

Recursos acuáticos costeros del sureste

VOLUMEN II

Alberto J. Sánchez
Xavier Chiappa-Carrara
Roberto Brito Pérez
editores

Recursos acuáticos costeros del sureste

VOLUMEN II

Recursos acuáticos costeros del sureste

VOLUMEN II

Alberto J. Sánchez
Xavier Chiappa-Carrara
Roberto Brito Pérez
editores



2012
México

Recursos acuáticos costeros del sureste vol. II
editores

Alberto J. Sánchez (UJAT)
Xavier Chiappa-Carrara (UNAM)
Roberto Brito Pérez (UNACAF)

Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica Conacyt-Gobierno del Estado de Yucatán
Red para el Conocimiento de los Recursos Costeros del Sureste
Consejo de Ciencia, Innovación y Tecnología del Estado de Yucatán
Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación, Conacyt
Sistema de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico del Estado de Yucatán
Universidad Nacional Autónoma de México
Universidad Autónoma del Carmen
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Villahermosa

ISBN 978-607-9060-06-0 (obra completa)
ISBN 978-607-9060-08-4 (volumen II)
D.R. © Fondo Mixto Conacyt-Gobierno del Estado de Yucatán, 2012
calle 23 Núm. 122 x 24, fraccionamiento Loma Bonita
CP 97205, Mérida, Yucatán, México
J (999)938.0400; 938.0451; 924.8437
www.cienciaytecnologia.yucatan.gob.mx

D.R. © Red para el Conocimiento de los Recursos Costeros del Sureste, 2012
Puerto de Abrigo s/n
CP 97356, Sisal, Yucatán, México
J (988)931.1000
www.sisal.unam.mx/recorecos

D.R. © Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad Académica Sisal, 2012
Puerto de Abrigo s/n
CP 97356, Sisal, Yucatán, México
J (988)931.1000
www.sisal.unam.mx

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio, sin el permiso escrito de los titulares de los derechos.

Coordinación general de obra

Xavier Chiappa Carrara

Coordinación editorial

Misael Hernández Martínez

Cuidado de edición y corrección de textos

Alejandrina Garza de León

Diseño editorial de interiores, de cubierta

infografía y formación

Sonia Olvera Carrasco

Fotografía en color y de cubierta

Pim Schalkwijk

Traducción y corrección de textos en inglés

Andrea Raz-Guzman

GC
1005.3
.M6
.R43
2012

Recursos acuáticos costeros del sureste / Alberto
J. Sánchez ... [et al.], editores ; prólogo,
José Narro Robles, c2012.

1. Recursos marinos-México. 2. Recursos marinos-
Costa del golfo de México. 3. Recursos marinos-México-
Región del Caribe. 4. Recursos marinos-Costa del Pacífico
(sur de México). 5. Conservación de los recursos naturales-
México. I. Sánchez, Alberto J.
ISBN 978-607-9060-06-0 (obra completa)
ISBN 978-607-9060-07-7 (v. I)
ISBN 978-607-9060-08-4 (v. II)



Editado e impreso en Mérida-México
Made and printed in Merida-Mexico

RECorecos
Red para el
conocimiento de los recursos costeros del sureste

Variación estacional de temperatura y salinidad en la laguna la Carbonera, Yucatán, 2009-2010

Seasonal variation of temperature and salinity in the lagoon la Carbonera, Yucatan, 2009-2010

G Jerónimo[†], J Gómez-Valdés, M Badillo,
K López-Aguilar, C Galindo, A Gallardo, J Loera,
L Arroyo-Pedraza, X Chiappa-Carrara

(GJ) (MB) (CG) (JL) (AG) (LAP) (XCC) UNAM-Facultad de Ciencias, UMDI-Sisal, Puerto de Abrigo s/n, CP 97355, Sisal, Yucatán, México. chiappa@unam.mx (JGV) Departamento de Oceanografía Física, CICESE. Baja California, México (KLA) Facultad de Química, campus Sisal UNAM, Yucatán, México

Resumen

En este trabajo se estudia la variabilidad de la temperatura y la salinidad en el sistema lagunar la Carbonera, que se ubica en la región noreste de la costa del estado de Yucatán. Fueron analizados datos mensuales medidos mediante un instrumento multiparámetro en la columna de agua en 12 estaciones para el periodo comprendido entre abril de 2009 y febrero de 2010. En cada estación fueron calculados los campos medios y las señales estacionales de cada variable mediante la técnica de análisis armónico. Se encontró que en laguna se establecen cuatro zonas de diferente variabilidad: 1) la zona de la entrada de la laguna (boca), la que exhibió una variabilidad intermedia controlada por los intercambios de agua con el mar; 2) la zona de mezcla, situada al oeste de la boca, sus propiedades termodinámicas mostraron que ésta es una región entre el dominio de las aguas oceánicas y el dominio de agua subterránea; 3) la zona de dominio de agua dulce, ubicada en la parte más austral del plan de estaciones, en donde se encontraron los valores más bajos de temperatura y salinidad, además de ser el área de menor variabilidad, la salinidad reveló que la presencia de agua dulce es permanente; 4) la zona de valores más altos de temperatura y salinidad, ubicada al este de la boca, esta región está controlada por la circulación de la marea.

71

Palabras clave

temperatura, salinidad, variación estacional, la boca de la Carbonera

Abstract

The variability of temperature and salinity was studied in the lagoon system of la Carbonera, located on the northeastern coast of the state of Yucatan. Monthly data collected with a multiparameter instrument in the water column of 12 stations were analysed for the period of April 2009 to February 2010. The mean fields and the seasonal signals of each variable were calculated at each station with the harmonic analysis technique. Four different areas were identified in the lagoon: 1) the area of the lagoon inlet with an intermediate variability controlled by the mixing of the water with sea water, 2) the mixed area to the west of the inlet where thermodynamic properties indicate this region lies between the dominant ocean water and the dominant underground water, 3) the southern part of the grid of stations where salinity indicates there is a permanent presence of freshwater, with the lowest temperature and salinity values and the least variability, and 4) the area to the east of the inlet controlled by tidal circulation, with the greatest values of temperature and salinity.

Key words

temperature, salinity, seasonal variation, la Carbonera lagoon

INTRODUCCIÓN

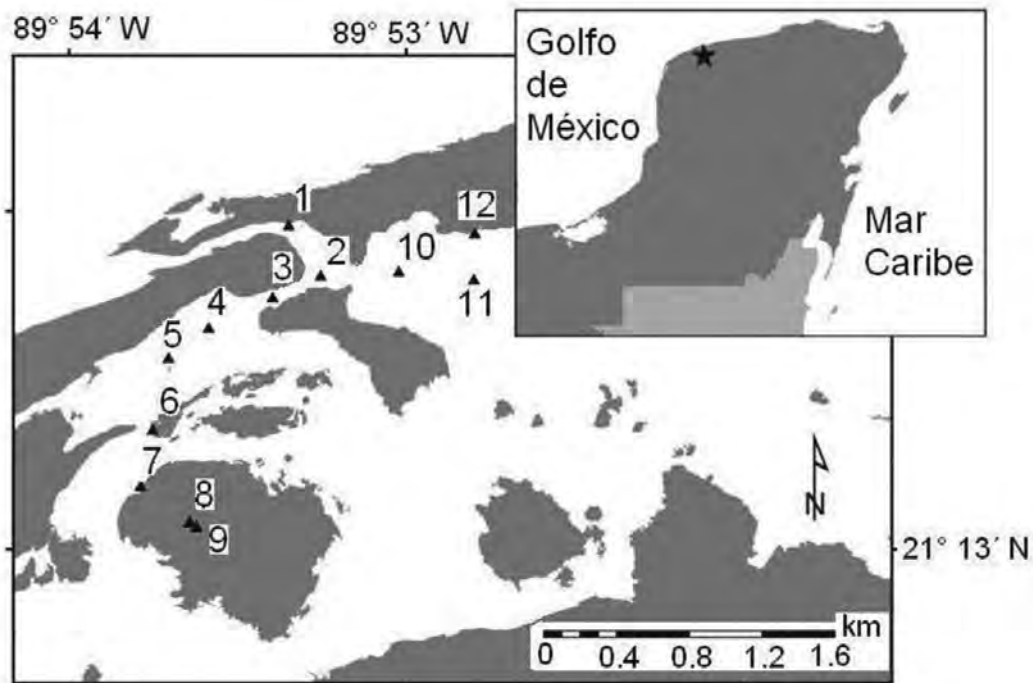
El estado de Yucatán se encuentra en la cuenca sedimentaria de Chicxulub (Perry *et al.* 1995). Esta cuenca es de una estructura cárstica, formada por el impacto de un meteorito en un área somera con depósitos de evaporitas y andesitas durante la transición del Cretácico al Terciario, dando origen a un cráter de aproximadamente 180 km de diámetro, bordeado por una banda semicircular de anillos múltiples con presencia de dolinas (cenotes) alineadas, producto de la disolución del material calizo depositado (Perry *et al.* 1995). En la cuenca de Chicxulub los anillos son zonas de alta permeabilidad, tanto por la presencia misma de los cenotes como por las rupturas de la barra arenosa litoral, y la alta concentración de manantiales donde el anillo intercepta la costa (Batllori-Sampedro *et al.* 2006). Se ha reportado que en dirección hacia el anillo ocurre una caída en el nivel del agua subterránea (Perry & Velázquez 1993). De esta manera, el anillo de cenotes afecta el tiempo de residencia de las masas de agua subterránea y tiende a aislar, en términos hidrogeológicos, a la cuenca de Chicxulub del resto de la península de Yucatán (Batllori-Sampedro *et al.* 2006).

Además, el estado de Yucatán está formado por una plataforma caliza emergente, ligeramente inclinada hacia el Norte, de morfología cárstica, por lo que carece de ríos superficiales, sin embargo, cuenta con una amplia red de corrientes subterráneas por donde el agua fluye a través de cavernas (Casares *et al.* 2006). El flujo de agua subterránea ocurre por medio de conductos de disolución, o bien de manera difusa (Casares *et al.* 2006). El acuífero al noroeste de Yucatán contiene un lente de agua dulce que flota sobre agua más salina y densa que penetra hasta 40 km tierra adentro (Steinich & Marín 1996). El acuífero se encuentra libre, excepto por una banda estrecha a lo largo de la costa (Perry *et al.* 1989), y es la fuente de agua dulce única al noroeste de Yucatán.

El promedio anual de precipitación en Yucatán ha sido estimado en 1,025 mm, los máximos de precipitación ocurren al Sur (hasta 1,300 mm), cuya distribución disminuye gradualmente hacia la costa hasta alcanzar los 500 mm (Sánchez-Pinto *et al.* 2005). Normalmente el periodo de lluvia más intensa comienza entre los meses de mayo y octubre, y de noviembre a abril se establece un periodo seco (Sánchez-Pinto *et al.* 2005). La temperatura media anual es de 26 °C, los valores de temperatura mínima ocurren entre diciembre y enero, mientras que los valores de temperatura máxima ocurren entre julio y agosto (SARH 1988). Considerando la temperatura media anual, la media anual de evapotranspiración en Yucatán ha sido estimada en 900 mm (Lesser 1976).

La laguna la Carbonera es un sistema lagunar que se ubica en la región noroeste de la costa del estado de Yucatán (21°13'56" N, 89°53'30" O) (Figura 1). El sistema está conectado con el mar por una boca estrecha que se formó a consecuencia del huracán Gilberto que azotó las costas yucatecas en 1988 rompiendo la isla de barrera que separaba el mar de la ciénaga (Palacios-Sánchez & Vega-Cendejas 2010). En septiembre de 2002, producto del impacto del huracán Isidoro en la zona, la forma de la Carbonera fue modificada con la desaparición del cordón arenoso que la formaba, quedando la ciénaga en contacto directo con el mar (Palacios-Sánchez & Vega-Cendejas 2010). En los años siguientes, la franja de arena se ha ido restableciendo gradualmente recobrando su forma original.

Figura 1
Zona de estudio y estaciones de muestreo (triángulos)



El sistema lagunar la Carbonera es paralelo a la costa, limita al Norte con una franja arenosa, al Sur con la duna costera que presenta en su borde manglares, al Este se une con la ciénaga. Tiene una longitud aproximada de 5 km en la dirección paralela a la costa y de aproximadamente 4 km en la dirección perpendicular a la costa. Dos de las principales características de este cuerpo de agua son su poca profundidad (~ 30 cm) y la confluencia de aguas de origen oceánico y de agua dulce de origen terrestre subsuperficial producto de manantiales que afloran a lo largo del sistema lagunar.

Con la finalidad de estudiar la variabilidad espacio-temporal de la comunidad de peces en la laguna y su relación con la variabilidad de la dinámica y termodinámica del cuerpo de agua, en abril de 2008 comenzó un programa de monitoreo mensual titulado “Variaciones espacio-temporales de

la comunidad de peces de la boca de la Carbonera en la costa norte de Yucatán”. Desde entonces, se han llevado a cabo mediciones mensuales de variables biológicas, químicas y físicas. La información acumulada de las mediciones de temperatura y salinidad permite realizar un estudio confiable sobre la caracterización de la variación mensual de estos parámetros físicos.

El objetivo de este trabajo es obtener la variabilidad de las señales estacionales de la temperatura y de la salinidad con el uso de la información del programa mencionado. Se emplean las series de tiempo de doce estaciones hidrográficas, ubicadas a lo largo del sistema lagunar, en las que se midieron la temperatura y la salinidad en la superficie de la columna de agua con periodicidad mensual.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el programa de monitoreo en la Carbonera se cubre un total de 12 estaciones. Las estaciones fueron seleccionadas considerando las dificultades logísticas (zonas de fácil acceso), y las zonas en las que la altura de la columna de agua no es nula a lo largo del año. La superficie que las estaciones abarcan es del orden de dos kilómetros cuadrados, del orden de 2 km en dirección perpendicular a la costa, en tanto que en la dirección paralela a la costa es del orden de 1 km. Las dimensiones de la boca del sistema lagunar son variables, exhibe un ancho aproximado de 70 m y 300 m de largo. La distancia entre estaciones es variable, pero en general fue de aproximadamente 20 m. El plan de estaciones se recorre comenzando desde las estaciones más alejadas de la boca hacia la boca misma, comúnmente el monitoreo se inició a las 10 horas y terminó a las 15 h. En cada campaña se tomaron mediciones de parámetros biológicos, químicos y físicos.

Los datos empleados en este estudio provienen de 11 campañas de mediciones de la temperatura y la salinidad realizadas entre abril de 2009 y febrero de 2010, en la superficie de la columna de agua. En todas las campañas se utilizó un analizador de agua EC300 marca YSI, cuyo sensor de temperatura tiene una precisión de 0.1 °C y el de salinidad de 0.1.

Para analizar la distribución espacial del campo medio de cada variable, el promedio fue calculado en el tiempo mediante la ecuación:

$$\langle P_i(\vec{x}) \rangle = \frac{1}{N_{t_f}} \sum_{t=1}^{N_{t_f}} P_{t,i}(\vec{x}) \quad (1)$$

donde $P_{t,i}(\vec{x})$ es la temperatura o la salinidad en la i -ésima estación de monitoreo, N_{t_f} es el número de datos al tiempo final, y el símbolo $\langle \rangle$ indica promedio temporal. Como una medida de la variabilidad, la desviación estándar alrededor del promedio fue calculada para cada variable mediante la ecuación (e.g., Jerónimo & Gómez-Valdés 2006):

$$\sigma_{P_i} = \frac{1}{N_{t_f}} \sum_{t=1}^{N_{t_f}} \left(P_{t,i}(\vec{x}) - \langle P_i(\vec{x}) \rangle \right)^2 \quad (2)$$

en donde $\langle P_i(\vec{x}) \rangle$ es el promedio en el tiempo de la temperatura o la salinidad en la i -ésima estación de monitoreo, P_i es la temperatura o salinidad en la i -ésima estación de monitoreo, N_{t_f} es el número de datos al tiempo final.

76

Para obtener la marcha a escala estacional de las series de tiempo de la temperatura se ajustó un modelo armónico directamente sobre los datos medidos. Siguiendo a Gómez-Valdés & Jerónimo (2009) el modelo se expresa como:

$$P_i(\vec{x}) = \{A_1(\vec{x}) \cos(\phi_1 t - f_1) + A_2(\vec{x}) \cos(\phi_2 t - f_2)\} \quad (3)$$

donde P_i es la temperatura o salinidad de cada serie de tiempo en cada estación, A_1 y A_2 son las amplitudes de la componente anual y semianual, ϕ_1 y ϕ_2 son las frecuencias de los armónicos anual y semianual, f_1 y f_2 son las fases de los armónicos anual y semianual, t es el tiempo. La varianza contenida en la señal estacional, extraída para cada variable por el modelo (V_j) fue calculada de la siguiente manera:

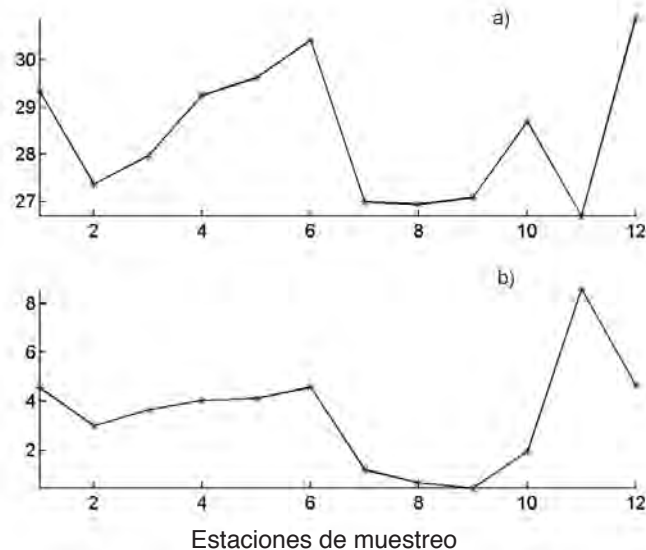
$$V_j = \frac{|A_j(\vec{x})|}{\sum_{i=0}^2 |A_i(\vec{x})|} \quad (4)$$

RESULTADOS

La distribución promedio de la temperatura exhibió una zona de temperatura elevada, entre 29 °C y 31 °C. Estos máximos locales se presentaron entre las estaciones 4 a la 6, al oeste de la boca de la laguna. Un segundo máximo local ocurrió en la estación 12, ubicada al noreste de la boca. Una zona de mínima temperatura promedio (~ 27 °C) se estableció entre las estaciones 7 a la 9, ubicadas en la dirección austral del plan de estaciones (Figura 2). En el área que estas estaciones abarcaron se encontró un petén, el cual tiene un manantial en su centro con aporte de agua subterránea. Un segundo mínimo de temperatura (~ 26.5 °C) se detectó en la estación 11, ubicada al sureste de la boca.

La distribución de la desviación estándar del campo de temperatura mostró una zona de máxima variabilidad alrededor del campo medio, donde la desviación estándar disminuyó de 8.5 °C a 2 °C; se trata de la zona este, entre las estaciones 10 y 12. Mientras que una zona de mínima variabilidad, entre 1 °C y 1.5 °C, se estableció entre las estaciones 7 y 9. Por otro lado, una zona de variabilidad con magnitud intermedia entre las anteriores, entre 3 °C y 4.5 °C, se registró entre las estaciones 1 a la 6, ubicadas desde la boca hasta la zona oeste del plan de estaciones (Figura 2).

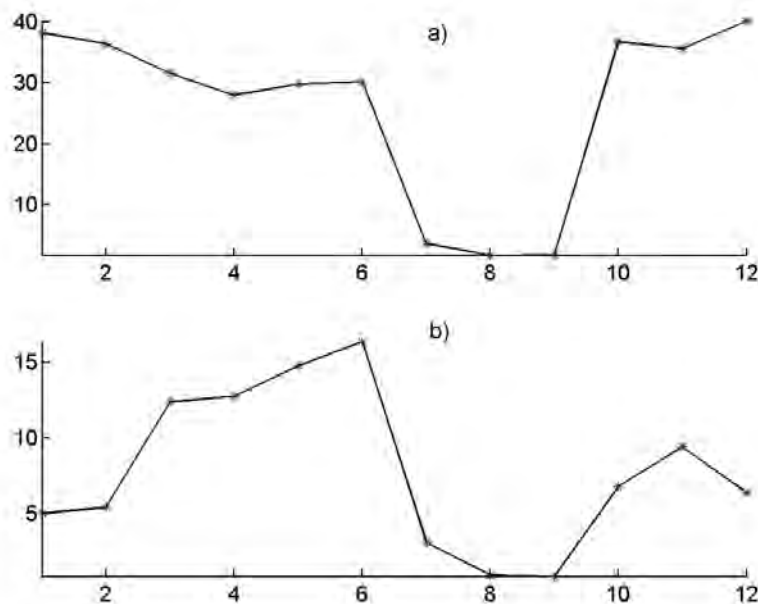
Figura 2
a) promedio y b) desviación estándar de la temperatura



La distribución del campo medio de la salinidad en la parte superior de la columna de agua exhibió un máximo local de salinidad entre 30 y 38, desde la estación 1 a la estación 6, ubicadas entre la boca y la zona occidental de la laguna. En el área cubierta por las estaciones 7 a la 9 ocurrió el mínimo de salinidad, entre 0 y 2, estas estaciones se ubican en la zona austral del plan de estaciones, en la zona del petén. Otros valores máximos del campo medio de salinidad, entre 38 y 40, se presentaron entre las estaciones 10 a la 12, que se ubican al este de la boca de conexión (Figura 3).

La distribución de la desviación estándar del campo de salinidad mostró una zona de máxima variabilidad alrededor del campo medio, con valores entre 11 y 16, que se extendieron desde la estación 3 hasta la estación 6, ubicadas al oriente de la boca. Entre las estaciones 7 a la 9 se estableció una zona de variabilidad mínima, con valores entre 0 y 4. Mientras que una zona de variabilidad intermedia, entre 5 y 10, se presentó en las estaciones 1 y 2, y de la estación 10 a la estación 12; las estaciones 1 y 2 que se ubican en la boca las estaciones de la 10 a la 12 a levante (Figura 3).

Figura 3
a) promedio y b) desviación estándar de la salinidad



Los resultados anteriores sugieren la existencia de al menos tres zonas de variabilidad distinta. Por ello, con la finalidad de estudiar si se establecen zonas de variabilidad diferente a lo largo del sistema lagunar de la Carbonera a escala estacional, se llevó a cabo un análisis de la señal estacional, ajustando dos armónicos de frecuencias diferentes a los datos medidos en las doce estaciones ubicadas a lo largo de la laguna. Los resultados de este análisis se muestran en conjuntos de tres estaciones.

El ajuste en dos armónicos para el conjunto comprendido por las estaciones 1 a la 3, localizadas en la boca de la laguna, mostró que los valores máximos de la temperatura, entre 32 °C y 34 °C, se presentaron en octubre (Figura 4). La temperatura exhibió una tendencia a aumentar, de 27 °C a 32 °C, en el periodo comprendido entre los meses de septiembre y octubre. Un mínimo local de temperatura (~ 20 °C) sucedió en febrero, un segundo mínimo local (~ 26 °C) ocurrió en noviembre. Los máximos valores de la salinidad, entre 45 y 50, se presentaron en octubre. Los valores mínimos, entre 10 y 20 para las estaciones 2 y 3, ocurrieron en noviembre. La estación más alejada de la boca exhibió los valores mínimos de salinidad (~ 10). En la estación 3 la variación de la salinidad sigue un patrón similar al patrón de variabilidad de la temperatura.

El ajuste en dos armónicos para el conjunto comprendido por las estaciones 4 a la 6, ubicadas al oeste de la boca, mostró un máximo local de la temperatura que las tres estaciones compartieron, del orden de 30 °C, ocurre en octubre. Un segundo máximo local de temperatura se estableció en las estaciones 4 y 5, se presentó en marzo (~ 32 °C), en cambio en la estación 6 el segundo máximo local de temperatura (~ 32 °C) ocurrió en el mes de agosto (Figura 5). La temperatura presentó una tendencia a aumentar, ~ 27 °C a ~ 30 °C, en el periodo comprendido entre julio y octubre. El valor mínimo de temperatura (~ 25 °C) se estableció en noviembre. Los máximos valores de la salinidad, entre 48 y 50, ocurren en octubre en las tres estaciones. En las tres estaciones el mínimo de salinidad (~15) ocurrió entre noviembre y diciembre, un segundo mínimo local se estableció en el mes de agosto (~ 20). Las señales de temperatura y salinidad exhibieron una variabilidad inversa en las estaciones 5 y 6, en tanto que en la estación 4 estas señales presentaron una variabilidad similar.

Figura 4
Análisis armónico (línea continua) y datos
(línea punteada) de temperatura y salinidad para:
a) la estación 1, b) la estación 2 y c) la estación 3

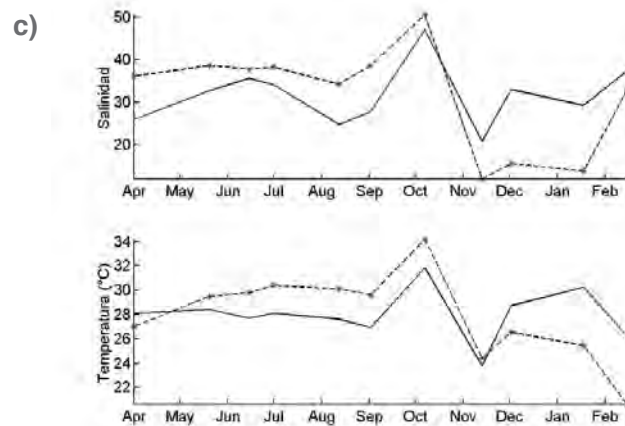
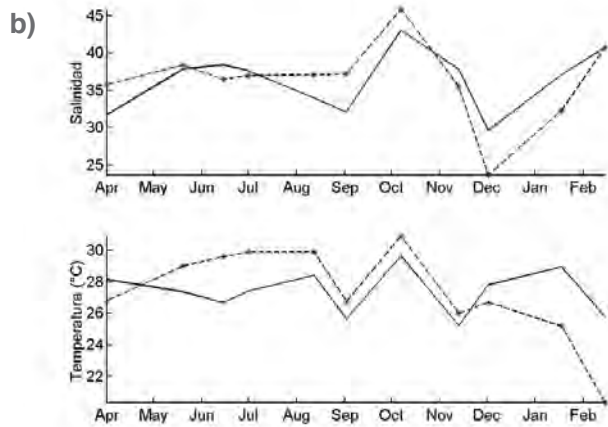
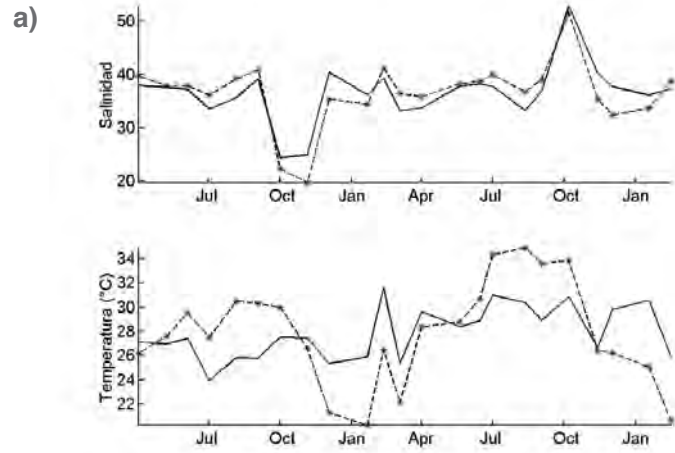
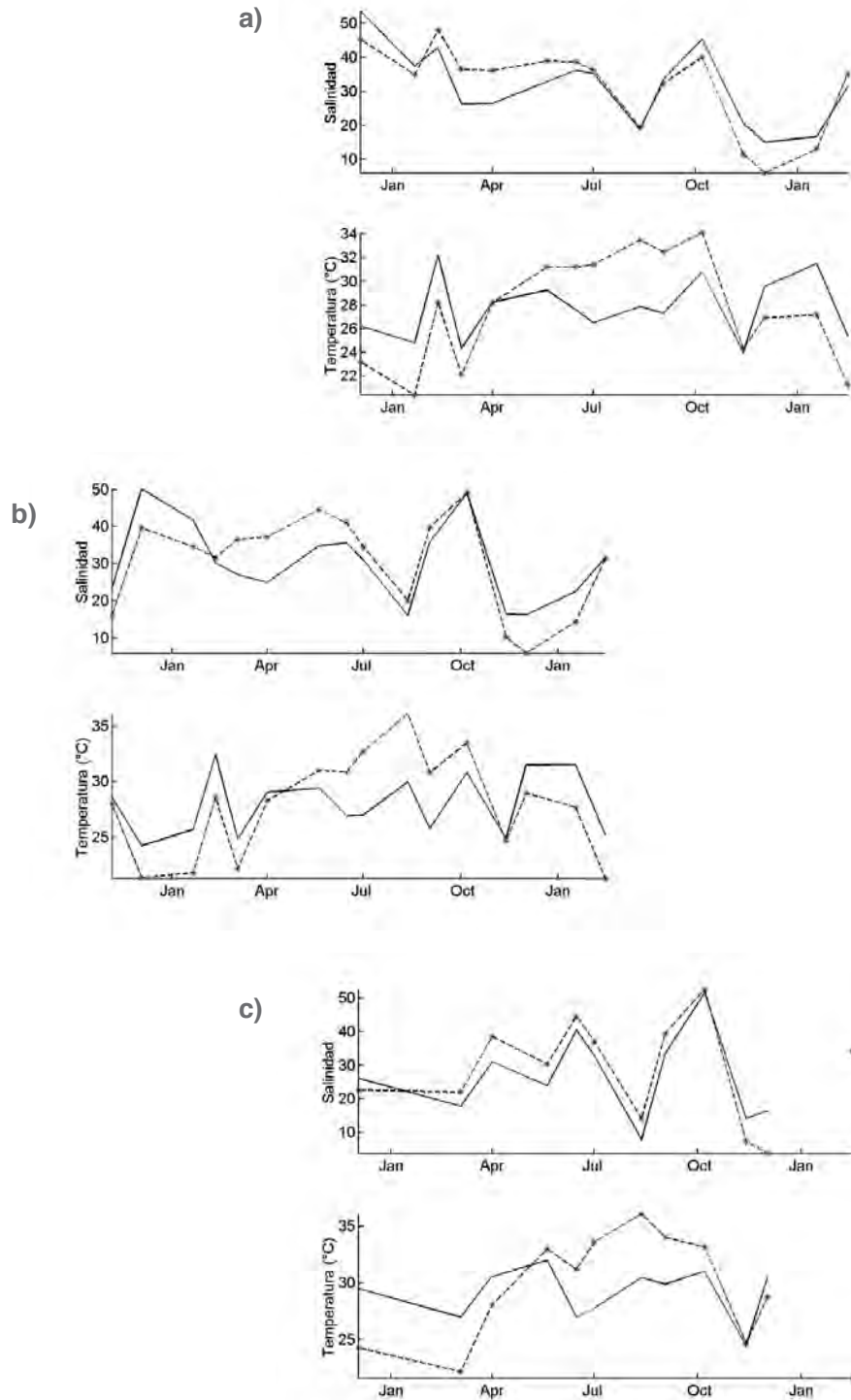


Figura 5
Análisis armónico (línea continua) y datos (línea punteada)
de temperatura y salinidad para:
a) la estación 4, b) la estación 5 y c) la estación 6



En la Figura 6 se muestran el resultado del ajuste en dos armónicos para el conjunto comprendido por las estaciones 7 a la 9, que cubren la zona austral. Los valores máximos de la temperatura fueron cercanos a 28 °C, los que ocurrieron en octubre en las estaciones 7 y 8, mientras que en la estación 9 el máximo ocurrió en septiembre. La amplitud de la marcha estacional de la temperatura es baja (~ 3 °C). Los valores mínimos de la temperatura se establecen entre noviembre y diciembre, entre 25 °C y 26 °C. Los máximos valores de la salinidad (~ 3.5) ocurrieron en abril en las estaciones 8 y 9, en tanto que en la estación 7 es de ~ 9 en octubre. La amplitud de la marcha estacional de la salinidad fue baja, en las estaciones 8 y 9 el rango de oscilación estacional es menor (~ 3.5), mientras que en la estación 7 el rango es de 1. El mínimo valor de la salinidad en las estaciones 8 y 9 se presentaron en julio (0), en tanto que en la estación 7 ocurrieron en septiembre (~ 2).

El resultado del ajuste en dos armónicos para el conjunto comprendido por las estaciones 10 a la 12, las que se ubican al este de la boca de la laguna, se muestra en la Figura 7. Los valores máximos de la temperatura, entre 31 °C y 35 °C, ocurrieron en octubre y agosto. La amplitud en la oscilación de la temperatura fue de ~ 15 °C. Los valores mínimos de temperatura se presentaron en febrero, entre 20 °C y 26 °C, en mayo de 2009 se registró un evento de temperatura anómalamente baja (~ 4 °C) en la estación 11. Los valores máximos de la salinidad (~ 50) se establecieron en octubre. El rango de oscilación estacional de la salinidad es de ~ 50. Los valores mínimos de salinidad, entre 15 y 25, se presentaron entre diciembre y enero.

DISCUSIÓN

Las variaciones estacionales de la temperatura y la salinidad en la parte superior de la columna de agua fueron estudiadas en el sistema lagunar de la Carbonera. Para ambas variables, los campos promedio y su variabilidad (desviación estándar) mostraron evidencias de zonas de distinta variabilidad a lo largo del sistema lagunar. Aunque la ocurrencia de los mínimos de temperatura y salinidad coincidió para algunas estaciones, en general la variabilidad de la temperatura y la salinidad fueron diferentes. En las estaciones localizadas

Figura 6
Análisis armónico (línea continua) y datos (línea punteada)
de temperatura y salinidad para:
a) la estación 7, b) la estación 8 y c) la estación 9

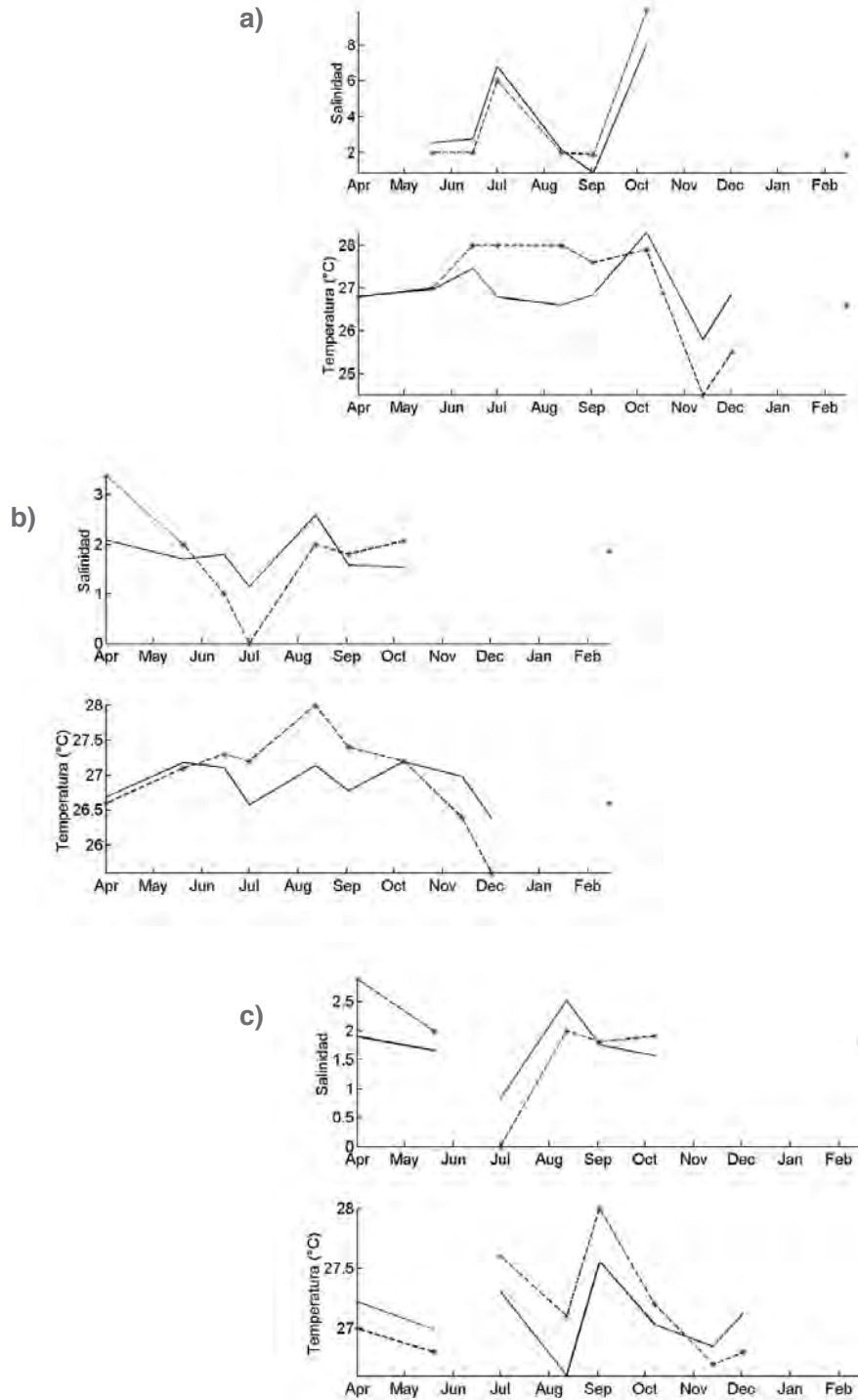
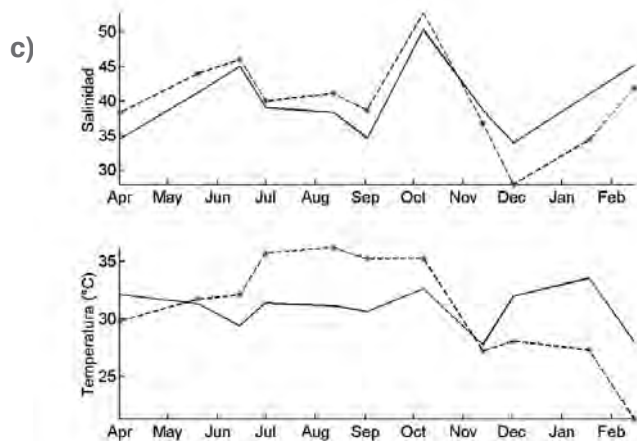
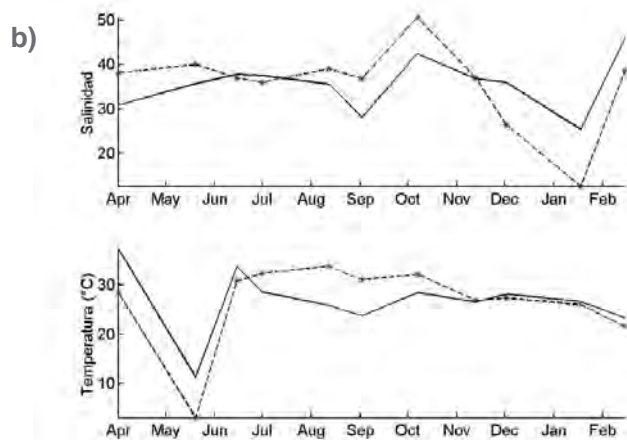
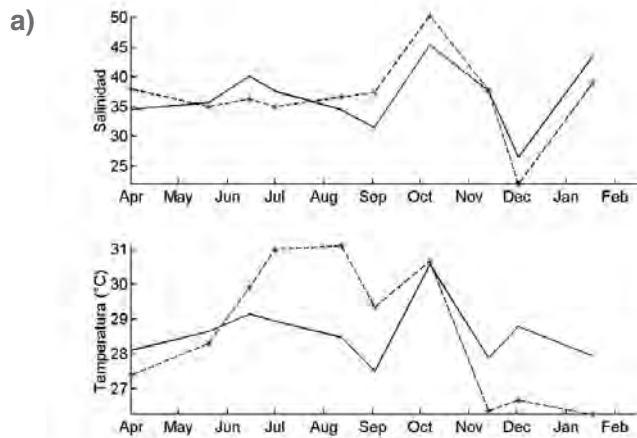


Figura 7
Análisis armónico (línea continua) y datos (línea punteada)
de temperatura y salinidad para:
a) la estación 10, b) la estación 11 y c) la estación 12



en la vecindad del petén, ubicadas en la zona austral del plan de estaciones, tanto la temperatura como la salinidad exhibieron sus mínimos valores promedio; también fueron estas las estaciones que exhibieron la mínima variabilidad alrededor del campo medio.

La zona de mayor variabilidad alrededor del campo medio (bajas frecuencias) de la temperatura y de la salinidad ocurrió entre la estación 4 y la estación 6, que se ubican al poniente de la boca de conexión. La amplitud de la variación de la temperatura fue de ~ 16 °C, en tanto que la amplitud de variación de la salinidad estuvo entre 20 y 40. De noviembre a enero la variabilidad de la temperatura fue inversa a la que exhibió la salinidad, excepto en la estación 6. El rango de oscilación de la temperatura y la salinidad sugieren que ésta es una zona de mezcla entre la zona dominada por los intercambios de agua con el océano (estaciones en la boca) y la zona dominada por la aportación de aguas subterráneas, estaciones alrededor del petén.

Para analizar la componente estacional de la variabilidad de la temperatura y la salinidad se implementó un ajuste en dos armónicos, resultado del ajuste fue que el porcentaje de varianza contenido en la señal estacional en todo el conjunto de datos fue mayor a 70% de la varianza total, lo que implica que los datos contienen una señal fuerte a escala estacional. El análisis por armónicos reveló que se establecen cuatro zonas de distinta variabilidad para la temperatura y la salinidad a lo largo de la región de estudio.

La zona de rango de variabilidad intermedia para la temperatura y la salinidad ocurrió entre las estaciones de la 1 a la 3, que se ubican a lo largo de la boca de la laguna. Con la finalidad de explorar los efectos que la componente de marea astronómica puede tener sobre el área de estudio, usamos del programa de generación de predicción Mar V1.0 del CI-CESE (<http://oceanografia.cicese.mx/predmar/>) para Puerto Progreso, Yucatán. Para llevar a cabo la comparación entre las mediciones y las salidas del modelo numérico, las salidas del modelo con periodicidad de 24 fueron comparadas con los datos de altura de la columna de agua; además, para tener información del ritmo de cambio de la columna de agua fue calculada la derivada local:

$$v_i = \frac{\partial h_i}{\partial t}, \quad (5)$$

donde h_i fue la altura de columna de agua ($i = 1$), o la magnitud de la marea ($i = 1$); fue el tiempo entre mediciones sucesivas, el que fue elegido de acuerdo con la frecuencia de las mediciones (1 mes). En las estaciones 1 y 2, tanto los valores de la columna de agua como las pendientes fueron las más parecidas de todo el conjunto de mediciones.

La zona con un rango de menor variabilidad para la temperatura y la salinidad ocurrió entre las estaciones 7 a la 9, que se ubican en la zona más austral del plan de estaciones. La variación de la temperatura estuvo centrada alrededor de 27 °C, la amplitud de variación fue de 1 °C. La salinidad fue la más baja de todo el conjunto de mediciones, el rango de variación de la salinidad osciló entre 0 y 8. La zona de mayor amplitud fue la estación 6, ubicada en la región de entrada hacia el petén. Estos resultados evidencian que esta zona está permanentemente controlada por los aportes de agua subterránea y la marcha estacional de la salinidad estará controlada por la oscilación de dichos aportes. La comparación entre la altura de la columna de agua y la marea así como de sus respectivas pendientes, mostró que las estaciones 7 y 8 fueron las menos parecidas del conjunto total de mediciones; sin embargo, en la estación 9 el ritmo de cambio de la altura de la columna de agua fue más parecido al de la marea.

La zona que exhibió la mayor variabilidad y los valores más altos tanto de la temperatura como de la salinidad a escala estacional fue la que se encuentra entre las estaciones 10 a la 12. La región que cubre este conjunto de estaciones se encuentra a levante. El rango de variación de la temperatura fue de ~ 15 °C, en tanto que para la salinidad el rango de variación osciló entre 30 y 50. La marcha estacional de la temperatura fue inversa a la marcha de la salinidad. La comparación entre la altura de la columna de agua y la marea así como de sus respectivas pendientes mostró que en la estación 10 el ritmo de cambio de la altura de la columna de agua fue más parecido al de la marea.

Al comparar los ritmos de cambio de la salinidad con los de la marea astronómica se observa que, con excepción de la estación 7 a la estación 9, las pendientes son del mismo signo, lo que sugiere que cuando aumenta la marea, la salinidad aumenta, y cuando disminuye la marea, la salinidad disminuye también.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto FOMIX Núm. 103229 y PAPIIT-UNAM: IN105309 e IN207609. El coautor J. Gómez-Valdés recibió una beca Conacyt para llevar a cabo una estancia sabática en la UMDI-Sisal, UNAM. Agradecemos las enriquecedoras discusiones del Dr. Ismael Mariño Tapia y la Dra. Cecilia Enríquez. Agradecemos también las revisiones del manuscrito por parte del Mtro. Gilberto Jerónimo Mateo y del Dr. Yasser Jerónimo Moreno.

Literatura citada

- Batllore-Sampedro E, González-Piedra JI, Díaz-Sosa J, Febles-Patrón JL (2006) "Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del estado de Yucatán, México. Investigaciones geográficas", *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. ISSN 0188, 59: 74-92.
- Gómez-Valdés J, Jerónimo G (2009) "Upper mixed layer temperature and salinity variability in the tropical boundary of the California Current, 1997-2007", *J. Geophys. Res.* 114, C03012, doi:10.1029/2008JC004793.
- _____ (2006) Estimación de temperatura potencial y salinidad promedio de la superficie de 27.0 de la región sureña de la Corriente de California por el método de análisis objetivo. *GEOS* 25 (3): 1-9.
- Lesser J M (1976) Estudio geohidrológico e hidrogeoquímico de la península de Yucatán. Secretaría de Recursos Hidráulicos. 62 pp.
- Palacios-Sánchez SE, Vega-Cendejas ME (2010) "Cambios alimenticios en tres especies de *Spherooides* (Tetraodontiformes: Tetraodontidae) posterior al huracán Isidoro en bocana de la Carbonera, sureste del golfo de México". *Rev. Biol. Trop.* 58 (4): 1223-1235.
- Perry E, Velázquez G (1993) "Determination of flow directions in the ring of cenotes in the Yucatan State, Mexico". (abs): *Geos (Unión Geofísica Mexicana)* 13(5): 59.
- Perry E, Marin L, McClain J, Velázquez G (1995) "Ring of Cenotes (sinkholes), northwest Yucatan, Mexico: its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater". *Geology* 23: 17-20.
- Perry E, Smith E, Gamboa J, Reeve A, Sanborn R, Marin L, Villasuso M (1989) "Geologic and environmental aspects of surface cementation, North Coast, Yucatan, Mexico". *Geology* 17: 818-821.
- Sánchez-Pinto I, González-Herrera R, Perry E (2005) "Hydrodynamic behavior of the Yucatan aquifer. A perspective on the hydraulic conductivity estimation". *Espelunc@digital, Órgano Oficial de la Sociedad Espeleológica de Cuba* Núm. 2, marzo, 2005. Ciudad de La Habana. 15 pp.

- SARH (1988) *Sinopsis geohidrológica del estado de Yucatán*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 48 pp.
- Steinich B, Marín L E (1996) "Hydrogeological Investigations in Northwestern Yucatan, Mexico, Using Resistivity Surveys". *Ground Water* 34: 640–646. doi: 10.1111/j.1745-6584.1996.tb02051.x.