Torreón (OBS)	1 123.0	25° 31' 11"	56	00025009	Bocatoma Sufragio	31.0	26° 04' 15"
16	00005044	Cuatro Ciénegas (DGE)	740.0	26° 59' 09"	57	00025011	Concordia (CFE)	140.0	23° 16' 15"
17	00005048	Saltillo (DGE)	1 700.0	25° 26' 00"	58	00025015	Culiacán (DGE)	60.0	24° 47' 31"
18	00005058	La Rosita	1 080.0	28° 27' 06"	59	00025018	Choix (SMN)	311.0	26° 43' 00"
19	00011009	Celaya (SMN)	1 761.0	20° 32' 11"	60	00025031	El Quelite (CFE)	49.0	23° 33' 26"
20	00011017	Dolores Hidalgo (SMN)	1 937.0	21° 09' 08"	61	00025038	Guasave (DGE)	22.0	25° 33' 45"
21	00011028	Irapuato	1 729.0	20° 40' 08"	62	00025110	Badiraguato (DGE)	191.0	25° 20' 31"
22	00011039	León (SMN)	1 800.0	21° 06' 00"	63	00025116	Los Mochis	11.0	25° 48' 04"
23	00011089	Silao (SMN)	1 777.0	20° 57' 00"	64	00030018	El Buzón	34.0	19° 09' 25"
24	00011094	Guanajuato (DGE)	1 995.0	21° 00' 51"	65	00030021	El Carrizal	242.0	19° 21' 47"
25	00011097	Santa María (SMN)	1 751.0	20° 13' 18"	66	00030032	Coscomatepec (SMN)	1 530.0	19° 04' 18"
26	00011109	San Felipe (SMN)	2 070.0	21° 28' 51"	67	00030041	Chicontepec (SMN)	291.0	20° 59' 36"
27	00011132	Puroagua (DGE)	2 013.0	20° 04' 29"	68	00030132	Poza Rica	50.0	20° 32' 27"
28	00014030	Ciudad Guzmán (OBS)	1 515.0	19° 43' 05"	69	00030182	Tierra Blanca (SMN)	65.0	18° 27' 00"
29	00014069	Huejúcar (OBS)	1 830.0	22° 21' 27"	70	00030201	Alvarado (DGE)	5.0	18° 46' 15"
30	00014081	La Desembocada	19.0	20° 43' 43"	71	00030228	Jalapa (DGE)	1 365.0	19° 31' 05"
31	00014096	Mascota (SMN)	1 230.0	20° 31' 31"	72	00030229	Tuxpan (SMN)	17.0	20° 56' 50"
32	00014148	Tecomates	286.0	19° 33' 30"	73	00031004	Celestún (SMN)	3.0	20° 51' 00"
33	00014167	Yahualica (SMN)	1 800.0	21° 10' 54"	74	00031005	CIAPY	50.0	20° 25' 36"
34	00014191	Valle de Juárez (SMN)	1 950.0	19° 56' 00"	75	00031019	Mérida (OBS)	11.0	20° 57' 00"
35	00014196	Colotlán (SMN)	1 660.0	22° 07' 00"	76	00031034	Tizimín	14.0	21° 09' 22"
36	00014338	El Arenal (DGE)	1 380.0	20° 46' 32"	77	00031036	Valladolid (OBS)	23.0	20° 41' 24"
37	00015004	Almoloya del R. (DGE)	2 572.0	19° 09' 20"	78	00031038	Xul	92.0	20° 06' 03"
38	00015007	Amecameca (DGE)	2 470.0	19° 08' 26"	79	00031048	Peto (SMN)	34.0	20° 07' 00"
39	00015058	Molinito	2 289.0	19° 27' 13"	80	00031057	Conkal	9.0	21° 04' 24"
40	00015125	Texcoco (DGE)	2 250.0	19° 30' 20"	81	00031061	Oxcutzcab	26.0	20° 17' 28"
41	00015126	Toluca (OBS)	2 726.0	19° 17' 28"					

donde Y_i es la variable dependiente, $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}$ son variables independientes; mientras que los parámetros o coeficientes son β_0 intercepto, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ y β_4 pendientes, respectivamente; finalmente, U_i es el error.

El primer MRLM fue general e involucró a los 972 grupos de datos, con ETP_{HS} como variable dependiente y TX, TN como variables independientes, así como los 81 datos de AL , que correspondieron a la altitud de las estaciones meteorológicas seleccionadas y 81 grupos de ME que concernieron a los meses del año para cada estación; es importante mencionar que los meses se codificaron del 01 al 12, donde el 01 correspondió, por ejemplo, a enero y el 12 a diciembre. El modelo quedó definido como:

$$ETP_g = \beta_0 + \beta_1 TX + \beta_2 TN + \beta_3 AL + \beta_4 ME \quad (2)$$

El segundo modelo fue para cada mes e involucró las variables independientes TX, TN y AL agrupadas por mes, pues en este caso ME fue considerada como una variable independiente categórica, con la ETP_{HS} como variable dependiente, por lo que los modelos se definieron para cada mes como:

$$ETP_m = \beta_0 + \beta_1 TX + \beta_2 TN + \beta_3 AL \quad (3)$$

La selección de las variables que aparecieron en los modelos finales para cada mes dependió de la significancia estadística ($F_c, P \leq 0.05$) de las variables independientes y la baja multicolinealidad, de tal manera que en la ecuación de los modelos para cada mes sólo aparecieran dos variables independientes, con el fin de obtener modelos sencillos. En este sentido, tanto el modelo general como los mensuales fueron de tipo predictivo (Martínez-Rodríguez, 2005).

Validación de los modelos

Un total de 12 estaciones meteorológicas (cuadro 2) y 10 observatorios (cuadro 3) diferentes a los que se utilizaron para la obtención de los modelos (ETP_g y ETP_m) fueron seleccionados de manera aleatoria para registrar los datos de AL , latitud, TX y TN ; es importante aclarar que los datos de las estaciones correspondieron al periodo de 1951 a 2010; mientras que los datos promedio de los observatorios fueron de 1951 a 1980, ya que sólo se contó con ese periodo. Los datos de las estaciones fueron útiles para el cálculo de la ETP mensual con los modelos ETP_g, ETP_m y ETP_{HS} , donde el último se consideró como de referencia (Moeletsi *et al.*, 2013), mismos que fueron divididos entre el número de días correspondientes a cada mes para

Cuadro 2. Estaciones meteorológicas para la prueba del desempeño de los modelos propuestos.

Núm.	Estación	Nombre	Estado	Latitud	Longitud	Altitud
1	00001014	Pabellón	Aguascalientes	22° 10' 01"	102° 17' 34"	1 937.70
2	00008147	Chihuahua Univer.	Chihuahua	28° 42' 20"	105° 59' 38"	1 350.00
3	00010009	Cd. Lerdo (SMN)	Durango	25° 32' 00"	103° 31' 00"	1 135.00
4	00013074	Ixmiquilpan (DGE)	Hidalgo	20° 28' 00"	99° 14' 00"	1 700.00
5	00016144	Zamora (SMN)	Michoacán	19° 59' 06"	102° 16' 59"	1 580.00
6	00019052	Monterrey (OBS)	Nuevo León	25° 44' 01"	100° 18' 17"	515.00
7	00020079	Oaxaca	Oaxaca	17° 04' 59"	96° 42' 35"	1 594.00
8	00022015	San Juan del R. (SMN)	Querétaro	20° 23' 00"	100° 00' 00"	1 914.00
9	00023002	Bacalar	Quintana Roo	18° 41' 00"	88° 23' 00"	2.00
10	00026004	Arivechi	Sonora	28° 55' 45"	109° 11' 27"	482.00
11	00028086	San Fernando	Tamaulipas	24° 50' 50"	98° 09' 30"	46.00
12	00032009	Jerez (SMN)	Zacatecas	22° 39' 00"	103° 00' 00"	2 108.00

obtener la ETP en mm/día y después se compararon entre sí. Aparte, con los datos TX , TN , AL y ME de los observatorios, la ETP mensual se calculó de nuevo con los modelos ETP_g y ETP_m y los resultados se dividieron entre el número de días del mes correspondiente, para obtener ETP promedio por día, para compararlos con los de ETP_{PN} de los mismos observatorios (cuadro 3), que se obtuvieron de la publicación de *Datos Agroclimáticos para América Latina y el Caribe* (FAO, 1985), que al estar reportados como promedio mensuales, se dividieron entre el número de días de cada mes, lo que sirvió para la verificación del desempeño de los modelos obtenidos con respecto a PN .

Análisis estadístico

Los coeficientes de determinación (R^2), valor de F_c ($P \leq 0.05$) de las variables independientes y el factor de inflación de la varianza (FIV) que se obtuvieron del análisis de varianza de las regresiones (Cuadras, 2014) se emplearon para comparar los modelos ETP_g y ETP_m . Por otra parte, el desempeño de estos modelos se obtuvo mediante índices estadísticos, como la raíz cuadrada de la media del error ($RCME$) y el error medio del sesgo (EMS), con las siguientes ecuaciones (Douglas, Jacobs, Sumne, & Ray, 2009):

$$RCME = \left((1/n) \sum_1^n (y - \hat{y})^2 \right)^{0.5} \quad (4)$$

donde $RCME$ es la raíz cuadrada de la media del error en mm/día; y , la ET calculada con los modelos obtenidos (ETP_g o ETP_m , en mm/día), y \hat{y} es la ET de referencia (en su caso, HS o PN , en mm/día):

$$EMS = \left((1/n) \sum_1^n (y - \hat{y}) \right) \quad (5)$$

donde EMS es el error medio del sesgo en mm/día; el resto de los símbolos indica lo mismo que en la ecuación (4).

El $RCME$ es un indicador del desempeño de un modelo en un periodo de tiempo dado (Douglas *et al.*, 2009) y su valor es siempre positivo (Yapo, Gupta, & Sorooshian, 1998); mientras que el EMS proporciona información del comportamiento a largo plazo de las correlaciones, lo que permite una comparación de la desviación real entre los valores pronosticados y medidos, término a término (Gunhan, Demir, Hancioglu, & Hepbasli, 2005); en ambos casos, el cero es ideal.

Finalmente, se llevaron a cabo dos regresiones ortogonales. Los valores de ETP_g y ETP_m se consideraron como variables independientes y ETP_{HS} como variable dependiente. Este tipo de

Cuadro 3. Observatorios con ETP promedio mensual por el método de Penman.

Obs.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Chihuahua	51	67	122	145	172	166	149	141	109	97	69	45
Chilpancingo	89	92	121	121	117	91	95	91	79	84	74	69
Durango	53	74	111	133	154	149	130	121	110	101	71	53
Guadalajara	80	94	139	156	171	132	119	116	102	95	78	71
Jalapa	62	68	95	105	110	102	103	103	87	77	62	55
La Paz	64	72	105	132	161	171	160	155	132	113	80	60
Mérida	89	98	140	158	165	149	145	141	121	109	89	81
Monterrey	50	62	98	119	133	142	155	143	109	84	55	48
Tacubaya	75	89	128	130	129	110	101	99	86	81	68	64
Tapachula	168	161	177	154	145	120	134	136	112	124	135	146

Fuente: FAO (1985).

regresión se utilizó para determinar si los modelos (ETP_g y ETP_m) son equivalentes o estiman lo mismo que el modelo de referencia (ETP_{HS}), lo cual se definió con los parámetros de cada regresión, donde las condiciones que debían cumplir fueron las siguientes: "el intervalo de confianza (IC) de la pendiente debe contener el número 1 y el IC de la intersección debe contener el 0" (Martínez-Arnaiz, 1994), considerando un IC al 95% en ambos casos, y asumiendo que las variables dependientes e independientes tienen la misma varianza (Carroll & Ruppert, 1996; Frez, 2002). El procesamiento de datos se realizó en el software *Minitab17* (2014).

Resultados y discusión

Durante el periodo de 1951 a 2010, las variables TX , TN y ETP_{HS} de las estaciones que se utilizaron tuvieron variaciones que se pueden ver en el cuadro 4. El comportamiento de los valores

de TX y TN fue similar a ETP_{HS} . Lo anterior no es raro, puesto que la variación durante el año de la TX y TN es normal; además, en la estimación de la ETP_{HS} se utilizaron las temperaturas máximas y mínimas (Hargreaves & Samani, 1985; Moeletsi *et al.*, 2013).

Asimismo, dichas variables respondieron a la ubicación de las estaciones meteorológicas tanto por altitud como por latitud. En este sentido, se sabe que el incremento de 305 m en la elevación produce un descenso aproximado de 1.66 °C, mientras que la variación de latitud genera cambios en la temperatura (Körner, 2007; Ortiz-Solorio, 2011). Por otra parte, los promedios de las variables climáticas en el lapso del año tuvieron una distribución normal, de tal manera que la TX y la ETP_{HS} presentaron los valores máximos en mayo (32.2 °C y 197.54 mm, respectivamente); en tanto que la TN promedio tuvo su máximo (17.1 °C) en junio (figura 2), similar a lo reportado por Ortiz-Solorio (2011).

Cuadro 4. Algunas estadísticas descriptivas de las variables de las estaciones en estudio.

Variable	N	\bar{x}	σ	$\bar{x} \pm \sigma$	Mínimo	Máximo
TX (°C)	972	28.63	4.82	(23.81 – 33.45)	14.6	40.1
TN (°C)	972	13.60	6.15	(7.45 – 19.75)	-1.9	26.2
AL (m)	81	1 048.00	31.3	(1016.70 – 1079.30)	3.00	2 897.00
ETP_{HS} (mm)	972	145.73	36.52	(109.21 – 182.25)	65.92	251.12

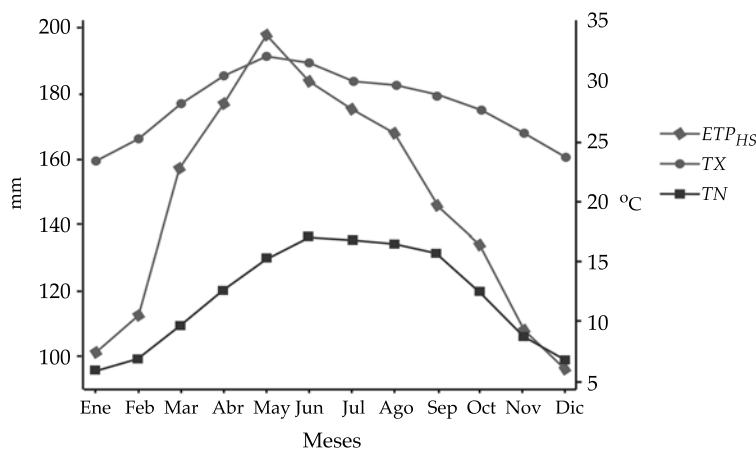


Figura 2. Distribución de las variables TX , TN y ETP . Promedios mensuales de 1981 a 2010 durante el año.

Modelación de la ETP general y mensual

El análisis de varianza de la regresión lineal múltiple para obtener el modelo general, utilizando todas las variables, mostró que la variable *TN* tuvo una probabilidad de rechazo de 0.074, mayor que la propuesta ($P \leq 0.05$) y una *Fc* de 3.21 ($P \leq 0.05$) más baja respecto al resto de las variables, lo que sugiere que un modelo con las variables *TX*, *AL* y *ME* podría ser más adecuado. En cambio, en los modelos para cada mes, la significancia de las variables *TN* y *AL* varió en función de los meses o temporada del año. La *AL* tuvo probabilidades de rechazo menor que 0.05 y *Fc* mayores que los de *TN* en los meses de noviembre a febrero, lo que sugiere que en estos meses considerar a *TX*, *AL* y *ME* (variable categórica) en los modelos es más apropiado; mientras que *TN* tuvo más significancia que *AL* en el resto de los meses. Una vez que se generaron nuevamente los modelos correspondientes, se tuvieron los siguientes resultados:

- Los modelos ETP_g y ETP_m fueron estadísticamente significativos ($P \leq 0.05$) y se ajustaron con precisión a los datos (cuadros 5 y 6, respectivamente). Además, sus variables independientes tuvieron una moderada correlación; es decir, baja multicolinealidad, ya que su *FIV* se encontró en el rango 1-5, lo que eliminó la redundancia de las variables independientes en la explicación del comportamiento de la variable dependiente (Katz, 2011).

El modelo general tuvo un R^2 ajustado igual a 0.7911 y un R^2 predicho de 0.7896; es decir, tiene una capacidad predictiva de 78.96%. Este

resultado sugiere que ETP_g es adecuado para la estimación de la evapotranspiración en cualquier época del año, ya que las variables *TX*, *AL* y *ME* explican un 79.18% del comportamiento de la *ETP*, donde el aumento de un grado Celsius en *TX* incrementa 8.140 mm la *ETP*, con la adición de 1.82 mm cada vez que se incrementan 100 metros en la altitud, a la que se sustrae 1.757 mm por el efecto del mes y finalmente la resta de 95.10 mm de la constante.

Por otra parte, el modelo mensual está integrado por 12 *MRLM*; cada uno corresponde a un mes del año (cuadro 6). Las ecuaciones de regresión tienen un R^2 ajustado que va de 0.7649 a 0.9942, siendo menor en el mes de noviembre y mayor en agosto, con una capacidad predictiva de 75.01 a 99.37%, respectivamente.

Los coeficientes de determinación de las regresiones para cada mes son adecuados, siendo estos una primera medida de evaluación (Martínez-Rodríguez, 2005); así como el valor de *Fc* ($P \leq 0.05$) varió de 131.89 hasta 6920.96, lo que indica su significancia estadística y fortalece su validez. Por otra parte, las variables independientes de estas ecuaciones fueron significativas ($P \leq 0.05$) y diferentes en cada una de ellas; además, tienen baja multicolinealidad. La *TX* tuvo mayor efecto sobre el comportamiento de la *ETP* y apareció en todos los modelos; las variables *TN* y *AL* tuvieron efectos en función de la temporada del año, de tal manera que *AL* influyó principalmente en invierno (de noviembre a febrero), y *TN* en el resto del año. Wong-González (2010) señala que la magnitud de los coeficientes de las variables independientes influye en el comportamiento de la variable dependiente. Los valores de los coeficientes de esta investigación se muestran en un orden de mayor a menor

Cuadro 5. Análisis de varianza del modelo de regresión lineal múltiple ETP_g .

Parámetro	Coef.	<i>Fc</i>	<i>P</i>	<i>FIV</i>	Modelo	R^2	R^2 aj.
Regresión		1 226.98	0.000		$ETP_g = 8.140*TX + 0.018226*AL - 1.757*ME - 95.10$	0.7918	0.7911
Constante	-95.10		0.000				
<i>TX</i>	8.140	3 465.43	0.000	1.55			
<i>AL</i>	0.018226	710.92	0.000	1.55			
<i>ME</i>	-1.757	125.38	0.000	1.00			

Cuadro 6. Análisis de varianza de los modelos de regresión lineal múltiple ETPm.

Mes	Parámetro	Coficiente	Fc	P	FIV	Modelo	R ² aj.
Ene	Regresión		460.99	0.000		$ETP = 4.661*TX + 0.009970*AL - 20.85$	0.9200
	Constante	-20.85		0.000			
	TX	4.661	920.79	0.000	1.41		
	AL	0.009970	298.14	0.000	1.41		
Feb	Regresión		438.51	0.000		$ETP = 4.68068*TX + 0.008744*AL - 17.2422$	0.9149
	Constante	-17.2422		0.000			
	TX	4.68068	862.87	0.000	1.38		
	AL	0.008744	225.54	0.000	1.38		
Mar	Regresión		920.24	0.000		$ETP = 7.04866*TX - 2.79732*TN - 13.5076$	0.9583
	Constante	-13.5076		0.000			
	TX	7.04866	1 736.68	0.000	1.98		
	TN	-2.79732	487.52	0.000	1.98		
Abr	Regresión		3 245.68	0.000		$ETP = 7.56124*TX - 3.2335*TN - 12.7099$	0.9878
	Constante	-12.7099		0.000			
	TX	7.56124	5 922.91	0.000	2.20		
	TN	-3.2335	1 660.10	0.000	2.20		
May	Regresión		3 444.41	0.000		$ETP = 8.65317*TX - 3.98152*TN - 20.158$	0.9885
	Constante	-20.158		0.000			
	TX	8.65317	5 734.52	0.000	2.68		
	TN	-3.98152	1 537.20	0.000	2.68		
Jun	Regresión		3 054.82	0.000		$ETP = 9.0764*TX - 4.6789*TN - 25.0644$	0.9871
	Constante	-25.0644		0.000			
	TX	9.0764	3 856.37	0.000	4.72		
	TN	-4.6789	1 358.79	0.000	4.72		
Jul	Regresión		4 615.35	0.000		$ETP = 9.47161*TX - 5.14064*TN - 23.8755$	0.9914
	Constante	-25.0644		0.000			
	TX	9.0764	5 266.01	0.000	4.47		
	TN	-4.6789	1 762.07	0.000	4.47		
Ago	Regresión		6 920.46	0.000		$ETP = 8.91333*TX - 4.94892*TN - 16.4938$	0.9942
	Constante	-16.4938		0.000			
	TX	8.91333	8 161.82	0.000	5.12		
	TN	-4.94892	3 082.82	0.000	5.12		
Sep	Regresión		1 773. 11	0.000		$ETP = 9.0764*TX - 4.6789*TN - 25.0644$	0.9779
	Constante	-4.25306		0.115			
	TX	7.56906	2 185.56	0.000	5.26		
	TN	-4.32205	882.94	0.000	5.26		
Oct	Regresión		311.89	0.000		$ETP = 6.02033*TX - 3.10231*TN + 7.78566$	0.8860
	Constante	7.78566		0.145			
	TX	6.02033	456.30	0.000	4.43		
	TN	-3.10231	188.86	0.000	4.43		
Nov	Regresión		136.18	0.000		$ETP = 4.86308*TX + 0.0119274*AL - 32.4384$	0.7649
	Constante	-12.4384		0.001			
	TX	4.86308	252.31	0.000	2.61		
	AL	0.0119274	110.56	0.000	2.61		
Dic	Regresión		398.59	0.000		$ETP = 4.53273*TX + 0.0106408*AL - 24.7453$	0.9086
	Constante	-24.7453		0.000			
	TX	4.53273	795.68	0.000	1.57		
	AL	0.01064808	321.66	0.000	1.57		

como $TX > TN > AL$, con tendencia positiva, negativa y positiva, respectivamente. Este comportamiento no es extraño para TX y TN , pues el aumento de la temperatura hasta un máximo (TX) incrementará la ETP , y la disminución de la temperatura hasta un mínimo (TN) provoca un decrecimiento de ETP , pues estas temperaturas influyen en la presión de saturación de vapor y por lo tanto afectan la estimación de ET (Allen *et al.*, 1998; Hargreaves & Samani, 1985; Ortiz-Solorio, 2011). No obstante, llama la atención el signo positivo del coeficiente de AL en el modelo general y en algunos mensuales, pues difiere de la tendencia negativa en la relación ETP -altitud, que reportaron Jaramillo-Robledo (2006), Vega y Jara (2009), y Goulden *et al.* (2012). La tendencia que se encontró en este estudio tiene sentido válido desde un punto de vista físico, pues la discrepancia podría deberse a la relación inversa que existe entre la altitud y la presión atmosférica (Pereira, Valero, Picornell-Buendía, & Martín-Benito, 2010), lo que provoca, a su vez, un aumento en la evaporación, independientemente de la temperatura (Castellan, 1987; Maderrey & Jiménez, 2001; Armstrong, Pomeroy, & Martz, 2015) y que para México se hace evidente en invierno. De acuerdo con Allen *et al.* (1998), la presión atmosférica es otro de los parámetros atmosféricos que determinan la ET .

En este contexto, Bautista, Bautista y Delgado (2009) mencionaron que los modelos tradicionales generalmente utilizan una o más variables atmosféricas o algunas mediciones relacionadas, como la evaporación. Aunque asumen un estado ideal donde no interviene la elevación; pero, como se observa en este estudio, la altitud sí tiene influencia. Al respecto, Hargreaves y Samani (1985), en su ecuación, hicieron una modificación en función de la correlación que encontraron entre las temperaturas máximas y mínimas con la altitud para El Salvador; sin embargo, es escasa más información relacionada con este aspecto.

Aplicación de los modelos ETP_g y ETP_m

Los resultados de la aplicación de los modelos ETP_g y ETP_m (cuadro 7) por estación y por mes

muestran que en ocasiones se subestiman o sobreestiman los valores de ETP respecto a ETP_{HS} mensual; es importante resaltar que al seleccionar de manera aleatoria EM y observatorios diferentes a las que se utilizaron para generar los modelos, se corrió el riesgo de seleccionar alguna que estuviera fuera del rango que se utilizó, situación no deseada cuando se generan modelos (Salinas & Silva, 2007). En este sentido, tres EM y un observatorio presentaron datos que no se encontraron en el rango de valores con los que se generaron los modelos (EM : 1. Pabellón de Arteaga [enero $TN = -3.0$ °C; febrero $TN = -2.2$ °C]; 9. Bacalar [$AL = 2.0$ m], y 10. Arivechi [mayo $TX = 40.2$ °C; junio $TX = 42.6$]; Observatorio Durango [enero $TN = -3.9$ °C; febrero $TN = -2.6$]). No obstante, estos datos no influyeron en los resultados, pues cuando fueron utilizados en los modelos ETP_g y ETP_m no se observaron diferencias grandes respecto a ETP_{HS} , ya que la varianza de los resultados de los modelos obtenidos se encuentra dentro del índice de confianza (95%) de la varianza de ETP_{HS} (cuadro 8), lo que sugiere que los resultados de ETP con HS y de las dos ecuaciones de este estudio son similares. Estos resultados pudieron ocurrir porque en Pabellón de Arteaga y en el observatorio de Durango los datos correspondieron a TN , que no se utilizaron en el cálculo; en Bacalar, la variación en la altitud es de un metro menor que el límite del rango, así como en Arivechi, con temperatura superiores al límite mayor por 0.1 y 1.5 °C, lo que provocó variaciones mínimas en los resultados.

De tal manera que la ETP mensual con los tres modelos tiene una distribución parecida (figura 3); resultados de distribución de ETP semejantes a los reportados por Campos-Aranda (2005) y Ruíz-Álvarez *et al.* (2014).

Análisis estadísticos de ETP_g y ETP_m

Al analizar el resultado de los modelos ETP_g y ETP_m con el total de las estaciones de prueba respecto a ETP_{HS} , los estadísticos $RCME$ y EMS del ETP_g (0.42 y 0.09 mm/día, respectivamente) fueron mayores que los de ETP_m ($RCME = 0.16$

Cuadro 7. Evapotranspiración potencial de las estaciones de prueba por los modelos HS , ETP_g y ETP_m .

EM	ME	ETP_{HS}	ETP_g	ETP_m	EM	ME	ETP_{HS}	ETP_g	ETP_m	EM	ME	ETP_{HS}	ETP_g	ETP_m
1	Ene	101.22	116.67	100.50	5	Ene	124.45	148.05	122.61	9	Ene	115.68	126.99	115.27
	Feb	111.04	169.70	109.26		Feb	135.05	162.70	133.25		Feb	118.99	127.81	119.93
	Mar	153.69	150.86	156.74		Mar	180.98	182.23	178.16		Mar	153.62	144.09	152.83
	Abr	174.70	170.39	176.31		Abr	198.01	196.89	196.51		Abr	160.33	154.67	163.94
	May	198.82	182.61	194.84		May	214.21	204.21	214.93		May	178.53	164.44	183.13
	Jun	174.91	172.84	175.51		Jun	187.06	186.31	189.09		Jun	163.04	157.93	167.78
	Jul	161.91	153.30	161.40		Jul	174.63	165.96	175.78		Jul	170.25	158.74	173.45
	Ago	158.01	154.11	158.94		Ago	171.13	166.77	171.13		Ago	170.76	162.81	170.75
	Sep	138.38	147.60	140.57		Sep	156.41	166.77	154.85		Sep	149.56	157.11	146.66
	Oct	130.36	142.72	133.77		Oct	150.49	165.96	145.66		Oct	144.24	155.48	137.95
	Nov	109.74	134.58	107.82		Nov	129.61	161.89	127.92		Nov	115.38	137.58	115.91
	Dic	96.84	119.12	96.46		Dic	117.97	148.86	116.71		Dic	108.84	128.62	108.54
2	Ene	72.44	71.74	76.04	6	Ene	109.69	126.90	111.99	10	Ene	90.34	85.17	92.09
	Feb	85.16	88.83	88.18		Feb	123.26	141.55	123.95		Feb	105.97	103.07	105.87
	Mar	128.97	118.14	135.20		Mar	172.31	161.09	178.16		Mar	160.04	133.19	173.69
	Abr	158.31	146.63	160.51		Abr	195.42	175.74	196.51		Abr	200.30	167.38	207.71
	May	190.87	171.86	187.81		May	217.05	186.07	214.93		May	242.72	198.31	241.55
	Jun	201.40	199.54	196.62		Jun	191.84	165.16	189.09		Jun	248.10	220.29	243.53
	Jul	183.13	183.26	178.78		Jul	178.29	144.81	175.78		Jul	221.05	195.06	216.81
	Ago	165.38	170.23	165.39		Ago	170.84	145.62	171.13		Ago	198.07	184.47	198.18
	Sep	135.17	153.14	140.79		Sep	151.29	145.62	154.85		Sep	175.66	182.03	181.89
	Oct	117.60	132.79	129.99		Oct	139.77	144.81	145.63		Oct	153.28	164.12	166.45
	Nov	83.15	95.34	84.82		Nov	115.89	140.74	115.22		Nov	107.63	120.98	107.53
	Dic	64.49	74.99	72.57		Dic	102.92	127.72	105.38		Dic	86.30	88.42	87.35
3	Ene	83.61	92.94	89.28	7	Ene	130.91	146.46	123.69	11	Ene	87.44	68.16	83.55
	Feb	100.37	110.85	102.21		Feb	140.15	161.93	134.78		Feb	99.39	86.06	97.85
	Mar	156.42	148.30	156.42		Mar	183.74	181.46	175.80		Mar	141.23	114.55	143.84
	Abr	183.12	180.86	183.33		Abr	194.14	192.86	191.22		Abr	160.41	138.97	162.19
	May	207.52	195.51	204.63		May	195.94	186.35	197.76		May	181.37	156.88	181.92
	Jun	197.80	197.14	194.63		Jun	164.47	161.92	167.36		Jun	183.29	169.90	182.24
	Jul	192.60	190.65	189.83		Jul	165.06	153.78	167.93		Jul	193.00	173.98	191.21
	Ago	176.11	180.86	175.30		Ago	162.86	153.78	162.90		Ago	189.96	178.86	188.78
	Sep	147.06	167.02	149.02		Sep	143.89	148.09	140.04		Sep	156.14	160.14	156.71
	Oct	131.79	150.74	137.21		Oct	142.36	148.90	133.25		Oct	132.04	134.09	135.58
	Nov	102.21	126.32	104.14		Nov	127.63	147.27	121.28		Nov	98.15	100.72	96.01
	Dic	84.08	98.64	86.60		Dic	122.33	142.39	115.05		Dic	84.36	73.04	79.54
4	Ene	110.12	120.23	105.63	8	Ene	98.34	97.65	96.58	12	Ene	85.31	76.33	88.26
	Feb	120.12	134.07	115.56		Feb	108.74	112.30	106.68		Feb	97.77	93.42	99.48
	Mar	168.84	161.74	169.60		Mar	150.44	137.53	147.64		Mar	136.11	113.77	135.62
	Abr	180.50	170.69	181.14		Abr	162.32	148.11	160.73		Abr	158.78	136.56	158.67
	May	190.94	173.95	191.73		May	172.03	150.55	170.89		May	185.42	159.35	184.67
	Jun	167.03	157.67	167.75		Jun	146.86	131.83	144.68		Jun	174.24	159.35	173.55
	Jul	163.69	147.90	164.59		Jul	141.81	121.25	139.19		Jul	157.36	132.49	155.72
	Ago	161.56	149.63	162.80		Ago	136.99	119.62	134.87		Ago	150.59	129.24	150.62
	Sep	140.25	141.39	140.57		Sep	119.95	113.92	118.73		Sep	130.63	124.35	132.03
	Oct	132.88	135.69	132.47		Oct	115.09	109.04	114.39		Oct	118.44	113.77	121.34
	Nov	114.29	130.81	108.44		Nov	100.08	105.78	97.86		Nov	98.13	102.37	100.18
	Dic	102.99	117.79	98.50		Dic	92.06	96.83	90.81		Dic	83.83	82.02	86.53

Cuadro 8. Resultados de ETP mensual de los modelos HS , general y para cada mes.

Mes	ETP_{HS}	ETP_g	ETP_m	Mes	ETP_{HS}	ETP_g	ETP_m
Enero	101.13	106.44	100.45	Julio	175.23	160.10	174.21
Febrero	112.20	121.02	111.45	Agosto	167.49	157.99	167.57
Marzo	156.87	145.58	158.64	Septiembre	145.36	150.60	146.39
Abril	177.20	164.78	178.28	Octubre	134.03	141.51	136.14
Mayo	197.54	177.26	197.40	Noviembre	108.49	125.37	107.26
Junio	183.34	173.32	182.65	Diciembre	96	108.20	95.33
				S	37.8	31.7	37.7
				S^2	1430	1006	1422
				IC 95% S	(33.9-42.8)	(28.4-35.9)	(33.8-42.7)
				IC 95% S^2	(1 149-1 829)	(808-1 287)	(1 142-1 819)

S: desviación estándar; S^2 : varianza; IC: intervalo de confianza.

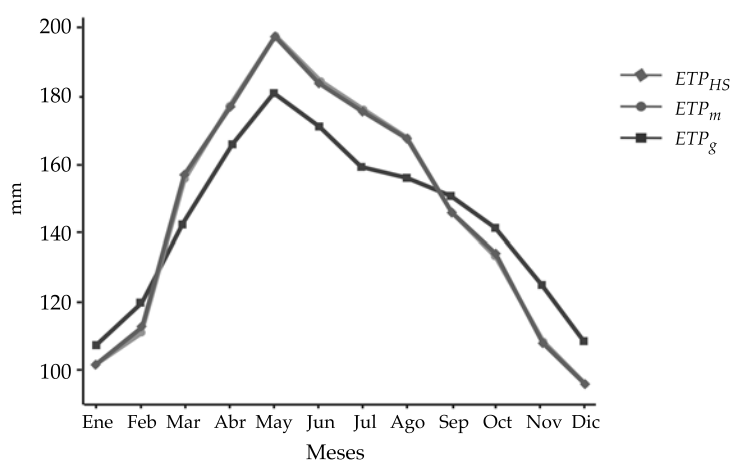


Figura 3. Distribución de valores medios de ETP de los modelos HS , ETP_g y ETP_m durante el año.

mm/día y un $EMS = 0.07$ mm/día); en cambio, cuando el desempeño de los modelos se evaluó por mes, el $RCME$ del ETP_g varió de 0.24 a 0.76 mm/día, resultados mayores que los obtenidos con ETP_m (cuadro 9), con excepción del mes de octubre (0.24 mm/día). El EMS en el modelo general tuvo valores de -0.05 a 0.68 mm/día, con marzo en la condición ideal (más cercano a cero); mientras que en los modelos para cada mes se tuvo un EMS de 0.01 a 0.16 mm/día, donde los valores más cercanos a cero y menores a 0.01 se encontraron en marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y diciembre.

Comportamiento parecido a lo reportado por Vásquez-Méndez *et al.* (2011), quienes concluyeron que el método de HS tuvo un mejor desempeño con datos a nivel mensual.

El valor promedio de la $RCME$ significa que los dos modelos generados en este estudio estiman la ETP con bajo error, aunque en el ETP_g tiene un error mayor que en ETP_m (0.38 y 0.14 mm/día, respectivamente), lo cual sugiere que el modelo para cada mes (ETP_m) tuvo el mejor desempeño. Por su parte, el EMS del modelo general tuvo valores positivos y negativos, lo que revela subestimaciones y sobreestimaciones, en

tanto que el modelo para cada mes tiende a una ligera sobreestimación.

Cuando los resultados de ETP_g y ETP_m en los observatorios fueron comparados con los de PN (FAO, 1985), el RCME de la ETP_g del mes de marzo fue el más bajo (0.73 mm/día), en tanto que febrero fue más grande (1.38 mm/día), mayores que ETP_m (cuadro 9). Por otra parte, el EMS detecta ligeras sobreestimaciones de los modelos obtenidos en todos los meses. No obstante, el desempeño de los modelos de este estudio a nivel mensual respecto a PN es satisfactorio, ya que se encuentran en los grupos 1 y 2 (RCME-EMS < 1 mm/día y RCME-EMS entre 1-2 mm/día, respectivamente), propuestos por Vásquez-Méndez *et al.* (2011). En este sentido, los modelos obtenidos tienen un comportamiento semejante a HS cuando se compararon con PN. Al respecto, Gavilán, Lorite, Tornero y Berengena (2006) reportaron un resultado similar al comparar datos de ETP calculados con PM y HS. Asimismo, Campos-Aranda (2005) y Ortiz-Solorio (2011) indicaron que el método de PM con datos de observatorios de México produce valores de ETP mayores que HS. Sin embargo,

diversos autores han concluido que el HS es un método alternativo cuando no existen datos para aplicar PM (Maeda, Wiberg, & Pellikka, 2011; Moeletsi *et al.*, 2013; Raziei & Pereira, 2013).

Al analizar lo anterior, el desempeño del modelo general y para cada mes con respecto a HS sugiere que el uso de cualquiera de ellos para la estimación de la ETP es factible. Sin embargo, la regresión ortogonal reveló que los coeficientes de la regresión ETP_g no cumplen con la condición que en el IC (95%) de la intersección se encuentre el "0" y en el IC (95%) de la pendiente se encuentre el "1" (figura 4a); por lo tanto, existe evidencia de que el modelo ETP_g y el modelo HS estiman evapotranspiraciones potenciales diferentes. En cambio, el modelo ETP_m estimó valores similares a los de HS, ya que el "0" se encontró en el IC (95%) de la intersección y el "1" dentro del IC (95%) de la pendiente (figura 4b); así, se deduce que no existe evidencia de que las dos ecuaciones estimen datos de ETP distintos.

El resultado anterior podría deberse a que la regresión ortogonal considera el error en las variables dependiente (datos de modelos

Cuadro 9. Evaluación del desempeño estadístico de los modelos ETP_g y ETP_m con los métodos de referencia.

ME	Est.	M	ETP_g	ETP_m	ME	Est.	M	ETP_g	ETP_m	ME	M	ME	ETP_g	ETP_m
Ene	RCME	HS	0.65	0.19	May	RCME	HS	0.45	0.11	Sep	RCME	HS	0.33	0.12
		PN	1.20	0.89			PN	0.81	1.14			PN	1.18	1.00
	EMS	HS	0.55	0.11		EMS	HS	-0.37	0.07		EMS	HS	0.22	0.05
		PN	1.09	0.64			PN	0.62	1.06			PN	1.12	0.94
Feb	RCME	HS	0.76	0.20	Jun	RCME	HS	0.25	0.12	Oct	RCME	HS	0.31	0.24
		PN	1.38	0.91			PN	1.04	1.15			PN	1.04	0.90
	EMS	HS	0.68	0.14		EMS	HS	-0.11	0.04		EMS	HS	0.24	0.10
		PN	1.29	0.75			PN	0.89	1.05			PN	0.98	0.84
Mar	RCME	HS	0.25	0.14	Jul	RCME	HS	0.29	0.10	Nov	RCME	HS	0.48	0.23
		PN	0.73	0.75			PN	0.82	1.11			PN	1.21	0.97
	EMS	HS	-0.05	0.01		EMS	HS	-0.28	0.04		EMS	HS	0.43	0.16
		PN	0.58	0.64			PN	0.74	1.06			PN	1.12	0.85
Abr	RCME	HS	0.28	0.06	Ago	RCME	HS	0.24	0.04	Dic	RCME	HS	0.34	0.19
		PN	0.91	0.97			PN	0.89	1.07			PN	1.00	0.95
	EMS	HS	-0.11	0.02		EMS	HS	-0.17	0.03		EMS	HS	0.15	0.08
		PN	0.75	0.89			PN	0.82	1.01			PN	0.84	0.78

ME: mes; M: modelo.

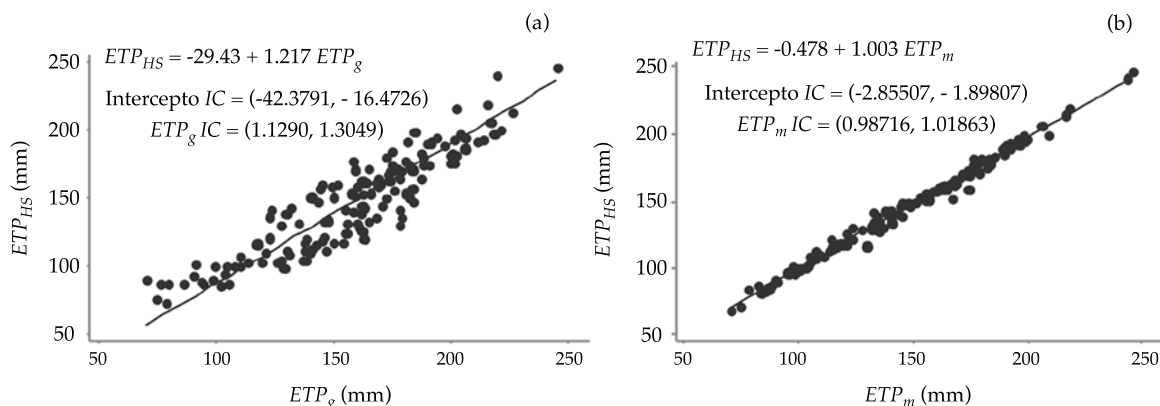


Figura 4. Regresiones ortogonales: a) relación entre ETP_{HS} y ETP_g ; b) relación entre ETP_{HS} y ETP_m .

propuestos) e independiente (datos del modelo de referencia), cuando generalmente en los análisis de regresión se considera sólo el error de la variable independiente, de tal manera que este procedimiento es recomendable para estudios de Ciencias de la Tierra (Carroll & Rupert, 1996; Frez, 2002), donde podría existir error en la medición de las variables dependientes e independientes, como en el caso de la combinación de elementos climáticos, geográficos y de tiempo, como en este estudio.

Conclusiones

La metodología propuesta en el presente estudio demostró que las variables TX , TN , AL y ME pueden emplearse en sencillos modelos lineales múltiples para estimar ETP mensual. En este sentido, la TX es la variable que mayor efecto tiene en el comportamiento de la ETP . Asimismo, la TN y la AL influyen en la ETP de forma distinta en los meses, de tal manera que estas variables compensan el efecto de TX en diferente magnitud en el transcurso del año. Durante los meses de primavera, verano y otoño, la TN con tendencias negativas en las ecuaciones es más significativa que la AL ; en cambio, en invierno, la AL tiene más significancia y con tendencias positivas. Por otra parte, la regresión ortogonal resultó ser una herramienta estadística útil en

la comparación de modelos que estiman datos climáticos, como ETP . Asimismo, con base en el $RCME$, EMS y la regresión ortogonal, el modelo para estimar ETP para cada mes (ETP_m) es el más apropiado para México. Los resultados de este modelo son similares a los que se obtienen con Hargreaves y Samani (1985), con la ventaja de requerir únicamente valores de TX y TN o AL de manera directa, como se demostró en este estudio. Por lo tanto, el modelo ETP_m que estima valores de ETP para cada mes es un modelo sencillo aplicable para México, sin considerar la latitud ni la radiación. Aun cuando el modelo para cada mes de esta investigación puede emplearse en la estimación de la ETP mensual en México, es necesario verificar la validez del uso de las variables TX , TN y AL en otras regiones del mundo, considerando HS o PM como métodos de referencia, bajo la metodología planteada en este trabajo. Asimismo, al no considerarse la radiación en los modelos de ETP_m , significa que podría utilizarse a nivel de invernadero o casa sombra, pero se requiere de la evaluación y validación en los mismos.

Agradecimientos

A los doctores Manuel Fortis Hernández y Pablo Yescas Coronado del Instituto Tecnológico de Torreón, y al doctor José Luis García Hernández de la Universidad Juárez del

Estado de Durango, por sus comentarios y sugerencias, así como a los árbitros y editores por sus atinadas observaciones y recomendaciones.

Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing water requirements (298 pp.). In: *FAO Irrigation and Drainage, Paper 56*. Rome: FAO.
- Armstrong, R. N., Pomeroy, J. W., & Martz, L. W. (2015). Variability in evaporation across the Canadian Prairie region during drought and non-drought periods. *Journal of Hydrology*, 521, 182-195.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (2008). *Climate change and water* (210 pp.). Tech. Paper Intergovern. Panel on Clim. Change. Geneva: IPCC Secretariat.
- Bautista, F., Bautista, D., & Delgado-Carranza, C. (2009). Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmósfera*, 22(4), 331-348.
- Campos-Aranda, D. F. (2005). Estimación empírica de la ETP en la República Mexicana. *Ingeniería hidráulica en México*, 20(3), 99-110.
- Carroll, R. J., & Rupert, D. (1996). The use and misuse of orthogonal regression in linear errors-in-variables models. *The American Statistician*, 50(1), 1-6.
- Castellan, G. W. (1987). *Fisicoquímica* (1057 pp.), 2ª ed. México, DF: Addison Wesley Iberoamericana.
- Chen, S. B., Liu, Y. F., & Thomas A. (2006). Climatic change on the Tibetan Plateau: Potential evapotranspiration trends from 1961-2000. *Climatic Changes*, 76(3), 291-319.
- Chen, Y., Xia, J., Liang, S., Feng, J., Fisher, J. B., Li, X., Li, X., Liu, S., Ma, Z., Miyata, A., Mu, Q., Sun, L., Tang, J., Wang, K., Wen, J., Xue, Y., Yu, G., Zha, T., Zhang, L., Zhang, Q., Zhao, T., Zhao, L., & Yuan, W. (2014). Comparison of satellite-based evapotranspiration models over terrestrial ecosystems in China. *Remote Sensing of Environment*, 140, 279-293.
- Cuadras, C. M. (2014). *Nuevos métodos de análisis multivariante* (304 pp.). Barcelona: CMC Editions.
- De Melo, G. L., & Fernandes A., L. T. (2012). Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, State of Minas Gerais, Brazil. *Engenharia Agrícola Jaboticabal*, 32(5), 875-888.
- Douglas, E. M., Jacobs, J. M., Sumne, D. M., & Ray, R. L. (2009). A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types. *Journal of Hydrology*, 373(3-4), 366-376.
- Droogers, P., & Allen, R. G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 16(1), 33-45.
- El-Nashar, W. Y., & Hussien, E. A. (2013). Estimating the potential evapo-transpiration and crop coefficient from climatic data in Middle Delta of Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 52(1), 35-42.
- FAO (1985). *Datos agroclimáticos para América Latina y el Caribe* (562 pp.). Colección FAO, Producción y Protección Vegetal No. 24. Roma: FAO.
- Frez, C. J. (2002). Estimadores de mínima desviación ortogonal; caso lineal. *GEOS*, 22(3), 444-452.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (90 pp.), 5ª ed. Serie Libros Núm. 6. México, DF: UNAM, Instituto de Geografía.
- Gavilán, P., Lorite, I. J., Tornero, S., & Berengena, J. (2006). Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. *Agricultural Water Management*, 81(3), 257-281.
- González-Medrano, F. (2003). *Las comunidades vegetales de México* (77 pp.). México, DF: INE-Semarnat.
- Goulden, M. L., Anderson, R. G., Bales, R. C., Kelly, A. E., Meadows, M., & Winston, G. C. (2012). Evapotranspiration along an elevation gradient in California's Sierra Nevada. *Journal of Geophysical Research*, 117(G03), 117, 1-13.
- Gunhan, T., Demir, V., Hancioglu, E., & Hepbasli, A. (2005). Mathematical modeling of drying of bay leaves. *Energy Conversion Management*, 46(11-12), 1667-1679.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99.
- Henríquez-Dole, L., & Miner-Vega, A. J. (2014). Revisión y validación de la evapotranspiración potencial (ETP) media anual y media mensual en Honduras obtenida por métodos ambientales de percepción remota. *Revista Ciencia y Tecnología*, 14(6), 77-98.
- Jaramillo-Robledo, A. (2006). Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé*, 57(4), 288-298.
- Katz, M. H. (2011). *Multivariable analysis: A practical guide for clinicians and public health researchers* (250 pp.), 3rd ed. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press.
- Körner, C. (2007). The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology and Evolution*, 22(11), 529-574.
- Kousari, M. R., & Ahani, H. (2012). An investigation on reference crop evapotranspiration trend from 1975 to 2005 in Iran. *International Journal of Climatology*, 32(15), 2387-2402.
- Maderey, R. L. E., & Jiménez, R. A. (2001). Alteración del ciclo hidrológico en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma por la transferencia de agua a la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín*, 45, 24-38.
- Maeda, E. E., Wiberg, D. A., & Pellikka, P. A. E. (2011). Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *Applied Geography*, 31(1), 251-258.

- Martí, P., & Zarzo, M. (2012). Multivariate statistical monitoring of ETo: A new approach for estimation in nearby locations using geographical inputs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152, 125-134.
- Martínez-Arnaiz, J. A. (1994). Regresión ortogonal y componentes principales. *Quaderns d'Estadística, Sistemes, Informàtica i Investigació Operativa*, 18(2), 285-296.
- Martínez-Rodríguez, E. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario jurídico y estadístico Escorialense*, 38, 315-332.
- Mckenney, M. S., & Rosenberg, N. J. (1993). Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64(1-2), 81-110.
- Minitab17 (2014). *Statistical Software*. State College, USA: Minitab Inc.
- Moeletsi, M. E., Walker, S., & Hamandawana, H. (2013). Comparison of the Hargreaves and Samani equation and the Thornthwaite equation for estimating dekadal evapotranspiration in the Free State Province, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 66, 4-15.
- Ortiz-Solorio, C. A. (2011). *Elementos de agrometeorología cuantitativa, con aplicaciones en la República Mexicana* (219 pp.), 5ª ed. México, DF: Universidad Autónoma Chapingo.
- Ortiz-Villanueva, B., & Ortiz Solorio, C.A. (1990). *Edafología* (394 pp.), 7ª ed. Chapingo: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceeding Royal Society of London*, 193(1032), 120-145.
- Pereira, L. S., Valero, J. A., Picornell-Buendía, M. R., & Martín-Benito, J. M. T. (2010). *El riego y sus tecnologías* (296 pp.). Albacete: CREA.
- Pérez-López, C. (2005). *Muestreo estadístico, conceptos y problemas resueltos* (392 pp.). Madrid: Pearson Educación, S.A.
- Raziei, T., & Pereira, L. S. (2013). Estimation of ETo with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agricultural Water Management*, 121, 1-18.
- Robertson, L. M., Edlinb, J. S., & Edwards, J. D. (2010). Investigating the importance of altitude and weather conditions for the production of toxic honey in New Zealand. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 38(2), 87-100.
- Romo-Benito, H. (2008). Diversidad de las mariposas diurnas ibero-baleares. *Ecosistemas*, 17(2), 106-111.
- Ruiz-Álvarez, O., Corrales-Suástegui, A., González-Jasso, L. A., Díaz-García, L. A., Narváez-Mendoza, M. P., Ontiveros-Capurata, R. E. et al. (2014). Comportamiento espacio temporal de la evapotranspiración de referencia en la República Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Publicación Especial*, (10), 1963-1976.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. México, DF: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Recuperado de http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf.
- Salinas, M. F., & Silva, C. Z. (2007). Modelos de regresión y correlación II. Regresión lineal múltiple. *Ciencia y Trabajo*, 9(23), 39-41.
- SMN (2015). Normales climatológicas Periodos 1951-2010 y 1981-2000. Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx>.
- Suleiman, A. A., & Hoogenboom, G. (2009). A comparison of ASCE and FAO-56 reference evapotranspiration for a 15-min time step in humid climate conditions. *Journal of Hydrology*, 375(3-4), 326-333.
- Trezza, R. (2008). Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método utilizar? *Bioagro*, 20(2), 85-95.
- Vásquez-Méndez, R., Ventura-Ramos, E. Jr., & 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.
- Vega, E. C., & Jara, J. C. (2009). Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (costa y región andina) del Ecuador. *Engharia Agrícola Jaboticabal*, 29(3), 390-403.
- Velázquez-Ruiz, A., Martínez, R. L. M., & Carrillo-González, F. M. (2012). Caracterización climática para la región de Bahía de Banderas mediante el sistema de Köppen, modificado por García, y técnicas de sistemas de información geográfica. *Investigaciones Geográficas, Boletín* 79, 7-19.
- Villa-Nova, N. A., Pereira, A. B., & Shock, C. C. (2007). Estimation of reference evapotranspiration by an energy balance approach. *Biosystems Engineering*, 96(4), 605-615.
- Wang, K. C., & Dickinson, R. E. (2012). A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 50(2), 1-54. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1029/2011RG000373>.
- Wong-González, E. (2010). ¿Después del análisis de varianza... qué? Ejemplos en ciencias de alimentos. *Agronomía Mesoamericana*, 21(2), 349-356.
- Yapo, P. O., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (1998). Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 83-97.
- Yu, G. R., Zhu, X. J., Fu, Y. L., He, H. L., Wang, Q. F., Wen, X. F. et al. (2013). Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China. *Global Change Biology*, 19(3), 798-810.

Dirección institucional de los autores

Dr. Miguel Angel Segura-Castruita

Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Torreón
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Carretera Torreón-San Pedro km 7.5
27170 Torreón, Coahuila, MÉXICO
Teléfono: +52 (871) 7507 198
dmilys5@hotmail.com

Dr. Carlos Alberto Ortiz-Solorio

Colegio de Postgraduados, IRENAT
Carretera México-Texcoco km 36.5
56230 Montecillo, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (555) 8046 800
caos@colpos.mx