

LA EVAPORACIÓN EN LA CUENCA DEL LAGO DE PÁTZCUARO, MÉXICO

• Enrique González-Sosa • Carlos A. Mastachi-Loza •
• J. Bernardo Rivera-Vázquez • Alfonso Gutiérrez-López •
Universidad Autónoma de Querétaro, México

• Jacqueline Lafragua •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• Aurelio Guevara-Escobar •
Universidad Autónoma de Querétaro, México

Resumen

La composición anual de la evaporación en la cuenca del lago de Pátzcuaro se integró por la evapotranspiración de la vegetación, las pérdidas por interceptación, la evaporación del cuerpo de agua y la evapotranspiración de la vegetación hidrófita. La evapotranspiración de la vegetación se estimó con los registros de seis estaciones climatológicas clásicas y siete evaporímetros ETgage. La evaporación del lago se midió con el método BREB. La evaporación por la interceptación de la vegetación fue calculada con relaciones lineales en función de la precipitación para diversos tipos de vegetación y la transpiración de la vegetación hidrófita a partir de mediciones puntuales con una cámara de circuito abierto. La evapotranspiración resultó de $308 \text{ mm} < \text{ETR} < 503 \text{ mm} (\pm 60)$, la evaporación del lago de $1\ 179 \text{ mm}$, la evapotranspiración de la vegetación hidrófita (ETH) de $1\ 824 \text{ mm}$ y la correspondiente a la interceptación entre $102 \text{ mm} < \text{EI} < 227 \text{ mm} (\pm 51)$. En el contexto del balance hídrico, en el nivel subcuenca se encontró un déficit de 12 mm en la de Ajuno y más del 65% en la propia cuenca del lago. En el resto de las subcuencas, el balance del residuo fue positivo para la generación de escurrimientos superficiales e infiltración, y/o percolación profunda, entre $18 \text{ mm} < (\text{P-ET}) < 156 \text{ mm} (\pm 53)$. Los resultados encontrados muestran la importancia de la vegetación y el lago en la distribución de la evaporación de la cuenca.

Palabras clave: evaporación, balance hídrico, lago, BREB.

Introducción

La evaporación generada por los elementos que constituyen la superficie de una cuenca, la transpiración de la cobertura vegetal, la evaporación del suelo desnudo, la evaporación de los cuerpos de agua, la evaporación generada por la interceptación de lluvia y la producida por la transpiración de la vegetación hidrófita son componentes primordiales del balance hídrico. Los cambios en la proporción de la evaporación a largo plazo pueden relacionarse con las

modificaciones en el uso del suelo, la cobertura vegetal y el clima (Bouwer *et al.*, 2008).

Numerosos métodos para determinar la evaporación se han originado en climas contrastantes y diferentes principios teóricos, los cuales pocas veces son comprobados con mediciones directas de la evaporación cuando se aplican a otros climas o condiciones diferentes a las de su origen. El principal problema se debe a la disponibilidad y calidad de observaciones directas de la evaporación, sobre todo para los cuerpos de agua.

En estudios de procesos hidrológicos y ecológicos, inevitablemente la elección y aplicación del método está sujeta al tipo de información disponible. Son ampliamente utilizados por su simplicidad los métodos: 1) Pan (tanque clase A) y los clasificados dentro del grupo de temperatura: Papadakis y Thornthwaite; 2) los que combinan la temperatura y duración del día: Blaney-Cridde y Hamon (Rosenberry *et al.*, 2007); 3) los que requieren información más detallada y cuentan con bases teóricas consistentes son clasificados dentro del grupo de Dalton: transferencia de masa (Harbeck *et al.*, 1958) y Ryan-Herleman; 4) o bien los que consideran la radiación solar y la temperatura: Makkink, Jensen-Haise y Sthepens-Stewart; 5) los que necesitan más información son llamados métodos combinados: Priestley-Taylor, deBruin, Keijman, Penman, Brutsaert-Stricker y deBruin.

En contraste, el método BREB (*Bowen Ratio Energy Balance*) es un procedimiento consistente e incluso un estándar en Estados Unidos por su confiabilidad y robustez; sin embargo, por su formulación, el método BREB ignora cualquier covarianza entre la velocidad del viento y los gradientes de temperatura y presión de vapor, lo cual podría provocar errores adicionales en el método.

En cambio, el procedimiento Eddy Covariance (EC), a pesar de ser una técnica más directa para medir la evaporación, requiere de instrumentos costosos, limitando su uso en forma generalizada. Si bien algunos de los métodos indicados son aplicables a lagos de montaña (Ronsenberry *et al.*, 2007), la decisión en la selección del método depende igualmente de la escala del tiempo de estimación de la evaporación, del tiempo de registro de las variables disponibles; es decir, su validez está sujeta a las condiciones particulares de cada sitio.

De la misma forma, el conocimiento de la evaporación generada en los lagos, humedales o bien presas es un componente valioso en la estimación del balance y la gestión de los recursos hídricos, considerando sus diversos

usos dentro del sector urbano, industrial y de producción de energía eléctrica.

La certeza en la estimación de la evaporación de los lagos asegura en consecuencia una buena planeación en el ahorro del agua de los sistemas de abastecimiento. Por tal razón, el disponer de mediciones directas de la evaporación de la cuenca del lago de Pátzcuaro es parte fundamental para un adecuado aprovechamiento hídrico de la región, conservando en todo momento los aspectos ecológicos a corto y largo plazos.

En el país, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) reportó para el periodo 1941-2000 una precipitación normal en el territorio de 771 mm, donde el 67.3% se concentra en cuatro meses (junio-septiembre). Específicamente en el estado de Michoacán, la precipitación fue de 802 mm. Maderey y Torres-Ruata (1990) estimaron una evaporación entre 800 y 900 mm por año en la región del lago de Pátzcuaro, aplicando el método de Turc (1954), basándose en la información de 543 estaciones climatológicas, con registros del periodo 1945-1980.

El residuo de la precipitación y la evaporación revela que los escurrimientos superficiales e infiltración y/o recarga profunda son prácticamente nulos. Cabe señalar que no obstante que el método de Turc (1954) es ampliamente utilizado por su simplicidad, no estima adecuadamente la evapotranspiración anual. Incluso a escala decenal, Seguin (1975) demuestra que subestima en un 12% la evapotranspiración real.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) llevó a cabo en 2004 un estudio del balance hídrico en la cuenca del lago de Pátzcuaro (Lafragua y Gutiérrez, 2005) integrándolo en tres flujos: superficial, subterráneo y del lago. El balance hídrico mostró que el 77% de la precipitación regresa a la atmósfera en forma de vapor, el 10% se infiltra y únicamente el 13% genera escurrimientos superficiales. Los flujos fueron estimados con la base de datos del año 2004, generada con una red de cinco pluviómetros

digitales y tres estaciones meteorológicas clásicas automatizadas (EMAs).

Las estaciones EMAs registraron las variables climatológicas y la precipitación cada diez minutos; en cambio, los pluviómetros registraron cada treinta minutos. La evaporación total de la cuenca incluyó la producida por el lago, la vegetación de la cuenca, la vegetación hidrófita y las pérdidas por interceptación. La combinación del modelo de Zhang *et al.* (2001) y el criterio de Turc (1954), en su modalidad anual, produjeron por parte del sistema suelo-planta una evapotranspiración de 1 193.85 mm, superior en 1.28 veces a la precipitación media anual (931.88 mm); es decir, un cociente de ETP/P por arriba del valor medio de 0.65 referido por diversos autores (*e.g.* Brutsaert, 1982, 1991). Por subcuenca, dicha relación osciló $1.07 < \text{ETP}/P < 1.45$, donde los valores extremos ocurrieron al sur y norte del lago, Pátzcuaro y San Jerónimo, respectivamente. Las pérdidas por interceptación (EI) fueron estimadas como el 18% de la precipitación anual, admitiendo implícitamente una capacidad de almacenamiento y distribución uniforme de la vegetación en 41.3% [bosque-(330.74 km²)] del 80% de la cuenca. De esta forma, la integración de las superficies boscosas de las subcuencas del sistema del lago de Pátzcuaro generaron una lámina de EI de 174.76 mm (18.7%). En tanto, con la base de datos de la estación La Pacanda —situada en la parte alta de la isla del mismo nombre, 30 m por arriba de la superficie del agua— se estimó el flujo de vapor del lago por separado de los otros flujos evaporativos de la cuenca a través de la ecuación de Penman (1948), sin considerar las superficies de las islas y la vegetación hidrófita. El flujo de vapor resultó de 989.5 mm, superior en 1.12 veces a la lámina de lluvia (879 mm) sobre la superficie del lago. La transpiración de la vegetación hidrófita fue deducida en proporción lineal al flujo de vapor del cuerpo de agua del lago, como 1.25 veces la evaporación anual, equivalente a 274.25 mm (Lafragua y Gutiérrez, 2005).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la evaporación en la cuenca del lago de Pátzcuaro a partir de mediciones directas y patentizar la importancia de la evaporación del lago y la producida por la vegetación terrestre e hidrófita, así como establecer una comparación entre la evapotranspiración calculada con el método de Penman-Monteith-FAO (Allen *et al.*, 1998) y la observada con el ETgage, comparar la evaporación del lago estimada con la ecuación de Penman (1948) y la medida con el método BREB, y conocer la distribución de la evaporación generada por los diversos componentes de la cuenca para establecer el balance hídrico.

Metodología

De acuerdo con los criterios propuestos por Ahuja (1959), Karasseff (1986) y Schaake (2000), correspondientes a los criterios de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), se evaluó la densidad de las estaciones para la cuenca del lago de Pátzcuaro. Con base en el estudio realizado por Lafragua y Gutiérrez (2005), fueron seleccionados siete sitios para medir la evapotranspiración con atmómetros (ETgage modelo E, cubierta #G2, que impide el paso de la precipitación y permite la evaporación durante la lluvia; Berrada *et al.*, 2001), con el objetivo de cubrir siete subcuencas de la cuenca. Los ETgage fueron instalados a 1.0 m de altura en áreas libres de obstáculos para evitar errores por el paso del sol y del viento (Manual ETgage).

Las figuras 1 y 2 muestran la ubicación en planta y en altitud de las estaciones y ETgage. Para evaluar la ETP con la ecuación de Penman-Monteith-FAO (Allen *et al.*, 1998) se instalaron tres estaciones meteorológicas automáticas tipo WATCHDOG-900, adicionales a las tres estaciones EMAs (IMTA), cumpliendo con ello la recomendación internacional para la densidad de redes de estaciones climatológicas (OMM, 1970, 1994). Una en la subcuenca de Ajuno, otra en la subcuenca de Tzurumútaró y la tercera

en la zona de San Andrés. Los ETgage y las estaciones de los sitios de Pichátaro y Yotatiro, en la zona poniente de la cuenca a 2 600 y 2 200 msnm, respectivamente.

Para medir la evaporación del lago se instaló una estación climática Bowen (Campbell Scientific, 1998) basada en el método de BREB, que mide los componentes del balance de energía de superficie y los gradientes de temperatura y presión de vapor del aire. La estación fue colocada en la vertiente norte de la parte central del lago, al pie de la isla de La Pacanda, con el propósito de garantizar un *fetch* conveniente ($F > 150$ m). Los gradientes de presión de vapor y de temperatura se midieron con una separación de 1 m, con un desnivel de 3 m respecto a la superficie del agua y registro cada veinte minutos. La temperatura del aire (T_a), la humedad relativa (H_r), y la velocidad (U_a) y dirección del viento fueron medidas a una altura 4 m por arriba del nivel del agua. Durante dos meses se midió la temperatura del agua con un termopar de cobre suspendido a 2 cm de profundidad.

Adicionalmente se llevaron a cabo dos campañas de medición de la transpiración de la vegetación hidrófita mediante una cámara portátil de circuito abierto, la cual se basa en la medición del flujo de vapor que circula al interior de la cámara (Stannard y Weltz, 2006). A través de imágenes de satélite y verificación sobre el terreno se delimitó la superficie y composición de las especies dominantes de la vegetación tanto terrestre como hidrófita.

Método Bowen Ratio Energy Budget (BREB)

La relación de Bowen (β) representa el cociente entre los flujos de calor latente (H) y el flujo de calor sensible (LE). La relación de Bowen, combinada con el balance de energía de superficie, definen la formulación del método Bowen Ratio Energy Budget (BREB) (Stannard, 1997):

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (1)$$

$$R_n = H + LE + G \quad (2)$$

donde R_n es la radiación neta y L es el calor latente de vaporización del agua (2450 J g^{-1}). La combinación de las ecuaciones (1) y (2) producen la ecuación para estimar el flujo de vapor:

$$LE = \frac{1}{1 + \beta} (R_n - G) \quad (3)$$

Dentro de un periodo promedio (30 min) se han formulado relaciones empíricas que relacionan los flujos y gradientes verticales:

$$LE = -\frac{\rho_a C_p}{\gamma} k_v \frac{\partial e}{\partial z} \quad (4)$$

$$H = -\rho_a C_p k_h \frac{\partial T}{\partial z}$$

donde C_p es el calor volumétrico del aire; e , la presión parcial de vapor; ρ_a , la densidad del aire; k_v , el coeficiente de difusión de vapor, y k_h es el coeficiente de difusión de calor. Asumiendo $k_v = k_h$ y disponiendo de los gradientes en dos niveles dentro de una superficie dada, la relación de Bowen resulta:

$$\beta = \gamma \frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\frac{\partial e}{\partial z}} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (5)$$

Siendo γ la constante psicométrica. Para el caso de cuerpos de agua, la ecuación (3) puede definirse de la forma siguiente (Rosenberry et al., 2007):

$$E = \frac{1}{\rho [L(1 + \beta) + cT_0]} (R_n - Q_x + Q_v - Q_b) \quad (6)$$

siendo C el calor específico del agua [$4186 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]; R_n , la radiación neta [Wm^{-2}]; T_v la temperatura de la superficie del agua [$^\circ\text{C}$]; Q_x , el cambio de calor almacenado en el cuerpo de agua [Wm^{-2}]; Q_v la energía neta (positiva cuando es por advección del algo) a partir de la precipitación, superficie

del agua y acuífero [Wm^{-2}], y Q_b la energía neta por conducción de los sedimentos en el lago [Wm^{-2}]. La relación de Bowen toma la forma:

$$\beta = C_B P \frac{T_0 - T_a}{e_0 - e_a} \quad (7)$$

C_B es el coeficiente empírico determinado por Bowen igual 0.61 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$); P , la presión atmosférica (kPa); T_a , la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$); T_0 , la temperatura de la superficie del agua; e_0 , la presión de vapor a saturación para la temperatura de la superficie del agua (Pa), y e_a es la presión de vapor (Pa).

Como la profundidad actual del lago es somera, entre 2 y 12.5 m, y no fue medido el perfil de temperatura, se estableció la hipótesis de una sola termoclina. Al igual que el trabajo de Rosenberry *et al.* (2007), quienes reportan que los valores de Q_v y Q_b generalmente son pequeños, en este estudio igualmente son ignorados tales valores.

Para evaluar la bondad del método de BREB se comparó la evaporación observada con la estimada con el método de Penman (1948). Sin duda por la dificultad natural de disponer las mediciones convenientes para la evaluación de la evaporación del lago de Pátzcuaro fue un desafío establecer el sitio experimental y garantizar un buen *fetch*, máxime que las mediciones deben ser representativas del flujo de vapor generado por el lago.

El sector norte presentó una distancia suficientemente larga como para suponer que las mediciones están dentro de la subcapa atmosférica de equilibrio, porción de la atmósfera en equilibrio con la superficie evaporante. Como los requerimientos del *fetch* también están asociados con la rugosidad y condiciones atmosféricas del sitio, se siguió la regla 1:100 de la relación altura-longitud para garantizar un grado razonable de equilibrio entre el sensor y la superficie evaporante (Heilman *et al.*, 1989).

Descripción del sitio

El lago de Pátzcuaro se localiza dentro de la cuenca del mismo nombre, entre las coordenadas $19^{\circ} 27'$ a $19^{\circ} 44'$ de latitud norte y entre los $101^{\circ} 26'$ a $101^{\circ} 53'$ de longitud oeste, parte central del estado de Michoacán, cuenca Lerma-Santiago. La cuenca es del tipo endorreica y se sitúa dentro de la subprovincia neovolcánica tarasca perteneciente al eje Neovolcánico Transversal. El clima en la cuenca es templado subhúmedo, con lluvias de verano. Una temperatura media anual $14^{\circ}\text{C} < T < 20^{\circ}\text{C}$ y una precipitación media anual histórica del periodo 1963-2003 entre $900\text{ mm} < P < 1\ 140\text{ mm}$. La geomorfología de la cuenca da origen a cinco climas, 18 tipos de suelos y tres tipos de bosques mixtos: pino-encino, de pino (*Pinus*), encino (*Quercus*) y de oyameles (*Abies religiosa*), y cuatro especies arbustivas, incluso asociaciones de huizache-mezquite.

La agricultura ocupa el 40% de la superficie de la cuenca y los cultivos se ubican en la ribera del lago y la zona de piedemonte. En la figura 1 se muestran los tipos dominantes de vegetación obtenidos de una imagen de satélite del año 2007. Puede observarse que en los bordes del lago se tiene la formación de vegetación hidrófita, acuática y subacuática, dominada por tules (*Scirpus americanus*, *Typha latifolia*, *Sagittaria graminea*, *Cyperus niger*).

El lago de Pátzcuaro puede considerarse como un lago tropical de montaña, con una profundidad somera y variable debido a su topografía y la gran dinámica del proceso erosión-sedimentación; la longitud y anchura máxima son de 20 y 10 km, respectivamente. Las profundidades varían entre 2 y 4 m en la fracción sur y sureste (Ihuatzio y Erongarícuaro), y 12.5 m en el sector oriente (Quiroga). En la zona denominada cuello del lago, donde se localizan las islas de Janitzio, Tecuén, Yunuén y La Pacanda, la profundidad es de 5 m.

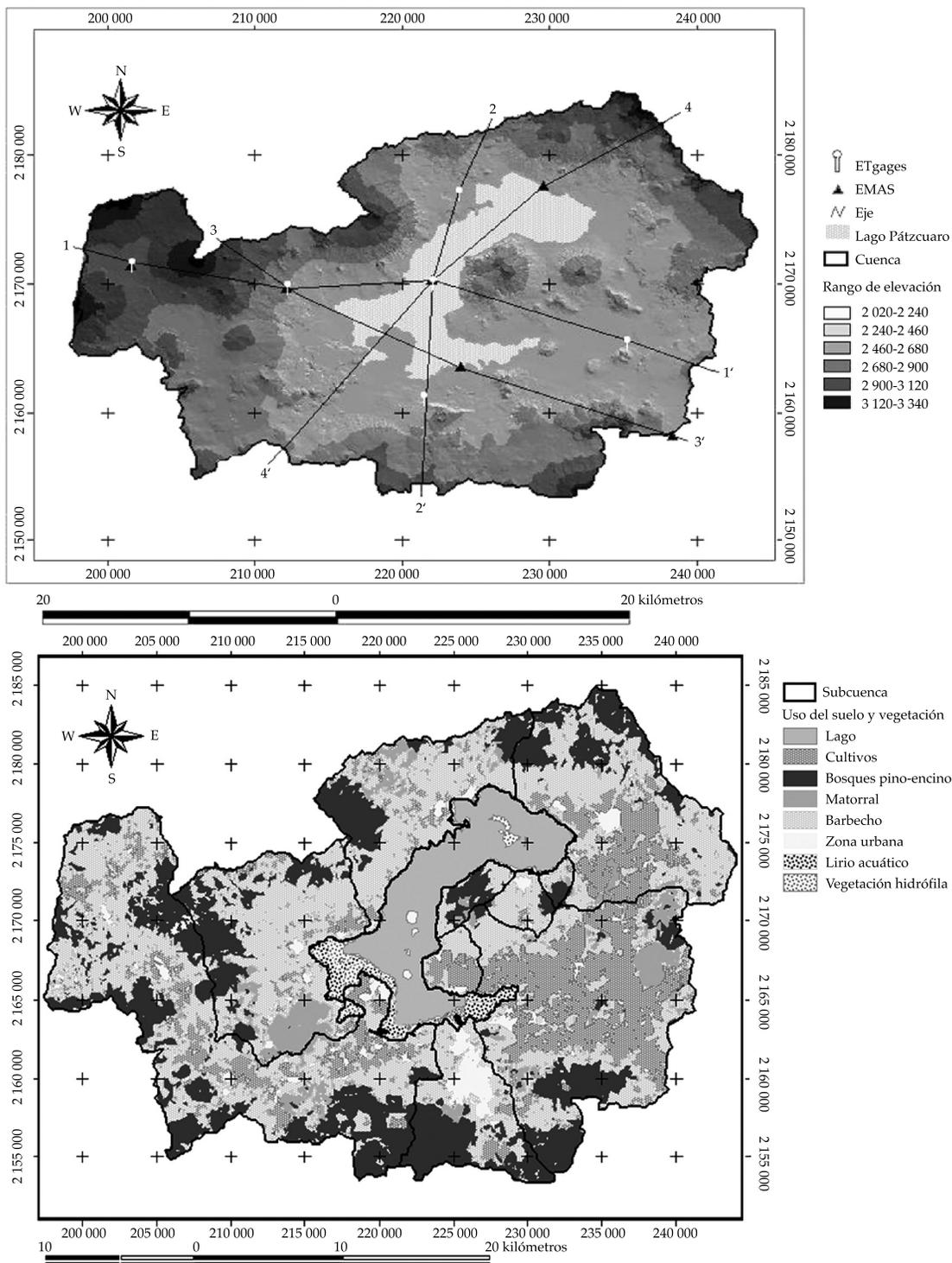


Figura 1. a) Ubicación de los sitios de medición de la evaporación y las variables climatológicas. La ubicación de los sitios respecto a la altitud sobre el trazo de cuatro ejes transversales: dos en la dirección norte-sur (2-2' y 4-4') y dos en la dirección este-oeste (1-1' y 3-3'); b) distribución de la cobertura vegetal, clasificada con base en la imagen de satélite de 2007.

Resultados y discusión

Las variables registradas en las estaciones EMA's mostraron un comportamiento parecido, salvo la temperatura en Pichátaro, que fue inferior al resto de las estaciones, originado por su ubicación en la montaña alta de la cuenca (figuras 1 y 2).

En la figura 3 se presentan los valores medios diarios de las estaciones de: Tupátaro, Pichátaro, Yotatiro, Chupícuaro, La Pacanda y Pátzcuaro, durante el periodo de julio 2006 a junio 2007: temperatura $5^{\circ}\text{C} < T_a < 25^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2.1, \pm 2.6, \pm 2.4, \pm 2.2, \pm 2.4, \pm 2.8$); humedad relativa $21\% < H_r < 94\%$ ($\pm 16.9, \pm 14.0, \pm 13.7, \pm 12.9, \pm 11.8, \pm 13.7$); déficit de presión de vapor $0.07\text{ KPa} < DP < 1.7\text{ KPa}$ ($\pm 0.3, \pm 0.2, \pm 0.3, \pm 0.3, \pm 0.3, \pm 0.3$); velocidad del viento $0.01\text{ ms}^{-1} < U_a < 5.7\text{ ms}^{-1}$ ($\pm 0.3, \pm 0.4, \pm 0.2, \pm 0.4, \pm 0.7, \pm 0.3$); la radiación global $7\text{ Wm}^{-2} < R_g < 371\text{ Wm}^{-2}$ ($\pm 55.6, \pm 56.4, \pm 51.3, \pm 56.7, \pm 56.1$), y una radiación neta $28\text{ Wm}^{-2} < R_n < 253\text{ Wm}^{-2}$ ($\pm 30.8, \pm 31.6, \pm 32.1, \pm 38.7, \pm 37.9$).

El comportamiento semejante de las variables climáticas en los seis sitios (figura 3) evidencia un clima regional dentro de la cuenca. En contraste, los registros de la estación Bowen y de la isla de La Pacanda mostraron un comportamiento diferente al observado en otros sitios, un clima particular del lago. Para el primer semestre de 2007: temperatura $12^{\circ}\text{C} < T_a < 20^{\circ}\text{C}$ (± 1.7); humedad relativa $35\% < H_r < 80\%$ (± 58.8); déficit de presión de vapor $0.4\text{ KPa} < DPV < 1.4\text{ KPa}$ (± 0.82); velocidad del viento $0.5\text{ ms}^{-1} < U_a < 9\text{ ms}^{-1}$ (± 13.6); radiación global $95\text{ Wm}^{-2} < R_g < 350\text{ Wm}^{-2}$ (± 47.5), y una radiación neta $55\text{ Wm}^{-2} < R_n < 250\text{ Wm}^{-2}$ (± 41), siendo las variables U_a , DPV y H_r las que mostraron un comportamiento diferente respecto a las otras estaciones (figura 3).

Los vientos dominantes circularon en dirección del sector noroeste de la cuenca, con mayor potencia en la zona central del lago, incluso con ráfagas instantáneas máximas del orden de 100 km h^{-1} .

Tal comportamiento del viento revela que es un elemento regulador del clima de

la cuenca debido a su acción convectiva-advectiva como fuente generadora de flujo de vapor y humedad en el interior de la cuenca, primordialmente en el sector norte del lago. Por otra parte, las velocidades reducidas de Yotatiro y Pátzcuaro, en comparación con las otras estaciones, hacen suponer la presencia de obstrucciones alrededor de los sitios, lo cual sin duda afecta la estimación de la evaporación cuando son aplicados métodos que consideran el viento.

La precipitación histórica de la estación Pátzcuaro, periodo 1969-1991, comparada con la correspondiente al periodo de estudio, muestra que fue un año relativamente seco (figura 4). En el cuadro 1 se presenta un resumen de la distribución la precipitación por mes y subcuenca, así como los valores anuales. En el periodo de estudio, la precipitación anual por subcuenca fluctuó entre $400\text{ mm} < P < 810\text{ mm}$, siendo la subcuenca de Ajuno con menor precipitación (309 mm) y la de Tzurumútaro la más lluviosa (809 mm), con una dispersión de $\pm 125\text{ mm}$ entre las subcuencas, incluyendo la propia del lago. El sector norte de la cuenca fue el más lluvioso, en tanto en la parte suroeste, zona montañosa, la precipitación se redujo en un 50%, y en el resto de las subcuencas la diferencia fue entre el 3 y 14%, siendo significativa la diferencia entre el sector norte y el resto de los sectores. Las diferencias entre las subcuencas de Ajuno y Tzurumútaro pueden explicarse por la orografía de la zona, es decir, por la presencia de agua atmosférica transportada por niebla advectiva (Labajo *et al.*, 1995), condensación típica de zonas de montaña, la cual no fue registrada con los pluviómetros utilizados en el estudio.

También la niebla representa una significativa fuente de vapor por la intercepción por condensación, la cual no es considerada en los métodos aplicados en este trabajo. La mayor parte de la precipitación se presentó en el ciclo verano-primavera, correspondiente a los meses de julio-septiembre 2006 y abril-

junio 2007, y sólo el 10% en el periodo otoño-invierno.

La precipitación se concentró en tres sectores. Por orden de magnitud, el sector oriente, zona de piedemonte-valle, integrada por las subcuencas de Pátzcuaro, Tzurumútaro y Quiroga, resultó ser el más lluvioso, con 810 mm año⁻¹. El sector central, integrado por las subcuencas de Cucuchucho, Granada, Tzintzuntzan, Ojo de Agua y El Lago, conjuntamente con Quiroga, con precipitaciones intermedias, 730-770 mm, originadas por los efectos de las corrientes de humedad del Pacífico y del golfo. El de menor precipitación fue el sector norponiente, correspondiente a la zona montañosa, donde se ubica Ajuno, entre 400-550 mm. En la figura 4b se presenta, a título de ejemplo, la distribución espacial de la precipitación para el mes de junio 2007.

Cabe mencionar que análisis estadísticos de rupturas de series de precipitación muestran que existen dos grandes periodos históricos de lluvias. El primero de 1949 a 1980 y el segundo de 1981 a 2004, lo que hace suponer que el comportamiento hasta el año 2006-2007 continúa dentro del mismo régimen (Gutiérrez *et al.*, 2004). La comparación de la evapotranspiración observada con los seis ETgage situados en la zona de montaña, piedemonte-valle y valle, calculada con los métodos de Turc, Turc modificado (Abteu, 1996, 2001), Priestley-Taylor e Imak, Penman-Monteith-FAO, confirmó que este último fue el adecuado para su aplicación en el presente trabajo. En la figura 5a se muestra la evaporación mensual calculada con los métodos mencionados en la estación Yotatiro, localizada en la cuenca de Ajuno, y en la figura 5b se tiene la evaporación correspondiente para el lago.

La comparación entre el ETgage y los métodos también puso en evidencia las limitaciones de su aplicación a las condiciones locales de cada sitio. A título de ejemplo, el sitio de Pichátaro, por sus condiciones climatológicas, zona de lluvia orográfica y niebla, zona de montaña y la

evaporación calculada con los métodos fue inferior a la observada con el ETgage, e incluso con el método de Penman-Monteith, a pesar de ser un método estandarizado por la FAO y por diversas investigaciones (*e.g.* Brown, 1981).

En la figura 6a se ejemplifica la distribución espacial de la evapotranspiración calculada con Penman-Monteith para el mes de junio 2007. En la figura 6b se presenta la distribución de la evapotranspiración real, una vez aplicada la corrección de Zeng (Sharif y Miller, 2006), también para el mismo mes.

La distribución espacial de la evaporación ocasionada por las pérdidas por interceptación para los diferentes tipos de cobertura no se muestra aquí. Al respecto, es importante destacar que no son considerados exhaustivamente todos los tipos de vegetación dentro de las siete clases consideradas en el estudio. En el cuadro 2 se resumen la distribución temporal de la evapotranspiración y la evaporación.

En el cuadro 2 se muestran los valores mensuales de ETR corregidos con el método de Zeng (Sharif y Miller, 2006). Como puede verse a nivel potencial, los valores anuales fluctúan de 1 083 mm año⁻¹ < ETP < 1 385 mm año⁻¹, con una evaporación media para la cuenca de 1 261 (± 97) mm año⁻¹, los cuales superan los 900 mm obtenidos por Maderey y Torres Ruata (1990), quienes aplicaron el método de Turc (1954). Las mayores tasas ocurren en el periodo primavera-verano, 128 mm mes⁻¹ (± 11.0) < ETP < 170 mm mes⁻¹ (± 18.0), equivalentes a 4.3 y 5.7 mm día⁻¹, siendo la subcuenca Ojo de Agua, situada en el costado interior del lago (sector centro) y la de Erongarícuaro (sector oeste) la de mayor y menor ETP, respectivamente. Una reducción sustancial de la ETP aparece en la época septiembre-enero, de 86 (± 6.0) mm mes⁻¹ < ETP < 119 mm mes⁻¹ (± 8), perteneciente a una temporada de bajas temperaturas y menor radiación. La aplicación del índice de humedad definido por Zeng *et al.* (2000) produce una ETR en un orden de magnitud inferior del 50% respecto a la ETP. Los valores anuales fluctúan de 308 mm año⁻¹ < ETR < 503

mm año⁻¹, con una media para la cuenca de 440 (± 60) mm año⁻¹. En marzo-abril 2007, la evapotranspiración prácticamente es nula, lo cual coincide con un periodo de poca humedad relativa y un significativo DPV, tal como puede observarse en la figura 3. Inclusive el periodo de sequía, que abarca seis meses, noviembre 2000-abril 2007, con una ETR < 1.0 mm día⁻¹. La distribución espacial ubica las mayores tasas de ETR en el sector sur-oeste, la cual coincide con la mayor zona de cultivos, con 1.2 mm día⁻¹ < ETR < 3.4 mm día⁻¹. El análisis de los errores de la relación de Bowen en condiciones no advectivas como establecen Pérez *et al.* (1999) y XiaoFeng Guo *et al.* (2007), entre otros, para el caso de superficies vegetadas, no fueron significativos, porque la relación de Bowen siempre fue mayor que -1. Cabe destacar que el 64% de los datos cumplieron con la relación $\frac{\Delta e + \rho \Delta T}{Rn - G} > 0$ (Pérez *et al.*, 1999).

En este mismo sentido debe señalarse que el transporte de flujo de vapor por advección en cuerpos de agua está regido por mecanismos turbulentos complejos poco descritos en la literatura especializada. En la figura 7a se presenta la comparación de la evaporación registrada con el ETgage situado en la isla de La Pacanda y el método de Penman (1948), a partir de la información de la estación climática situada también en la isla y la estimada con el método BREB (ecuación (3)). Puede observarse que existe una muy buena correspondencia entre el método BREB y el ETgage, un $R^2 > 0.9$, como también lo observó Puryear (2005). En tanto el método de Penman (1948) muestra una subestimación sistemática bien definida respecto al BREB y el ETgage (figura 7b). Con base en esta comparación y correlación entre Penman (1948) y Bowen se calculó la evaporación anual del lago. La evaporación del lago fluctuó 2.2 mm día⁻¹ < E_w < 5.0 mm día⁻¹ y durante el periodo seco, el lago proporciona la humedad a la región central de la cuenca para satisfacer la demanda evaporativa de la atmósfera. Del mismo

puede notarse un comportamiento semejante entre la ETR y la E_w durante el periodo de lluvias julio-septiembre, cuando el suelo alcanza la saturación y existe suficiente agua en la zona de las raíces. En la figura 7b se tienen los valores de la relación Bowen y los gradientes de presión de vapor y temperatura. La transpiración mensual de la vegetación hidrófita del lago se estimó con base en la medición en las tres especies dominantes (thypha, tule y lirio) y el agua, y la correlación con la evaporación con el método BREB. El cuadro 3 muestra ambos resultados: evaporación del lago y transpiración de la vegetación hidrófita.

Puede apreciarse que la transpiración de la vegetación hidrófita (ETH) es persistente mensualmente, en comparación con la del lago. En el periodo agosto (2006) a enero (2007), la transpiración generada por la typha y tule superan la producida por el lago. Es decir, la evaporación generada por la vegetación hidrófita por unidad de superficie es significativamente mayor a la del lago, en un orden de magnitud de $1.3 < (ETH/E_w) < 3.8$. La evaporación producida por la intercepción de la vegetación, sin incluir la parte de las herbáceas y los lechos de residuos vegetales alcanza valores entre 102 mm < EI < 277 mm (± 51), es decir, representa por subcuenca del orden del 35y 19% de la precipitación anual. Las pérdidas por intercepción se concentran en el sector oeste-central del lago, Tzintzuntzan y Ojo de Agua, subcuencas integradas por cultivos y vegetación herbácea. En promedio, la tasa de EI no rebasa 1.7 mm día⁻¹, y en el periodo noviembre (2006) a mayo (2007) son prácticamente nulas por la escasa precipitación en este periodo.

Conclusiones

En este trabajo se determinó la composición anual de la evaporación integrada por la evapotranspiración de la vegetación, las pérdidas por intercepción, la evaporación del cuerpo de agua y la evapotranspiración de la

Cuadro 1. Precipitación mensual en mm, julio 2006-junio 2007.

Cuenca	2006							2007						
	Área	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
Ajuno	243	58	74	52	56	8	4	13	22	0	5	19	87	398
Pátzcuaro	57	159	178	114	133	15	5	17	17	0	0	38	122	798
Tzurumútaró	176	154	164	170	111	14	4	17	16	8	1	43	110	810
Quiroga	125	141	172	213	81	11	4	8	14	3	2	16	104	769
San Jerónimo	85	153	166	200	99	18	3	7	22	0	0	7	70	745
Erongarícuaro	115	77	91	80	147	18	4	12	26	0	0	9	102	566
Cucuchucho	12	142	157	154	99	14	4	9	17	0	0	17	84	697
Granada	12	150	159	190	104	21	3	8	24	0	0	9	60	728
Tzintzuntzan	12	158	170	211	93	14	4	8	19	3	0	16	87	782
Ojo de Agua	4	145	175	216	82	11	5	7	15	3	2	13	102	775
Lago	96	147	162	181	101	16	4	8	20	0	0	11	80	730
Máximo		159	178	216	147	21	5	17	26	8	5	42	122	810
Mínimo		58	74	52	56	8	3	7	14	0	0	7	60	398
Media		134	151	160	100	14	4	11	19	2	1	19	93	707
Desv. est.		34	35	56	25	4	1	4	4	3	2	12	18	123

Cuadro 2. Repartición mensual de la evapotranspiración.

Cuenca	2006						2007						
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
Ajuno	107/46	100/54	96/41	94/43	74/8	81/4	83/12	76/19	106/0	119/4	116/18	96/59	1 148/308
Pátzcuaro	112/92	101/95	98/72	90/77	80/14	78/5	78/16	96/16	136/0	152/0	145/33	128/83	1 294/503
Tzurumútaró	103/88	92/87	89/87	85/67	74/13	74/4	75/15	91/15	131/8	152/1	137/37	106/73	1 209/495
Quiroga	119/88	103/94	99/103	94/57	86/10	89/4	88/8	103/13	148/3	161/2	169/15	122/73	1 381/470
San Jerónimo	109/89	94/88	90/95	84/62	76/16	78/3	78/6	97/20	142/0	156/0	157/7	119/55	1 280/441
Erongarícuaro	91/54	83/59	80/53	79/76	68/17	69/4	70/11	80/22	115/0	124/0	123/9	101/67	1 083/372
Cucuchucho	107/86	95/86	91/84	84/62	75/13	74/4	73/9	94/16	137/0	152/0	146/16	124/63	1 252/439
Granada	104/87	90/84	86/90	80/63	72/18	74/3	73/7	94/21	139/0	154/0	152/9	118/48	1 236/430
Tzintzuntzan	114/93	100/92	95/100	90/62	82/13	84/4	84/8	100/18	145/3	159/0	164/15	121/63	1 338/471
Ojo de Agua	119/90	104/95	100/103	94/57	86/10	89/4	88/7	103/14	148/3	161/2	170/13	123/72	1 385/470
Máximo	119/93	104/95	100/103	94/77	86/18	89/5	88/16	103/22	148/8	161/4	170/37	128/83	1 385/503
Mínimo	91/46	83/54	80/41	79/43	68/8	69/3	70/6	76/13	106/0	119/0	96/7	96/48	1 083/308
Media	109/81	96/83	92/83	87/63	77/13	79/4	79/10	93/17	135/2	149/1	116/17	116/66	1 261/440
Desv. est.	8/17	7/15	6/21	6/10	6/3	7/1	6/3	9/3	14/3	15/1	18/10	11/10	97/60

Nota: los valores en negritas corresponden a la evaporación real.

Cuadro 3. Repartición mensual de la evaporación del lago y la vegetación hidrófita.

	2006						2007						
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
Lago	99	85	81	74	66	68	67	91	136	151	145	116	1 179
Lirio	66	66	64	66	64	66	66	59	66	64	66	64	777
Thyfa y tule	88	89	86	89	86	89	88	80	88	86	89	89	1 047

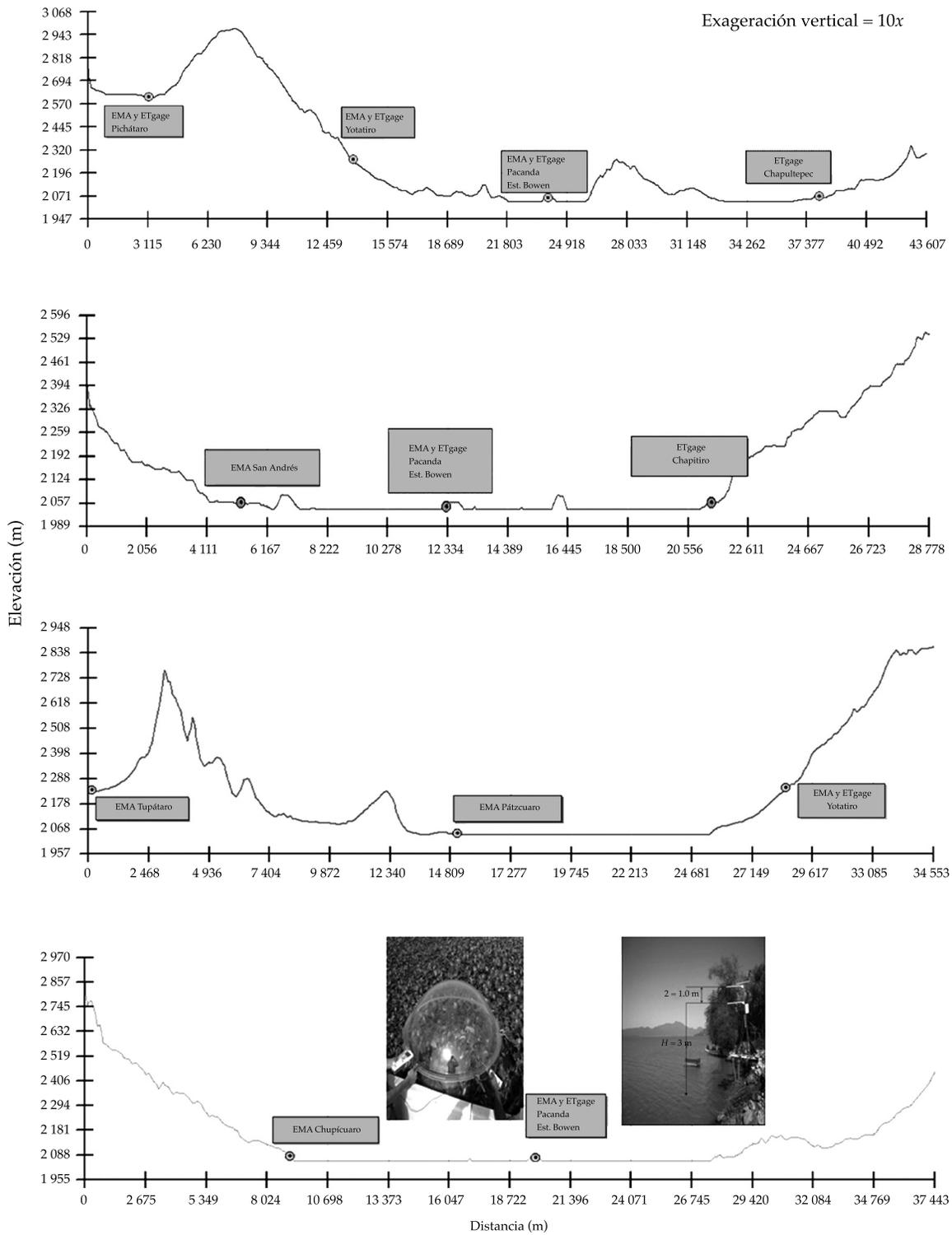


Figura 2. Ubicación en altitud de los evaporímetros tipo ETgage y las estaciones EMAs. Los dos primeros perfiles corresponden a la dirección norte-sur (2-2' y 4-4') y los otros dos a la dirección este-oeste (1-1' y 3-3').

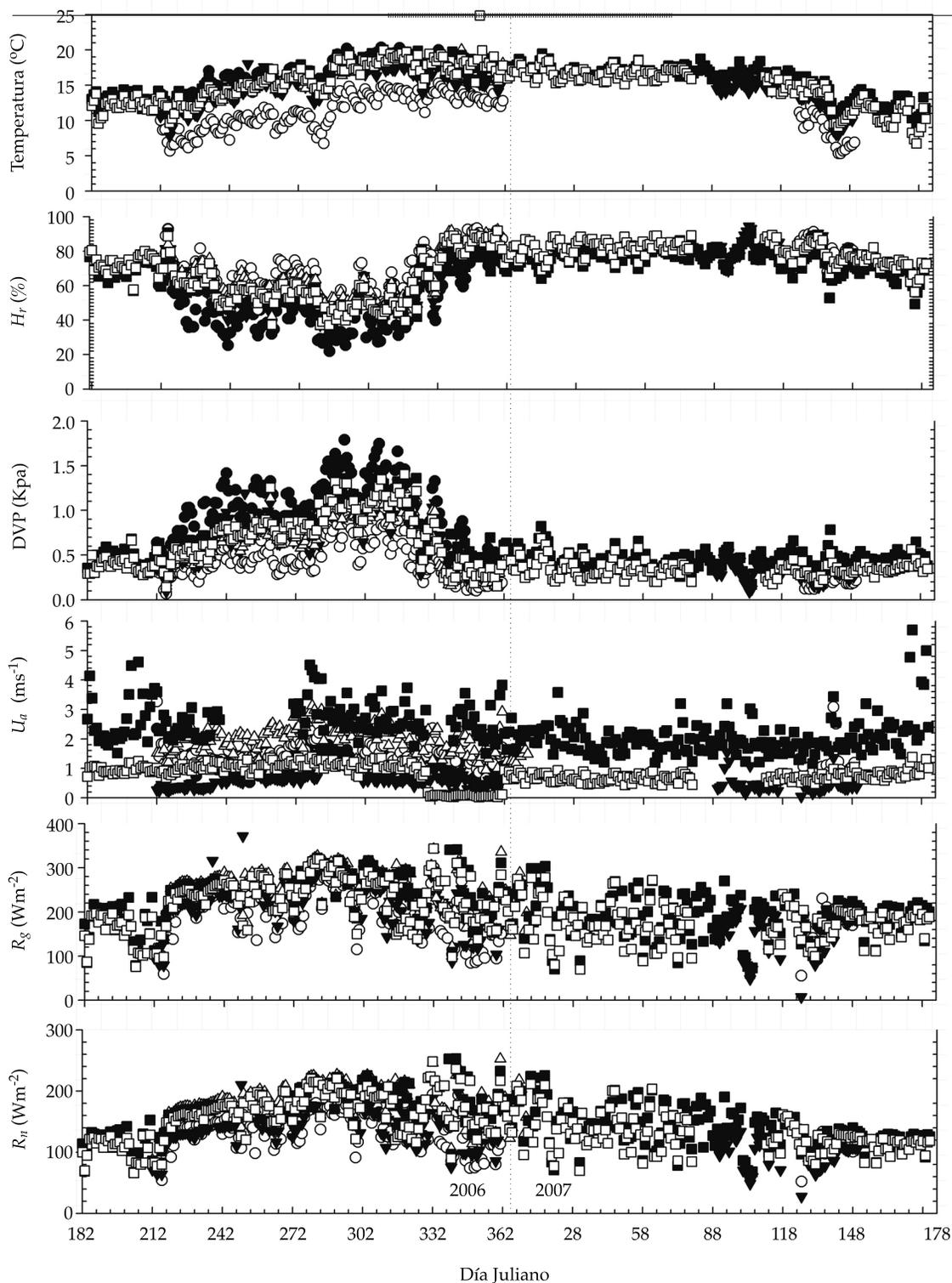


Figura 3. Variables climatológicas durante julio 2006-2007: temperatura, T_a ; humedad relativa, H_r ; déficit de presión de vapor, DPV ; velocidad del viento, U_a ; y la radiación global y neta, R_g y R_{net} , registradas en las estaciones de Tupátaro (\circ), Pichátaro (\square), Yotatiro (\blacktriangledown), Chupícuaru (\blacktriangle), La Pacanda (\blacksquare) y Pátzcuaro (\square).

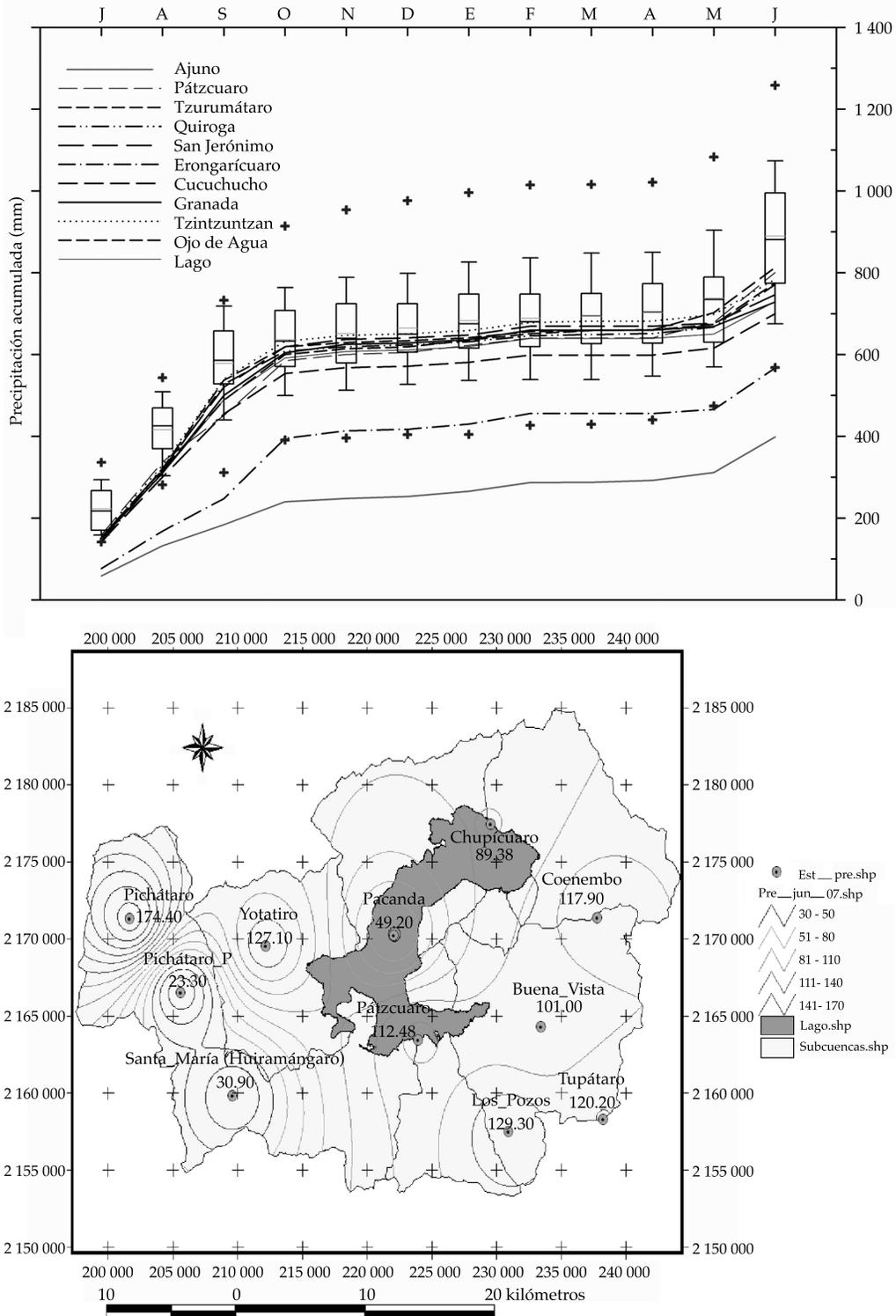


Figura 4. a) Comparación de la precipitación histórica acumulada del periodo 1969-1991 en la estación Pátzcuaro, y la del periodo julio 2006-junio 2007 por subcuencas, incluyendo la del lago. Las cajas indican la media y mediana, y los percentiles del 5 y 95% de la lluvia histórica 1969-1991; b) distribución espacial de la precipitación del mes de junio 2007.

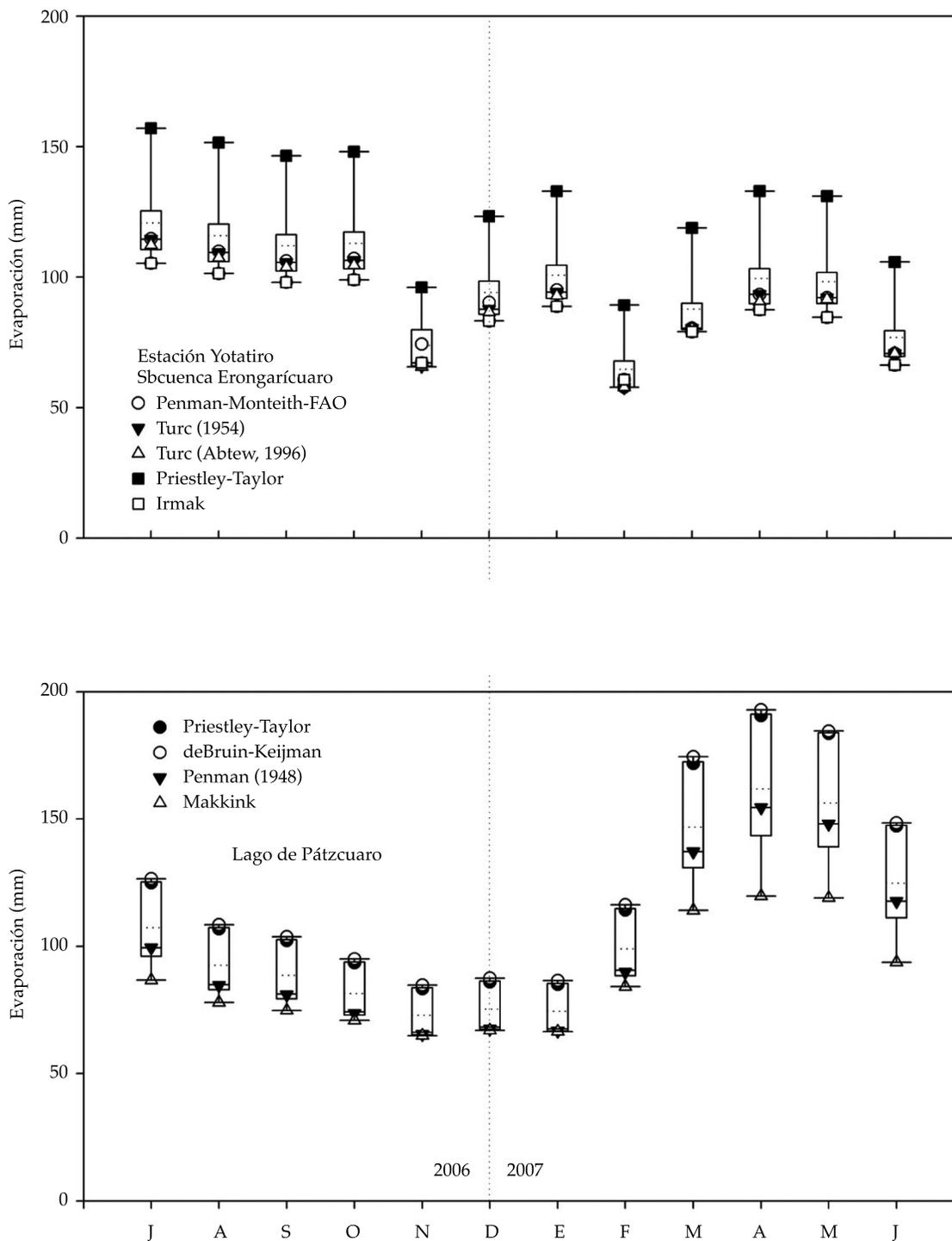


Figura 5. a) Comparación de la evaporación mensual estimada en la estación de Yotatiro, subcuenca de Ajuno *versus* Penman-Montheith-FAO, Turc, Turc (Abtew, 1996), Priestley-Taylor e Irmak; b) evaporación estimada para el lago de Pátzcuaro con los métodos de Priestley-Taylor, deBruin-Keijman, Penman (1948) y Makkink. Las cajas indican la media y mediana, y los percentiles del 5 y 95%.

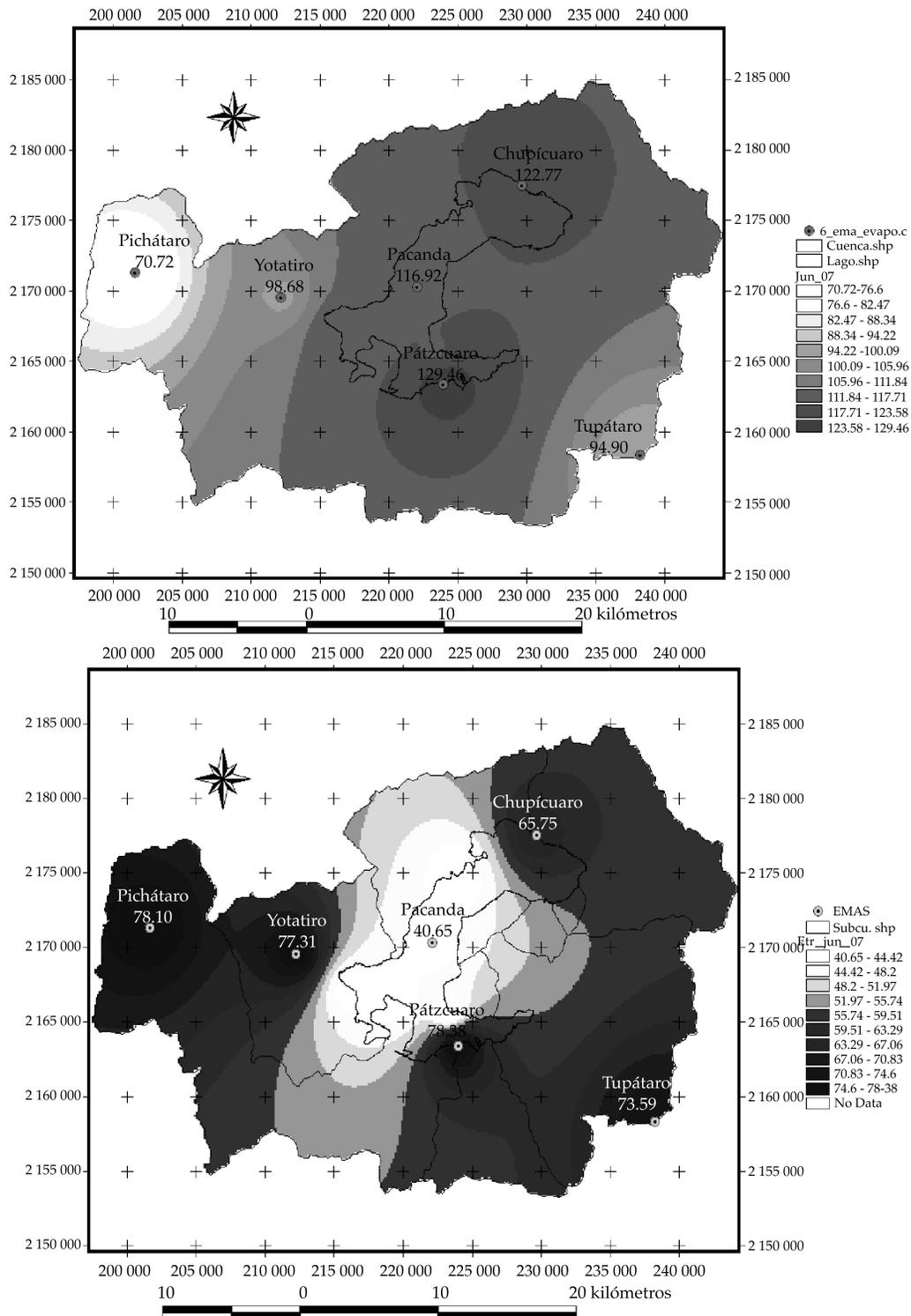


Figura 6. a) Distribución espacial de la evapotranspiración (mm) de referencia calculada con el método Penman-Monteith-FAO para el mes de junio de 2007; b) distribución espacial de la evapotranspiración real, aplicando la corrección de Zeng (Sharif y Miller, 2006).

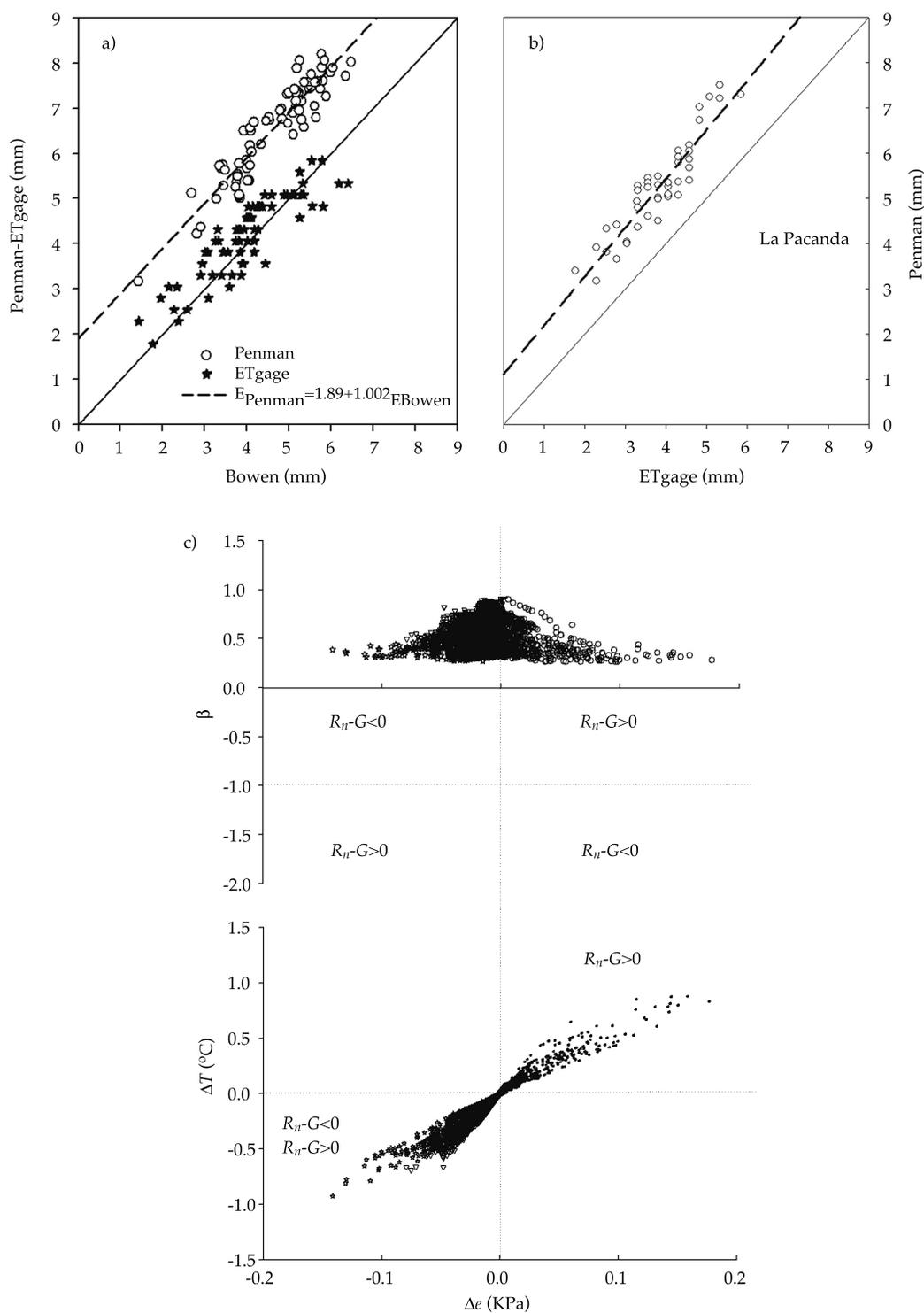


Figura 7. a) Comparación de la evaporación, estación Bowen *versus* método de Penman (1948) y el ETgage; b) comparación de la evaporación ETgage *versus* Penman (1948); c) plano de exclusión de errores de la relación de β *versus* Δe , en función de $R_H - G$ y distribución de los gradientes de presión de vapor (Δe) y de temperatura (ΔT) del aire registrada en la estación Bowen situada en la isla de la Pacanda.

vegetación hidrófita. El análisis del periodo julio 2006-junio 2007 refleja el estado actual de la repartición de la evaporación. En este sentido, la repartición de la evaporación a largo plazo puede cambiar en forma significativa debido a las alteraciones que está sufriendo la cuenca por el cambio acelerado del uso del suelo. El estudio enfatiza la metodología utilizada en este trabajo, las observaciones directas con el método BREB y el ETgage.

Los resultados exponen que los métodos deben adaptarse a condiciones particulares de cada sitio para reducir las diferencias por los límites de aplicación, independientemente de las condiciones locales de las zonas. Por otra parte, no obstante que el año de estudio corresponde a uno relativamente seco, en comparación con la media histórica de la precipitación, existe un excedente para la generación de escurrimientos superficiales e infiltración/drenaje profundo, y pone en evidencia la importancia del lago en la regulación del flujo evaporativo que demanda la atmósfera dentro de la cuenca y el papel que juega en la regulación del clima dentro de la misma.

La evaporación conjunta de la transpiración y la asociada con las pérdidas por interceptación oscila entre el 81 y el 88% de la precipitación, esto sin considerar la evaporación adicional y las pérdidas correspondientes a la vegetación herbácea y lechos vegetales, que en conjunto no son mayores al 7%, es decir, el agua disponible para los escurrimientos superficiales y la infiltración percolación es del 12-19% de la precipitación anual.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P., el financiamiento otorgado a este trabajo y al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) el apoyo concedido en la gestión e instalación de la instrumentación y operación de los sitios de observación.

Recibido: 22/10/08

Aprobado: 15/12/09

Referencias

- ABTEW, W. Evaporation estimation for lake Okeechobee in South Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 127, no. 3, 2001, pp. 140-147.
- ABTEW, W. Evapotranspiration measurements and modeling for tree wetland systems. *Water Resources Assoc.* Vol. 32 no. 3, 1996, pp. 465-47.
- ALLEN, G.R., PEREIRA, S.L., RAES, D. and SMITH, M. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998, 298 pp.
- BERRADA, A., HOOTEN, T., CARDON, G.E. and BRONER, I. *Assessment of irrigation water management and demonstration of irrigation scheduling tools in full service area of Dolores Project: 1996-2000. Part II Calibration of watermark soil moisture sensor and ETgage atmometer*. Agric. Exp. Stn. Tech. Rep. TR-01-8. Colorado State University. Technical Report. TR01-7, 2001.
- BOUWER, L.M., BIGGS, T.W. and AERTS, J.C.J.H. Estimates of spatial variation in evaporation using satellite-derived surface temperature and water balance model. *Hydrological Processes*. Vol. 22, 2008, pp. 660-678.
- BROWN, S.L. A comparison of the structure, primary production, and transpiration of cypress ecosystems in Florida. *Ecol. Monogram*. Vol. 51, no. 4, 1981, pp. 403-427.
- BRUTSAERT, W. *Evaporation into atmosphere: Theory, History and Applications*. Dordrecht, Holland/Boston, USDA: D. Reidel Pub. Co. 1982, 340 pp.
- BRUTSAERT, W. *Hydrology introduction*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991, 605 pp.
- CAMPBELL SCIENTIFIC. *Bowen Ratio Instrumentation, Manual Instruction*. Logan, Utah: Campbell Scientific, 1998, 23 pp.
- GUTIÉRREZ-LÓPEZ, A., PRECIADO, M., AGUILAR, E., MEJÍA, R., GÓMEZ, J. and SCALANTE, M. Effects of climatic variability in Lake Pátzcuaro. A historical review and hydrological modeling. *Proceedings of the International Conference Climate Change: a Challenge or a Threat for Water Management*, The Netherlands, 2004.
- HARBECK, G.E., KOHLER, M.A. and KOBERG, G.E. *Water loss investigations, Lake Mead studies*. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey Professional Paper 298 pp. ETgage Manual Catalog. No. 3170, 1958.
- HEILMAN, J.L., BRITTIN, C.L. and NEALE, C.M.U. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. *Agric. For. Meteorol.* Vol. 44, 1989, pp. 261-273.
- LABAJO, S.J.L., PIORNO, H.A. e IZQUIERDO, G.M.J. Un modelo de pronóstico de temperaturas de formación de nieblas de radiación. *Atmósfera*. Vol. 8, 1995, pp. 115-126.
- LAFRAGUA, J.C. y GUTIÉRREZ, A.L. *Balance hídrico en la cuenca del lago de Pátzcuaro*. Jiutepec, México:

- Subcoordinación de Hidrología y Mecánica de Ríos, IMTA TH-0413, 2005, 120 pp.
- MADEREY, L.E. y TORRES-RUATA, C. *Atlas Nacional de México*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México. D.F., 1990 [en línea] http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/atlas_con.html#medioambiente.
- MONTEITH, J.L. Evaporation from land surfaces: progress in analysis and predictions since 1948. *Proceeding of the national conference on advances in evaporations*. Chicago American Society, 1985, pp. 4-12.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Royal Society, London Proceedings, Ser. A*. Vol. 193, 1948, pp. 120-146.
- PÉREZ, P.J., CASTELLVI, F., IBÁÑEZ, M. and ROSELL, J.L. Assessment of reliability of Bowen ratio method for portioning fluxes. *Agricultural and Forest and Meteorology*. Vol. 97, 1999, pp. 141-150.
- PURYEAR, M.W.P. *Observations and modeling of evapotranspiration across North Carolina*. Thesis Master of Science. North Carolina State University, Marine, Earth and Atmospheric Sciences, 2005, 190 pp.
- ROSENBERRY, D.O., WINTER, T.C., BUSO, D.C. and LIKENS, G.E. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake northeastern USA. *Journal of Hydrology*. Vol. 340, 2007, pp. 149-166.
- SEGUIN, B. Etude compare des methods d'estimation d'ETP en climat méditerranéen du sud de la France. (Region d'Avignon). *Ann. Agron*. Vol. 26, 1975, pp. 675-691.
- SHARIF, H.O. and MILLER, N.L. Hydroclimatological Predictions Based on Basin's Humidity Index. *Combined preprints of the 86th American Meteorological Society Annual Meeting*. Atlanta, GA, 2006, 6 pp.
- STANNARD, D.I. A theoretical based determination of Bowen-ratio fetch requirements. *Boundary-Layer Meteorol*. Vol. 83, 1997, pp. 375-406.
- STANNARD, D.I. and WELTZ, M.A. Partitioning evapotranspiration in sparsely vegetated rangeland using a portable chamber. *Water Resources Research*. Vol. 42, no. 2, 2006, W02413.
- TURC, L. Le bilan d'eau des sols. Relation entre la precipitation, l'évaporation et écoulement. *Ann. Agron*. Vol. 5, 1954, pp. 491-569.
- XIAOFENG, G., HOGSHENG, Z., LING, K., JINLIN, D., WANBIAO, L. and YUANJING, Z. Quality control and flux gap filing strategy for Bowen ratio method: revisiting the Priestley-Taylor evaporation model. *Environ Fluid Mech*. Vol. 7, 2007, pp. 421-437.
- ZENG, N., SHUTTLEWORTH J.W. and GASH, J.H.C. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part I. Point analysis. *Journal of Hydrology*. Vol. 228, no. 3-4, 2000, pp. 228-241.
- ZHANG, L., DAWES, W.R. and WALKER, G.R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*. Vol. 37, no. 3, 2001, pp. 701-708.

Abstract

GONZÁLEZ-SOSA, E., MASTACHI-LOZA, C.A., RIVERA-VÁZQUEZ, J.B., GUTIÉRREZ-LÓPEZ, A., LAFRAGUA, J. & GUEVARA-ESCOBAR, A. *Evaporation in the Lake Patzcuaro watershed, Mexico. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. I, no. 3, July-September, 2010, pp. 51-69.*

Annual evaporation in the Lake Patzcuaro watershed was partitioned as follows: evapotranspiration of terrestrial vegetation, interception losses, lake evaporation and evapotranspiration of aquatic plants. Terrestrial evapotranspiration was estimated from the records of six stations and seven atmometers (ETgage). Lake evaporation was measured with the BREB method. The interception loss was calculated with lineal relations to different classes of vegetation, and evapotranspiration of aquatic vegetation with local measurements by open path chamber. The evapotranspiration of vegetation was 308 mm < ETR < 503 mm (± 60), lake evaporation 1 179 mm, aquatic evapotranspiration (ETH) 1 824 mm, and interception losses amounted to 102 mm < EI < 227 mm (± 51). Water balance by subwatershed showed a deficit of 12 mm in Ajuno and over 65% in the lake. In the rest of the subwatershed the water balance was positive for surface runoff and infiltration or deep percolation: 18 mm < (P-TE < 156 mm (± 53)). The results show the importance of vegetation and the lake in the distribution of evaporation.

Keywords: *evaporation, water balance, lake, BREB.*

Dirección institucional de los autores

Dr. Enrique González-Sosa

Profesor investigador
Universidad Autónoma del Estado de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Laboratorio de Hidráulica
CU Cerro de las Campanas s/n Centro
76010 Querétaro, Querétaro, México
teléfono: +52 (442) 1921 200, extensión 6074
fax: +52 (442) 1921 200, extensión 6023
egs@uaq.mx

M.C. Carlos Alberto Mastachi-Loza

Estudiante del doctorado en Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de Querétaro
Laboratorio de Hidráulica
CU Cerro de las Campanas s/n Centro
76010 Querétaro, Querétaro, México
Teléfono y fax: +52 (442) 1921 200
mastachii@hotmail.com

Ing. Bernardo Rivera-Vázquez

Estudiante de la maestría de Recursos Hídricos y Ambiental
Universidad Autónoma del Estado de Querétaro
Laboratorio de Hidráulica
CU Cerro de las Campanas s/n Centro
76010 Querétaro, Querétaro, México
Teléfono y fax: +52 (442) 1921 200, extensión 6025

Dr. Alfonso Gutiérrez-López

Profesor investigador
Universidad Autónoma de Querétaro
Centro de Investigaciones del Agua
CU Cerro de las Campanas s/n Centro
76010 Querétaro, Querétaro, México
teléfono: +52 (442) 1921 200, extensión 6074
alfonso.gutierrez@uaq.mx

Dra. Jaqueline Lafragua-Contreras

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación de Hidrología
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
teléfonos: +52 (777) 3293 684 y 3293 600, extensión 526
fax: +52 (777) 3293 684
jaquelin@tlaloc.imta.mx

Dr. Aurelio Guevara-Escobar

Profesor investigador
Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales
Campus Juriquilla
76230 Querétaro, Querétaro, México
teléfono: +52 (442) 1921 200, extensión 6025