

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Balance hídrico del lago de Chapala, México.
<i>Autor / Adscripción</i>	Javier Aparicio Alfredo Ocón Aldo I. Ramírez Álvaro A. Aldama Roberto Mejía-Zermeño Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 21(1): 5-16
<i>Fecha de publicación</i>	2006
<i>Resumen</i>	Se presenta un análisis del balance hídrico en el lago de Chapala. Dada la gran magnitud de su superficie libre, la evaporación es de gran importancia para su equilibrio hidrológico. Este componente se estima a partir del método combinado o de Penman alimentado por mediciones ad hoc de las variables climatológicas correspondientes, así como de datos históricos. Se encontró que los coeficientes de evaporímetro no son constantes a lo largo del año, y se determinaron los coeficientes apropiados para este caso particular. En este sentido, se descubrió que para ciertos meses del año, los coeficientes de evaporímetro exceden la unidad y se encontró una explicación física de este hecho, basada en la dominancia de la convección forzada en épocas de vientos intensos.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/810

Balance hídrico del lago de Chapala, México

Javier Aparicio
Alfredo Ocón
Aldo I. Ramírez
Álvaro A. Aldama
Roberto Mejía-Zermeño

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Se presenta un análisis del balance hídrico en el lago de Chapala. Dada la gran magnitud de su superficie libre, la evaporación es de gran importancia para su equilibrio hidrológico. Este componente se estima a partir del método combinado o de Penman alimentado por mediciones ad hoc de las variables climatológicas correspondientes, así como de datos históricos. Para este efecto, se usaron estaciones climatológicas automáticas del Servicio Meteorológico Nacional de México, así como otras estaciones instaladas ex profeso para este trabajo. Se encontró que los coeficientes de evaporímetro no son constantes a lo largo del año, y se determinaron los coeficientes apropiados para este caso particular. En este sentido, se descubrió que para ciertos meses del año, los coeficientes de evaporímetro exceden la unidad y se encontró una explicación física de este hecho, basada en la dominancia de la convección forzada en épocas de vientos intensos. Se concluyó que los cálculos convencionales de la evaporación subvalúan este componente.

Palabras clave: balance hídrico, Chapala, evaporación, coeficiente de evaporímetro, Penman.

Introducción

El lago de Chapala se ubica aproximadamente a 42 km al sur de Guadalajara, Jalisco, al occidente de la república mexicana, entre los 20° 06' y 20° 18' de latitud norte, y los 102° 25' y 103° 25' de longitud oeste, con una orientación este-oeste (ilustración 1). Este lago forma parte del sistema de drenaje de las cuencas de los ríos Lerma y Santiago, ya que constituye el sitio de descarga del primero, así como el de alimentación inicial del segundo. Es un lago poco profundo (con una profundidad máxima posible de 10 m), con una longitud aproximada de 70 km y un ancho de 20 km. A su nivel máximo ordinario de 1,523.80 m sobre el nivel medio del mar, equivalente a una cota arbitraria de 98.00 m (de acuerdo con la referencia de elevaciones empleada localmente en forma cotidiana), presenta un almacenamiento de 8,126.4 hm³, con un área expuesta del orden de 1,149 km². Este lago es el vaso interior de mayor tamaño en México, y en sus riberas se desarrolla una gran actividad urbana, industrial y agrícola. Además de tener un considerable valor económico, cultural y ecológico, el lago sirve como fuente de abastecimiento de agua potable a la ciudad de Guadalajara.

La cuenca del río Lerma es una de las más aprovechadas de México y existen diversos conflictos entre los usuarios por el agua. En consecuencia, el lago de Chapala está sujeto a grandes presiones derivadas de los aprovechamientos hídricos aguas arriba. Por ello es necesario contar con herramientas que permitan analizar con precisión los componentes del balance hídrico del lago, para que las decisiones tanto del Consejo de Cuenca como de las autoridades federales y estatales se tomen a partir de información apropiada. En este trabajo se presenta una metodología para estimar en forma práctica la evaporación en el lago, usando las fuentes de información habitualmente disponibles. Esta metodología puede aplicarse a otros cuerpos de agua similares.

En la ilustración 2 se muestra la evolución de los niveles en el lago de Chapala durante el periodo del 1° de marzo de 1934 al 19 de mayo de 2005. En sus momentos de máximos niveles en el siglo XX –en los años 1935 y 1967– el lago derramó, llegando a las cotas 99.21 y 99.00, respectivamente, que corresponden aproximadamente al nivel máximo extraordinario, con volúmenes de 9,686 y 9,279 hm³, respectivamente. En cuanto a los almacenamientos mínimos, en los registros oficiales el más bajo corresponde al 1° de julio de 1955,

Ilustración 1. Ubicación del lago de Chapala.

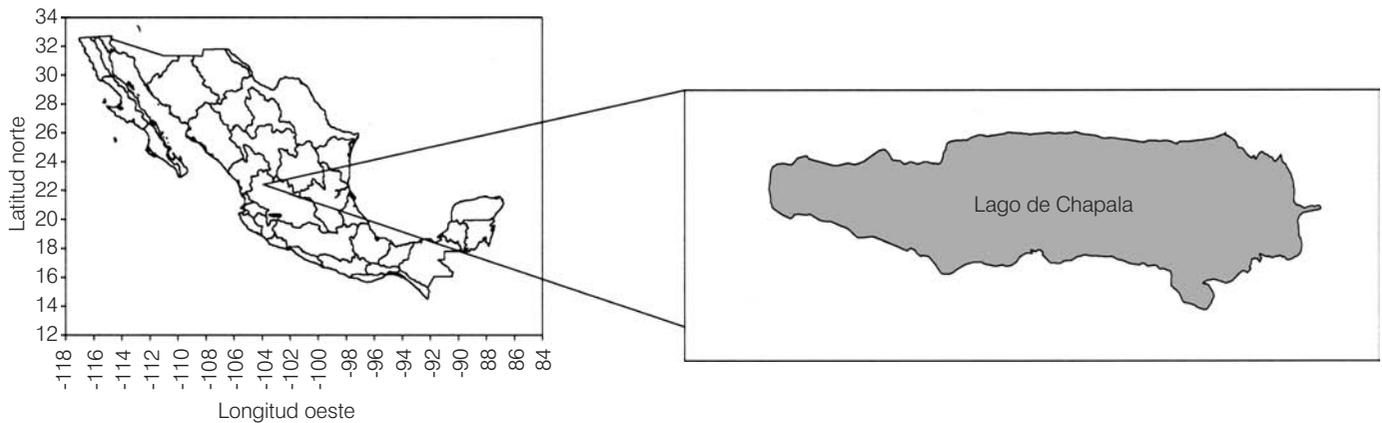
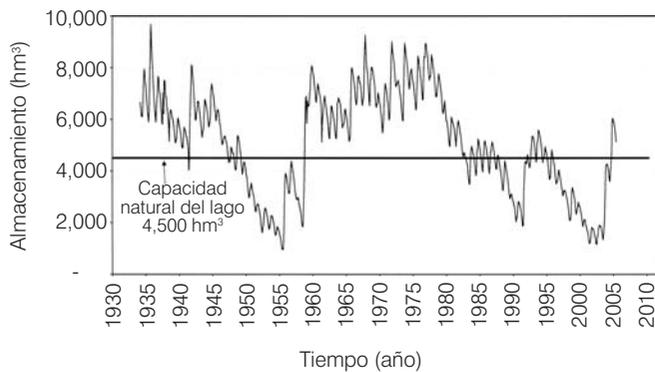


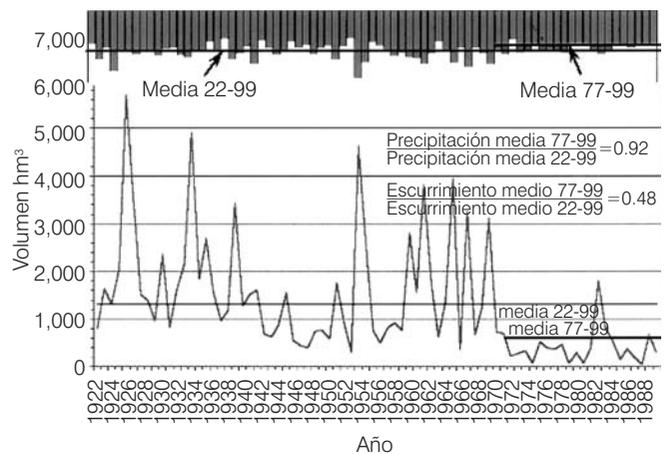
Ilustración 2. Evolución histórica de los niveles en el lago de Chapala. Fuente: CNA.



cuando –en la cota 90.85– albergaba 953.98 hm³. Le sigue el del 1º de julio de 2002, con 1145.16 hm³ a la cota 91.08.

Como se puede observar en la ilustración 2, los niveles en el lago tuvieron una considerable disminución durante las décadas de los ochenta y noventa del siglo pasado. Si bien la precipitación media durante esos años fue menor al promedio histórico, los volúmenes de ingreso al lago registraron una disminución proporcionalmente mayor (ilustración 3), por lo que los bajos almacenamientos en esa época no se explican exclusivamente por un periodo de sequía natural, sino que, al menos en parte, se deben a las presiones por el uso del agua mencionadas anteriormente. Por otra parte, los balances hidrológicos del lago que se hacen rutinariamente contienen un alto nivel de incertidumbre debido a que algunos de sus componentes no se cuantifican con suficiente detalle o precisión (Mejía *et al.*, 2000). Entre dichos compo-

Ilustración 3. Precipitación sobre toda la cuenca y volúmenes históricos de ingreso al lago de Chapala.

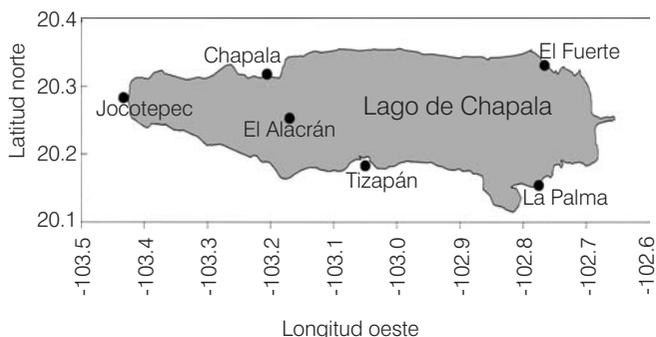


ponentes, la evaporación, que puede alcanzar más de 1,500 hm³ anuales en el lago de Chapala, es de los más importantes desde el punto de vista cuantitativo, en virtud de la gran extensión superficial del lago.

Información y mediciones *ad hoc*

La información hidrológica empleada en este trabajo se recolectó del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas) (IMTA, 1999), del Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC) (IMTA, 1998) y de otras fuentes de información oficial. No obstante, para tener la suficiente precisión en la estimación de ciertas variables, como la radiación solar y la velocidad del viento –fundamentales para la determinación de la evaporación–, se instalaron seis estaciones hidroclimatológicas automáti-

Ilustración 4. Estaciones hidroclimatológicas automáticas instaladas ad hoc en el lago de Chapala.



cas en los sitios de Chapala, Tizapán, Jocotepec, La Palma, isla del Alacrán y El Fuerte, la mitad de las cuales forman ahora parte de la red de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), en su tiempo llamadas estaciones hidroclimatológicas automáticas (EHCA) y tres de ellas pertenecen al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (ver ilustración 4).

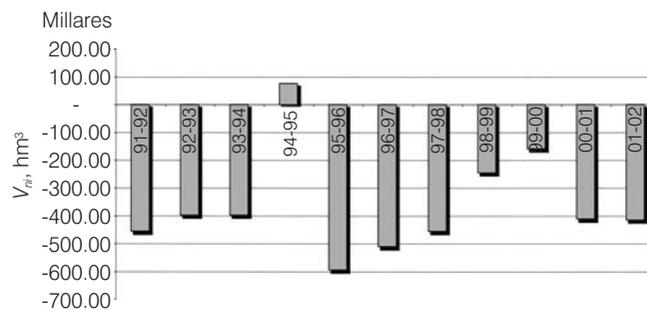
Balances hidrológicos en el lago de Chapala

La ecuación del balance hidrológico en un cuerpo de agua es una expresión del principio de conservación de masa y comprende tres componentes principales: las entradas, las salidas y la variación en el almacenamiento Δs (Campos, 1984):

$$\Delta s = P_d + E_{se} + F_{se} - E_{ss} - F_{ss} - E_t - E_d - E + V_{ni} \quad (1)$$

donde P_d es la precipitación directa sobre el lago; E_{se} es el escurrimiento superficial de entrada por afluentes y cuenca propia; F_{se} es el flujo subterráneo de entrada; E_{ss} es el escurrimiento superficial de salida; F_{ss} es el flujo subterráneo de salida; E_t es la evapotranspiración de plantas acuáticas sobre el lago; E_d es la extracción directa del lago; E es la evaporación, y $V_{ni} \equiv E_{ni} - S_{ni}$ representa el volumen neto no identificado, en el cual E_{ni} es el volumen de entrada no identificado y S_{ni} , el volumen de salida no identificado. Este término se incluye debido a que las incertidumbres implícitas en la estimación de los diversos componentes del balance impiden que éste cierre con exactitud. De hecho, V_{ni} se despeja de la ecuación (1) y se considera que el balance es aceptable cuando dicha cantidad no representa un porcentaje significativo del componente dominante en la ecuación de balance, que en el caso del lago de Chapala es la evaporación E .

Ilustración 5. Balances convencionales (Fuente: CNA, 2004).



Cuadro 1. Balances hidrológicos convencionales. Fuente: adaptado a partir de Comisión Nacional del Agua, 2004.

Ciclo	V_{ni} hm ³
91-92	-455,221
92-93	-395,460
93-94	-395,91
94-95	76,191
95-96	-591,721
96-97	-510,259
97-98	-453,972
98-99	-244,517
99-00	-159,195
00-01	-412,007
01-02	-412,836
Promedio	-359,537

Los balances hidrológicos que cotidianamente realiza la Gerencia Regional Lerma-Santiago-Pacífico de la Comisión Nacional del Agua (2004) producen los valores de V_{ni} mostrados en el cuadro 1 y en la ilustración 5, para el periodo 1991-2002. El valor medio de V_{ni} resulta ser -359.5 hm³, que representa más del 25% de la evaporación media en el periodo. No sólo es demasiado alto este porcentaje, lo cual indica que el nivel de incertidumbre en el balance es inaceptable, sino que la ilustración 5 muestra que consistentemente los valores de V_{ni} son negativos, lo cual sugiere que se incurre en un error sistemático en la sobreestimación de las entradas al lago o en la subestimación de las salidas.

A continuación se presenta una metodología para la estimación de la evaporación, empleando como caso de estudio el lago de Chapala.

Evaporación

Debido a la extensión en planta del lago de Chapala y a su poca profundidad, la precisión en la estimación de la evaporación es un factor de primera importancia para el

balance. Los balances hídricos que se habían realizado antes de este trabajo se basaron en las mediciones de un tanque evaporímetro tipo A ubicado en la estación Chapala (ver ilustración 4), a los cuales se aplicó un coeficiente general de corrección de 0.77, que se ubica en el rango habitual de 0.6 y 0.82 para estimar la evaporación en el lago (ver, por ejemplo, Aparicio, 1997, y Campos, 1984). Este coeficiente, que se suele aplicar para estimar la evaporación en forma gruesa, se ha determinado a partir de comparaciones con otros lagos (v. gr., Winter, 1981).

Una forma alternativa de estimar la evaporación es calcularla de manera residual, es decir, obtener todos los demás parámetros de la ecuación 1 y despejar de ésta la evaporación, suponiendo que el volumen no identificado es despreciable. Sin embargo, este procedimiento implica tener un control completo en las variables involucradas. De no ser el caso, se correría el riesgo de incluir en la estimación de la evaporación los errores cometidos en las demás variables. En general, es conveniente hacer este cálculo en la época de estiaje para disminuir en lo posible la influencia de la precipitación. Aquí se usará este procedimiento para verificar los resultados de los otros en condiciones controladas, como se explicará más adelante.

Por último, se puede usar algún método de cálculo de la evaporación basado en datos climatológicos. Existen básicamente dos tipos de métodos de esta naturaleza: el de balance de energía y el de transferencia de masa o aerodinámico. Por sí solo, cada uno de estos métodos tiene importantes limitaciones: el método de balance de energía supone que el transporte de vapor es continuo; es decir, que el viento continuamente renueva el vapor y no hay nunca saturación, y el aerodinámico supone que no hay limitación en el suministro de energía (radiación solar), cosa que por lo general no se cumple del todo en la práctica (Chow *et al.*, 1994; Sellers, 1965; Wilson, 1990; Shaw, 1994). El método de Penman, que se usará en este trabajo, combina los dos anteriores (Chow *et al.*, 1994) y por ello compensa algunas de sus limitaciones.

A continuación se describen en forma general los tres métodos mencionados con comentarios específicos para el lago de Chapala.

Método del balance de energía

Este método se basa en la ecuación de continuidad de la energía térmica (Campos, 1984; Winter, 1981). La forma general de la ecuación que define la tasa de evaporación calculada por medio del método del balance de energía es (Chow *et al.*, 1994):

$$E_b = \frac{R_n}{l_v \rho_w} \quad (2)$$

donde:

E_b = tasa de evaporación por unidad de tiempo.

R_n = radiación solar neta.

l_v = calor latente de vaporización.

ρ_w = densidad del agua.

La radiación neta puede calcularse como (Campos, 1984):

$$R_n = R_i(1-r) - R_e \quad (3)$$

donde:

R_i = radiación solar incidente sobre la superficie evaporante.

r = albedo.

R_e = radiación emitida.

Para el caso particular del lago de Chapala, la radiación solar incidente (R_i) se mide directamente en las estaciones del SMN y del IMTA. Las del SMN reportan el promedio de cada diez minutos y las del IMTA de cada hora. En ambos casos, para efectos de aplicación en la fórmula, se obtienen los promedios diarios, incluyendo los valores nulos; es decir, se calcula el valor promedio para 24 horas.

Con respecto al albedo, en la bibliografía respectiva (v. gr., Campos, 1984; Sellers, 1965; Wilson, 1990; Shaw, 1994; Chow *et al.*, 1994), se encuentran valores que van de 0.02 a 0.10. El valor seleccionado para Chapala fue de 0.06, debido a que, por un lado, es el valor más recomendado en la bibliografía arriba mencionada y, por otro, un análisis de sensibilidad en la aplicación de la fórmula, realizado para este trabajo, mostró que al usar este valor se produce la mínima diferencia ($\pm 5\%$) en la evaporación respecto de los resultados obtenidos considerando los valores extremos.

Para el cálculo de la radiación emitida se utiliza la ecuación de Brunt (Campos, 1984):

$$R_e = \sigma T_{abs}^4 \left(0.56 - 0.0924 \sqrt{e} \right) \left(0.10 + 0.90 \frac{n}{N} \right) \quad (4)$$

donde:

σ = $567 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, que es la constante de Stefan-Boltzmann.

T_{abs} = temperatura ambiente absoluta (K).

e = presión de vapor del aire (mm Hg).

$\frac{n}{N}$ = relación entre las horas de sol efectivas y las máximas probables.

La presión de vapor del aire se calcula en términos de la humedad relativa HR , medida en las estaciones climatológicas, y la presión de vapor de saturación e_s como:

$$e = HRe_s \quad (5)$$

Por otro lado, se tiene que la presión de vapor de saturación, en Pascales (Pa), se puede calcular como (Chow et al., 1994):

$$e_s = 611 \exp\left(\frac{17.27T}{237.3+T}\right) \quad (6)$$

donde: T = temperatura ($^{\circ}C$).

La relación $\frac{n}{N}$ se suele estimar con valores publicados, por ejemplo, en el *Atlas del agua de la república mexicana* (SRH, 1976); sin embargo, éstos sólo son valores medios de las lecturas diarias tomadas a las 14:00 horas y, por tanto, no son representativos de las 24 horas del día, como se requiere para el cálculo de la evaporación diaria. Por ello, aprovechando el hecho de que en este caso se cuenta con mediciones de la radiación incidente desde 1999, se usó la fórmula recomendada por Jáuregui (1978) para la república mexicana:

$$\frac{n}{N} = \frac{\left(\frac{R_i}{R_{at}}\right) - 0.290 \cos \phi}{0.55} \quad (7)$$

donde:

ϕ = latitud del lugar en grados.

R_{at} = radiación solar diaria al tope de la atmósfera.

R_{at} se estima con valores publicados en la literatura al respecto (v. gr. Campos, 1984) para la latitud correspondiente, $20^{\circ}N$ en este caso. En el cuadro 2 se presentan los valores correspondientes a la zona de estudio.

De esta manera, los valores de $\frac{n}{N}$ para el lago de Chapala, de acuerdo con las mediciones de la radiación incidente, según la fórmula (7), son los mostrados en el cuadro 3.

El valor medio consignado en el cuadro 3 se calculó utilizando polígonos de Thiessen para determinar el área de influencia de cada estación sobre la superficie libre del lago.

Cuadro 2. Radiación al tope de la atmósfera, lago de Chapala.

Mes	R_{at} (W/m ²)
Enero	304.92
Febrero	353.32
Marzo	407.04
Abril	432.67
Mayo	449.64
Junio	452.54
Julio	450.12
Agosto	435.60
Septiembre	402.20
Octubre	367.84
Noviembre	317.50
Diciembre	292.82

Cuadro 3. Relación de nubosidad para el lago de Chapala.*

Mes	Relación $\frac{n}{N}$						
	Chapala	Jocotepec	Tizapán	La Palma	El Fuerte	El Alacrán	Valor medio
Enero	0.709	0.842	0.836	0.749	0.803	0.830	0.801
Febrero	0.674	0.785	0.747	0.731	0.757	0.775	0.747
Marzo	0.753	0.758	0.760	0.762	0.739	0.768	0.756
Abril	0.753	0.763	0.810	0.828	0.784	0.804	0.796
Mayo	0.667	0.578	0.595	0.622	0.596	0.610	0.609
Junio	0.558	0.490	0.487	0.486	0.422	0.486	0.481
Julio	0.554	0.596	0.560	0.573	0.539	0.567	0.560
Agosto	0.571	0.562	0.539	0.557	0.565	0.608	0.566
Septiembre	0.652	0.634	0.669	0.580	0.599	0.637	0.630
Octubre	0.673	0.716	0.709	**	0.682	0.718	0.694
Noviembre	0.683	0.834	0.818	0.700	0.803	0.807	0.781
Diciembre	0.698	0.776	0.760	0.714	0.746	0.754	0.743

* 1999-2000.

** Dato no disponible por pérdida de la información de la estación climatológica debido a una falla en el suministro de energía.

El calor latente de vaporización se obtiene de (Chow *et al.*, 1994):

$$l_v = 2.501 \times 10^6 - 2370T \quad (8)$$

La densidad del agua ρ_w se estimó usando valores publicados en la literatura (v. gr., Streeter y Wylie, 1975).

Método aerodinámico

Esta formulación toma en cuenta la capacidad de transporte de vapor de agua lejos de la superficie evaporante. Las fórmulas para su cálculo se obtuvieron de Chow *et al.*, 1994, aunque pueden encontrarse fórmulas similares en otras publicaciones:

$$E_a = B(e_s - e) \quad (9)$$

donde:

E_a = tasa de evaporación por el método aerodinámico (m/s).

B = coeficiente de transferencia de vapor (m/Pa·s).

e_s = presión de vapor de saturación en Pa, calculada con la ecuación (6).

e = presión de vapor en Pa, calculada con la ecuación (5), donde a su vez:

$$B = \frac{0.622 \kappa^2 \rho_a U_2}{P \rho_w \left[\ln \left(\frac{z_2}{z_0} \right) \right]^2} \quad (10)$$

κ = 0.40 que es la constante de von Kármán.

P = presión atmosférica en Pa, medida en las estaciones climatológicas.

ρ_a = densidad del aire en kg/m³, que se calcula como:

$$\rho_a = \frac{P}{R_a T_{abs}} \quad (11)$$

U_2 = velocidad del viento medida a dos metros de la superficie, m/s.

z_2 = 2.0 m, que es la altura a la que se mide la velocidad del viento.

z_0 = rugosidad superficial del agua, m.

R_a = relación entre las constantes de gas para aire húmedo y aire seco, J/kg·K:

$$R_a = 287(1 + 0.608q_v) \quad (12)$$

q_v = humedad específica, definida como:

$$q_v = 0.622 \frac{e}{P} \quad (13)$$

Como la velocidad del viento no se mide precisamente a dos metros sobre la superficie del agua, se aplica la corrección de la magnitud haciendo uso de la fórmula de perfil logarítmico (Streeter y Wylie, 1975):

$$\frac{U_m}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z_m}{z_0} \right) \quad (14)$$

Entonces, si se conoce la altura (z_m) a la que se midió la velocidad del viento (U_m), se puede despejar la velocidad al cortante U_* :

$$U_* = \frac{U_m \kappa}{\ln \left(\frac{z_m}{z_0} \right)} \quad (15)$$

Con este valor se procede a obtener la velocidad U_2 :

$$U_2 = \frac{U_*}{\kappa} \ln \left(\frac{2}{z_0} \right) \quad (16)$$

La altura de rugosidad del agua varía, según Chow *et al.* (1994), de 0.0001 m a 0.0006 m. En este caso se tomó el valor máximo, considerando que el movimiento del agua en un cuerpo de las dimensiones del lago de Chapala provoca altas rugosidades.

Método combinado o de Penman

Este método combina los valores de la evaporación calculados según las ecuaciones (2) y (9) en la forma (Chow *et al.*, 1994):

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_b + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (17)$$

donde:

E = tasa de evaporación por el método combinado en mm/día.

Δ = gradiente de la curva de presión de vapor de saturación en Pa/°C, que se estima como (Chow *et al.*, 1994).

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(237.3 + T)^2} \quad (18)$$

γ = constante psicrométrica en Pa/°C (Chow *et al.*, 1994):

$$\gamma = \frac{C_p P}{0.622 l_v} \quad (19)$$

C_p = 1005 J/kg·K es el calor específico del aire, el cual se refiere al coeficiente de proporcionalidad entre el

cambio de temperatura y la energía interna o calor sensible (Chow et al., 1994).

Resultados del cálculo de la evaporación en el lago por el método combinado

En el cuadro 4 se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del método combinado, utilizando para ello las mediciones reportadas por las estaciones del SMN y del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Coefficiente del evaporímetro

Con la información generada y considerando que la estación Chapala es la que se ha usado en los últimos años para la estimación de la evaporación en el lago por su facilidad de acceso y adecuado mantenimiento, se consideró conveniente seguir utilizando el evaporímetro de esta estación, pero definiendo un coeficiente ponderado con base en las mediciones de las demás estaciones hidroclimatológicas automáticas (EHCA). Además, se obtuvieron los coeficientes simples de evaporación para las estaciones que cuentan con tanque y estaciones hidroclimatológicas automáticas.

Para la obtención de este coeficiente, se hace uso de la evaporación medida directamente en los tanques evaporímetros de las estaciones convencionales ubica-

das en los mismos lugares que las automáticas, de la siguiente manera:

$$C_e = \frac{\text{Evaporación calculada}}{\text{Evaporación medida}} = \frac{E_c}{E_m} \quad (20)$$

donde E_c se calcula según la ecuación (17).

A continuación se presentan los datos de evaporación medida en los evaporímetros ubicados en las cercanías del lago. Para el cálculo de la evaporación media se utilizó el método de los polígonos de Thiessen

Con los datos de la evaporación calculada (cuadro 4) y medida (cuadro 5), y haciendo uso de la fórmula (20), se pueden calcular los coeficientes de evaporímetro que se muestran en el cuadro 6 y en la ilustración 6. Nótese que los coeficientes de evaporímetro no son constantes en el tiempo. Además, es conveniente resaltar que dichos coeficientes pueden adoptar valores notablemente diferentes a los publicados en la literatura, incluso mayores que la unidad.

En el cuadro 7 se presentan los coeficientes que deben ser aplicados a las mediciones del evaporímetro realizadas en la estación Chapala para calcular la evaporación de todo el lago. Se obtuvieron con base en los resultados del valor medio de la evaporación calculada para todo el lago (cuadro 4) y la medida en la propia estación Chapala. Este proceso puede hacerse de ma-

Cuadro 4. Evaporación calculada con el método combinado, mm/día.

Mes	Chapala	Jocotepec	Tizapán	Alacrán	La Palma	El Fuerte	Valor medio
Abr-99	6.072	*	*	*	*	*	6.072
May-99	6.581	*	*	*	*	*	6.581
Jun-99	6.059	*	*	*	*	*	6.059
Jul-99	5.286	*	*	*	*	*	5.286
Ago-99	5.414	5.037	5.177	5.303	4.810	5.010	5.128
Sep-99	5.048	5.026	5.234	4.835	4.565	4.604	4.885
Oct-99	4.475	4.483	4.721	4.308	**	4.076	4.339
Nov-99	3.368	3.517	3.933	3.235	2.968	3.212	3.405
Dic-99	2.861	2.812	3.272	2.601	2.594	2.542	2.803
Ene-00	3.163	3.333	3.730	2.967	2.703	2.785	3.132
Feb-00	4.057	4.364	4.545	3.774	3.632	3.663	4.001
Mar-00	5.288	5.514	5.796	4.706	4.771	4.683	5.115
Abr-00	6.111	6.306	6.790	5.475	5.596	5.623	5.994
May-00	5.945	6.057	6.420	5.315	5.523	5.562	5.808
Jun-00	5.246	5.103	5.369	5.074	5.015	4.661	5.072
Jul-00	5.523	5.518	5.525	5.342	5.280	5.006	5.340
Ago-00	5.032	5.091	5.200	5.165	5.088	4.796	5.061
Sep-00	***	***	***	4.936	4.622	4.601	4.789

* Datos no disponibles, porque las estaciones climatológicas se instalaron a finales de julio de 1999, excepto Chapala que se instaló a principios de abril del mismo año.

** Dato no disponible. Se perdió la información de la estación climatológica por una falla en el suministro de energía.

*** Datos no proporcionados por el SMN.

Cuadro 5. Evaporación medida en los evaporímetros, mm/día.

Mes	Chapala	Tizapán	La Palma	El Fuerte	Valor medio
Abr-99	7.107	9.842	7.697	7.744	8.269
May-99	7.070	10.546	8.837	8.000	8.678
Jun-99	5.584	8.007	7.469	6.850	6.875
Jul-99	4.249	6.099	4.959	4.716	5.075
Ago-99	4.292	7.810	5.305	4.522	5.721
Sep-99	4.304	7.296	4.696	3.863	5.366
Oct-99	5.147	5.969	4.489	3.370	5.091
Nov-99	4.374	5.423	4.278	3.767	4.649
Dic-99	3.732	4.753	4.183	4.176	4.224
Ene-00	4.279	5.502	4.946	4.011	4.755
Feb-00	5.173	6.132	5.312	4.117	5.369
Mar-00	6.812	9.225	7.509	****	7.981
Abr-00	7.832	11.050	9.462	6.000	8.891
May-00	7.033	11.100	8.450	6.943	8.655

**** Dato no disponible.

Cuadro 6. Coeficientes mensuales de los evaporímetros.

Mes	Chapala	Tizapán	La Palma	El Fuerte
Abr-99	0.854	∞	∞	∞
May-99	0.931	∞	∞	∞
Jun-99	1.085	∞	∞	∞
Jul-99	1.244	∞	∞	∞
Ago-99	1.261	0.663	0.907	1.108
Sep-99	1.173	0.717	0.972	1.192
Oct-99	0.869	0.791	∞	1.209
Nov-99	0.770	0.725	0.694	0.853
Dic-99	0.767	0.688	0.620	0.609
Ene-00	0.739	0.678	0.547	0.694
Feb-00	0.784	0.741	0.684	0.890
Mar-00	0.776	0.628	0.635	∞
Abr-00	0.780	0.614	0.591	0.937
May-00	0.845	0.578	0.654	0.801

∞ No se puede calcular por falta de uno de los datos.

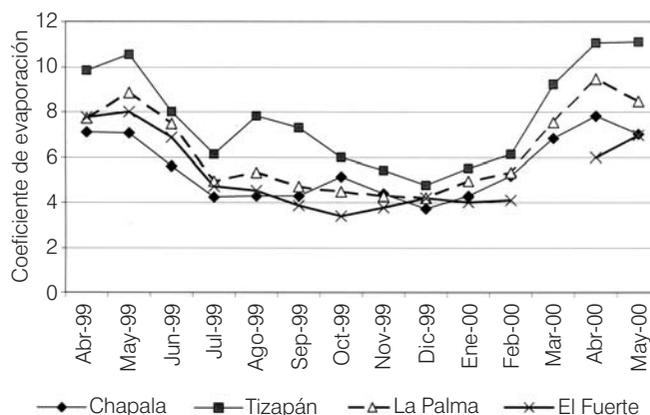
nera continua dependiendo de la recopilación de datos y hacer un seguimiento de las variaciones de este coeficiente para Chapala u otra estación, o una combinación de estaciones que se seleccione.

Los valores del cuadro 7 son los que se pueden usar para el cálculo de los balances hidrológicos.

Cálculo residual de la evaporación

Con el objeto de verificar los valores de los coeficientes de evaporímetro estimados en el cuadro 7, se hizo el

Ilustración 6. Variación del coeficiente de evaporímetro en el tiempo.



cálculo de la evaporación de manera residual, esto es, mediante los balances o funcionamientos mensuales del lago, considerando exclusivamente los registros donde no hay lluvia. Con esto, la única incógnita es la evaporación y el resto de los componentes del balance son conocidos, nulos o tienen un efecto mínimo en la evaporación. El periodo analizado fue de enero de 1990 a abril de 2000. En la ilustración 7 se presenta una comparación entre los valores calculados con los coeficientes de evaporímetro presentados en el cuadro 7 y los obtenidos de manera residual. Como puede observarse, existe una correspondencia muy satisfactoria, con lo que se considera que los valores de los coeficientes de evaporímetro contenidos en el cuadro 7 son confiables para la estimación de la evaporación en el lago.

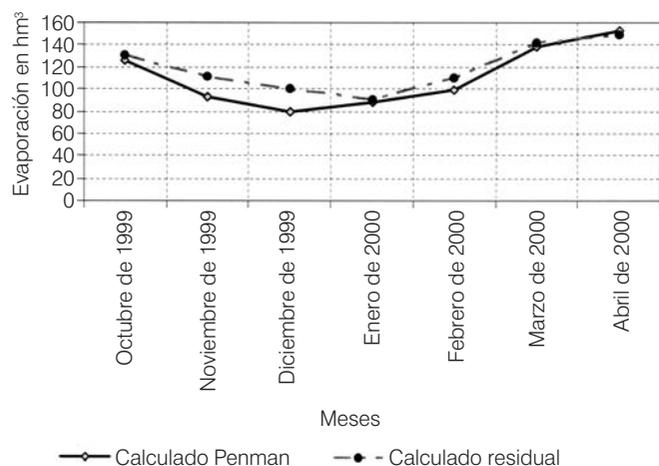
Relación entre la velocidad del viento y el coeficiente de evaporación

Como puede observarse en el cuadro 7, los coeficientes de evaporímetro correspondientes a los meses de junio a septiembre superan la unidad. Aunque no es común, se han reportado resultados de esta naturaleza en la literatura. Hounam (1973), por ejemplo, reporta valores anuales de coeficientes de evaporímetro clase A desde 0.52 hasta 0.86; pero, en intervalos mensuales, dichos valores pueden ir, según este autor, desde 0.35 hasta 1.32 para el lago Hefner en Estados Unidos, y desde 0.48 hasta 2.04 en el lago Eucumbene en Australia. Asimismo, Winter (1981) indica que es incorrecto usar en forma mensual el valor de 0.7 como coeficiente anual del evaporímetro, lo cual es común, pues el coeficiente puede diferir de 0.7 en más del 100%. Una explicación física de estos valores es la siguiente: la evaporación en

Cuadro 7. Coeficientes mensuales de evaporímetro en la estación Chapala para obtener la evaporación en todo el lago.

Mes	Coefficiente
Enero	0.732
Febrero	0.773
Marzo	0.751
Abril	0.810
Mayo	0.878
Junio	1.127
Julio	1.158
Agosto	1.189
Septiembre	1.135
Octubre	0.843
Noviembre	0.778
Diciembre	0.751
Medio	0.911

Ilustración 7. Comparación de los volúmenes evaporados entre el método de Penman y el residual.



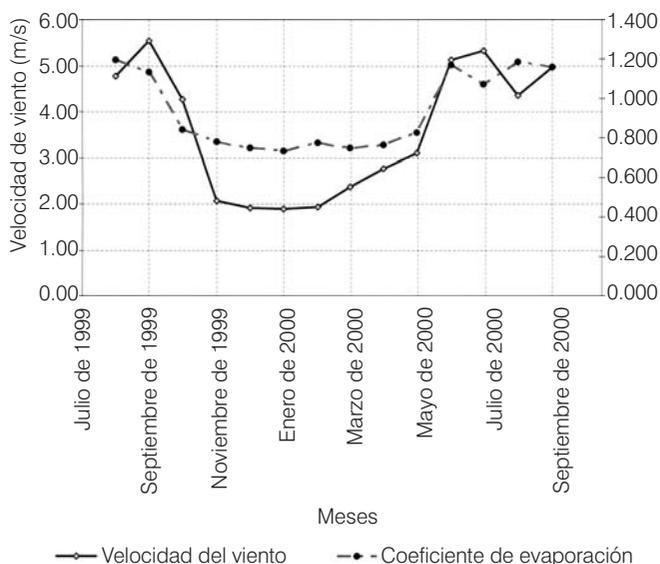
un cuerpo de agua ocurre debido a dos mecanismos principales: la convección libre y la convección forzada. La convección libre se origina por la diferencia de temperaturas entre el agua y el aire. Así, cuando el agua está más caliente que el aire, calienta las capas inferiores de éste, produciendo un movimiento ascendente que arrastra moléculas de agua en estado gaseoso. El método de balance de energía antes presentado supone que el fenómeno de evaporación está dominado por convección libre. Por otra parte, la convección forzada ocurre cuando el viento sopla sobre la superficie libre, ejerciendo un esfuerzo cortante sobre la misma, produciendo condiciones de intensa turbulencia e incluso rompimiento de oleaje, que hace más eficiente el proceso de hacer disponibles las moléculas de agua en estado gaseoso o en la forma de aerosoles, para ser

arrastradas por corrientes ascendentes. El método aerodinámico previamente expuesto supone que el fenómeno de evaporación está dominado por convección forzada.

Un tanque evaporímetro, por sus dimensiones, se calienta mucho más rápidamente y en mayor intensidad que un cuerpo de agua natural. Por lo mismo, es de esperarse que cuando el fenómeno de evaporación esté dominado por convección libre, las mediciones del evaporímetro tenderán a sobrestimar la evaporación real y, por lo mismo, deberá usarse un coeficiente de evaporímetro menor a la unidad. Esto es lo que ocurre en el lago de Chapala durante los meses de enero a mayo, y de octubre a diciembre, que corresponden a los meses de estiaje, cuando el viento sopla con velocidades bajas o está en calma. En contraste, cuando el fenómeno de evaporación esté dominado por convección forzada, en vista de que el tanque evaporímetro se localiza en una estación protegida en cierto grado de la acción del viento, las velocidades que éste alcanzará ahí serán menores que en el lago, donde el *fetch* es considerable. Por tanto, la evaporación medida en el evaporímetro tenderá a subestimar la real y, consecuentemente, deberá usarse un coeficiente de evaporímetro mayor a la unidad. Los meses de junio a septiembre corresponden a la época de lluvias en el lago de Chapala, cuando se presentan los vientos más fuertes.

Es pertinente señalar que existe una altísima correlación entre los valores de los coeficientes de evaporímetro y las velocidades del viento sobre el lago, como

Ilustración 8. Relación entre la velocidad del viento y el coeficiente de evaporación.



Cuadro 8. Comparación de balances.

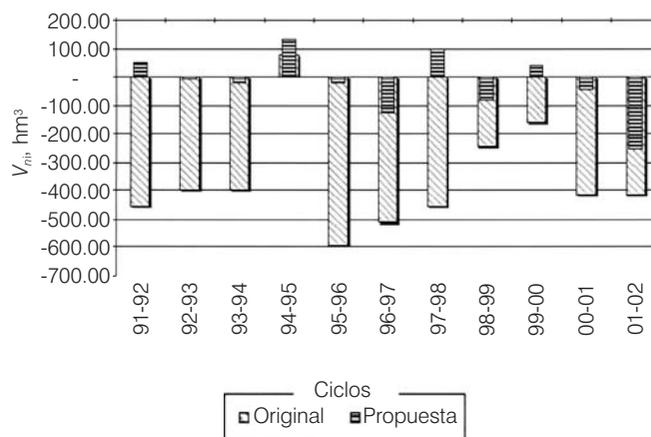
Balance hidrológico en el lago de Chapala (mayo de 1997-abril de 1998) Volúmenes en hm ³		
	Convencional	Propuesto
Variación del almacenamiento	- 949	- 949
Entradas		
Ríos	186	180
Lluvia	711	722
Cuenca propia	325	232
Total	1,222	1,134
Salidas		
Ríos	80	80
Extracciones por riego y agua potable	254	249
Evaporación	1,394	1,613
Total	1,728	1,942
Volumen no controlado	- 444	-141

se observa en la ilustración 8 (con un coeficiente de correlación de 0.91), por lo que se considera que la explicación ofrecida en el párrafo anterior es plausible. Esto brinda confianza adicional para el uso de los coeficientes reportados en el cuadro 7.

Balance hidrológico

Con los elementos descritos anteriormente se realizó el balance hídrico. Los detalles para el cálculo de los demás componentes se publicarán en otro artículo. En el cuadro 8 se presenta la comparación entre el balance de mayo de 1997 a abril de 1998 realizado en este trabajo y el convencional. Asimismo, en la ilustración 9 se presenta una comparación de volúmenes no identificados. Se observa una considerable mejoría en el cálculo, pues los volúmenes no identificados se reducen en un 75% y ya no son sistemáticamente negativos. Esto demuestra que la incertidumbre en el balance ha sido reducida significativamente por medio del método propuesto en este artículo para estimar la evaporación. En el caso del balance presentado en el cuadro 8, la mayor parte de la reducción del volumen no identificado se asocia con un incremento en la evaporación estimada. En general, se obtuvieron resultados similares en los demás periodos analizados, cuyos resultados se presentan en la ilustración 9. Por lo anterior, se estima que la evaporación había sido subestimada en un 16%, aproximadamente. Al ser éste el componente dominante del balance z del

Ilustración 9. Comparación de entradas netas no medidas.



lago de Chapala, aun variaciones moderadas en su estimación tienen un impacto considerable en la confiabilidad del balance. La subestimación en la evaporación del lago de Chapala tiene consecuencias muy importantes en el manejo del agua en la cuenca, pues puede conducir a decisiones inapropiadas en materia de transferencia de agua de las presas, en la información pública y en la solución de conflictos entre usuarios, entre otras.

Conclusiones y recomendaciones

Se realizó un análisis de la evaporación en el lago de Chapala sin precedentes en cuanto a su precisión, en la historia escrita del mismo. Dicha evaporación es apreciablemente mayor (en aproximadamente 16%) a la que se calcula con los métodos convencionales. Además, los coeficientes de evaporímetro no son constantes, sino que varían en el tiempo y en el espacio, por lo que se recomienda corregirlos y aplicarlos en forma mensual y no como un valor anual constante como se suele hacer en los métodos convencionales. Por facilidad operativa y para continuar con la práctica habitual de usar la estación Chapala como única referencia para el cálculo de la evaporación, se recomendaron coeficientes mensuales de evaporímetro representativos de todo el lago con base en las mediciones en dicha estación.

La metodología desarrollada en este trabajo y que fue aplicada al lago de Chapala puede reproducirse en otros cuerpos de agua.

Recibido: 31/05/2005
Aprobado: 31/08/2005

Referencias

- APARICIO, M. J. *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa, 1997.
- CAMPOS D. F. *Procesos del ciclo hidrológico, Volumen I*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 1984.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, comunicación personal, 2004.
- CRESSMAN, G. An operational objective analysis system. *Monthly Weather Review* Vol. 87, 1959, pp. 367-374.
- CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R. y MAYS L. W. *Hidrología aplicada*. Santa Fe de Bogotá: Mc Graw Hill, 1994.
- HOUNAM, C.E., *Comparison between pan and lake evaporation*. Technical note 126, World Meteorological Organization, 1973, 52 pp.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. Colección de discos compactos, México, 1999.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. *Extractor rápido de información climatológica (ERIC II)*. Disco compacto, México, 1998.
- JÁUREGUI O. E. Una primera estimación de la distribución de la radiación global y neta en México, *Revista Recursos Hidráulicos*. 1978.
- MEJÍA, R., OCÓN, A., AGUILAR, E., LOBATO, R., RAMÍREZ, H., ESCALANTE, M., GUTIÉRREZ, C., GONZÁLEZ, L. y CASTILLO, L. Análisis de los componentes del balance hidrológico en el lago de Chapala. Informe final, IMTA, 2000.
- SELLERS, W. D. *Physical climatology*. Chicago: The University of Chicago Press, 1965.
- SHAW E. M. *Hydrology in practice*, Chapman & Hall, Great Britain, 1994.
- SECRETARÍA DE RECURSOS HIDRÁULICOS (SRH), *Atlas del agua de la República Mexicana*, México, 1976.
- STREETER, V. L., WYLIE, E. B. *Fluid mechanics*. Sexta edición. Tokyo: Mc Graw Hill, Kogakusha, 1975.
- WILSON, E. M. *Engineering hydrology*. Hong Kong: Macmillan Education LTD, 1990.
- WINTER, T. C. Uncertainties in estimating the water balance of lakes, *Water Resources Bulletin*, American Water Resources Association, 1981.

Abstract

APARICIO, J., OCÓN, A., RAMÍREZ, A., ALDAMA, A. & MEJÍA-ZERMEÑO, R. Hydric balance the lake of Chapala, Mexico. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXI, no. 1, January-March, 2006, pp. 5-16.

An analysis of the hydric balance of Chapala Lake is presented. Given the large extension of its free surface, evaporation is of great importance for the balance. This component is estimated from the combined or Penman method fed by ad hoc measurements of the corresponding climatological variables, as well as historical data. To this effect, climatological automatic stations operated by the Mexican National Meteorological Service were used, as well as other stations installed purposely for this work. It was found that the evaporation pan coefficients are not constant during the year, and the appropriate co-efficients for this particular case were determined. In this sense, it was discovered that for some months of the year such coefficients exceed the unity and a physical explication for this fact was found, based on the forced convection dominance during intense winds. It was concluded that conventional calculations of evaporation under-evaluate this component.

Keywords: hydric balance, Chapala, evaporation, evaporation pan coefficient, Penman.

Dirección institucional de los autores:

Javier Aparicio
Alfredo Ocón
Aldo I. Ramírez
Alvaro A. Aldama
Roberto Mejía-Zermeño

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA),
Paseo Cuauhnáhuac 8532,
62550 Jiutepec, Morelos, México,
teléfono: +(52) (777) 329 3600, extensión 551,
japaricio@tlaloc.imta.mx