

BALANCE DE CALOR E INTERACCIÓN AGUA-NUTRIENTES-CADENA ALIMENTICIA EN EL LAGO DE ZAPOTLÁN, MÉXICO

HEAT BALANCE AND WATER-NUTRIENT FOOD CHAIN INTERACTIONS IN LAKE ZAPOTLÁN, MÉXICO

Mario A. Ortiz-Jiménez¹ y José de Anda²

¹Instituto Tecnológico de Tepic. Avenida Tecnológico 2595. 63175. Tepic, Nayarit. México (ojimez@nayar.uan.mx). ²Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C. Normalistas 800. 44270. Guadalajara, Jalisco, México.

RESUMEN

Se presenta un balance de calor del Lago de Zapotlán que fue resuelto numéricamente mediante el método de Runge-Kutta de cuarto orden con un incremento de tiempo de un día. A semejanza de otros lagos tropicales, el presupuesto anual de calor es muy bajo. La temperatura del lago (correlacionada con la radiación atmosférica y la radiación de fondo), la acción del viento (correlacionada con la radiación solar), y los escurrimientos (correlacionados con la radiación atmosférica, la radiación de fondo, la precipitación sobre el lago y la temperatura del lago), producen el mezclado del lago durante las estaciones de invierno, primavera y verano. Pero en el inicio del otoño, al disminuir el flujo neto de calor superficial y terminar las lluvias, el hipolimnión se enfría levemente debido a que esta capa es ocupada por escurrimientos más fríos y más densos. Esta pequeña diferencia térmica provoca que la columna de agua se estratifique de manera inestable. Los episodios alternados de mezclado y estratificado afectan significativamente el ciclo de nutrientes y la dinámica de la cadena alimenticia del lago.

Palabras clave: Estratificación, método de Runge-Kutta de cuarto orden, mezclado, radiación atmosférica, radiación de fondo.

INTRODUCCIÓN

El modelamiento matemático del transporte y destino del calor de un cuerpo de agua permite determinar o predecir la influencia de diversos factores sobre el régimen hidráulico, la calidad de agua y la biota de un lago bajo diferentes escenarios, como el cambio estacional de temperatura o el cambio climático global (Alcamo y Henrichs, 2002). Por tanto, el objetivo del presente trabajo fue desarrollar un balance de calor del Lago de Zapotlán, en México, a partir de los datos meteorológicos de la cuenca, y determinar su relación con el balance hidrológico y la interacción con la concentración de nutrientes y la concentración de algas, zooplancton herbívoro y zooplancton carnívoro del lago. La temperatura calculada

ABSTRACT

This paper presents a heat balance for Lake Zapotlán, which was solved numerically using the fourth-order Runge-Kutta method with a step size of one day. Like other tropical lakes, the annual heat budget of Lake Zapotlán is very low. Lake temperature (correlated with both atmospheric longwave radiation and water back radiation), wind strength (correlated with solar shortwave radiation, and runoffs (correlated with atmospheric longwave radiation, water back radiation, precipitation on lake and lake temperature) produce lake mixing during three seasons: winter, spring and summer. When fall begins, as the net surface heat flux diminishes and rainfall ends, the epilimnion is slightly cooled since this layer receives colder, denser runoff. This small difference in temperature causes the water column to stratify in an unstable manner. The alternating episodes of mixing and stratification significantly affect the nutrient cycle and the dynamics of the food chain.

Key words: Stratification, fourth-order Runge-Kutta method, mixing, atmospheric radiation, water back radiation.

INTRODUCTION

Mathematical modeling of heat transport and fate in a waterbody enables the determination or prediction of the influence of diverse factors on the hydraulic regime, water quality and biota of a lake under different scenarios, such as seasonal temperature change or global climate change (Alcamo and Henrichs, 2002). Therefore, the objective of this work was to develop a heat balance of the Zapotlán Lake, in México, using meteorological data of the basin and to determine its relationship with water balance and its interaction with nutrient and algae concentration, herbivorous zooplankton, and carnivorous zooplankton relationships in the lake. The calculated temperature for heat balance was introduced in a model of nutrients-food chain of the lake (Ortiz-Jiménez *et al.*, 2006). Finally, the results of the model were used to develop a lake nutrient balance (Ortiz-Jiménez, 2006)^[3]. The hypothesis was

Recibido: Febrero, 2005. Aprobado: Diciembre, 2006.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 41: 447-458. 2007.

por el balance de calor se introdujo en un modelo de nutrientes-cadena alimenticia del lago (Ortiz-Jiménez *et al.*, 2006). Finalmente, los resultados del modelo se usaron para desarrollar un balance de nutrientes del lago (Ortiz-Jiménez, 2006)³. La hipótesis fue: el balance hidrológico y la interacción nutrientes-cadena alimenticia son sensibles a las variaciones del balance de calor del lago.

La cuenca endorreica del Lago de Zapotlán se localiza en la región sur del Estado de Jalisco, México, entre 19° 34' y 19° 53' N y entre 103° 24' y 103° 38' O (Figura 1). El lago se ubica en los municipios de Zapotlán el Grande y Gómez Farías, cuya población conjunta es cercana a 100 000 habitantes (INEGI, 2001). Se calcula que el lago tiene una superficie de 1300 ha, una profundidad media de 1.5 a 1.7 m, un volumen de 20 Mm³ (UDG, 2002), una superficie máxima de 1340 ha y un volumen máximo de 26.88 Mm³ (CEASJ, 2003). Guzmán *et al.* (2000) reportan, para nueve estaciones de monitoreo del lago, una profundidad media de 1.9 m y una variación de 1 a 3.1 m. En el Cuadro 1 se muestran las características morfométricas del lago obtenidas mediante una simulación hidrológica de la cuenca para el periodo 1982-2003 (Ortiz-Jiménez *et al.*, 2005). Para los cálculos se utilizaron: i) un levantamiento topobatemétrico del lago efectuado por el CEASJ

that the water balance and the interaction nutrients-food chain are sensitive to the variations in the lake heat balance.

The endorreic basin of Lake Zapotlán is located in the southern region of the State of Jalisco, México, between 19° 34' and 19° 53' N and between 103° 24' and 103° 39' W (Figure 1). The lake is in the municipalities of Zapotlán el Grande and Gómez Farías, whose populations add up to around 100 000 (INEGI, 2001). It is calculated that the lake covers an area of 1 300 ha and has a mean depth of 1.5 to 1.7 m and a volume of 20 Mm³ (UDG, 2002), a maximum surface area of 1340 ha and a maximum volume of 26.88 Mm³ (CEASJ, 2003). Guzmán *et al.* (2000) report a mean depth of 1.9 m and a variation of 1 to 3.1 m for the nine lacustrine monitoring stations. The morphometric characteristics of the lake obtained through a hydrological simulation of the basin for the period 1982-2003 are shown in Table 1 (Ortiz-Jiménez *et al.*, 2005). For the calculations, we used i) a topobathymetric survey of the lake conducted by CEASJ (2003); ii) weighted monthly precipitation of the weather stations at Atoyac, San Gregorio and Ciudad Guzmán (CEASJ, 2003); iii) evaporation and direct precipitation over the lake reported by the weather station of Ciudad Guzmán, located in the vicinity of the lake (CNA, 2004).

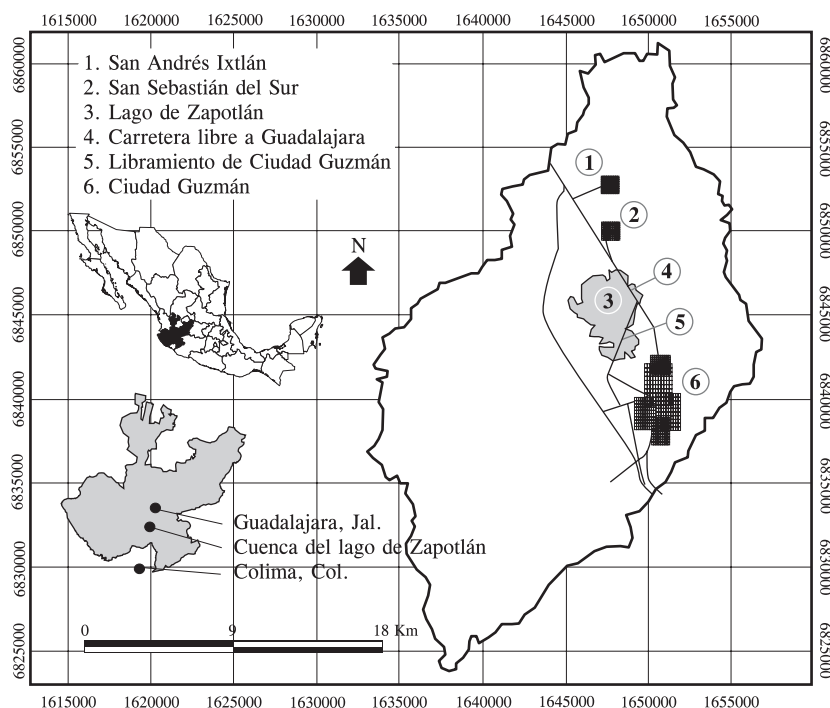


Figura 1. Localización geográfica de la cuenca del Lago de Zapotlán.
Figure 1. Geographic location of the Lake Zapotlán basin.

³ Ortiz-Jiménez M. A. 2006. Modelo de nutrientes-cadena alimenticia del Lago de Zapotlán, México. Tesis de Doctorado en Ciencia y Tecnología en Ingeniería Ambiental. Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología. CONACYT. CIATEJ A. C. Guadalajara, Jalisco, México. 187 p.

(2003); ii) la precipitación mensual ponderada de las estaciones meteorológicas de Atoyac, San Gregorio y Ciudad Guzmán (CEASJ, 2003); iii) la evaporación y precipitación directa sobre el lago reportada en la estación de Ciudad Guzmán, ubicada en la proximidad del lago (CNA, 2004).

La información disponible sobre el comportamiento hidrológico del lago refleja cierta variación debido a que se carece de escalas de control y análisis hidráulicos específicos que sustenten debidamente los datos. El CEASJ (2003) reportó 8.33 Mm³ de precipitación directa sobre el lago, 7.5 a 10.2 Mm³ de descargas residuales, 17.79 Mm³ de escurrimientos, 17.7 Mm³ de evaporación y 13 Mm³ de extracciones de agua para riego agrícola. Ortiz-Jiménez *et al.* (2005) reportaron 18.9 Mm³ de escurrimientos, 7.76 Mm³ de precipitación directa sobre el lago, 4.8 Mm³ de afloramientos de aguas subterráneas en el lago, 4 Mm³ de descargas de aguas residuales, 13 Mm³ de extracciones de agua por bombeo, 11.7 Mm³ de evapotranspiración en el área del lago con maleza acuática, 10.1 Mm³ de evaporación en el área del lago sin maleza acuática y un tiempo de residencia de siete meses.

Debido a la escasa profundidad del lago y su ubicación en una cuenca endorreica, la actual actividad antropogénica en la cuenca pone en riesgo su supervivencia y sustentabilidad económica y ecológica. De gran impacto fue la construcción de dos carreteras que lo han segmentado físicamente en tres cuerpos de agua casi independientes. Esta segmentación, junto con la contaminación provocada por la descarga de aguas residuales municipales, ha producido cambios en la morfometría, hidrodinámica, aireación, régimen térmico y calidad del agua, resultando en una severa eutrofización del cuerpo de agua, manifestada por el crecimiento exacerbado de algas y maleza acuática, como el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y el tule (*Typha latifolia*) (Ortiz-Jiménez *et al.*, 2005; Guzmán *et al.*, 2000; CUSUR, 2002).

MATERIALES Y MÉTODOS

Partiendo de los resultados del balance hidrológico del lago de Zapotlán (Ortiz-Jiménez *et al.*, 2005) se desarrolló un balance de calor y se obtuvo un modelo de temperatura en forma de una ecuación diferencial ordinaria (Chapra, 1997). El modelo se integró numéricamente mediante el método de Runge-Kutta de cuarto orden con paso de un día (Chapra y Canale, 1988). La simulación se efectuó con la hoja electrónica Excel. Las temperaturas simuladas se introdujeron en un modelo de nutrientes/cadena alimenticia del Lago de Zapotlán (Ortiz-Jiménez *et al.*, 2006) y se desarrolló un balance de nutrientes del lago (Ortiz-Jiménez, 2006)^[3]. Para probar la hipótesis se calculó una matriz de coeficientes de correlación de Pearson de los datos obtenidos de los balances de agua, calor y

Cuadro 1. Características morfométricas del Lago de Zapotlán, México (1982-2003).

Table 1. Morphometric characteristics of Lake Zapotlán, México (1982-2003).

Variable	Valor medio	Desviación estándar
Longitud máxima (NW-SE)	5271 m	-
Anchura máxima (E-W)	4300 m	-
Área superficial	1109.3 ha	293.7 ha
Volumen	19.612 Mm ³	8.82 Mm ³
Profundidad máxima	4.8 m	-
Profundidad media	1.66 m	0.37 m
Perímetro	25 060 m	-

The available information on the hydrological behavior of the lake reflects some variation because there are no control scales or specific hydraulic analyses that duly support the data. CEASJ (2003) reported 8.33 Mm³ of precipitation directly over the lake, 7.5 to 10.2 Mm³ of residual flow, 17.79 Mm³ of runoff, 17.7 Mm³ of evaporation, and 13 Mm³ extracted for irrigation. Ortiz-Jiménez *et al.* (2005) reported 18.9 Mm³ of runoff, 7.76 Mm³ of precipitation directly over the lake, 4.8 Mm³ from springs of underground water in the lake, 4 Mm³ of residual water discharges, 13 Mm³ extracted by pumping, 11.7 Mm³ evapotranspiration in the lake area with water plants, 10.1 Mm³ evaporation in the area of the lake without vegetation in a residence time of seven months.

Because the lake is very shallow and is located in an endorreic basin, the present day anthropogenic activity in the watershed endangers its survival and its economic and ecological sustainability. Of great impact was the construction of two highways that physically segmented it into three almost independent bodies of water. This segmentation, together with the pollution caused by the discharge of municipal sewage water, has produced changes in the morphometry, hydrodynamics, aeration, thermal regime and water quality, resulting in severe eutrophication of the waterbody, manifested by the exacerbated growth of algae and aquatic weeds, such as water lily (*Eichhornia crassipes*) and cattail (*Typha latifolia*) (Ortiz-Jiménez *et al.*, 2005; Guzmán *et al.*, 2000; CUSUR, 2002).

MATERIALS AND METHODS

Based on the results of the water balance of the lake Zapotlán (Ortiz-Jiménez *et al.*, 2005), a heat balance was developed and a temperature model was obtained in the form of an ordinary differential equation (Chapra, 1997). The model was integrated numerically using the fourth-order Runge-Kutta method with a step size of one day (Chapra and Canale, 1988). Simulation was performed with an Excel spreadsheet. The simulated temperatures were introduced into a nutrients/food chain model of lake Zapotlán

nutrientes. Dada la naturaleza cíclica de los balances involucrados, los resultados se presentaron como promedios mensuales de un año simulado.

El balance de calor simplificado puede escribirse como

$$A_c = E_n - S_a \pm I_n \quad (1)$$

donde, A_c = acumulación de calor en el lago; E_n = flujo de calor introducido por el agua que entra; S_a = flujo de calor perdido por el agua que sale; I_n = flujo de calor intercambiado en la superficie.

La Ecuación 1 puede reescribirse como una ecuación diferencial (Chapra, 1997)

$$\rho C_p V(t) \frac{dT_s}{dt} = Q(t) \rho C_p T_{in} - S(t) \rho C_p T_s \pm A_s(t) J(t) \quad (2)$$

donde, ρ = densidad del agua del lago (g cm^{-3}); C_p = calor específico del agua ($\text{cal g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$); $V(t)$ = volumen del lago en el día t (cm^3); T_s = temperatura del flujo de salida de agua = temperatura superficial del lago ($^\circ\text{C}$); $Q(t)$ = flujo de agua que entra al lago en el día t ($\text{cm}^3 \text{ d}^{-1}$); T_{in} = temperatura promedio del flujo de entrada de agua ($^\circ\text{C}$); $S(t)$ = flujo de agua que sale en el día t ($\text{cm}^3 \text{ d}^{-1}$); $A_s(t)$ = área superficial del lago en el día t (cm^2); t = tiempo (d).

El flujo de calor superficial $J(t)$, en $\text{cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, de la Ecuación 2 puede descomponerse así:

$$J(t) = [J_1(t) + J_2(t)] - [J_3(t) + J_4(t) + J_5(t)] \quad (3)$$

donde, $J_1(t)$ = radiación solar neta de onda corta absorbida por el lago en el día t ; $J_2(t)$ = radiación atmosférica de onda larga absorbida en el día t ; $J_3(t)$ = radiación de fondo de onda larga emitida por el agua en el día t ; $J_4(t)$ = calor perdido por conducción y convección hacia la atmósfera en el día t ; $J_5(t)$ = calor perdido por evaporación hacia la atmósfera en el día t .

En el Cuadro 2 se muestra la radiación solar extraterrestre diaria $S_0(t)$ sobre el Lago de Zapotlán (19.76°N) tabulada el día 15 de cada mes del año (Allen *et al.*, 1998).

La radiación solar neta $J_1(t)$ absorbida por el lago es (Allen *et al.*, 1998):

$$J_1(t) = \left(0.25 + 0.50 \frac{n}{N}\right) S_0(t) \quad (4)$$

donde, n = horas efectivas de insolación mensual sobre el Lago de Zapotlán (CNA, 2004); N = horas teóricas de insolación diaria a cielo despejado sobre el Lago de Zapotlán el día 15 de cada mes (Cuadro 3).

**Cuadro 2. Radiación solar extraterrestre diaria ($\text{cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$).
Table 2. Daily extraterrestrial solar radiation ($\text{cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$).**

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
641.80	738.27	833.81	907.30	937.18	942.85	937.44	916.76	861.91	774.24	673.06	617.82

(Ortiz-Jiménez *et al.*, 2006) and a nutrient balance of the lake was developed (Ortiz-Jiménez, 2006)^[3]. To test the hypothesis, a matrix of Pearson correlation coefficients were calculated from the data obtained from the water, heat and nutrient balances. Given the cyclic nature of the balances involved, the results are presented as monthly averages of one simulated year.

The simplified heat balance can be written as

$$A_c = E_n - S_a \pm I_n \quad (1)$$

where A_c = accumulation of heat in the lake, E_n = heat flux introduced by entering water, S_a = heat flux lost by water that exits; I_n = heat flux exchanged on the surface.

Equation 1 can be re-written as a differential equation (Chapra, 1997).

$$\rho C_p V(t) \frac{dT_s}{dt} = Q(t) \rho C_p T_{in} - S(t) \rho C_p T_s \pm A_s(t) J(t) \quad (2)$$

where ρ = density of lake water (g cm^{-3}); C_p = specific heat of water ($\text{cal g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$); $V(t)$ = lake volume on day t (cm^3); T_s = temperature of water exit flow = lake surface temperature ($^\circ\text{C}$); $Q(t)$ = water entering the lake on day t ($\text{cm}^3 \text{ d}^{-1}$); T_{in} = average temperature of entering water flow ($^\circ\text{C}$); $S(t)$ = flow of water that leaves on day t ($\text{cm}^3 \text{ d}^{-1}$); $A_s(t)$ = surface area of the lake on day t (cm^2); and t = time (d).

The total surface heat flux $J(t)$, in $\text{cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, of Equation 2 can be broken down as follows:

$$J(t) = [J_1(t) + J_2(t)] - [J_3(t) + J_4(t) + J_5(t)] \quad (3)$$

where $J_1(t)$ = net solar shortwave radiation absorbed by the lake on day t ; $J_2(t)$ = net atmospheric longwave radiation absorbed on day t ; $J_3(t)$ = longwave back radiation emitted by the water on day t ; $J_4(t)$ = heat lost by conduction and convection to the atmosphere on day t ; $J_5(t)$ = heat lost by evaporation to the atmosphere on day t .

In Table 2 it is shown the daily extraterrestrial solar radiation $S_0(t)$ on Lake Zapotlán (19.76°N) tabulated on the 15th of each month of the year (Allen *et al.*, 1998).

Net solar radiation $J_1(t)$ absorbed by the lake is (Allen *et al.*, 1998):

$$J_1(t) = \left(0.25 + 0.50 \frac{n}{N}\right) S_0(t) \quad (4)$$

where n = effective hours of monthly insolation on Lake Zapotlán (CNA, 2004); N = theoretical cloudless daily insolation hours on Lake Zapotlán on the 15th of each month (Table 3).

Cuadro 3. Horas teóricas de insolación diaria (Allen *et al.*, 1998).
Table 3 Theoretical hours of daily insolation (Allen *et al.*, 1998)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
11.1	11.4	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	11.0

La radiación atmosférica se calcula por la ley de Stefan-Boltzmann modificada (Chapra, 1997):

$$J_2(t) = \left[\sigma (T_{\text{aire}}(t) + 273)^4 \right] \cdot \left[A + 0.031 \sqrt{e_{\text{aire}}(t)} \right] \cdot [1 - R_L] \quad (5)$$

donde, σ = constante de Stefan-Boltzmann = 11.7×10^{-8} cal cm⁻² d⁻¹ °K⁴, $T_{\text{aire}}(t)$ = temperatura del aire sobre el Lago de Zapotlán en el día t (°C) (CNA, 2004); A = coeficiente adimensional ≈ 0.6 (Chapra, 1997); $e_{\text{aire}}(t)$ = presión de vapor del aire sobre el Lago de Zapotlán en el día t (mm Hg) (CNA, 2004); R_L = coeficiente adimensional de reflexión del lago ≈ 0.03 (Chapra, 1997).

La radiación de fondo se calcula por la ley de Stefan-Boltzmann (Chapra, 1997):

$$J_3(t) = \varepsilon \sigma [T_s(t) + 273]^4 \quad (6)$$

donde, ε = emisividad del agua = 0.97 (Chapra, 1997); $T_s(t)$ = temperatura superficial del lago en el día t (°C).

El flujo de calor transferido a la atmósfera por conducción/convección puede calcularse con (Chapra, 1997):

$$J_4(t) = c_1 f(U_w) [T_s(t) - T_{\text{aire}}(t)] \quad (7)$$

donde, c_1 = coeficiente de Bowen ≈ 0.47 mm hg/°C (Chapra, 1997), $U_w(t)$ = velocidad del viento a 7 m sobre el lago en el día t (m s⁻¹) (CNA, 2004); $f(U_w)$ = función de la velocidad del viento, definida por Brady *et al.* (1969) como:

$$f(U_w) = 19.0 + 0.95 U_w^2 \quad (8)$$

El flujo de calor perdido por evaporación del lago se calcula por la ley de Dalton:

$$J_5(t) = f(U_w) [e_s(t) - e_{\text{aire}}(t)] \quad (9)$$

donde, $e_{\text{aire}}(t)$ = presión de vapor en el punto de rocío en el día t (mm Hg) (CNA, 2004); $e_s(t)$ = presión de vapor de saturación en el día t (mm Hg), calculada por Raudkivi (1979):

$$e_s(t) = 4.596 e^{\frac{17.27 T_s(t)}{237.3 + T_s(t)}} \quad (10)$$

Sustituyendo las Ecuaciones 5 a 9 en la 3 se obtiene:

$$J(t) = \left(0.25 + 0.50 \frac{n}{N} \right) S_0(t) + \sigma [T_{\text{aire}}(t) + 273]^4$$

Atmospheric radiation is calculated by the modified Stefan-Boltzmann law (Chapra, 1997):

$$J_2(t) = \left[\sigma (T_{\text{air}}(t) + 273)^4 \right] \cdot \left[A + 0.031 \sqrt{e_{\text{air}}(t)} \right] \cdot [1 - R_L] \quad (5)$$

where σ = Stefan-Boltzmann constant = 11.7×10^{-8} cal cm⁻² d⁻¹ °K⁴; $T_{\text{air}}(t)$ = air temperature over Lake Zapotlán on day t (°C) (CNA, 2004); A = adimensional coefficient ≈ 0.6 (Chapra, 1997); $e_{\text{air}}(t)$ = air vapor pressure over Lake Zapotlán on day t (mm Hg) (CNA, 2004); R_L = adimensional reflection coefficient of the lake ≈ 0.03 (Chapra, 1997).

Water back radiation is calculated by the Stefan-Boltzmann law (Chapra, 1997):

$$J_3(t) = \varepsilon \sigma [T_s(t) + 273]^4 \quad (6)$$

where ε = emissivity of water = 0.97 (Chapra, 1997); $T_s(t)$ = surface temperature of the lake on day t (°C).

The heat flux transferred to the atmosphere by conduction/convection can be calculated by (Chapra, 1997):

$$J_4(t) = c_1 f(U_w) [T_s(t) - T_{\text{air}}(t)] \quad (7)$$

where c_1 = Bowen's coefficient ≈ 0.47 mm hg/°C (Chapra, 1997); $U_w(t)$ = wind speed 7 m above the lake on day t (m s⁻¹) (CNA, 2004); $f(U_w)$ = wind speed function defined by Brady *et al.* (1969) as:

$$f(U_w) = 19.0 + 0.95 U_w^2 \quad (8)$$

The flux of heat lost by evaporation from the lake is calculated by the Dalton law:

$$J_5(t) = f(U_w) [e_s(t) - e_{\text{air}}(t)] \quad (9)$$

where $e_{\text{air}}(t)$ = vapor pressure at dewpoint on day t (mm Hg) (CNA, 2004); $e_s(t)$ = saturation vapor pressure on day t (mm Hg), calculated by Raudkivi (1979):

$$e_s(t) = 4.596 e^{\frac{17.27 T_s(t)}{237.3 + T_s(t)}} \quad (10)$$

When Equations 5 to 9 are substituted, we obtain:

$$J(t) = \left(0.25 + 0.50 \frac{n}{N} \right) S_0(t) + \sigma [T_{\text{air}}(t) + 273]^4$$

$$\begin{aligned} & \left[A + 0.031\sqrt{e_{\text{aire}}(t)} \right] (1 - R_L) - \varepsilon \sigma [T_s(t) + 273]^4 - c_1 f(U_w) \\ & [T_s(t) - T_{\text{aire}}(t)] - f(U_w)[e_s(t) - e_{\text{aire}}(t)] \end{aligned} \quad (11)$$

Al sustituir la Ecuación 11 en la 2 y despejar la derivada de T_s con respecto al tiempo se obtiene el modelo de temperatura superficial del lago:

$$\begin{aligned} \frac{dT_s}{dt} = & \frac{Q(t)}{V(t)} T_{in} + \frac{J_{sn}(t)}{\rho C_p H(t)} \\ & + \frac{\sigma [T_{\text{aire}}(t) + 273]^4 \left[A + 0.031\sqrt{e_{\text{aire}}(t)} \right] (1 - R_L)}{\rho C_p H(t)} - \frac{S(t)}{V(t)} T_s \\ & - \frac{\varepsilon \sigma (T_s + 273)^4}{\rho C_p H(t)} - \frac{c_1 f(U_w) [T_s - T_{\text{aire}}(t)]}{\rho C_p H(t)} - \frac{f(U_w) [e_s(t) - e_{\text{aire}}(t)]}{\rho C_p H(t)} \end{aligned} \quad (12)$$

Se integró numéricamente la Ecuación 12 mediante el método de Runge-Kutta de cuarto orden utilizando un paso de tiempo de un día (Chapra y Canale, 1988). Para efectuar los cálculos se empleó la hoja electrónica Excel (Microsoft® Excel, 2000).

El presupuesto anual de calor θ_a ($\text{cal cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$), requerido para calentar el volumen medio $\bar{V}$ del lago (Cuadro 1) desde la temperatura mínima de invierno T_{Min} (13°C) a la temperatura máxima de verano T_{Max} (27°C) y normalizado por la superficie media del lago $\bar{A}_s$ (Cuadro 1), puede calcularse como (Wetzel, 2001):

$$\theta_a = \frac{\bar{V} \rho (T_{\text{Max}} - T_{\text{Min}}) C_p}{\bar{A}_s} \quad (13)$$

donde, ρ = densidad del agua a la temperatura media del lago (21°C) = 0.997 g cm^{-3} ; C_p = calor específico del agua a la temperatura media del lago (21°C) = $0.99933 \text{ cal g}^{-1} ^\circ \text{C}$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dada la alta relación área-volumen del lago y la poca variación de la temperatura del cuerpo de agua a lo largo del año, el presupuesto anual de calor fue bajo (2467 cal cm^{-2}). El régimen térmico del Lago de Zapotlán es bastante similar al reportado para otros lagos tropicales, cuyos presupuestos de calor son bajos (Wetzel, 2001; Lewis, 1996). Chapman *et al.* (1998) informan de un lago tropical africano con un presupuesto anual de calor de $1073.8 \text{ cal cm}^{-2}$. Los principales flujos de entrada de calor fueron la radiación atmosférica (55.4%) y la solar (42.8%). Los principales flujos de salida fueron la radiación de fondo (79.1%) y el calor perdido por evaporación (17.2%). Los valores máximos del flujo de radiación solar y calor perdido

$$\begin{aligned} & \left[A + 0.031\sqrt{e_{\text{air}}(t)} \right] (1 - R_L) - \varepsilon \sigma [T_s(t) + 273]^4 - c_1 f(U_w) \\ & [T_s(t) - T_{\text{air}}(t)] - f(U_w)[e_s(t) - e_{\text{air}}(t)] \end{aligned} \quad (11)$$

When Equation 11 is substituted in Equation 2 and solved, the derivative of T_s , with respect to time, the lake surface temperature model is obtained:

$$\begin{aligned} \frac{dT_s}{dt} = & \frac{Q(t)}{V(t)} T_{in} + \frac{J_{sn}(t)}{\rho C_p H(t)} \\ & + \frac{\sigma [T_{\text{air}}(t) + 273]^4 \left[A + 0.031\sqrt{e_{\text{air}}(t)} \right] (1 - R_L)}{\rho C_p H(t)} - \frac{S(t)}{V(t)} T_s \\ & - \frac{\varepsilon \sigma (T_s + 273)^4}{\rho C_p H(t)} - \frac{c_1 f(U_w) [T_s - T_{\text{air}}(t)]}{\rho C_p H(t)} - \frac{f(U_w) [e_s(t) - e_{\text{air}}(t)]}{\rho C_p H(t)} \end{aligned} \quad (12)$$

Equation 12 was integrated numerically using the fourth-order Runge-Kutta method using a step size of one day (Chapra and Canale, 1988). To do the calculations, an Excel (Microsoft® Excel, 2000) spreadsheet was used.

The annual heat budget θ_a ($\text{cal cm}^{-2} \text{ year}^{-1}$) required to heat the mean volume $\bar{V}$ of the lake (Table 1) from the lowest winter temperature T_{Min} (13°C) to the maximum summer temperature T_{Max} (27°C) and normalized by the mean lake area $\bar{A}_s$ (Table 1) can be calculated as (Wetzel, 2001):

$$\theta_a = \frac{\bar{V} \rho (T_{\text{Max}} - T_{\text{Min}}) C_p}{\bar{A}_s} \quad (13)$$

where ρ = water density at the mean lake temperature (21°C) = 0.997 g cm^{-3} ; C_p = specific heat of the lake at the mean lake temperature (21°C) = $0.99933 \text{ cal g}^{-1} ^\circ \text{C}$.

RESULTS AND DISCUSSION

Given the close relationship between lake area and volume and the small temperature variation of the waterbody during the year, the annual heat budget was low (2467 cal cm^{-2}). The thermal regime of Lake Zapotlán is quite similar to that reported for other tropical lakes whose heat budgets are low (Wetzel, 2001; Lewis, 1996). Chapman *et al.* (1998) report a lake in tropical Africa with an annual heat budget of $1073.8 \text{ cal cm}^{-2}$. The main heat input flows were atmospheric radiation (55.4%) and solar radiation (42.8%). The main heat output flows were water back radiation (79.1%) and the heat lost by evaporation (17.2%). The maximum values of solar radiation flux and heat lost by evaporation occurred in April. The maximum values of atmospheric and water back

por evaporación fueron en abril. Los valores máximos de radiación atmosférica y radiación de fondo fueron en junio. Según los resultados de la simulación, el flujo ganado por radiación atmosférica se correlacionó positivamente con el flujo de radiación de fondo ($r=0.99$). Igualmente, el flujo de calor ganado por radiación solar se correlacionó positivamente con el flujo de calor perdido por evaporación ($r=0.99$).

En la Figura 2 se muestran los componentes del balance de calor (en líneas gruesas referidas al eje vertical izquierdo) y la temperatura simulada superficial del lago, además de las mediciones de las temperaturas de punto de rocío y aire (en líneas delgadas referidas al eje vertical derecho). Las temperaturas mínimas y máximas del aire y superficie del lago ocurrieron durante enero y junio. La temperatura media del lago fue $20.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una variación de 13 a $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el periodo simulado. Para el año 2000, se reportó una temperatura media de $21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una variación de 18.1 a $25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Guzmán *et al.*, 2000). La simulación mostró una diferencia máxima entre las temperaturas de la superficie del lago y del aire durante el verano y principios de otoño, y una mínima durante invierno-primavera. Esta misma relación se observó entre las temperaturas del epilimnion e hipolimnion (Guzmán *et al.*, 2000). Según los resultados de la simulación, la temperatura del lago se correlacionó positivamente con la radiación atmosférica y la radiación de fondo. Lubin (1994) y Roberts *et al.* (2004) confirman que la radiación de fondo contribuye directamente al calentamiento de la superficie de un cuerpo de agua. La temperatura del aire se correlacionó positivamente con la temperatura del lago, la radiación de fondo y la radiación atmosférica. Roberts *et al.* (2004) y Josey *et al.* (2003) afirman que la radiación atmosférica depende de la temperatura del aire.

En la Figura 3 se muestran los componentes del balance de calor (en líneas gruesas referidas al eje

radiation were in June. According to the results of the simulation, the flux gained by atmospheric radiation correlated positively with water back radiation flux ($r=0.99$). Likewise, heat flux gained by solar radiation correlated positively with heat flux lost by evaporation ($r=0.99$).

The components of the heat balance (in thick lines referred to the left vertical axis), and the simulated surface temperature of the lake, besides measurements of dewpoint and air temperatures (in thin lines referred to the right vertical axis) are shown in Figure 2. The minimum and maximum temperatures of the air and lake surface occur during January and June. The mean lake temperature was $20.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ with a variation of 13 to $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ during the simulated period. For the year 2000, a mean temperature of $21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ with a variation of 18.1 to $25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ was reported (Guzmán *et al.*, 2000). The simulation showed a maximum difference between the lake surface temperatures and air temperatures during the summer and early fall, and a minimum difference during winter and spring. This same relationship was observed between epilimnion and hypolimnion temperatures (Guzmán *et al.*, 2000). According to the simulation results, lake temperature correlated positively with atmospheric radiation and water back radiation. Lubin (1994) and Roberts *et al.* (2004) confirm that water back radiation contributes directly to surface heat of a waterbody. Air temperature correlated positively with lake temperature, water back radiation and atmospheric radiation. Roberts *et al.* (2004) and Josey *et al.* (2003) state that atmospheric radiation depends on air temperature.

Figure 3 shows the heat balance components (in thick lines referred to the left vertical axis) and the lake water balance (in thin lines referred to the right vertical axis). The maximum values of evaporation and runoff occurred in April and August. According to the simulation data, evaporation from the lake correlated positively with heat lost by evaporation and

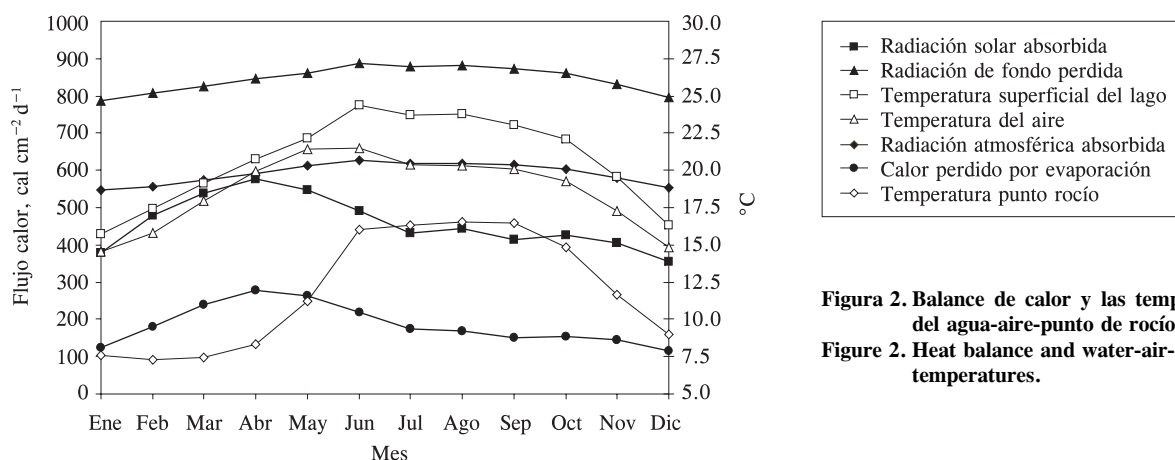


Figura 2. Balance de calor y las temperaturas del agua-aire-punto de rocío.
Figure 2. Heat balance and water-air-dewpoint temperatures.

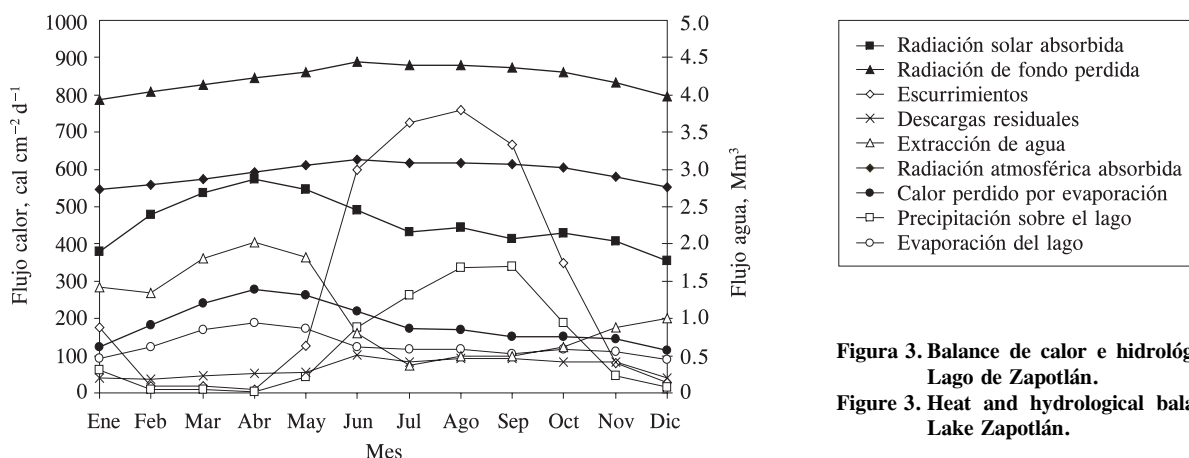


Figura 3. Balance de calor e hidrológico del Lago de Zapotlán.

Figure 3. Heat and hydrological balance of Lake Zapotlán.

vertical izquierdo) y del balance hidrológico del lago (en líneas delgadas referidas al eje vertical derecho). Los valores máximos de evaporación y escurrimientos ocurrieron en abril y agosto. Según los datos de la simulación, la evaporación del lago se correlacionó positivamente con el calor perdido por evaporación y la radiación solar. Oswald y Rouse (2004) afirman que entre más pequeños y someros sean los lagos, los periodos de mayor evaporación ocurren en los días con mayor radiación solar. Adicionalmente la evaporación del lago se correlacionó con la humedad relativa ($r \leq -0.70$; $p \leq 0.001$). Para lagos pequeños y someros, Oswald y Rouse (2004) reportaron que los periodos de mayor evaporación ocurren en los días con menor humedad relativa. Los escurrimientos se correlacionaron con la radiación atmosférica, la radiación de fondo, la precipitación sobre el lago y las descargas residuales ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$). La precipitación directa sobre el lago se correlacionó con la radiación atmosférica, la radiación de fondo, los escurrimientos y las descargas residuales ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$).

La profundidad media del lago se correlacionó con los escurrimientos, la precipitación sobre el cuerpo de agua ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$); y con la extracción de agua, la radiación solar, la velocidad del viento, el calor perdido por evaporación y conducción/convección ($r \leq -0.70$; $p \leq 0.001$). El área del lago cubierta con maleza acuática se correlacionó con el área del cuerpo de agua, la evapotranspiración, ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$), y con el calor perdido por la evaporación en el área del lago cubierta por maleza acuática ($r \leq -0.70$; $p \leq 0.001$).

En la Figura 4 se muestran los componentes de balance de calor (en líneas gruesas referidas al eje vertical izquierdo) y las concentraciones de nutrientes (N en nitratos, N en amonio y SRP) (en líneas delgadas referidas al eje vertical derecho). En septiembre ocurrieron las concentraciones máximas de nutrientes en el lago. Hubo una alta correlación positiva entre

with solar radiation. Oswald and Rouse (2004) state that the smaller and shallower the lakes, the greater evaporation periods take place on days of greater solar radiation. In addition, evaporation from the lake correlated with relative humidity ($r \leq -0.70$; $p \leq 0.001$). For small shallow lakes, Oswald and Rouse (2004) reported that the periods of greatest evaporation occur on days of low relative humidity. Runoff correlated with atmospheric radiation, water back radiation, precipitation over the lake, and discharges of sewage water ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$). Direct precipitation over the lake correlated with atmospheric radiation, water back radiation, runoff, and discharges of sewage water ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$).

Mean lake depth correlated with runoff, precipitation over the waterbody ($r \leq -0.70$; $p \leq 0.001$); and with extraction of water, solar radiation, wind velocity, heat lost by evaporation and conduction/convection ($r \leq -0.70$; $p \leq 0.001$). The area of the lake covered by aquatic vegetation correlated with the area of the waterbody, evapotranspiration ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$), and with heat lost by evaporation in the lake area covered by aquatic vegetation ($r \leq -0.70$; $p \leq 0.001$).

The heat balance components (in thick lines referred to the left vertical axis) and nutrient concentrations (N in nitrates, N in ammonium, and SRP) (in thin lines referred to the right vertical axis), are shown in Figure 4. The maximum nutrient concentrations occurred in the lake in September. There was a high positive correlation among nutrient concentrations and between these and atmospheric radiation, water back radiation, and heat lost by conduction-convection ($r \geq 0.85$; $p \leq 0.001$).

The heat balance components (in thick lines referred to the left vertical axis) and the concentrations of algae, herbivorous zooplankton, and carnivorous zooplankton (in thin lines referred to the right vertical axis), are shown in Figure 5. The maximum concentration of algae and carnivorous zooplankton

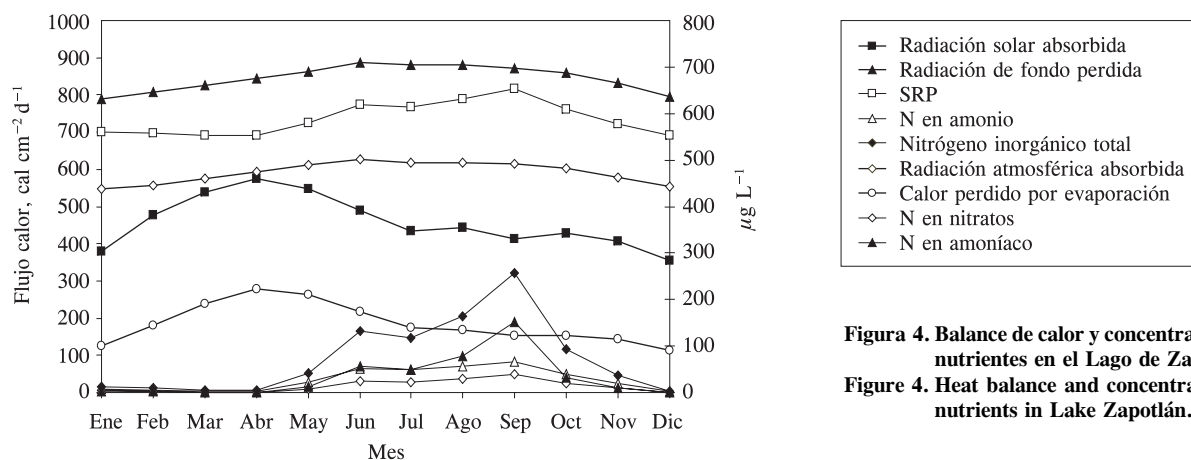


Figura 4. Balance de calor y concentración de nutrientes en el Lago de Zapotlán.
Figure 4. Heat balance and concentration of nutrients in Lake Zapotlán.

las concentraciones de los nutrientes, y entre éstas y la radiación atmosférica, la radiación de fondo y el calor perdido por conducción-convección ($r \geq 0.85$; $p \leq 0.001$).

En la Figura 5 se muestran los componentes del balance de calor (en líneas gruesas referidas al eje vertical izquierdo) y las concentraciones de algas, zooplancton herbívoro y zooplancton carnívoro (en líneas delgadas referidas al eje vertical derecho). La concentración máxima de algas y zooplancton carnívoro ocurrió en junio. Se han reportado concentraciones de algas mayores a 88 mg de clorofila-a en el lago durante el verano (CUSUR, 2002). A pesar de la abundancia de alimento, el zooplancton herbívoro tuvo una tasa de crecimiento casi nula. Lewis (1996) atribuye la supresión del zooplancton herbívoro en lagos tropicales a la predación de *Chaoborus*. Orozco-Hernández *et al.* (1992) detectaron este díptero en el cercano lago de Chapala. Según los resultados de la simulación, hay una correlación entre las concentraciones de la cadena alimenticia (algas, zooplancton carnívoro, zooplancton herbívoro), la radiación atmosférica y la radiación de fondo ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$).

occurred in June. Alga concentrations of more than 88 mg of chlorophyll-a have been reported in the lake during the summer (CUSUR, 2002). In spite of the abundance of food, herbivorous zooplankton had a near zero growth rate. Lewis (1996) attributes the suppression of herbivorous zooplankton in tropical lakes to predation by *Chaoborus*. Orozco-Hernández *et al.* (1992) have detected this dipteran near Lake Chapala. According to the results of the simulation, there is a correlation between the concentrations of the food chain (algae, carnivorous zooplankton and herbivorous zooplankton), atmospheric radiation and water back radiation ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$).

Figure 6 shows the heat balance components (in thick lines referred to the left vertical axis) and the nutrient balance (in thin lines referred to the right vertical axis). Maximum inputs and outputs of nutrients occurred in September. The simulation results show that the nutrients generated by DOC (dissolved organic carbon) hydrolysis correlated with atmospheric radiation, water back radiation and nutrients exported by runoff ($r \geq 0.70$, $p \leq 0.001$). The nutrients exported by runoff correlated with atmospheric radiation and water back radiation, and flow of nutrients to the lake

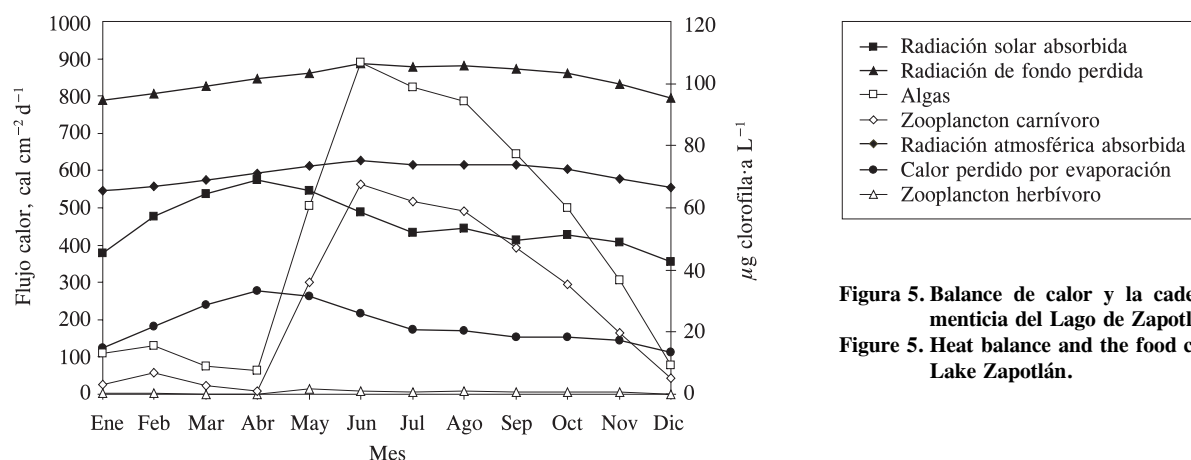


Figura 5. Balance de calor y la cadena alimenticia del Lago de Zapotlán.
Figure 5. Heat balance and the food chain in Lake Zapotlán.

En la Figura 6 se muestran los componentes del balance de calor (en líneas gruesas referidas al eje vertical izquierdo) y el balance de nutrientes (en líneas delgadas referido al eje vertical derecho). En septiembre ocurrieron las entradas y salidas máximas de nutrientes del lago. Los resultados de la simulación muestran que los nutrientes generados por hidrólisis del COD (carbono orgánico disuelto) se correlacionaron con la radiación atmosférica, la radiación de fondo y los nutrientes exportados vía escurrimientos ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$). Los nutrientes exportados vía escurrimientos se correlacionaron con la radiación atmosférica, la radiación de fondo y el flujo del exceso de nutrientes hacia el fondo del lago (por sedimentación del amonio y SRP), la atmósfera (por desnitrificación y transformación de amonio a amoniaco) o la maleza acuática (por consumo) ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$). Este flujo del exceso de nutrientes se correlacionó con la radiación atmosférica, la radiación de fondo, los nutrientes generados tanto por hidrólisis del COD como por la respiración de algas ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$). Los nutrientes ingeridos por las algas se correlacionaron con los nutrientes generados por la respiración de las algas, la radiación atmosférica, la radiación de fondo, el calor perdido por evaporación y la radiación solar ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$). Doods (2002) confirma la relación entre la radiación solar y los nutrientes ingeridos por las algas.

La temperatura del lago (regulada por la radiación atmosférica y la radiación de fondo), junto con la acción del viento (correlacionada con la radiación solar) y los escurrimientos (correlacionados con la temperatura del lago) desempeñan un papel clave en la dinámica del ecosistema del Lago de Zapotlán. El análisis de correlación y las Figuras 2 a 6 sugieren que el Lago presenta un periodo de mezclado durante las estaciones de invierno, primavera y verano. El mezclado de invierno, más térmico que eólico, ocurre cuando los vientos fríos de mediana intensidad

bottom (by sedimentation of ammonium and SRP), to the atmosphere (by denitrification and transformation of ammonium to ammonia) or to the aquatic weeds (by nutrient uptake) ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$). This flux of surplus nutrients correlated with atmospheric radiation, water back radiation, and nutrients generated by both hydrolysis of DOC and alga respiration ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$). The nutrients taken up by the algae correlated with nutrients generated by alga respiration, atmospheric radiation, water back radiation, heat lost by evaporation, and solar radiation ($r \geq 0.70$; $p \leq 0.001$). Doods (2002) confirm the relationship between solar radiation and nutrient uptake by algae.

Lake temperature (regulated by atmospheric radiation and water back radiation, together with the action of wind (correlated with solar radiation) and runoffs (correlated with lake temperature) play a key role in the dynamics of the Lake Zapotlán ecosystem. The correlation analysis and Figures 2 to 6 suggest that the lake has a mixing period during winter, spring and summer. Mixing in winter, more thermal than eolian, takes place when cold winds of medium intensity cool the epilimnion until it reaches the temperature of the hypolimnion. This mixing is weak, but it does remove some of the nutrients at the lake bottom. Guzmán *et al.* (2000) did not report a significant difference between the temperatures of the two layers in this period. Spring mixing, provoked mainly by more intense winds, combines a warm epilimnion with a cooler hypolimnion, so that a significant amount of nutrients are removed from the lake bottom. This increases the concentration of nutrients throughout the lake and triggers productivity of the lake in late spring. As nutrients are removed from the lake bottom, they are used by algae, which grow at a staggering rate. Summer mixing is caused mainly by hydraulic factors (Hamilton and Lewis, 1987). Apparently, the first runoffs is as warm as the lake water since it collects heat from the soil of the basin, resulting

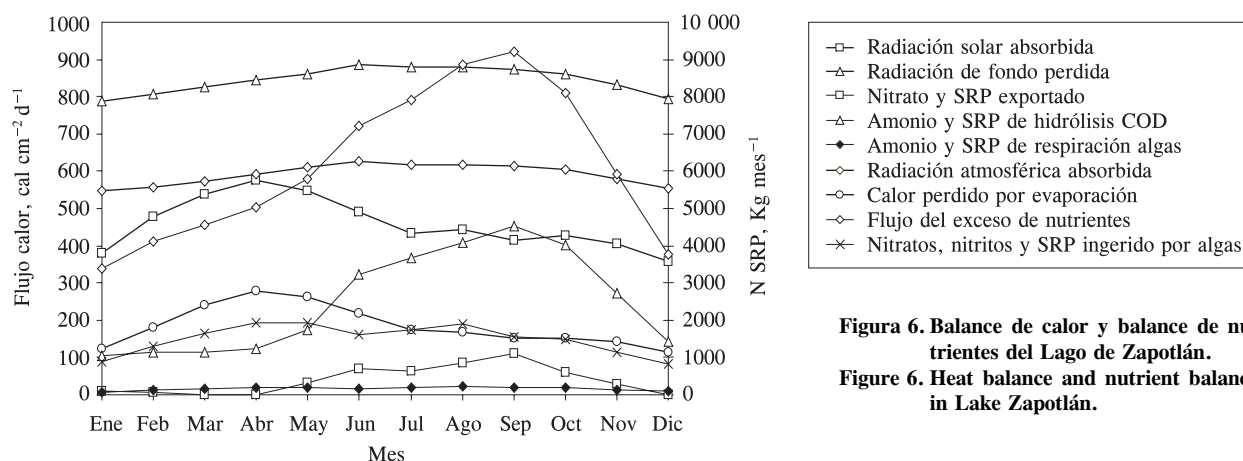


Figura 6. Balance de calor y balance de nutrientes del Lago de Zapotlán.

Figure 6. Heat balance and nutrient balance in Lake Zapotlán.

enfrian al epilimnión hasta la temperatura del hipolimnión. Tal mezclado es débil pero remueve algunos nutrientes del fondo del lago. Guzmán *et al.* (2000) no reportaron una diferencia significativa entre las temperaturas de ambas capas en dicho periodo. El mezclado de primavera, provocado principalmente por vientos más intensos, combina un epilimnión cálido con un hipolimnión menos cálido; así se remueve una cantidad significativa de nutrientes del fondo del lago. Esto incrementa la concentración de nutrientes dentro del lago y detona la productividad del lago a finales de primavera. A medida que los nutrientes se remueven del fondo, son ingeridos por las algas hasta alcanzar un vertiginoso crecimiento. El mezclado de verano es provocado principalmente por factores hidráulicos (Hamilton y Lewis, 1987). Aparentemente, los primeros escurrimientos son tan cálidos como las aguas del lago debido a que recolectan calor del suelo de la cuenca, y esto resulta en un buen mezclado. Al transcurrir la estación lluviosa y disminuir la temperatura del aire y el suelo, los escurrimientos se vuelven menos cálidos y más densos e ingresan dentro del hipolimnión (Martin y McCutcheon, 1999). Al concluir las lluvias a principios de otoño, aparece una pequeña diferenciación térmica de solo 1.4 °C entre el epilimnión e hipolimnión (Guzmán *et al.*, 2000), que es suficiente para estratificar el lago, desacelerar el ciclo de nutrientes y aminorar la productividad del cuerpo de agua.

CONCLUSIONES

El régimen térmico del Lago de Zapotlán es similar al reportado para otros lagos tropicales. La radiación atmosférica, la radiación de fondo, la temperatura del lago, los escurrimientos, la precipitación y las descargas residuales tienen una función importante en la interacción de los nutrientes y la cadena alimenticia del lago. La temperatura del lago (correlacionada con la radiación atmosférica y la radiación de fondo), más la acción del viento (correlacionado con la radiación solar), junto con los escurrimientos (correlacionados con la radiación atmosférica, la radiación de fondo, la precipitación sobre el lago y la temperatura del lago), producen el mezclado del cuerpo de agua en invierno, primavera y verano. En otoño, cuando disminuye la velocidad del viento, cesan las lluvias y se enfría levemente el hipolimnión, la columna de agua se estratifica inestablemente. Estos episodios alternados de mezclado y estratificado afectan el ciclo de nutrientes y la dinámica de la cadena alimenticia del lago. La alta eficiencia del ciclo de nutrientes durante el verano eleva las tasas de regeneración de nutrientes así como la producción primaria del lago.

in good mixing. As the rainy season progresses and air and soil temperatures decrease, runoff becomes cooler and denser and enters the hypolimnion (Martin and McCutcheon, 1999). When the rains end in early fall, a small thermal difference of only 1.4 °C appears between the epilimnion and hypolimnion (Guzmán *et al.*, 2000), which is sufficient to stratify the lake, decelerate the nutrient cycle and lower productivity of the waterbody.

CONCLUSIONS

The thermal regimen of Lake Zapotlán is similar to that reported for other tropical lakes. Atmospheric radiation, water back radiation, lake temperature, runoff, precipitation, and discharges of sewage water play an important role in the interaction of the nutrients and the food chain of the lake. Lake temperature (correlated with atmospheric radiation and water back radiation) plus the action of wind (correlated with solar radiation) and runoff (correlated with atmospheric radiation, water back radiation, precipitation over the lake and lake temperature) produce mixing in the waterbody during winter, spring and summer. In fall, when wind velocity decreases, rain ceases, and the hypolimnion cools slightly, the water column stratifies unstably. These alternating episodes of mixing and stratification affect the nutrient cycle and the dynamics of the food chain in the lake. The high efficiency of the nutrient cycle during the summer raises the rate of nutrient regeneration as well as primary productivity of the lake.

—End of the English version—



LITERATURA CITADA

- Alcamo, J., and T. Henrichs. 2002. Critical regions: A model-based estimation of world water resources sensitive to global changes. *Aquat. Sci.* 64: 352-362.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage Paper 56. Rome. 300 p.
- Brady, D. K., W. L. Graves, and J. C. Geyer. 1969. Surface Heat Exchange at Power Plant Cooling Lakes, Water Cooling Discharge Project Report, No. 5, Edison Electric Inst. Publication No. 69-901, New York. 153 p.
- CEASJ (Comisión Estatal de Agua y Saneamiento. Jalisco). 2003. Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán. Ciudad Guzmán, Jal. 111 p.
- Chapman, L. J., C. A. Chapman, T. L. Crisman, and F. G. Nordlie. 1998. Dissolved oxygen and thermal regimes of a Ugandan crater lake. *Hydrobiologia* 385: 201-211.
- Chapra, S. C. 1997. Surface Water-Quality Modeling. WCB/McGraw-Hill, New York. 844 p.

- Chapra, S. C., and R. P. Canale. 1988. *Numerical Methods for Engineers*. 2nd ed. McGraw-Hill, New York. 812 p.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2004. Reportes meteorológicos mensuales. Estación Meteorológica de Ciudad Guzmán. Comisión Nacional del Agua. México. 30 p.
- CUSUR (Centro Universitario del Sur). 2002. 2° Curso-Taller Internacional Rehabilitación de la "Laguna de Zapotlán". Ponencia: Pesca y Limnología del Lago de Zapotlán. Ciudad Guzmán, Jalisco. 24 p.
- Dodds, W. K. 2002. *Freshwater Ecology: Concepts and Environmental Applications*. Academic Press. San Diego. 569 p.
- Guzmán, M., J. G. Michel, A. Peredo, M. García, y S. Camarena. 2000. *Limnología de la Laguna de Zapotlán*. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. Zapopan, Jalisco. 120 p..
- Hamilton, S. K., and W. M. Lewis Jr. 1987. Causes of seasonality in the chemistry of a lake on the Orinoco River floodplain, Venezuela. *Limnol. Oceanogr.* 32: 1277-1290.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2001. *Tabulados Básicos*. Jalisco. <http://www.inegi.gob.mx>
- Josey, S. A., R. W. Pascal, P. K. Taylor, and M. J. Yelland. 2003. A new formula for determining the atmospheric longwave flux at the ocean surface at mid-high latitudes. *J. Geophys. Res.*, 108: 3108.
- Lewis, W. M. 1996. Tropical Lakes: How Latitude Makes a Difference. *Perspectives in Tropical Limnology*, F. Schiemer & K. T. Boland (eds). Amsterdam. pp: 43-64.
- Lubin, D. 1994. The Role of the Tropical Super Greenhouse Effect in Heating the Ocean Surface. *Science*. 265: 224-227.
- Martin, J. L., and S. C. McCutcheon. 1999. *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*. Lewis Publisher. New York. 794 p.
- Microsoft® Excel. 2000. Copyright® 1995-1999. Microsoft Corporation.
- Orozco-Hernández, R. B., M. Guzmán-Arroyo, y B. G. Palma-Colín. 1992. Dípteros Acuáticos en la Ensenada de San Nicolás, Lago de Chapala. *An. Inst. Cienc. Mar y Limnol. Univ. Nal. Auton. México*, 20(1): 25-32.
- Ortiz-Jiménez, M. A., J. De Anda, and H. Shear. 2005. Hydrologic Balance of Lake Zapotlán (México). *J. Environ. Hydrology*. 13: 1-16.
- Ortiz-Jiménez, M. A., J. De Anda, and H. Shear. 2006. Nutrients/Food Chain Model for Lake Zapotlán (México). *Intl. J. River Basin Manag.* 4: 125-135.
- Oswald, C. J., and W. R. Rouse. 2004. Thermal characteristics and energy balance of various-size Canadian shield lakes in the Mackenzie River Basin. *J. Hydrometeorology*. 5(1): 129-144.
- Raudkivi, A. J. 1979. *Hydrology*. Pergamon, Oxford. 479 p.
- Roberts, M., B. Zalewsky, T. Swanson, L. Sullivan, K. Sinclair, and M. LeMoine. 2004. *Quality Assurance Project Plan. Deschutes River, Capitol Lake, and Budd Inlet Temperature, Fecal Coliform Bacteria, Dissolved Oxygen, pH, and Fine Sediment Total Maximum Daily Load Study*. Washington State Department of Ecology. Environmental Assessment Program. Olympia, Washington. Publication No. 04-03-103. 82 p.
- UDG (Universidad de Guadalajara). 2002. *Plan Parcial para el Desarrollo Integral de la Zona de la Laguna de Zapotlán*. Documento Técnico. Centro Universitario del Sur. Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades. Centro de Investigaciones del Medio Ambiente y Ordenación Territorial. Municipio de Zapotlán el Grande. Municipio de Gómez Farías. Jalisco.
- Wetzel, R. G. 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems*, 3rd. Ed. Academic Press, San Diego. 850 p.