

Estimación empírica de la ETP en la república mexicana

Daniel Francisco Campos-Aranda

Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí

El objetivo de este trabajo consiste en comparar tres criterios empíricos de estimación de la evapotranspiración potencial contra el método de Penman. Primeramente se expone una definición concreta sobre la evapotranspiración potencial (ETP) del cultivo de referencia (pasto) y se destaca su importancia en las estimaciones de los requerimientos de riego. Enseguida se indica cuál fue la información climatológica utilizada en un total de 31 observatorios meteorológicos, que son los que cuentan con datos de velocidad media del viento. A continuación se justifica el uso de los métodos empíricos y se exponen con detalle las fórmulas de Makkink, Turc, Hargreaves-Samani y del método de Penman modificado. Posteriormente se citan las simplificaciones elementales adoptadas para la aplicación del método de Penman y se describen brevemente los programas de cómputo elaborados. A continuación se presentan los valores mensuales extremos (mayo y diciembre) y anuales estimados de ETP, con los cuatro criterios aplicados y se contrastan, por medio de regresión lineal, los resultados mensuales de los tres primeros contra el método de Penman. La conclusión fundamental de este contraste indica que el criterio empírico de Hargreaves-Samani reproduce de manera bastante aceptable las estimaciones mensuales de la ETP del método de Penman y por ello es que se recomienda cuando este último no es aplicable por falta de datos meteorológicos.

Palabras clave: evapotranspiración potencial, método de Penman, fórmulas de Turc, Makkink y Hargreaves-Samani.

Introducción

La evapotranspiración potencial (ETP) se puede definir como la aportación de agua de la superficie terrestre (suelo y vegetación) a la atmósfera bajo condiciones de disponibilidad suficiente de agua en una superficie cubierta de pasto en crecimiento activo de 8 a 15 cm de altura, libre de enfermedades y que sombrea completamente el suelo (Doorenbos y Pruitt, 1976). Esta ETP se conoce como del cultivo de referencia (pasto), pero a principios de los años ochenta se comenzó a utilizar la alfalfa como cultivo de referencia para usarse en la estimación de los requerimientos de riego de cultivos de las regiones áridas (Burman, 1985; Wright, 1996).

La ETP es el factor fundamental para la estimación de los requerimientos de riego, cuya cuantificación racional es esencial en todas las etapas de un proyecto, especialmente en las condiciones áridas y semiáridas en las que se ubican muchas zonas de riego del país y del mundo (Ojeda y Sifuentes, 2000). En tales ambientes climáticos, el agua es un recurso sumamente escaso y valioso, por ello la planificación de sus usos doméstico, industrial y agrícola debe ser lo más precisa posible, a fin de evitar a futuro compromisos que al no poder cumplirse generan crisis sociales, técnicas y económicas de proporciones inimaginables (Salih y Sendil, 1984).

Cuando no se dispone de mediciones de la ETP, su estimación se debe abordar con métodos que emplean las variables meteorológicas que la determinan, el más

exacto entre ellos ha probado ser el de Penman, el cual tiene como principal inconveniente para su aplicación en la república mexicana el requerir mediciones de viento. En este trabajo se propone utilizar únicamente tres registros promedio anual de datos climatológicos: los de temperatura media, humedad relativa media e insolación total de todos los observatorios meteorológicos que cuentan con datos de velocidad media del viento, pues ésta es la información más escasa tanto en disponibilidad como en registros amplios y confiables. Para intentar superar lo anterior se comparan los resultados de tres fórmulas empíricas —las de Makkink, Hargreaves-Samani y Turc—, contra los resultados del método de Penman. Estas fórmulas empíricas son fácilmente aplicables con los datos climatológicos previamente citados y no requieren de mediciones de velocidad del viento.

Información climatológica utilizada

Un planteamiento fundamental en este trabajo fue utilizar muy poca información climatológica y, por ello, en cada observatorio meteorológico que cuenta con datos de velocidad media del viento (v) y que por lo tanto es aplicable el método de Penman, se emplearon únicamente tres series de 12 valores promedio mensual: de temperatura media o ambiente (Tt , °C), de humedad relativa media (HR , %) y del total de horas de insolación (n). Estas series están publicadas en el documento *Normales climatológicas* (SMN, 1982), en 40 de los 56 observatorios meteorológicos de la república mexicana, de los cuales se eliminaron dos: Isla Guadalupe, en Baja California, y Temosachic, en Chihuahua; el primero, por su lejanía de la península de Baja California y el segundo, por carecer de datos de humedad relativa.

En el cuadro 1 se presentan las características generales de los 31 observatorios meteorológicos utilizados en este trabajo y que son los que cuentan con datos de velocidad media del viento (v) obtenidas directamente del Servicio Meteorológico Nacional. Los datos del cuadro 1 son coordinadas geográficas y valores promedio anual de v , Tt y precipitación total, así como la fórmula climática de acuerdo con el sistema de Köppen modificado tomado de García (1981), para cuya interpretación somera conviene recordar:

Grupo climático	Símbolo	Grupo climático	Símbolo
Cálido	A	Seco	BS ₀
Semicálido (cálido-fresco)	A (C)	Semiseco	BS ₁
Desértico o muy árido	BW	Templado	C
Árido	BS	Semicálido (templado-cálido)	(A) C

En el cuadro 1, los primeros 24 observatorios meteorológicos cuentan con datos de horas totales de insolación o soleamiento (n) y los restantes siete no disponen de tal información; por ello se leyeron en los mapas de Hernández *et al.* (1991) de irradiación solar global media diaria en (cal/cm²)/día, los correspondientes valores promedio mensual o magnitudes de radiación solar incidente (Ri), ya que los valores de n se utilizan para estimar tal variable climatológica. Otra opción para obtener los valores de Ri son los mapas de Almanza y López (1978), reproducidos por Campos (1998).

En el cuadro 2 se detallan los periodos de velocidad media del viento (v , m/s) que fueron procesados, indicando el número de años completos que se consideraron, pues diversos registros están interrumpidos o tienen varios datos mensuales faltantes. Como el planteamiento general fue utilizar el máximo de la información de v , se aceptó una amplitud mínima del registro de sólo ocho años, que fue el caso de los observatorios de las ciudades de Campeche, Chihuahua, Culiacán y Orizaba.

Métodos empíricos utilizados

Justificación

Debido a la importancia de la ETP y al hecho de contar con muy pocas mediciones en lisímetros, se han propuesto diversos procedimientos o fórmulas empíricas para su estimación con base en los variados datos climáticos. Tales procedimientos han sido clasificados por varios autores de acuerdo con sus particularidades, pero recientemente Smith *et al.* (1996) distinguen sólo cuatro grupos: a) los métodos combinados, caracterizados por la fórmula de Penman, llamados así por incluir en su formulación los enfoques energético y aerodinámico; b) los métodos de radiación, en los cuales se incluye al método de la FAO del mismo nombre (Doorenbos y Pruitt, 1976) y el de Makkink; c) los métodos de temperatura, como son los de Thornthwaite, Blaney-Cridle, Turc, Hargreaves-Samani, etcétera, y d) los métodos de evaporación en tanque.

En este trabajo se aplican las fórmulas de Makkink, Turc y Hargreaves-Samani por ser consideradas las de mayor aplicabilidad a los diferentes ambientes climáticos de México. Estos criterios son contrastados con el método de Penman —que se acepta como el más confiable y que se expone al final por facilidad—, ya que utiliza varios de los conceptos hidrometeorológicos (Eagelman, 1980; Petterssen, 1976) y cálculos previos que se realizan para los otros criterios.

Cuadro 1. Características generales de los 31 observatorios meteorológicos que cuentan con datos de velocidad del viento.

Núm.	Nombre	Coordenadas geográficas:			Vel. media del viento promedio anual (m/s)	Temp. media, promedio anual (°C)	Precipitación total, promedio anual (mm)	Fórmula del clima según sistema Köppen modificado
		Longitud (°GW)	Latitud (°N)	Altitud (msnm)				
1	Campeche, Camp.	90° 33'	19° 51'	5	3.14	26.4	1,094.0	$Aw''_0(w)(i')$
2	Piedras Negras, Coah.	100° 31'	28° 42'	220	3.01	21.6	529.5	$BS_1hx'(e')$
3	Saltillo, Coah.	100° 59'	25° 27'	1,609	3.82	17.8	269.4	$BS_0kx'(e)$
4	Tapachula, Chis.	92° 16'	14° 55'	182	1.71	26.1	2,552.4	$Am(w'')ig$
5	Tuxtla Gutiérrez, Chis.	93° 07'	16° 45'	528	2.85	24.4	849.0	$Aw''_0(w)(i')g$
6	Chihuahua, Chih.	106° 05'	28° 38'	1,423	1.54	18.7	300.5	$BS_0hw(w)(e')$
7	Tacubaya, D.F.	99° 12'	19° 24'	2,308	2.24	15.4	746.8	$C(w_1)(w)b(i')g$
8	Durango, Dgo.	104° 40'	24° 02'	1,889	2.71	17.8	411.5	$BS_1kw(w)(e)$
9	Guanajuato, Gto.	101° 15'	21° 01'	2,050	2.70	17.8	631.4	$C(w_0)(w)b(e)g$
10	Pachuca, Hgo.	98° 44'	20° 08'	2,426	3.27	14.1	371.6	$BS_1k'w''ig$
11	Guadalajara, Jal.	103° 23'	20° 40'	1,589	1.62	19.2	901.6	$(A)C(w_1)(w)a(e)g$
12	Lagos de Moreno, Jal.	101° 55'	21° 21'	1,942	3.10	18.1	535.3	$BS_1hw(w)(e)g$
13	Morelia, Mich.	101° 11'	19° 42'	1,941	2.00	17.8	776.0	$C(w_{01})(w)b(i')g$
14	Puebla, Pue.	98° 12'	19° 02'	2,162	1.13	16.8	814.4	$C(w_1)(w)b(i')g$
15	Culiacán, Sin.	107° 24'	24° 49'	84	2.90	25.1	699.0	$BS_1(h')w(e)$
16	Mazatlán, Sin.	106° 25'	23° 12'	3	2.80	24.3	748.1	$Aw_0(w)(e)$
17	Hermosillo, Son.	110° 58'	29° 04'	237	1.89	24.6	247.9	$BW(h')hw(e')$
18	Tlaxcala, Tlax.	98° 14'	19° 19'	2,252	1.05	16.6	819.6	$C(w_1)(w)big$
19	Jalapa, Ver.	96° 55'	19° 32'	1,427	1.56	18.0	1,454.0	$C(fm)w''b(i')g$
20	Orizaba, Ver.	97° 06'	18° 51'	1,284	1.44	19.2	2,116.7	$(A)C(m)w''b(i')g$
21	Veracruz, Ver.	96° 08'	19° 12'	16	4.49	25.4	1,710.0	$Aw''_2(w)(i')$
22	Mérida, Yuc.	89° 30'	20° 59'	9	2.31	25.9	956.8	$Aw''_0(x')(i')g$
23	Progreso, Yuc.	89° 39'	21° 18'	8	1.93	25.5	424.0	$BS_0(h')(x')i$
24	La Bufa, Zac.	102° 34'	22° 47'	2,612	6.47	13.3	248.9	$BS_1k'w(w)(e)$
25	La Paz, B.C.S.	110° 25'	24° 10'	10	2.59	23.9	177.0	$BW(h')hw(e)$
26	Monclova, Coah.	101° 25'	26° 53'	591	1.49	22.0	302.1	$BWhw''(e')$
27	Torreón, Coah.	103° 27'	25° 32'	1,013	1.39	22.3	144.0	$BW(h')hw(e)$
28	Manzanillo, Col.	104° 17'	19° 03'	8	2.31	26.5	1,076.2	$Aw_0(w)i$
29	Tepic, Nay.	104° 54'	21° 31'	915	1.43	20.6	1,348.9	$(A)C(w_2)(w)a(i')$
30	San Luis Potosí, S.L.P.	100° 59'	22° 09'	1,877	2.96	18.2	315.4	$BS_0kw''(w)(e)g$
31	Soto La Marina, Tams.	98° 12'	23° 46'	25	2.18	24.2	640.2	$BS_1(h')hw''(e)$

Fórmula de Makkink

Propuesta a finales de los años cincuenta, consiste básicamente en una modificación (W) a la radiación solar incidente (Ri' , mm/d) debida a la temperatura media (Tt); su expresión es (Chang, 1968; Arnáiz, 1976):

$$ETP = 0.61 W Ri' - 0.12 \quad (1)$$

donde:

ETP = evapotranspiración potencial en mm/d.
 W = cociente adimensional igual a $\Delta/(\Delta + \gamma)$.
 Δ = pendiente de curva de presión de vapor de saturación contra temperatura en milibares (mb).

γ = constante psicrométrica en mb.

La estimación de la radiación solar incidente (Ri) en (cal/cm^2)/día; es decir, en langley/día (ly/d), se realiza con base en la ecuación de Angström:

$$Ri = R_E \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

donde:

R_E = radiación en el tope de la atmósfera o extraterrestre (ly/d).
 n = insolación real promedio diaria en horas.

Cuadro 2. Registros de velocidad media del viento (m/s) en los observatorios meteorológicos indicados.

Núm.	Nombre y edo.:	Periodo(na*)	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1	Campeche, Camp.	1990-1997(8)	3.16	3.40	3.91	3.85	3.73	3.43	2.94	2.52	2.68	2.77	2.65	2.68
2	P. Negras, Coah.	1981-2000(20)	2.84	3.27	3.38	3.29	3.24	3.16	3.21	2.87	2.65	2.70	2.85	2.65
3	Saltillo, Coah.	1981-2000(16)	3.54	3.82	4.06	4.27	4.33	4.05	3.83	3.76	3.62	3.32	3.61	3.64
4	Tapachula, Chis.	1981-1997(17)	1.87	2.00	2.10	2.09	1.77	1.62	1.55	1.61	1.55	1.50	1.34	1.50
5	Tuxtla Gtz, Chis.	1983-1998(16)	3.36	3.64	3.71	3.32	2.91	2.14	2.30	2.13	2.27	2.60	2.94	2.93
6	Chihuahua, Chih.	1983-1990(8)	1.22	1.89	2.19	2.21	1.75	1.94	1.61	0.96	1.20	1.11	1.23	1.17
7	Tacubaya, D. F.	1981-2000(20)	1.85	2.18	2.36	2.37	2.31	2.29	2.27	2.56	2.48	2.27	2.10	1.87
8	Durango, Dgo.	1981-1995(14)	2.66	3.33	3.89	3.73	3.29	2.80	2.20	1.85	2.06	2.02	2.30	2.39
9	Guanajuato, Gto.	1981-1999(19)	2.58	2.86	3.11	3.12	2.78	2.79	2.63	2.61	2.63	2.42	2.46	2.41
10	Pachuca, Hgo.	1981-1997(17)	2.83	3.01	3.22	3.26	3.21	3.57	3.74	3.95	3.67	3.24	2.93	2.65
11	Guadalajara, Jal.	1987-1996(10)	1.36	1.81	2.54	2.23	2.19	1.65	1.30	1.20	1.31	1.36	1.43	1.00
12	Lagos de M., Jal.	1981-1996(16)	3.15	3.47	3.89	3.77	3.43	3.27	2.85	2.73	2.72	2.59	2.67	2.69
13	Morelia, Mich.	1981-1997(14)	2.00	2.14	2.41	2.54	2.17	2.09	1.84	1.81	1.82	1.75	1.75	1.70
14	Puebla, Pue.	1982-1999(18)	0.95	1.30	1.43	1.47	1.37	1.19	1.14	1.04	0.99	0.96	0.82	0.88
15	Cuñacán, Sin.	1982-1990(9)	2.26	2.71	3.02	3.09	3.67	3.89	3.47	3.01	2.84	2.49	2.13	2.18
16	Mazatlán, Sin.	1981-1998(18)	2.67	2.72	2.94	2.87	3.01	3.09	2.93	2.89	2.73	2.65	2.69	2.45
17	Hermosillo, Son.	1981-1997(13)	1.76	1.75	2.02	2.12	2.22	2.15	2.18	1.85	2.01	1.62	1.49	1.53
18	Tlaxcala, Tlax.	1985-2000(15)	1.05	1.25	1.37	1.35	1.15	1.08	0.84	0.92	1.09	0.77	0.87	0.87
19	Jalapa, Ver.	1981-1996(16)	1.53	1.58	1.59	1.66	1.60	1.41	1.44	1.44	1.71	1.66	1.66	1.46
20	Orizaba, Ver.	1981-1990(9)	1.24	1.59	1.87	1.68	1.48	1.32	1.39	1.42	1.33	1.37	1.34	1.21
21	Veracruz, Ver.	1981-1990(10)	5.21	4.93	4.54	4.57	4.16	3.53	2.97	3.46	4.50	5.33	5.35	5.36
22	Mérida, Yuc.	1981-2000(20)	2.16	2.51	2.72	3.05	3.02	2.43	2.12	1.90	1.68	1.83	2.13	2.18
23	Progreso, Yuc.	1981-1997(17)	1.92	2.05	2.26	2.19	2.35	1.90	1.82	1.58	1.51	1.74	2.02	1.85
24	La Bufa, Zac.	1981-1996(16)	7.68	7.93	8.88	7.56	6.16	5.00	5.04	5.14	5.14	5.47	6.45	7.22
25	La Paz, B.C.S.	1981-2000(20)	2.58	2.45	2.91	2.81	3.09	2.91	2.66	2.48	2.26	2.02	2.38	2.49
26	Monclova, Coah.	1991-2000(10)	1.27	1.36	1.59	1.60	1.89	1.88	1.74	1.63	1.32	1.42	1.13	1.06
27	Torreón, Coah.	1981-2000(20)	1.28	1.52	1.62	1.67	1.60	1.55	1.49	1.41	1.22	1.06	1.07	1.24
28	Manzanillo, Col.	1981-2000(20)	2.37	2.30	2.39	2.40	2.45	2.35	2.33	2.34	2.39	2.14	2.15	2.07
29	Tepic, Nay.	1983-1998(16)	1.16	1.38	1.59	1.67	1.81	1.80	1.49	1.34	1.35	1.29	1.20	1.09
30	S. Luis P., S.L.P.	1981-1997(17)	2.69	3.22	3.76	3.44	3.12	3.18	3.12	3.09	2.75	2.35	2.36	2.41
31	Soto La M., Tam.	1981-1997(17)	2.31	2.27	2.31	2.39	2.27	2.13	2.03	2.15	2.00	2.01	2.10	2.20

na = número de años procesados.

N = valor máximo de la insolación real, tabulado en función del mes y de la latitud.

a y b = constantes empíricas, adimensionales.

Para la república mexicana, de acuerdo con Jáuregui (1978), a y b son:

$$a = 0.290 \cos \varphi \quad b = 0.550$$

donde φ es la latitud del lugar en grados. Los valores mensuales promedio diarios de R_E están tabulados, por ejemplo en Kijne (1978), y son función de la latitud del lugar (φ). Para valores de φ de entre 10 y 40° N, es decir, las latitudes en que se ubica la república mexicana, se desarrollaron mediante el polinomio de interpolación de Newton de tercer grado (Chapra y Canale, 1999; Campos, 2003), doce ecuaciones que ahora son propuestas y cuya forma es:

$$R_E = b_0 + b_1(\varphi - 10) + b_2(\varphi - 10)(\varphi - 20) + b_3(\varphi - 10)(\varphi - 20)(\varphi - 30) \quad (3)$$

cuyos parámetros b_i tienen los valores citados en la tabulación siguiente.

Mes	b_0	b_1	b_2	b_3	Mes	b_0	b_1	b_2	b_3
Enero	760	-12	-0.075	1/600	Julio	880	5	-0.100	-1/1200
Febrero	820	-9	-0.100	1/1200	Agosto	890	2	-0.125	-1/1200
Marzo	875	-5	-0.125	1/1200	Sept.	880	-2.5	-0.150	1/1200
Abril	895	0	-0.125	-1/1200	Oct.	840	-8	-0.075	-1/1200
Mayo	890	4	-0.100	-1/400	Nov.	780	-11.5	-0.025	-1/300
Junio	875	6	-0.100	-1/600	Dic.	740	-12.5	-0.075	1/1200

Para evitar la interpolación de los valores de N en la tabla de dichos datos, Campos (1989) propuso una fórmula empírica senoidal; posteriormente, mediante

optimización numérica no restringida, tal ecuación fue verificada y corregida, por lo que ahora se propone:

$$N = A + B [\text{sen}(30nm + 83.5)] \quad (4)$$

en la cual nm es el número del mes, uno para enero y doce para diciembre; A y B son constantes adimensionales función de la latitud del lugar (φ) en grados con las expresiones siguientes cuando ésta varía de 15° a 35° N, es decir, las latitudes en que se ubica aproximadamente la república mexicana:

$$A = 12.09086 + 0.00266 \varphi \quad B = 0.2194 - 0.06988 \varphi$$

Los parámetros Δ y γ se estiman en función de la temperatura media Tt en $^\circ$ C, por ejemplo con base en las expresiones propuestas por Burman *et al.* (1983):

$$\Delta = 2.0(0.00738 Tt + 0.8072)^7 - 0.00116 \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{0.386 P}{Hv} \quad (6)$$

en donde P , la presión barométrica media en mb, se puede estimar con una aproximación lineal de la atmósfera estándar en función de la altitud (ALT) en metros:

$$P = 1,013.0 - 0.1055 ALT \quad (7)$$

Hv es el llamado calor latente de evaporación (cal/cm²), es decir, la energía requerida (cal) para evaporar un gramo (cm³) de agua; se puede estimar con la expresión siguiente (Hargreaves-Samani, 1991):

$$Hv = 595.9 - 0.55 Tt \quad (8)$$

Finalmente, la transformación a lámina de agua evaporada (mm) de la radiación solar incidente (Ri) se realiza con base en la fórmula siguiente:

$$Ri' = \frac{10 Ri}{Hv} \quad (9)$$

La ecuación 2 se aplica en los primeros 24 observatorios, esto es, los que cuentan con datos de horas de insolación (n); para los restantes siete, que carecen de tal información, se leyeron en los mapas de Hernández *et al.* (1991) sus correspondientes valores de Ri , los cuales permiten, a través de la ecuación citada, despejar el valor de la insolación relativa

(n/N), magnitud que es requerida posteriormente para estimar la radiación neta (Rn) del método de Penman.

Fórmula de Turc

Desde mediados de los años cuarenta, L. Turc intentó encontrar una fórmula empírica para reproducir las evapotranspiraciones mensuales que se habían observado en lisímetros de Francia, norte de África, Holanda y Escocia; finalmente, a comienzos de los sesentas propuso la siguiente ecuación (Turc, 1961):

$$ETP = c \frac{Tt}{Tt + 15} (Ri + 50) \quad (10)$$

Ahora la ETP está en mm/mes y c es un coeficiente con un valor de 0.40 para meses de 30 o 31 días, y de 0.37 para febrero. La fórmula de Turc (ecuación 10) se aplica directamente cuando la humedad relativa (HR) media mensual es superior a 50%; en caso contrario, se multiplica por el siguiente factor correctivo FC_{HR} :

$$FC_{HR} = 1 + \left[\frac{(50 - HR)}{70} \right] \quad (11)$$

Esta corrección pretende tomar en cuenta el efecto oasis que se ha observado en las áreas bajo riego de las zonas áridas y semiáridas, con objeto de evitar estimaciones por defecto de las necesidades hídricas de los cultivos.

Fórmula de Hargreaves-Samani

A principios de la década de los ochenta se propuso una nueva fórmula empírica de estimación de la ETP media diaria en milímetros. Dicha fórmula está basada en la temperatura media (Tt) expresada en grados Fahrenheit y en Ri' , su expresión es (Hargreaves y Samani, 1982; Samani y Hargreaves, 1982):

$$ETP = 0.0075 Ri' Tt \quad (12)$$

Para la estimación de Ri' se resuelven las ecuaciones (2) y (9), cuando el observatorio tiene datos de insolación (n), y únicamente la ecuación (9) cuando los datos de Ri hayan sido leídos de los mapas respectivos; para la transformación de Tt de $^\circ$ C a $^\circ$ F se multiplica por 1.8 y se le suma 32.

Método de Penman modificado

Propuesto en 1948, originalmente estimaba la evaporación desde una superficie libre de agua y por medio de unos coeficientes que variaban de 0.60 en los meses de invierno a 0.80 en los del verano relacionaba la evaporación con la ETP. La fórmula de Penman que presentan Doorenbos y Pruitt (1976) es básicamente la original, y la designación de *modificada* se debe al uso de una función de viento revisada y un factor correctivo (FC_{dn}), que toma en cuenta las diferentes condiciones meteorológicas diurnas y nocturnas. Tal expresión es:

$$ETP = FC_{dn} [W Rn' + (1 - W) f(v)(e_s - e)] \quad (13)$$

en la cual, ETP y Rn' están en mm/día. El balance de energía o radiación neta (Rn) recibida por una superficie de albedo r es la porción de la radiación solar incidente (Ri) que no es reflejada ni reirradiada a la atmósfera como radiación de onda larga (Rl), es decir: $Rn = Ri(1-r) - Rl$. Sin embargo, parte de Rl es absorbida por el vapor de agua, las nubes y el dióxido de carbono, y una porción es reirradiada a la tierra como radiación atmosférica. Además, parte de la radiación de onda corta es absorbida y reirradiada a la tierra como radiación de onda larga. Ante la dificultad para realizar mediciones confiables de las componentes citadas, se ha optado por estimar la radiación *net*a de onda larga (Rnl , en ly/d) usando, por ejemplo, la ecuación de Brunt. Entonces se tiene que (Dunne y Leopold, 1978):

$$Rn = Ri(1 - r) - Rnl \quad (14)$$

y

$$Rnl = \sigma T_2^4 \left(0.56 - 0.08 \sqrt{e_2} \right) \left(0.10 + 0.90 \frac{n}{N} \right) \quad (15)$$

donde:

σ = constante de Stefan-Boltzmann igual a 1.17×10^{-7} ly $^\circ$ K 4 /día.

T_2 = temperatura del aire a una altura de dos metros, en $^\circ$ K ($^\circ$ K = $^\circ$ C + 273).

e_2 = presión del vapor del aire a una altura de dos metros, en mb.

n/N = insolación relativa, adimensional.

La transformación del resultado de la ecuación (15) y de la (14) de ly/d a lámina de agua evaporada (mm/d) se realiza con la ecuación (9). La función de viento en la ecuación (13) tiene la expresión siguiente:

$$f(v) = 0.27(1 + 0.01 \cdot v_2) \quad (16)$$

siendo v_2 la velocidad total del viento en km/día a una altura de dos metros. Las últimas variables por definir son e_s y e ; la primera es la presión de vapor de saturación correspondiente a la temperatura media (Tt) en milibares, se estima con la ecuación cúbica siguiente:

$$e_s = 6.020543 + 0.525097 Tt + 0.004585162 Tt^2 + 0.0006141563 Tt^3 \quad (17)$$

Deducida con base en los datos de Eagleman (1980), tiene un coeficiente de correlación de 0.9999921 y 0.1165 como error estándar de ajuste. La curva de e_s también se ha representado por ecuaciones exponenciales como en Torres (1983) y UC (1984). Existe otro tipo de expresiones en referencias más recientes, pero en realidad todas son igualmente exactas. En cambio, e es la presión de vapor media del aire, en milibares, la cual se despeja de la fórmula de la humedad relativa (HR). Ésta es:

$$HR = (e/e_s)100 \quad (18)$$

La función de viento dada por la ecuación 16 se aplica en condiciones normales de viento diurno. Entonces, cuando predominen vientos fuertes o condiciones excepcionales de calma durante la noche, con unos valores de humedad relativa anormalmente bajos o altos, habrá que aplicar el factor correctivo FC_{dn} que se presenta en el cuadro 3. Frevert *et al.* (1983), y Allen y Pruitt (1991) presentan ecuaciones de regresión para evitar la interpolación en el cuadro 3.

Simplificaciones adoptadas

Como la información climatológica disponible no incluye datos sobre velocidad de viento diurno y nocturno, no se pueden obtener del cuadro 3 los factores correctivos FC_{dn} y por ello se adoptó 0.90 como valor correctivo general, como lo hicieron López *et al.* (1988). Además, se consideró un valor constante durante el año de 0.25 para el albedo, el cual corresponde a vegetales verdes (Dunne y Leopold, 1978).

Programas de cómputo

Se elaboraron dos programas en *Basic*, el primero para procesar los 24 observatorios meteorológicos (SMN, 1982) que cuentan con el total de horas de insolación promedio mensual (n) y el segundo para los siete restantes que carecen de tal información, y que por ello se leyó en los mapas de Hernández *et al.* (1991)

Cuadro 3. Factor de corrección (FC_{dn}) por condiciones diurnas y nocturnas del método de Penman modificado (Doorenbos y Pruitt, 1976).

Ri (mm/día)	$HR_{m\acute{a}x} = 30\%$				$HR_{m\acute{a}x} = 60\%$				$HR_{m\acute{a}x} = 90\%$			
	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12
$v_{d\acute{a}a}$ (m/s)	$v_{d\acute{a}a}/v_{noche} = 4.0$											
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.79	0.84	0.92	0.97	0.92	1.00	1.11	1.19	0.99	1.10	1.27	1.32
6	0.68	0.77	0.87	0.93	0.85	0.96	1.11	1.19	0.94	1.10	1.26	1.33
9	0.55	0.65	0.78	0.90	0.76	0.88	1.02	1.14	0.88	1.01	1.16	1.27
$v_{d\acute{a}a}$ (m/s)	$v_{d\acute{a}a}/v_{noche} = 3.0$											
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.76	0.81	0.88	0.94	0.87	0.96	1.06	1.12	0.94	1.04	1.18	1.28
6	0.61	0.68	0.81	0.88	0.77	0.88	1.02	1.10	0.86	1.01	1.15	1.22
9	0.46	0.56	0.72	0.82	0.67	0.79	0.88	1.05	0.78	0.92	1.06	1.18
$v_{d\acute{a}a}$ (m/s)	$v_{d\acute{a}a}/v_{noche} = 2.0$											
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.69	0.76	0.85	0.92	0.83	0.91	0.99	1.05	0.89	0.98	1.10	1.14
6	0.53	0.61	0.74	0.84	0.70	0.80	0.94	1.02	0.79	0.92	1.05	1.12
9	0.37	0.48	0.65	0.76	0.59	0.70	0.84	0.95	0.71	0.81	0.96	1.06
$v_{d\acute{a}a}$ (m/s)	$v_{d\acute{a}a}/v_{noche} = 1.0$											
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.64	0.71	0.82	0.89	0.78	0.86	0.94	0.99	0.85	0.92	1.01	1.05
6	0.43	0.53	0.68	0.79	0.62	0.70	0.84	0.93	0.72	0.82	0.95	1.00
9	0.27	0.41	0.59	0.70	0.50	0.60	0.75	0.87	0.62	0.72	0.87	0.96

su radiación o irradiación solar (Ri) promedio mensual. En el primer programa, la Ri se calcula por medio de la ecuación (2) y después se aplican las ecuaciones (1), (10), (12) y (13), así como sus auxiliares para obtener los valores de ETP según los criterios de Makkink, Turc, Hargreaves-Samani y Penman. Enseguida, se realizan tres análisis de regresión lineal entre los doce valores de ETP del método de Penman, que se toman como la variable dependiente (y) y los de cada uno de los otros tres criterios tomados como abscisas (x). Se evalúa, además, el correspondiente coeficiente de correlación. En el segundo programa, primero se calcula R_E (ecuación 3) para despejar de la ecuación (2) los valores de la insolación relativa (n/N). Después, el proceso de cálculo es el mismo que en el primer programa.

Análisis de los resultados

En el cuadro 4 se han concentrado parte de los resultados obtenidos al procesar los promedios

mensuales de los 31 observatorios utilizados, uno por cada renglón. Por lo anterior, en la primera columna se tiene el número correspondiente al observatorio, procedente del cuadro 1. En las siguientes ocho columnas se presentan los valores mensuales de ETP de los meses de mayo y diciembre, es decir, el máximo y el mínimo generalmente, obtenidos con cada uno de los cuatro criterios empíricos aplicados. De igual manera, las cuatro columnas siguientes muestran los valores anuales. Finalmente, en las siguientes nueve columnas se tienen los parámetros de ajuste obtenidos con las regresiones lineales entre los valores mensuales de ETP del método de Penman como ordenadas y los de cada criterio como abscisas (López *et al.*, 1988).

Una comparación general entre las estimaciones de ETP, tanto mensual como anual, en el cuadro 4 entre los primeros 24 renglones y los últimos siete, adoptando como criterio de similitud entre observatorios el clima (cuadro 1), indica una concordancia global cuantitativa, lo cual significa que cuando no se disponga de datos de insolación (n) se pueden utilizar con confianza las

Cuadro 4. Valores de la evapotranspiración potencial (ETP) mensual y anual, calculada con los criterios indicados y parámetros de la regresión lineal de los valores ETP mensuales de cada fórmula (x) con los del método de Penman (y).

Núm. de observatorio	ETP media mensual (mm)		ETP media anual (mm)		Parámetros de la regresión lineal																
	M ¹	T ²	P	H-S ³	M	T	H-S	m ^{††}	b ^{‡‡}	r _{xy} ^{§§}	m	b	r _{xy}	m	b	r _{xy}					
1	195	96	127	71	150	91	174	95	1,771	1,260	1,530	1,703	1,672	-27,935	0,959	1,557	-50,952	0,961	1,172	-18,716	0,958
2	163	58	117	41	138	51	156	50	1,683	1,111	1,333	1,468	1,573	-5,461	0,995	1,373	-12,286	0,992	1,070	9,398	0,991
3	188	88	112	51	126	58	136	58	1,629	1,053	1,197	1,293	1,514	2,865	0,940	1,308	5,216	0,935	1,138	16,915	0,936
4	139	114	105	92	126	112	141	123	1,541	1,188	1,448	1,593	1,514	-21,515	0,679	1,707	-77,546	0,697	1,213	-32,649	0,741
5	164	107	111	81	131	98	147	104	1,610	1,164	1,405	1,522	1,585	-19,642	0,826	1,515	-43,267	0,835	1,133	-9,584	0,838
6	180	51	137	45	195	49	172	50	1,420	1,115	1,409	1,362	1,429	-14,490	0,985	0,956	6,074	0,986	1,041	0,177	0,977
7	141	77	107	61	115	66	122	67	1,311	1,041	1,146	1,161	1,479	-19,088	0,973	1,227	-7,961	0,986	1,241	-10,800	0,980
8	206	83	135	61	171	67	162	68	1,668	1,220	1,433	1,424	1,623	-26,024	0,919	1,228	-7,622	0,976	1,210	-4,629	0,987
9	166	96	134	78	164	84	159	87	1,690	1,319	1,540	1,519	1,654	-40,958	0,965	1,065	4,151	0,978	1,293	-22,817	0,965
10	150	82	124	79	128	80	137	84	1,409	1,218	1,255	1,319	1,642	-49,285	0,976	1,516	-41,186	0,986	1,395	-35,889	0,982
11	166	71	144	72	178	82	178	83	1,462	1,279	1,509	1,528	1,592	-47,943	0,964	1,500	-22,777	0,987	1,205	-31,695	0,957
12	206	90	149	76	168	82	179	85	1,700	1,333	1,496	1,551	1,624	-38,770	0,935	1,332	-24,386	0,962	1,235	-17,880	0,928
13	151	75	113	69	125	77	135	78	1,353	1,126	1,263	1,309	1,727	-49,380	0,952	1,511	-46,285	0,962	1,350	-34,426	0,956
14	137	70	126	84	135	89	146	93	1,258	1,272	1,396	1,440	1,574	-62,067	0,987	1,224	-37,617	0,977	1,258	-46,157	0,990
15	226	85	134	66	157	84	181	86	1,805	1,229	1,489	1,645	2,006	-55,006	0,970	1,815	-74,792	0,968	1,352	-34,996	0,958
16	172	92	138	70	161	88	182	91	1,638	1,273	1,536	1,687	1,332	-4,820	0,971	1,228	-20,657	0,976	0,972	-0,104	0,990
17	219	75	137	56	205	72	184	71	1,849	1,211	1,627	1,626	1,732	-20,774	0,991	1,166	-4,009	0,958	1,154	-2,238	0,988
18	122	70	106	76	115	81	122	84	1,170	1,088	1,211	1,229	1,718	-58,185	0,911	1,451	-48,947	0,971	1,366	-42,396	0,926
19	113	63	96	61	110	71	117	71	1,075	975	1,134	1,165	1,287	-15,015	0,984	1,165	-20,555	0,989	1,007	-8,211	0,988
20	112	64	88	63	103	75	109	75	1,109	972	1,147	1,182	1,466	-26,270	0,933	1,327	-34,430	0,943	1,127	-18,516	0,943
21	177	124	121	71	143	89	163	93	1,827	1,208	1,472	1,621	0,981	53,506	0,890	0,909	40,758	0,893	0,694	58,483	0,902
22	195	97	131	74	154	93	179	98	1,681	1,240	1,508	1,669	1,465	-11,265	0,930	1,356	-30,307	0,930	1,036	-3,987	0,928
23	159	91	125	79	147	98	168	104	1,540	1,274	1,543	1,705	1,196	1,357	0,962	1,109	-14,278	0,963	0,851	7,331	0,960
24	244	147	133	65	158	62	147	67	2,163	1,167	1,273	1,246	1,178	65,627	0,491	1,201	52,858	0,721	0,957	80,881	0,472
25	215	97	165	74	189	92	216	95	1,919	1,464	1,733	1,932	1,489	-21,718	0,984	1,367	-37,584	0,987	1,042	-7,871	0,988
26	190	53	146	58	167	68	194	69	1,520	1,224	1,441	1,588	1,475	-23,712	0,994	1,319	-31,748	0,996	1,023	-8,658	0,995
27	197	66	161	69	216	80	210	81	1,597	1,368	1,673	1,739	1,437	-30,775	0,986	1,052	-13,536	0,973	1,004	-12,362	0,987
28	194	118	165	100	189	121	221	133	1,787	1,437	1,717	1,929	0,912	39,676	0,895	0,864	25,218	0,894	0,738	30,232	0,925
29	157	66	156	83	173	97	193	101	1,281	1,335	1,541	1,651	1,226	-29,616	0,953	1,167	-43,089	0,967	0,987	-29,025	0,974
30	198	87	148	76	167	82	177	84	1,710	1,260	1,459	1,474	1,501	-16,049	0,919	1,187	-1,767	0,953	1,185	-3,076	0,925
31	154	70	114	62	136	78	155	78	1,492	1,177	1,432	1,575	1,258	0,951	0,988	1,161	-14,282	0,990	0,881	8,629	0,990

† Método de Penman.

‡ Criterio o fórmula de Makkink.

§ Criterio o fórmula de Turc.

φ Criterio o fórmula de Hargreaves-Samani.

†† Pendiente de la recta de regresión.

‡‡ Ordenada al origen de la recta de regresión.

§§ Coeficiente de correlación lineal.

Nota: el número de observatorio corresponde al del cuadro 1.

lecturas de radiación solar incidente (R_i), como se hizo en este trabajo.

En términos generales, según resultados de las últimas nueve columnas del cuadro 4, los criterios de Hargreaves-Samani y el de Turc, en ese orden, reproducen mejor los resultados mensuales de ETP del método de Penman, medido esto por la proximidad de la pendiente de regresión (m) a la unidad y de la ordenada al origen (b) a cero, ya que el coeficiente de correlación (r_{xy}) en general es bastante alto y semejante en algunos observatorios en los tres criterios empíricos contrastados. Lo anterior también es válido en las magnitudes mensuales extremas y anual de la ETP. De los tres criterios empíricos contrastados, el de Makkink no es aceptable para reproducir los resultados del método de Penman, pues en general conduce a valores anuales inferiores.

En general, el criterio de Hargreaves-Samani conduce a valores del r_{xy} superiores a 0.96 y reproduce bastante bien la evolución o marcha de la ETP a través del año, como se muestra en las ilustraciones 1 a 6, para localidades de ambientes geográficos muy disímiles. Las ilustraciones 1 y 2 ejemplifican las mejores estimaciones de la fórmula Hargreaves-Samani, en cambio el resto muestra los ajustes (r_{xy}) más bajos, los cuales en general se presentan donde la velocidad media del viento es superior a los 3 m/s en climas secos (ilustración 4). También se deduce del cuadro 4 que en localidades con velocidades de viento reducidas (<1.5 m/s), las estimaciones del criterio de Hargreaves-Samani son bastante aproximadas tanto en los valores anuales como en los mensuales (ilustración 3).

Ilustración 1. Contraste entre las estimaciones de ETP del método de Penman ($ETP_p=1,420$ mm) y las de la fórmula de Hargreaves-Samani ($ETP_{HS}=1,362$ mm) en el observatorio meteorológico de Chihuahua, Chihuahua ($v=1.54$ m/s; $r_{xy}=0.977$).

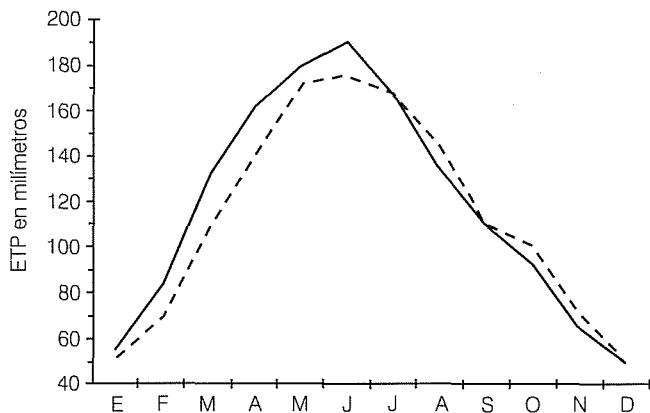


Ilustración 2. Contraste entre las estimaciones de ETP del método de Penman ($ETP_p=1,492$ mm) y las de la fórmula de Hargreaves-Samani ($ETP_{HS}=1,575$ mm) en el observatorio meteorológico de Soto La Marina, Tamaulipas ($v=2.18$ m/s; $r_{xy}=0.990$).

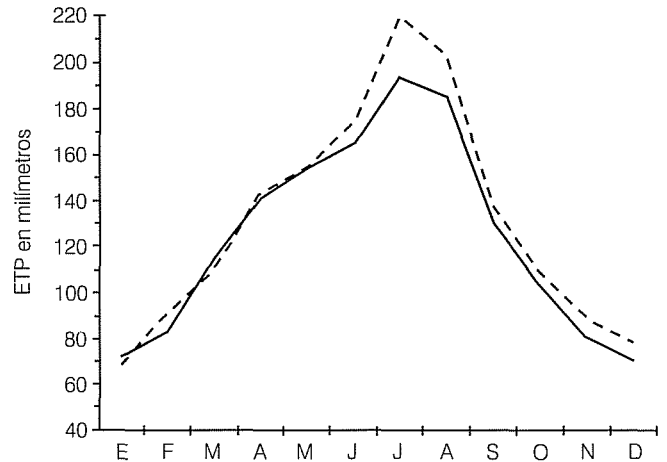


Ilustración 3. Contraste entre las estimaciones de ETP del método de Penman ($ETP_p=1,170$ mm) y las de la fórmula de Hargreaves-Samani ($ETP_{HS}=1,229$ mm) en el observatorio meteorológico de Tlaxcala, Tlaxcala ($v=1.05$ m/s; $r_{xy}=0.926$).

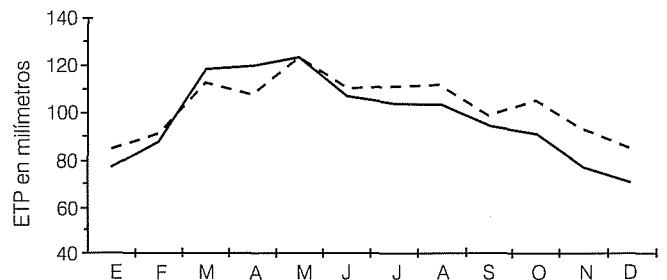


Ilustración 4. Contraste entre las estimaciones de ETP del método de Penman ($ETP_p=1,629$ mm) y las de la fórmula de Hargreaves-Samani ($ETP_{HS}=1,253$ mm) en el observatorio meteorológico de Saltillo, Coahuila ($v=3.82$ m/s; $r_{xy}=0.936$).

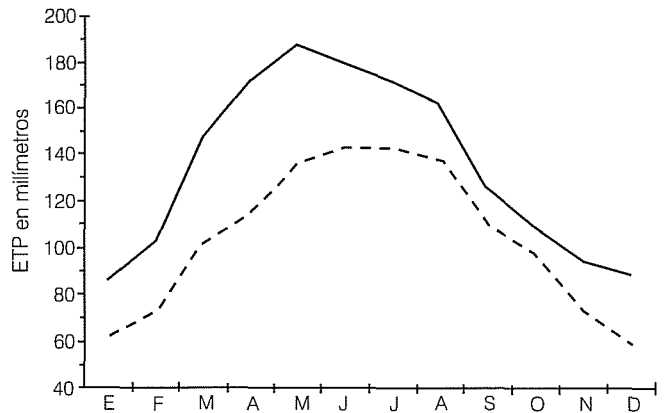


Ilustración 5. Contraste entre las estimaciones de ETP del método de Penman ($ETP_p=1,541$ mm) y las de la fórmula de Hargreaves-Samani ($ETP_{HS}=1,593$ mm) en el observatorio meteorológico de Tapachula, Chiapas ($v=1.71$ m/s; $r_{xy}=0.741$).

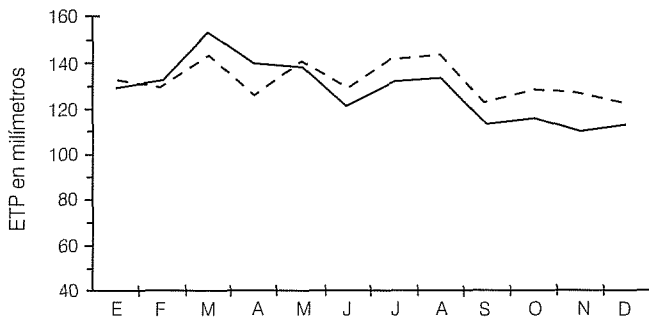
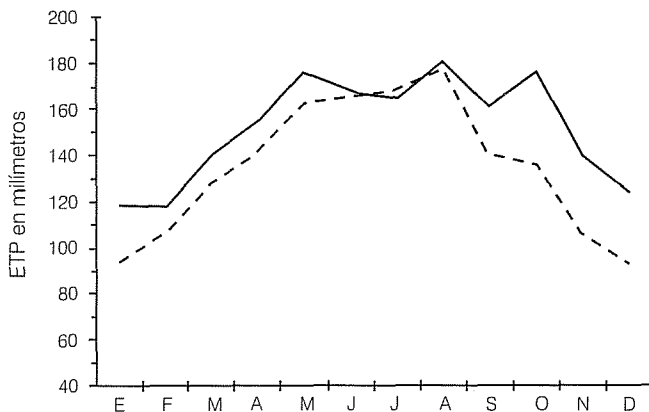


Ilustración 6. Contraste entre las estimaciones de ETP del método de Penman ($ETP_p=1,827$ mm) y las de la fórmula de Hargreaves-Samani ($ETP_{HS}=1,621$ mm) en el observatorio meteorológico de Veracruz, Veracruz ($v=4.49$ m/s; $r_{xy}=0.902$).



Por otra parte, los resultados que ha presentado Campos (2002) destacan la importancia de las mediciones de viento, ya que su impacto en las estimaciones de ETP, con base en el método de Penman, tanto mensual como anual, es bastante severo, a pesar de ello, la mayoría de los criterios empíricos utilizados actualmente no lo incluyen. Estos resultados (Campos, 2002) permiten considerar aceptable la adopción de una velocidad media del viento próxima a 2 m/s (172.8 km/d) en el método de Penman cuando no existen tales datos; esta magnitud es muy aproximada a la moda (2.05 m/s) obtenida con base en la distribución Pearson tipo III (Campos, 1988) y los valores reales del cuadro 2, mismos que conducen a un valor mediano muestral de 2.31 m/s y poblacional de 2.32 m/s. El valor de la mediana (2.3 m/s) es más recomendable en este tipo de estimaciones que el de la moda.

Conclusiones

Aunque el método de Penman ha sido contrastado y aceptado mundialmente como el criterio más confiable para las estimaciones de la ETP, es necesario contrastarlo contra valores medidos para verificar su aplicabilidad en la república mexicana y tener una idea cuantitativa de su grado de confiabilidad. Por lo anterior, es urgente que las instituciones que disponen de tales mediciones de ETP y de sus correspondientes variables meteorológicas publiquen estos datos, con el fin de tener acceso a ellos y así realizar contrastes diarios, mensuales o anuales, que sienten bases cuantitativas firmes para las estimaciones de los requerimientos de riego.

El método de Penman puede ser aplicable en observatorios meteorológicos que no cuentan con el total de horas de insolación, o usando mapas de radiación solar incidente de la república mexicana, e incluso en aquellos observatorios que no disponen de mediciones de velocidad de viento, adoptando un valor medio de 2.3 m/s, de acuerdo con los datos del cuadro 2.

De las fórmulas empíricas contrastadas —Makkink, Turc y Hargreaves-Samani—, esta última es la más recomendable para estimaciones donde el método de Penman no es aplicable por falta de datos meteorológicos; tiene como ventajas adicionales el ser muy simple y requerir únicamente datos de temperatura media cuando se usan mapas de radiación solar incidente.

Agradecimientos

Se agradece al Servicio Meteorológico Nacional, el haber proporcionado al autor los registros mensuales disponibles de velocidad media del viento, en los 31 observatorios meteorológicos del cuadro 2.

Recibido: 02/12/2003
Aprobado: 07/09/2004

Referencias

- ALLEN, R.G. y PRUITT, W.O. FAO-24 reference evapotranspiration factors. *Journal of irrigation and drainage engineering*. Vol. 117, pp. 758-773, 1991.
- ALMANZA, R. y LÓPEZ, S. *Radiación solar global en la república mexicana mediante datos de insolación*. Segunda edición. México, D.F.: Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM # 357, 1978, 24 pp.
- ARNÁIZ, M.M. Evapotranspiración. *Hidrología subterránea*. Custodio, E. y Llamas M.R. (editores). Barcelona: Ediciones Omega, S.A. 1976, pp. 323-341.

- BURMAN, R.D. Comparison of monthly estimates of grass and alfalfa ET. *Proceedings of the National Conference on Advances in Evapotranspiration*. ASAE Publication 14-85. St. Joseph, Michigan. 1985, pp. 185-192.
- BURMAN, R.D., NIXON P.R., WRIGHT, J.L. y PRUITT W.O. Water requirements. *Design and operation of farm irrigation systems*. Capítulo 6. Jensen, M.E. (editor). ASAE Monograph núm. 3. St. Joseph, Michigan, 1983, pp. 189-232.
- CAMPOS, D.F. *Función de distribución de probabilidades gamma mixta: soluciones y aplicaciones*. 10° Congreso Nacional de Hidráulica. Tomo II, subtema 6, Morelia, Michoacán, México. del 18 al 21 de octubre de 1988, pp. 318-322.
- CAMPOS, D.F. Primera estimación del potencial agrícola del estado de San Luis Potosí por medio de índices climáticos. *Memorias de la Segunda Reunión Nacional de Agroclimatología*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México, 1989, pp.80-91.
- CAMPOS, D.F. Estimación de la ETP en la república mexicana con base en el método de Penman. XVII Congreso Nacional de Hidráulica. *Avances en hidráulica 9*. Jiutepec, México: IMTA, 2002, pp. 377-386.
- CAMPOS, D.F. Procesos de ciclo hidrológico. *Nociones de hidrometeorología*. Capítulo 3. Tercera reimpresión. San Luis Potosí, México: Librería Universitaria Potosina, 1998, pp. 3-1 a 3-61.
- CAMPOS, D.F. Interpolación mediante polinomios. *Introducción a los métodos numéricos: software en Basic y aplicaciones en hidrología superficial*. Capítulo 2. San Luis Potosí, México: Librería Universitaria Potosina, 2003, pp. 30-43.
- CHANG, J.H. Empirical formulae. *Climate and agriculture. An ecological survey*. Capítulo 15. Chicago: Aldine Publishing Co., 1968, pp. 149-156.
- CHAPRA, S.C. y CANALE, R.P. Interpolación. *Métodos numéricos para ingenieros*. Capítulo 18. Tercera edición. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, 1999, pp. 502-536.
- DOORENBOS, J. y PRUITT, W.O. Las necesidades de agua de los cultivos. *Estudio FAO: Riego y Drenaje núm. 24*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1976, pp. 9-58.
- DUNNE, T. y LEOPOLD, L.B. Water use by vegetation. *Water in environmental planning*. Capítulo 5. San Francisco, Estados Unidos: W.H. Freeman and Co., 1978, pp. 126-162.
- EAGLEMAN, J.R. Clouds, precipitation and fog. *Meteorology. The atmosphere in action*. Capítulo 6. New York: Van Nostrand Co., 1980, pp. 124-149.
- FREVERT, D.K., HILL, R.W. y BRAATEN B.C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. *Journal of irrigation and drainage engineering*. Vol. 109, 1983, pp. 265-270.
- GARCÍA, E. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Tercera edición. México, D.F.: Instituto de Geografía de la UNAM, 1981, 252 pp.
- HARGREAVES, G.H. y SAMANI, Z.A. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the irrigation and drainage division*. Vol. 108, 1982, pp. 225-230.
- HARGREAVES, G.H. y SAMANI, Z.A. *Programación del riego (un manual bilingüe)*. Las Cruces, Estados Unidos: Editts, 1991, pp. 19-20.
- HERNÁNDEZ, E., TEJEDA-MARTÍNEZ, A. y REYES, S. *Atlas solar de la república mexicana*, Textos Universitarios. Veracruz, México: Universidad de Colima y Universidad Veracruzana, 1991, pp. 45-116.
- JÁUREGUI, E. Una primera estimación de la distribución de la radiación global y neta en México. *Recursos hidráulicos*. Vol. VII, 1978, pp. 96-105.
- KIJNE, J.W. Tablas para calcular la evaporación y la evapotranspiración. *Principios y aplicaciones del drenaje*. Vol. III. Núm. 16. Wageningen, Holanda: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1978, pp. 109-122.
- LÓPEZ, J., TIJERINA, L. y ACEVES, L.A. Determinación de la evapotranspiración potencial en el área de influencia de Montecillo, haciendo uso de variables climáticas. *Memorias de la Segunda Reunión Nacional de Agroclimatología*. Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo, 1988, pp. 345-354.
- OJEDA, W. y SIFUENTES, E. Evapotranspiración. *Pronóstico del riego en tiempo real*. Capítulo 4. Ojeda, W. (editor). Jiutepec, México: Semarnat-CNA-IMTA, 2000, pp. 55-82.
- PETTERSEN, S. *Introducción a la meteorología*. Quinta edición. Madrid: Espasa-Calpe, S.A., 1976, 469 pp.
- SMN. *Normales climatológicas. Periodo 1941-1970*. México, D.F.: Dirección General del SMN de la SARH/Servicio Meteorológico Nacional, 1982, 799 pp.
- SALIH, A.M.A. y SENDIL, U. Evapotranspiration under extremely arid climates. *Journal of irrigation and drainage engineering*. Vol. 110, 1984, pp. 289-303.
- SAMANI, Z.A. y HARGREAVES, G.H. *Evaluation of some water requirement estimating methods*. Logan, Estados Unidos: International Irrigation Center, 1982, 24 pp.
- SMITH, M., ALLEN, R. y PEREIRA, L. Revised FAO methodology for crop water requirements. *Proceedings of the International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*. Camp, C.R., Sadler, E.J. y Yoder, R.E. (editores). San Antonio, Estados Unidos: ASAE publication. St. Joseph, Michigan, 1996, pp. 116-123.
- TORRES, E. Radiación solar. *Agrometeorología*. Capítulo 3. México, D.F.: Editorial Diana, S.A., 1983, pp. 39-65.
- TURC, L. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. Formule climatique simplifiée et mise a jour. *Ann. Agron*. Vol. 12, núm. I, 1961, pp. 13-49.
- UC. *Converting humidity expressions with computers and calculators*. Berkeley, Estados Unidos: University of California, Cooperative Extension, 1984, 24 pp.

WRIGHT, J.L. Derivation of alfalfa and grass reference evapotranspiration. *Proceedings of the International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*.

Camp, C.R., Sadler, E.J. y Yoder, R.E. (editores). San Antonio, Estados Unidos: ASAE publication. St. Joseph, Michigan, 1996, pp. 133-140.

Abstract

CAMPOS-ARANDA, D.F. Empirical estimation of PET in the Mexican Republic. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish), vol. XX, no. 3, July-September, 2005, pp. 99-110.

The comparison of three empirical criteria for potential evapotranspiration estimation with the Penman method is the main objective of this paper. Firstly, a concrete definition of potential evapotranspiration (PET) is exposed for the reference crop (grass) and its importance in the estimation of the crop water requirements is emphasized. Then, the climatological information used from a total of 31 meteorological observatories is indicated, those with records wind mean velocity. Next, the use of the empirical methods is justified, the formulae of Makkink, Turc, Hargreaves-Samani and the modified Penman method are exposed in detail. After that, the adopted elemental simplifications for the application of the Penman method are cited and the computer programs developed are briefly described. Finally, the extreme monthly values (May and December) and annual estimated PET values are presented, with the four criteria applied and the first three monthly results are contrasted through lineal regression with the Penman method. The main conclusion of this test points out that the empirical criteria of Hargreaves-Samani accurately reproduce monthly PET estimations in the Penman method and therefore, this is the empirical criteria suggested when there is insufficient meteorological information to apply Penman's formula.

Keywords: *potential evapotranspiration, Penman method, Hargreaves-Samani, Turc and Makkink formulae.*

Dirección particular del autor:

Dr. Daniel Francisco Campos-Aranda

Genaro Codina 240,
colonia Jardines del Estadio,
78280 San Luis Potosí, San Luis Potosí, México,
teléfono: +(52) (444) 815 1431.