

Batimetría y calidad de agua de la laguna Milagros, Quintana Roo, México



Recibido:15/06/17 · Aceptado: 01/08/17

Yu-Lin Lin
Víctor Hugo Delgado-Blas*
Adrián Cervantes-Martínez
Martha Angélica Gutiérrez-Aguirre
Universidad de Quintana Roo

Resumen

Para determinar la calidad del agua de la laguna Milagros del sur de Quintana Roo, se definieron variables físicas y químicas, así como su morfometría y batimetría. Este sistema presentó una transparencia (0.8 a 1.28 m), aguas poco profundas (0.5 a 4.7 m), cálidas (27.9 a 30 °C), un pH (6.01 a 7.86), con aguas bien oxigenadas (5.5 a 8.03 mg/l), una conductividad en la superficie y el fondo (1.61 a 3.53 mS/cm, respectivamente), concentraciones de amonio (1.27 a 3.33 mg/l), nitrito (0.009 mg/l) y nitratos (0.5 a 1.6 mg/l). La batimetría y morfometría de la laguna mostró una forma irregular, la cubeta tiene el aspecto de un cono invertido; su longitud máxima ($L_{\text{máx}}$) es de 3.63 km y su ancho máximo (B) de 1.64 km, con un área total (a) de 3.13 km² y un volumen (V) de 5 100 156 m³. Se concluye que la laguna Milagros es un cuerpo de agua apto para actividades recreativas, saludable en términos de condiciones de oxígeno, con concentraciones de nutrientes dentro de los valores máximos permisibles (nitritos) de los criterios ecológicos de calidad de agua (CE-CCA-001/89). Se recomienda utilizar esta información para el manejo y conservación de este sistema acuático.

PALABRAS CLAVE: Caracterización hidrológica, manejo, calidad del agua, morfometría, batimetría, Quintana Roo.

*Correo electrónico: blas@uqroo.edu.mx



Bathymetry and water quality of Laguna Milagros, Quintana Roo, Mexico

Received: 06/15/17 · Accepted: 08/01/17

Yu-Lin Lin

Víctor Hugo Delgado-Blas*

Adrián Cervantes-Martínez

Martha Angélica Gutiérrez-Aguirre

Universidad de Quintana Roo

Abstract

To determine the water quality of Laguna Milagros in the south of Quintana Roo, physical and chemical variables were determined and its morphometry and bathymetry as well. This system presented transparency (0.8 to 1.28 m), shallow waters (0.5 to 4.7 m), temperature (27.9 to 30.0 ° C), pH (6.01 to 7.86), with well-oxygenated waters (5.5 to 8.03 mg/l), conductivity on the surface and at the bottom (1.61 to 3.53 mS/cm, respectively), with concentrations of ammonium (1.27 to 3.33 mg/l), nitrites (0.009 mg/l) and nitrates (0.5 up to 1.6 mg/l). Bathymetry and morphometry of the lagoon showed an irregular shape, with the bucket as an inverted cone; its maximum length (L_{max}) is 3.63 km and maximum width (B) of 1.64 km, with a total area (a) of 3.13 km² and volume (V) of 5,100,156 m³. It is concluded that the Laguna Milagros is a body of water suitable for recreation; it is healthy in terms of dissolved oxygen conditions, with concentrations of nutrients entering the maximum permissible values (nitrites) (CE-CCA-001/89). It is recommended to use this information for the management and conservation of this aquatic system.

KEY WORDS: hydrological characterization, management, water quality, morphometry, bathymetry, Quintana Roo.

*E-mail: blas@uqroo.edu.mx

Introducción

Los suelos de origen calcáreo ocupan 10 % de la superficie de la tierra y contienen cerca de 25 % del agua dulce disponible para el ser humano (White, Culver, Hernan, Kane y Mylroie, 1995, p. 12; González-Medrano y Hernández-Mejía, 1998, p. 55). En la Península de Yucatán, parte de esta agua se encuentra albergada en sistemas acuáticos como cenotes, lagos, lagunas, entre otros, y de manera general, en el acuífero cárstico de la región, sin embargo, en la mayoría de estos cuerpos de agua se desconoce la calidad y cantidad de agua que guardan (Cervantes-Martínez, 2007, p. 164).

Los sistemas acuáticos de la Península de Yucatán suministran agua para consumo humano y otros usos, con fines recreativos. En centros turísticos la calidad de agua para este uso es un factor primordial para garantizar la protección de la salud de los usuarios y más aún para Quintana Roo, en donde el establecimiento de complejos turísticos se ha agudizado y la población ha crecido en 350 % en los últimos 20 años (Azuz-Adeath y Rivera-Arriaga, 2004, p. 456).

En la mayoría de los sistemas acuáticos de nuestro país existen factores que afectan la calidad de agua, como drenajes pluviales, descargas de aguas residuales tratadas, asentamientos irregulares que no cuentan con infraestructura de saneamiento y alcantarillado. Uno de los métodos básicos para conocer el estado de salud de un ecosistema acuático es realizar estudios de calidad del agua basados en las características físicas, químicas, morfométricas y batimétricas de la misma. Estos parámetros brindan una amplia información sobre las condiciones de salud de los sistemas lacustres, lo cual resulta esencial a la hora de planificar los proyectos asociados con el uso y manejo de estos ambientes (Ruiz-Sevilla, 2002, p. 78).

A partir de la determinación de indicadores físicos: transparencia (m), temperatura del agua (°C); químicos: pH, oxígeno disuelto (mg/l), conductividad (mS/cm^{-1}), concentración de amonio, nitratos y nitritos (mg/l); morfométricos: longitud de la línea de costa (m), área (km^2); y batimétricos: profundidad (m), volumen (m^3); se presenta la caracterización hidrológica y de salud de la laguna Milagros, ubicada en la zona sur de Quintana Roo, México. Esta laguna es importante por su atractivo escénico y afluencia turística. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivos: *a*) incrementar el conocimiento hidrológico y de calidad del agua, en una zona considerada poco estudiada, e incluso como un

sistema acuático aún inexplorado (Cervantes-Martínez, Mezeta-Barrera y Gutiérrez-Aguirre, 2009, p. 177), y b) zonificar la laguna, en función de sus características ambientales. Los resultados obtenidos de la calidad del agua se contrastan con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 y con estándares establecidos por las normas de calidad del agua (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comité Técnico de Normalización Nacional para la Protección Ambiental, 2005, p. 37).

Materiales y métodos

Área de estudio

La laguna Milagros es un cuerpo de agua que se encuentra en el extremo sur del estado de Quintana Roo ($18^{\circ}31'04''$ LN y $88^{\circ}25'34''$ LW) y a una altura sobre el nivel medio del mar entre 1 y 3 m (figura 1). Forma parte de un gran sistema lagunar, junto con la Laguna de Bacalar y el Río Hondo, conectados a través de arroyos (Anónimo, 2011).

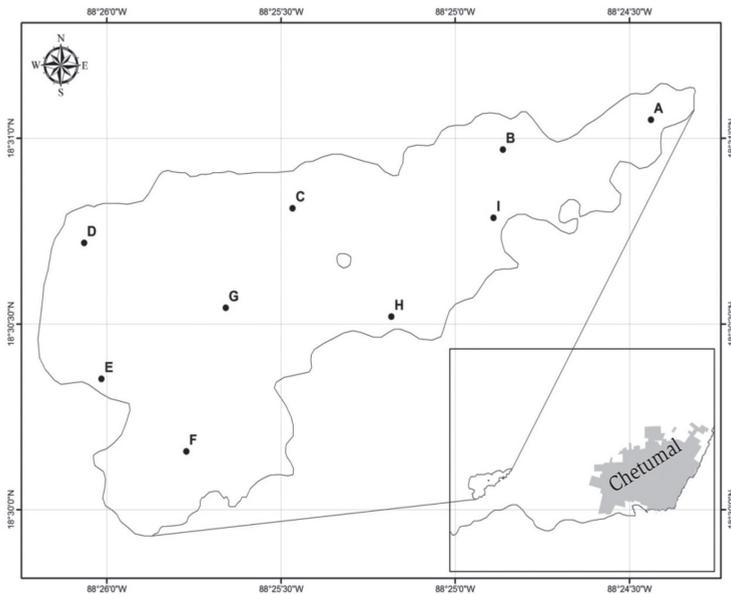


FIGURA 1. Localización de la laguna Milagros y estaciones de muestreo (A-I)

El trabajo de campo se realizó durante la época de secas y en etapa temprana de lluvias (finales de marzo-principios de junio de 2012).

Análisis de parámetros fisicoquímicos

Se muestreó en nueve estaciones (A-I) geoposicionados con un GPS (Global Positioning System) de una ecosonda digital marca Garmin modelo GPSMAP 421s. Las estaciones de muestreo se definieron con base en: 1) influencia de los arroyos de entrada o salida, 2) influencia de la zona urbana y 3) zona de vegetación.

Las muestras se recolectaron en la superficie y fondo de la columna de agua con una botella Van Dorn de 1 L de capacidad. La visibilidad se determinó con un disco de Secchi, la temperatura del agua y el pH fueron medidos en forma simultánea con un medidor de pH (con compensación de temperatura) marca Hanna, modelo HI-991003, el oxígeno disuelto con un oxímetro Hanna HI-9142 y la conductividad con un conductímetro Hanna HI-9635.

Análisis de nutrimentos

Los nutrimentos (mg/l): amonio (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-), fueron determinados mediante los métodos de Nessler, diazotización y reducción de cadmio, respectivamente (Eaton, Clesceri y Greenberg, 1995, p. 1110), utilizando kits de reactivos comerciales Hach y un espectrofotómetro portátil Hach DR/2010.

Morfometría y batimetría

La morfometría se realizó mediante el análisis de los siguientes parámetros: se determinaron longitud máxima ($L_{m\acute{a}x}$, en km) y ancho máximo (B , en km) mediante la herramienta Google Earth (6.1.0.5001) con la función “regla” para medir la distancia entre dos puntos; también área total (a , en km^2), área superficial (A , en km^2) y perímetro o longitud de la línea de costa (l_o , en km) con la herramienta en línea Mapa Digital de México (5.0), del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, mediante la función “medir” que es para distancias y áreas; se calculó asimismo el ancho medio (B_m , en km) mediante la razón área superficial entre longitud máxima:

$$B_m = A / L_{m\acute{a}x}$$

El índice de desarrollo de la línea de costa (F , adimensional) proporciona una medida de la irregularidad del perímetro; si $F = 1$ significa que la cuenca de la laguna es perfectamente circular, y si $F > 1$ significa que la cuenca es irregular, y se determinó con la fórmula:

$$F = (l_0 / 2(\pi A))^{0.5}$$

Las ecuaciones y simbología son de acuerdo con Håkanson (1981 cit. en Roldán-Pérez y Ramírez-Restrepo, 2008, p. 227).

Para efectuar la batimetría se utilizó una lancha fuera de borda y una ecosonda digital GPSMAP 421s. Para el levantamiento batimétrico se elaboró un mapa de 86 transectos mediante la determinación de los puntos georreferenciados en el perímetro de la laguna (Cruz-Ángeles, 2000, p. 45) con el programa ArcMap. Se navegó a cinco nudos y cada 20 segundos se registraron las profundidades con la ecosonda. El mapa batimétrico se realizó con el programa ArcMap, utilizando el método de interpolación: Topo to Raster (Alcocer y Escobar, 1993, p. 172).

La profundidad máxima ($D_{m\acute{a}x}$, en m) se obtuvo después de llevar a cabo la batimetría de la laguna Milagros tomando el valor más profundo. La profundidad media (D_m , en m) se calculó mediante la relación entre el volumen del agua y el área total:

$$D_m = V / a$$

Se obtuvo la profundidad relativa (D_r , en %) por medio del cociente entre la profundidad máxima y el diámetro medio de la laguna:

$$D_r = [D_{m\acute{a}x} / 100] / [2(a/\pi)^{0.5}] = 88.6D_{m\acute{a}x} / (a)^{0.5}$$

Se determinó el volumen (V , en m^3) utilizando la herramienta “cut fill” de ArcMap, donde calcula el cambio del volumen entre dos superficies. Se tomó como base la superficie del suelo, con una altura de cero metros asignada de manera arbitraria, y comparando con el modelo batimétrico de la laguna se obtuvo el volumen.

El índice de desarrollo del volumen (V_d , adimensional) se calculó con la siguiente fórmula:

$$V_d = V_{\text{real}} / V_{\text{cono hipotético}} = 3V / a * D_{\text{máx}} = 3D_m / D_{\text{máx}}$$

Cuando $V_d = 1$, se trata de un cono igual al teórico (invertido); cuando $V_d < 1$, entonces la laguna es de tipo convexo y tiene forma similar a la letra V; si $V_d > 1$ es de tipo cóncavo y tiene aspecto de U; por lo general, estas formas son las típicas, en otras palabras, es la forma ideal de un cuerpo de agua que corresponde a la de un senoide elíptico (Herrera-Anzures, 2002, p. 27; Roldán-Pérez y Ramírez-Restrepo, 2008, p. 221).

Resultados

Los resultados hacen énfasis en el comportamiento de los datos superficiales de la laguna, debido a que los valores obtenidos de la superficie y del fondo del sistema no difieren de manera considerable.

Profundidad y visibilidad al disco de Secchi

De las nueve estaciones analizadas, las que presentaron las mayores profundidades fueron la C y la G con 2.5-4.0 m, y las de menor profundidad fueron la A y la F, ambas con 1.3 m. La mayor y menor profundidad coinciden con los valores máximos y mínimos de visibilidad al disco de Secchi con 1.28 y 0.80 m, respectivamente, siendo el valor promedio de 1.07 m (véase anexos, cuadro 1).

Temperatura del agua

La temperatura superficial del agua osciló entre 27.9 y 29.5 °C, registrándose el valor más alto en la estación E y el más bajo en la A (figura 2). El valor promedio tanto en la superficie como en el fondo fue de 28.9 °C (véase anexos, cuadro 1).



FIGURA 2. Variación de la temperatura del agua en superficie (S) en la laguna Milagros

pH

El pH superficial del agua se encontró en un rango de 6.01 a 7.79 unidades pH, presentándose el valor más elevado en la estación D y el más bajo en la A (figura 3). El promedio en la superficie y el fondo fue de 7.17 y 7.16 unidades pH, respectivamente (véase anexos, cuadro 1).

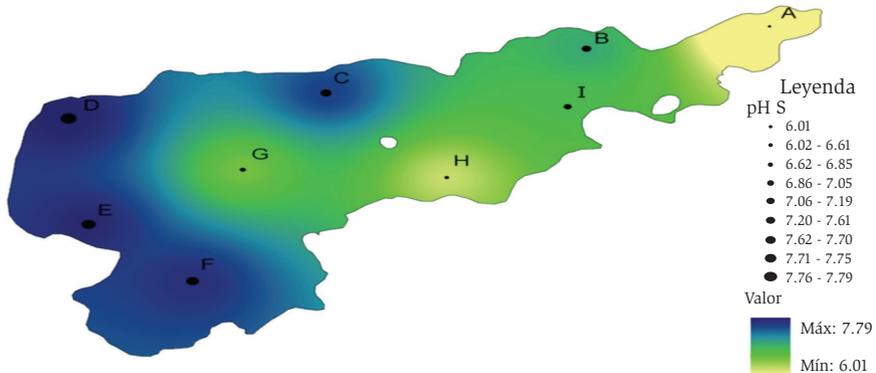


FIGURA 3. Variación del pH del agua en superficie (S) en la laguna Milagros

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto superficial del agua mostró un rango de 5.8 a 8.03 mg/l (figura 4). El valor promedio en la superficie y el fondo fue de 7.15 y 6.28 mg/l, respectivamente (véase anexos, cuadro 1).

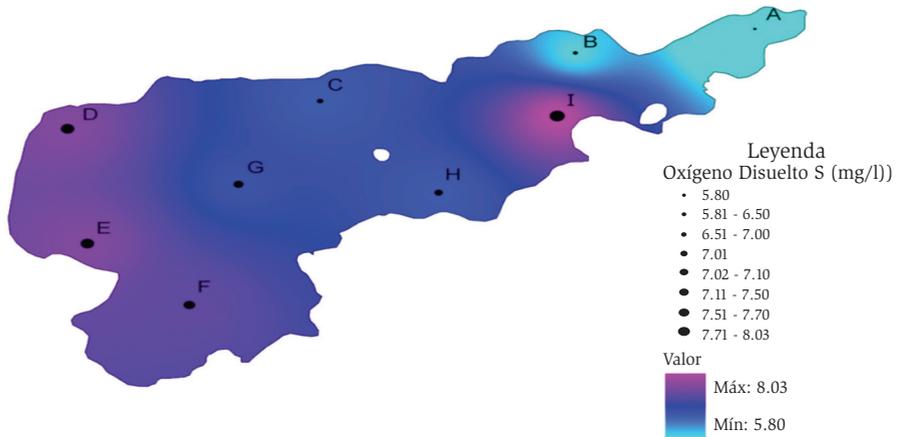


FIGURA 4. Variación del oxígeno disuelto del agua en superficie (S) en la laguna Milagros

Conductividad

La conductividad superficial del agua osciló entre 1.65 y 3.53 mS/cm, con el valor máximo en la estación D y el mínimo en la E (figura 5). El valor promedio en la superficie y el fondo fue de 2.68 y 2.98 mS/cm, respectivamente (véase anexos, cuadro 1).

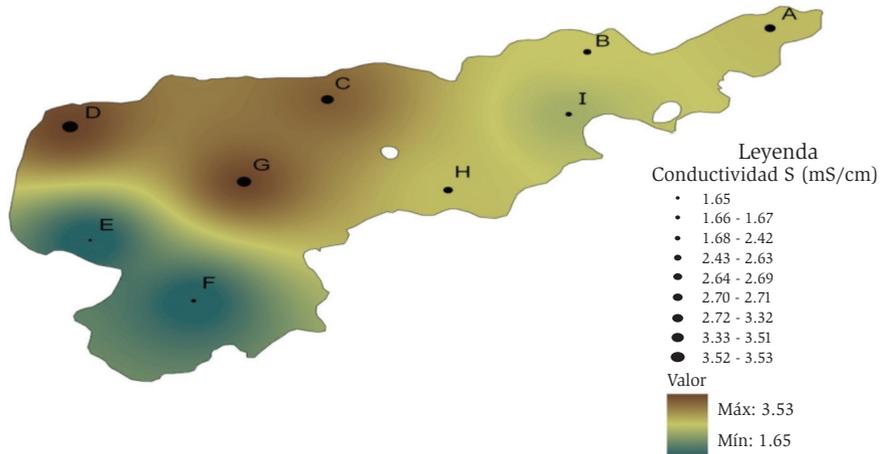


FIGURA 5. Variación de la conductividad del agua en superficie (S) en la laguna Milagros

Amonio

El amonio superficial del agua presentó entre 1.27 y 2.88 mg/l, con la concentración más elevada en la estación F y la más baja en la H (figura 6). El valor promedio en la superficie y el fondo fue de 2.27 y 2.55 mg/l, respectivamente (véase anexos, cuadro 1).

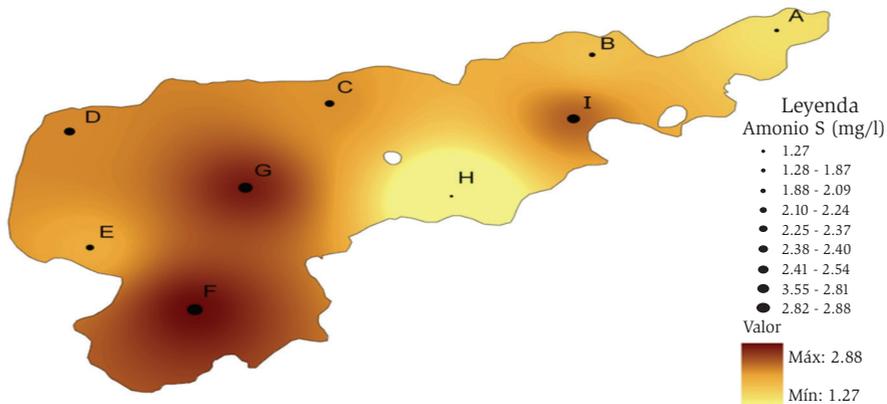


FIGURA 6. Variación de la concentración del amonio en superficie (S) en la laguna Milagros

La concentración de nitrito en la superficie osciló entre 0.001 y 0.008 mg/l, y en el fondo, entre 0 y 0.009 mg/l, con los valores máximos en la estación A y los mínimos en la D (figura 7). Hubo valores indetectables por estar debajo del rango. El valor promedio en la superficie y el fondo fue de 0.004 y 0.003 mg/l, respectivamente (véase anexos, cuadro 1).

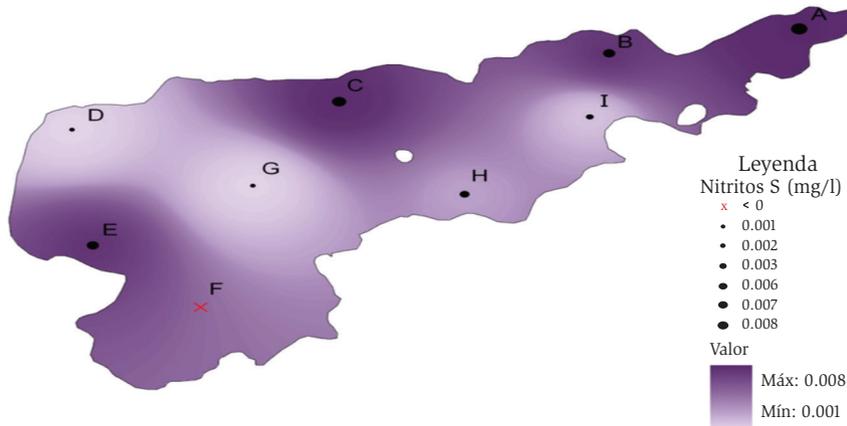


FIGURA 7. Variación de la concentración de nitritos en superficie (S) en la laguna Milagros

Nitratos

Para el ión nitrato, la concentración en la superficie osciló entre 0.9 y 1.6 mg/l, con el valor más alto en la estación D y el más bajo en la B (figura 8). El valor promedio en la superficie y el fondo fue de 1.3 y 0.9 mg/l, respectivamente (véase anexos, cuadro 1).

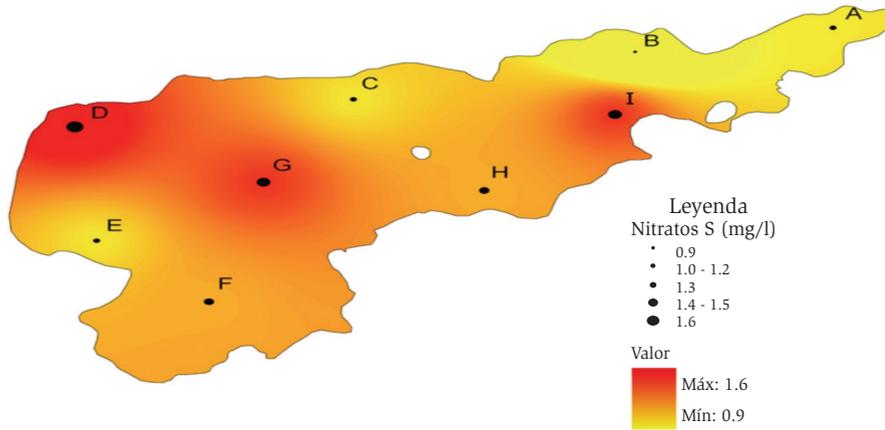


FIGURA 8. Variación de la concentración de nitratos en superficie (S) en la laguna Milagros

Morfometría y batimetría

La laguna Milagros presentó una forma irregular con longitud máxima de 3.63 km y ancho máximo de 1.65 km; tiene un perímetro de 11.10 km, para un área total de 3.13 km² y un volumen de 5 100 156 m³ (véase anexos, cuadro 2). El mapa batimétrico reveló que las zonas más profundas están hacia la parte norte de la laguna, con una dirección que corre horizontalmente en el eje este-oeste. Las estaciones G, C y B son las de mayor profundidad, oscilando entre los 2.5 y 4.5 m (figura 9).

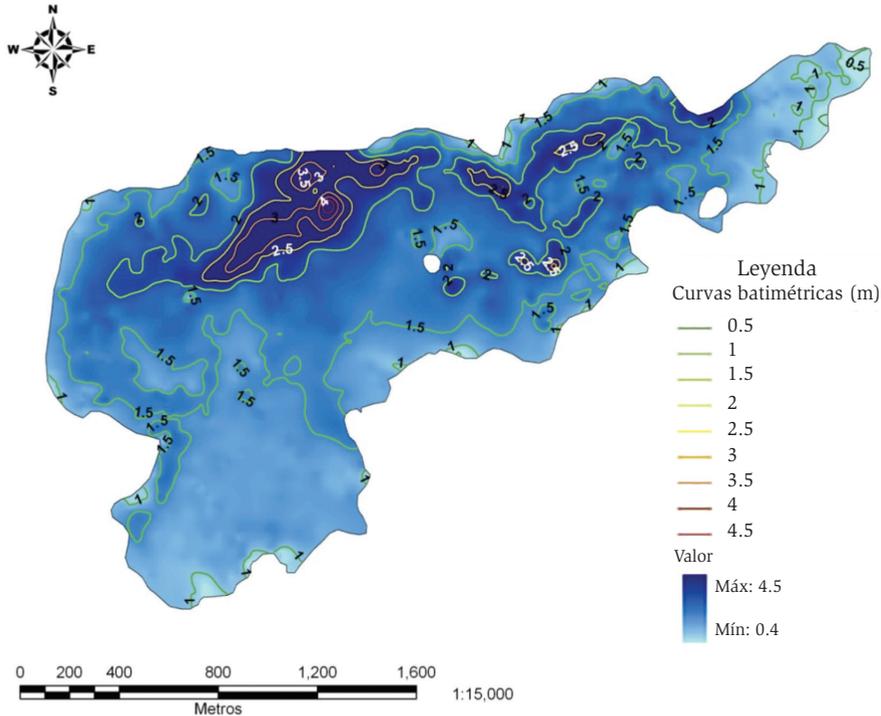


FIGURA 9. Mapa batimétrico y morfométrico de la laguna Milagros

Discusión

La laguna Milagros en su mayor parte tiene menos de 2 m de profundidad y las zonas más profundas se encuentran hacia el norte, enfrente de la población (figura 9). De acuerdo con las profundidades registradas en la laguna, esta se clasifica como un sistema somero, ya que, según Barbanti (1985, p. 10), sistemas acuáticos con profundidades menores a 10 m pueden considerarse como tales. En este sentido, los cuerpos de agua con una profundidad relativamente baja están menos protegidos contra el viento y muestran menor transparencia, lo que causa turbidez en el sistema. En la laguna Milagros se registró una transparencia de 1.28 y 0.80 m, lo cual puede estar relacionado con la presencia de sustancias orgánicas disueltas, fitoplancton, sólidos suspendidos o partículas orgánicas disueltas del fondo, y también con el lavado de la tierra circundante, transportado hacia el sistema por el viento o la lluvia.

En cuanto a los valores de temperatura del agua, oscilaron entre 27.9 y 29.5 °C, por lo que este sistema puede ser clasificado como cálido tropical (Lewis, 1996, p. 220). Sus valores de temperatura coinciden con los reportados para otros sistemas acuáticos de la región; por ejemplo, Carrillo-Ruiz (2003, p. 47) menciona que el sistema lagunar Bacalar mantiene una oscilación termal entre los 27 y 31.5 °C, con una temperatura de 30 °C en la mayor parte del sistema (al final de la época de secas y principio de lluvias). Lo mismo sucede en otros sistemas cársticos de Yucatán (Herrera-Silveira y Comín, 2000).

Respecto a la concentración promedio de oxígeno (7.15 y 6.28 mg/l superficie y fondo, respectivamente), el sistema presenta aguas bien oxigenadas, de acuerdo con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89, para la protección de la vida acuática en agua dulce, los cuales establecen que el valor mínimo permitido es de 5 mg/l (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, 1989; Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Instituto Nacional de Ecología, 2000); todas las estaciones mostraron concentración de más de 5 mg/l de oxígeno y en ningún caso se observaron condiciones de anoxia o valores más bajos que el mínimo permisible. El comportamiento de la temperatura y el oxígeno es importante porque estos influyen en la mayoría de los procesos vitales de los organismos, así como en variados factores abióticos del ecosistema (Betancourt, Suárez y Toledo, 2009).

La condición de si las aguas contienen o carecen de oxígeno determina la transformación de metales y los compuestos de nitrógeno y fósforo (Bostrom, Andersen, Flescher y Jansson, 1988; Chulgoo, Nishimura y Nagata, 2006), por tanto, se debe conocer el comportamiento de la concentración del oxígeno en la columna de agua, ya que es una importante herramienta para recomendar el uso sustentable de este tipo de ambientes acuáticos (Santiago y Vignatti, 2009).

Por otro lado, los valores del pH presentaron poca variación, de 6.01 a 7.79, por lo que el pH del agua fue neutro con tendencia hacia la acidez; sin embargo, estos valores son típicos de cuerpos de agua de paisajes cársticos, con reserva alcalina alta y con el predominio de carbonatos y bicarbonatos como sales amortiguadoras (Cervantes-Martínez, 2005 p. 60). Este comportamiento del pH en los sistemas acuáticos epicontinentales es explicado por su capacidad amortiguadora, relación carbonatos-bicarbonatos, procesos biológicos (fotosíntesis, respiración y actividades de descomposición de materia orgánica), entre otros (Lampert y Sommer, 1997, p. 37).

Los valores promedio de conductividad (2.68 y 2.98 mS/cm superficie y fondo, respectivamente) son bajos en comparación con lo reportado para lagos de la región centro y norte del país, donde se han registrado valores de 6.0 hasta 160 mS cm³, lo cual es característico de cuencas endorreicas y donde los procesos de evaporación y precipitación de sales son dominantes (Alcocer y Escobar, 1993). El comportamiento de esta variable puede ser explicado por: 1) el aporte de agua dulce del Río Hondo que desemboca en la parte suroeste del sistema en estudio, 2) la influencia del agua dulce subterránea (típico de paisajes cársticos) y, 3) al ser laguna Milagros un cuerpo de agua perenne y somero, es probable que presente procesos de evaporación y descomposición de materia orgánica, causando la liberación de iones e incrementando la conductividad del sistema, lo cual puede explicar las concentraciones más elevadas de conductividad en el fondo del sistema. Por otra parte, las estaciones con valores más altos de conductividad (C, D y G) son las más cercanas a la zona urbana; probablemente haya descargas eventuales de aguas residuales domésticas en estos sitios.

Con relación al amonio, todas las estaciones presentaron concentraciones de más de 1.27 mg/l, y por ser mayor a 0.1 mg/l, podría considerarse un indicador de contaminación por aguas residuales domésticas, ya que el amonio es el producto final de la reducción de las sustancias orgánicas e inorgánicas nitrogenadas y debe su origen a factores como: 1) nitrógeno atmosférico, por fijación química; 2) proteínas animales o vegetales, por putrefacción mediante acción bacteriana; y 3) reducción de nitritos (Barrenechea-Martel, 2004, p. 110). La presencia de amonio en el agua está íntimamente relacionada con descargas recientes de desagües, que aportan altas concentraciones de materia orgánica; además, por los aportes de escorrentía terrestres y aguas subterráneas, fertilizantes nitrogenados y excremento de animales (Fuentes y Massol-Deyá, 2002, p. 16).

En el caso de la calidad del agua para la protección de vida acuática, las normas internacionales (Recomendación Nacional Actual sobre Criterios de Calidad del Agua de los Estados Unidos de América y Directiva 78/659/CEE de la Comunidad Económica Europea) utilizan el amonio y establecen como valores máximos entre 0.5 y 1 mg/l. Mientras que para México no está especificado, ya que se registra como nitrógeno total en la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SE-MARNAT-1996), indicando como límite máximo permisible una concentración promedio mensual de 15 mg/l, para descargas en ríos y embalses destinados a

la protección de la vida acuática (Ramírez-Carrillo, Luna-Pabello y Arredondo Figueroa, 2009, p. 93); y en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89), 0.06 mg/l como nitrógeno amoniacal, para la protección de la vida acuática en agua dulce (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, 1989; Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Instituto Nacional de Ecología, 2000). Por lo tanto, con base en las normas internacionales, la concentración del amonio obtenido se encontró por encima del rango máximo permisible.

Las concentraciones promedio de nitratos (1.3 y 0.9 mg/l) son mayores que los nitritos (0.004 y 0.003 mg/l) en superficie y fondo. La concentración del nitrato es resultado de que este compuesto sea químicamente más estable y la forma más oxidada del nitrógeno; lo contrario sucede con los nitritos, que son los de menor concentración. Lo anterior concuerda con los estudios de Kadlec y Knight (1996), quienes encontraron que los nitritos no son químicamente estables en la mayoría de los humedales, por lo que sugieren que los niveles detectables frecuentemente indican asimilación incompleta de nitrógeno y la presencia de una fuente de ingreso de origen antropogénico.

Respecto a la calidad del agua para la vida acuática, las normas internacionales (Recomendación Nacional Actual sobre Criterios de Calidad del Agua de los Estados Unidos de América y Directiva 78/659/CEE de la Comunidad Económica Europea) establecen como valores máximos para nitritos entre 0.05 y 0.09 mg/l, y nitratos entre 0.5 y 0.3 mg/l; mientras que para México, como en el caso del amonio, tampoco está especificado en la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996) para descargas en ríos y embalses destinados a la protección de la vida acuática (Ramírez-Carrillo et al., 2009, p. 96); ni se establecen en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89), para la protección de la vida acuática en agua dulce; sin embargo, sí hay criterios para agua marina (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Instituto Nacional de Ecología, 2000). Por lo tanto, con base en las normas internacionales, los valores obtenidos de nitritos se encontraron dentro del rango permisible, pero los nitratos no. Barrenechea-Martel (2004, p. 116) menciona que en comunidades rurales es común la presencia de nitratos y nitritos en aguas almacenadas en cisternas, por el uso de fertilizantes nitrogenados y la contaminación por la acumulación de excretas humanas y animales.

Desde el punto de vista batimétrico, la longitud ($L_{\text{máx}}$) y el ancho máximo (B) de la laguna Milagros son de 3.63 km y 1.65 km, respectivamente. El área total (a) de la laguna es 3.13 km², eliminando las pequeñas islas que se encuentran dentro de ella y solamente la parte inundada; el área superficial (A) es de 3.12 km² aproximadamente. La profundidad máxima ($D_{\text{máx}}$) que presentó el sistema fue de 4.7 m (figura 9), un perímetro o longitud de la línea de costa (l_0) de 11.1 km y un volumen (V) de 5 100 156 m³. A diferencia de otros lagos cársticos estudiados en Quintana Roo, este es uno de los primeros lagos de la región con valores morfométricos y batimétricos de consideración; por ejemplo, las áreas de lagos analizados en la región de estudio se ubican en un rango de 0.00026-0.028 km², con perímetros de 0.0775-0.054 km y volúmenes de 4 419.8-233 036.9 m³.

En cuanto a la forma de la cuenca, el índice de desarrollo de la línea de costa (F) proporciona una medida de la irregularidad del perímetro. La laguna Milagros presenta un índice de 1.77, siendo un valor que se encuentra por encima de 1, por lo tanto, nos indica que la forma de la cuenca es irregular (Rol-dán-Pérez y Ramírez-Restrepo, 2008, p. 220). De ocho sistemas estudiados por Cervantes-Martínez, Elías-Gutiérrez y Suárez-Morales (2002), solo uno mostró forma más irregular con un valor de línea de costa de 1.28.

Esta información evidencia la diversidad de sistemas acuáticos de la región, con un predominio de sistemas con forma circular sobre aquellos con formas irregulares (Elías-Gutiérrez, Cervantes-Martínez, Gutiérrez-Aguirre y Arce-Ibarra, 2007, p. 430). También se han reportado formas irregulares para otros lagos (por ejemplo, Catemaco) de latitudes tropicales y de importancia turística (Pérez-Rojas y Torres-Orozco, 1992).

De manera general, se concluye que la laguna Milagros es un cuerpo de agua adecuado para actividades recreativas, saludable en términos de condiciones de oxígeno, apto para la protección de vida acuática, con concentraciones de nutrientes que entran en los valores máximos permisibles (nitritos).

Se recomienda emplear esta información para el manejo y conservación de este sistema acuático turístico. Los valores morfométricos y batimétricos pueden considerarse como una línea base para un mejor manejo y aprovechamiento de la laguna; por ejemplo, para una mayor seguridad de los visitantes, se sugiere utilizar las zonas menos profundas para recreación acuática (ubicadas

en la parte sur, sureste, suroeste y centro de la laguna). Por otro lado, cabe señalar que en las zonas antes mencionadas se están dando mayores procesos de azolvamiento, por ende, es importante conservar la cobertura vegetal que circunda a la laguna.

Agradecimientos

El primer autor quiere agradecer a la Universidad de Quintana Roo por las facilidades otorgadas para la realización de este proyecto. Se extiende un agradecimiento especial a los ejidatarios de Huay-Pix por permitir llevar a cabo el estudio. Dos revisores anónimos mejoraron sustancialmente la versión inicial de este manuscrito.

Fuentes consultadas

- Alcocer, J. y Escobar, E. (1993). Morphometric characteristics of six Mexican coastal-lakes related to productivity. *Revista de Biología Tropical*, 41(2), 171-179.
- Anónimo. (2011). *Laguna Milagros, México*. Recuperado de <http://www.lake-lubbers.com/laguna-milagros-1969/> [2012, 8 de febrero].
- Azuz-Adeath, I. y Rivera-Arriaga, E. (2004). Escalas espaciales y temporales del manejo costero. En E. Rivera-Arriaga, G. J. Villalobos-Zapata, I. Azuz-Adeath y F. Rosado May (eds.), *El manejo costero en México* (pp. 27-38). Campeche: Universidad Autónoma de Campeche/Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/CETYS-Universidad/Universidad de Quintana Roo.
- Barbanti, L. (1985). Some problems and new prospects on physical limnology - Lymnology: A review. *Memorie dell' Istituto italiano di Idrobiol*, 43, 1-32.
- Barrenechea-Martel, A. (2004). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. [2012, 9 de octubre].
- Betancourt, C., Suárez, R. y Toledo, L. (2009). Patrones de distribución temporal de algunas variables físicas y químicas en el embalse Paso Bonito, Cienfuegos, Cuba. *Limnética*, 28(1), 23-34.

- Bostrom, B., Andersen, J. A., Flescher, S. y Jansson, M. (1988). Exchange of phosphorus across the sediment-water interface. *Hidrobiología*, 179, 229-244.
- Carrillo-Ruiz, A. A. (2003). *Caracterización de la flora bacteriana y fúngica en la Columna de Agua del Sistema Lagunar Bacalar* (Tesis de licenciatura en Ingeniería Ambiental). Universidad de Quintana Roo, División de Ciencias e Ingenierías, México.
- Cervantes-Martínez, A. (2005). *Análisis limnológico de dos sistemas cársticos (cenotes) de la Península de Yucatán, México con énfasis en la variación espacial y temporal del zooplancton* (Tesis de doctorado en Ecología y Desarrollo Sustentable). El Colegio de la Frontera Sur, México.
- Cervantes-Martínez, A. (2007). El balance hídrico en cuerpos de agua cársticos de la Península de Yucatán: realidades y retos. *Teoría y Praxis*, 3, 163-172.
- Cervantes-Martínez, A., Elías-Gutiérrez, M. y Suárez-Morales, E. (2002). Limnological and morphometrical data of eight karstic systems “cenotes” of the Yucatan Peninsula, Mexico, during the dry season (February-May, 2001). *Hydrobiologia*, 482, 167-177.
- Cervantes-Martínez, A., Mezeta-Barrera, M. y Gutiérrez-Aguirre, M. A. (2009). Limnología básica del lago cárstico turístico Cenote Azul en Quintana Roo, México. *Hidrobiológica*, 19(2), 177-180.
- Chulgoo, K., Nishimura, Y. y Nagata, T. (2006). Role of dissolved organic matter in hypolimnetic mineralization of carbon and nitrogen in large, monomictic lake. *Limnology and Oceanography*, 5(1), 70-78.
- Cruz-Ángeles, M. A. (2000). *Aspectos morfométricos de tres lagunas costeras de Chiapas, la Carreta, Pereyra y el Bobo* (Tesis de licenciatura en Hidrobiología). Universidad Autónoma Metropolitana, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Departamento de Hidrobiología, México.
- Eaton, A. D., Clesceri, L. S. y Greenberg, A. E. (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington, D. C.: American Public Health Association.
- Elías-Gutiérrez, M., Cervantes-Martínez, A., Gutiérrez-Aguirre, M. A. y Arce-Ibarra, A. M. (2007). Los cenotes y lagunas del centro y sur de la Península de Yucatán. En G. de la Lanza Espino (comp.), *Las aguas interiores de México, conceptos y casos* (pp. 423-446). México: AGT Editor.

- Fuentes, F. y Massol-Deyá, A. (2002). *Manual de laboratorios: Ecología de microorganismos*. Universidad de Puerto Rico, Puerto Rico. Recuperado de <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p3-nitrogeno.pdf> [2012, 19 de abril].
- González-Medrano, F. y Hernández-Mejía, G. (1998). Las dolinas de Tamaulipas. *Ciencias*, 50, 56-58.
- Håkanson, L. A. (1981). *A Manual of Lake Morphometry*. Berlín: Springer-Verlag.
- Herrera-Anzures, L. (2002). *Batimetría y análisis morfométrico de las lagunas Chantuto y Panzacola, Chiapas* (Tesis de licenciatura en Hidrobiología). Universidad Autónoma Metropolitana, Ciencias Biológicas y de la Salud, Departamento de Hidrobiología, México.
- Herrera-Silveira, J. A. y Comín, F. A. (2000). An introductory account of types of aquatic ecosystems of Yucatan Peninsula (SE Mexico). En M. Munawar, S. G. Lawrence, I. F. Munawar y D. F. Malley (eds.), *Aquatic Ecosystems of Mexico. Status and Scope* (pp. 213-227). Leiden: Backhuys Publishers.
- Kadlec, R. H. y Knight, R. L. (1996). *Treatment Wetlands*. Boca Raton: CRC Press/Lewis Publishers.
- Lampert, W. y Sommer, U. (1997). *Limnoecology: The Ecology of Lakes and Streams*. Nueva York: Oxford University Press.
- Lewis, M. W. Jr. (1996). Tropical lakes: How latitude make a difference. En F. Schiemer y K. T. Boland (eds.), *Perspectives in Tropical Limnology*. Academic Publishing.
- Pérez-Rojas, A. y Torres-Orozco, R. (1992). Geomorfología y batimetría del lago de Catemaco, Veracruz, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, 19(1), 19-24.
- Ramírez-Carrillo, H. F., Luna-Pabello, V. M. y Arredondo-Figueroa, J. L. (2009). Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8(1), 93-99.
- Roldán-Pérez, G. A. y Ramírez-Restrepo, J. J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical* (2ª ed.). Medellín: Universidad de Antioquia.
- Ruiz-Sevilla, G. (2002). *Variaciones morfométricas del lago de Zirahuén* (Tesis de maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

- Santiago, E. y Vignatti, A. (2009). Determinación del estado trófico y de la capacidad de carga del embalse Casa de Piedra. *BioScribia*, 2(1), pp. 41-51.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. (13 de diciembre de 1989). Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89. *Diario Oficial de la Federación*.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comité Técnico de Normalización Nacional para la Protección Ambiental. (2005). Norma Mexicana de Análisis PROY-NMX-AA-121-SCFI-2005. Aguas naturales epicontinentales, costeras y marinas-muestreo. México.
- Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Instituto Nacional de Ecología. (2000). *La calidad del agua en los ecosistemas costeros de México*. México: Autor.
- White, W. B., Culver, D. C., Hernan, J. S., Kane, T. C. y Mylroie, J. E. (1995). Karst lands. *American Science*, 83, 450-459.



Anexos

CUADRO 1. Valores y promedio general de los parámetros fisicoquímicos y nutrimentos

Estación	Parámetros Físico-químicos								Nutrimentos							
	P	Trans.	T	pH		O.D.		C		Amonio		Nitritos		Nitratos		
	(m)	(m)	(°C)	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	
A	1.3	0.84	27.9	28.2	6.01	6.38	5.8	5.5	2.71	3.45	1.87	2.66	0.008	0.009	1.2	1.1
B	2.0	0.95	28.4	28.4	7.19	6.11	6.5	6.3	2.63	2.69	2.09	2.91	0.006	0.002	0.9	0.5
C	1.6	1.28	29.2	28.8	7.61	7.61	7.0	6.4	1.61	3.32	2.37	2.27	0.007	n/d	1.2	1.3
D	1.6	1.20	29.2	28.8	7.79	7.86	7.7	6.4	3.53	3.39	2.40	3.33	0.001	0	1.6	0.7
E	1.6	1.16	29.2	28.8	7.75	7.85	7.7	5.7	1.65	3.53	2.24	2-33	0.006	0.006	1.2	0.8
F	1.3	0.80	29.4	30.0	7.7	7.75	7.5	6.1	1.67	3.33	2.88	1.37	n/d	0.006	1.3	0.8
G	3.4	1.18	28.9	28.8	6.85	7.49	7.1	6.9	3.51	3.47	2.81	3.05	0.001	0.002	1.5	0.7
H	1.5	1.00	29.2	29.1	6.61	6.57	7.01	6.05	2.69	2.69	1.27	2.87	0.003	n/d	1.3	1.2
I	1.8	1.22	28.8	29.2	7.05	6.83	8.03	7.2	2.42	2.68	2.54	2.2	0.002	n/d	1.5	1.2
Promedio	1.8	1.07	28.9	28.9	7.17	7.16	7.15	6.28	2.68	2.98	2.27	2.55	0.004	0.003	1.3	0.9

Profundidad (P), Transparencia (Trans.), Temperatura (T), Oxígeno disuelto (O.D.), Conductividad (C), Superficie (S), Fondo (F), no detectable (n/d).

CUADRO 2. Resultados de los parámetros morfológicos y morfométricos de la Laguna Milagros, Huay-Pix, Quintana Roo

Parámetros	Resultados
Longitud máxima	$L_{m\acute{a}x} = 3.63 \text{ km}$
Ancho máximo	$B = 1.65 \text{ Km}$
Área total	$a = 3.13 \text{ Km}^2$
Perímetro o longitud de la línea de costa	$l_0 = 11.10 \text{ Km}$
Área superficial	$A = 3.12 \text{ Km}^2$
Ancho medio	$B_m = 0.86 \text{ Km}$
Índice de desarrollo de la línea de costa	$F = 1.77$
Profundidad máxima	$D_{m\acute{a}x} = 4.7 \text{ m}$
Profundidad media	$D_m = 1.63 \text{ m}$
Profundidad relativa	$D_r = 0.2 \%$
Volumen	$V = 5 \ 100 \ 156 \text{ m}^3$
Índice de desarrollo del volumen	$V_d = 1.04$