

USO DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS AUTOMÁTICAS Y MODELOS MATEMÁTICOS PARA DETERMINAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

- Eduardo Chávez-Ramírez • Guillermo González-Cervantes* •
• José Luis González-Barrios •

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

*Autor de correspondencia

• Enrique Dzul-López •
Instituto Tecnológico de la Laguna, México

• Ignacio Sánchez-Cohen •
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

• Armando López-Santos •
Universidad Autónoma Chapingo, México

• Jorge Armando Chávez-Simental •
Universidad Juárez del Estado de Durango, México

Resumen

La evapotranspiración es una variable esencial en el manejo del agua y planificación del riego. De ahí la importancia de su cuantificación y del análisis de cuáles métodos la estiman de manera satisfactoria en el ámbito local y de cuenca. En tal contexto, el objetivo de este trabajo fue estimar la evapotranspiración de referencia (ET_0) a partir de datos climáticos estándar, utilizando los modelos matemáticos de Penman-Monteith FAO, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani y método del tanque evaporímetro, y comparar los resultados de la aplicación de los cuatro métodos en dos subcuencas del río Nazas. Para ello se utilizaron tres estaciones climatológicas automatizadas en red, ubicadas en la cuenca del río Nazas: dos estaciones en la cuenca baja; 1) estación "Cenid Raspa" de marca Davis y 2) estación "Las Villas" de marca Motorola; y una en la cuenca media de marca Davis, para el monitoreo y registro de las variables climáticas, mismas que alimentaron a los modelos matemáticos. Los resultados indican mayor ET_0 para la cuenca baja con respecto de la cuenca media del río Nazas, con mayor claridad durante el periodo de marzo a septiembre; implica mayor volumen de riego para esta zona. Por otro lado, de los métodos analizados con respecto al de Penman-Monteith FAO como referencia, se recomienda usar para cálculos de evapotranspiración el método de Blaney-Criddle y Hargreaves-Samani en la cuenca baja y media del río Nazas, respectivamente. Ello cuando no se cuente con variables suficientes para utilizar el modelo de Penman-Monteith FAO.

Palabras clave: consumo hídrico, estaciones agroclimáticas, cuenca del Nazas.

Introducción

La evapotranspiración como variable hidrológica a escala regional y en nivel de cuenca es fundamental para tomar mejores decisiones para

la planeación y el manejo del agua, en cuanto a maximizar su uso en la producción agropecuaria, en especial en zonas áridas y semiáridas (Pereira *et al.*, 2006; Dinpashoh, 2006; Jacobs *et al.*, 2008). Además, la evapotranspiración es un descriptor

importante para la clasificación en tiempo y espacio del régimen climático, en especial si se relaciona con la precipitación pluvial. Esta variable también es componente principal del balance de agua en el suelo (Arora, 2002; Mundo y Martínez, 2002).

La necesidad de conocer la evapotranspiración para sus diversas aplicaciones ha obligado a desarrollar métodos semiempíricos de estimación con base en datos climáticos estándar. A partir de la década de los años cuarenta se han venido realizando investigaciones para determinarla, pero no fue sino hasta 1975 que la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) propuso usar el término de evapotranspiración de referencia (ET_0) para describir la demanda de agua por efecto de las condiciones climáticas (Blaney-Cridde, 1962; Jensen et al., 1990; Smith, 1991). Hoy día existen numerosas ecuaciones empíricas y semiempíricas que pueden ser utilizadas, pero la mayoría de ellas requieren de una calibración previa para definir su utilidad localmente (Pérez y Castellví, 2002; López et al., 2006). Paralelo a ello, se han desarrollado instrumentos y técnicas de alta precisión para estimar tanto la ET_0 como la evapotranspiración de un cultivo directamente en campo, destacando el balance de energía y correlación turbulenta (*eddy covariance*). El uso de lisímetros de pesada y el método gravimétrico como los métodos para obtener la medida directa de la evapotranspiración. Sin embargo, tanto la correlación turbulenta como el lisímetro, con alto costo económico y necesidad de parcelas de tamaño considerables (*fetch*), son utilizados sólo con fines de generar nuevos modelos, y realizar pruebas y ajustes en los ya existentes (López et al., 1991; Jiyane y Zermeño, 2003; Sammis et al., 2004; Er-Raki et al., 2009). En tanto, los modelos semiempíricos son ampliamente utilizados en casos prácticos de manejo del riego; la ecuación desarrollada por Penman-Monteith FAO goza de especial aceptación por parte de la sociedad científica mundial y es propuesta por la FAO como

método estandarizado para el cálculo de la evapotranspiración con base en información climática. Otro método semiempírico para estimar la evapotranspiración ampliamente estudiada es el tanque evaporímetro, el cual proporciona una medida del efecto integrado de una manera parecida al efecto de las variables climáticas que definen la evapotranspiración de una superficie de referencia (Allen et al., 1998; Allen et al., 2005).

En México se han realizado mediciones directas de ET_0 y de evapotranspiración real de cultivos en pocos sitios del país (Villaman et al., 2001), pero desafortunadamente existe un reducido número de lisímetros instalados (tres). De manera reciente, la determinación directa en campo mediante la correlación turbulenta se está usando con mayor frecuencia, con estudios puntuales (Moguel et al., 2001; Jiyane y Zermeño, 2003). Por otro lado, trabajos encaminados a mejorar la planeación y el uso del agua de riego a gran escala, con base en la evapotranspiración como variable a estimar en periodos diarios para modelar el balance de agua en el suelo, fueron reportados por Mundo y Martínez (2002) para el distrito de riego 05 (Delicias, Chihuahua). Con ello se ha logrado ahorrar hasta un 30% de agua por unidad de superficie, con parámetros validados en campo. En este contexto, a partir de 2005, el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (Cenid Raspa, INIFAP), con objeto de monitorear el ambiente climático y disponer de información para aplicaciones diversas, dentro de las cuales se considera determinar la evapotranspiración como variable principal para el manejo del agua de riego y como variable para describir la climatología local, cuenta con un sistema de monitoreo climático vía telemetría, que enlaza tres estaciones climáticas autónomas en red, instaladas en distintos puntos de la cuenca del río Nazas. Se ha realizado investigación para el manejo del riego a corto plazo para el cultivo de nogal pecanero (6 375 ha) y en cultivos forrajeros (caso de la alfalfa, 31 739 ha). Por otro lado, en términos

de utilizar la evapotranspiración y describir la climatología local, la red Cenid Raspa no es suficiente ni por su tamaño ni por el tiempo operado, para ello se requiere análisis espacio-temporal de mayor tiempo de observación (Salinas *et al.*, 1998; Descroix *et al.*, 2004), por lo que esto sólo puede cumplirse con datos climáticos registrados en estaciones climáticas convencionales (por ejemplo, las del Servicio Meteorológico Nacional). En este contexto, el objetivo de este trabajo fue estimar la ET_0 a partir de datos climáticos estándar, utilizando los modelos matemáticos de Penman-Monteith FAO, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani y el método del tanque evaporímetro, y comparar los resultados de la aplicación de los cuatro métodos en dos subcuencas del río Nazas.

En la cuenca de la Región Hidrológica 36, el río Nazas es la principal fuente de agua, ubicada en el norte centro de México, entre los paralelos 23° y 27° de latitud norte, y los meridianos 106° y 102° de longitud oeste (figura 1). Esta cuenca

cuenta con extensión en superficie de 71 906 km² y el 95% de los recursos hídricos que ahí se producen es utilizado para la producción agropecuaria (en especial para la irrigación de cultivos), ello con fuerte disputa, a tal punto que en la actualidad existe una condición crítica de sobreexplotación del recurso agua.

Investigadores del CENID-RASPA, INIFAP, en colaboración con investigadores del Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM), hoy IRD, realizaron trabajos que permitieron delimitar la cuenca del Nazas en tres subregiones principales, con base en el análisis de precipitaciones anuales, utilizando el método de vector regional y a partir de un análisis de componentes principales, teniendo como variable dependiente la precipitación y como variables independientes altitud, longitud y densidad de vegetación (Descroix *et al.*, 1997; Descroix *et al.*, 2004). Las tres subregiones son las siguientes:

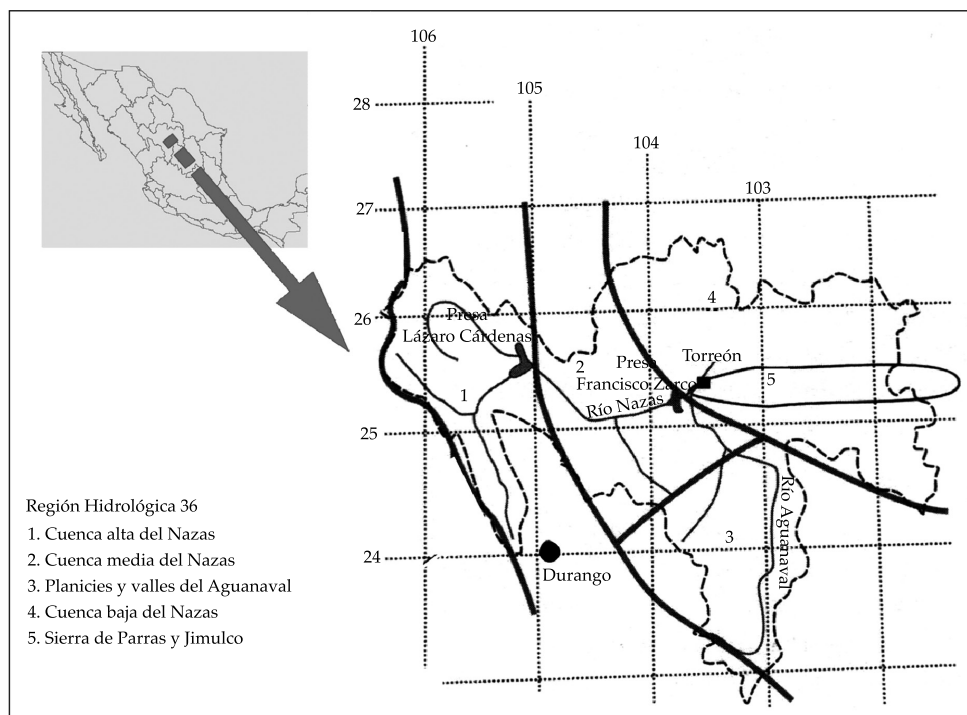


Figura 1. Cuenca del río Nazas (adaptado de Descroix *et al.*, 2004).

- Cuenca alta: comprende la zona montañosa de la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango, que corresponde a los mayores índices de vegetación y con lluvias promedio anual superior a los 500 mm, donde se genera el 85% de los escurrimientos, clasificada como una zona subhúmeda de producción y almacenamiento de agua de lluvia (donde se ubica y abastece de agua la presa Lázaro Cárdenas),
- Cuenca media: con precipitación media anual de 300 a 500 mm que generan sólo el 15% de los escurrimientos, se considera una zona semiárida, donde se ubica la presa Francisco Zarco, y obras para la conducción y el aprovechamiento de agua hacia la parte baja de la cuenca del río Nazas. Sus límites pueden ser definidos entre las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco.
- Cuenca baja: esta área puede ser comprendida desde aguas abajo de la presa Francisco Zarco hasta llegar a la laguna de Mayrán, con precipitación promedio anual inferior a 300 mm. Se clasifica como zona árida, con un consumo de agua para la producción agropecuaria proveniente de la parte alta y media de la cuenca, y la extracción de pozos profundos. En esta subcuenca es donde se acentúa la problemática del agua, presentándose problemas de administración del agua de gravedad, sobreexplotación de acuíferos y disminución acelerada en la calidad del vital líquido.

En relación con lo anterior, hace falta complementar la caracterización de las subregiones con información climática, por lo tanto es conveniente la instrumentación de la cuenca tanto para aplicaciones hidroclimáticas (periodos secos y su impacto ambiental, y en la producción agropecuaria) como agroclimáticas (disponibilidad, demanda, planificación y gestión del agua para uso de la actividad agropecuaria; tecnificación del riego; selección de cultivo; caso de la cuenca baja).

Materiales y métodos

En la cuenca media y baja se instalaron tres estaciones climáticas automatizadas para monitorear el clima, con el fin de estimar la evapotranspiración. Están distribuidas de la siguiente manera (figura 2): dos estaciones en la cuenca baja; 1) estación "Cenid Raspa" de marca Davis, instalada en condiciones estándar al cultivo de referencia y 2) estación "Las Villas" de marca Motorola, instalada en condición todavía no estándar (por esta razón no se considera en el presente trabajo). La primera se localiza en las coordenadas 25° 35' 18.090" de latitud norte, 103° 27' 01.523" de longitud oeste y 1 129 msnm; la segunda se localiza en las coordenadas 25° 37' 02.136" de latitud norte y 103° 24' 11.952" de longitud oeste, a 1 126 msnm. En tanto, en la cuenca media se instaló la estación "Santa Bárbara" de marca Adcon, en condiciones estándar al cultivo de referencia, ubicada en coordenadas 25° 14' 43.928" de latitud norte, 104° 07' 06.230" de longitud oeste y 1 243 msnm.

Las estaciones Cenid Raspa están equipadas con sensores electrónicos de la marca Davis; Las Villas y Santa Bárbara, con sensores de la marca Decagon ECH2O. Estos sensores miden temperatura del aire, humedad atmosférica, velocidad y dirección del viento, radiación solar y precipitación pluvial, a una altura de 2 m sobre el nivel del suelo, y cuentan con otro sensor para medir la temperatura del suelo a 30 cm de profundidad. Las estaciones se programaron para registrar las variables climáticas en periodos de un minuto y consideran para su almacenamiento el promedio de 15 registros, integrando una base de datos local propia de cada estación. La información se solicita mediante un programa de computadora, que conecta a las estaciones en red vía telemetría, a intervalos de 15 minutos, utilizando frecuencia de radio para las estaciones Cenid Raspa y Las Villas; para la estación Santa Bárbara es vía módem, a intervalos de 24 horas. Este sistema permite monitorear, almacenar y usar la información

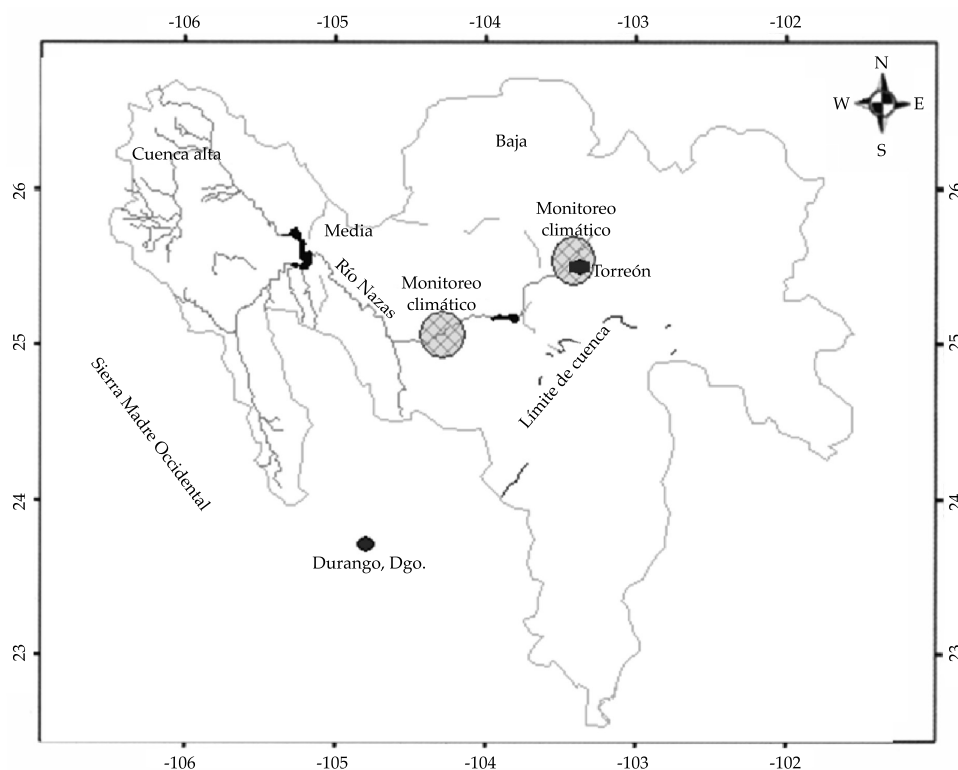


Figura 2. Distribución espacial de las estaciones climatológicas automatizadas en la cuenca del Nazas.

para observar en tiempo real las variables climáticas suscitadas en cada punto de monitoreo; fue desarrollado e instalado en una computadora central ubicada dentro de las instalaciones del Cenid Raspa.

En el mismo sitio donde se localiza la estación Cenid Raspa se encuentra instalado un tanque evaporímetro tipo A (10 m distante), el cual fue empleado para medir la evaporación diaria a las 8:00 a.m., considerando también los días con precipitación, para después calcular la ET_0 . La estructura y dimensiones del tanque, así como las condiciones del sitio, cumplieron con las condiciones estándar establecidas por la FAO (Allen et al., 1998).

Métodos de estimación de la evapotranspiración

Para realizar mediciones de la evapotranspiración a escala regional y en el nivel de

cuenca, el inconveniente es que cualquier técnica de medición directa resulta relativamente costosa, por ello la importancia de probar la utilidad de modelos semiempíricos para una zona determinada, donde las variables climáticas monitoreadas por estaciones sean poco disponibles.

La información climática registrada en las estaciones ubicadas en las subcuencas baja y media del río Nazas fue usada para estimar la ET_0 en periodos diarios, utilizando las ecuaciones de Penman-Monteith FAO, Hargreaves-Samani y Blaney-Criddle. Así también, los datos de la evaporación fueron usados para calcular la ET_0 en periodos diarios, utilizando la ecuación propuesta por Cuenca (1989) para determinar el coeficiente del tanque. Después, sólo para la cuenca baja, se hizo una comparación estadística entre valores promedio mensual de ET_0 aplicando las ecuaciones e información obtenida con las estaciones climáticas contra lo observado en el

tanque tipo A, utilizando índices estadísticos como coeficiente de regresión y coeficiente de correlación, que miden la relación lineal (sentido y fuerza) entre dos variables cuantitativas:

$$Bias = \frac{1}{n} \sum (Q_{obs} - Q_{est}) \quad (1)$$

Donde n es el número de valores analizados; Q_{obs} , el valor observado, y Q_{est} es el valor estimado.

Método de Penman-Monteith FAO

La ecuación de Penman-Monteith FAO es el modelo más preciso que existe. Las variables utilizadas en esta ecuación son radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento a 2 m de altura sobre la superficie del suelo (Allen et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

Donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia (mm d^{-1}); R_n , la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G , la densidad del flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); T , la temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$); u_2 , la velocidad del viento registrada a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s , la presión de vapor de saturación (kPa); e_a , la presión de vapor (kPa); $e_s - e_a$, el déficit de presión de vapor de saturación (kPa); Δ , la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ , la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Método de Blaney-Criddle

Las variables climáticas requeridas son temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento durante horas diurnas; a y b , coeficientes de calibración climática en función de humedad relativa y velocidad del viento durante horas diurnas, y de un factor f_e en función de la elevación del sitio sobre el nivel del mar (Doorenbos y Pruitt, 1977).

$$ET_0 = f_e \left\{ a + b \left[p(0.46 * T + 8.13) \right] \right\} \quad (3)$$

Donde f_e es factor de ajuste por la elevación sobre el nivel del mar; a y b , coeficientes de calibración climática; p , porcentaje medio diario anual de insolación; T , temperatura media ($^{\circ}\text{C}$).

Método de Hargreaves y Samani

Este modelo requiere para su aplicación de información de temperatura del aire y radiación solar extraterrestre (Hargreaves y Samani, 1985), por lo que representa una opción importante para intentar procesar información climática histórica, donde la radiación solar es un dato frecuentemente no disponible en las redes de estaciones climatológicas del país. Sin embargo, porque utiliza pocas variables es necesario evaluar su utilidad en los ámbitos regional y local.

$$ET_0 = 0.0023(t_{med} + 17.78)R_0 * (t_{m\acute{a}x} - t_{m\acute{i}n})^{0.5} \quad (4)$$

Donde $t_{m\acute{a}x}$ es temperatura máxima diaria ($^{\circ}\text{C}$), $t_{m\acute{i}n}$ es temperatura mínima diaria ($^{\circ}\text{C}$), t_{med} es temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$), R_0 es radiación solar extraterrestre (mm d^{-1}).

Método del tanque evaporímetro tipo A

Los datos diarios de evaporación observados en el tanque evaporímetro tipo A pueden expresarse a datos de ET_0 mediante la siguiente expresión:

$$ET_0 = K_p E_{pan} \quad (5)$$

Donde E_{pan} es evaporación observada en el tanque (mm d^{-1}) y K_p es coeficiente del tanque evaporímetro. El K_p se determinó a partir de la ecuación propuesta por Cuenca (1989), la cual considera la cobertura del suelo y los alrededores donde se ubica el tanque, así como la velocidad del viento y las condiciones de humedad relativa, mismas variables climáticas que fueron medidas por la estación climática Cenid Raspa.

El uso de este método ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para calcular la ET_0 , dado que la medida de la evaporación integra el efecto de la radiación, viento, temperatura y humedad para un lugar específico. En algunos trabajos experimentales, los valores de evaporación medidos en el tanque tipo A, afectados por sus correspondientes factores de corrección, se han utilizado para calcular el volumen de agua de riego a reponer en los cultivos (Godoy y López, 1997; Tijerina, 2000; González y Hernández, 2000).

Resultados y discusión

Evapotranspiración de referencia

Para la estimación de la ET_0 en la cuenca baja y media del río Nazas, se utilizó la información climática de tres ciclos de observación (años 2005, 2006 y 2007), registrada mediante las estaciones automáticas descritas para cada subregión, procediéndose a hacer las estimaciones en periodos diarios, utilizando los modelos de Penman-Monteith FAO, Blaney-Criddle y Hargreaves-Samani. Sin embargo, para apreciar los datos, se muestran los valores promedio diario mensual, promediando los tres ciclos observados. Posteriormente se

realizó una correlación entre los valores de ET_0 calculados con los métodos de Blaney-Criddle y Hargreaves-Samani con respecto a Penman-Monteith FAO.

La figura 3 muestra los resultados para los sitios de estudio. En esta figura se observan claras diferencias entre la parte baja y media mediante la ecuación de Penman-Monteith FAO y poco notoria con Blaney-Criddle, siendo superior la evapotranspiración en la cuenca baja. Por otro lado, con Hargreaves-Samani, se aprecia una diferencia, pero en sentido inverso; es decir, con mayor evapotranspiración en la cuenca media. La razón de este resultado puede corresponder a dos situaciones relacionadas entre sí: la poca información climática que utiliza el método y/o fuerte dependencia de la radiación solar (extraterrestre) con base en la ubicación geográfica del sitio, por lo tanto no es involucrado el efecto del entorno orográfico.

En la cuenca baja se presentan patrones de tendencia de ET_0 similar con Blaney-Criddle y Penman-Monteith FAO, con valores mínimos al inicio del año (enero) y máximos en la parte media del año (junio), a razón de 3 y 8 mm d⁻¹, respectivamente, decreciendo este último valor al final del año (diciembre) a entre 3 y 4 mm d⁻¹. A diferencia de lo anterior,

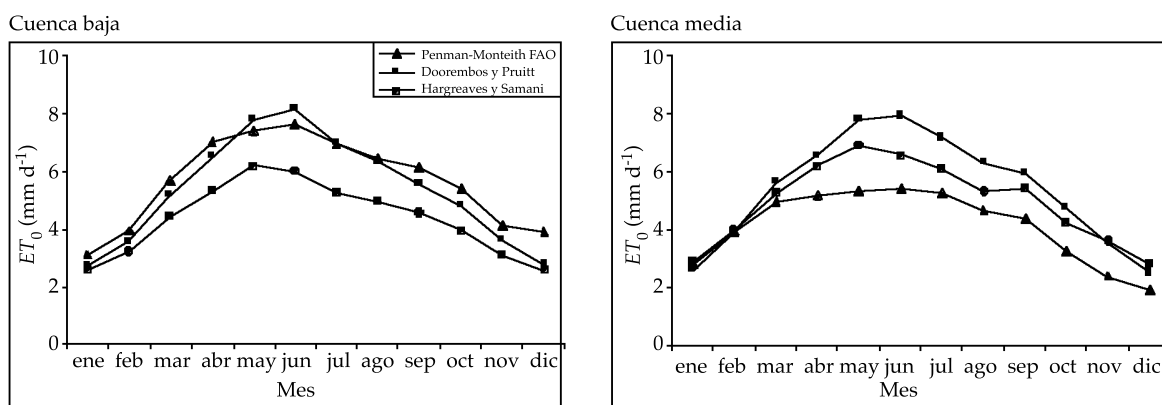


Figura 3. Comportamiento de ET_0 promedio de tres ciclos de observación (años 2005, 2006 y 2007) en la cuenca baja y media del río Nazas, utilizando diferentes métodos.

con Hargreaves-Samani, con valores de 2.5 (al inicio y final del año) y 6.24 mm d⁻¹ (parte media del año) como mínimos y máximos, respectivamente, se desfasa en tiempo (mayo) el valor máximo de evapotranspiración, periodo donde se señala mayor incidencia de radiación solar extraterrestre. Sin embargo, los tres modelos coinciden en que el periodo de mayor evapotranspiración es a partir del mes de abril hasta septiembre. También en este periodo se aprecia una diferencia considerable de evapotranspiración resultante con los tres modelos (hasta de 1.8 mm d⁻¹).

En la cuenca media se presentan patrones de tendencia parecidos a los que se tienen en la cuenca baja, con el periodo de mayor demanda a partir del mes de abril hasta septiembre; se observa discrepancia de evapotranspiración resultante con los tres modelos para este mismo periodo, pero con mayor contraste (hasta de 2.5 mm d⁻¹).

Es evidente que el modelo de Blaney-Criddle presentó mayor sensibilidad de cambio debido a que las variables climáticas como temperatura, velocidad del viento y radiación solar mostraron valores superiores en la cuenca baja en relación con la cuenca media.

Por otra parte, a fin de señalar la utilidad de los modelos de poca demanda de variables climáticas en cuanto al modelo que solicita la mayoría de las variables climáticas que definen la evapotranspiración —en este caso los modelos de Blaney-Criddle y Hargreaves-Samani con respecto a Penman-Monteith FAO—, se realizó una correlación entre estos métodos. La figura 4 muestra los resultados, los cuales indican correlaciones aceptables, ello con el coeficiente de correlación de Pearson de 0.69 y 0.61 para la cuenca baja, y de 0.80 y 0.76 para la cuenca media, con Blaney-Criddle y Hargreaves-Samani, con respecto a Penman-Monteith FAO, respectivamente. Los coeficientes de Pearson ligeramente superiores para la cuenca media obedecen a que existe mínima diferencia durante los primeros meses del periodo (enero, febrero y marzo).

Comparación de métodos

La comparación de métodos se realizó sólo para un ciclo de observación (2005) y durante el periodo de alta evapotranspiración, comprendido entre los meses de mayo, junio, julio y agosto. Los tres modelos utilizados manifiestan la máxima demanda de agua durante dicho periodo, y ese periodo también presenta una diferencia marcada en la estimación de ET_0 con los tres modelos. Esta comparación consistió en realizar una correlación de valores promedio mensual de ET_0 , determinados mediante el método de Penman-Monteith FAO (ecuación (2)) contra los valores promedio mensuales obtenidos con Blaney-Criddle, con Hargreaves-Samani y con el método del tanque evaporímetro tipo "A".

Los resultados se muestran en los cuadros 1 y 2. En estos cuadros se observa que Blaney-Criddle sobrestiman en 8.8% y en 19.7% la evapotranspiración en la cuenca baja y media, respectivamente, mientras que Hargreaves-Samani subestiman en 22% para la cuenca baja, pero la sobrestiman en 2.7% para la cuenca media. Por su parte, el método del tanque muestra una subestimación del 5.3% en la cuenca baja, menor a la que presenta el método de Hargreaves-Samani durante el periodo analizado. Los coeficientes de correlación obtenidos se pueden considerar como aceptables según De Juan (1993). El sesgo y el coeficiente de correlación obtenidos manifiestan notablemente que el modelo Blaney-Criddle modificado y el método del tanque evaporímetro pueden ser de gran utilidad para la cuenca baja, mientras que el modelo de Hargreaves-Samani en la cuenca media del Nazas.

Conclusiones

- Los modelos utilizados, con excepción de Hargreaves-Samani, manifiestan mayor evapotranspiración de referencia para la cuenca baja en relación con la cuenca

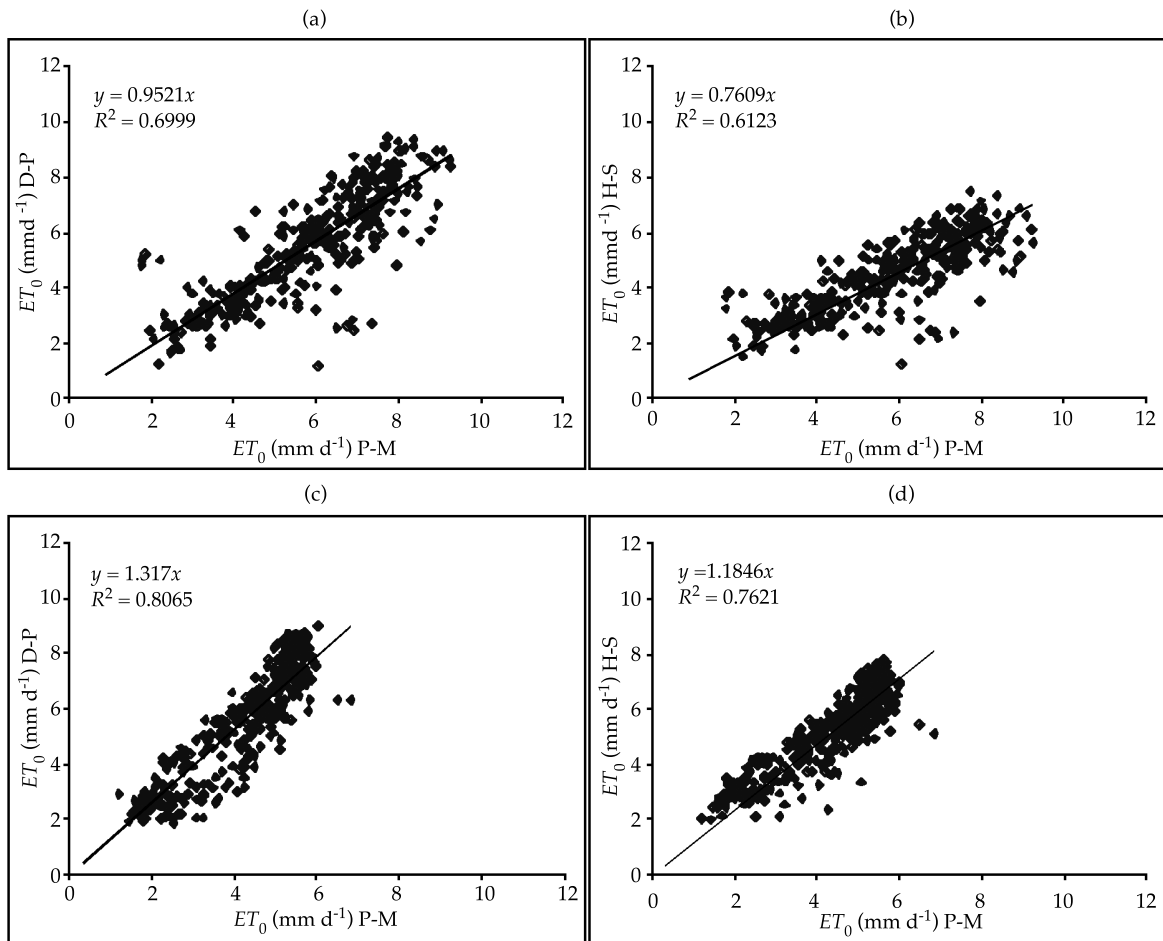


Figura 4. Estimación de ET_0 con Blaney-Criddle "D-P", con Hargreaves-Samani "H-S" con respecto a la ET_0 con Penman-Monteith FAO "P-M", (a) y (b), respectivamente, para la cuenca media; mientras que (c) y (d) bajo el mismo esquema para la cuenca media, promedio del periodo 2005-2007.

Cuadro 1. Comparación de los valores promedio mensual de ET_0 en la cuenca baja, en el periodo de máximos requerimientos hídricos (mayo-agosto).

Método	ET_0 (mm d ⁻¹) promedio mensual				Coeficiente de correlación	Sesgo %
	Mayo	Junio	Julio	Agosto		
Penman-Monteith FAO	7.817	8.297	7.790	6.345	referencia	referencia
Doorenbos-Pruitt	8.372	9.821	7.912	6.794	0.917	+8.781
Hargreaves-Samani	6.339	6.696	5.447	5.109	0.8.27	-22.011
Tanque tipo A	6.902	8.001	7.571	6.166	0.913	-5.329

media del río Nazas, lo cual constata que corresponde a dos condiciones espaciales por completo diferentes; lo anterior se ve con mayor claridad durante el periodo de marzo a septiembre, y marca que la

demanda hídrica de cualquier cultivo establecido sea mayor bajo las condiciones climáticas de la cuenca baja del Nazas.

- De los métodos analizados con respecto al de Penman-Monteith FAO como

Cuadro 2. Comparación de métodos.

Método	ET_0 (mm d ⁻¹) promedio mensual				Coeficiente de correlación	Sesgo %
	Mayo	Junio	Julio	Agosto		
Penman-Monteith FAO	6.499	6.734	6.307	5.715	referencia	referencia
Doorenbos-Pruitt	7.844	8.886	7.263	6.252	0.969	+19.750
Hargreaves-Samani	7.004	7.412	6.081	5.432	0.957	+2.660

referencia, se recomienda usar el método de Blaney-Criddle debido a que genera precisión aceptable para estimar la evapotranspiración de referencia en periodos diarios; como segunda opción se sugiere recurrir al método de Hargreaves-Samani; sin embargo, en periodos mensuales, el tanque evaporímetro es una buena herramienta para la cuenca baja. En tanto, para la cuenca media del Nazas, el método de Hargreaves-Samani tendría mayor validez. Lo anterior cuando no se cuente con variables suficientes como para utilizar el modelo de Penman-Monteith FAO.

Recibido: 04/04/2011

Aceptado: 22/10/2013

Referencias

- ALLEN, R.G., WALTER, I.A., ELLIOT, R., HOWELL, T., ITENFISU, D., and JENSEN, M. *The ASCE standardized reference evapotranspiration equation*. Phoenix: American Society of Civil Engineers Environmental and Water Resource Institute (ASCE-EWRI), 2005, pp. 7-9.
- ALLEN, R.G., PEREIRA L., RAES, D., and Smith, M. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage*. Paper No. 56. Rome: FAO, 1998.
- ARORA, V.K. The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff. *Journal of Hydrology*. Vol. 265, 2002, pp. 164-177.
- BLANEY, H.F. and CRIDDLE, W.D. 1962. Determining consumptive use and irrigation water requirements. USDA (ARS). *Tech Bull*. Vol. 1275, 59 pp.
- CUENCA, R.H. *Irrigation system design: An engineering approach*. Englewood Cliffs, USA: Prentice Hall. 1989.
- DESCROIX, L., GONZÁLEZ, J.L. y ESTRADA, J. *La Sierra Madre Occidental, un château d'eau menacé*. Paris : L'Institut de Recherche pour le Développement, 2004, pp. 132-149.
- DESCROIX, L., NOUVELOT, J.F. y ESTRADA, J. Geografía de lluvias en una cuenca del norte de México: Regionalización de las precipitaciones en la Región Hidrológica 36. *Folleto Científico*. Núm. 10. Gómez Palacio, México: Cenid Raspa, INIFAP-ORSTOM, 1997, pp. 52-123.
- DINPASHOH, Y. Study of reference crop evapotranspiration in I.R. of Iran. *Agricultural Water Management*. Vol. 84, Issues 1-2, 2006, pp. 123-129.
- DE JUAN, J. *Agronomía del riego*. Madrid: Mundi-Prensa, 1993.
- DOORENBOS, J. and PRUITT, W.O. *Crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage. Paper No. 24 (rev.). Rome: FAO, 1977.
- GODOY, C. y LÓPEZ, J.C. Patrón de extracción y requerimientos de agua en diferentes etapas fenológicas en el nogal. *Revista Interamericana Terra*. Vol. 15, 1997, pp. 1-6.
- GONZÁLEZ, M.A. y HERNÁNDEZ, L.B. Estimación de las necesidades hídricas del tomate. *Revista Interamericana Terra*. Vol. 17, núm. 4, 2000, pp. 45-50.
- HARGREAVES, G.H. and SAMANI, Z.A. Reference crop evaluation for temperature. *Applied Engr. Agric*. Vol. 1, 1985, pp. 96-99.
- JACOBS, C., ROERINK, G.J., and HAMMANI, A. *Crop water stress detection from remote sensing using the SSEBI-2 algorithm: A case study in Morocco*. XIII World Water Congresses, Montpellier, France, 2008.
- JENSEN, M.E., BURMAN, R.D., and ALLEN, R.G. *Evapotranspiration and Water Irrigation Requirements*. Manual No. 70. New York: Committee on Irrigation Water Requirements, Irrigation and Drainage Division of ASCE, American Society of Civil Engineers, 1990, pp. 332.
- JIYANE, J. y ZERMEÑO, G.A. Aplicación del enfoque de evapotranspiración a equilibrio en la agricultura de riego en zonas áridas. *Agrociencia*. Vol. 37, núm. 6, 2003, pp. 553-563.
- LÓPEZ, U.R., MARTÍN DE SANTA OLALLA, F., FABEIRO, C., and MORATALLA, A. An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. *Agricultural Water Management*. Vol. 86, Issue 3, 2006, pp. 277-328.
- LÓPEZ, E.J., TIJERINA, CH.L., HARO, A.G. y ARTEAGA, R.R. Calibración de fórmulas de evapotranspiración

- mediante un cultivo de alfalfa como referencia en el área de Montecillo, Estado de México. *Agrociencia*. Vol. 2, 1991, pp. 55-77.
- MOGUEL, O.E., TIJERINA, CH.L., QUEVEDO, N.A., CRESPO, P.G. y HARO, G. Evapotranspiración y balance de energía en el cultivo de alfalfa. *Agrociencia*. Vol. 35, núm. 1, 2001, pp. 13-21.
- MUNDO, M.D. y MARTÍNEZ, P. Sistema computarizado para la gestión del agua en sistemas de riego por gravedad en México. *Ingeniería del agua*. Vol. 9, núm. 2, 2002, pp. 171-181.
- PEREIRA, A.R., GREEN, S., and NOVA, N.A.V. Penman-Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration. *Agricultural Water Management*. Vol. 83, 2006, pp. 153-161.
- PÉREZ, J.P. y CASTELLVÍ, F. Análisis de la evapotranspiración a escala local y regional en Cataluña. *Ingeniería del agua*. Vol. 9, núm. 1, 2002, pp. 59-71.
- ER-RAKI, S., CHEHBOUNI, A., GUÉMOURIA, N., EZZAHAR, J., CAVA, S., BOULET, G., and HANICH, L. Citrus orchard evapotranspiration: Comparison between eddy covariance measurements and the FAO-56 approach estimates. *Plant Biosystems*. Vol. 143, No. 1, 2009, pp. 201-208.
- SALINAS, Z., LLLUCHE, D., HERNANDEZ, S. y LLUCHE, D.B. La aridez en el norte de México. Un análisis de su variabilidad espacial y temporal. *Atmósfera*. Vol. 11, 1998, pp. 29-44.
- SAMMIS, T.W., MEXAL, J.G., and MILLER, D. Evapotranspiration of flood-irrigated pecans. *Agricultural Water Management*. Vol. 69, 2004, pp. 179-190.
- TIJERINA, Ch.L. Requerimientos hídricos de los cultivos bajo sistemas de fertirrigación. *Revista Interamericana Terra*. Vol. 17, núm. 3, 2000, pp. 237-244.
- VILLAMAN, P.R., TIJERINA, CH.L., QUEVEDO, N.A. y CRESPO, P.G. Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración, en el área de Montecillo, México. *Revista Interamericana Terra*. Vol. 19, núm. 3, 2001, pp. 281-291.

Abstract

CHÁVEZ-RAMÍREZ, E., GONZÁLEZ-CERVANTES, G., GONZÁLEZ-BARRIOS, J.L., DZUL-LÓPEZ, E., SÁNCHEZ-COHEN, I., LÓPEZ-SANTOS, A. & CHÁVEZ-SIMENTAL, J.A. Use of automated weather stations and mathematical models to determine evapotranspiration. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. IV, No. 4, September-October, 2013, pp. 115-126.

Evapotranspiration is an essential variable in water management and irrigation planning. Hence the importance of quantifying it and analyzing the methods that most satisfactorily estimate evapotranspiration on the local and basin levels. Therefore, the objective of this study was to estimate reference evapotranspiration (ET_0) based on standard weather data using the mathematical models Penman-Monteith FAO, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani and the evaporimeter tank method, and to compare the results from applying the four methods in two Nazas River sub-basins. Three automated weather station networks located in the Nazas River were used to monitor and record the climate variables used as input in mathematical models. Two of the networks were in the lower basin (Cenid Raspa facilities with the David brand and Las Villas facilities with Motorola) and one was in the middle basin (David brand). The results indicated a higher ET_0 for the lower basin than for the middle basin of the Nazas River, with greater clarity from March to September, implying a higher irrigation volume for this zone. Moreover, based on the analysis of the methods and the comparison to the Penman-Monteith FAO as reference, the Doorenbos-Pruitt and Blaney-Criddle models are recommended to estimate evapotranspiration in the lower and middle Nazas River basins, respectively, when lacking sufficient variables for the use of the Penman-Monteith FAO model.

Keywords: water consumption, agro-climate stations, Nazas basin.

Dirección institucional de los autores

M.C. Eduardo Chávez Ramírez
Dr. Guillermo González Cervantes
Dr. José Luis González Barrios
Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Centro Nacional de Investigación Interdisciplinaria en
Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera del INIFAP
Km. 6.500 margen derecha Canal Sacramento
Gómez Palacio, Durango
Apartado postal 35140 Ciudad Lerdo, Durango, MÉXICO
Teléfono: +52 (871) 1590 105
Fax: +52 (871) 1590 104
chavez.eduardo@inifap.gob.mx
gonzalez.guillermo@inifap.gob.mx
gonzalez.barrios@inifap.gob.mx
sanchez.ignacio@inifap.gob.mx

Dr. Enrique Dzúl López

Instituto Tecnológico de la Laguna
Blvd. Revolución y Calzada Cuauhtémoc s/n
27000 Torreón, Coahuila, MÉXICO
Teléfono: +52 (871) 7051 313
Fax: +52 (871) 7051 300
alejandro.dzul@gmail.com

Dr. Armando López Santos

Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas
Universidad Autónoma Chapingo
Domicilio conocido s/n, AP # 8
35230 Ciudad Bermejillo, Durango, MÉXICO
Teléfono: +52 (872) 7760 160
Fax: +52 (872) 7760 043
Armando.lopezsantos@gmail.com

Dr. Jorge Armando Chávez Simental

Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera
Universidad Juárez del Estado de Durango
Blvd. del Guadiana # 501, Fraccionamiento Ciudad
Universitaria
34120 Durango, Durango, MÉXICO
Teléfono y fax: +52 (618) 8251 886
jorge.chavez@ujed.mx