



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

# POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Instituto de Biología

TENDENCIA FISICOQUÍMICA Y  
ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA "EL  
YUCATECO", TABASCO DE 2003 A  
2009.

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
(Biología Ambiental)

P R E S E N T A

Brenda Flores Baca

TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: Dra. Guadalupe Judith De la Lanza  
Espino

COMITÉ TUTORAL: Dra. Marisa Mazari Hiriart  
Dr. Alfonso Vázquez Botello

MÉXICO, D.F.

OCTUBRE, 2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

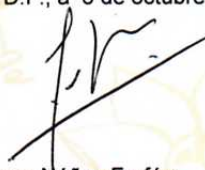
**Dr. Isidro Ávila Martínez**  
**Director General de Administración Escolar, UNAM**  
**Presente**

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 23 de agosto de 2010, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** de la alumna **FLORES BACA BRENDA** con número de cuenta **300260221** con la tesis titulada **"Tendencia Fisicoquímica y Estado Trófico de la Laguna El Yucateco, Tabasco de 2003 a 2009"**, realizada bajo la dirección de la **DRA. GUADALUPE JUDITH DE LA LANZA ESPINO**:

Presidente: DR. ALFONSO VÁZQUEZ BOTELLO  
Vocal: DR. ROBERTO ANTONIO LINDIG CISNEROS  
Secretario: DRA. GUADALUPE JUDITH DE LA LANZA ESPINO  
Suplente: DR. GABRIEL NÚÑEZ NOGUERA  
Suplente: DRA. MARISA MAZARI HIRIART

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

**Atentamente**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
Cd. Universitaria, D.F., a 6 de octubre de 2010.

  
Dr. Juan Núñez Farfán  
Coordinador del Programa

c.c.p. Expediente del (la) interesado (a)

## **AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES**

Este trabajo fue realizado en el Instituto de Biología, Departamento de Zoología, en el laboratorio de Hidrobiología de la Universidad Nacional Autónoma de México bajo la tutoría de la Dra. Guadalupe De la Lanza Espino.

Al Posgrado de Ciencias Biológicas por su apoyo para llevar a cabo y concluir satisfactoriamente los estudios de maestría.

Los estudios de maestría de la Biol. Brenda Flores Baca fueron apoyados con una beca de CONACyT (261799) y por la Fundación Packard .

El Comité Tutorial que asesoró el desarrollo de esta tesis estuvo formado por:

Dra. Guadalupe Judith De la Lanza Espino, Instituto de Biología, UNAM.

Dra. Marisa Mazari Hiriart, Instituto de Ecología, UNAM

Dr. Alfonso Vázquez Botello, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

Salvador Sánchez Pulido brindó una excelente asesoría técnica en campo y laboratorio durante el desarrollo de esta investigación.

Iván Penié y Francisco Rivera que brindaron un excelente apoyo logístico para el desarrollo de este proyecto de investigación.

El Jurado de Examen de Grado estuvo constituido por:

Dra. Guadalupe Judith De la Lanza Espino , Instituto de Biología, UNAM.

Dra. Marisa Mazari Hiriart , Instituto de Ecología, UNAM

Dr. Alfonso Vázquez Botello, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

Dr. Roberto Lindig Cisneros, Centro de Investigación en Ecosistemas , UNAM

Dr. Gabriel Nuñez Nogueira, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

Agradezco infinitamente su apoyo, sus comentarios y observaciones que fueron fundamentales para mejorar este trabajo.

Gracias a la Máxima Casa de Estudios la Universidad Nacional Autónoma de México, donde me forme como científica, al prestigio y la importancia de la misma en el país por permitirme formar parte de la orgullosa comunidad UNIVERSITARIA!!!! Feliz Centenario...

## AGRADECIMIENTOS

Para ustedes que se adelantaron en el camino y se perdieron sucesos muy importantes de mi vida, sin embargo están en mi mente y mi corazón las amo mamá y abu!!!! (Guadalupe Suyapa Baca García y Gloria García Moreno q .e.p.d). Todos mis logros estarán dedicados siempre a ustedes.....Gracias por qué me enseñaron a esforzarme y dar lo mejor de mi en todo momento.

A la Dra. Guadalupe De la Lanza Espino un sincero y profundo agradecimiento por haber depositado en mí su confianza, por enseñarme en el ámbito académico y por formarme también para la vida, por ser mi madre académica y jalarme las orejas GRACIAS!!!!!!!!!!!!Aprendí muchísimo...

Para mi papá Moisés Flores Gómez, el hombre sin duda más importante de mi vida, por su apoyo, sus risas, sus porras, por cuidarme, ayudarme y consentirme; papi eres fundamental y este logro como muchos otros que llegaron y los que están por venir son para ti ..... Gracias, TE AMO PAPITO!!!!

Para mi hermanito Moisés que es la luz de la casa, el hijo prodigo y mi compañero de vida, por su apoyo, cariño y por sus críticas que seguro algún día me harán mejor persona y hermana. Te adoro manito!!!!

A Salvador Sánchez Pulido por su apoyo en campo, por enseñarme a coleccionar, por las salidas de campo tan entretenidas y por enseñarme las técnicas en laboratorio en fin su apoyo fue invaluable miles de gracias Chava!!!

A Claudia García y Joaquín Preza quienes fueron muy importantes en las salidas de campo de este trabajo gracias!!!!

A Susana Villanueva y Guadalupe Ponce por su disponibilidad a ayudarme y siempre brindar un cálido recibimiento en el Laboratorio de Contaminación Marina del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.

A Ivan Penié y Francisco Rivera por el apoyo logístico para el desarrollo de este proyecto de investigación por su tiempo y entusiasmo para ayudarme.

A Penélope Martínez Campos por leerme y darme sus comentarios, prestándome sus ojos para arreglar este trabajo, por ser mi amiga, hermana y una personita sumamente especial para mí , que tiene ganado un lugar en mi corazón y posee eternamente mi amistad y cariño. Gracias Nenitaaaaaa!!!

A Alex Bernal Mendoza por acompañarme a lo largo de estos cuatro años, en las buenas, las malas, por ser mi inspiración, por su amor, paciencia y por todos los planes, deseos e ilusiones que compartimos y que alcanzaremos juntos algún día.....TE ADORO!!!!!!

A la familia Baca Ibarra que me ha apoyado de muchas maneras, me ha brindado su cariño y siempre palabras de aliento. Gracias Familia!!!

A todos los Flores que conforman mi familia, que han estado más cerca los últimos cuatro años y con los cuales he compartido un montón de felices experiencias, muchas Gracias Familia!!

A mis compañeras y amigas de la generación 2009-2011 de la maestría de Restauración Ecológica, las "FLORES del DÍAZ", Berenice Díaz, Eleonora Flores y Dulce Flores, por compartir clases, ser compañeras de equipo, conformando el equipo muégano en las prácticas de campo las quiero un montón!!!!

A los chicos y chicas valientes que compartieron el interés por la restauración ecológica y que me enseñaron otros modos de pensar y a pasarla muy bien durante clases, Víctor, Karina, Francisco, Verónica, Armando, Mario, Aslam, Hugo, Liliana, Lili en fin todos los que de algún modo estuvieron cerca en la realización de este trabajo.

A Cris Carmona Isunza amiga desde hace mucho por estar siempre al pendiente de mí y por el apoyo recibido al inicio y durante el desarrollo de esta aventura, Gracias amiga!!!.

A los profesores que dejaron un granito de inquietud y de curiosidad en mí como científica Leticia Merino, Roberto Lindig, Alma Orozco, Alejandra Rabasa, Vicky Cervantes, Francisco Medrano.

A Luz María Aranda que siempre nos ayudó, orientó y nos brindó calor de hogar en el Instituto de Ecología, Gracias por ser mi amiga LUZ MA!!!!

A los miembros del jurado, Dra. Guadalupe Judith De la Lanza, Dra. Marisa Mazari Hiriart, Dr Alfonso Vázquez Botello, Dr. Roberto Lindig Cisneros y Dr. Gabriel Nuñez Nogueira por su acompañamiento y apoyo durante la realización de este trabajo, sus comentarios y observaciones fueron fundamentales para mejorar este trabajo.

Gracias a mis amigos que estarán conmigo para siempre como, Julio Arellano, Liliana Medina, Roberto Monroy, Abraham Vidal, Pilar Torres, Ericka Palacios, todos ellos me han apoyado, se han preocupado por mi y tienen un lugar en mi corazón y evidentemente en mi vida.

Dedico esta tesis también a mis queridos compañeritos y amigos de la secundaria que han continuado a mi lado a pesar del tiempo y la distancia; con quienes comparto más de 10 años de vivencias los quiero mucho y son realmente importantes para mí (Adolfo, Alejandro Octavio Argentina, Diana, Franco, Israel entre otros que no terminaría de mencionar)

# ÍNDICE

	PAG
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
OBJETIVO GENERAL	15
OBJETIVO PARTICULARES	15
ÁREA DE ESTUDIO	16
METODOLOGÍA	19
MODELO LOICZ	20
RESULTADOS	23
Temperatura	23
Salinidad	25
Oxígeno disuelto	26
pH	27
Alcalinidad	28
Demanda Química de Oxígeno	30
NUTRIENTES	31
Amonio (NH <sub>4</sub> )	31
Nitritos(NO <sub>2</sub> )	33
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	33
Nitrógeno total	34
Ortofosfatos (PO <sub>4</sub> )	36
Fósforo total	37
Proporción N:P	39
Clorofila "a"	39
Índice de Carlson	41
MODELO DE LOICZ	42
DISCUSIÓN	45
Temperatura	45
Salinidad	46
Oxígeno disuelto	49
pH	50
Demanda Química de Oxígeno	51
Alcalinidad	52
NUTRIENTES	53
Amonio (NH <sub>4</sub> )	53
Nitritos(NO <sub>2</sub> )	55
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	56
Nitrógeno total	57
Ortofosfatos (PO <sub>4</sub> )	58

Fósforo total	59
Proporción N:P	61
Clorofila "a"	62
Índice de Carlson	64
Modelo de LOICZ	67
Recuperación y Rehabilitación	68
CONCLUSIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	74
ANEXO I Base de datos parámetros fisicoquímicos	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

	PAG.
Figura 1. Ubicación geográfica de la laguna "El Yucateco"	16
Figura 1.1 Laguna El Yucateco y estaciones de muestreo	18
Figura 2. Distribución espacial promedio de temperatura (°C)	24
Figura 3. Análisis Cluster de temperatura (°C) promedio de 2003 a 2009	24
Figura 4. Distribución espacial de salinidad promedio (ups) de 2003 a 2009	25
Figura 5. Distribución espacial del oxígeno disuelto (mg/l) de 2003 a 2009	26
Figura 6. Tendencia del contenido de oxígeno disuelto en el período de estudio de 2003 a 2009	27
Figura 7. Distribución espacial pH promedio de 2003 a 2009	28
Figura 8. Análisis Clúster de alcalinidad promedio de 2003 a 2009	29
Figura 9. Distribución espacial de la alcalinidad promedio de 2003 a 2009	29
Figura 10. Distribución espacial de DQO promedio de 2003 a 2009	30
Figura 11. Tendencia de la DQO en el período de estudio de 2003 a 2009	31
Figura 12. Distribución espacial contenido de NH <sub>4</sub> promedio de 2003 a 2009	32
Figura 13. Tendencia del contenido promedio de amonio durante el período de estudio de 2003 a 2009	32
Figura 14. Distribución espacial del contenido promedio de NO <sub>2</sub> de 2003 a 2009	33
Figura 15. Distribución espacial contenido promedio de NO <sub>3</sub> de 2003 a 2009	34
Figura 16. Distribución espacial del Nt promedio de 2003 a 2009	35
Figura 17. Tendencia del contenido promedio de Nt en el período de estudio de 2003 a 2009.	35
Figura 18. Distribución espacial de PO <sub>4</sub> promedio de 2003 a 2009.	36
Figura 19. Tendencia del contenido promedio de ortofosfatos en el período de estudio de 2003 a 2009.	37
Figura 20. Distribución espacial de Pt promedio de 2003 a 2009.	38
Figura 21. Tendencia del contenido promedio de P total en el período de estudio de 2003 a 2009.	38
Figura 22. Proporción N:P de 2003 a 2009.	39
Figura 23. Distribución espacial de Clorofila "a" promedio de 2008 a 2009.	40
Figura 24. Tendencia del estado Trófico según Índice Carlson (fósforo total).	41
Figura 25. Porcentaje del estado trófico de los 137 muestreos de 2003 a 2009.	42
Figura 26. Balance de agua y sales en la laguna El Yucateco	43
Figura 27. Balances de nitrógeno y fósforo en la laguna El Yucateco	44



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Mínimo, máximo, promedio general y desviación estandar de los parámetros fisicoquímicos de 2003 a 2009	23
Tabla 2. Mínimo, máximo y promedio de Clorofila "a" promedio de 2008 a 2009	40
Tabla 3. Relación entre precipitación media mensual en Tabasco, eventos meteorológicos y altos valores en los parámetros fisicoquímicos	48
Tabla 4. Categorías de Estado Trófico según Carlson y Simpson (1996) para lagos templados	65

## RESUMEN

Se realizaron 12 muestreos en un período de seis años de 2003-2009, distribuidos a través de tres estaciones climáticas (lluvias, secas y “nortes”) en la laguna costera “El Yucateco”, Tabasco. Se realizó el registró *in situ* de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y pH. Al mismo tiempo se colectaron muestras de agua para la cuantificación de nutrientes nitrogenados y fosforados, así como de la demanda química de oxígeno (DQO) y la alcalinidad. Se calculó la proporción N:P usando el Nt y Pt, se estimó el estado trófico por medio del Índice de Carlson usando el contenido de Pt de (2003-2009) y se aplicó el Modelo de Balance de Nutrientes, Land-Ocean Interaction Coastal Zone (LOICZ) para determinar el Metabolismo Neto del Ecosistema (MNE) por medio de las relaciones estequiométricas de Redfield (1958). Entre el período de 2008-2009 se colectaron muestras para determinar el contenido de Clorofila “a”.

Se registró una alta heterogeneidad espacio-temporal en los parámetros fisicoquímicos, con cierta asociación a los eventos meteorológicos estacionales (sequías y altas precipitaciones) e influencia por tormentas tropicales y huracanes. Los contenidos de Nt y Pt así como el Índice de Carlson indicaron que “El Yucateco” presentó una tendencia desde la eutrofía a la mesotrofía hacia final del estudio, cuyo significado se puede interpretar como una capacidad de autoregulación (resiliencia) del ecosistema. Con base en el modelo de balance de agua y sal de LOICZ se estimó un tiempo de residencia hidráulica de 50.5 días, la laguna se comportó como un exportador de nutrientes, se estimó un predominio de la desnitrificación y un metabolismo heterótrofo.

## ABSTRACT

In a period of six years from 2003 to 2009, data was obtained from twelve samplings periods, distributed through three climatic seasons (rain, drought and “norths”) in the coastal lagoon “El Yucateco”, Tabasco. Data was collected *in situ* for temperature, salinity, dissolved oxygen and pH. A water samples were collected for the quantification of nitrogenous and phosphoric nutrients as well as the chemical oxygen demand (COD) and alkalinity.

The ratio N:P was calculated using Nt and Pt, the trophic state was estimated applying the Carlson Index with using Pt content of (2003-2009) and the model of balance of nutrients, Land-Ocean Interaction Coastal Zone (LOICZ) was applied to determine the Net Ecosystem Metabolism (NEM) by means of the stoichiometric relations of Redfield (1958). Between the period 2008-2009 samples were collected to determine the content of Chlorophyll “a”.

A high space-temporal heterogeneity in the physicochemical parameters was registered, with some association to seasonal meteorological events (droughts and precipitations discharges) and influenced by tropical storms and hurricanes.

The contents of Nt and Pt as well as the Index of Carlson indicated that “El Yucateco” had a tendency from an eutrophic state to a mesotrophic state towards the end of the study. This could mean that there is capacity for self regulation (resilience) in the ecosystem. On the basis of the model of water and salt balance of LOICZ, the time of hydraulic residence was of 50,5 days, the lagoon behaved like an exporter of nutrients. The predominance of the denitrification and a heterotrophic metabolism were considered.

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Vadineanu (2005) las lagunas costeras son ecotonos o unidades de transición entre la tierra y el mar continuamente cambiantes, influenciados por los efectos de la conectividad ecohidrológica; es decir, los controles tierra-mar/mar-tierra (Gamito *et al.*, 2005); los flujos tierra-mar (aportes de cuencas hidrológicas) y los de mar-tierra (mareas, corrientes, huracanes, entre otros eventos meteorológicos), ejercen papeles clave en regular el funcionamiento ecológico de las lagunas costeras. Sin embargo, los eventos naturales y las actividades antrópicas modifican la intensidad de conectividad entre ecosistemas, la magnitud de los controles tierra-mar/mar-tierra que impactan las características de la “estabilidad” de los ecosistemas, modifican su condición de equilibrio dinámico (Holling, 1973).

Es importante evaluar la conectividad de los ecosistemas (Séller y Causey, 2005), a través de los procesos biogeoquímicos y biológicos, por medio de los parámetros fisicoquímicos (oxígeno disuelto, temperatura, demanda química de oxígeno y el contenido de nutrientes); ya que estos factores están regulados por procesos hidrológicos y meteorológicos, que actúan a diferentes escalas espaciales y temporales. Los parámetros fisicoquímicos y sus tendencias brindan información sobre el estado trófico de los cuerpos de agua.

El estado trófico en lagunas costeras indica la tasa de abastecimiento de materia orgánica; un incremento en el abastecimiento, puede provocar un proceso de eutrofización, ya sea natural o por influencia antropogénica (eutrofización

cultural), de tal forma que el estado trófico prevaleciente en la laguna costera refleja su condición ambiental (Caffrey, 2003).

Para estimar el estado trófico se pueden usar como indicadores; el contenido de clorofila "a" fitoplanctónica en la columna de agua así como el contenido de fósforo, nitrógeno y la cantidad de luz que penetra en ella, estos factores en conjunto se integran en el índice de Carlson (Carlson, 1977; Carlson y Simpson 1996). El análisis estequiométrico (N:P) proporciona información acerca de la naturaleza y origen de la materia orgánica en la columna de agua, así como del elemento responsable de la limitación en el crecimiento fitoplanctónico y es de utilidad en la aplicación del modelo de balances biogeoquímicos LOICZ (Gordon *et al.*, 1996) que permite evaluar las cargas, los flujos y el destino de los nutrientes, así como el metabolismo neto del ecosistema (MNE) (Smith y Atkinson, 1994).

El uso de estas herramientas (índices y modelos) permite realizar el diagnóstico de la condición trófica de un cuerpo de agua a través del tiempo, para definir su capacidad de retornar a estados de equilibrio estable después de perturbaciones o bien la llamada resiliencia (Holling, 1973), así como proponer las acciones de manejo que favorezcan su conservación, rehabilitación o uso sustentable en base a la información obtenida a partir del contexto fisicoquímico que oriente las prioridades y defina los criterios de acción.

El sureste mexicano es un área vulnerable, ya que se conjuntan características geológicas, hidrológicas y meteorológicas que dan como resultado una de las regiones más lluviosas del país siendo el caso particular del estado de Tabasco, el cual posee una amplia superficie inundable. Tabasco también es rico en flora y fauna así como en combustibles fósiles; las actividades extractivas de

hidrocarburos junto con otras actividades como la agricultura y la ganadería provocaron el cambio de uso de suelo del territorio tabasqueño desde 1930, llevando a un deterioro de los ecosistemas (Sánchez y Barba, 2005); en el caso de la laguna “El Yucateco” las actividades petroleras se han desarrollado desde 1960 (CIMADES, 2001) con la instalación de una red de oleoductos, barcazas y canales propios de esta industria, así como asentamientos humanos marginales asociados a las actividades petroleras, que descargan aguas residuales lo cual dificulta el conocimiento de los aportes y el impacto que estos provocan. Por lo anterior se han desarrollado diversas investigaciones ambientales interdisciplinarias con una visión holística para determinar el grado de impacto de los diversos contaminantes propios de las actividades extractivas y productivas en el sistema lagunar, así como la capacidad de estos ecosistemas de recuperarse.

En la laguna “El Yucateco” se han realizado estudios que analizaron los procesos de nitrificación, desnitrificación y flujo de amonio en los sedimentos de la laguna; los cuales indicaron que la nitrificación se presentaba a tasas bajas, a diferencia de la desnitrificación que fue el proceso dominante, lo que provocó una acumulación de amonio en la columna de agua y en el sedimento; de acuerdo al mismo estudio, las tasas de nitrificación en la laguna “El Yucateco” fueron bajas a diferencia de lo reportado en lagunas costeras que no tienen influencia petrolera (Granados, 1999).

Chávez (2006) determinó la concentración de plaguicidas organoclorados en productos pesqueros de la laguna “El Yucateco”. Los resultados no revelaron una relación directa con la época del año en las concentraciones de plaguicidas en lluvias y secas, ya que no hubo diferencias significativas; se concluyó que las

concentraciones eran mayores a lo aceptable por las normas mexicanas (NOM-027-SSA1-93 hasta NOM-030) para el consumo de producto pesquero fresco por los habitantes por lo cual el consumo de estos productos debería evitarse.

El equipo de investigadores del laboratorio de Contaminación Marina dirigido por el Dr. Vázquez-Botello del Instituto de Ciencias del Mar UNAM lleva 10 años monitoreando los contenidos de hidrocarburos, metales pesados y pesticidas en el sedimento y agua de la laguna “El Yucateco”; con la colaboración de la Dra. De la Lanza del Instituto de Biología se han monitoreado los factores fisicoquímicos, con la finalidad de observar las tendencias de los parámetros fisicoquímicos para evaluar las condiciones ambientales del sitio.

Por otro lado en 2007 la laguna “El Yucateco” y el estero del río Tonalá fueron propuestos como sitios prioritarios de investigación y de conservación de manglares (Abarca y Herzing, 2007).

Por lo anterior el presente estudio se enfocó a determinar el comportamiento ambiental de 2003 a 2009 de la laguna “El Yucateco” influenciada por actividades humanas tales como la extracción de petróleo, descargas de aguas residuales, agricultura y ganadería; considerando también la influencia de eventos meteorológicos en las condiciones ambientales de la laguna “El Yucateco”.

## **OBJETIVO GENERAL**

Con base en lo anterior, el objetivo general del presente trabajo consistió en cuantificar las condiciones fisicoquímicas en la laguna “El Yucateco” para determinar su comportamiento de 2003 a 2009, asimismo la influencia meteorológica; y estimar el estado trófico por medio del Índice de Carlson y se aplicó el Modelo de Balance de Nutrientes Land-Ocean Interaction Coastal Zone (LOICZ), usando la proporción N:P.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

Determinar la tendencia temporal de los parámetros fisicoquímicos de 2003 a 2009.

Estimar la influencia de los eventos meteorológicos locales (tormentas tropicales, ciclones o huracanes) en los niveles de nutrientes.

Determinar el estado trófico por medio del Índice de Carlson usando el Pt.

Aplicar el Modelo de balance de Nutrientes LOICZ usando la proporción N:P.

Con base en el diagnóstico integrativo proponer medidas de mitigación, mejoramiento o rehabilitación de acuerdo a los resultados obtenidos.



## ÁREA DE ESTUDIO

La laguna “El Yucateco”, en Tabasco es un cuerpo fluvio-lagunar que se encuentra ubicado entre los límites territoriales de los municipios de Huimanguillo y Cárdenas, entre los meridianos  $94^{\circ}00'30''$  y  $94^{\circ}01'33''$  de longitud oeste y los paralelos  $18^{\circ}11'30''$  y  $18^{\circ}10'$  de latitud norte.

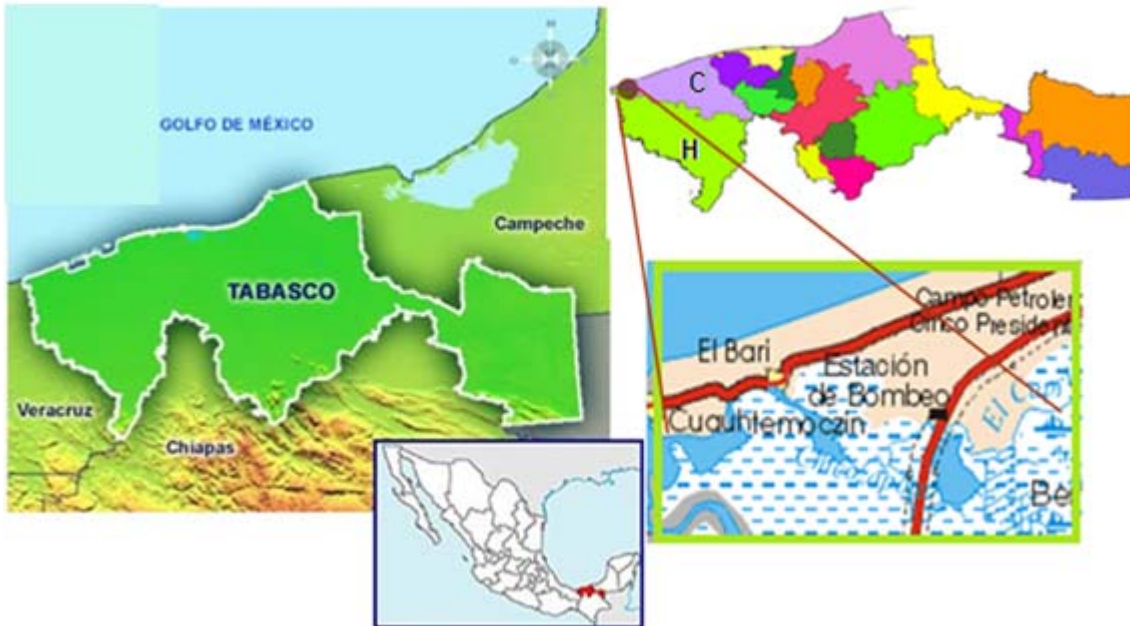


Figura 1. Ubicación espacial de la laguna “El Yucateco”, entre los límites territoriales de los municipios de Cárdenas y Huimanguillo (marcados con C y H respectivamente), Tabasco(a la izquierda), México. (Información obtenida de INEGI Monografías para niños, 2010 y Condensado Estatal Tabasco, 2000).

La laguna “El Yucateco” forma parte de la Región Hidrológica No. 29 denominada Coatzacoalcos, que corresponde a la vertiente del Golfo de México (INEGI, 2010) y pertenece a la cuenca del río Tonalá-Laguna del Carmen y Machona, así como a la subcuenca del río Tonalá. Según Rodríguez (2002) la laguna esta comunicada con el río Tonalá por el cauce del río Chicozapote; esta laguna es un cuerpo de

agua de forma semiovoide y dendrificada. Presenta un perímetro de 22.7 km con una longitud máxima de 2.69 km y una anchura máxima de 1.69 km. Tiene influencia marina a través de la desembocadura del río Chicozapote en el río Tonalá y este a su vez en el mar (Rodríguez, 2002). La vegetación circundante está compuesta por plantas hidrófilas (mangle entre otros), selva mediana y pastizales (CIMADES, 2001; INEGI, 2008).

El campo petrolero “Cinco Presidentes” colinda con este cuerpo fluvio-lagunar, por este motivo PEMEX (Petróleos Mexicanos) construyó una extensa red de canales (33 km) para drenar el agua producto del escurrimiento de terrenos sujetos a inundación que rodean el área (CIMADES, 2001).

El clima que predomina en la zona de acuerdo a la clasificación climática de Köepen modificado por García (1973), es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, un régimen térmico anual oscila entre 26-28°C, las temperaturas más altas se registran en el mes de mayo con 29°C y la mínima de 23°C durante el mes de enero (INEGI, 2010; CIMADES, 2001).

La laguna “El Yucateco” presenta un comportamiento estuarino con una marcada estacionalidad que se ve reflejada en la salinidad, como resultado de los aportes de agua marina o dulce según la época (lluvias, secas y “nortes”) (CIMADES, 2001). La precipitación pluvial es de aproximadamente 2600 mm por año, la máxima durante octubre con 400 mm y la mínima en abril con 143 mm. Según el INEGI (2010) la evaporación potencial presenta un intervalo de 1400-1800 mm y se ha estimado que el intervalo de mareas es de 48 cm.

A pesar de que en los municipios Cárdenas y Huimanguillo las principales actividades económicas comprenden a la ganadería y a la agricultura, en las

poblaciones aledañas a la laguna “El Yucateco” se realizan actividades pesqueras de autoconsumo, así como el cultivo de maíz, frijol, calabaza y chile; también se realiza el cultivo de cocos y de caña de azúcar en menor escala con fines comerciales (Chavez, 2006).

Los principales productos pesqueros que se obtienen en la laguna de acuerdo con Chávez (2006) son: jaiba (*Callinectes similis*), sábalo (*Megalops atlanticus*), robalo (*Centropomus poeyi*), mojarra (*Cichlasoma heterospilum*), bagre (*Ariopsis felis*) y pejelagarto (*Atractosteus tropicus*). Los asentamientos humanos aledaños a la laguna son pequeñas comunidades o caseríos de bajo impacto para el ecosistema, por lo tanto no existe un registro gráfico de ellos en las cartas topográficas. Algunas de estas comunidades son: El Bari, Cuahutemotzin, Ojoshal, Pailebot, El Yucateco y las más lejanas son Villa Benito Juárez y Sánchez Magallanes (Com. Personal. Sr. Antonio pescador de la laguna).

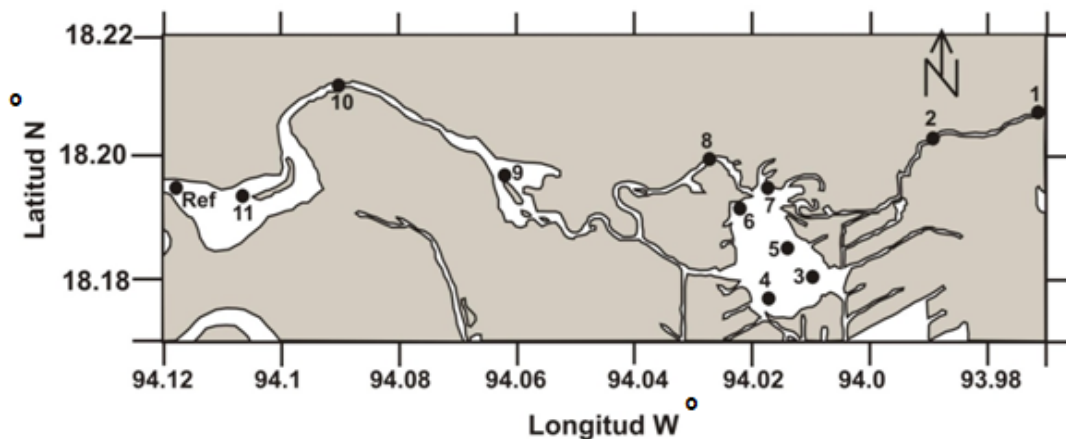


Figura 1.1. Laguna “El Yucateco”, Tabasco y estaciones de muestreo

## METODOLOGÍA

Se realizaron en total 12 muestreos desde 2003 a 2009, integrándome al proyecto en los últimos tres años de 2008 a 2009; estos muestreos incluyeron 12 estaciones de muestreo dentro de la laguna y el cauce del río Chicozapote (Fig. 1.1), que se eligieron en base a sus diferentes características geomorfológicas y la época climática (lluvias, secas y “nortes”). *In situ* se midieron: la temperatura, la salinidad, el oxígeno disuelto y el pH a través de la sonda multiparamétrica *HYDROLAB YSI 556 MPS*. Se recolectaron muestras de agua a media columna por medio de la botella *Van Dorn*, estas muestras fueron conservadas y transportadas a -4°C. En el Laboratorio se llevó a cabo la determinación del contenido de nutrientes (Laboratorio de Hidrobiología, Instituto de Biología, UNAM) ( $\text{PO}_4$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , Nt y Pt) y clorofila “a” (muestreos de 2008 a 2009) con base en las técnicas espectrofotométricas estándar descritas en Strickland y Parsons (1972), APHA, (1992) y de la SCOR-UNESCO (1980); el agua fue filtrada a través de membranas Millipore de 25 mm de diámetro y 0.45  $\mu\text{m}$  de tamaño del poro, realizándose extracción con acetona al 90% y los extractos se leyeron en el espectrofotómetro. Los parámetros fisicoquímicos fueron organizados en tablas por muestreo y por estación (Anexo I), lo cual permitió hacer los análisis ambientales correspondientes así como por medio del análisis Cluster para observar la agrupación de estaciones de muestreo.

Para determinar los gradientes de los parámetros se crearon los mapas de distribución espacial, con el uso del programa Surfer 8 (Golden Software);

tomando como base el promedio aritmético de cada una de las estaciones muestreadas durante todo el periodo de estudio (2003 a 2009).

Se construyó una tabla que resume el comportamiento meteorológico en el estado de Tabasco durante el período de estudio así como información sobre la media mensual de precipitación en el mismo estado para considerar la influencia meteorológica.

Se calculó la proporción N:P con base en nitrógeno y fósforo totales debido a que el uso de las concentraciones inorgánicas resultaba en valores menores a 1. Se calculó el Índice de Carlson (Carlson y Simpson, 1996) empleando solamente PT con el fin de estimar el estado trófico de la laguna “El Yucateco”.

### **MODELO DE LOICZ**

Para la determinación del balance de agua, sal y nutrientes (Nt y Pt) se aplicó el modelo llamado “Balance de agua, sal, y de nutrientes”. El modelo se construye en tres etapas que consisten en: (a) el balance de agua, (b) balance de sal y (c) balance de materiales no conservativos (nutrientes). Las ecuaciones básicas para calcular los balances son:

$$I. \quad dV/dt = V_Q + V_P + V_G + V_O - V_E + V_R$$

$$II. \quad d(V_S)/dt = V_P S_P - V_E S_E + V_G S_G + V_O S_O + V_R S_R + V_X (S_{ocn} - S_{sis})$$

$$III. \quad d(V_Y)/dt = V_P Y_P - V_E Y_E + V_G Y_G + V_O Y_O + V_R Y_R + V_X (Y_{ocn} - Y_{sis}) + \Delta Y$$

Donde  $V_Q$  es el aporte de los ríos,  $V_P$  la precipitación,  $V_G$  las aguas subterráneas,  $V_O$  los aportes antropogénicos,  $V_E$  es el flujo de evaporación y  $V_R$  el flujo residual.

$S_E$ ,  $S_P$ ,  $S_Q$ ,  $S_G$ ,  $S_O$  y  $S_R$  son la salinidad del agua evaporada, precipitada, de los escurrimientos, subterránea, de los aportes antropogénicos y la salinidad residual (promedio de salinidad entre el estuario y la laguna) respectivamente.  $S_{est}$  y  $S_{lag}$  son las salinidades del mar y la laguna respectivamente.

$Y_E$ ,  $Y_P$ ,  $Y_Q$ ,  $Y_G$ ,  $Y_O$ ,  $Y_R$ ,  $Y_{est}$  y  $Y_{lag}$  son la concentración de nitrógeno total o fósforo total en el agua evaporada, precipitada, de los ríos, subterránea, de los aportes antropogénicos, en el flujo residual, en el estuario adyacente y en la laguna respectivamente.

$\Delta Y$  es el cambio de  $N_t$  o  $P_t$ , que es una medida de los flujos biogeoquímicos dentro del sistema (Gordon *et al.*, 1996). Considerando el estado estacionario,  $dV/dt$ ,  $d(V_S)/dt$  y  $d(V_Y)/dt$  son nulos, por lo que el sistema de ecuaciones propuesto permitió calcular el flujo residual ( $V_R$ ), el flujo de mezcla ( $V_X$ ) y por consiguiente el balance biogeoquímico ( $\Delta Y$ ) en la laguna.

Para el cálculo del balance de agua y dada la ausencia de información hidrológica de esta laguna como en otros sitios del país y el mundo, el Modelo de balance de LOICZ permite considerar la hidrología con que se cuenta (Smith *et al.*, 1997; Camacho-Ibar, 2000) e incluir los datos ausentes como cero; en el caso de la laguna El Yucateco, los datos de precipitación y evaporación disponibles fueron utilizados así como el gasto del río Tonalá que es aproximadamente constante, a diferencia del río Chicozapote; que es escaso e intermitente. Por consiguiente esta información es suficiente para una primera aproximación (Gordon *et al.*, 1996) considerándose nulos los aportes aguas subterráneas y antropogénicas datos no disponibles para la elaboración de este estudio.

$V_E$  y  $V_P$  se estimaron a través de la conversión de los respectivos promedios anuales registrados para el Municipio de Huimanguillo, escalados al área de la laguna (1.55 y 1.06 mm/año respectivamente).

$V_R$  se estimó mediante el balance entre los flujos de entrada y salida de agua dulce del sistema el cual debe ser igual al volumen almacenado dentro del sistema (Ecuación 1)

$$V_R = V_E - V_P \quad (1)$$

A partir de las consideraciones anteriores, el flujo de mezcla se calculó por: (Ecuación 2)

$$V_X = -V_R S_R - (S_{est} - S_{lag}) \quad (2)$$

Asimismo el tiempo de residencia hidráulico de la laguna se calculó a partir del volumen total de la laguna ( $V_T$ ), el valor modular del flujo residual y el flujo de mezcla. (Ecuación 3)

$$T = V_T / (V_E + V_P) \quad (3)$$

Por las anteriores consideraciones y despreciando la concentración de N y P en el agua precipitada y evaporada, la ecuación III se reescribió de la siguiente forma: (Ecuación 4)

$$0 = V_R Y_R + V_X (Y_{est} - Y_{lag}) + \Delta Y \quad (4)$$

Con lo cual se determinó el flujo no-conservativo en la laguna El Yucateco. Utilizando la estequiometría simple, se determinó el metabolismo neto del ecosistema, que es la diferencia entre la producción primaria bruta y la respiración. Dicha estimación se realizó multiplicando la relación C:P esperada según Redfield, con signo negativo, por el flujo no-conservativo de fósforo total ( $-106 \cdot \Delta DtP$ ).

De igual forma, se consideró que la desviación del flujo de nitrógeno total con base en lo “esperado”, según el flujo de fósforo inorgánico disuelto y la proporción

Redfield ( $\Delta D_tN - 16^* \Delta D_tP$ ) es proporcional a fijación de nitrógeno – desnitrificación (Gordon *et al.*, 1996).

## RESULTADOS

### Parámetros fisicoquímicos

#### *Temperatura*

El promedio general fue de 28.5°C, el máximo 35.3°C y el mínimo 21.4°C (Tabla 2); este promedio no definió las condiciones y variaciones espacio-temporales del sistema fluvio-lagunar. La distribución espacial de los valores térmicos formó una regionalización en dos grupos; el primero con las temperaturas más altas (27.6-29°C) en las estaciones desde el interior de la laguna hacia la influencia marina y los menores (26°C) en las estaciones del río Chicozapote (Fig. 2). El promedio térmico mayor (32.97°C) se registró en septiembre 2003.

Tabla 1. Mínimo, máximo, promedio general y desviación estándar de los parámetros fisicoquímicos de 2003 a 2009.

<i>Parámetros</i>	<i>Mínimo</i>	<i>máximo</i>	<i>Promedio general</i>	<i>desviación s</i>
<i>Temperatura (°C)</i>	21.40	35.30	28.50	2.97
<i>Salinidad (ups)</i>	<0.50	33.00	12.06	11.78
<i>Oxígeno disuelto (mg/l)</i>	0.00	8.50	4.00	2.30
<i>pH</i>	6.00	8.80	7.00	1.42
<i>Alcalinidad (mgCaCO3/l)</i>	25.00	266.00	81.20	53.44
<i>DQO (mgO2/l)</i>	8.00	136.00	37.27	34.78
<i>NH<sub>4</sub> (μM)</i>	<0.01	30.71	8.80	7.91
<i>NO<sub>2</sub> (μM)</i>	<0.01	1.64	0.54	0.63
<i>NO<sub>3</sub> (μM)</i>	<0.01	21.43	1.33	3.00
<i>N total (μM)</i>	7.14	228.60	63.19	53.50
<i>PO<sub>4</sub> (μM)</i>	<0.01	18.06	5.90	4.27
<i>P total (μM)</i>	3.23	138.00	33.90	26.83
<i>N:P</i>	0.10	10.86	2.52	2.39



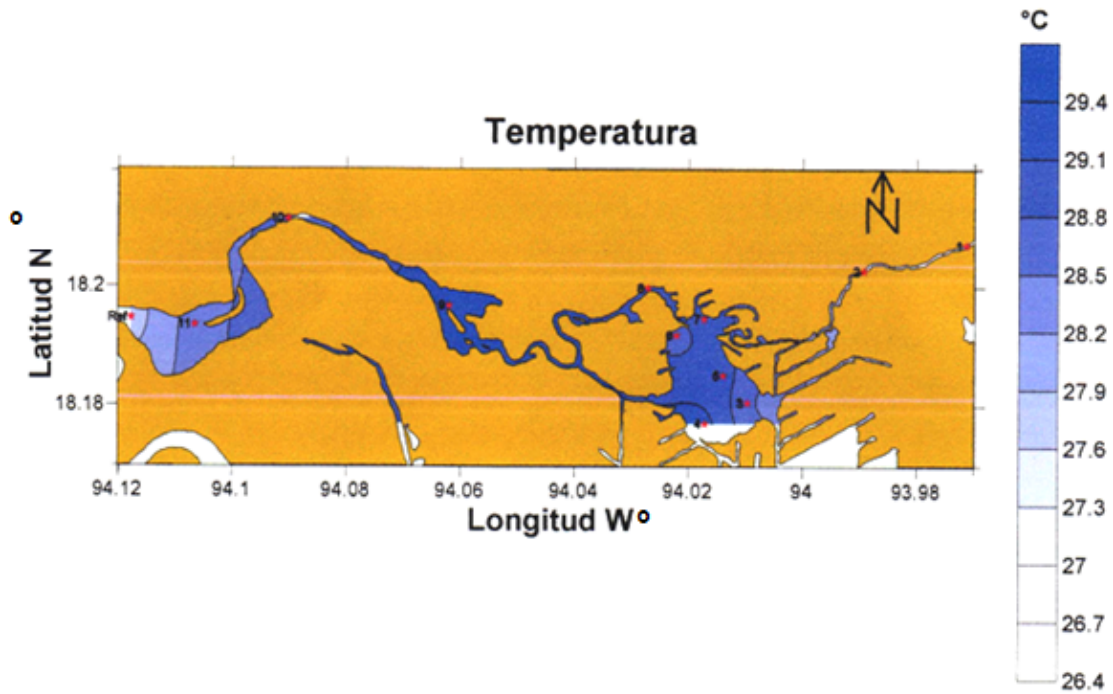


Figura 2. Distribución espacial promedio de temperatura (°C) de 2003 a 2009.

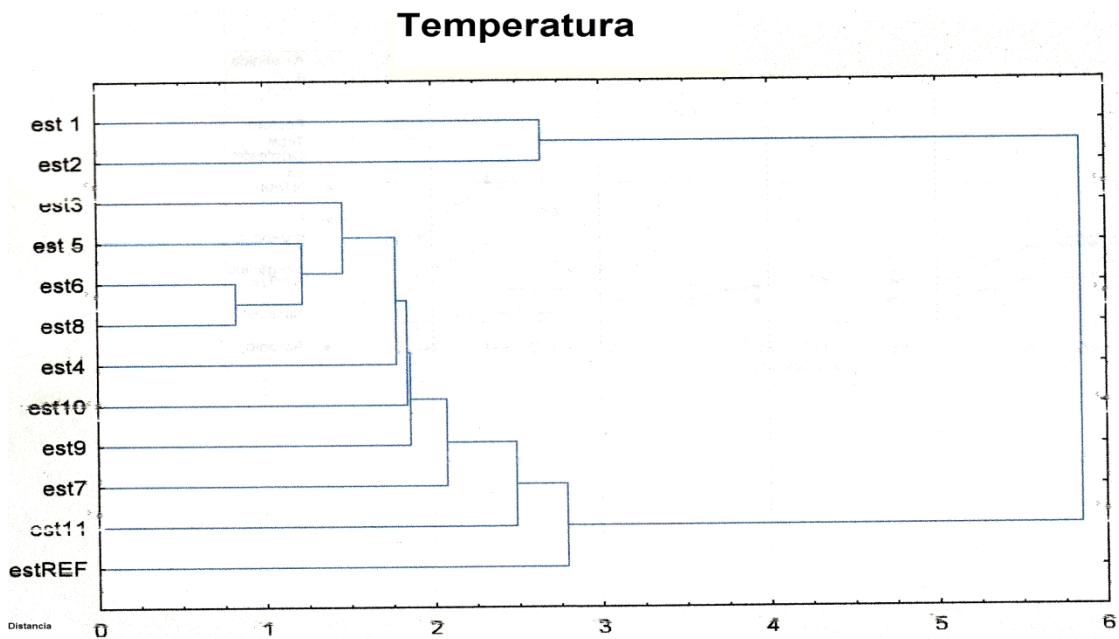


Figura 3. Análisis Cluster de temperatura °C promedio 2003 a 2009.

## Salinidad

El promedio general fue 12.06 ups, con un valor máximo de 33 ups (en la estación de referencia REF) y el mínimo no detectable (ND) en las estaciones del río Chicozapote (Tabla 2); el promedio no definió la variación espacio-temporal del sistema fluvio-lagunar. La distribución espacial estableció un gradiente; de menos en las estaciones con influencia dulceacuícola, a más en las estaciones con influencia marina (Fig. 4). El promedio mayor (27.8 ups) se registró para el mes de mayo 2009.

\*ups= unidades prácticas de salinidad

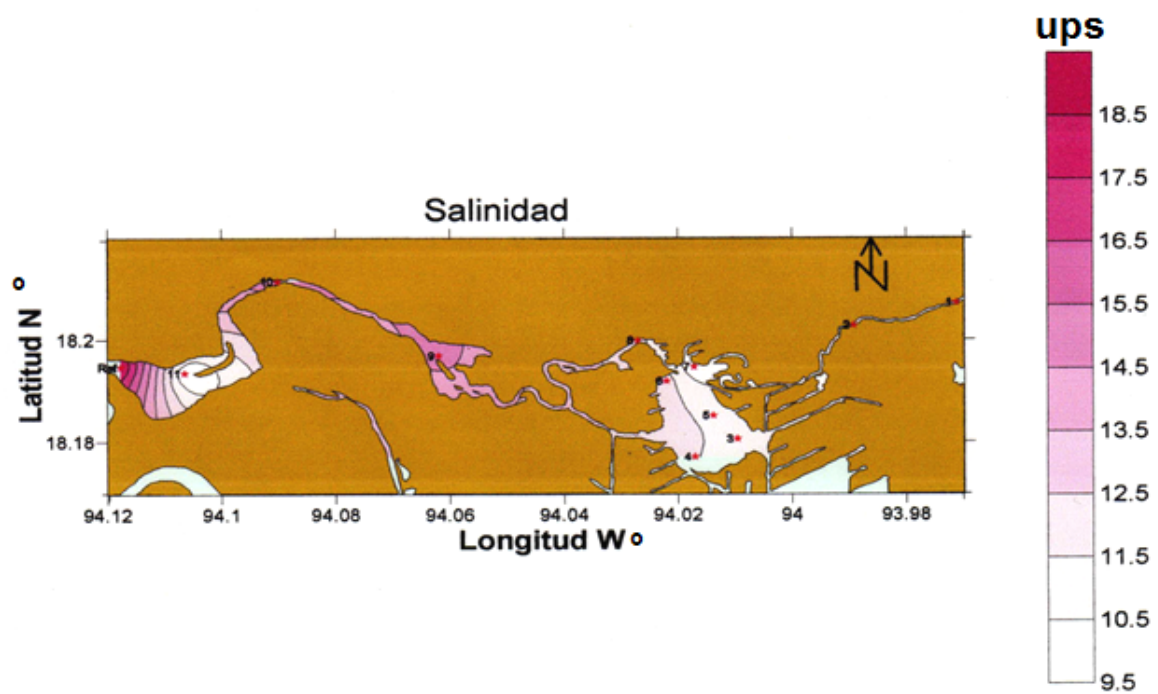


Figura 4. Distribución espacial de salinidad promedio (ups) de 2003 a 2009.

### ***Oxígeno disuelto***

Este parámetro presentó un intervalo que osciló desde la anoxia a 8.5 mg/l; con un promedio general de 4 mg/l (Tabla 1), este promedio no definió la variación espacio-temporal del cuerpo fluvio-lagunar.

El mapa reveló un gradiente; de menos en las estaciones del interior de la laguna a más en las estaciones con influencia marina (Fig. 5). Mayo 2009 presentó el promedio más alto (6.17 mg/l), como en el caso de la salinidad.

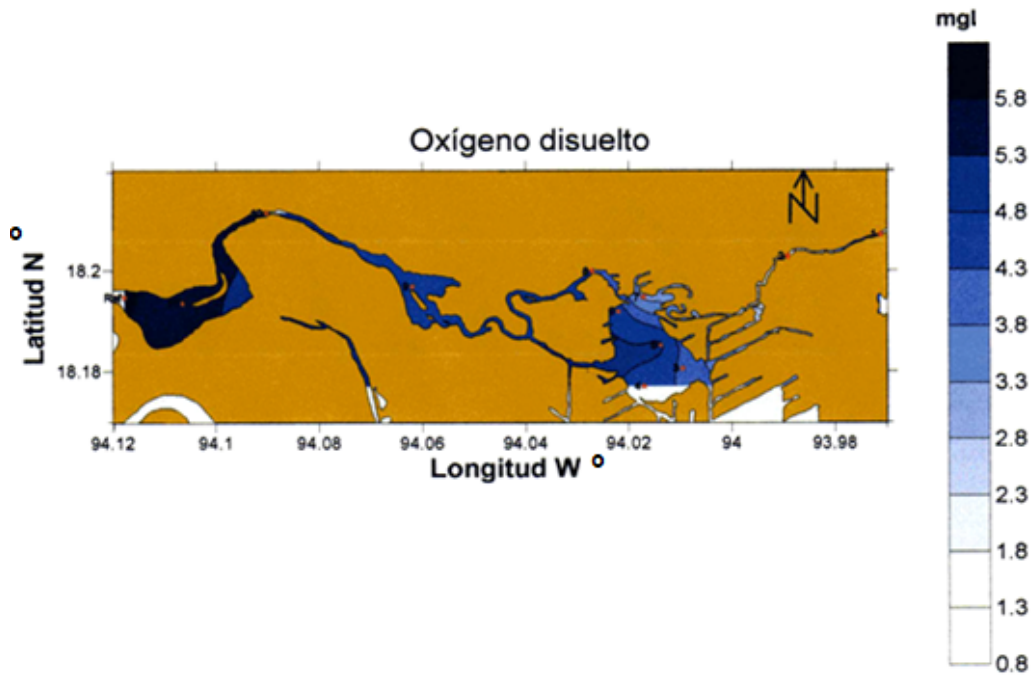


Figura 5. Distribución espacial del oxígeno disuelto (mg/l) de 2003 a 2009

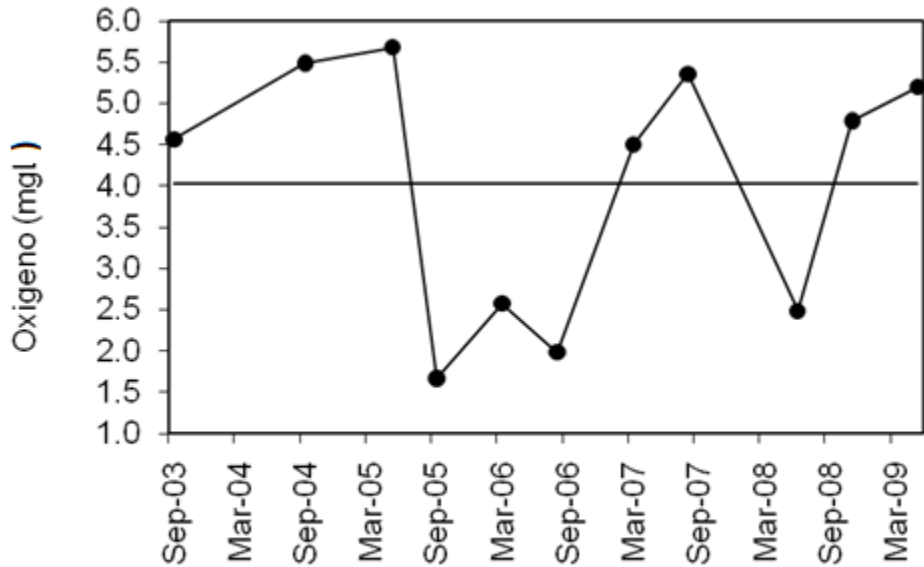


Figura 6. Tendencia del contenido de oxígeno disuelto en el período de estudio 2003 a 2009.

### **pH**

El intervalo de unidades osciló entre valores de 6 a 9; de lo ligeramente ácido a lo alcalino, con un promedio de 7 (Tabla 2). La distribución del pH describió un gradiente que mostró los niveles alcalinos en las estaciones con influencia marina y los ligeramente ácidos en las estaciones al interior del sistema fluvio-lagunar (Fig. 7). Este parámetro no presentó variaciones temporales significativas.

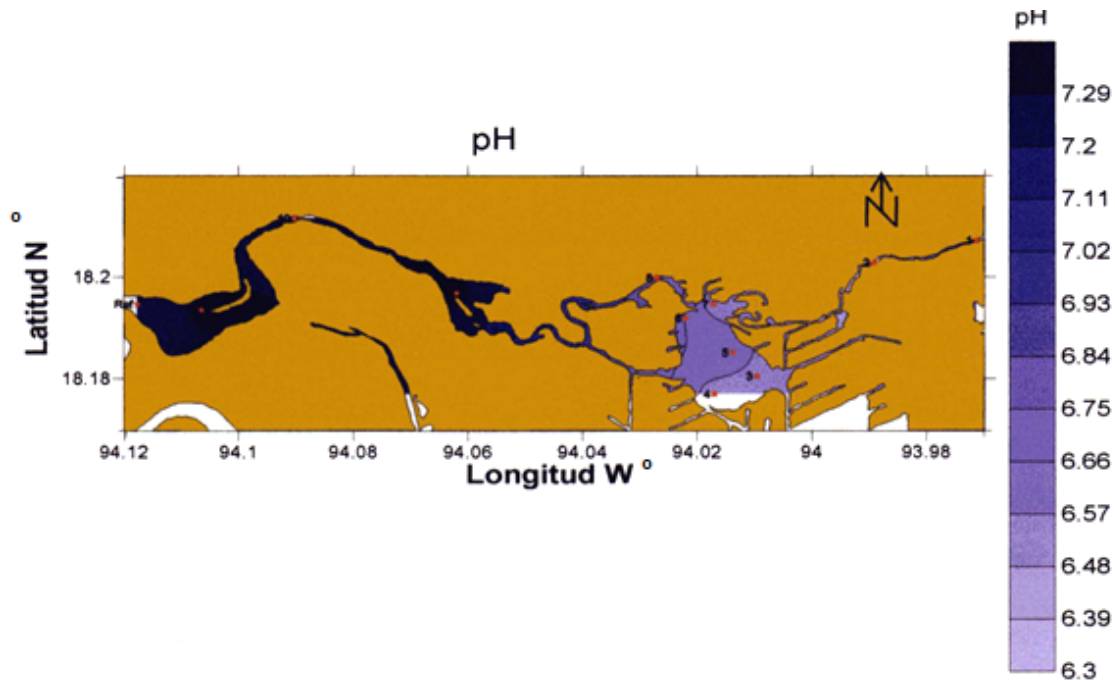


Figura 7. Distribución espacial pH promedio de 2003 a 2009.

### ***Alcalinidad***

Los niveles de este parámetro tuvieron una oscilación entre 25 a 266 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  con un promedio general de 81.2 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  (Tabla 2). El análisis Cluster mostró una regionalización agrupando a las estaciones del interior del cuerpo fluvio-lagunar y otro grupo a las estaciones con influencia marina (Fig. 8). Por su parte, el mapa reveló que los promedios menores se ubicaron en las estaciones del río Chicozapote y al interior de la laguna; los niveles más altos se localizaron en estaciones con influencia marina (11, 10 y 9) (Fig. 9). El mes más conspicuo fue mayo de 2005 con un promedio de 150.5 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ .

## Alcalinidad

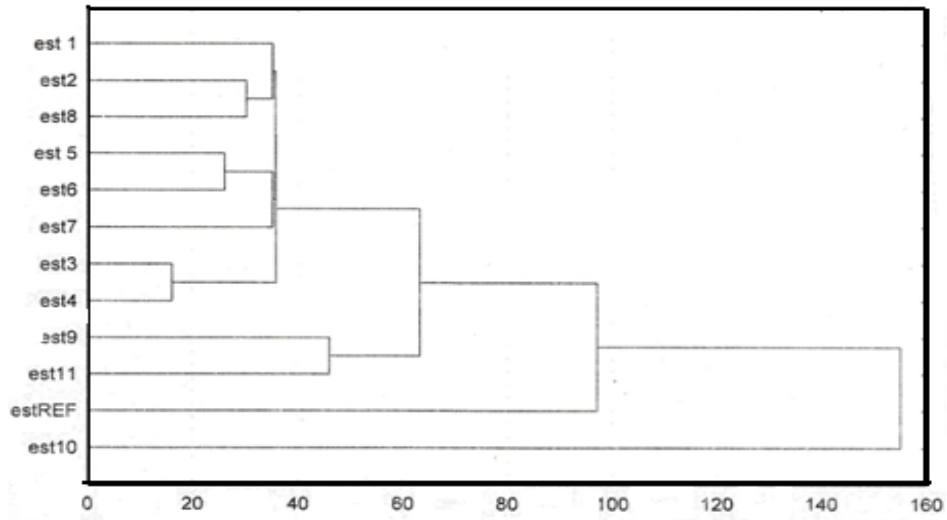


Figura 8. Análisis Cluster de alcalinidad promedio de 2003 a 2009.

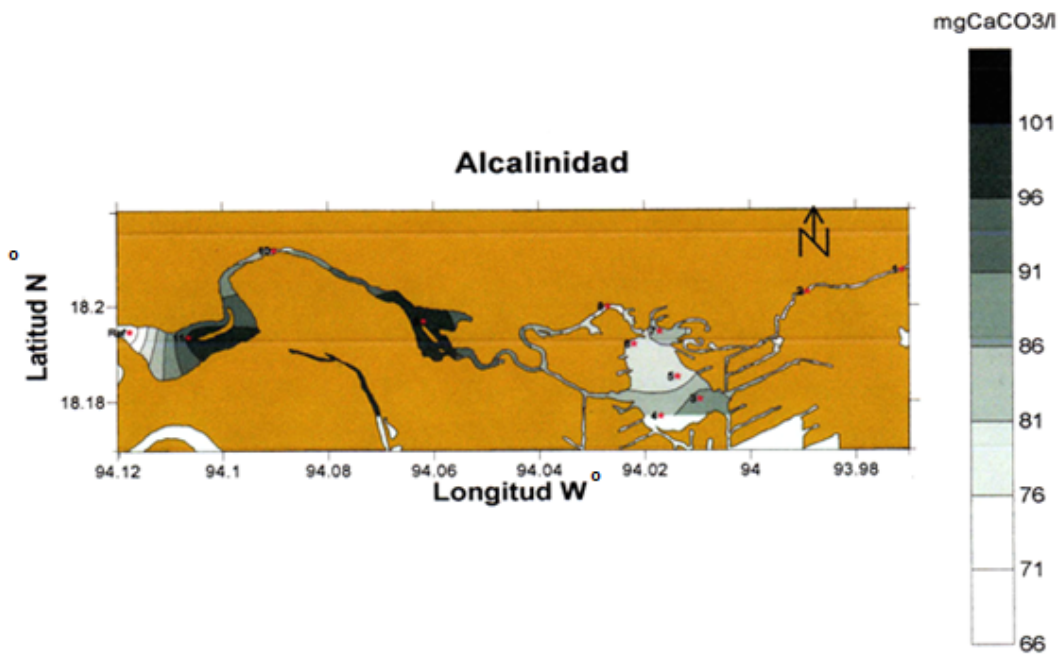


Figura 9. Regionalización de la alcalinidad promedio de 2003 a 2009.

### ***Demanda Química de Oxígeno (DQO)***

Este parámetro mostró un intervalo de 5 a 136 mg O<sub>2</sub>/l y un promedio general de 37.27 mg O<sub>2</sub>/l (Tabla 1), aunque este último no definió las variaciones espacio-temporales. El mapa de distribución espacial (Fig. 10) agrupó a las estaciones en dos; el primer grupo con las estaciones al interior del cuerpo fluvio-lagunar y otro con las de mayor influencia marina (Fig. 10). El promedio más alto (94 mgO<sub>2</sub>/l) se registró en agosto de 2006 (Fig.11).

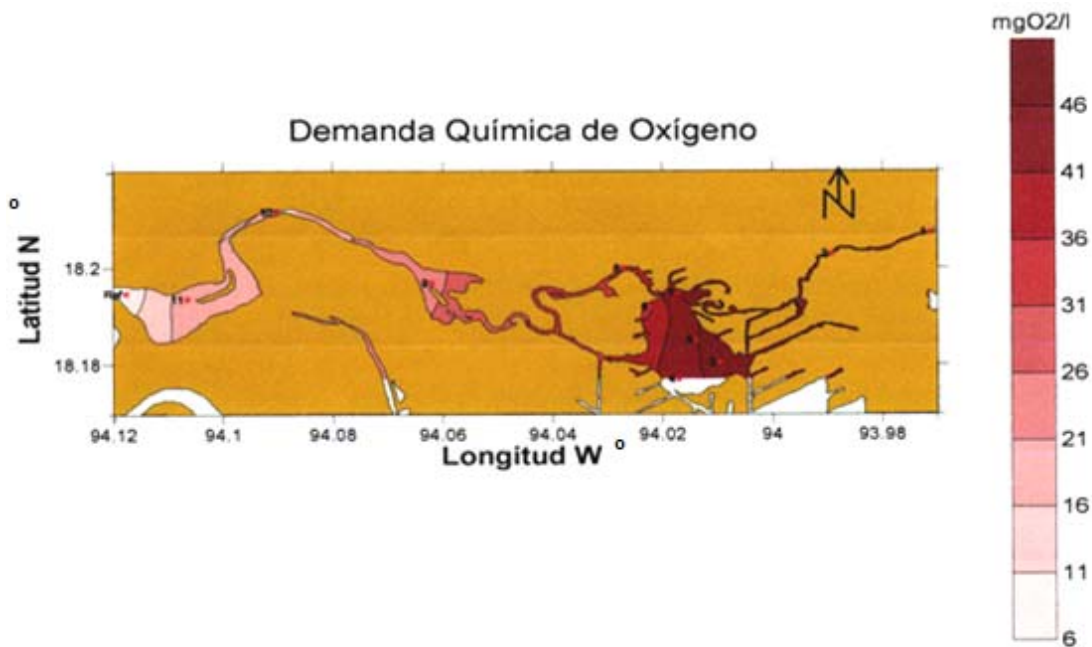


Figura 10. Distribución espacial de DQO promedio de 2003 a 2009.

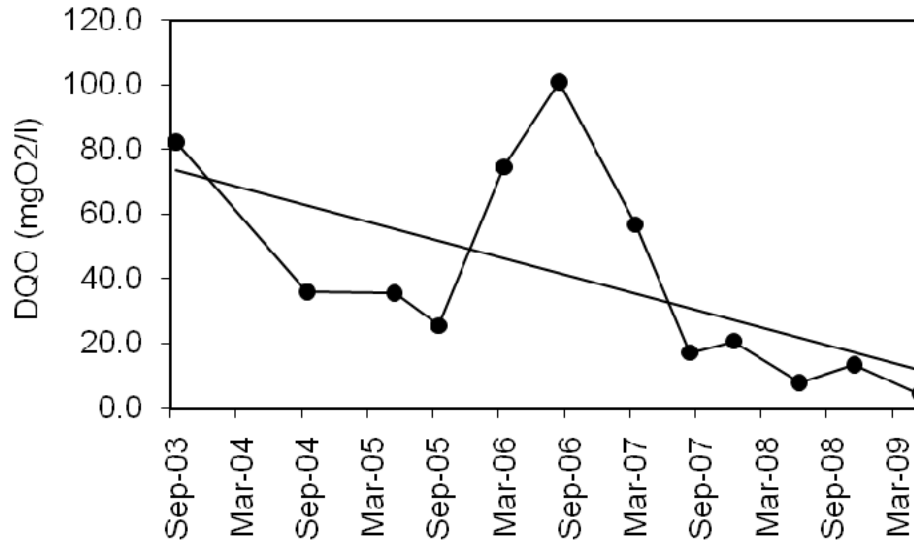


Figura 11. Tendencia de la DQC en el período de estudio de 2003 a 2009.

## NUTRIENTES

### *Amonio (NH<sub>4</sub>)*

Este nutriente registró un intervalo de <0.001 a 30.71  $\mu\text{M}$  y un promedio general de 8.8  $\mu\text{M}$  (Tabla 2). La distribución espacial describió un gradiente; las mayores concentraciones se encontraron en las estaciones al interior del sistema fluvio-lagunar y los contenidos disminuyeron al acercarse a la influencia marina (Fig. 12). El promedio más alto fue 20.8  $\mu\text{M}$  registrado en diciembre de 2007 (Fig. 13).



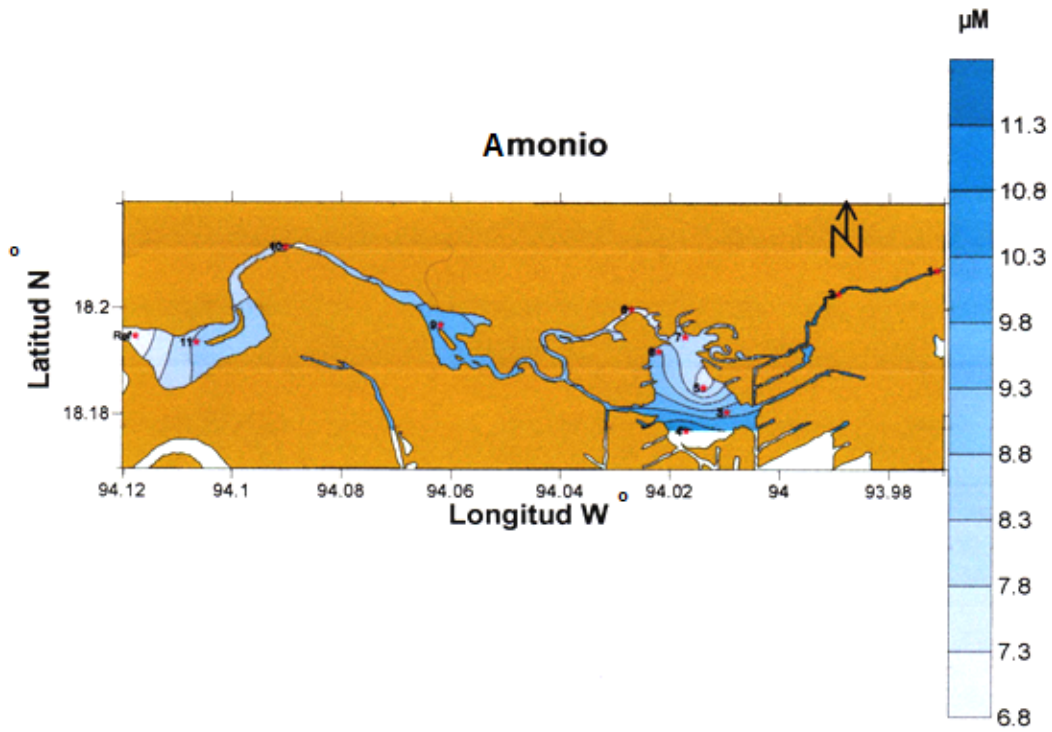


Figura 12. Distribución espacial contenido de  $\text{NH}_4$  promedio de 2003 a 2009.

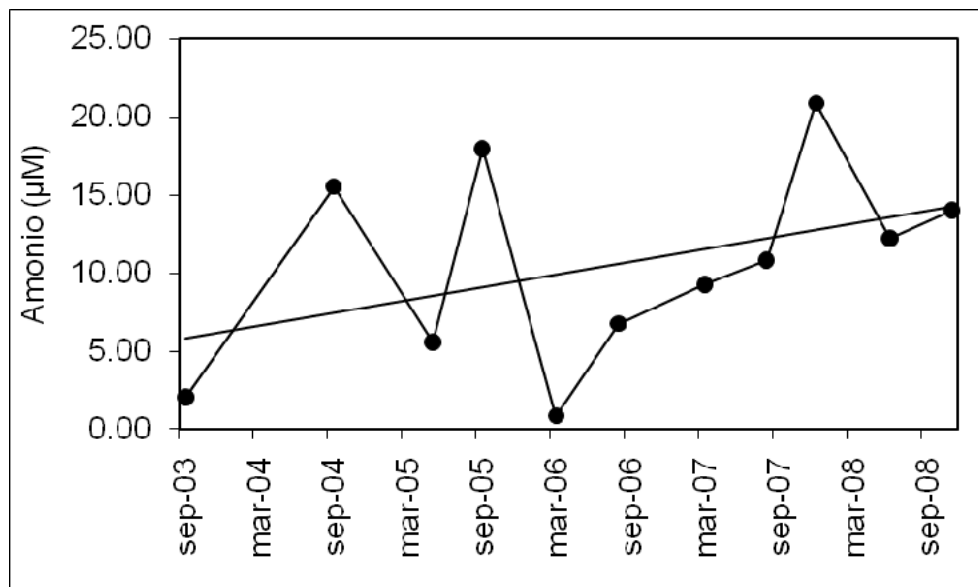


Figura 13. Tendencia del contenido promedio de amonio durante el período de estudio 2003 a 2009.

### **Nitritos ( $NO_2$ )**

El contenido de este nutriente tuvo un intervalo de variación de  $<0.001$  a  $2.8 \mu M$  con un promedio general de  $0.54 \mu M$  (Tabla 2). La distribución espacial presentó un gradiente; el mayor contenido se registró en las estaciones dentro del sistema fluvio-lagunar y el menor en las próximas a la influencia marina (Fig. 14). El promedio más alto ( $1.90 \mu M$ ) como en el caso del amonio, se registró en diciembre de 2007.

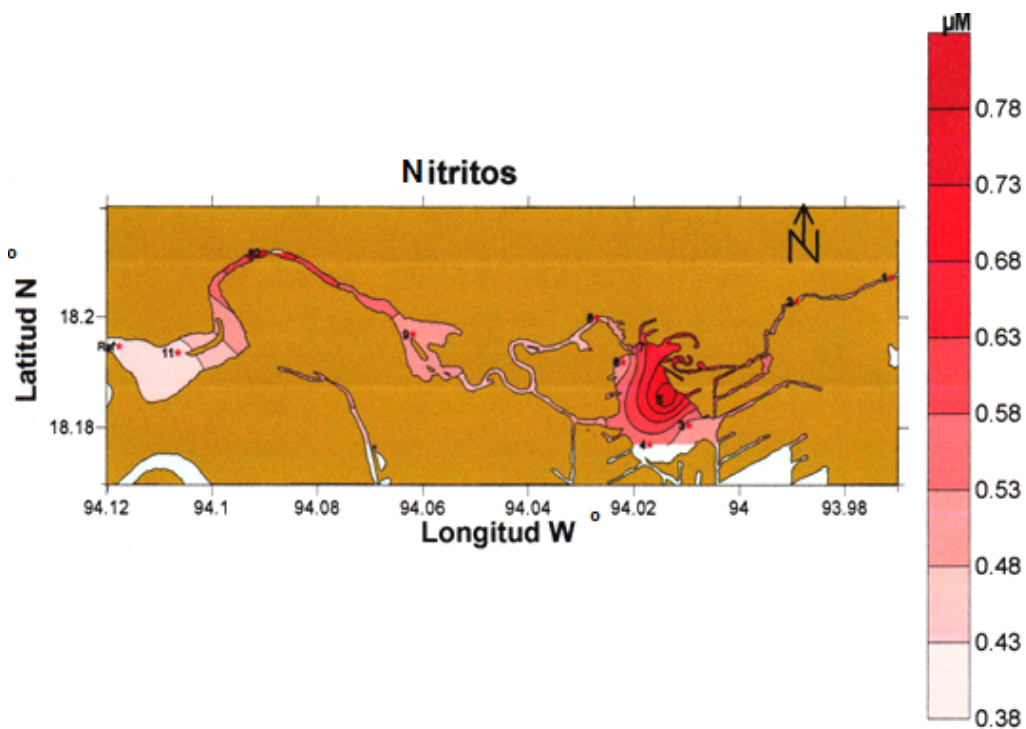


Figura 14. Distribución espacial del contenido promedio de  $NO_2$  de 2003 a 2009

### **Nitratos ( $NO_3$ )**

El intervalo de este parámetro fue de  $<0.001$  a  $21.43 \mu M$  con un promedio general de  $1.33 \mu M$  (Tabla 2). La distribución espacial de los nitratos formó un gradiente; los mayores contenidos se registraron al interior del sistema fluvio-lagunar y disminuyeron al acercarse a la influencia marina (Fig. 15). El muestreo con el

promedio más conspicuo fue septiembre de 2003 con 11  $\mu\text{M}$ .

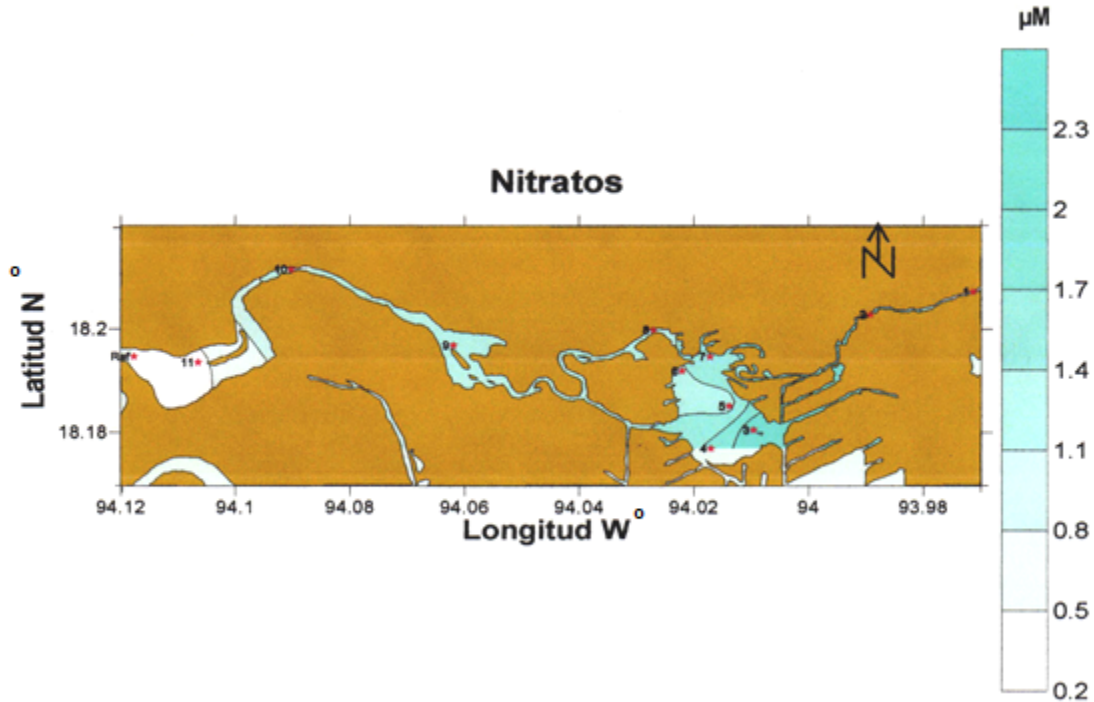


Figura 15. Distribución espacial contenido promedio de  $\text{NO}_3$  de 2003 a 2009.

### ***Nitrógeno total***

El intervalo del contenido de este nutriente fue de 7.14 a 228.6  $\mu\text{M}$  y el promedio general de 63.19  $\mu\text{M}$  (Tabla 2). La distribución espacial fue gradual; las mayores concentraciones al interior del cuerpo fluvio-lagunar y las menores en estaciones más cercanas a la influencia marina (Fig. 16). El contenido promedio mayor (151.2  $\mu\text{M}$ ) fue registrado en diciembre de 2007 (Fig. 17), de igual forma que  $\text{NH}_4$  y  $\text{NO}_2$ .

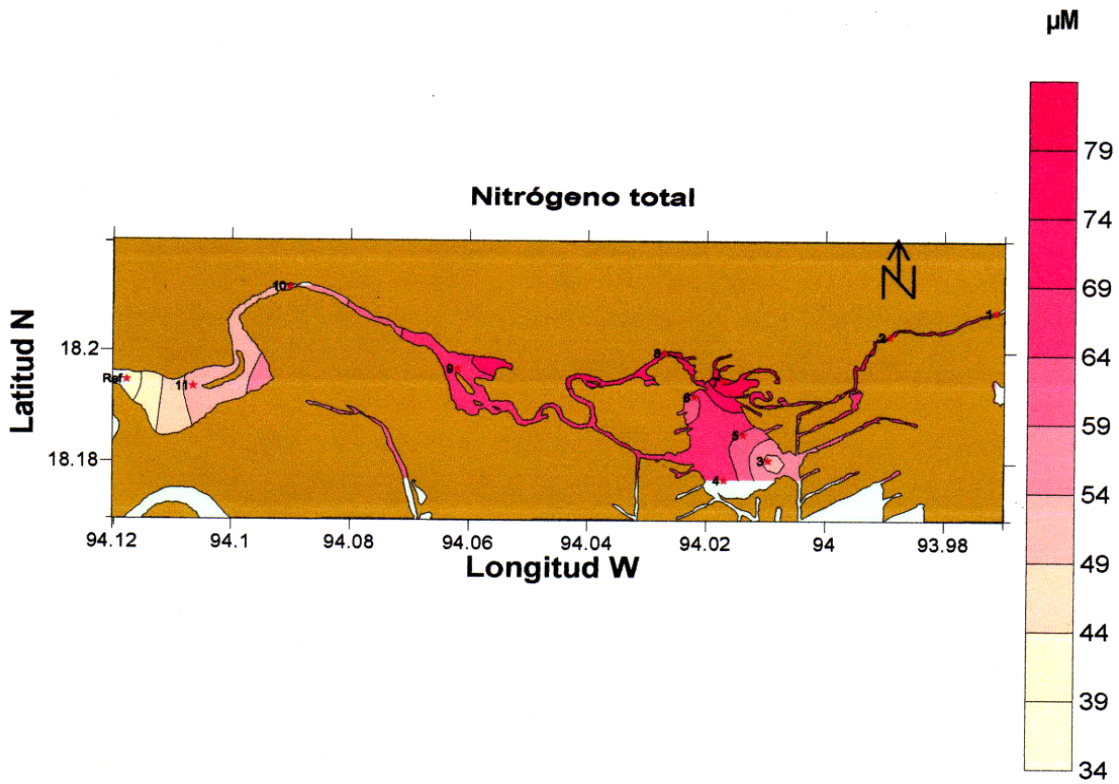


Figura 16. Distribución espacial del Nt promedio de 2003 a 2009.

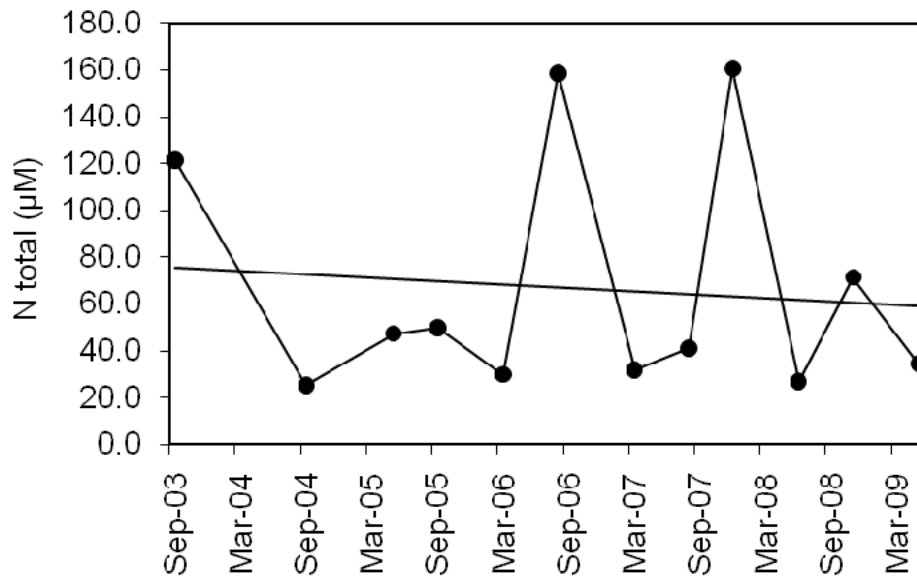


Figura 17. Tendencia del contenido promedio de Nt en el período de estudio de 2003 a 2009.

### **Ortofosfatos ( $PO_4$ )**

El intervalo de este parámetro durante el muestreo fue de  $<0.001$  a  $18.06 \mu\text{M}$  y el promedio general de  $5.90 \mu\text{M}$  (Tabla 2). Con base en el mapa, se registró una distribución espacial gradual; los mayores contenidos se observaron al interior del sistema fluvio-lagunar disminuyendo hacia las estaciones influenciadas por el mar (Fig. 18). El contenido promedio de  $PO_4$  más conspicuo ( $19 \mu\text{M}$ ) se registró en septiembre de 2004 (Fig.19).

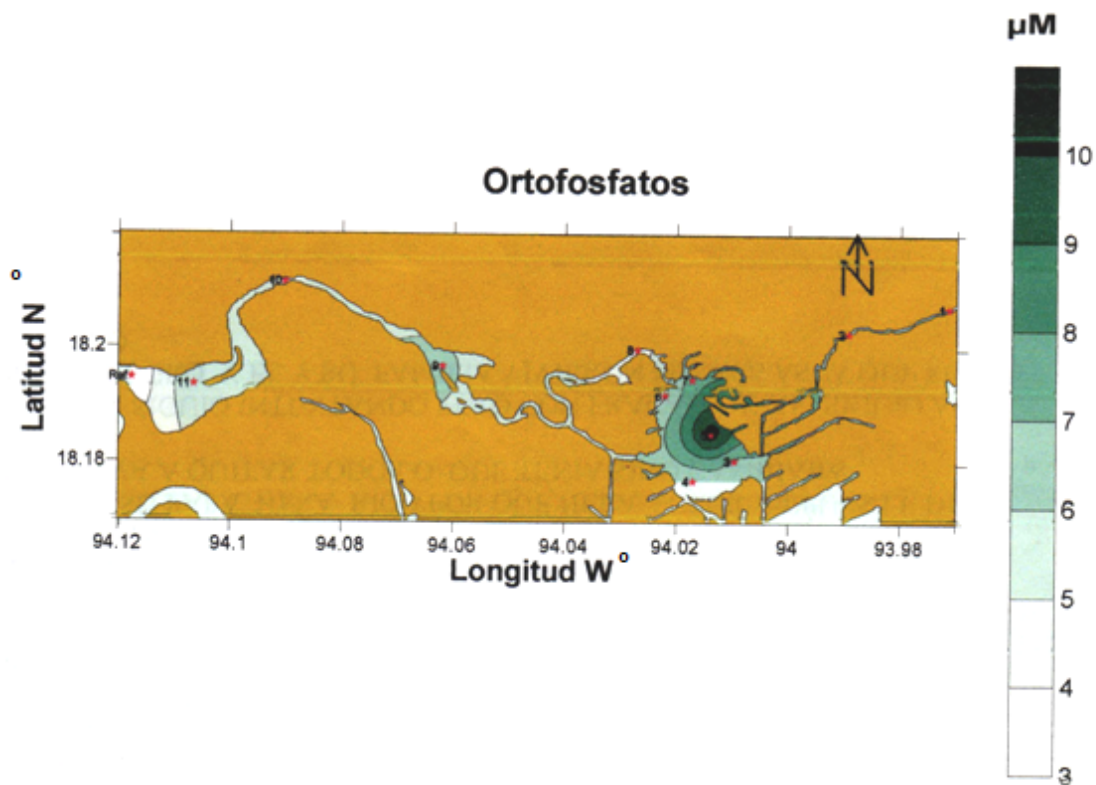


Figura18. Distribución espacial de  $PO_4$  promedio de 2003 a 2009.

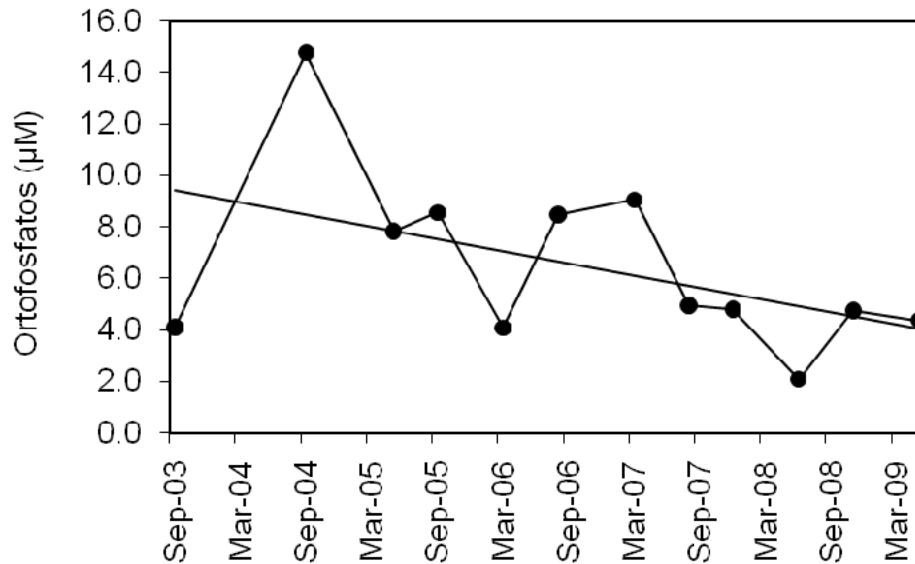


Figura19. Tendencia del contenido promedio de ortofosfatos en el período de estudio de 2003 a 2009.

### ***Fósforo total***

El intervalo de variación de este parámetro fue de 3.23 a 138  $\mu\text{M}$  y el promedio general de 34  $\mu\text{M}$  (Tabla 2). La distribución espacial de este nutriente describió un gradiente; los mayores contenidos en las estaciones al interior del sistema fluvio-lagunar y los menores en aquellas cercanas a la boca marina (Fig. 20). El promedio más alto (75  $\mu\text{M}$ ) se registró en agosto 2006 coincidiendo con la DQO (Fig. 21).

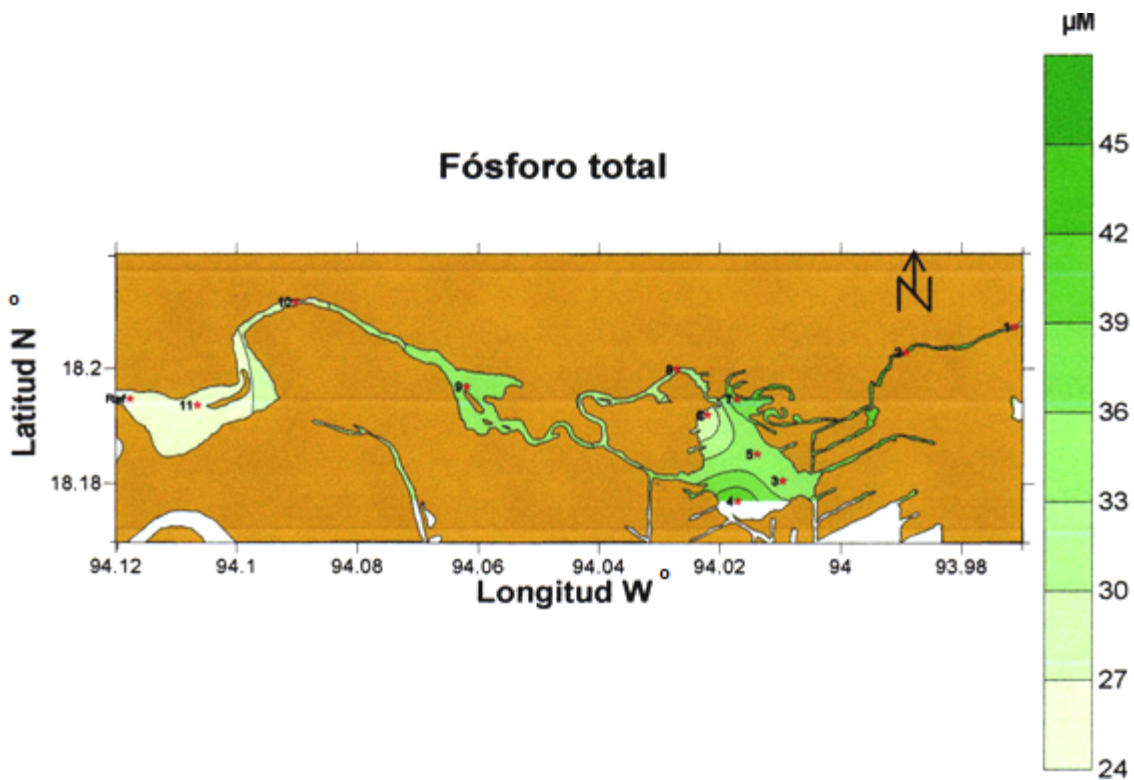


Figura 20. Distribución espacial de Pt promedio de 2003 a 2009.

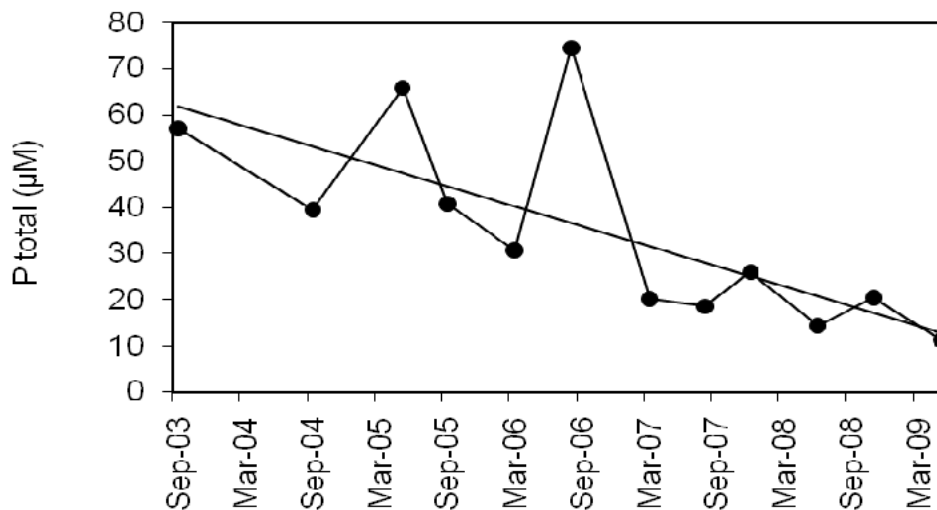


Figura 21. Tendencia del contenido promedio de P total en el período de estudio de 2003 a 2009.

### Proporción N:P

El intervalo de variación de esta proporción en todo el período de estudio (2003 a 2009) fue de 0.1 a 10.86 y el promedio general de 2.52 (Tabla 2). Esta proporción registró el promedio mayor (6.4) en diciembre de 2007 (Fig. 22). Se registraron proporciones mayores a 10 en mayo 2009 en cuatro estaciones, tanto de influencia marina como fluvio-lagunar (estaciones 4, 6, 8y 10).

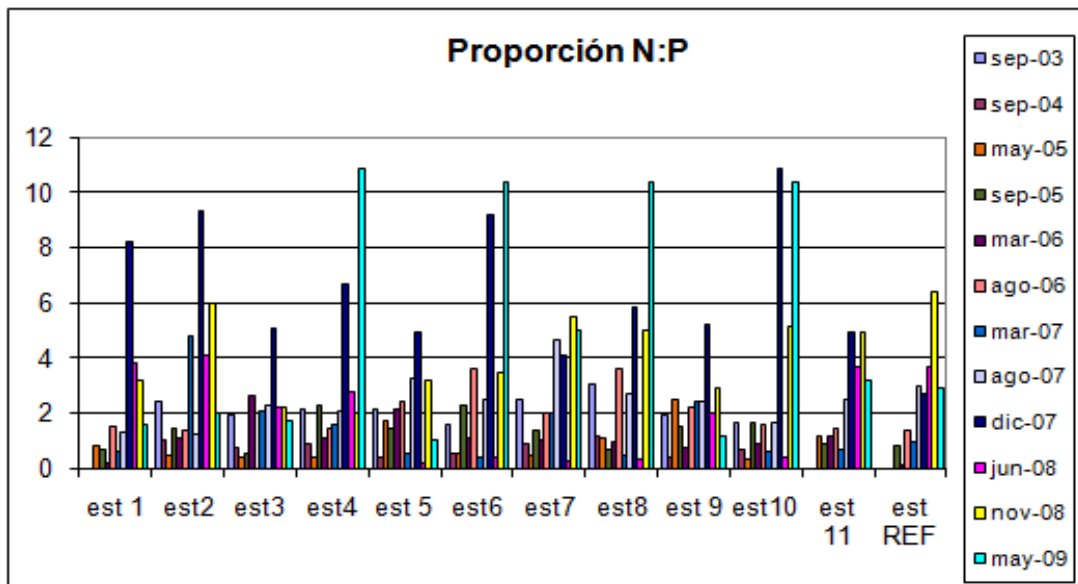


Figura 22. Proporción N:P de 2003 a 2009.

### Clorofila "a".

El intervalo fue de 1.76 mg/m<sup>3</sup> a 28.8 mg/m<sup>3</sup> y el promedio general de 15.10 mg/m<sup>3</sup> (Tabla 3). Con base en el mapa se registró que las concentraciones más altas se distribuyeron en las estaciones del río Chicozapote y la estación que une este río con la laguna (estación 7). El contenido mayor promedio (17.3 mg/m<sup>3</sup>) fue en mayo 2009 (Tabla 3) coincidiendo con los contenidos más altos de oxígeno disuelto.



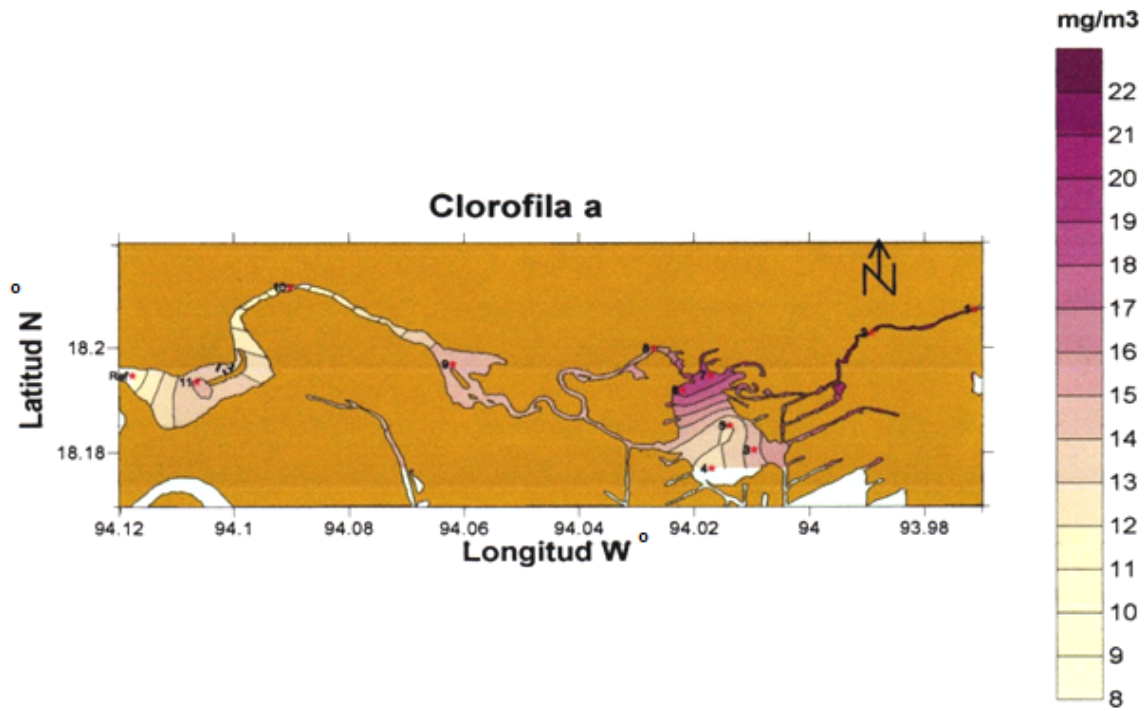


Figura 23. Distribución espacial de Clorofila “a” promedio de 2008 a 2009.

Tabla 2. Mínimo, máximo y promedio de Clorofila “a” de 2008 a 2009.

<b>clorofila a</b> <b>mg/m<sup>3</sup></b>			
<b>Mes</b>	<b>Min</b>	<b>Máx</b>	<b>Promedio</b>
<i>jun-08</i>	5.88	27.05	15.09
<i>nov-08</i>	1.76	21.76	12.98
<i>may-09</i>	12.94	28.81	17.26

## Índice de Carlson (P)

Los niveles calculados van desde la oligotrofia hasta la hipertrofia. Las variaciones calculadas revelaron la alta heterogeneidad del estado trófico durante todo el período de estudio. En el último muestreo (mayo 2009) las condiciones tendieron hacia la mesotrofia (Fig. 24). Sin embargo, de los 137 muestreos desde 2003 a 2009 y promediando los resultados, el estado eutrófico fue dominante con un 49%, seguido del mesotrófico con 34%, oligotrófico 14% y hipertrófico 3 % (Fig. 25).

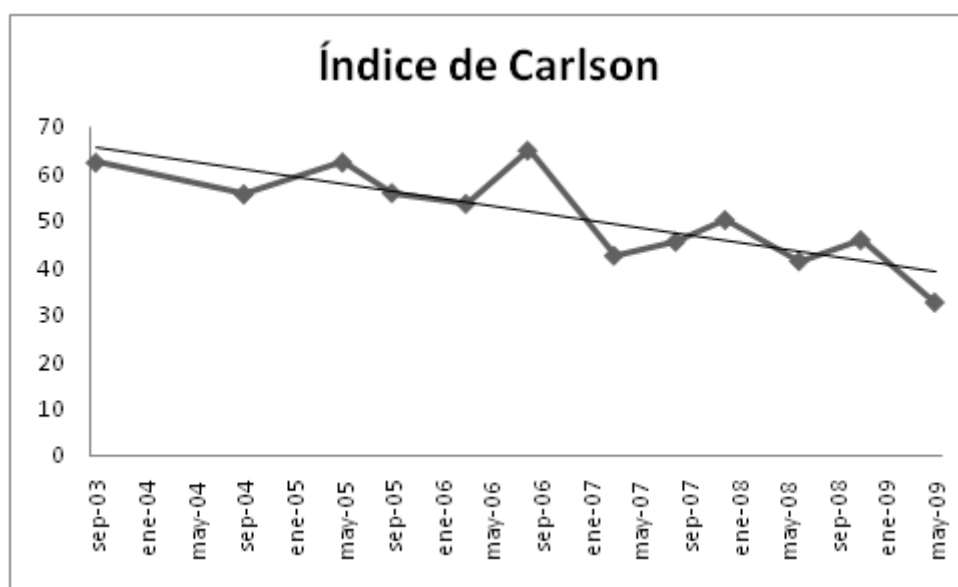


Figura 24. Tendencia del estado Trófico según Índice Carlson (fósforo total).

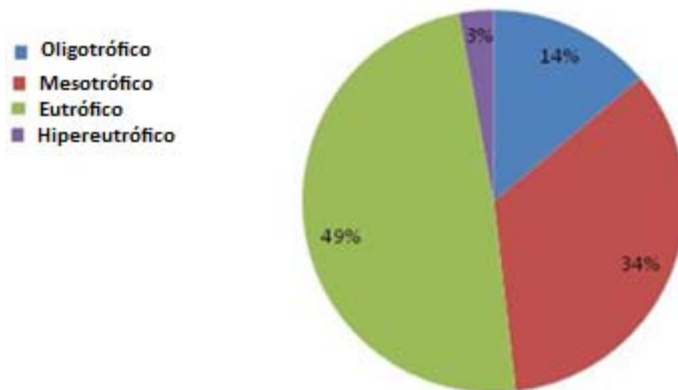


Figura 25. Porcentaje del estado trófico de los 137 muestreos de 2003 a 2009.

## Modelo de LOICZ

### *Balance de agua y sales*

El flujo residual de agua ( $F_r$ ) fue negativo ( $-11.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ ), lo cual indica que es un flujo que de forma neta sale de la laguna. Sin embargo el flujo de mezcla ( $F_x = 26.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ ), resultó prácticamente el doble (Fig.26), lo cual proporcionalmente conduciría a una mejor renovación del agua salobre que se intercambia con el estuario del río Tonalá, que el agua dulce que recibe la laguna vía las lluvias y el escurrimiento superficial (73.7 por 167.2 días, respectivamente). El tiempo de residencia total estimado resultó de 0.14 años (50.5 días).

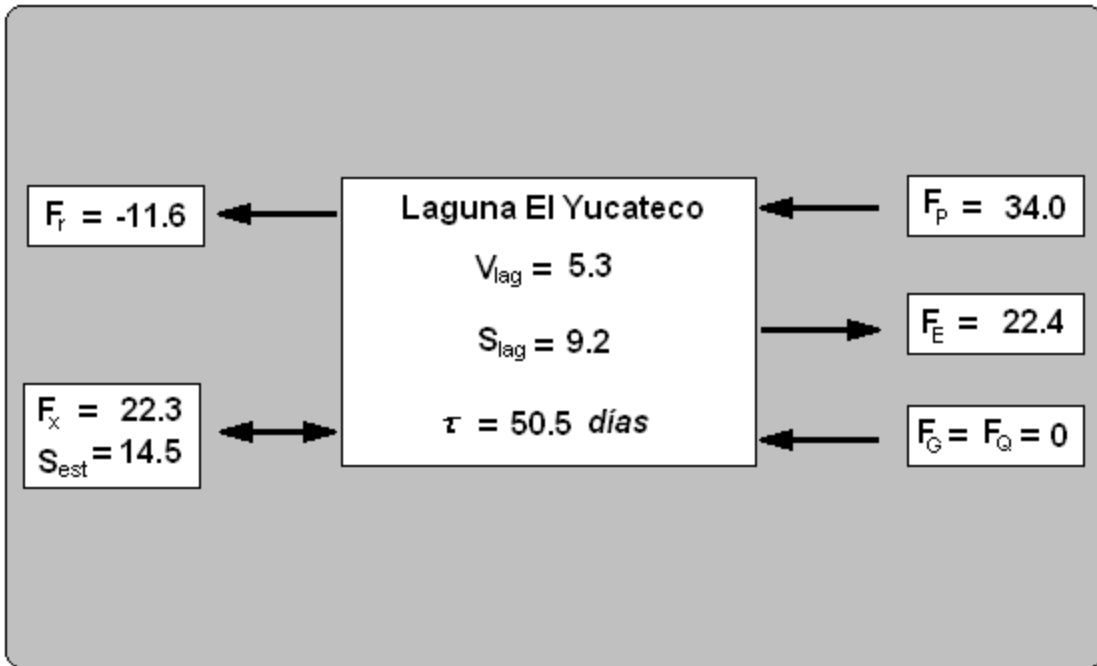


Figura 26. Balance de agua y sales en la laguna El Yucateco. El volumen de la laguna está en  $10^6 \text{ m}^3$ ; los flujos de agua en  $10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  y los flujos de sales en  $10^3 \text{ año}^{-1}$ .

A partir de los resultados obtenidos por el modelo de LOICZ, los valores positivos de  $\Delta DtN$  y  $\Delta DtP$  indican que la laguna “El Yucateco” exportó nitrógeno y fósforo hacia el estero del río Tonalá adyacente (Fig. 27).

En esta investigación no se realizaron mediciones directas de nutrientes sobre el cauce del río Chicozapote, por lo tanto, no han sido considerados en la contabilización del presupuesto de los nutrientes. Sin embargo, en la distribución espacial de ambos nutrientes, se determinó un gradiente en las concentraciones que se incrementaban hacia el cuerpo fluvial-lagunar lo cual confirma que el aporte principal proviene desde los sedimentos lacustres (De la Lanza, 1994), como desde la red de canales que circunda a dicha porción de la laguna. En

promedio para toda el área de la laguna (2.5 km<sup>2</sup>), se estarían exportando 400 mmolN m<sup>3</sup> /año y 266 mmolP m<sup>3</sup>/año respectivamente.

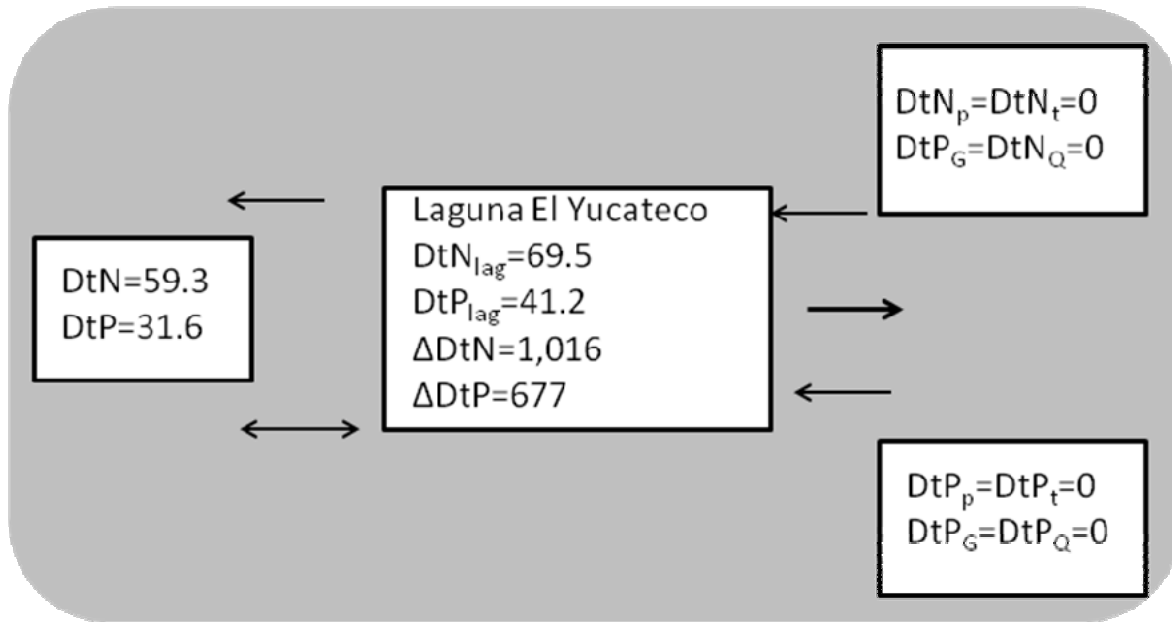


Figura 27. Balances de nitrógeno y fósforo en la laguna El Yucateco. Las concentraciones están en mmol m<sup>-3</sup> y los balances en 10<sup>6</sup> mmol año<sup>-1</sup>.

El volumen total de la laguna “El Yucateco” se intercambiaría en promedio en menos de dos meses, como se calculó. Ello sugiere que cantidades significativas de N y P estarían emitiéndose relativamente rápido hacia la región del estero del río Tonalá adyacente y eventualmente al mar. La estimación del metabolismo neto del ecosistema lagunar resultó heterótrofo (-28,230 mmol m<sup>3</sup>/año), es decir que predomina el proceso de respiración sobre el de producción. Asimismo y con base en la estequiometría simple se determinó un predominio promedio de la desnitrificación sobre la fijación de nitrógeno en la laguna (-3,861 mmol m<sup>3</sup> /año), lo cual había sido constatado con anterioridad en la laguna por Granados (1999).

## DISCUSIÓN

### *Temperatura*

Durante el período de estudio (2003-2009) las variaciones térmicas mostraron un amplio intervalo, como consecuencia de las épocas climáticas (lluvias, secas y “nortes”) y del microclima (de la Lanza, 1994). Las temperaturas más bajas se registraron en los meses de “nortes” (noviembre y marzo), las máximas en lluvias y secas (septiembre-mayo). De acuerdo a varios autores en la época de “nortes” las temperaturas son bajas debido al paso de masas de aire polar incrementándose en lluvias y secas (de la Lanza y Lozano, 1999; Morán–Silva *et al.*, 2004). La tendencia de la temperatura fue de mantenerse constante entre 28 a 30°C; con una excepción máxima de 35.3°C que se registró en septiembre de 2003, que el Sistema Meteorológico Nacional (SMN) refirió bajo condiciones anormalmente secas las cuales cambiaron por el paso de la tormenta tropical “Larry” la transición entre estos eventos pudo condicionar el aumento de temperatura en las estaciones de muestreo en ese mes de ese año (Tabla 3). En otros muestreos (mayo de 2005, septiembre de 2005 y agosto de 2007) se presentaron también niveles térmicos altos (de 30 °C a 32°C) en el agua, estos meses estuvieron influenciados por condiciones secas que incrementaron la temperatura en la columna de agua.

La distribución espacial mostró una regionalización que fue corroborada por medio del análisis Cluster y el mapa, en donde se formaron dos grupos; el primero con las temperaturas más frías en las estaciones del río Chicozapote (1 y 2) y el otro formado por las estaciones restantes. De acuerdo a de la Lanza y Lozano (1999) las aguas continentales presentan temperaturas más frías en comparación con

las de origen marino que son más cálidas, lo cual fue similar a lo registrado en la laguna “El Yucateco”.

Según Neue *et al.* (1997) el intervalo de temperatura en ambientes costeros tropicales va de 27 a 33°C; mientras que Contreras (2001) señaló que en las lagunas costeras mexicanas se presenta un intervalo térmico de 15 a 35°C y la temperatura del agua en “El Yucateco” osciló entre lo reportado para las lagunas costeras mexicanas. Se debe considerar que existen otros factores que influyen en la variación térmica como son: el horario del muestreo, la ocurrencia de vientos locales, el patrón de mareas y la profundidad del cuerpo de agua (Umgiesser y Neves, 2005).

### **Salinidad**

La variabilidad de la fisicoquímica del agua se hace más evidente cuando se considera la salinidad; esta característica se modifica visiblemente por las lluvias y la influencia de mareas (Morán-Silva *et al.*, 2004). Durante la época de lluvias, la influencia dulceacuícola es mayor y favorece condiciones de oligohalinidad; que el cuerpo de agua permanezca bajo dichas condiciones depende de la intensidad y frecuencia de las lluvias locales. Al disminuir las lluvias, el aporte de los ríos se hace menor, lo que provoca el aumento de la influencia mareal (Contreras, 2001).

La variación temporal en todo el período de estudio (2003-2009), presentó una tendencia a oscilar entre lo limnético (<0.5 ups) a lo euhalino (33 ups), de acuerdo a la clasificación de Carriker (1967). El promedio halino más alto se registró en mayo de 2009, mes informado por el SMN como de condiciones de sequía moderada (Tabla 3), lo que aumentó la evaporación concentrando el contenido de las sales. Se registraron también muestreos con condiciones limnéticas (<0.5 ups)

en todas las estaciones con un ligero incremento en los sitios muestreados con influencia marina; estos muestreos (agosto de 2006, marzo de 2007 y noviembre de 2008) se registraron en años considerados como secos, sin embargo; los muestreos se hicieron en meses con lluvias poco despreciables en el estado de Tabasco, lo cual explicaría las condiciones limnéticas ya que en la época de secas se considerará que las condiciones halinas se desarrollan por una disminución en el escurrimiento de aguas continentales y el aumento de la influencia mareal, por lo tanto, lo observado en “El Yucateco” pudo ser resultado de una medición errónea, sin dejar de considerar la posibilidad de la ocurrencia de una bajamar y precipitaciones aisladas por el frente frío.



Tabla 3. Relación entre precipitación media mensual en Tabasco, eventos meteorológicos y altos valores en los parámetros fisicoquímicos. *Información obtenida del monitor de sequía del Servicio Meteorológico Nacional Mexicano (SMN)*

Mes de muestreo	PMM (mm)	Evento	Parámetro
sep-03	234.9	Condiciones anormalmente secas-tormenta tropical "Larry"	temperatura
sep-04	312.4	Condiciones de sequía moderada	ortofosfatos
may-05	80.6	Condiciones de sequía severa centradas en Tabasco	alcalinidad
sep-05	383.4	Ciclones tropicales condiciones secas en todo el país	
mar-06	161.8	Precipitaciones 6% menores en el sureste del país	
ago-06	260.8	Condiciones anormalmente secas- sequía moderada	DQO/ Fósforo total
mar-07	65.9	Se extienden condiciones de un invierno seco	
ago-07	439.9	Anormalmente seco- sequía moderada y paso del huracán "Dean"	
dic-07	77.8	Fuertes lluvias e inundaciones (oct-nov07)	amonio, nitritos, nitrógeno total y proporción N:P
jun-08	308.4	Anormalmente secas-sequía moderada- sequía moderada y remanente "Arthur"	
nov-08	54.3	Frentes fríos y eventos de norte en el litoral Golfo de México y sequía moderada	
may-09	79.0	Condiciones anormalmente secas-sequía moderada, aparición frentes fríos y ondas tropicales	salinidad, Oxígeno disuelto y clorofila a

\*PMM precipitación media mensual.

La distribución espacial de los niveles halinos describió un gradiente definido por la entrada de agua marina y continental; las estaciones 1 y 2, presentaron condiciones salinas más bajas por su ubicación en el río Chicozapote (Fig.1) mientras que la estación de referencia (REF) registró las concentraciones más altas como resultado de la influencia marina. García-Nagaya y Castañeda (1994) refieren que las condiciones salinas existen en función de las características propias de cada laguna; por ejemplo, la dinámica de circulación, sitios con influencia marina o dulceacuícola como en el caso de “El Yucateco”, donde las estaciones que presentaron condiciones limnéticas permanentes fueron las correspondientes al río Chicozapote y las euhalinas en la estación REF en la boca marina. Aún bajo condiciones de amplia oscilación, el intervalo que se registró en este estudio se encontró dentro de los reportado por De la Lanza y Lozano (1999) y Morán–Silva *et al.* (2004) en la laguna de Alvarado Veracruz y por Contreras (2001) en lagunas costeras mexicanas.

### ***Oxígeno disuelto***

El oxígeno es un componente no-conservativo, importante en los procesos de fotosíntesis, en la descomposición de materia orgánica, y su contenido es un indicador de la salud del sistema siendo necesario para la vida de los organismos y además controla las reacciones de oxido-reducción (Gürel *et al.*, 2005).

En la laguna “El Yucateco” el intervalo de concentración osciló entre la anoxia y 8.5 mg/l. Durante el período de estudio (2003-2009) no se observó ninguna tendencia temporal (Fig. 6), simplemente osciló entre el intervalo de valores ya mencionado; sin embargo, se registraron condiciones hipóxicas en estaciones

puntuales bajo condiciones de sequía (septiembre de 2005, marzo de 2006, agosto de 2006 y junio de 2008), como consecuencia una mayor concentración de sales. El promedio mayor fue registrado en mayo de 2009, coincidente con el mayor contenido de clorofila “a” y de un menor contenido de ortofosfatos, como resultado de una mayor actividad fotosintética.

La distribución espacial describió un gradiente en el cual las concentraciones más bajas se ubicaron en las estaciones 1 y 2 correspondientes al río Chicozapote, como resultado de la baja dinámica y de un mayor contenido de materia orgánica disuelta (Morán-Silva *et al.*, 2004) ya que los microorganismos comienzan la descomposición removiendo el oxígeno de la columna de agua (Kennish, 1986). En general las variaciones en la concentración de OD se determinaron por el intercambio gaseoso a través de la superficie del agua, producción fotosintética, el consumo respiratorio, el horario de muestreo, la época climática y la mezcla de aguas (De la Lanza, 1986).

## **pH**

El pH se define como el logaritmo negativo base 10 del contenido de iones hidrógeno; se relaciona con el ciclo del dióxido de carbono, el cual constituye un indicador de la tasa de metabolismo total del sistema (fotosíntesis y respiración) (Odum y Barret, 2006). De acuerdo con Caso *et al.* (2004) el valor promedio de pH en los ecosistemas costeros del Golfo de México es de 8.11 mientras que cercanos a 7 están asociados con agua continental proveniente de escurrimientos fluviales, contrariamente al agua de mar que posee niveles de 8.2 en promedio.

Durante el período de estudio (2003-2009) se observó una escasa variación en este parámetro, ya que osciló de lo ligeramente ácido (6) a lo alcalino (9). La

distribución espacial definió un gradiente; alcalino en las estaciones con influencia marina y los ligeramente ácidos en las estaciones con influencia dulceacuícola. El pH de acuerdo a De la Lanza (1994) presenta una curva de variación diurna, en donde en horas de luz domina la tasa fotosintética sobre la respiración, lo que coincide con un incremento de pH; mientras que en las horas de oscuridad el proceso se invierte y domina la actividad respiratoria sobre la fotosíntesis, con un decremento de pH con una alta producción de CO<sub>2</sub> (Stickney, 1993). Con base en lo anterior se debe considerar de igual manera para parámetros como temperatura, OD y clorofila "a" la importancia de la hora del día en que se toma la muestra. Cepeda (2005) reportó para la Laguna de Términos (Campeche) un intervalo de pH desde 6.5 con características estuarinas a 8.9 en el área con influencia marina. Lo registrado en "El Yucateco" fue similar a lo reportado para otras lagunas del Golfo de México.

### ***Demanda Química de Oxígeno (DQO)***

Desde el punto de vista ambiental de acuerdo a Jaquenod (2005), la DQO es la medida indirecta de la concentración de sustancias en el agua que son susceptibles de ser oxidadas ya sean orgánicas o minerales, por medio de reacciones químicas. Lo anterior brinda información general sobre las sustancias que entran en las aguas, en este caso la laguna "El Yucateco". En la variación de los contenidos de la DQO durante el período de estudio (2003 a 2009) se observó una tendencia a la disminución a pesar de las oscilaciones en cada muestreo. Las concentraciones más bajas fueron registradas en el último muestreo; es decir, mayo de 2009, mes informado por el SMN con la presencia de condiciones de sequía moderada, paso de frentes fríos y de ondas tropicales, mientras que el

promedio más alto de todo el muestreo se registró en agosto de 2006 (94 mgO<sub>2</sub>/l), considerado por la misma institución solamente bajo condiciones de sequía moderada lo que pudo contribuir a una mayor concentración de materia disponible para la oxidación (Tabla 3).

La DQO presentó un amplio intervalo durante el período de estudio (2003-2009) entre un mínimo de 5 mgO<sub>2</sub>/l y un máximo puntual de 136 mgO<sub>2</sub>/l, este valor se registró en la estación 3 al interior de la laguna, zona influida por canales del río Chicozapote (Fig. 1) es decir que el mayor aportador de materia orgánica es el río. La tendencia observada en todo el período de estudio fue a la disminución (Fig. 11).

De acuerdo con las representaciones gráficas (análisis Cluster y el mapa) los altos niveles de DQO se registraron en las estaciones con influencia dulceacuícola (1 a la 8), mientras que los más bajos en las estaciones influenciadas por el mar (9 a la REF) como un efecto de dilución por la mezcla de aguas (marina y estuarina).

### ***Alcalinidad***

La alcalinidad mide en forma indirecta los cationes químicamente unidos a los carbonatos y demás aniones que están relacionados con la acción amortiguadora del agua. (Wetzel, 2001).

La variación de la alcalinidad durante el período de estudio presentó un amplio intervalo desde 18 a 266 mgCaCO<sub>3</sub>/l; sin embargo la tendencia observada fue a la disminución (Anexo1). El valor promedio más alto (150 mgCaCO<sub>3</sub>/l) fue registrado en mayo y septiembre de 2005, mes reportado por el SMN bajo condiciones de sequía severa en el estado de Tabasco, condiciones que prevalecieron y se extendieron a todo el país hasta septiembre, lo que pudo provocar una

concentración de carbonatos en el agua (Tabla 3). El promedio menor fue registrado en agosto de 2006, en donde la SMN informó bajo condiciones anormalmente secas a sequía moderada, similares a los meses con altas alcalinidades; cabe señalar que los niveles de precipitación en agosto de 2005 y 2006 fueron iguales, por lo que pudiera asociarse a la pleamar y el consiguiente efecto de dilución. La distribución espacial mostró una regionalización, observándose que las mayores alcalinidades se presentaron en las estaciones con influencia marina (de la estación 9 a la 11) y las menores al interior del cuerpo fluvio-lagunar y la estación REF, de acuerdo al mapa de distribución y al análisis Cluster correspondiente a este parámetro (Fig. 8 y 9). Las aguas marinas son alcalinas por su alto contenido de carbonatos, lo que explica la influencia marina (Figueruelo y Dávila, 2004).

## **NUTRIENTES**

### ***Amonio (NH<sub>4</sub>)***

Todos los nutrientes nitrogenados y fosforados son no conservativos; es decir, son reactivos química y biológicamente (Riley y Chester, 1971), por lo que comportamiento espacio temporal puede ser amplio; por ejemplo, por los procesos de nitrificación-desnitrificación o por la asimilación.

Según Moran-Silva *et al.* (2004) la desnitrificación es el proceso ampliamente reconocido como el dominante en los ambientes costeros someros de nitrato reducción. Una ruta alterna de la desnitrificación es la amonificación del nitrato, que es la reducción de NO<sub>3</sub> a NH<sub>4</sub> por bacterias heterótrofas. Dicho nitrógeno no se pierde en el sistema, por el contrario es convertido en nitrógeno disponible (Herbert, 1999). La presencia de amonio indica el nitrógeno remineralizado y a su

vez se le relaciona con condiciones reductoras (bajas concentraciones de OD) de acuerdo a lo referido por Caso *et al.* (2004) y Gürel *et al.* (2005). El contenido de este nutriente ha aumentado con las actividades humanas sobre todo las agropecuarias en suelos adyacentes (Paerl *et al.*, 2002). De acuerdo a Kenish (1986) las concentraciones de componentes nitrogenados en lagunas costeras aumentan con el aporte de los ríos.

En la laguna “El Yucateco” el contenido de amonio durante el período de estudio, presentó un gradiente, donde los mayores contenidos de  $\text{NH}_4$  se localizaron en las estaciones al interior del sistema fluvio-lagunar, lo que señala que el río aporta cantidades importantes de  $\text{NH}_4$  y decreció al aproximarse a la influencia marina como efecto de la dilución o de procesos de asimilación. Sin embargo, la tendencia a la disminución fue heterogénea espacial y temporalmente; las mayores concentraciones se registraron en meses correspondientes a lluvias y a los meses influidos por eventos de “norte” que provocaron un mayor escurrimiento de aguas dulces y resuspensión de sedimentos derivada del oleaje y los vientos que hace al  $\text{NH}_4$  disponible en la columna de agua (Seitzinger, 1988).

El contenido promedio más alto (20.83  $\mu\text{M}$ ) y el máximo puntual (31  $\mu\text{M}$ ) fueron registrados en diciembre de 2007, como resultado de las fuertes lluvias desde finales de octubre a finales de noviembre de ese año (Tabla 3) lo cual pudo contribuir a una mayor resuspensión de sedimentos y aportes por escurrimientos continentales con altos contenidos de nutrientes entre ellos el  $\text{NH}_4$ . Se registraron también bajas concentraciones de este nutriente en meses con influencia de sequías, tormentas tropicales y frentes fríos (septiembre 2003, marzo 2006 y mayo 2009); cabe resaltar que el muestreo de mayo 2009 presentó contenidos no

detectables en todas las estaciones que pudieron estar asociados a una alta productividad primaria según lo observado en las concentraciones de clorofila “a” que presentaron el promedio mayor del período de 2008 a 2009.

La tendencia en los contenidos de  $\text{NH}_4$  de 2003 a 2009 fue a aumentar (Fig. 13), con un máximo registrado en la estación 5 en diciembre de 2007 ( $31 \mu\text{M}$ ). En el presente estudio los contenidos de  $\text{NH}_4$  estuvieron dentro lo referido por Contreras (2001) para lagunas costeras mexicanas de 5 a  $20 \mu\text{M}$ . De acuerdo con De la Lanza (1994) el contenido de nutrientes nitrogenados depende del aporte de materia orgánica local y su remineralización, la difusión del sedimento (fuente principal) y de la vía fluvial con carga antropogénica, lo que puede ser aplicado a la laguna de “El Yucateco”.

### **Nitritos ( $\text{NO}_2$ )**

Este nutriente es un estado intermedio de oxidación entre el amonio y el nitrato (Caso *et al.*, 2004; Gürel *et al.*, 2005). En general las concentraciones de este nutriente son bajas en las aguas costeras; factores como la contaminación industrial asimismo las aguas residuales domésticas pueden elevar las concentraciones de este nutriente (Baird, 2004).

En la laguna “El Yucateco” la variación del contenido de  $\text{NO}_2$  fue mínima oscilando desde lo no detectable ( $<0.001$ ) a  $2.8 \mu\text{M}$ . En diciembre de 2007 (Tabla 3) después de intensas lluvias e inundaciones (octubre-noviembre de 2008), se registró la concentración promedio más alta ( $1.98 \mu\text{M}$ ), al igual que el  $\text{NH}_4$ . Las variaciones registradas no fueron notorias lo que coincide con lo reportado por De la Lanza y Lozano (1999) en la Laguna de Alvarado, Veracruz.



La distribución espacial formó un gradiente, en el cual los contenidos más altos se registraron dentro del sistema fluvio-lagunar, lo que indica que el río aporta los nutrientes nitrogenados, disminuyendo hacia las estaciones con influencia marina como efecto de la asimilación y dilución; lo anterior coincide con lo determinado por Herrera-Silveira (1996) y De la Lanza y Lozano (1999) para la Laguna de Celestún y La laguna de Términos respectivamente; en estos estudios las altas concentraciones se observaron donde la influencia de ríos fue mayor y disminuyeron al aproximarse a la influencia marina.

### **Nitratos ( $NO_3$ )**

De acuerdo a Gürel *et al.* (2005) el contenido de nitratos en aguas costeras procede de la descomposición de materiales vegetales (que liberan  $NH_4$  y su posterior nitrificación), de efluentes industriales y del lixiviado de tierras agrícolas donde se usan fertilizantes nitrogenados. Estos nutrientes tienen una naturaleza “no conservativa” activa química y biológicamente (Caso *et al.*, 2004) como ya se mencionó anteriormente.

En la laguna “El Yucateco” la variación del contenido de  $NO_3$  se mantuvo constante en todo el período de estudio, oscilando desde lo no detectable ( $<0.001$ ) a  $21 \mu M$ , a excepción del muestreo de septiembre de 2003, mes en el cual se registraron altos contenidos continuos que alcanzaron un promedio de  $11.10 \mu M$ ; de acuerdo con la información del SMN, durante ese mes se desarrollaron condiciones anormalmente secas las cuales cambiaron por el paso de la tormenta tropical “Larry” (Tabla 3), lo que pudo provocar resuspensión de sedimentos, haciendo disponible este nutriente en la columna de agua. A pesar de las condiciones conspicuas en el mes de septiembre de 2003, el contenido general de

este nutriente fue bajo a diferencia del contenido de amonio. Granados en 1999, encontró para “El Yucateco” la predominancia de amonio sobre los nitritos y nitratos determinando contenidos no detectables para estos últimos, lo que indica mayores tasas de desnitrificación; estas condiciones han prevalecido 10 años después, de acuerdo a lo registrado en el presente estudio en el mismo cuerpo lagunar.

En cuanto a la distribución espacial de manera similar al amonio y a los nitritos, se observó un gradiente, en el que los niveles fueron mayores en las estaciones del interior del sistema fluvio-lagunar y disminuyeron hacia las estaciones con influencia marina; estos datos fueron similares a lo referido por Herrera-Silveira (1996) para la Laguna de Celestún; lo anterior como efecto de la asimilación biológica y la dilución de este nutriente bajo la influencia de agua marina.

### ***Nitrógeno total (Nt)***

El nitrógeno total es la suma de las formas nitrogenadas orgánicas e inorgánicas disueltas (Gürel *et al.*, 2005).

La variación en el contenido de Nt fue amplia, desde 7.14 a 228.6  $\mu\text{M}$ , a pesar de ello la tendencia fue a la disminución (Fig. 17). Las mayores concentraciones fueron registradas en el mes de diciembre de 2007, con contenidos altos generales (Tabla 3), de igual forma que el amonio y los nitritos. De acuerdo al SMN, desde el mes de octubre a noviembre de 2007 se presentaron lluvias extremas e inundaciones, lo que explicaría los altos contenidos de Nt registrados en diciembre de ese mismo año como resultado de un mayor aporte de aguas continentales (Olivos *et al.*, 2002). Agosto de 2006, también presentó contenidos altos generales; sin embargo, este mes fue influenciado por condiciones secas y

por ende la disminución de los escurrimientos fluviales, por lo que las altas concentraciones de este nutriente pudieron ser resultado de las reacciones de remineralización de nitrógeno proveniente del sedimento (Gürel *et al.*, 2005).

La distribución espacial describió un gradiente en el cual los contenidos más altos se cuantificaron dentro del sistema fluvio-lagunar y disminuyeron hacia las estaciones con influencia marina, como consecuencia de la dilución por el mayor aporte de agua marina y los procesos de asimilación biológica de este nutriente.

Según el intervalo de concentración de este nutriente propuesto por Contreras (1996) para las lagunas costeras mexicanas, va desde 5 a 15  $\mu\text{M}$  y el contenido máximo registrado para “El Yucateco” sobrepasó 15 veces (228.6  $\mu\text{M}$ ) lo propuesto por el autor, lo cual podría indicar aportes exógenos de materia orgánica y una eutrofización.

#### **Ortofosfatos ( $\text{PO}_4$ ).**

Los ortofosfatos ( $\text{PO}_4$ ) son la forma soluble y asimilable para plantas acuáticas y el fitoplancton (Corell, 1998; Wetzel, 2001). Se considera que este nutriente es causa fundamental en el fenómeno de eutrofización, común en los sistemas costeros (Mee, 1977); aunque es uno de los nutrientes limitantes para el fitoplancton y la macro vegetación.

Altas concentraciones de este nutriente están asociadas con la época de lluvias cuando el aporte fluvial es mayor (Morán-Silva *et al.*, 2004) Existen fuentes externas de fósforo para los ecosistemas costeros, como las descargas urbanas (en las que el fósforo aumenta por el uso de detergentes que contienen este nutriente), de industrias y de las aguas provenientes de actividades agrícolas que usan fertilizantes con alto contenido de fósforo.

La variación en el contenido de  $\text{PO}_4$  desde indetectable ( $<0.001$ ) a  $18.06 \mu\text{M}$ , mostrando una tendencia a la disminución (Fig.19). Las concentraciones más altas se registraron en septiembre de 2004, mes informado por el SMN con condiciones de sequía moderada (Tabla 3); estas condiciones no explicarían el aumento de este nutriente pero, los altos contenidos pudieron ser resultado del muestreo que se realizó en el mes de lluvias; además producto de procesos de la remineralización de la materia orgánica en los sedimentos y resuspensión de los mismos por corrientes y vientos (Seitzinger, 1988), incluso por el efecto del movimiento de la lancha. Las concentraciones más bajas se registraron en mayo de 2009, consecuencia de altas tasas de asimilación por parte del fitoplancton ya que este muestreo que presentó también altos contenidos de oxígeno disuelto y de clorofila "a".

Se describió un gradiente en la distribución espacial, en el cual las concentraciones más altas se ubicaron dentro del sistema fluvio-lagunar con influencia dulceacuícola, decreciendo hacia las estaciones con influencia marina; lo anterior indica que el río Chicozapote los aporta al cuerpo lagunar donde se acumulan y enriquecen el sedimento, este último es también una fuente importante de ortofosfatos para la columna de agua (Kjerve, 1994).

### ***Fósforo Total***

El fósforo en el agua se puede clasificar en formas particuladas y disueltas. En la fracción disuelta se incluyen compuestos inorgánicos como el ortofosfato, compuestos orgánicos en forma de fosfoazúcares, fosfolípidos, productos de la descomposición de la materia orgánica, excretas de organismos y sus respectivos subproductos. La fracción de fósforo particulado es el menos estudiado y se

estima que se presenta en forma inorgánica como flóculos de fosfato férrico. Puede encontrarse también adsorbido en la materia orgánica particulada (Gürel *et al.*, 2005)

La variación de la concentración de Pt en “El Yucateco” osciló desde 3.23 a 138  $\mu\text{M}$  y la tendencia registrada fue a la disminución durante el período de estudio de 2003 a 2009. A pesar de que al final del muestreo las concentraciones fueron menores, en general los niveles de este nutriente fueron altos. La tendencia del contenido de este nutriente en el periodo de estudio fue a la disminución (Fig. 21) Los contenidos más elevados fueron registrados en agosto de 2006, mes reportado por el SMN con condiciones que oscilaron de lo anormalmente seco a sequia moderada (pero el muestreo se efectuó en la época de lluvias); a pesar de que existieron otros muestreos con eventos meteorológicos similares, las concentraciones altas registradas en 2006 no se repitieron, lo que denota que un mismo cuerpo de agua puede responder de formas diferentes ante las condiciones meteorológicas. Sin embargo se registraron algunos contenidos altos puntuales en estaciones con influencia fluvial (mayo de 2005 y marzo de 2007). Dentro de otros factores que pueden influir en este nutriente es el efecto mecánico del paso de la embarcación provocando una resuspensión de sedimentos y su correspondiente redistribución (De La Lanza com. pers).

La distribución espacial de este nutriente presentó un gradiente, donde las mayores concentraciones se registraron en las estaciones del río Chicozapote, efecto de la estrecha morfología y su consecuente menor dinámica de circulación aunado al mayor aporte de manglar, disminuyendo hacia las estaciones con influencia marina. Los contenidos de Pt en los meses de la época de sequía,

presentaron una amplia heterogeneidad, pero con los niveles más altos en la descarga del río Chicozapote que puede ser resultado de la remineralización del fitoplancton muerto.

### **Proporción N:P**

Según Redfield (1958) la proporción N:P óptima de 16:1 permite el crecimiento del fitoplancton. Una proporción baja indica una limitación de nitrógeno y por el contrario proporciones altas indican una limitación por fósforo para la producción primaria del fitoplancton. Estas limitaciones pueden afectar el estado biológico del sistema acuático, en especial a la biomasa, la composición de la biota y eventualmente en la cadena alimentaria de acuerdo a Gürel *et al.* (2005), no obstante existen algunos problemas al usar esta proporción como un indicador de limitación por nutrientes; esto se debe a que diferentes tipos de organismos fitoplanctónicos requieren diferentes proporciones, y que además la limitación puede ser por otros factores ambientales. Se usa la proporción N:P en la columna de agua porque se estima existe un aporte de nutrientes constante o estacionario (Tappin, 2002); sin embargo, el transporte de nutrientes puede darse en pulsos por lo cual la proporción se altera constantemente dependiendo de los pulsos y el aprovechamiento de ellos. Las proporciones de nutrientes resultan poco claras para determinar el nutriente limitante en el crecimiento de algas, especialmente cuando existen diversas especies en el mismo cuerpo de agua (Gürel *et al.*, 2005). Dado que las proporciones N:P calculadas a partir de los nutrientes inorgánicos resultaron menores a uno, se optó por calcularlos con base en los contenidos totales. La tendencia que esta proporción presentó en el período de estudio (2003-2009) fue a mantener valores menores a 5, con excepción de diciembre de 2007

que superaron este cociente, lo que coincidió con las altas concentraciones de Nt (con un promedio de 151  $\mu\text{M}$ ) y bajas de Pt (con un promedio de 25  $\mu\text{M}$ ). De acuerdo a Rinaldi *et al.* 1992 las proporciones N:P con cocientes mayores a 10 indican una marcada influencia oceánica. En “El Yucateco” en más de un 50% de los valores calculados en todo el período de estudio, fueron menores a cinco, lo que indicaría una mayor influencia de aguas de origen continental (Contreras, 1983); en la laguna “El Yucateco” el N no fue el nutriente limitante, ya que se registraron altas concentraciones orgánicas, que aunque no son fácilmente asimilables por los organismos acuáticos, existen algunos fitoplanctones que los utilizan (De la Lanza, 2001) al igual que con los elevados suministros de formas fosfatadas orgánicas lo cual se corrobora con altos contenidos de Pt. Aunado a lo anterior, la relación N:P tiene más relevancia que la concentración de cada nutriente (Redfield, 1958; Rinaldi *et al.*, 1992) ya que controla las comunidades fitoplanctónicas; por lo anterior, el nitrógeno y fósforo totales con altas concentraciones en la laguna “El Yucateco”, se puede considerar que no presenta problemas de limitación de nutrientes, y por el contrario, condiciones eutróficas naturales. Cabe señalar que estas condiciones tendieron a disminuir hacia el final del período de estudio.

### ***Clorofila “a”***

La clorofila “a” es comúnmente usada como un parámetro para medir la biomasa y como variable dependiente de la concentración de fósforo (Contreras, 1994). Según el modelo de la OCDE de Vollenweider y Kerekes (1982), entre mayor cantidad de Pt, mayor es la concentración de clorofila (Botello *et al.*, 2002). De la

Lanza y Gómez (1999) hacen hincapié en que no siempre el número de fitoplanctones (cosecha) es proporcional a la concentración de clorofila “a” debido a que puede haber diversos organismos en donde el pigmento está inactivo (feopigmentos) o viceversa.

El contenido de clorofila “a” que se cuantificó en el período de 2008 a 2009, varío en un intervalo de 1.76 a 28.81 mg/m<sup>3</sup> con el promedio mayor en el muestreo de mayo de 2009 (Tabla 3), coincidiendo con la mayor concentración de oxígeno disuelto y el menor contenido de ortofosfatos, lo que permite considerar a ese mes como productivo. Cabe mencionar que en ese periodo se registraron condiciones meteorológicas extremas (sequía, frentes fríos y ondas tropicales) de acuerdo al SMN.

En términos de localización puntual, el proceso fotosintético en la columna de agua es complejo. Las variaciones en el mismo día y sitio son extremas, lo cual hace dudar sobre cualquier generalización, aun en una misma área (Contreras, 1994). El contenido de clorofila “a” ha mostrado ser una determinación confiable en comparación con otros métodos para evaluar la producción primaria (Botello *et al.*, 2002) a pesar de ser solo un índice. La relación entre la clorofila “a” y la productividad primaria para algunos autores no es confiable ya que la respuesta de la clorofila “a” solo será óptima mientras los factores ambientales sean apropiados (cantidad de luz, disponibilidad de nutrientes, sus interrelaciones y temperaturas adecuadas (Botello *et al.*, 2002). Con base en lo anterior, se puede considerar que en “El Yucateco” la distribución espacial fue heterogénea, registrándose los contenidos más altos en las estaciones del río Chicozapote (1 y



2) y dentro del cuerpo lagunar en las estaciones 6 y 7, ubicadas en la zona donde el río y la laguna se interconectan.

El intervalo de concentración de este pigmento (1.76 a 28.81 mg/m<sup>3</sup>) fue menor que lo registrado por De la Lanza *et al.* (2008) en la Laguna Tres Palos (con concentraciones superiores a 100 mg/m resultado de una elevada contaminación orgánica), y mayor a lo determinado por Herrera–Silveira (1995) para la laguna de Chelem (10 mg/m<sup>3</sup>).

De acuerdo a Revilla *et al.* (2000) el incremento en el contenido de este pigmento, puede ser resultado de la marea y de la influencia de descargas fluviales; los patrones espaciales responden a condiciones locales y las corrientes estuarinas pueden distribuir la biomasa fitoplanctónica asimétricamente. En el caso de El Yucateco las mayores concentraciones se localizaron en las estaciones del río Chicozapote, lo cual muestra que las descargas fluviales fueron más importantes para la presencia de fitoplancton.

Cambios temporales como la temperatura, radiación solar, y la disponibilidad de nutrientes, son algunas de las variables que influyen en la distribución del fitoplancton (Reynolds, 2002; Botello *et al.*, 2002). Se ha reportado que los organismos se agrupan en parches en la superficie de los cuerpos de agua (Álvarez-Borrego *et al.*, 1977), por esta razón se debe considerar que mediante la metodología se pudo tomar la muestra en un parche de fitoplancton o en sitios donde no hubiera ningún organismo, lo que explica la heterogeneidad.

### ***Índice de Carlson***

El índice del estado trófico de Carlson (1977) es útil para medir el grado de eutrofia en aguas dulces lénticas y fue propuesto en 1991 por la EPA como un

análisis rutinario para el monitoreo en la calidad de los lagos interiores; sin embargo se ha aplicado en otros cuerpos de agua como los costeros. Este índice correlaciona la transparencia (disco de Secchi), clorofila a y el fósforo total (de la Lanza *et al.*, 2000) es decir es un concepto multidimensional, ya que envuelve aspectos como la concentración de nutrientes, productividad, calidad y cantidad de organismos e incluso la morfometría del cuerpo de agua, lo cual permite obtener una clasificación numérica del estado trófico, lo que demuestra en forma más sensible los cambios tróficos (Carlson, 1977).

**Tabla 4. Categorías de Estado trófico según Carlson y Simpson (1996) para lagos templados.**

<i>Oligotrófico</i>	<40
<i>Mesotrófico</i>	40-49
<i>Eutrófico</i>	50-70
<i>Hipereutrófico</i>	>70

Los altos contenidos de fósforo total (Pt) registrados en la laguna “El Yucateco” reflejaron un estado eutrófico generalizado y al aplicarse este índice tomando en cuenta ese nutriente y la clorofila “a” se corroboró que en la mayor parte del período de estudio (2003 a 2006) presentó estas condiciones; sin embargo, hacia los últimos muestreos (2007-2009) se pudo observar una ligera tendencia a la mesotrofia; en particular en mayo de 2009 se calculó una heterogeneidad en el cociente; con siete estaciones oligotróficas, tres mesotróficas y una eutrófica, lo cual indica la distribución compleja de los nutrientes y el fitoplancton; este mes fue reportado por el SMN bajo condiciones meteorológicas heterogéneas, desde

sequía moderada, frentes fríos y ondas tropicales. Cabe señalar que además de dicha heterogeneidad en diversas condiciones ambientales, la aplicación del citado índice tiene reservas al aplicarse en ambientes costeros por su temporalidad, nivel de agua y la circulación vertical a diferencia de los lagos interiores.

Los contenidos de nitrógeno total y fósforo total en el período de estudio, fueron de contenidos altos a normales, semejantes a lo determinado para lagunas costeras mexicanas (para el Nt 5 a 15  $\mu\text{M}$  y para el Pt de 5 a 20  $\mu\text{M}$ ) de acuerdo a Contreras (2001). Otros cuerpos lagunares mexicanos han sido categorizados de acuerdo a su estado trófico en base al contenido de nutrientes o por medio de la aplicación de otros índices. Contreras y García-Nagaya (1991) clasificaron al sistema lagunar de San José Manialtepec en Oaxaca como eutrófico considerando bajas concentraciones de oxígeno y altas concentraciones de nutrientes como amonio y fosforo orgánico. Otros autores (Contreras, 1983; Moran-Silva *et al.*, 2004) clasificaron cuatro lagunas veracruzanas bajo condiciones de eutrofia por la influencia de la presencia de asentamientos urbanos. En general Contreras *et al.* (1996) observaron que las lagunas costeras mexicanas presentan una tendencia a presentar un estado eutrófico.

Una saturación de formas nitrogenadas y fosfatadas provoca serios daños a los sistemas acuáticos (Lickens, 1972; Nixon, 1995); sin embargo, en “El Yucateco” este efecto se categoriza como eutrofización natural, ya que no existen factores antrópicos obvios que estén influyendo de manera directa y significativa en el contenido de nutrientes y las comunidades humanas aledañas son pequeñas y se estima que el impacto puede ser mínimo.

### **Modelo de LOICZ**

El flujo residual de agua ( $F_r$ ) fue negativo ( $-11.6 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ ), lo cual indica que es un flujo que de forma neta sale de la laguna. Sin embargo el flujo de mezcla ( $F_x = 26.3 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ ), resultó prácticamente el doble, lo cual proporcionalmente conduciría a una mejor renovación del agua salobre que se intercambia con el estero del río Tonalá, el agua dulce que recibe la laguna vía las lluvias y el escurrimiento superficial (73.7 por 167.2 días, respectivamente).

El tiempo de residencia total estimado resultó de 0.14 años (50.5 días), lo cual coincide con los resultados obtenidos por otros autores en los sistemas lagunares vecinos, como Carmen-Machona-Pajonal y Mecoacán en Tabasco (Herrera-Silveira, 2006). En el marco de esta investigación no se han realizado mediciones directas del aporte de nutrientes por el río Chicozapote, sin embargo; en la distribución espacial de ambos nutrientes, se percibe un gradiente con concentraciones en aumento hacia el cuerpo fluvial-lagunar lo cual confirma que el aporte principal proviene tanto desde los sedimentos lacustres (De la Lanza, 1994) (Fig. 16 y 19), como desde la red de canales que circunda a dicha porción de la laguna. El volumen total de la laguna "El Yucateco" se intercambiaría en promedio en menos de dos meses, como se ha calculado. Ello sugiere que considerables cantidades de N y P estarían emitiéndose relativamente rápido hacia la región del estero del río Tonalá adyacente y eventualmente al mar. No obstante, datos históricos de la laguna sugieren que el aporte de nutrientes posee una clara tendencia hacia la baja (Fig. 17 y 21). El metabolismo neto del ecosistema lagunar resultó heterótrofo ( $-28,230 \text{ mmol m}^3/\text{año}$ ), mostrando un predominio del proceso

de respiración sobre el de producción. Con base en la estequiometría simple se determinó que la desnitrificación superó en promedio a la fijación de nitrógeno en la laguna (-3,861 mmol m<sup>3</sup>/año), lo cual había sido observado hace 10 años en “El Yucateco” por Granados (1999), es decir que es probable que ese proceso se ha mantenido desde entonces.

### ***Recuperación y Rehabilitación***

Las lagunas costeras son sistemas que se ven influenciados por las actividades humanas y en “El Yucateco” la industria petrolera ha sido una de estas provocando algunos problemas de contaminación. Diversos estudios se han centrado en encontrar mecanismos que remedien los efectos que los hidrocarburos tienen en suelos, aguas y la vegetación cercanos a estas actividades. Se ha recomendado el uso de bacterias comerciales que degradan los hidrocarburos; también se han estudiado bacterias nativas con la misma capacidad degradadora y se ha observado que las condiciones calurosas y húmedas del trópico mexicano favorecen la degradación de los hidrocarburos (Adams *et al.*, 1999). Estos estudios se han realizado a nivel laboratorio y a escala microcosmos, lo que muestra que aún faltan estudios a mayor escala, donde se observen los efectos que estos tratamientos pueden tener en el sistema completo (Olguín *et al.*, 2007). Se ha observado que existe otra técnica menos costosa que es la biodegradación pasiva conocida como “atenuación natural”, que es lenta y de bajo costo, en la cual no se hace ningún tratamiento solo se deja que el sistema se “limpie” con sus propios mecanismos (Romaniuk *et al.*, 2007). Estos estudios han incrementado el conocimiento sobre las respuestas que los

ecosistemas ponen en marcha ante perturbaciones, además que permite seguir innovando en las técnicas de mejoramiento ambiental, por medio de estos se ha averiguado sobre la bioaumentación, donde se busca aumentar la actividad metabólica de las bacterias oleofílicas incrementando el aporte de nutrientes (N y P), acelerando el proceso de biorremediación (Romaniuk *et al.*, 2007). De acuerdo con Adams *et al.*, (1999) la Universidad de Tabasco (UJAT) ha estudiado la biodegradación pasiva de hidrocarburos en varios sitios de Tabasco; sin embargo, aun faltan más estudios que se enfoquen a la remediación y restauración de sitios contaminados de una manera integral no sólo suelos y vegetación sino también los sistemas acuáticos.

La laguna “El Yucateco” es un sistema complejo por encontrarse entre el mar y la tierra, en el cuál las oscilaciones ambientales proveen a este sistema de una alta heterogeneidad. De acuerdo con los resultados de este estudio, se puede estimar que el estrés ambiental al que la laguna “El Yucateco” ha estado sujeta tanto natural como antropogénicamente, ha sido autoregulado por el sistema. Se observó que de 2003 a 2006 las condiciones de la laguna fueron eutróficas, considerando las altas concentraciones de fósforo total y nitrógeno total; hacia el final del muestreo 2007 a 2009 las condiciones tendieron a la mesotrofia y que las concentraciones de nutrientes tendieron a disminuir, lo que describe un ciclo en el cual las condiciones de trofia oscilaron en el tiempo y el espacio, situación a la cual el ecosistema se adaptó y fue capaz de regular las perturbaciones de acuerdo a Holling, (1973). El tiempo de residencia del agua en la laguna estimado por el modelo de balance de masas de LOICZ (Gordon *et al.*, 1996) fue de 50.5 días

tiempo que condicione la eutrofia, asociado a las descargas de los asentamientos de las actividades petroleras. En este sistema lagunar al igual que en otros sistemas complejos se presentaron cambios episódicos, donde períodos de cambios rápidos (influencia de eventos meteorológicos extremos) alternan con cambios lentos (mayor aporte en época de lluvias), que dan como resultado equilibrios múltiples que definen estados funcionales diferentes, sin llegar a la pérdida de atributos como lo generalizan para ecosistemas terrestres y acuáticos Holling y Gunderson (2002).

En estudios previos desarrollados en la laguna “El Yucateco” se ha descrito la influencia de la industria petrolera que se observó en las concentraciones de contaminantes tales como hidrocarburos y algunos metales pesados (Villanueva y Vazquez-Botello, 2005). Schindler y Smith (2009) sugieren que el destino de estos contaminantes está fuertemente influenciado por la disponibilidad de nutrientes, ya que éstos limitan directa e indirectamente la actividad metabólica de los microorganismos heterótrofos capaces de metabolizar los hidrocarburos; la diversidad de sustratos orgánicos que las bacterias acuáticas son capaces de metabolizar, aumentan bajo condiciones de alta productividad en la columna de agua. En “El Yucateco” se registraron altos contenidos de nutrientes lo cual se estima pudo contribuir a la degradación de este tipo de contaminantes (Schindler y Smith, 2009); lo anterior como un mecanismo de adaptación ante las perturbaciones y definiéndose un estado estable en el que una comunidad de bacterias oleofílicas limpian el ecosistema manteniendo bajo control los impactos antropogénicos, principalmente de la industria petrolera (Romaniuk *et al.*, 2007).

## CONCLUSIONES

Los parámetros fisicoquímicos como temperatura, salinidad y pH mostraron niveles dentro del intervalo que se ha reportado como normal para las lagunas costeras mexicanas, se observan algunos niveles máximos o mínimos que se relacionan con variaciones meteorológicas y otros factores ambientales.

La distribución espacial señaló un gradiente para la salinidad, oxígeno disuelto, amonio, nitritos, nitratos, nitrógeno total, ortofosfatos y fósforo total. Para la temperatura, la demanda química de oxígeno y la alcalinidad se definieron regiones relacionadas ambas con la influencia continental y marina que existe en la laguna “El Yucateco”. Los contenidos de Nt y Pt individualmente condiciones eutróficas y hacia el final de estudio los contenidos tendieron a disminuir, por consiguiente las condiciones eutróficas tendieron a la mesotrofia.

La proporción N:P mantuvo valores menores a cinco a excepción del mes de diciembre 2007 donde las proporciones fueron de 5 a 10, lo cual se relacionó con las altas concentraciones de Nt y Pt resultantes de un mayor escurrimiento continental lo cual se ratifica con lo indicado por Rinaldi *et al.*, 1992, que las proporciones menores a cinco indican una marcada influencia continental como el caso de “El Yucateco”.

El contenido de clorofila “a” cuantificado en el período de 2008 a 2009, presentó una distribución espacial heterogénea con niveles altos puntuales resultado de la distribución en parches de fitoplancton. Los contenidos altos ratificaron la condición eutrófica. El intervalo de la concentración de la clorofila “a” fue similar a lo reportado como normal para las lagunas costeras mexicanas.



El índice de Carlson reveló que la laguna “El Yucateco” presentó en la mayor parte del período de estudio (2003-2006) un estado eutrófico. El modelo de balance de agua y sal mostró que el tiempo de residencia de la laguna “El Yucateco” fue de 50.5 días, que este sistema lagunar se comportó como un exportador de nutrientes, presentó un predominio de la desnitrificación y un metabolismo heterótrofo.

Si bien el retiro de los asentamientos humanos asociados a la industria petrolera pudo influir en el mejoramiento de las condiciones ambientales de la laguna, las perturbaciones producidas años atrás se hayan reflejadas en las condiciones del sedimento, principal trampa de nutrientes y contaminantes que está sujeto a resuspensión principalmente por eventos meteorológicos (vientos, huracanes y tormentas tropicales); sin embargo, ante estas perturbaciones el sistema ha respondido ya que de acuerdo a las tendencias observadas en el estado trófico y la cantidad de nutrientes a lo largo de los siete años de estudio fueron a la mesotrofia y a la baja, respectivamente.

Por lo que en la laguna “El Yucateco” no es recomendable ningún tipo de rehabilitación o restauración, dado que a lo largo del período de estudio, se observó que se ha desarrollado una recuperación natural, mejor conocida como “atenuación natural”, experimentando el retorno a un estado “estable” mostrando la resiliencia del sistema (Holling, 1973).

De acuerdo con Schindler y Smith (2009) el destino de contaminantes como los hidrocarburos está fuertemente influenciado por la disponibilidad de nutrientes (N y P) ya que de manera directa e indirecta, limitan la actividad de organismos heterótrofos capaces de degradar aquellos contaminantes en ambientes

acuáticos; en la primera parte de este estudio los altos contenidos de N y P (2003 a 2006) pudieron influir en el incremento de la degradación de hidrocarburos (Olgún *et al.*, 2007); lo anterior podría ser parte de los mecanismos bióticos y abióticos que regulan el mantenimiento de un equilibrio “estable” del sistema, por lo que es posible recuperar los atributos de los ecosistemas sin la necesidad de costosas acciones de restauración ecológica.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Abarca, F. y M. Herzig. 2007. Manual para el manejo y la conservación de los humedales de México. 3ª ed. Publicación Dirección General de Vida Silvestre-SEMARNAT, Arizona Game and Fish Department, North American Wetland Conservation Act, U.S. Fish and Wildlife Service, Convención Ramsar, U.S. State Department, Ducks Unlimited of Mexico-A.C., Pronatura Noreste, Canadian Wildlife Service y Society of Wetlands Scientists. Phoenix, Arizona.

Adams-Schoeder, R., V. Domínguez y L. García. 1999. Potencial de la Biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano. Terra. 17: 2.159-174.

Álvarez-Borrego, S., R. Lara-Lara y M. J. Acosta-Ruiz. 1977. Parámetros relacionados con la productividad orgánica primaria en dos antiestuarios de Baja California. Reportes, 1 julio de 1975 a 30 de junio de 1976. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations. Ciencias Marinas 4:1-12.

American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Facilities. 1992. Standard Methods for the examination of Water and Wastewater 16<sup>ed</sup> Washington DC.

Baird, C. 2004. Química ambiental. 2ª ed. Revérte. Barcelona (Ed.). España, 517 pp.

Botello, V. A., F. Contreras-Espinoza y G. De la Lanza-Espino. 2002. Primary production in coastal lagoons. In: Encyclopedia of Life Support Systems. EOLSS Publishers. El Colegio de Sinaloa, Culiacán, México.

Caffrey, J. M. 2003. Production, respiration and net ecosystem metabolism in US estuaries. Environmental Monitoring and Assessment. 81: 207-219.

Camacho-Ibar. V. 2000. Introducción al Modelo de Balances Biogeoquímicos de LOICZ. En: <http://data.ecology.su.se/mnode/Methods/powerpoint/ppts.htm>

Carlson, R. E. 1977. A trophic state index for lakes. Limnology and Oceanography 22(2): 361-369.

Carlson, R. E. y J. Simpson. 1996. A coordinator's guide to volunteer lake monitoring methods. North American Lake Management Society: 96 pp.

Carriker, M.R. 1967. In: G.H. Lauff, Publ. 83, American Association for the Advancement of Science, Washington, D.C. 442 pp.

Caso, M., I. Pisanty y E. Ezcurra. (Ed). 2004. Diagnóstico ambiental del Golfo de México. Vol.1. SEMARNAT. 1ª ed, México, 626 pp.

Cepeda, M. 2005. Península de Yucatán. Laguna de Términos: un estuario de importancia Local, Regional y Nacional. PRONATURA: 24.

Chávez, G. E. 2006. Plaguicidas organoclorados en productos pesqueros de la laguna El Yucateco, Tabasco, México. Tesis Licenciatura. Facultad de Química, UNAM, México: 65.

Comisión Interinstitucional para el Medio Ambiente y el Desarrollo Social. 2001. Estudios e Investigaciones Ambientales. México, 62.

Contreras, F. E. 1983. Variaciones en la hidrología y concentraciones de nutrientes del área estuarino-lagunar de Tuxpan Tampamachoco, Veracruz, México. *Biótica* 8(2): 210-213.

Contreras, E. F. y A. García-Nagaya. 1991. Hidrología, nutrientes y productividad primaria en la laguna San José Manialtepec, Oaxaca, México. *Hidrobiológica* 1: 65-72.

Contreras, F. E. 1994. Producción primaria fitoplanctónicas en las lagunas costeras. *Revista de Investigaciones Marinas* 16(1): 11-21.

Contreras, F. E., O. Castañeda, R. Torres-Alvarado y F. Gutierrez. 1996. Nutrientes en 39 lagunas costeras mexicanas. *Revista Biología Tropical* 44(2): 417-245.

Contreras, F.E. 2001. Caracterización de lagunas costeras mexicanas a través de variables ecológicas seleccionadas. Tesis Doctorado, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México: 110

Correll, D. L. 1998. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *Journal of Environmental Quality* 27: 261-266.

De la Lanza-Espino, G. 1986. Calidad ambiental de la laguna de Mezcaltitán, Nayarit, México, durante el estiaje. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología Universidad Nacional Autónoma de México* 13(3): 15-328.

De la Lanza-Espino, G. 1994. Química de las lagunas costeras y el litoral mexicano. In: De la Lanza-Espino G., Cáceres-Martínez C. (Eds). *Lagunas Costeras y el Litoral Mexicano*. Universidad Autónoma de Baja California Sur, México: 127-198.

De la Lanza-Espino, G., H. Lozano 1999. Comparación fisicoquímica de las lagunas de Alvarado y Términos. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México, *Hidrobiológica* 2(1):15-30.

De la Lanza-Espino, G y S. Gómez-Aguirre. 1999. Fisicoquímica del agua y cosecha de fitoplancton en una laguna costera tropical. Universidad Autónoma del Estado de México. *Ciencia Ergo Sum* 6(2): 147-153.

De la Lanza-Espino, G., J.L, García-Calderón., S. Hernández-Pulido y P. Rojo-Díaz 2000. Employment of halophylous compost in coastal aquaculture and its relation to water quality. *Environmental Technology* 21: 467-473.

De la Lanza-Espino, G., 2001. Características físico-químicas de los mares de México. *Temas Selectos de Geografía de México. Textos Monográficos: Las Costas y los Mares de México.* Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, México, D.F. 149.

De la Lanza-Espino, G., J. Alcocer-Duran., J.L. Moreno-Ruiz., S. Hernández-Pulido. 2008. Análisis químico - biológico para determinar el estatus trófico de la Laguna de Tres Palos, Guerrero, México. *Hidrobiológica*, 18(1): 21-30.

Eyre, B. D y L. J, Mkee. 2002. Carbon, nitrogen and phosphorus budget for a shallow subtropical coastal embayment (Moreton Bay, Australia). *Lymnology and Oceanography* 47(4): 1043-1055.

Figueruelo, J. E. y M. M. Dávila. 2004. *Química física del ambiente y de los procesos medioambientales.* REVERTE, S.A.Barcelona, España, 591.

Gamito, S., Gilbert. J., C, Marcos-Diego y A. Pérez-Ruzafa. 2005. Effects of changing environmental conditions on lagoon ecology. En: Göneç, E. I ., Wolflin J. P (Eds). *Coastal Lagoons: Ecosystem Processes and Modelling for Sustainable Use and Development.* CRC Press, Boca Raton: 193-229.

García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México. D.F.

García-Nagaya, A y O. L. Castañeda. 1994. Hidrología, nutrientes y productividad primaria en dos sistemas costeros del estado de Chiapas, México. *Revista de Investigaciones Marinas* 75(3): 171-190.

Göncü, E. I. y J. P. Wolfen (Eds). 2005. *Costal Lagoons: Ecosystem processes and modeling for sustainable use and development*. CRC Press, USA. 500.

Gordon, D.C. Jr., P.R. Boudreau., K.M. Mann, J.E. Ong., W.L Silver., S.V. Smith, G, Wattayacom., F. Wulff y T. Yanagi. 1996. *LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines*. LOICZ. Reports & studies (5): 96 pp.

Granados, S.G. 1999. Nitrificación, Desnitrificación y amonificación en sedimentos de la laguna costera "El Yucateco", Tabasco, México. Tesis Maestría. Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados (CINVESTAV) Instituto Politécnico Nacional. Unidad Mérida. Departamento de Recursos Marinos, Yucatán, México 88 pp.



Gürel, M., A., Tanik R., Russo y R. Göneç,2005. Chap. 4 Biogeochemical cycles. En: Göneç, R, Wolfin, J. (Eds). Coastal Lagoons, Ecosystem Processes and modeling for sustainable use and development. CRC Press. USA: 475.

Herrera-Silveira, J. N. 1995. Seasonal Patterns and behaviour of nutrients in a tropical coastal lagoon with groundwater discharges. *Journal of Ecology and Environmental Service* 22(1)45-57.

Herrera-Silveira J. N. 1996. Salinity and nutrients in a tropical coastal lagoon influenced by groundwater discharges. *Hydrobiology* 321: 165-176.

Herrera-Silveira J. N. 2006. Lagunas costeras de Yucatán (SE México): Investigación, diagnóstico y manejo. *ECOTROPICOS*, Yucatán, México. 19(2):94-108.

Herbert R, A. 1999. Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems. *FEMS Microbiology Review* 23: 563-590.

Holling, C. S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 1-23.

Holling, C. S. y L. Gunderson. 2002. In quest of a theory of adaptive change. In: Gunderson, L. y C.S. Holling (Eds). *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Island Press, Washington, DC: 3-24.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2008. Anuario Estadístico del Estado de Tabasco. [www.inegi.gob.mx/est/contenidos/.../present.htm](http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/.../present.htm).

INEGI. 2010. <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?s=geo&e=27>

Jaquenod, S. 2005. Derecho ambiental. La gobernanza de las aguas. Editorial Dykinson, Madrid, España:219.

Kennish, M. J. 1986. Ecology of estuaries. Vol.1, Physical and chemical aspects. CRC. Press; Boca Raton, Florida:254.

Kjerve, B. 1994. Coastal lagoons process. Elsevier Oceanography Series, 60. Amsterdam. Elsevier Science Publishers:577.

Likens, G. E. 1972. Nutrients and eutrophication. American Society of Limnology and Oceanography Special Symposia, Vol. 1. Lawrence, Kansa: 378 pp.

Mee, D. 1977. Chemical Oceanography. In: Riley J. P, Chester R, (Eds.) Coastal lagoons 42 (7): 441-490.

Morán-Silva, A., R, Martínez-Franco., A. T., Chávez-López y S. Mark. 2004. Seasonal and spatial patterns in salinity, nutrientes, and chlorophyll a in the

Alvarado Lagoon System, Veracruz, Mexico. *Gulf and Caribbean Research* (17): 133-143.

Neue, H.U., J.L. Gaunt., P. Wang., P. Becker-Heidmann y C. Quijano. 1997. Carbon in tropical wetlands. *GEODERMA* (79): 163-185.

Nixon, S.W. 1995. Coastal Marine Eutrophication: A Definition, Social Causes, and future Concerns. *OPHELIA* (41): 199-219.

Odum, E. 1969. The strategy of ecosystem development. *Science* (126): 262-270.

Odum, E y G. Barret. 2006. *Foundations of Ecology*. 5<sup>ta</sup> Edition, Chicago: 598.

Olivos, A, M. Masó y J. Camp. 2002. Aportes continentales de nutrientes y su posible influencia sobre las relaciones estequiométricas (DIP:P:Si) en las lagunas del noreste del Mediterráneo español (Mar Catalán). Universidad Autónoma de Baja California. *Ciencias Marinas* 28(4): 393-406.

Olguín, E.,M, Hernández y Sánchez-Galván,G. 2007. Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 23(3):139-154.

Paerl, H. W., J. L. Pinckney y P, Tester. 2003. The role of nutrient loading and eutrophication in estuarine ecology. *Environmental Health Perspectives*. Supplement 5, 109: 699-706.

Redfield , A. 1958. Electronic hall effect in NaCl. *Physical Review* 91(3): 753.

Reynolds, C. 2002. *Cambridge studies of ecology. The ecology of freshwater phytoplankton.* Cambridge University Press, 374 pp.

Revilla, M.I. 2000. *Metabolismo del microfitoplancton en el estuarino de Urdabai: influencia del fitoplancton y del as bacterias heterótrofas.* Universidad del País Vasco (UPV). Facultad de Ciencias en: [www.cibernetia.com/tesis-es/oceanografia](http://www.cibernetia.com/tesis-es/oceanografia).

Rinaldi, A., G, Montanari., A, Guetti., C. R, Ferrari y A. Ferrari. 1992. Eutrophy and dystrophy in the goro lagoon. In: Vollenweider RA, Marchetti R, Viviani R (Eds). *Marine Coastal Eutrophication.* Elsevier Science Pub.: 457-470.

Riley, J.P y R. Chester. 1971. *Introduction to marine chemistry.* Academic Press. New York, USA:465.

Rodríguez, R. 2002. *Las Lagunas Continentales de Tabasco.* Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, Tabasco: 264.

Romaniuk, R., J, Brandt y P, Ríos. 2007. Atenuación natural y remediación inducida en suelos contaminados con hidrocarburos. *CI Suelo.* 25(2): 139-149.

Sánchez, A. J y E. Barba. 2005. Biodiversidad de Tabasco. Cap. 1:1-16. En Bueno, J., F. Álvarez y S, Santiago. (Eds). Biodiversidad del Estado de Tabasco , 386p. Instituto de Biología UNAM-CONABIO. México. D.F: 386.

Séller, B.D. y B. D. Causey. 2005. Linkages between the Florida Keys National Marine Sanctuary and the South Florida Ecosystem Restoration Initiative. *Ocean and Coastal Management* 48:869-900.

Schindler, D y V, Smith. 2009. Eutrophication science: where do we go from here?. *Trends in Ecology and Evolution*. 24(4): 201-207.

Scientific Committee on Oceanic Research-United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (SCOR-UNESCO). 1980. Determination of chlorophyll in sea water. *Technical Papers in Marine Science*: 35.

Seitzinger, S.P. 1988. Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems: ecological and geochemical significance: *Limnology and Oceanography* 33: 702-724.

Sistema Meteorológico Nacional (SMN). Monitor de sequía.  
<http://smn.cna.gob.mx/climatologia/sequia/sequia.html>

Smith, S. V. y M. J., Atkinson. 1994. Mass balance of nutrient flux in coastal lagoons. In: Kjerve B (Ed). Coastal lagoons processes. Elsevier, Amsterdam, Netherlands: 133-153.

Smith, S. V., S, Ibarra - Obando., P. R., Boudreau y V. F., Camacho - Ibar. 1997. Comparison of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Fluxes in Mexican Coastal Lagoons. LOICZ Reports and Studies No. 10, Texel. Netherlands, 84 pp.

Stickney, R. R. 1993. Tilapia. In: Stickney, R.R. (Ed). Culture of non-salmonid freshwater fishes. CRC Press. Boca Raton, Florida: 81-115.

Strickland, J. D. H y T. R., Parsons. 1972. Practical handbook of Sea Water Analysis. Second Edition. Fisheries Research Board Canadian Bulletin, Ottawa, Canada, 310.

Tappin, A. D. 2002. An examination of the fluxes of nitrogen and phosphorus in temperate and tropical estuaries, estimates and uncertainties. Estuarine Coastal and Shelf Science 55: 885-901.

Urmigiesser, G y R. Neves. 2005. Physical Processes. En: Göneç, R y Wolfin J (Eds). Coastal lagoons, ecosystem processes and modeling for sustainable use and development. CRC. Press. USA: 43-78.

Vadineau, A. 2005. Identification of lagoon ecosystems. En Göneç R, Wolfin J (Eds). Coastal lagoons, ecosystem processes and modeling for sustainable use and development. CRC. Press. USA: 7-42.

Villanueva.F.S., y A.V. Botello. 2005. Vigilancia y presencia de metales tóxicos en la laguna el Yucateco. Tabasco. México. 407-430. *In:* A.V.Botello, J.Rendón-von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernandez (Eds). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental:Diagnóstico y Tendencias, 2ª Edición. Univ. Auton de Campeche. Univ. Nal. Auton de México. Instituto Nacional de Ecología: 696

Vollenweider, R. A y Kerekes, J. 1982. The application of phosphorus load-trophic response relationships to reservoirs. Canadian Water Resources Journal: 349-354.

Wetzel, R. G. 2001. Limnology. 3ª Edition Academic Press, San Diego, CA, 1006 pp.

**Anexo 1. Base de datos parámetros  
fisicoquímicos de la laguna  
El Yucateco, Tabasco de 2003 a 2009**



<b>TEMPERATURA °C</b>													
<b>muestreo</b>	<b>est 1</b>	<b>est2</b>	<b>est3</b>	<b>est4</b>	<b>est 5</b>	<b>est6</b>	<b>est7</b>	<b>est8</b>	<b>est 9</b>	<b>est10</b>	<b>est 11</b>	<b>est REF</b>	<b>promedio</b>
sep-03		32.60	31.23	31.37	32.03		34.33	35.27	33.93				32.97
sep-04		29.03	29.97	30.13	30.30	30.80	30.77	30.70	30.40	30.80			30.32
may-05	26.97	27.60	29.57	30.00	29.90	30.30	30.30	28.90	30.40	30.10	32.87		29.72
sep-05	28.33	27.60	31.10	32.00	31.80	31.60	30.87	31.60	30.40	31.10	31.00	29.57	30.58
mar-06	22.50	23.20	26.80	28.00	26.60	26.30	26.20	26.30	27.20	25.80	26.10	26.90	25.99
ago-06	27.00	27.30	29.70	30.30	30.00	30.00	30.00	29.50	31.00	30.10	29.40	28.60	29.41
mar-07	22.70	22.90	23.00	23.60	23.10	23.00	21.40	23.00	24.20	24.00	22.90	22.50	23.03
ago-07	30.60	30.90	31.40	31.80	31.30	31.10	31.80	30.60	31.50	31.20	30.20	29.40	30.98
jun-08	29.66	29.66	28.75	29.20	29.42	29.14	29.88	29.26	28.74	28.60	28.26	28.67	29.1
nov-08	22.27	22.29	23.25	25.64	25.02	24.27	24.46	24.61	26.00	25.89	27.14	29.00	24.98
may-09	27.82	30.22	29.1	29.13	28.75	29.63	29.27	29.4	28.93	28.72	27.41	27.28	28.8

<b>Salinidad ups</b>													
<b>muestreo</b>	<b>est 1</b>	<b>est2</b>	<b>est3</b>	<b>est4</b>	<b>est 5</b>	<b>est6</b>	<b>est7</b>	<b>est8</b>	<b>est 9</b>	<b>est10</b>	<b>est 11</b>	<b>est REF</b>	<b>promedio</b>
sep-03		10.00	9.00	10.00	10.00		10.00	8.00	8.00				9.29
sep-04		3.00	10.13	10.00	10.00	12.00	10.00	12.00	18.00	20.00			11.68
may-05	<0.001	18.00	20.00	20.00	18.00	20.00	18.00	18.00	28.00	30.00	9.00		18.09
sep-05	0.10	1.30	3.60	3.73	4.00	4.10	4.03	4.10	4.00	3.97	1.10	1.63	2.97
mar-06	0.20	0.20	0.60	0.90	0.90	1.10	1.20	2.30	9.30	2.00	0.10	29.50	4.03
ago-06	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	1.00	<0.001	<0.001	3.00	0.33
mar-07	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.00	0.20	3.40	4.90	0.10	8.50	1.51
ago-07	26.40	26.90	29.00	29.50	29.00	28.30	28.80	28.70	30.20	28.10	26.40	20.9	27.68
jun-08	25.09	25.09	25.02	24.83	25.27	25.31	25.33	26.07	28.18	27.72	25.09	24.02	25.58
nov-08	0.49	0.52	0.53	0.54	0.53	0.57	0.56	0.58	0.89	1.42	0.49	28.57	2.97
may-09	23.3	25.83	26.88	26.92	26.34	27.85	27.39	28.54	31.88	32.29	23.30	32.97	27.79

oxígeno disuelto mg/l														
muestreo	est 1	est2	est3	est4	est 5	est6	est7	est8	est 9	est10	est 11	est REF	promedio	
sep-03		0.77	4.87	5.47	6.03		3.73	6.77	4.33				4.56	
sep-04		3.00	4.27	6.17	6.57	5.57	4.93	5.43	6.77	6.73			5.49	
may-05		0.00	4.6	5.57	5.80	5.57	5.80	5.40	6.00	6.40	6.00		5.11	
sep-05	0.93	0.02	1.17	2.53	2.47	2.01	0.70	2.73	1.60	1.60	2.57	3.4	1.81	
mar-06	0.10	0.30	2.50	4.00	2.40	2.40	2.10	2.40	3.50	3.35	5.30	6.00	2.86	
ago-06	0.19	0.14	1.63	1.83	1.32	1.44	1.08	1.57	3.33	5.25	4.06	3.54	2.11	
mar-07	0.06	0.11	5.62	5.50	6.69	6.54	1.08	5.29	5.17	7.00	6.49	7.21	4.73	
ago-07	0.00	0.10	4.30	5.10	6.40	7.40	4.20	6.30	5.80	7.00	7.00	7.60	5.10	
jun-08	1.60	1.63	2.95	1.84	2.90	3.44	2.86	1.68	0.46	4.26	3.71	4.76	2.67	
nov-08	1.54	1.54	6.19	5.86	6.16	6.30	2.93	4.83	5.45	5.68	6.19	6.15	4.90	
may-09	0.15	1.60	7.19	6.68	7.60	6.10	5.11	5.21	5.22	5.93	7.35	8.50	5.55	

pH														
Muestreo	est 1	est2	est3	est4	est 5	est6	est7	est8	est 9	est10	est 11	est REF	promedio	
sep-03		7.23	6.51	5.68	6.33		6.13	6.78	7.15				6.54	
sep-04		7.70	7.09	7.10	7.18	7.10	7.10	7.60	8.00	7.60			7.38	
may-05		8.00	8.00	8.60	8.80	7.10	7.70	6.90	6.60	6.93	6.63		7.52	
sep-05	4.20	2.03	2.10	2.10	2.00	2.12	2.13	2.20	7.74	4.93	4.40	4.20	3.34	
mar-06	8.06	6.44	6.37	6.89	7.01	7.25	7.33	7.26	7.40	7.91	8.38	8.06	7.36	
ago-06	7.29	5.92	6.60	6.83	6.91	7.04	7.13	7.13	7.72	7.62	7.39	7.29	7.07	
mar-07	7.30	6.80	6.40	6.90	7.00	7.80	7.13	8.20	7.10	7.90	8.20	7.30	7.33	
ago-07	8.20	6.00	6.80	6.70	6.6	7.40	6.60	7.30	7.30	8.00	8.50	8.20	7.30	
jun-08	7.58	6.96	7.67	7.55	7.63	7.66	7.17	7.54	7.63	7.61	7.70	7.58	7.52	
nov-08	7.11	5.63	6.59	5.85	6.25	5.8	6.07	6.26	6.37	6.17	6.69	7.11	6.32	
may-09	7.93	6.82	7.56	7.52	7.49	7.29	7.32	7.30	7.59	7.71	7.89	7.93	7.52	

alcalinidad mgCaCO <sub>3</sub> /l													
muestreo	est 1	est2	est3	est4	est 5	est6	est7	est8	est 9	est10	est 11	est REF	promedio
sep-03		95	90	85	85	95	95	100	85	95			91.66
sep-04		97	110	82	86	100	100	115	80	98			96.44
may-05	79	66	190	186	118	100	152	87	251	192	235		150.54
sep-05	95	76	203	198	135	136	167	103	266	121	248	50	149.83
mar-06	31	18	30	25	35	30	30	27	50	48	40	77	36.75
ago-06	31	48	48	43	40	59	40	45	45	36	44	36	42.91
mar-07	26	26	26	28	28	30	40	26	28	158	50	54	43.33
ago-07	178	152	140	148	160	144	156	148	156	52	142	116	141
dic-07	35	30	35	25	30	30	34	30	40	34	52	42	34.72
jun-08	90	80	84	84	86	82	84	86	84	76	64	52	79.33
nov-08	34	38	30	34	32	32	34	36	36	34	44	82	38.83
may-09	88	78	82	82	84	80	82	84	82	74	62	92	20.83

DQO mgO <sub>2</sub> /l													
muestreo	est 1	est2	est3	est4	est 5	est6	est7	est8	est 9	est10	est 11	est REF	promedio
sep-03		80.00	120.00	135.00	117.00	47.00	83.00	72.00	51.00	36.00			82.33
sep-04		34.00	62.00	32.00	46.00	8.00	48.00	8.00	50.00	36.00			36.00
may-05	36.00	54.00	34.00	26.00	28.00	8.00	32.00	42.00	56.00	34.00	42.00		35.63
sep-05	27.00	22.00	26.00	30.00	27.00	31.00	17.00	28.00	26.00	23.00	24.00		25.54
mar-06	88.00	84.00	80.00	66.00	90.00	96.00	82.00	72.00	74.00	33.00	56.00	12.00	69.41
ago-06	125.00	120.00	136.00	122.00	120.00	111.00	120.00	114.00	62.00	50.00	29.00	20.00	94.08
mar-07	59.00	57.00	57.00	55.00	57.00	59.00	120.00	61.00	37.00	12.51	49.00	20.00	53.62
ago-07	18.49	18.49	16.32	16.86	15.77	16.32	16.04	16.04	13.60	29.00	11.69	12.24	16.73
dic-07	27.00	8.00	17.00	13.00	23.00	16.00	15.00	17.00	24.00	38.00	29.00	4.00	19.25
jun-08	10.34	10.88	8.70	9.52	9.25	8.98	9.79	7.34	4.9	4.08	3.81	4.08	7.63
nov-08	13.33	13.60	13.06	12.78	12.78	13.33	13.60	13.87	14.14	14.14	13.87	4.35	12.74
may-09	7.34	7.62	5.98	5.98	5.44	4.62	4.62	4.62	1.63	0.54	0.54	0.54	4.12

amonio µM													
muestreo	est 1	est2	est3	est4	est 5	est6	est7	est8	est 9	est10	est 11	est REF	promedio
sep-03	<0.001	0.71	1.43	0.71	0.71	7.86	5.00	0.71	0.71	0.71			1.85
sep-04	<0.001	22.14	16.42	25.71	12.14	12.14	16.42	13.57	11.42	10.00			13.99
may-05	7.86	6.43	0.71	0.01	0.01	12.14	0.01	0.71	0.01	0.01	0.01		2.53
sep-05	20.71	25.00	17.14	15.71	17.14	15.00	24.29	14.29	14.29	17.14	17.14	5.00	16.90
mar-06	0.01	0.01	1.43	1.43	1.43	0.01	0.01	0.01	2.14	2.86	0.01	0.01	0.78
ago-06	3.57	5.00	7.14	11.43	7.86	10.71	7.86	13.57	4.29	<0.001	2.86	5.00	6.60
mar-07	3.57	12.14	7.86	7.86	<0.001	4.29	7.86	<0.001	20.71	10.00	<0.001	<0.001	6.19
ago-07	9.29	11.43	9.29	10.71	9.29	10.00	8.57	11.43	9.29	20.00	10.00	9.29	10.71
dic-07	20.00	15.71	22.14	30.00	30.71	19.29	15.71	17.86	20.00	18.57	20.00	20.00	20.83
jun-08	15.00	15.00	13.57	16.43	0.00	4.29	0.00	0.00	19.29	0.00	14.29	4.29	8.51
nov-08	12.14	21.43	18.57	12.14	10.00	11.43	8.57	9.29	13.57	17.14	20.00	17.86	14.35
may-09	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

nitritos µM													
muestreo	est 1	est2	est3	est4	est 5	est6	est7	est8	est 9	est10	est 11	est REF	promedio
sep-03		0.07	0.07	0.07	0.07	0.14	0.14	0.07	0.07	0.07			0.085
sep-04		0.71	0.71	0.43	2.86	0.43	2.36	0.29	0.93	0.64			1.04
may-05	0.50	0.64	0.64	0.50	0.64	0.43	0.29	0.43	0.21	0.21	0.14		0.42
sep-05	0.01	0.07	0.07	0.93	1.07	0.71	1.07	0.07	0.57	1.36	1.00	0.01	0.57
mar-06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.71	0.01	0.01	0.06
ago-06	1.36	1.36	1.36	1.21	1.07	0.93	0.79	1.71	1.00	0.50	0.71	1.00	1.03
mar-07	0.50	0.50	0.50	0.71	0.71	0.71	0.79	0.64	0.43	0.07	0.29	0.29	0.51
ago-07	0.64	0.21	0.21	0.14	0.28	0.21	0.14	0.14	0.14	1.71	<0.001	0.07	0.32
dic-07	1.64	1.79	1.79	2.14	2.21	2.00	2.00	2.00	2.00	2.07	1.71	1.43	1.90
jun-08	0.07	0.21	0.21	0.21	0.14	0.14	0.07	0.14	0.07	0.43	0.14	0.71	0.21
nov-08	0.21	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
may-09	0.36	0.36	0.36	0.21	0.43	0.07	0.21	0.01	0.71	0.14	0.07	0.21	0.26

<b>nitratos µM</b>													
<b>muestreo</b>	<b>est 1</b>	<b>est2</b>	<b>est3</b>	<b>est4</b>	<b>est 5</b>	<b>est6</b>	<b>est7</b>	<b>est8</b>	<b>est 9</b>	<b>est10</b>	<b>est 11</b>	<b>est REF</b>	<b>promedio</b>
sep-03		14.28	21.43	14.28	7.14	7.14	14.28	7.14	7.14	7.14			11.10
sep-04		2.86	1.43	2.07	2.86	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14			2.21
may-05	0.71	0.71	0.01	0.01	0.01	2.14	0.01	0.01	0.01	0.01	0.71		0.39
sep-05	2.14	3.57	1.43	1.43	1.43	0.71	1.43	<0.001	0.71	2.14	0.71	0.01	1.30
mar-06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
ago-06	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	<0.001	2.14	0.01	0.71	0.01	0.71	0.71
mar-07	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	1.43	<0.001	1.43	1.43	0.01	0.71	0.71	0.84
ago-07	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.43	0.71	0.01	0.18
dic-07	1.43	1.43	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	1.43	0.71	1.84
jun-08	0.08	0.71	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08	0.01	0.01	0.08	0.01	0.08
nov-08	0.17	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08	0.03
may-09	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08	0.01	0.08	0.01	0.01	0.02

<b>N total µM</b>													
<b>muestreo</b>	<b>est 1</b>	<b>est2</b>	<b>est3</b>	<b>est4</b>	<b>est 5</b>	<b>est6</b>	<b>est7</b>	<b>est8</b>	<b>est 9</b>	<b>est10</b>	<b>est 11</b>	<b>est REF</b>	<b>promedio</b>
sep-03		150.00	128.60	121.40	114.30	85.70	135.70	157.10	107.10	92.90			121.42
sep-04		42.86	35.71	28.57	21.43	14.28	21.43	21.43	28.57	14.28			25.39
may-05	50.00	57.14	28.57	50.00	100.00	14.28	28.57	42.86	100.00	21.43	28.57		47.40
sep-05	28.57	57.14	28.57	107.14	50.00	50.00	42.86	50.00	55.71	42.86	35.71	14.29	46.90
mar-06	7.14	28.57	35.71	35.71	35.71	28.57	28.57	35.71	35.71	28.57	28.57	7.14	27.97
ago-06	157.14	171.43	<0.001	128.57	157.14	214.29	185.71	228.57	128.57	107.14	107.14	107.14	153.89
mar-07	7.14	35.71	21.43	21.43	7.14	7.14	185.71	7.14	42.86	7.14	7.14	7.14	29.76
ago-07	37.86	35.71	32.86	41.43	43.57	35.71	66.43	50.00	39.29	35.71	35.71	42.14	41.73
dic-07	171.43	150.00	171.43	150.00	135.71	171.43	171.43	192.86	135.71	171.43	142.86	50.00	151.19
jun-08	70.71	70.71	35.71	37.86	2.86	6.43	3.57	3.57	37.14	4.29	25.00	25.00	26.90
nov-08	70.00	73.57	66.43	69.29	61.43	82.14	65.71	66.43	78.57	80.71	70.71	57.85	70.24
may-09	32.14	37.14	35.71	38.57	31.43	33.57	35.71	33.57	36.43	33.57	32.86	9.29	32.50

ortofosfatos $\mu\text{M}$													
Muestreo	est 1	est2	est3	est4	est 5	est6	est7	est8	est 9	est10	est 11	est REF	promedio
sep-03		6.12	4.51	4.51	7.42	0.32	1.61	3.22	4.84	4.51			4.12
sep-04		18.06	17.10	14.19	19.10	11.29	17.10	10.00	16.77	10.32			14.88
may-05	10.97	10.97	10.97	4.19	5.48	11.29	7.42	8.06	9.35	4.19	3.23		7.83
sep-05	17.10	6.45	8.71	7.10	9.68	3.55	14.52	3.23	3.23	11.61	9.03	5.16	8.28
mar-06	3.87	2.58	6.13	4.84	3.87	3.55	2.26	0.65	9.03	<0.001	<0.001	<0.001	4.09
ago-06	4.52	0.32	5.16	9.03	13.23	7.42	13.87	6.77	7.74	7.74	17.42	3.55	8.06
mar-07	9.03	6.13	8.06	9.68	10.65	9.35	13.87	9.68	6.77	9.68	6.77	1.61	8.44
ago-07	9.03	9.35	3.23	3.23	3.55	3.55	4.84	2.58	4.84	6.13	4.19	4.84	4.95
dic-07	2.58	4.84	5.48	6.13	5.48	6.13	3.87	5.81	3.87	3.55	5.16	6.45	4.95
jun-08	3.23	3.23	1.94	1.29	1.61	1.61	2.26	1.94	2.26	2.26	1.29	1.29	2.02
nov-08	2.58	2.58	2.90	5.48	3.87	11.94	3.87	1.94	5.16	5.48	6.45	4.52	4.73
may-09	0.01	6.45	5.16	2.26	7.74	0.01	3.55	0.32	0.01	0.01	5.16	0.01	2.56

P total $\mu\text{M}$													
muestreo	est 1	est2	est3	est4	est 5	est6	est7	est8	est 9	est10	est 11	est REF	promedio
sep-03		61.94	67.74	57.32	53.22	55.16	54.83	51.93	55.80	56.12			57.11
sep-04		43.22	47.42	33.55	59.68	27.10	24.19	19.03	79.68	21.94			39.53
may-05	62.90	133.23	77.42	138.06	59.03	27.10	60.32	40.32	40.65	61.94	24.19		65.92
sep-05	40.97	39.35	52.90	46.77	35.16	22.26	31.94	76.13	37.42	26.13	39.68	17.10	38.81
mar-06	50.65	27.10	13.55	32.26	16.77	26.45	28.39	38.71	49.03	31.61	24.19	68.06	33.89
ago-06	104.84	126.77	15.16	90.97	65.16	60.00	92.58	63.23	58.39	68.71	74.52	79.35	74.97
mar-07	11.94	7.42	10.32	13.87	14.52	17.1	92.58	14.84	17.74	11.94	10.32	7.42	19.16
ago-07	28.57	28.57	14.29	20.00	13.57	14.29	14.29	18.57	16.43	21.43	14.29	14.29	18.21
dic-07	20.97	16.13	33.87	22.58	27.74	18.71	41.61	32.9	26.13	15.81	29.03	18.71	25.34
jun-08	18.71	17.42	16.13	13.55	14.84	15.81	13.23	12.26	18.39	11.61	6.77	6.77	13.79
nov-08	21.94	12.26	30.32	35.16	19.35	23.87	11.94	13.23	26.77	15.81	14.19	9.03	19.48
may-09	20.00	18.71	20.65	3.55	31.61	3.23	7.10	3.23	3.23	3.23	10.32	3.23	10.67

N:P	est 1	est2	est3	est4	est 5	est6	est7	est8	est 9	est10	est 11	est REF	promedio
sep-03		2.42	1.89	2.11	2.14	1.55	2.47	3.02	1.91	1.65			2.18
sep-04		0.99	0.75	0.85	0.35	0.52	0.88	1.12	0.35	0.65			0.71
may-05	0.79	0.42	0.36	0.36	1.69	0.52	0.47	1.06	2.46	0.34	1.18		0.87
sep-05	0.69	1.45	0.54	2.29	1.42	2.24	1.34	0.65	1.48	1.64	0.89	0.83	1.28
mar-06	0.14	1.05	2.63	1.10	2.12	1.08	1.00	0.92	0.72	0.90	1.18	0.10	1.07
ago-06	1.49	1.35	<0.001	1.41	2.41	3.57	2.00	3.61	2.20	1.55	1.43	1.35	2.03
mar-07	0.59	4.81	2.07	1.54	0.49	0.41	2.00	0.48	2.41	0.59	0.69	0.96	1.42
ago-07	1.32	1.24	2.29	2.07	3.21	2.49	4.64	2.69	2.39	1.66	2.49	2.94	2.45
dic-07	8.17	9.29	5.06	6.64	4.89	9.16	4.11	5.86	5.19	10.84	4.92	2.67	6.4
jun-08	3.77	4.05	2.21	2.79	0.19	0.40	0.26	0.29	2.01	0.36	3.69	3.69	1.97
nov-08	3.19	6.00	2.19	1.97	3.17	3.44	5.50	5.02	2.93	5.10	4.89	6.40	4.15
may-09	1.60	1.98	1.72	10.86	0.99	10.39	5.02	10.39	1.12	10.39	3.18	2.87	5.04

Índice de Carlson (Pt) muestreo	est 1	est2	est3	est4	est 5	est6	est7	est8	est 9	est10	est 11	est REF
sep-03		63.64	64.90	62.53	61.46	61.97	61.89	61.10	62.14	62.22		
sep-04		58.50	59.80	54.80	63.11	51.72	50.09	46.63	67.28	48.70		
may-05	63.73	74.70	66.90	75.20	62.95	51.72	63.26	57.45	57.57	63.64	50.09	
sep-05	57.68	57.10	61.40	59.59	55.50	48.90	54.09	66.62	56.38	51.20	57.22	45.08
mar-06	60.74	51.72	41.73	54.20	44.80	51.37	52.40	56.87	60.27	53.94	50.09	65.00
ago-06	71.23	73.98	43.35	69.19	64.38	63.19	69.44	63.94	62.79	65.14	66.31	67.22
mar-07	39.91	33.00	37.80	42.07	42.73	45.08	69.44	43.04	45.61	39.91	37.80	33.05
ago-07	52.50	52.50	42.50	47.34	41.75	42.50	42.50	46.27	44.51	48.34	42.50	42.50
dic-07	48.03	44.24	54.94	49.09	52.06	46.38	57.91	54.52	51.20	43.95	52.72	46.38
jun-08	46.38	45.35	44.24	41.73	43.04	43.95	41.40	40.29	46.13	39.50	31.72	31.72
nov-08	48.68	40.29	53.34	55.48	46.87	49.90	39.91	41.38	51.55	43.95	42.39	35.90
may-09	47.34	46.38	47.80	22.41	53.94	21.05	32.41	21.05	21.05	21.05	37.80	16.90