



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Desarrollo Sustentable

Análisis de la clorofila α durante un ciclo anual en sistemas acuáticos de Cozumel como indicador del estado trófico del agua (2007-2008).

TESIS

**Que para obtener el grado de
LICENCIADO (A) EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES
EN ESPECIALIDAD EN COSTAS**

Presenta

Cinthia Jazmín Pech Domínguez

Director de Tesis

Dra. Martha Gutiérrez Aguirre



Cozumel, Q. Roo, Septiembre de 2009.

059774

UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Desarrollo Sustentable



Tesis elaborada bajo la supervisión del comité de Tesis del programa de Licenciatura y aprobada como requisito para obtener el grado de:

LICENCIADA EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES.

COMITÉ DE TESIS

Director:

Dra. Martha Angélica Gutiérrez Aguirre

Asesor:

Dr. Luis Mejía Ortiz

Asesor:

Dr. Adrian Cervantes Martínez

Cozumel, Quintana Roo, México, Septiembre de 2009

A mi madre Victoria Domínguez Chi,
la persona más importante en mi vida que
sin la cual y sin su apoyo constante e
incondicional no habría logrado este paso en mi
vida.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que me apoyaron durante el transcurso de los cinco años de estudio y en la elaboración de este trabajo.

A los profesores de la Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales en especial a la Dr. Martha Angélica Gutiérrez Aguirre, al Dr. Adrian Cervantes Martínez por guiarme y aportarme parte de sus conocimientos durante la realización de este trabajo y en los cinco años de estudio, como también al Dr. Luis Mejía Ortiz por sus consejos y enseñanzas.

A mi madre María Victoria Domínguez Chi por su cariño y el gran apoyo incondicional que siempre me demostró para finalizar mis estudios. **Gracias** por ser mi base y mi apoyo.

A mis compañeros y amigos que me apoyaron en el trabajo de campo y laboratorio: Omar Martínez Zapata, Jorge Villanueva Pool, José Guadalupe Chan Quijano, Coral Grisel Koh Pasos, Aarón Esteban Canché Canché, Verónica Angélica Prado Aguilar, Arturo Antonio Cahuich, Wilson Uc Uchin y Georgina Mena Celis gracias por el apoyo y su amistad.

Al Programa de Jóvenes Investigadores (PROJI) que me apoyaron con el financiado de este trabajo a través de la Convocatoria 2009 del Programa de Jóvenes Investigadores (PROJI) de la Universidad de Quintana Roo bajo el proyecto PROJI-2009-11 con el nombre de "Análisis de la clorofila α durante un ciclo anual en sistemas acuáticos de Cozumel como indicador del estado trófico del agua (2007-2008)".

Así como a los propietarios de los terrenos en los cuales se encontraban los puntos de muestreo, dándonos permiso para el fácil acceso.

Estoy segura que este trabajo concluye gracias a cada una de las personas mencionadas.

Muchas Gracias a todos.

INDICE

RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
ANTECEDENTES	15
JUSTIFICACION	17
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
OBJETIVOS	19
ÁREA DE ESTUDIO	20
CLIMATOLOGIA	22
VEGETACIÓN	22
FAUNA	22
SUELOS	23
SISTEMAS ACUÁTICOS CÁRSTICOS DE COZUMEL	24
MATERIAL Y MÉTODOS	25
PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS	25
CLOROFILA α	26
RESULTADOS	27
DISCUSIÓN	44
CONCLUSIÓN	49
LITERATURA CITADA	50

RESUMEN

La determinación de la concentración de la clorofila α en los sistemas acuáticos sirve como indicador del estado trófico además que proporciona una respuesta casi inmediata a los cambios en la concentración de nutrimentos. En el presente trabajo se describe y analiza el estado trófico de cinco sistemas acuáticos de Cozumel Quintana Roo, por medio de una evaluación de la concentración de clorofila α y de variables ambientales como temperatura del agua, conductividad, salinidad, pH, cloruros, concentración de oxígeno disuelto y saturación de oxígeno. Se realizaron muestreos mensuales de noviembre 2007 a octubre de 2008. Las variables ambientales determinadas, permitieron complementar la descripción trófica de los sistemas y caracterizarlos con base a su salinidad: a) dulceacuícolas (Sin barda y San Gervasio b), salobres y subsalinos (El faro y Chankanaab 3) y c) costero (Laguna Ciega). La concentración del pigmento presentó pocas variaciones durante el ciclo anual; por otro lado permitió clasificar a los sistemas como oligotróficos (El faro, Chankanaab 3, San Gervasio 2 y Laguna ciega, con concentraciones menores a 1.4 mg/m^3 en promedio) y mesotróficos (Sin barda, con hasta 10 mg/m^3). Con este estudio se establece una línea base de evaluación y descripción de la clorofila α de sistemas acuáticos presentes en la Isla de Cozumel. En general las condiciones de oligotrofia encontradas en la mayoría de los sistemas estudiados se deben a la naturaleza cárstica del ambiente (baja concentración de nutrientes y por ende un buen estado de salud en los ambientes estudiados).

Palabras clave: clorofila α , estado trófico, espectrofotometría, indicador y oligotróficos.

INTRODUCCIÓN

El estado trófico se define como la biomasa existente en un sistema acuático, en un tiempo y lugar determinado Carlson y Simpson (1996). Una excesiva introducción de nutrientes produce un estado conocido como eutrofización (Lampert y Sommer, 1997), que se traduce como baja calidad de agua en un sistema natural. Una baja concentración de nutrientes en un sistema acuático produce el estado oligotrófico y una concentración intermedia, indica mesotrofia (Parra, 1989; Lampert y Sommer, *op. cit.*).

Una forma adecuada de conocer la calidad o el estado trófico del agua en un sistema determinado, es mediante el análisis de la concentración de la clorofila α , ya que permite estimar la cantidad de producción primaria por medio de la biomasa del fitoplancton, lo cual indicará el estado trófico del cuerpo de agua en cuanto a sus niveles de productividad (Lara-Lara *et al.*, 1993; Platt *et al.*, 1992 citado en Ramírez *et al.*, 2006). Por otro lado la concentración de clorofila α en el agua, proporciona una respuesta casi inmediata a la variabilidad de los nutrimentos, lo que propicia que su cuantificación y seguimiento sean indicadores confiables de las variaciones de la biomasa fitopláctica, que es la responsable directa de la salud del ecosistema (Kerekes, 1982, 1983; citados en Contreras-Espinosa *et al.*, 1994).

La clorofila α es el pigmento común a todos los organismos que realizan fotosíntesis con liberación de oxígeno. Los métodos de extracción se basan en la transferencia del pigmento a un solvente orgánico sin provocar cambios químicos en la molécula y la concentración de la clorofila se cuantifica por absorbancia en un espectrofotómetro (colorimetría o espectrofotometría) (A.P.H.A., 1986). El pigmento es muy sensible a la degradación fotoquímica por lo que todas las manipulaciones deben hacerse en condiciones de luz tenue (De León, 2007).

Debido a ello, la espectrofotometría es una de las técnicas experimentales más utilizadas para la detección específica de moléculas. Se caracteriza por su precisión, sensibilidad y su aplicabilidad a formas de distinta naturaleza (contaminantes, biomoléculas, entre otros.) (Rivera *et al.*, 2005).

INTRODUCCIÓN

La clorofila forma parte importante o principal de la productividad primaria, ya que absorbe la energía solar necesaria para iniciar el ciclo fotosintético (Carlson, 1977); la principal propiedad fisicoquímica responsable de este hecho, es la elevada absorbancia que presenta el pigmento, en el intervalo de longitudes de onda entre 400 y 700 nm (Avers, 1980).

Por lo tanto, la biomasa de fitoplancton puede ser estimada determinando la concentración de pigmentos fotosintéticos en una muestra de agua; así se puede determinar la concentración de la mayor parte del fitoplancton presente en la columna de agua (algas Cianobacterias) sin limitación por luz (Montecino *et al.*, 2002; Gregor y Marsálek, 2004).

Es importante señalar que junto con la concentración de clorofila, otras variables que permiten obtener información adicional acerca del estado trófico de sistemas acuáticos son la concentración de nutrientes, de oxígeno disuelto y la transparencia las cuales se relacionan también con la productividad en el agua (Cervantes-Martínez, 2005).

Mientras que factores como el pH, conductividad, salinidad y la concentración de cloruros, son importantes para conocer y describir la naturaleza de los iones contenidos en un sistema (Lampert y Sommer, 1997).

Las diferentes variables abióticas contribuyen de manera importante a la caracterización de los sistemas por ejemplo: la temperatura, durante los periodos de estratificación y mezcla de los cuerpos de agua, puede influir sobre procesos como la producción primaria y secundaria de un lago, ya que afectan la distribución de los nutrientes (nitrógeno, fósforo, sílice, entre otros) y del oxígeno (Lugo-Vázquez, 2000).

Por otro lado, los cambios en la transparencia del agua durante el periodo de estratificación podrían relacionarse con diferencias en el pH, la conductividad eléctrica y las concentraciones de oxígeno (Mercedes-Castillo, 2007).

INTRODUCCIÓN

Adicionalmente, la concentración del oxígeno disuelto puede estar influenciada por factores biológicos como la fotosíntesis (generadora de oxígeno) y la respiración (que lo consume); por lo tanto, estos procesos, así como la distribución de los organismos en la columna de agua, pueden afectar la distribución vertical del gas. En los lagos, la concentración de oxígeno varía dependiendo de su estado trófico; por ejemplo en lagos estratificados oligotróficos, la concentración de oxígeno en el epilimnio es ligeramente mayor que en el hipolimnio. En cambio, en un lago eutrófico la concentración de oxígeno está determinada principalmente por procesos biológicos (Lampert y Sommer, 1997).

- El pH también es una variable influenciada por los procesos fotosintéticos y de descomposición que modifican el equilibrio de carbonato- bicarbonato- dióxido de carbono (Lampert y Sommer, 1997). La gran mayoría de las aguas epicontinentales quedan comprendidas por su pH entre 6.5 y 8.5 lo cual significa que en todas ellas, el ion bicarbonato, tiene un papel preponderante (Margalef, 1993 citado en Garbagnati, *et al.*, 2005).

Una problemática detectada en los sistemas acuáticos de Cozumel, es que existen pocos estudios que muestren el estado trófico del agua que albergan, utilizando indicadores tan informativos como son los análisis de clorofila α , en conjunto con la información de variables complementarias como las mencionadas.

Esta falta de conocimiento, puede impedir un correcto aprovechamiento o descripción de los mismos. Por lo anterior este trabajo tiene como meta principal establecer y describir el estado trófico de diferentes sistemas acuáticos de Cozumel, mediante el estudio de la clorofila α y generar información básica que posteriormente podría usarse para determinar el tipo de aprovechamiento que puede tener un determinado sistema.

ANTECEDENTES

- La limnología como estudio de los cuerpos de agua continentales se originó y desarrolló en regiones templadas. Los primeros trabajos limnológicos en latitudes tropicales se enfocaron principalmente a los grandes lagos de África, Asia y América (Brasil), incluso a los de gran altura como el lago Titicaca (Cervantes-Martínez, 2005).

Debido al origen de la limnología en latitudes templadas, su estudio ha sido enfocado a este tipo de ambientes desde hace aproximadamente 200 años (Lugo-Vázquez, 2000) y aún en la actualidad se realizan investigaciones relacionadas con la descripción en la productividad y estado trófico. Por ejemplo en el trabajo de Montecino *et al.* (2002), se hizo un análisis de la composición por tamaños del fitoplancton, abundancia de clorofila y gradientes de productividad primaria en la región de Aysen, Chile; Wayman (2002) por su parte, realizó un estudio sobre el análisis de la clorofila *a* en el lago de Otsego, en el hemisferio Norte.

- ▶ En las zonas tropicales existe poco desarrollo en el estudio limnológico y el análisis del estado trófico de sus sistemas; en México los trabajos de este tipo se han realizado principalmente en la parte centro y norte del país y muy pocos en la región sur (Cervantes- Martínez, 2005).
- Como ejemplo de éstos, se encuentra el trabajo de Schmitter-Soto *et al.* (2002) ellos realizaron la descripción de los sistemas epicontinentales presentes en la Península de Yucatán, clasificándolos en diferentes tipos: cenotes-cántaro en los que la abertura al exterior es pequeña en relación con el diámetro del embalse; cenotes cilíndrico el cual se caracteriza por que sus paredes verticales, donde la abertura equivale al diámetro del cuerpo de agua; cenotes aguada y grutas con una entrada lateral. Una clasificación semejante se presenta en el trabajo de Mejía-Ortiz *et al.* (2007), en donde se presenta un análisis de varios sistemas acuáticos de Cozumel.

Adicionalmente estos sistemas cársticos pueden ser de flujo abierto (conectados directamente a un sistemas de flujo subterráneo horizontal), o cerrado (agua estancada) por lo tanto, cada cenote puede ser clasificado ya sea de tipo lótico o léntico, lo cual

dependerá de su velocidad de flujo y de la edad de los cenotes (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

- En cuanto a la isla de Cozumel el número de estudios realizados en escalas temporales amplias son escasos y muy recientes. Por ejemplo Cervantes-Martínez (2008) describe por primera vez el comportamiento físico-químico del agua en 15 sistemas cársticos mediante la medición de variables ambientales, encontrando que los sistemas de la isla se diferencian de los cenotes de Yucatán por sus bajas profundidades, bajas concentraciones de oxígeno y menores temperaturas. Sugiere que los sistemas pueden ser alimentados por un flujo subterráneo así mismo también se observó que la salinidad y conductividad tienen variación en relación con la distancia a la costa, el autor también hace referencia a la falta de estudios físicos y químicos que ayuden a conocer la dinámica del agua en la isla debido a su importancia para el consumo humano.
- Un estudio de clasificación y descripción físico-química de sistemas cársticos urbanos de la isla, se puede consultar en Gutiérrez-Aguirre *et al.* (2008), donde se encontró que la mejor calidad de agua dulce, así como los sistemas más profundos, se localizan en la zona media de la isla.
- En otro tipo de estudios como el de Yañez-Mendoza *et al.* (2008) se describe la diversidad de los sistemas anquihalinos existentes en la Isla de Cozumel presentando una lista de los cenotes más importantes, su profundidad, ubicación, fauna y área de extensión también se realiza la descripción de los seis sistemas considerados como los más importantes (Aerolito de paraíso, Los tres potrillos, Cenote cocodrilo, Cenote bambú y Sistema Chancanaab). Los autores de este trabajo consideran que los sistemas acuáticos de la isla, deben protegerse debido a que sirven como reservorio de fauna única a nivel mundial y a que son el depósito de agua dulce más importantes en la región.

JUSTIFICACIÓN

Todos los trabajos citados anteriormente se han enfocado principalmente al estudio de aspectos químicos y físicos de los sistemas y en menor medida, a las características tróficas. Un ejemplo claro de la falta de estudios básicos en la región, se plantea al reconocerse que los cenotes de amplias regiones de Quintana Roo (como el centro y la isla de Cozumel), son prácticamente desconocidos (Schmitter-Soto *et al.*, 2002; Cervantes- Martínez, 2005).

Es por lo cual que sería deseable intensificar los estudios limnológicos realizados dentro de las zonas tropicales en México, lo cual es coincidente con el propósito de este trabajo que se realizó con el fin de proporcionar nuevo conocimiento del estado trófico y de variables físicas y químicas de sistemas acuáticos cársticos de la isla de Cozumel.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a la poca información existente de los sistemas epicontinentales de la isla de Cozumel es difícil contar con una respuesta correcta en cuanto al estado trófico de los sistemas; por lo tanto el propósito de este proyecto es contestar a la siguiente pregunta ¿Cuál es el estado trófico de cinco sistemas acuáticos de la isla de Cozumel durante un ciclo anual, que se encuentran diferenciados por su concentración de salinidad?

OBJETIVO GENERAL

- Describir a través de un ciclo anual (2007-2008), el estado trófico 3 tipos distintos de cuerpos de agua (definidos por sus concentraciones de salinidad), mediante la medición de la clorofila α y otras variables físicas y químicas como saturación de oxígeno, concentración de oxígeno disuelto, amonio, cloruros, conductividad eléctrica, salinidad, pH y temperatura del agua.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar mensualmente la concentración de la clorofila α en tres tipos de sistemas acuáticos presentes en Cozumel: dulceacuícolas (Sin barda y San Gervasio 2), salobres (El faro y Chankanaab 3) y costero (Laguna Ciega).
- Determinar mensualmente el comportamiento de variables ambientales tales como temperatura del agua, conductividad, salinidad, pH, cloruros, amonio, concentración de oxígeno disuelto y saturación de oxígeno.
- Describir y tipificar el estado trófico de los sistemas analizados durante un ciclo anual.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra dentro del municipio de Cozumel, considerada como la isla más grande de México (Fig. 1), originada en el periodo Plioceno y su suelo es predominantemente calcáreo. En la siguiente tabla (Tabla 1) se muestran las coordenadas UTM de los cuerpos de agua que serán analizados en este estudio, los cuales también se ilustran en la figura antes mencionada.

Tabla 1. Unidades UTM de los sitios analizados

Puntos de muestreo	Unidades UTM
Sin barda	X 504897.93; Y 2265206.18
Chankanaab 3	X 547572.01; Y 2240846.15
Faro	X 543979.72; Y 2244401.26
San Gervasio 2	X 550299.00; Y 2243308.51
Laguna Ciega	X 550820.39; Y 2247485.05

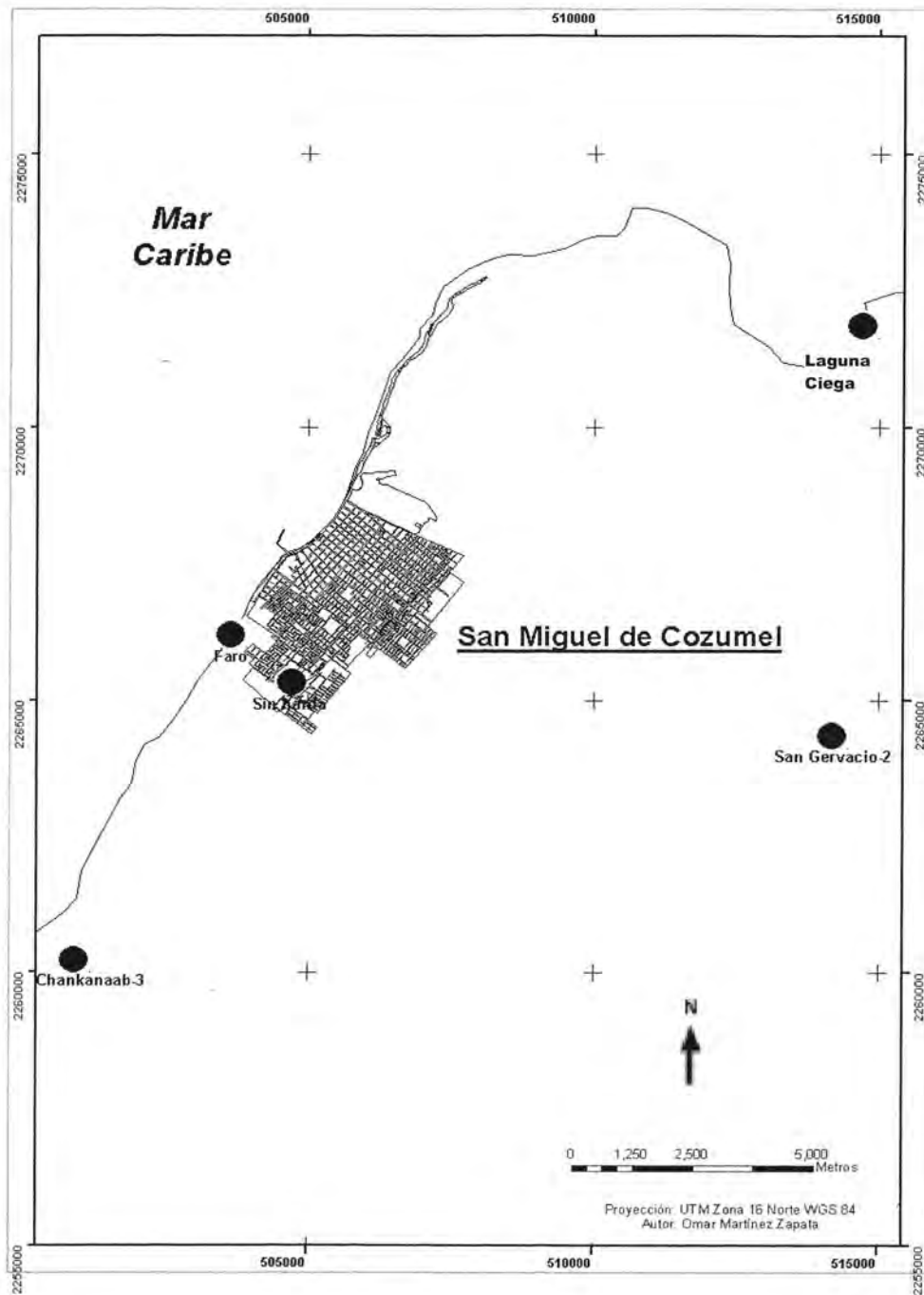


Fig. 1. Mapa de la Isla de Cozumel (los sitios de estudio, se señalan con los puntos negros).

CLIMATOLOGIA

En Cozumel el clima predominante es el cálido húmedo con abundantes lluvias en verano ya que la presencia de masas de agua de origen tropical que trae a la isla vientos cargados de humedad sobre todo en los meses de julio y agosto originan lluvias de gran magnitud; la precipitación media anual de lluvias es de 1504.3 mm (Anónimo, 1998).

La oscilación diaria entre las temperaturas máximas y mínimas es muy pequeña, por lo que la temperatura media, 25.5° C, es isoterma, es uniforme durante casi todos los meses del año, con excepción de la temporada invernal cuando las temperaturas varían cerca de 20° C. Los valores extremos registrados son 6° C y 39° C (Anónimo, 1998).

VEGETACIÓN

En la isla de Cozumel se encuentra presente aproximadamente un 40% de la flora total reportada para el estado de Quintana Roo pudiéndose mencionar cinco comunidades vegetales importantes; selva media subcaducifolia (especies más comunes son *Manilkara zapota*, *Metopium brownei*), tasistal (*Acoelorrhaphe wrightii*), manglar (*Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* y *Laguncularia racemosa*) y duna costera (*Cenchrus equinatus* y *Cakile lanceolata* entre otras) (Anónimo, 1998).

FAUNA

En cuanto a la fauna registrada en los cenotes de Quintana Roo, el mayor número de registros realizados han sido de macrocrustáceos, zooplancton, cocodrilos (*Crocodylus moreleti*), iguanas (*Ctenosaura similis*), tortugas (*Chrysemys scripta*, *Dermatemys mawii*, *Kinosternon creaseri*, etc.) y gran diversidad de peces tales como el bagre (*Rhamdia guatemalensis*) y el gupi (*Gambusia yucatanana*) (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

SUELOS

Los suelos en general son de tipo rendzinas, someros, con un espesor menor a 30 cm, con un buen drenaje, abundante litosol y regosol calcáreo, con textura media y alta permeabilidad, además contiene entre 6 y 15 % de materia orgánica (Anónimo, 1998).

En Cozumel se distinguen tres tipos de suelos claramente definidos: de mesetas calcáreas, que se encuentran en las partes altas, cubiertos por selva mediana subcaducifolia; de barras costeras y playas, cubiertos de matorral costero o cocotero y por último, de cuencas cubiertas por vegetación de manglar y otras halófitas (Anónimo, 1998).

Suelos de mesetas calcáreas: debido a la formación relativamente reciente de la isla, los procesos pedogénicos aún no han formado suelos profundos; esto se refleja más claramente en los de mesetas calcáreas, que predominan en la vertiente E de la isla; los cuales se clasifican como litosoles, cuya característica principal es su poca profundidad (0-40 cm) (Anónimo, 1998).

Suelos de barras costeras y playas: en éstos se aprecia vegetación de matorral costero a zonas de contacto entre el manglar y elementos de la selva subperennifolia. Este tipo de suelo es consecuencia de la deposición de sedimentos costeros de textura gruesa.

Suelos de cuencas o bajos aluviales: se originan en zonas de depósito de sedimentos provenientes de la erosión de las mesetas calcáreas localizadas al Norte del sistema lagunar de Colombia. Ocurren en su mayoría en zonas inundables, carecen de vegetación, son fangosos y poco compactos, anaeróbicos y saturados de agua salobre o con concentración salina superior al agua de mar. Existen tres unidades de suelos: litosol, gleysol (subunidades mólico y húmico) y solonchak (subunidades mólico y gleyco) (Anónimo, 1998).

Debido a la reciente formación de la isla la erosión cárstica de las rocas calizas ha determinado por un lado, la ausencia de cauces de agua superficial y por el otro, la formación de un cuerpo subterráneo de agua dulce que yace sobre las aguas saladas marinas, de mayor densidad, el cual alcanza su máximo espesor en la zona centro-oriental de la isla (Ezcurra *et al.*, 1985 citado en Anónimo, 1998). Por lo tanto la única fuente de agua potable en Cozumel depende del acuífero cárstico y la recarga depende solamente por las lluvias (Gutiérrez-Aguirre, 2008).

SISTEMAS ACUÁTICOS CÁRSTICOS DE COZUMEL

Se puede decir que de manera general, los sistemas acuáticos de Cozumel son cálidos tropicales (25.2 ± 1.2 °C), poco profundos (1.2 ± 0.8), con una transparencia de $1.1 \pm .07$ m, medianamente oxigenados (2.2 ± 3.3 mg/l); en cuanto a su contenido iónico, los sistemas son básicos teniendo valores entre 7.8 ± 0.60 , con una conductividad ampliamente variable entre sistemas (0.5 a 54.4 mS/cm). Los valores más altos de conductividad se han registrado en cuerpos de agua cercanos a la costa y los más bajos, en los alejados a la misma (Cervantes-Martínez, 2008; Gutiérrez-Aguirre *et al.*, 2008). También se ha reportado que los sistemas acuáticos cercanos al mar, contienen altas concentraciones de NH_4^+ y NO_3^- , así como bajos valores de oxígeno; la concentración de cloro en Cozumel alcanza valores de 31-188 mg/L (Gutiérrez-Aguirre *et al.*, 2008).

MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis del estado trófico de los diferentes cuerpos de agua, se realizó a partir de muestras colectadas de noviembre de 2007 a octubre de 2008. El agua para el análisis de la clorofila se colectó con un muestro aleatorio estratificado: se tomaron muestra y réplica de la superficie y fondo de los sistemas con profundidad > 1m. Mientras que en los cuerpos de agua someros sólo se consideró un estrato. El agua se colectó con ayuda de 2 botellas Van Dorn de 2.5 litros de capacidad, ambas se emplearon simultáneamente para obtener la muestra y su réplica.

Se consideraron tres tipos de sistemas presentes en Cozumel, clasificados por sus características en salinidad. Los cuerpos de agua fueron elegidos al azar de un total de 15, anteriormente identificados geográficamente (ver Cervantes-Martínez, 2008). A continuación se da una breve descripción ambiental de cada uno, a partir de datos tomados *in situ*.

1. Dulceacuícolas: Sin barda (X 504897.93; Y 2265206.18) y San Gervasio 2 (X 550299.00; Y 2243308.51). Sistemas con profundidad máxima de 0.4 a 2 m, y salinidad promedio entre 0.23 a 0.54 mg/l.
2. Salobres y subsalinos: El faro (X 543979.72; Y 2244401.26) y Chankanaab 3 (X 547572.01; Y 2240846.15). Sistemas con profundidad máxima de 2 m y salinidad promedio de 1.22 a 13 mg/l.
3. Costero: Laguna Ciega (X 550820.39; Y 2247485.05). Con profundidad de alrededor de 1 m y salinidad promedio de 37 a 38 mg/l.

Parámetros fisicoquímicos

Al momento de colectar la muestra para la determinación de clorofila, también se midieron *in situ* los siguientes parámetros ambientales: saturación de oxígeno disuelto (%), concentración de oxígeno disuelto (mg/l), cloruros (mg/l), salinidad (mg/l), conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH y temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$), con la ayuda de una

sonda multiparamétrica Hydrolab DS5X. Lo anterior permitió complementar la descripción trófica de los sistemas bajo estudio.

Clorofila α

Las muestras para la determinación de la concentración de clorofila α se fijaron en hielo (al momento de la colecta), para transportarse al laboratorio. Se usaron filtros Millipore con apertura de poro de 0.45 μm para filtrar el agua colectada en un porta filtro de 500 ml y con la ayuda de una bomba de vacío Weg. Posteriormente, el filtro se analizó a partir del método de espectrofotometría propuesto por A.P.H.A. (1986) que se describe a continuación:

El filtro se colocó en un tubo de ensayo (PIREX de 15 ml) con 10 ml de acetona al 90%, se dejó reposar por 24 horas. Posteriormente, las muestras se centrifugaron (con ayuda de una centrífuga C-600 a 2500 revoluciones por 10 minutos), para liberar al pigmento. Finalmente se realizaron lecturas de absorbancia (665, 664, 647 y 630 nm) del sobrenadante, usando el espectrofotómetro Thermo Spectronic Genesys 20. Para la solución del blanco se utilizó acetona al 90% la cual también reposó 24 hrs, junto con las muestras analizadas

La concentración de clorofila α se determinó mediante la siguiente relación (Carlson y Simpson, 1996):

$$Chl\alpha \text{ mg/m}^3 = (Ca \cdot v) / (V \cdot 10), \text{ donde}$$

$$Ca = (11.85 \cdot E_{664}) - (1.54 \cdot E_{647}) - (0.08 \cdot E_{630})$$

v = volumen de la acetona

V = volumen de la muestra filtrada

$Chl\alpha$ = Clorofila α

Con los datos colectados se realizó la descripción de la variación espacial y temporal de la productividad primaria, así como la caracterización del estado trófico en tres tipos distintos de sistemas, típicos de la isla de Cozumel, durante un ciclo anual, con apoyo de la generación de gráficos (en Excell-2007) de cada sistema acuático.

RESULTADOS

Clorofila α

El Faro: El máximo valor de clorofila α se presentó en el mes de diciembre (época de nortes), con un máximo de 1.22719 mg/m^3 (Fig. 1) en el fondo. Se puede observar, que las concentraciones del pigmento en superficie y fondo, son constantes desde abril a octubre, registrándose la menor en la superficie, con un valor de 0.00605 mg/m^3 siendo este el más bajo durante todo el periodo de muestreo.

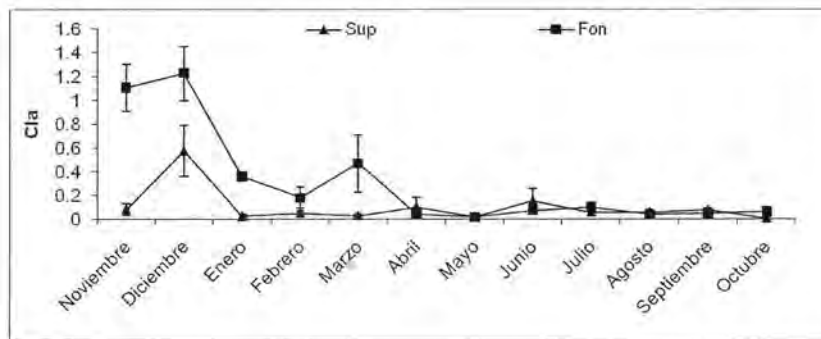


Fig. 1. Concentración promedio de clorofila α en el Faro durante un ciclo anual.

Chankanaab 3: En comparación con el Faro, en Chankanaab 3 se presentaron concentraciones de clorofila α ligeramente mayores a lo largo del año. El valor máximo se presentó en diciembre (nortes), con 1.33051 mg/m^3 en el fondo (Fig. 2).

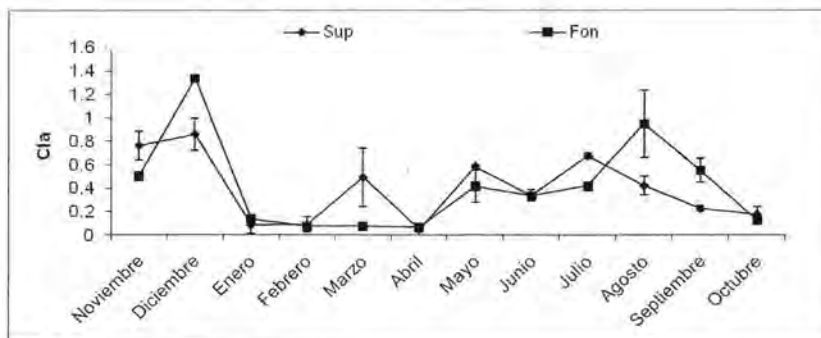


Fig. 2. Concentración promedio de clorofila α en Chankanaab 3 durante un ciclo anual.

RESULTADOS

Sin barda: Las mayores concentraciones del pigmento se registraron en el fondo, durante mayo a septiembre. Se puede observar que en mayo (secas), existió un aumento de la clorofila a (10.9 mg/m^3) en el fondo y los valores más bajos, registrados para ambos estratos corresponden a los meses de diciembre a febrero (nortes), cuando se registró una concentración promedio de 0.079315 mg/m^3 en el fondo (Fig. 3).

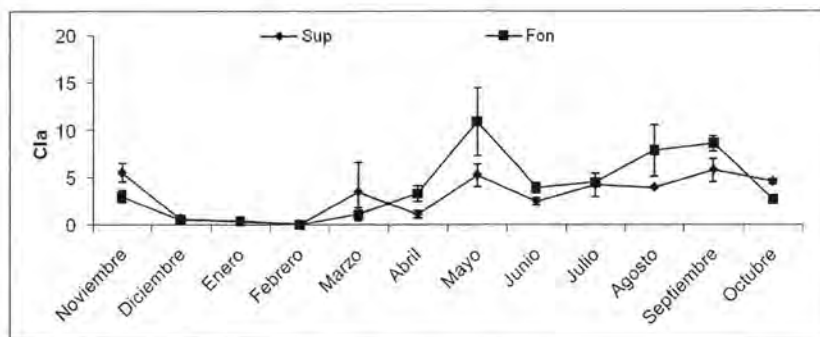


Fig. 3. Concentración promedio de clorofila α en Sin barda durante un ciclo anual.

San Gervasio 2: En comparación con el sistema anterior, en San Gervasio no se registraron altas concentraciones de clorofila durante todo el periodo analizado. El valor más alto fue de 2.52657 mg/m^3 en agosto (lluvias) y el más bajo, fue de 0.049355 mg/m^3 en octubre (Fig. 4).

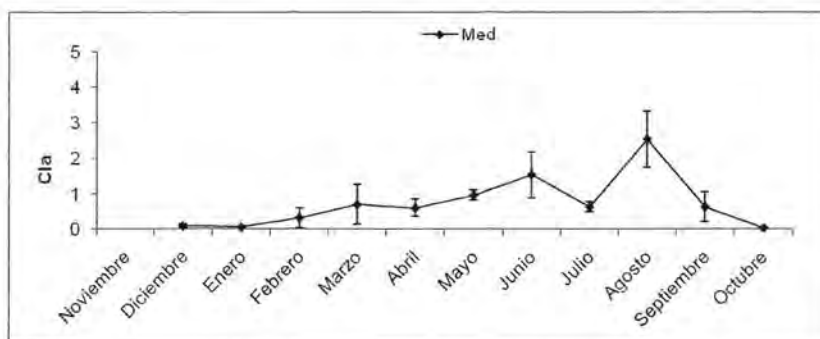


Fig. 4. Concentración promedio de clorofila α en San Gervasio 2 durante un ciclo anual.

RESULTADOS

Laguna Ciega: Fue el sistema que presentó menor concentración de clorofila, en comparación con el resto; siendo 0.19 mg/m^3 el valor máximo y 0.005 mg/m^3 el mínimo, ambas en la época de nortes. Sin embargo las bajas concentraciones de este pigmento fueron persistentes a lo largo del año, con valores entre 0.02 a 0.09 mg/m^3 (Fig. 5).

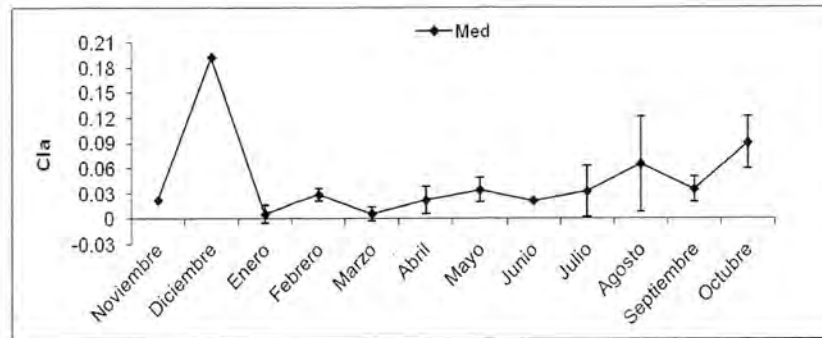


Fig. 5. Concentración promedio de clorofila α en Laguna Ciega durante un ciclo anual.

Oxígeno disuelto

El Faro: En este sistema se registró la menor concentración de oxígeno disuelto (en comparación con el resto de los sitios analizados), como se puede observar en la Fig. 6, no presentó gran variación en esta variable (Fig. 6A).

Chankanaab 3: Se observó un aumento gradual en la concentración del gas, desde nortes hacia lluvias, con valores de 1.445 mg/l a 5.27 mg/l desde noviembre a junio de 2008; con un valor máximo en agosto (lluvias), cuando se registró una concentración de 7.195 mg/l (Fig. 6B).

Sin barda: En este cenote, se denotó baja concentración de oxígeno disuelto durante el año de análisis. En general los resultados mostraron que la concentración de oxígeno disuelto fue relativamente constante; el mínimo fue de 0.12 en octubre y para marzo se observó un leve aumento a 1.91 mg/l siendo este, el máximo alcanzado para dicho sistema en especial (Fig. 6C).

San Gervasio 2: Una elevada concentración de oxígeno disuelto se presentó en marzo, con un valor de 4.51 mg/l en la época de secas; durante abril la concentración disminuyó a valores de 1.25 mg/l (semejantes a los que se registraron en nortes y lluvias) pero fue en el mes de octubre, cuando se observó la mayor concentración con 5.7 mg/l (Fig. 6D).

Laguna Ciega: Fue el sistema que presentó mayor concentración de oxígeno disuelto, en comparación con el resto; con un valor máximo de 9.55 mg/l en agosto y concentraciones elevadas en secas (febrero a mayo), cuando se obtuvieron registros de 8 mg/l; en general, los valores más bajos se registraron en los meses de octubre a diciembre con registros entre 4.04 a 4.3 mg/l (Fig. 6E).

RESULTADOS

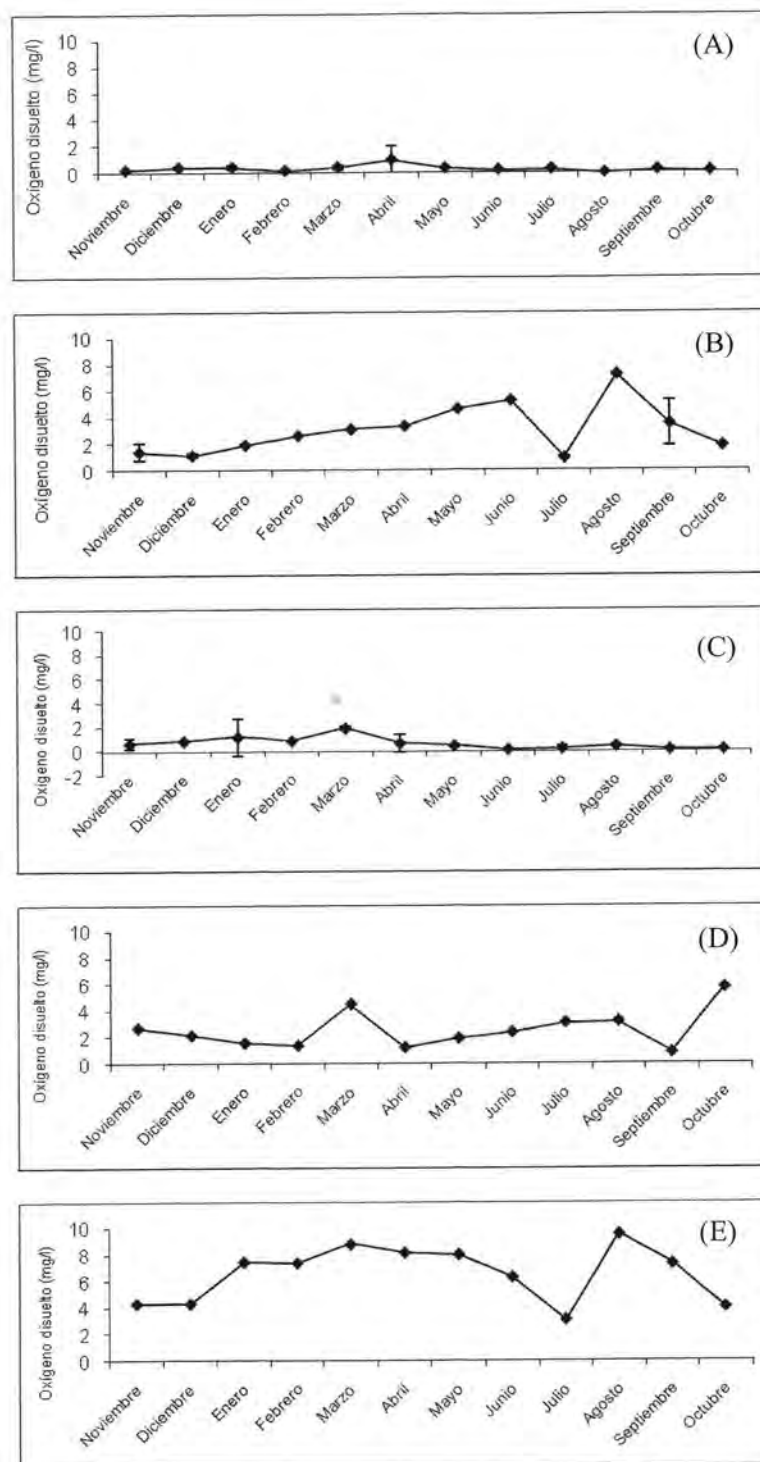


Fig. 6 Concentración de oxígeno disuelto en un ciclo anual en Faro (A), Chankanaab 3 (B), Sin Barda (C), Gervasio 2 (D) y Laguna Ciega (E).

Saturación de oxígeno disuelto

El Faro: Se observó a lo largo del estudio una homogeneidad de valores relativamente bajos (Fig. 7A): el mínimo se registró en el mes de agosto (secas) con 0.3 % y el máximo en enero (nortes) con 6.7 %.

Chankanaab 3: El patrón en la saturación de oxígeno durante el estudio, tuvo un comportamiento similar en comparación con la concentración de oxígeno, teniendo una disminución en el mes de julio (lluvias) con 14.65% que aumentó en agosto alcanzado un valor máximo de 111.95%. De manera general se observó un aumento gradual durante lluvias que desciende en nortes alcanzando valores de 16 a 21.18% (Fig. 7B).

Sin barda: Los valores más bajos de saturación de oxígeno para este sistema, se encontraron en el mes de octubre (1.55%) y los más altos (27.53%), en marzo, (entrada de la temporada de secas) (Fig. 7C).

San Gervasio 2: El porcentaje más bajo (10.3%) se encontró en septiembre y para el mes de octubre (lluvias) el valor de la saturación de oxígeno fue de 90.5% siendo el máximo de saturación de oxígeno para este sistema. Se puede observar que el porcentaje de saturación de oxígeno no rebasó el 50% a lo largo del análisis a excepción del mes de octubre (Fig. 7D).

Laguna Ciega: La saturación de oxígeno fue mayor en comparación con los sistemas ya mencionados. Los valores máximos se registraron en lluvias (201.2 %) y disminuyen hacia nortes con valores 70.2% (Fig. 7E).

RESULTADOS

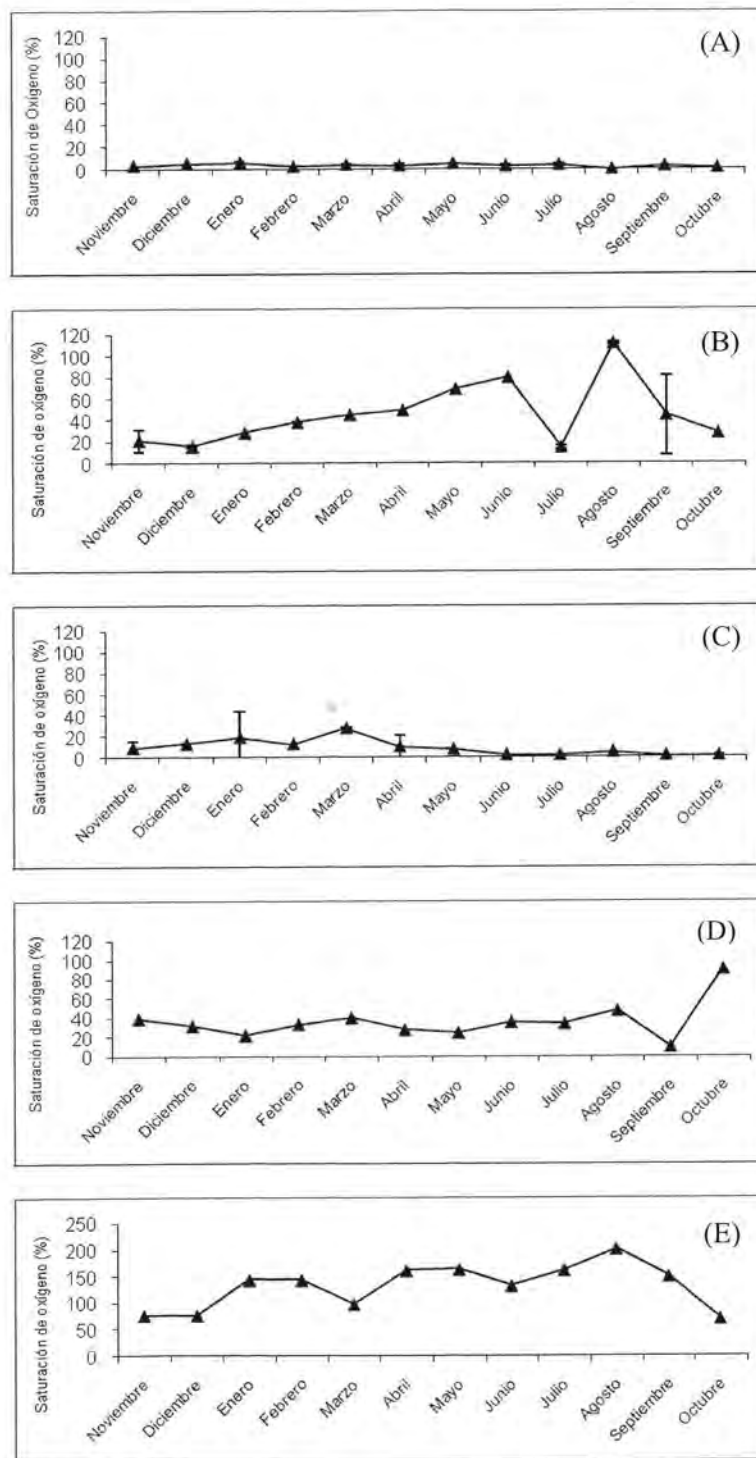


Fig. 7. Saturación de oxígeno disuelto en un ciclo anual en Faro (A), Chankanaab 3 (B), Sin Barda (C), San Gervasio 2 (D) y Laguna Ciega (E).

Temperatura (°C)

EL Faro: La temperatura se encontró en 24.59 a 24.77 en toda el ciclo analizado, no presentando variaciones de magnitud (Fig. 8A).

Chankanaab 3: Se presentó variación en su temperatura registrándose el valor más bajo en el mes de febrero (nortes) con una temperatura de 24.16°C, en septiembre se registró la temperatura más alta en todo el período de muestreo (27.81°C). De manera general se observó que la temperatura tuvo un aumento sucesivo durante el ciclo y que tiende a disminuir en la temporada de nortes (Fig. 8B).

Sin barda: La temperatura no varió durante los primeros meses de estudio (de noviembre a marzo), con registros de alrededor de 24° C. Es durante el mes de abril y durante toda la época de lluvias, es cuando se observó una temperatura mayor a la mencionada. En agosto, se presentó la máxima temperatura de 28.4°C (Fig. 8C).

San Gervasio 2: Se encontraron registros de 25.38 a 27.6°C. Durante la temporada de secas y lluvias se observó un ligero incremento de temperatura en el agua (Fig. 8D).

Laguna Ciega: En este sistema es donde se registraron las mayores temperaturas (así como oscilaciones mucho más claras), en comparación con los sistemas anteriores. Por ejemplo, los registros menores se encontraron durante los meses de noviembre y diciembre (nortes, con un mínimo de 25.36°C), con tendencia al incremento durante secas y lluvias, cuando el máximo se registró en el mes de agosto (con 33.25°C) (Fig. 8E).

RESULTADOS

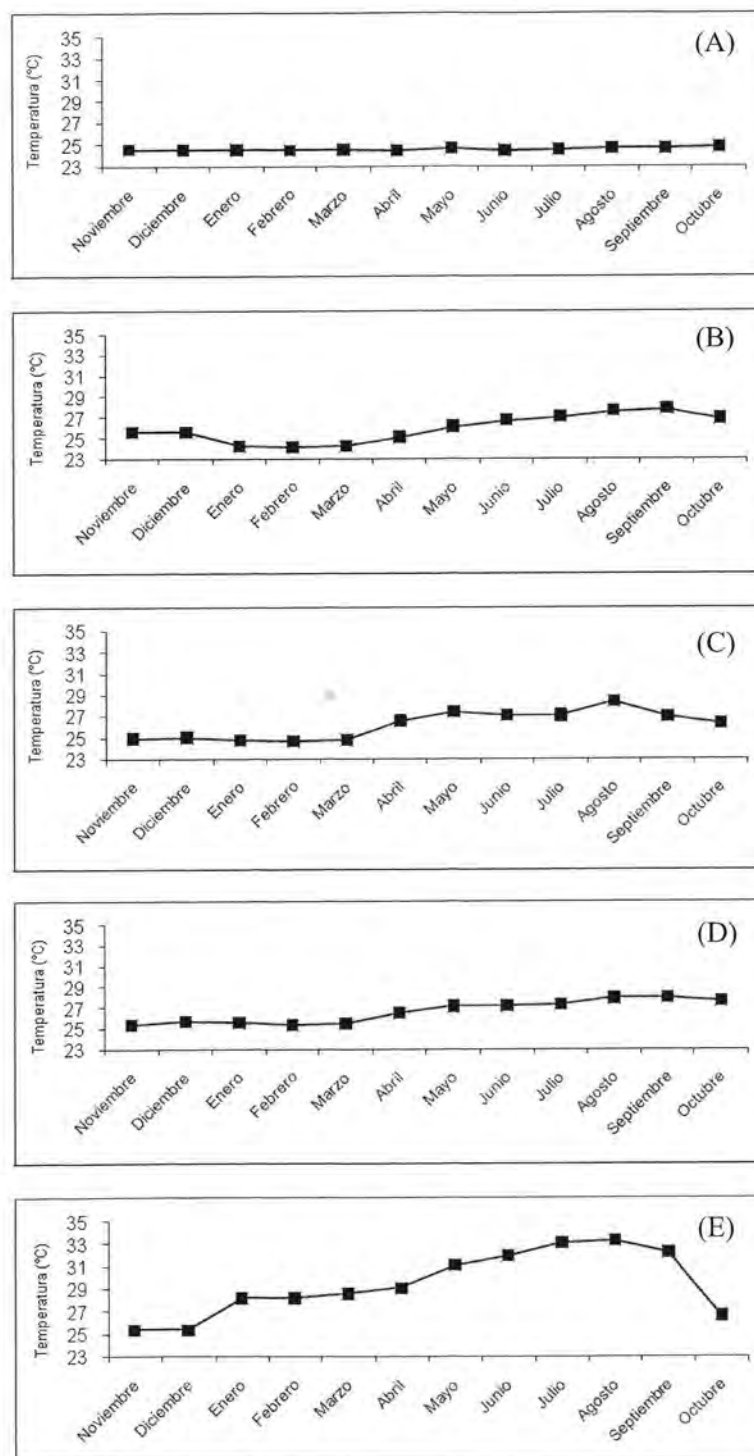


Fig. 8. Temperatura del agua en un ciclo anual en Faro (A), Chankanaab 3 (B), Sin Barda (C), San Gervasio 2 (D) y Laguna Ciega (E).

pH

El Faro: Se puede observar que durante los meses de noviembre a abril, el pH se encontró en el rango de 7.5 y fue en mayo, cuando se registró un ligero aumento a 8.03, el cual continúa hacia junio con un valor de 8.18 siendo este el máximo alcanzado durante el año. A partir del mes de julio (lluvias) se observó una tendencia hacia la disminución, alcanzándose un pH de 6.99 en agosto, de hecho es valor más bajo en todo el muestreo (Fig. 9A).

Chankanaab 3: Se observó un aumento gradual del pH durante los meses de noviembre a junio con un valor de 8 a 8.82 siendo este último el más elevado. En julio se observó una disminución a 8.03 que continuó en los meses restantes, alcanzando un valor mínimo de 7.24 en septiembre (lluvias). De manera general se observó que es durante la temporada de lluvias cuando el pH, desciende de forma paulatina e inicia el incremento hacia nortes (Fig. 9B).

Sin barda: Durante el período de estudio, se presentó un rango de variación de 7.07 a 8.55, siendo este último el máximo registrando en el mes de junio (lluvias). También se puede observar que durante el mes de julio a septiembre (lluvias) existió una disminución del pH, es a partir del mes de octubre cuando se comenzó a observar una tendencia al incremento de dicha variable (Fig. 9C).

San Gervasio 2: La variación del pH registró valores de 7.01 a 8.74; así mismo, de manera semejante a lo que se observa en el gráfico antes descrito, de noviembre a junio los rangos del pH se encuentran por arriba de 8 con una pequeña disminución de 7.9 para el mes de abril; mientras que de julio a septiembre (lluvias) el pH desciende con valores de 7.17 a 7.33 y es para el siguiente mes (octubre) cuando se observó una tendencia al aumento con un valor de 8.08 (Fig. 9D).

Laguna Ciega: Durante abril, mayo y junio (temporada de secas) se registraron valores de alrededor de 9. De junio a octubre (lluvias) es cuando se pudo observar una disminución del pH llegando a registrarse como valor mínimo 7.69; mientras que en nortes, se observaron valores intermedios (alrededor de 8.5) (Fig. 9E).

RESULTADOS

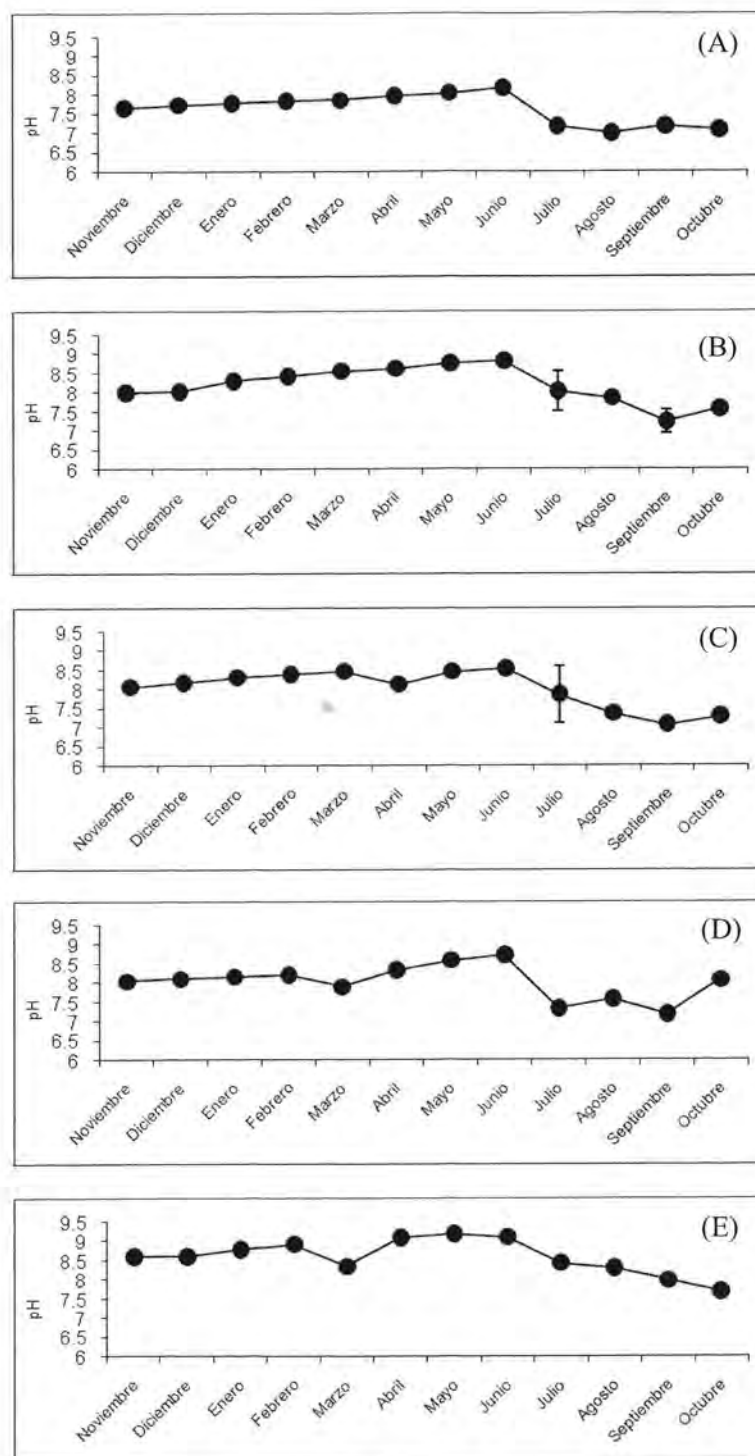


Fig. 9. pH del agua en un ciclo anual en Faro (A), Chankanaab 3 (B), Sin Barda (C), San Gervasio 2 (D) y Laguna Ciega (E).

Análisis de la clorofila α durante un ciclo anual en sistemas acuáticos de Cozumel como indicador del estado trófico del agua (2007-2008).

RESULTADOS

Salinidad

El Faro: Fue uno de los sistemas que alcanzaron concentraciones de salinidad intermedias (entre 10 a 15 mg/l); se puede observar que existió un aumento gradual de la misma desde la temporada de nortes, hacia secas y lluvias, con valores de 11.51 a 15.97 mg/l. Durante nortes (noviembre-diciembre) es cuando se refleja una disminución de esta variable (Fig. 10A).

Chankanaab 3: La salinidad permaneció en valores por debajo de 2 mg/l durante todo el ciclo de muestreo (Fig. 10B).

Sin barda: En este sistema se observó que la salinidad no rebasó los 2 mg/l sin embargo para el mes de septiembre (lluvias) se registró un leve aumento de 2.35 mg/l (Fig. 10C).

San Gervasio 2: La concentración de salinidad no alcanzó valores considerables a lo largo del ciclo analizado siendo durante marzo cuando se registró un valor de 0 de salinidad. En general, los valores oscilaron entre 0 a 0.31 mg/l (Fig. 10D).

Laguna Ciega: Es donde se registraron valores de la salinidad más elevados, con 38.02 mg/l desde el inicio del muestro. Durante noviembre a septiembre, la salinidad permaneció en valores de 38.02 a 39.53 y es hasta el mes de octubre cuando se observó un descenso, alcanzando una concentración de 24.6 mg/l, siendo éste último, el valor más bajo registrado para este cuerpo de agua (Fig. 10E).

RESULTADOS

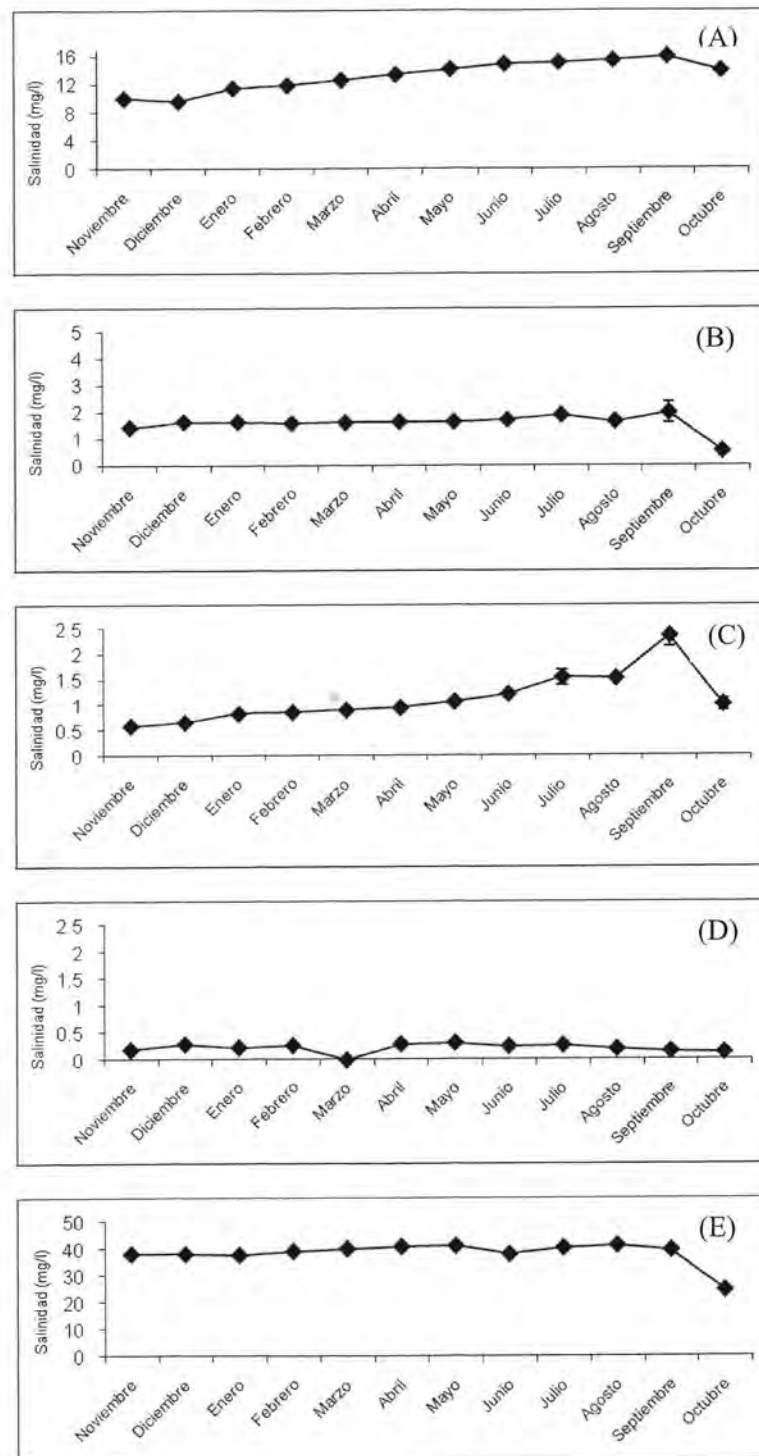


Fig. 10. Salinidad del agua en un ciclo anual en Faro (A), Chankanaab 3 (B) y Sin Barda (C), San Gervasio 2 (D) y Laguna Ciega (E).

Análisis de la clorofila α durante un ciclo anual en sistemas acuáticos de Cozumel como indicador del estado trófico del agua (2007-2008).

Conductividad

En general, las figuras de conductividad muestran un comportamiento parecido a las gráficas de salinidad que se presentaron y describieron anteriormente.

El Faro: La conductividad va aumentando de manera progresiva durante el análisis. Los datos más elevados corresponde al mes de septiembre (lluvias) con un valor de 26213.5 $\mu\text{S/cm}$ y el mínimo valor se registró en diciembre (nortes) con 16391 $\mu\text{S/cm}$, por lo que se observó que es durante nortes, cuando existe una disminución de la conductividad (Fig. 11A).

Chankanaab 3: De manera general, este sistema presentó valores muy similares de conductividad durante el análisis. Se registró un valor mínimo de 1060.5 $\mu\text{S/cm}$ y un máximo de 3677.5 $\mu\text{S/cm}$. Se puede observar que existieron similitudes en los datos registrados a lo largo de ciclo muestreado, excepto para octubre, en donde se observó un descenso en los valores de esta variable (Fig. 11B).

Sin barda: La conductividad registrada no sobrepasó los 5000 $\mu\text{S/cm}$, sin embargo si se puede apreciar leves aumentos a lo largo del periodo de muestreo así mismo también es posible observar que en septiembre se registró el valor máximo (4273.5 $\mu\text{S/cm}$) (Fig. 11C).

San Gervasio 2: Presentó registros de conductividad variables, por debajo de los 600 a lo largo del ciclo, siendo 595.2 el máximo y alrededor de los 300 $\mu\text{S/cm}$ el mínimo (Fig. 11D).

Laguna Ciega: En general, la conductividad alcanzó valores más altos por arriba de 50000 $\mu\text{S/cm}$; sin embargo, para el mes de octubre se encontró una disminución, alcanzando los 38735.5 $\mu\text{S/cm}$. Pese a esta disminución; a lo largo de todo el año la conductividad permaneció con valores altos, de 56516 a 60621 $\mu\text{S/cm}$ en casi todo el ciclo (Fig. 11E).

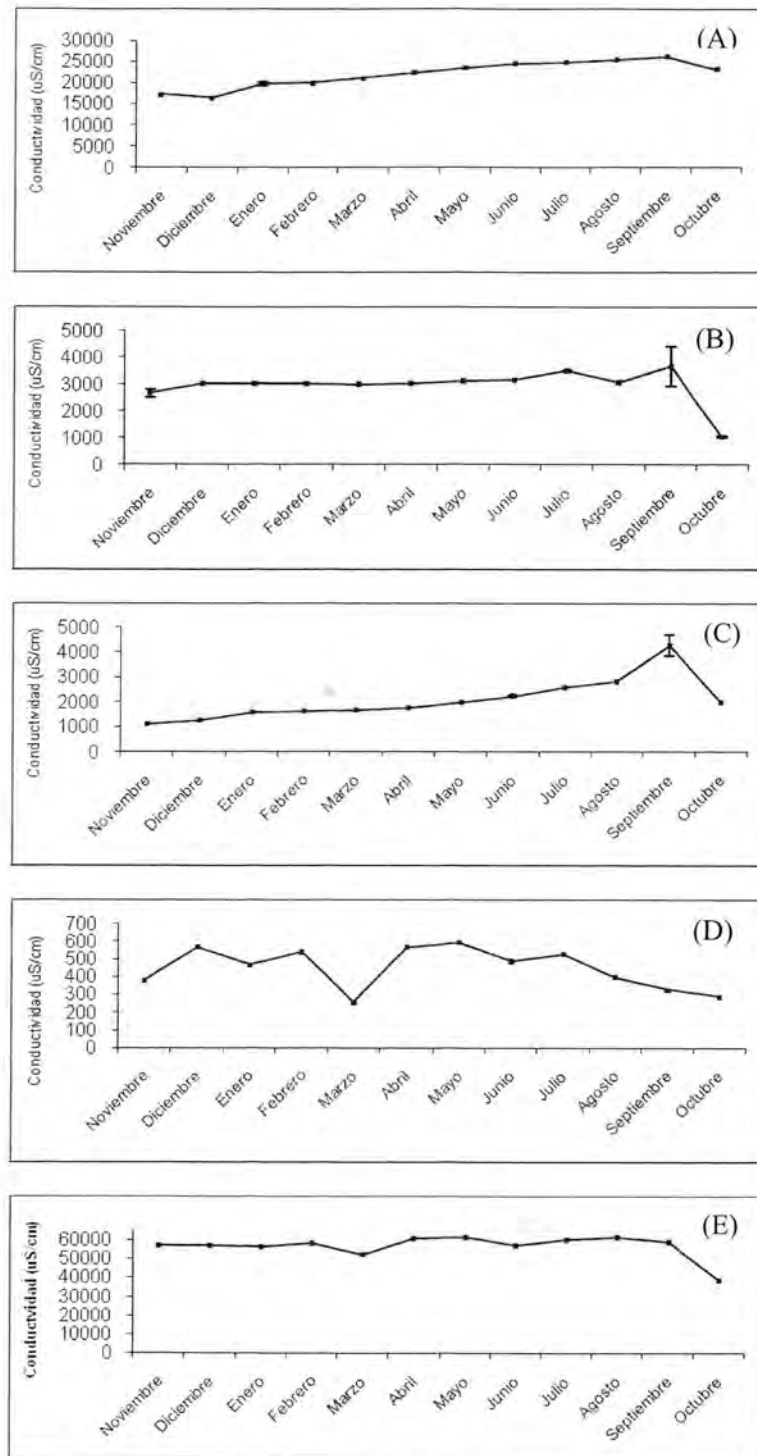


Fig. 11. Conductividad del agua en un ciclo anual en Faro (A), Chankanaab 3 (B) y Sin Barda (C), San Gervasio 2 (D) y Laguna Ciega (E).

RESULTADOS

Cloruros

El Faro: En cuanto a la medición de cloruros, esta variable presentó valores que oscilaron desde los 4795.64 a 7780.70 mg/l siendo este último, el máximo valor registrado y corresponde a septiembre (lluvias). Así mismo se puede observar que existe un aumento progresivo con respecto al tiempo (Fig. 12A).

Chankanaab 3: Se observó que los valores siguen una tendencia homogénea no habiendo datos que superaran los 1000 mg/l. El valor más alto que se encontró fue de 932.01 mg/l en el mes de septiembre y el más bajo se observó en el mes de octubre con 136.70 mg/l (Fig. 12B).

Sin barda: Se puede observar desde el inicio del análisis, que la concentración de cloruros siguió un aumento a lo largo del ciclo, pero disminuyó a partir de octubre (lluvias) con una concentración de 422.67 mg/l, que continua en noviembre y diciembre (nortes). Fue en septiembre (lluvias) cuando se registró la concentración máxima con 1113.13 mg/l (Fig. 12C).

San Gervasio 2: Los valores registrados fueron igual a 0 en todo el periodo de estudio (Fig. 12D).

Laguna Ciega: Se observa que los cloruros se encontraron por debajo de los 20000 mg/l y es para el mes de marzo (secas) cuando se observa un ligero descenso con una concentración de 15726.62 mg/l. Para el mes de octubre la conductividad disminuyó hasta 11586.13 mg/l, de hecho es el valor más bajo registrado, en este sistema (Fig. 12E).

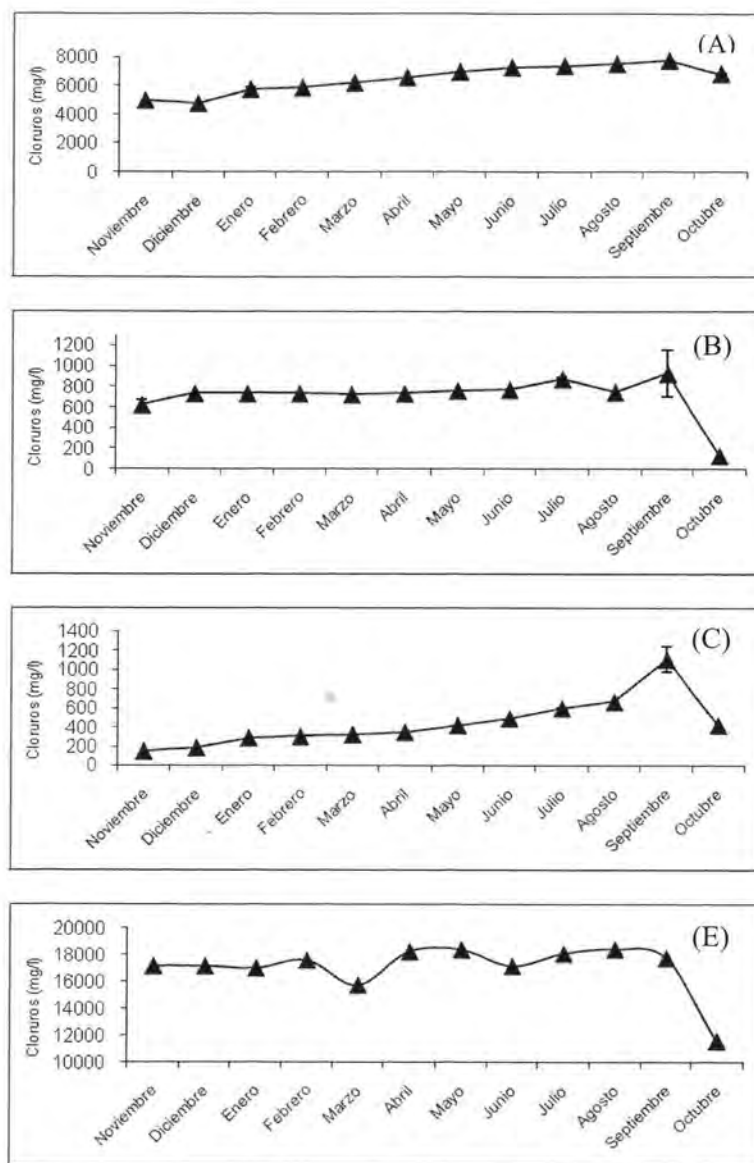


Fig. 12. Cloruros del agua en un ciclo anual en Faro (A), Chankanaab 3 (B) y Sin Barda (C) y Laguna Ciega (E).

DISCUSIÓN

Sistemas salobres:

La concentración de clorofila registrada a lo largo de todo el ciclo en Faro y Chankanaab 3 (<1.5 mg/l) permitió identificar condiciones oligotróficas (Carlson, 1977 citado en Contreras-Espinosa, 1994), en toda la columna de agua de los sistemas salobres analizados. Por otro lado, aunque hacia el fondo de los sistemas, se encontró una concentración ligeramente mayor de clorofila, ésta no es significativamente distinta a la registrada en la superficie (<0.85 mg/l) de acuerdo a la prueba U Mann-Whitney ($Z = -0.52141$ $p > 0.05$ en Chankanaab 3; $Z = 1.9687$ $p > 0.05$ en Faro).

Probablemente, los organismos fotosintéticos tienden a concentrarse más hacia el fondo de los sistemas a fin de evitar el efecto de fotoinhibición, cuando el exceso de luz solar produce la disminución en la tasa fotosintética y en la abundancia de productores primarios en sistemas cristalinos de latitudes tropicales (Forján- Lozano *et al.*, 2008).

En los sistemas salobres analizados, las bajas concentraciones del pigmento puede deberse al continuo recambio del agua debido a la conexión y cercanía que presentan con el mar (Schmitter- Soto *et al.*, 2002; Gutiérrez-Aguirre *et al.*, 2008).

Así mismo también se pudo observar que la clorofila, presentó sus máximos durante nortes en el Faro, un sistema con poca variación en la temperatura durante todo el análisis (con valores constantes de 24°C). La estabilidad térmica sugiere que en adición al agua marina, este sistema tiene influencia de agua subterránea, procedente del acuífero de Cozumel. En la región, se han reportado temperaturas de agua estables entre 23 a 26°C como típicas de agua subterránea (Matthes, 2008).

La influencia subterránea también se evidencia por la concentración y saturación de oxígeno bajos y homogéneos a lo largo del ciclo analizado, sin embargo, aunque el agua subterránea se caracteriza por su baja actividad biológica, es importante considerar la probabilidad de que a nivel local podrían existir factores que propicien la

DISCUSIÓN

transformación de un sistema oligotrófico hacia la meso o eutrofia: observaciones directas indicaron la presencia de algas filamentosas flotando en la superficie del Faro durante el ciclo de muestreo, lo cual podría ser indicio de un constante suministro de nutrientes a escala local, lo cual puede ser un indicador de una posible "perturbación", que en lo futuro cambie la condiciones tróficas de este sistema. Por lo tanto, futuros trabajos son necesarios para establecer las fuentes de estos aportes de nutrientes, así como el origen de los mismos (antrópico o natural).

En cuanto al valor de pH medido para este sistema, fue ligeramente alcalino y puede deberse a la intrusión de agua marina debido a la cercanía que presenta con la costa (Schmitter- Soto *et al.*, 2002), debido a que la naturaleza química del agua mar, actúa como amortiguador (buffer) del pH (De la Lanza-Espino, 2001) lo que permite que el agua permanezca con un pH alcalino.

De igual manera la intrusión de agua marina en el Faro explica las concentraciones de conductividad cloruros y salinidad encontradas (Cifuentes *et al.*, 1986) y al ser variables que se encuentran íntimamente relacionadas entre sí, el comportamiento entre ellas es similar. Las concentraciones presentadas fueron relativamente medias en comparación con sistemas dulces y salinos (Álvarez-Cadena *et al.*, 2007). Los cloruros medidos también presentaron altas concentraciones en comparación con los sistemas de aguas dulces, lo cual puede ser explicado por la influencia marina, debido a su cercanía con la costa (Cifuentes-Lemus., 1986).

El agua de Chankanaab 3 por su parte, presentó un contenido iónico más estable a lo largo del ciclo, se ha reportado como un sistema con una ligera influencia de aguas provenientes de la costa (Gutiérrez-Aguirre *et al.*, 2008). Los resultados encontrados indican que la concentración de organismos fotosintéticos está más influenciada por los cambios ambientales, como por ejemplo la temperatura del agua. En sistemas tropicales esta última cambia en función de las temporadas climáticas (Cervantes-Martínez, 2005).

DISCUSIÓN

Los datos climáticos procedentes consultados en el Servicio Meteorológico Nacional, SMN (Anónimo, 2007a; 2008) durante el ciclo analizado muestran a la temperatura ambiente más elevada durante secas y lluvias, lo cual coincide con la temperatura del agua y propicia el mantenimiento de concentración de clorofila entre 0.5 a 1.0 mg/m³ (Kain y Norton, 1990)

En cuanto a las variables físico-químicas que se midieron se puede decir que el sistema Chankanaab 3 se encuentra medianamente oxigenado (Cervantes-Martínez, 2008) pudiendo deberse a las características típicas de ambientes cársticos oligotróficos, donde se ha reportado que en el tiempo en que la concentración de clorofila se mantiene, hay una tendencia al incremento en la concentración de oxígeno disuelto hacia secas y lluvias (Cervantes-Martínez, 2005).

Se encontró que para este sistema el pH fue de tipo alcalino, debido a la naturaleza calcárea del terreno (De Lanza-Espino, 2001; Schimtter-Soto *et al.*, 2002). Con lo que respecta a las bajas concentraciones de conductividad, salinidad y cloruros, esto podrían explicarse por la influencia de agua dulce en este sistema (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

Sistemas dulceacuícolas:

En comparación con el resto, en Sin barda se registraron las mayores concentraciones de clorofila α en ambos estratos (hasta 5 a 10 mg/m³), los máximos valores se encontraron en secas y lluvias, sin diferencias significativas en la concentración del pigmento entre estratos ($Z= 0.1031$, $p>0.9$). Lo anterior permite clasificar a este sistema como mesotrófico (Carlson, 1977). Por otro lado, las altas concentraciones de dicho pigmento, son coincidentes con lo reportado por Cervantes-Martínez (2005) para sistemas cársticos de la península de Yucatán, él reporta mayores concentraciones de clorofila α , durante las temporadas climáticas de lluvias y secas; lo cual indica un aumento en la densidad de organismos fotosintéticos (Contreras-Espinosa *et al.*, 1994).

Las características que se observaron en Sin Barda, sugieren que es un sistema cerrado, sin influencia de corrientes subterránea, conocido en la región como "aguada"

DISCUSIÓN

(Schmitter-Soto *et al.*, 2002). Por ejemplo, las bajas concentraciones de oxígeno disuelto, durante todo el ciclo, podría deberse a distintas variables como la elevada temperatura, y factores biológicos como la respiración y procesos de descomposición en la columna de agua (Mercedes-Castillo, 2007). Observaciones *in situ* mostraron un color de agua verdoso durante todo el ciclo, así como olor a ácido sulfhídrico en secas y lluvias.

Por otro lado las bajas concentraciones de oxígeno registradas durante secas y lluvias podrían explicarse por la temperatura (ya que ambas variables comporten una relación inversa) las cual tuvo un aumento durante las mismas temporadas (Cervantes-Martínez, 2005). La temperatura del agua estuvo regida por la temperatura ambiental habiendo un incremento durante las temporadas de secas y lluvias (Cervantes-Martínez, 2005; Schmitter-Soto *et al.*, 2002). Por otra parte el pH de este sistema fue básico lo cual puede ser explicado por procesos como la fotosíntesis donde al retirar grandes cantidades de CO₂, se promueve la transformación del bicarbonato incrementando el pH (Lampert y Sommer, 1997). En cuanto a la conductividad, salinidad y cloruros este sistema no presentó altas concentraciones, debido a su naturaleza de agua dulce (Cervantes-Martínez, 2008).

En cuanto a San Gervasio 2, se pudo observar que la concentración de clorofila α , no presentó valores muy elevados a lo largo del ciclo estudiado, por lo tanto este sistema puede ser clasificado como oligotrófico (Carlson, 1977). La baja densidad de organismos fotosintéticos, puede ser debido a una baja disponibilidad de nutrientes debido a que aparentemente San Gervasio 2 es alimentado por agua de lluvia.

San Gervasio 2 presentó una oxigenación media lo cual puede explicarse por su poca profundidad y alta transparencia, que favorece una mejor oxigenación del sistema (Cervantes-Martínez, 2008; Lampert y Sommer, 1997). La temperatura del agua fue controlada por las temporalidad climática, incrementándose en secas y lluvias y disminuyendo en nortes. El pH permaneció la mayor parte de ciclo en un estado básico pudiéndose explicar por la naturaleza cárstica del sitio (Flores-Nava, 1994; Cervantes-Martínez, 2008).

DISCUSIÓN

Los valores de conductividad, salinidad y cloruros registrados en San Gervasio 2 indican que es un sistema alimentado básicamente por la precipitación (Anónimo, 2007b).

Sistema marino:

En la Laguna Ciega los valores de clorofila α presentados a lo largo de todo el ciclo de muestreo permiten clasificar a este sistema como oligotrófico (Carlson, 1977; De la Lanza-Espino, 2001). Esto se debe a que, en las zonas costeras existe mayor eficiencia de ramoneo hacia los organismos fotosintéticos (Gasca *et al.*, 1996).

El pH alcalino registrado para este sistema es explicado por la acción buffer que el mar desempeña sobre el pH (De la Lanza-Espino, 2001). En cuanto a la temperatura del agua, esta varió a lo largo del ciclo anual, guardando una estrecha relación con la temporalidad climática (Contreras y García-Nagaya, 1991) ya que se observa que durante lluvias y secas existe un aumento de temperatura mientras que para la temporada de nortes hay un descenso. La naturaleza química del agua, explica las concentraciones de conductividad, salinidad y cloruros lo cual se debe a las diferentes concentraciones de sales y iones disueltos en el agua de mar (De la Lanza-Espino, 2001).

CONCLUSIONES

En general la clorofila α no tuvo grandes variaciones en sus concentraciones, durante todo el muestreo. En cuanto al estado trófico, los sistemas como Faro y Chankanaab 3 (Salobres), San Gervasio 2 (alimentado por agua de lluvia) y Laguna Ciega (marino) fueron clasificados como sistemas oligotróficos. En cambio en Sin barda (dulce), se encontraron altas concentraciones de clorofila α , permitiendo clasificarlo como mesotrófico.

Variables como concentración de oxígeno disuelto, temperatura del agua y pH, proporcionan información complementaria y auxilian en el establecimiento del análisis trófico de los cuerpos de agua. Por otro lado, variables como conductividad, salinidad y concentración de cloruros ayudan en la determinación de la naturaleza iónica, así como de la influencia del ambiente y de la precipitación sobre los sistemas acuáticos.

Los parámetros como temperatura del agua, oxígeno disuelto y contenido iónico sugieren que el Faro es continuamente alimentado por agua subterránea; mientras que en San Gervasio 2 por agua de lluvia. Sin barda en cambio presenta todas las características fisicoquímicas de un sistema dulce y cerrado; mientras que Chankanaab 3 es subsalino y Laguna Ciega presentó todas las características típicas de un sistema con influencia costero-marinas.

LITERATURA CITADA

LITERATURA CITADA

- Alvarez-Cadena, J.N. , U. Ordóñez-López., D. Valdéz-Lozano., A.R. Almaral-Mendivil y A. Uicab-Sabido. 2007. Estudio anual de zooplancton: composición, abundancia, biomasa e hidrología del norte de Quintana Roo, mar Caribe de Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 78:421-430.
- Anónimo. 1998. *Programa de Manejo Parque Marino Nacional Arrecifes de Cozumel, Quintana Roo*. Quintana Roo, México. Instituto Nacional de Ecología. 161 p.
- Anónimo. 2007a. Temperatura media por entidad federativa. Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 1 p.
- Anónimo. 2007b. Estado y cambio del agua de lluvia en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 199 p.
- Anónimo. 2008. Temperatura media por entidad federativa. Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 1 p.
- A.P.H.A. 1986. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, D.C., United States of America. 16 th ed. American Public Health Association. 1527 p.
- Avers, Ch. J. 1980. *Biología celular*. México D. F., México. 2ª ed. Grupo Editorial Iberoamérica. 532 p.
- Carlson, R. E. y J. Simpson. 1996. <http://dipin.kent.edu/tsi.htm>. A coordinator's guide to volunteer lake, monitoring methods. North American Lake Management Society. Última actualización: 15 de junio de 2006. Fecha de consulta: 11 de diciembre de 2007.

LITERATURA CITADA

Carlson. 1997. A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography* 22:361-369.

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, El Colegio de la Frontera Sur, Chetumal, México. 171 p.

Cervantes-Martínez, A. 2008. Estudios limnológicos en sistemas cársticos (cenotes). En: L. M. Mejía-Ortíz (Ed.). *Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel* (pp. 349-358). Cozumel, Mexico. Universidad de Quintana Roo, Plaza y Valdés.

Cifuentes-Lemus J.L., M.P Torres-Garcia y M.M Frías. 1986. El océano y sus recursos II. Las ciencias del mar: oceanografía geología y oceanografía química. DF, Mexico. Fondo de Cultura Económica. 170 p.

Contreras-Espinosa, F., O. Castañeda-López y A. García-Nagaya. 1994. La clorofila a como base para un índice trófico en lagunas costeras mexicanas. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología Universidad Nacional Autónoma de México* 21:55-66.

Contreras E. y Garcia-Nagaya. 1991. Hidrología de nutrientes y productividad primaria en la Laguna San Jose Manialtepec, Oaxaca, Mex. *Hidrobiológica* 1:65-69.

De Leon, L. (2007).

<http://mail.fq.edu.uy/~inmuno/curso%20microcistinas/tecnicas%20curso/protocoloclorofila%20nush.doc>. Determinación de la biomasa algal estimada por concentración de clorofila-a. Última actualización: 20 de julio de 2008. Fecha de consulta: 4 de diciembre de 2008.

LITERATURA CITADA

- De la Lanza-Espino, G. 2001. *Características físicas y químicas de los mares de México*. D.F. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México y Plaza-Valdez México. 149 p.
- Forján-Lozano, E., M.J. Dominguez-Vargas., C. Vilchez-Lobato., R.Miguel., C. Costa y M.P. Reis. 2008. Cianoalerta: Estrategias para predecir el desarrollo de Cianobacterias Toxicas en embalses. *Ecosistemas* 17:37-47.
- Flores-Nava, A. 1994. Some limnological data from five water bodies of Yucatan as a basis for aquaculture development. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, 21: 87-98.
- Garbagnati, M, A., P. González., R. Antón y M. Mallea. 2005. Características físico-químicas, capacidad buffer y establecimiento de la línea base ambiental del Río Grande, San Luis, Argentina. *Ecología Austral* 15:59-71.
- Gasca, R., L. Segura y E. Suárez-Morales. 1996. El zooplancton marino. En: R. Gasca y E. Suárez-Morales (Eds.). *Introducción al estudio del zooplancton marino*. (pp.1-35). Mexico D.F. El Colegio de la Frontera Sur, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Gutiérrez-Aguirre, M. A., A. Cervantes-Martínez y L. Coronado-Álvarez. 2008. Limnology of groundwater exposures with urban influence in Cozumel island, Mexico. *Verbandlung der internationalen vereinigung für Theoretisch und Angewandte Limnologie* 30: 493-496.
- Gregor, J, B y Marsálek. 2004. Freshwater Phytoplankton Quantification by Chlorophyll a: A Comparative Study of in vitro, in vivo and in situ Methods. *Water Research* 38:517-522.

LITERATURA CITADA

- Kain, J. M. y T.A. Norton. 1990. Marine Ecology. En: D. L. K. M. Cole y R.G. Sheath (Eds.). *Biology of the red algae* (pp. 377-422). London, UK. Cambridge University Press.
- Lampert, W. y U. Sommer. 1997. *Limnoecology: The ecology of lakes and streams*. New York, United States of America. Oxford University Press. 382 p.
- Lara-Lara, J., R. Millan-Nuñez., J. Lara-Osorio y C. Bazan. 1993. Productividad y biomasa de fitoplancton por clase y tamaño, en la parte central del golfo de California durante la primavera de 1985. *Ciencias marinas* 19:137-154.
- Lugo Vázquez. A. 2000. Variación espacial y temporal de la estructura de la comunidad planctónica del lago de Alchichica, Puebla, con algunos aspectos de interacciones tróficas. Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México. Iztacala, México. 98 p.
- Mejía-Ortiz, L.M., G. Yáñez., M. López-Mejía, y E. Zarza-González. 2007. Cenotes (anchialine caves) on Cozumel Island, Quintana Roo, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies* 69: 250–255.
- Matthes, L. 2008. Analysis and evaluation of ground and surface water quality and groundwater flow in the northern aquifer of Quintana Roo, Mexico. En: Guitierrez-Aguirre y Cervantes-Martinez (Comps.). *Estudio Geohidrológico del Norte de Quintana Roo* (pp. 67-107). Cozumel, Mexico. CONACYT, UQROO, FOMIX.
- Castillo, M. 2007.
http://www.intecmar.usb.ve/~eklein/labeco1/guia/agua/agua_2007.pdf
Componentes abióticos de un sistema acuático. Última actualización: 29 de Septiembre del 2007. Fecha de consulta: 8 de Febrero de 2009.
-
- Análisis de la clorofila α durante un ciclo anual en sistemas acuáticos de Cozumel como indicador del estado trófico del agua (2007-2008).

LITERATURA CITADA

- Montecino, V., M. A. Paredes, M. Manley y G. Pizarro. 2002. <http://www.shoa.cl/cendhoc/cimar8/resumenes/pdf/montecinopdf.pdf>. Composición por Tamaños del Fitoplancton, Abundancia de Clorofila y Gradientes de Productividad Primaria en la Región de Aysen. Última actualización: 10 de noviembre del 2007. Fecha de consulta: 10 de noviembre del 2007.
- Parra, O. 1989. La eutroficación de la Laguna Grande de San Pedro, Concepción, Chile: un caso de estudio. *Ambiente y desarrollo* 1: 117-136.
- Ramírez, D. G., A. Giraldo y J. Tovar. 2006. Producción primaria, biomasa y composición taxonómica del fitoplancton costero y oceánico en el Pacífico colombiano (septiembre-octubre 2004). *Investigación Marina Valparaíso* 34: 211-216.
- Rivera R, C., A. Zapata., G. Pinilla., J. Donato., B. Chaparro y P. Jiménez. 2005. Comparación de la estimación de la clorofila-a mediante los métodos espectrofotométrico y fluorométrico. *Acta Biológica Colombiana*. 10: 1-95.
- Schmitter-Soto, J. J., E. Escobar-Briones, J. Alcocer, E. Suárez-Morales, M. Elías-Gutiérrez y L. E. Marín. 2002. Los cenotes de la península de Yucatán. En: G. de La Lanza y J. L. García Calderón (Comps.). *Lagos y presas de México* (pp. 338-376). México D.F., Mexico. AGT Editor.
- Wayman, K. 2002. [http://oneonta.edu/academics/biofld/PUBS/ANNUAL/2001%20content/\(0.18\)%20chlorophylla.pdf](http://oneonta.edu/academics/biofld/PUBS/ANNUAL/2001%20content/(0.18)%20chlorophylla.pdf). Chlorophyll a analysis of Otsego Lake, summer 2001. In 34th Annual Report 2001. Última actualización: 15 Noviembre del 2007. Fecha de consulta: 15 de Noviembre del 2007.

LITERATURA CITADA

Yañez-Mendoza, G., E. Zarza-González y L. M. Mejía-Ortiz. 2008. Sistemas Anquihalinos. En: L. M. Mejía-Ortiz (Ed.). *Biodiversidad acuática de la isla de Cozumel* (pp. 49-61). Cozumel, México. Universidad de Quintana Roo, Plaza y Valdés.