



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Desarrollo Sustentable

**Calidad del agua y sitios de monitoreo de *dos*
lagunas costeras insulares de Quintana *Ro***

**TESIS
Que para obtener el grado de
LICENCIADO EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES**

**Presenta
Jorge Alberto Sulub Tolosa**

**Director de Tesis
Dr. Adrián Cervantes Martínez**

Cozumel, Q. Roo, México, octubre de 2011.

UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

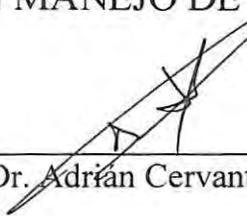
División de Ciencias y Humanidades



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

LICENCIADO EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

Director:


Dr. Adrián Cervantes Martínez

Asesor:


Dra. Martha Angélica Gutiérrez Aguirre

UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
UNIDAD ACADÉMICA COZUMEL



Asesor:


Dr. Víctor Hugo Delgado Blas

DEPARTAMENTO DE
APOYO ACADÉMICO

A mis padres, mi madre Florentina Tolosa Poot y mi padre Jorge Alberto Sulub Dzul por su apoyo incondicional y ser mi fuente de inspiración para seguir adelante, a ustedes le debo todo lo que soy, los amo y respeto de forma infinita.

A mis hermanas Nímia y Teresa por ser parte de este logro que también es de ustedes.

"Los grandes logros se forman de pequeñas acciones"
Jorge Alberto Sulub Tolosa

AGRADECIMIENTOS

A mi familia; a mi padre gracias por estar siempre en el hogar y enseñarme con el ejemplo que el trabajo es la clave del éxito, a mi madre le agradezco por sus sabios consejos y por el esfuerzo sobrehumano que hizo y sigue haciendo para que yo llegue en donde estoy, a mis hermanas que siempre han estado conmigo en las buenas y en las malas, además de tenerme paciencia, aceptar mi forma de ser y de pensar, gracias por su apoyo moral y económico.

A la Universidad de Quintana Roo, Unidad Académica Cozumel por las facilidades brindadas durante mi estancia en la Universidad y por abrirme las puertas del conocimiento.

Al Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT-Gobierno del Estado de Quintana Roo, con clave de proyecto QROO-2009-C01-123254 por el financiamiento durante el desarrollo de la tesis.

A mi director de Tesis Dr. Adrián Cervantes Martínez, por guiarme durante mis estudios, estancia profesional, servicio social y durante todo el proceso de mi tesis, le agradezco la paciencia que me ha tenido, por todo el conocimiento que me ha transmitido de forma académica y como ejemplo de persona recta y formal.

A la Dra. Martha A. Gutiérrez Aguirre por sus oportunas observaciones que ayudaron a enriquecer el contenido de la tesis, gracias por todas esas horas de conocimiento que me transmitió en el salón de clases además de su paciencia y humildad que siempre la han caracterizado.

Al Dr. Víctor Hugo Delgado Blas por el tiempo que se tomó en aportar su granito de arena para mejorar el contenido de este documento.

Al Dr. Luis Manuel Mejía Ortiz por ser la primer persona en involucrarme a las practicas de campo en la Universidad y por su humildad como persona.

A mis padrinos Elizabeth y Hermenegildo por ser un ejemplo de familia y por su puesto a mi hermanita Aeleen, gracias por apoyarme siempre.

A Coral Grisel Koh Pasos, por ser esa personita que me ha hecho ver el mundo de una forma diferente, gracias por tu amor, cariño y comprensión sin olvidar todas esas horas de felicidad que has compartido conmigo.

A Reyes Joaquín Canché Chay por brindarme su amistad, confianza y por compartir momentos de ocio que fueron muy valiosos para hacer menos pesada esta trayectoria.

A mi gatita "Panterita" por darme la oportunidad de cuidarla y por esperarme siempre después de una larga jornada en la Universidad, tu bondad debe ser ejemplo para muchos seres humanos.

A todos los Manejadores de Recursos Naturales que me apoyaron con el trabajo de campo y laboratorio: Coral, Annie, Margarita, Toñito, Nancy, Araceli, Yajaira, Vere, Arturo, Javier y en especial a Carlos Uh Moo por su apoyo incondicional en todos los muestreos.

A todos mis compañeros de generación: Coral, Verónica, Margarita, Brenda, Lizbeth, Paulina y Mónica.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	11
INTRODUCCIÓN.....	13
ANTECEDENTES.....	16
JUSTIFICACIÓN.....	19
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	21
OBJETIVO GENERAL.....	22
ÁREA DE ESTUDIO.....	23
MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
RESULTADOS.....	33
LAGUNA COLOMBIA (VARIABLES FÍSICAS)	
Profundidad y transparencia.....	33
Temperatura.....	34
LAGUNA COLOMBIA (VARIABLES QUÍMICAS)	
Salinidad.....	35
Conductividad.....	36
Oxígeno disuelto.....	37
pH.....	38
Clorofila "a".....	39
Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	40
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅).....	41
Ortofosfatos.....	42
Nitratos.....	43
Nitritos.....	44
Silicatos.....	45
LAGUNA MACAX (VARIABLES FÍSICAS)	
Profundidad y transparencia.....	46
Temperatura.....	47
LAGUNA MACAX (VARIABLES QUÍMICAS)	
Salinidad.....	48
Conductividad.....	49
Oxígeno disuelto.....	50
pH.....	51
Clorofila "a".....	52
Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	53
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅).....	54

Ortofosfatos.....	55
Nitratos.....	56
Nitritos.....	57
Silicatos.....	58
SITIOS DE MONITOREO	
Laguna Colombia (secas).....	59
Laguna Colombia (lluvias).....	60
Laguna Macax (secas).....	61
Laguna Macax (lluvias).....	62
DISCUSIÓN.....	63
CONCLUSIONES.....	72
LITERATURA CITADA.....	74
ANEXO.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Mapa donde se aprecian las estaciones de muestreo de la Laguna Colombia.....	24
Fig. 2. Localización de las estaciones de muestreo de la Laguna Macax.....	26
LAGUNA COLOMBIA	
Fig. 3. Promedio de la profundidad por estación de muestreo y época climática.....	30
Fig. 4. Promedio de la temperatura del agua por estación de muestreo y época climática.....	31
Fig. 5. Promedio de la salinidad del agua por estación de muestreo y época climática.....	32
Fig. 6. Promedio de la conductividad del agua por estación de muestreo y época climática.....	33
Fig. 7. Promedio de la concentración de oxígeno disuelto por estación de muestreo y época climática.....	34
Fig. 8. Promedio del pH por estación de muestreo y época climática.....	35
Fig. 9. Promedio de la concentración de clorofila "a" por estación de muestreo y época climática.....	36
Fig. 10. Promedio de la DQO por estación de muestreo y época climática.....	37
Fig. 11. Promedio de la DBO ₅ por estación de muestreo y época climática.....	38

Fig. 12. Promedio de ortofosfatos por estación de muestreo y época climática.....	39
Fig. 13. Promedio de nitratos por estación de muestreo y época climática.....	40
Fig. 14. Promedio de nitritos por estación de muestreo y época climática.....	41
Fig. 15. Promedio de silicatos por estación de muestreo y época climática.....	42

LAGUNA MACAX

Fig. 16. Promedio de la profundidad por estación de muestreo y época climática.....	43
Fig. 17. Promedio de la temperatura del agua por estación de muestreo y época climática.....	44
Fig. 18. Promedio de la salinidad del agua por estación de muestreo y época climática.....	45
Fig. 19. Promedio de la conductividad del agua por estación de muestreo y época climática.....	46
Fig. 20. Promedio de la concentración de oxígeno disuelto por estación de muestreo y época climática.....	47
Fig. 21. Promedio del pH por estación de muestreo y época climática.....	48
Fig. 22. Promedio de la concentración de clorofila "a" por estación de muestreo y época climática.....	49

Fig. 23. Promedio de la DQO por estación de muestreo y época climática.....	50
Fig. 24. Promedio de la DBO ₅ por estación de muestreo y época climática.....	51
Fig. 25. Promedio de ortofosfatos por estación de muestreo y época climática.....	52
Fig. 26. Promedio de nitratos por estación de muestreo y época climática.....	53
Fig. 27. Promedio de nitritos por estación de muestreo y época climática.....	54
Fig. 28. Promedio de silicatos por estación de muestreo y época climática.....	55
Fig. 29. Dendograma de los sitios de muestreo sugeridos, de acuerdo al índice de distancia métrica Euclídeana y el algoritmo de agrupamiento UPGMA para la época de secas en la Laguna Colombia.....	56
Fig. 30. Dendograma de los sitios de muestreo sugeridos, de acuerdo al índice de distancia métrica Euclídeana y el algoritmo de agrupamiento UPGMA para la época de lluvias en la Laguna Colombia.....	57
Fig. 31. Dendograma de los sitios de muestreo sugeridos, de acuerdo al índice de distancia métrica Euclídeana y el algoritmo de agrupamiento UPGMA para la época de secas en la Laguna Macax.....	58
Fig. 32. Dendograma de los sitios de muestreo sugeridos, de acuerdo al índice de distancia métrica Euclídeana y el algoritmo de agrupamiento UPGMA para la época de lluvias en la Laguna Macax.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo de la Laguna Colombia, Cozumel, Quintana Roo.....	27
Tabla 2. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo de la Laguna Macax, Isla Mujeres, Quintana Roo.....	28
Tabla 3. Ecuación asociada a las curvas de calibración de nutrientes.....	31

RESUMEN

Una laguna costera se define como un cuerpo de agua continental, por lo general orientada en paralelo a la costa, éstas pueden ser clasificadas en: lagunas costeras, albuferas, deltas, llanuras de inundación y salinas. La línea de costa de la Península de Yucatán (PY) tiene una extensión de 1500 km en ella se encuentran cuencas, costas, estuarios, lagunas costeras y bahías. En el siguiente trabajo se determinó la calidad del agua y se establecieron sitios de monitoreo de dos lagunas costeras de la zona norte de Quintana Roo, Laguna Colombia (LC), en la isla de Cozumel y Laguna Macax (LM), en Isla Mujeres. El análisis se realizó considerando dos temporadas climáticas (secas y lluvias de 2010), así como el área superficial de cada sistema, a partir de la determinación de variables físicas y químicas [profundidad, transparencia, temperatura del agua, salinidad, conductividad, oxígeno disuelto, pH, concentración de clorofila "a", Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno al quinto día (DBO₅), concentración de ortofosfatos, nitratos, nitritos y silicatos]. De acuerdo a los resultados, estos sistemas se pudieron clasificar como someros (LC 0.94 ± 0.17 m y LM 1.92 ± 0.84 m) con aguas transparentes, con temperaturas cálidas ($<40^{\circ}\text{C}$), de acuerdo a la salinidad LC es hiperhalina en secas (> 40 u.p.s) y LM eurihalina (30 a 40 u.p.s), conductividad (LC 61.51 ± 4.20 mS/cm y LM 57.43 ± 4.30 mS/cm), ambas lagunas se encuentran bien oxigenadas (LC 5.82 ± 1.13 y LM 5.11 ± 1.78 mg/l), con pH cercano a la acidez, con condiciones oligotróficas en función de la concentración de clorofila "a" (LC 0.43 ± 0.32 mg/m³ y LM 0.17 ± 0.08 mg/m³), con altas concentraciones de ortofosfatos (LC 0.28 ± 0.18 μM/l y LM 0.32 ± 0.30 μM/l), nitratos (LC 0.51 ± 0.41 μM/l y LM 1.02 ± 0.97 μM/l), nitritos (LC 1.04 ± 0.68 μM/l y LM 0.21 ± 0.30 μM/l) y una estabilidad en silicatos (LC 6.39 ± 7.51 μM/l y LM 3.84 ± 1.27 μM/l). Al contrastar los resultados en DQO y DBO₅ analizados aquí, con Criterios de Calidad del Agua de Comisión Nacional del Agua se encontró una DQO excelente en secas para LC y fuera del límite máximo permisible durante lluvias en LC y durante ambas temporadas en LM; la DBO₅ se encontró dentro de los parámetros para considerarse de buena calidad del agua. Con base en lo anterior y de acuerdo al análisis de conglomerados basado en el índice de distancia métrica Euclídeana y el agrupamiento UPGMA se sugieren los siguientes grupos de monitoreo para cada sistema y cada época climática, LC en secas grupo (I) estación 10, grupo (II) región oeste (5 y 6) y grupo (III) región centro hacia el este (1-4, 7-9), en lluvias grupo (I) región oeste (5 a 9), grupo (II) extremo sureste y norte (3 y 10) y LM en secas grupo (I) región centro hasta el noreste (3-8) en lluvias grupo (I) región centro hasta el extremo

noroeste (3 a 8) y grupo (II) región sureste (1 y 2), las variables que permitieron determinar la calidad del agua de ambos sistemas son; la temperatura, transparencia, oxígeno disuelto, pH, clorofila "a", ortofosfatos y silicatos. Estos resultados contribuyen con información para poder determinar acciones de manejo, conservación y/o aprovechamiento de lagunas insulares del estado de Quintana Roo ya que en la mayoría de estos ecosistemas, dicha información es escasa o fragmentada.

Palabras clave: Islas, Clorofila "a", nutrimentos, laguna Macax, laguna Colombia.

INTRODUCCIÓN

Kjerfve (1994) define a una laguna costera como un cuerpo de agua continental, por lo general orientada en paralelo a la costa, separada del mar por una barrera, conectada con el Océano por una o más entradas restringidas, la comunicación con el mar puede ser permanente o efímera y son el resultado del encuentro de dos masas de agua de diferentes características, lo que origina peculiares fenómenos en su comportamiento físico, químico y biológico, además de consecuentes pautas ecológicas como: elevada productividad y su capacidad de reciclamiento de nutrientes por procesos biogeoquímicos (Contreras-Espinoza, 2001; Contreras-Espinoza y Castañeda, 2004).

Soria-García y Sahuquillo-Llinares (2009) mencionan que existen tres tipos de lagunas costeras:

1. Lagunas costeras y albuferas. Cuerpos de agua próximos al mar, separado aparentemente del mar por una barra arenosa o de cantos cuya formación (carácter genético) está unida o relacionada, con procesos de dinámica litoral, actuales o subactuales.
2. Deltas y llanuras de inundación. Este grupo presenta un predominio de la dinámica fluvial sobre la acción litoral. Se puede dividir en dos subgrupos, el primero, deltas caracterizados porque su proceso de formación depende de la descarga fluvial, de la dinámica costera y de los procesos tectónicos que permiten la acumulación de sedimentos. El segundo, subgrupo que reúne a los humedales (lucios) formados por encharcamientos, bastante permanentes, de aguas dulces y salinas procedentes de las inundaciones aluviales (inundación invernal) y de la descarga de aguas subterráneas.
3. Salinas. Masas de agua costera modificadas por la acción antrópica para la extracción de la sal. Originariamente como cuerpo único, están divididas en muchos cuerpos de agua someros, alimentados de agua marina o salmuera, formando esteros que se denominan evaporadores, concentradores y cristalizadores dependiendo la salinidad de la salmuera.

Estos ambientes son característicos de litorales costeros. México cuenta con más de 11,000 km de litoral a lo largo del Golfo de México, el Mar Caribe y el océano

Pacífico. Los estados de Tamaulipas, Baja California Sur y Campeche poseen las lagunas costeras más grandes de México (Laguna Madre, Bahía Magdalena y Laguna de Términos, respectivamente); los estados como Veracruz y Sinaloa, poseen lagunas costeras de tamaño mediano, diseminadas por todo el litoral (Cervantes, 2007).

La línea de costa de la Península de Yucatán (PY) tiene una extensión de 1500 km incluyendo a los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo, la zona costera está compuesta por cuencas, costas, estuarios, lagunas costeras y bahías (Herrera-Silveira *et al.* 2004), dichas formaciones se deben a la evolución geológica e hidrodinámica de las zonas costeras (Ortiz-Pérez y De La Lanza-Espino, 2006).

Las lagunas costeras son consideradas entre los ecosistemas de mayor productividad en el planeta y representan áreas de gran potencial pesquero. Sin embargo, esta productividad puede verse afectada producto de las actividades antrópicas que se desarrollan en las mismas lagunas o en sus alrededores, también son áreas utilizadas comúnmente para la protección, alimentación y reproducción de muchos organismos marinos (Contreras-Espinoza y Castañeda 2004; Rodríguez y Villamizar, 2006). Tradicionalmente, la actividad en estos ambientes es la pesca; de ella depende directamente un gran número de pescadores y sus familias, e indirectamente un sector importante de comerciantes y distribuidores (Contreras-Espinoza, 2001).

Además, las lagunas costeras son consideradas como trampas de sedimentos inorgánicos y materia orgánica y por esa razón sirven como sumideros o de filtros de material (Kjerfve, 1994).

Por otro lado, de acuerdo con Molina *et al.* (1998), en la zona norte de Quintana Roo algunas lagunas costeras representan un gran atractivo turístico para el desarrollo de actividades acuáticas como los paseos en kayak, el veleo, ski acuático, wind surf, entre otros, sin embargo el incremento del desarrollo turístico alrededor de las lagunas aumenta la vulnerabilidad a los impactos directos (p.e. cuando se corta la vegetación o cuando se rellena) e indirectos (ocasionados por contaminación de las escorrentías provenientes de las actividades que se llevan a cabo en zonas más elevadas).

En México los indicadores generales de calidad del agua muestran que 73% de los cuerpos de agua del país están contaminados, ya que 80% de las descargas de

centros urbanos y 85% de las descargas industriales se vierten directamente en ellos sin tratamiento previo (CONABIO, 2006).

El término calidad del agua es relativo y solo tiene importancia universal si está relacionado con el uso del recurso. Esto quiere decir que una fuente de agua suficientemente limpia que permita la vida de los peces puede no ser apta para la natación y un agua útil para el consumo humano puede resultar inadecuada para la industria.

Para decidir si un agua califica para un propósito particular, su calidad debe especificarse en función del uso que se le va a dar. Bajo estas consideraciones, se dice que un agua está contaminada cuando sufre cambios que afectan su uso real o potencial (Barrenechea-Martel, 2004).

La calidad del agua se determina al identificar una serie de características que están asociadas con los contaminantes o con procesos que sirvan como indicadores para poder calificarla, todo ello para determinar los valores máximos permisibles que no ejerzan presión a la vida acuática y que permita al ser humano emplear el agua para su uso y consumo, cualquiera que este sea; recreativo, agrícola, industrial, consumo o contacto directo (Herrera-Silveira *et al.* 2006, citado en Anónimo, 2008).

El propósito de este proyecto es evaluar la calidad del agua considerando los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 y los indicadores para la evaluación de la calidad del agua expuestos por la Comisión Nacional del Agua (CNA) en la Laguna Colombia y Laguna Macax, durante dos temporadas climáticas (secas y lluvias en 2010) mediante el análisis de variables físicas y químicas para determinar el estado de salud y puntos de monitoreo de dichos sistemas.

ANTECEDENTES

La investigación científica de las lagunas costeras se ha desarrollado desde varios enfoques y la riqueza de información es una prueba de ello, existiendo una heterogeneidad de disciplinas que se aplican en el conocimiento de estos ecosistemas (Contreras-Espinoza, 2001).

En México se han realizado trabajos de investigación relacionados con el estado trófico de estos ambientes y se describen a continuación:

Contreras-Espinoza *et al.* (1994) realizaron la caracterización del estado trófico por medio de la concentración de clorofila "a" en 33 lagunas costeras mexicanas, obteniendo valores tan bajos (0.01 mg/m^3) y elevados (hasta casi los 100 mg/m^3) y concluyeron que existe una relación estrecha entre la cantidad de nutrimentos y la concentración de clorofila "a" en un sistema, por lo tanto ésta última puede emplearse como un indicador del estado trófico.

Contreras-Espinoza (2001) realizó un estudio basado en el análisis de siete lagunas costeras de México, cuatro de ellas situadas en el Golfo y tres en el Pacífico Sur, menciona que son sistemas con tendencia a la eutrofia por sus cantidades normales de nutrimentos, así mismo menciona que el comportamiento básico de una laguna costera esta sujeta a factores primordialmente externos, como los vientos, mareas oleajes, entre otros.

En la parte del noroeste de México, Arreola-Lizárraga (2009), realizó una propuesta de manejo de tres lagunas costeras: Yavaros (Sonora), Santa María la Reforma y Altata Pabellón (Sinaloa), en este trabajo se consideraron aspectos socio-ambientales, de investigación y monitoreo para el manejo de la eutrofización y contaminación química de dichas lagunas, teniendo como resultado que dos de los sistemas lagunares estudiados, mostraron problemas de eutrofización.

En el Pacífico existen investigaciones como la de Cupul-Magaña (1999) quien realizó un estudio en la laguna Quelee, Nayarit, México sobre las aves acuáticas que habitan allí, sus resultados registran que 40 aves están asociadas a este sistema, siendo la especie *Dendrocygna autumnalis* la más abundante, dando como resultado un área de descanso y alimentación para aves residentes y temporales.

Varona-Cordero y Gutiérrez-Mendieta (2006) investigaron la distribución espacio-temporal del microplancton en dos lagunas costeras Chantut-Panzacola y Carretas-Pereyra, Chiapas, en donde identificaron un total de 324 taxas para ambos sistemas, siendo las diatomeas céntricas las de mayor riqueza.

Referente al Sureste de México se pueden mencionar algunos trabajos de Herrera-Silveira (1996b) en donde llevó a cabo estudios en la laguna de Celestún, Yucatán sobre variación espacial y temporal de las características físico-químicas, como la temperatura, salinidad, oxígeno y nutrientes (nitrato, amonio, silicato y fosfatos) reportó cambios con respecto a las condiciones del agua donde presentó un gradiente de salinidad permanente. En este mismo sistema, Herrera-Silveira (1998) realizó otro estudio evaluando gradientes de nutrientes, clorofila "a", feopigmentos, tasas de producción y respiración durante un ciclo anual, donde encontró niveles bajos en el desarrollo de fitoplancton debido un mayor desarrollo de macrófitas y a la descomposición de materia orgánica proveniente del manglar.

Otra referencia que apunta a esta misma línea de investigación es el trabajo de Herrera-Silveira (2006), en donde determinó el estado de salud de algunas lagunas costeras de la Península de Yucatán (Celestún, Chelem, Dzilam, Holbox, Chacmochuc, Bojorquez y Bahía de la Ascensión) mediante variables de calidad del agua, fitoplancton y pastos marinos; reportando condiciones oligohalinas (<10) hasta hiperhalinas (>40), con una calidad del agua en general buena, sin embargo menciona que las lagunas de Chelem, Bojorquez, Holbox y Chacmochuc, presentan un nivel de riesgo de contaminación y eutrofización.

Para lagunas costeras insulares del Estado de Quintana Roo, los estudios realizados en estos ambientes son escasos y recientes, por ejemplo como es el caso del trabajo de Ortiz-Borges (2010) donde elaboró la primera descripción y análisis del comportamiento espacio-temporal de variables físico-químicas (temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto y saturación de oxígeno) y su producción primaria de la laguna Colombia, reportando que de manera espacial las variables físico-químicas se comportan de forma homogénea y heterogénea temporalmente. En cuanto a la concentración de clorofila "a", dicho sistema fue clasificado como oligotrófico.

En Laguna Macax (Municipio de Isla Mujeres) los primeros acercamientos sobre estudios del sistema se encuentra el reporte técnico de Azcorra-Esquivel (1997) en el que se determinó la calidad físico-química y bacteriológica del agua, concluyendo

que de acuerdo a la ubicación de la laguna y el contacto con las áreas pobladas, es susceptible de impacto por descargas clandestinas de aguas residuales y residuos sólidos; recomendando la implementación de medidas correctivas para evitar efectos de contaminación y preservar la calidad del agua de dicho ambiente.

JUSTIFICACIÓN

Contreras-Espinoza (2001) mencionó que la importancia de estudiar las lagunas costeras radica en que son áreas utilizadas comúnmente para protección, alimentación y reproducción de muchos organismos marinos. Varias pesquerías litorales dependen de la conservación de estos ecosistemas, sin embargo uno de los principales problemas para establecer medidas de conservación, preservación y aprovechamiento de las áreas costeras, es la carencia de una cantidad suficiente y representativa de datos puntuales.

Herrera-Silveira (2006) señala que para contar con un diagnóstico de la salud de las lagunas costeras y verificar el éxito de las estrategias de manejo, es necesario desarrollar investigaciones que proporcionen las bases científicas para asegurar que las acciones de manejo mantengan el buen funcionamiento de las propiedades en las lagunas.

Desafortunadamente, en la zona costera norte de Quintana Roo, existen diversas áreas con mayor vulnerabilidad frente al proceso de eutrofización por el acelerado desarrollo socioeconómico que están experimentando (Herrera-Silveira *et al.* 2008).

La importancia de realizar este estudio en la Laguna Colombia es que pertenece a una Zona Sujeta a Conservación Ecológica, Refugio Estatal de Flora y Fauna, dentro del parque Marino Nacional de la zona conocida como Arrecifes de Cozumel (Anónimo, 1998), por lo tanto es indispensable generar información que permita determinar el estado de salud de este sistema.

Por su parte, la Laguna Macax es un sistema lagunar que obtiene aportes de agua dulce (Azcorra-Esquivel, 1997), en este sentido, Herrera-Silveira (2006) menciona que sistemas con estas características se deben identificar para determinar si vienen acompañadas de contaminantes o de un exceso de nutrientes y si es necesaria alguna acción de manejo y no esperar a que su estado de salud se deteriore.

Considerando lo anterior, el siguiente trabajo pretende determinar la calidad del agua de dos sistemas acuáticos insulares (Laguna Colombia en Cozumel y Laguna Macax en Isla Mujeres, ambas pertenecientes a la zona norte del estado de Quintana

Roo), mediante la medición de variables físicas y químicas de la calidad del agua que permitan sugerir sitios de monitoreo en estos dos sistemas insulares.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Qué variables físicas (profundidad, transparencia, temperatura del agua), químicas [salinidad, conductividad, oxígeno disuelto, pH, clorofila "a", Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)], concentración de nutrimentos [ortofosfatos, nitratos, nitritos y silicatos] servirán como indicadores para determinar sitios de monitoreo en la Laguna Colombia y la Laguna Macax?

OBJETIVO GENERAL

Establecer mediante el análisis de variables físicas [profundidad (m), transparencia (m), temperatura del agua (°C)], químicas [salinidad (u.p.s), conductividad (mS/cm), oxígeno disuelto (mg/l), pH, clorofila "a" (mg/m³), DQO(mg/l) y DBO₅ (mg/l)] y nutrientes [ortofosfatos (PO₄), nitratos (NO⁻³), nitritos (NO⁻²) y silicatos (SiO₄)] la factibilidad de sitios de monitoreo en dos lagunas costeras (Laguna Colombia y Laguna Macax) del norte de Quintana Roo, durante dos temporadas climáticas (secas y lluvias de 2010).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el comportamiento espacio-temporal de las lagunas costeras (laguna Colombia y laguna Macax), a partir de variables físicas y químicas en dos temporadas climáticas (secas y lluvias, 2010).
- Con base a los resultados obtenidos de las variables fisico-químicas y herramientas estadísticas, sugerir sitios de monitoreo en la Laguna Colombia y la Laguna Macax.

ÁREA DE ESTUDIO

El Estado de Quintana Roo se localiza en la provincia fisiográfica Península de Yucatán, en la porción oriental de ésta. Colinda al norte con Yucatán y Golfo de México, al este con el mar Caribe, al sur con la Bahía de Chetumal y Belice, y al oeste con los Estados de Campeche y Yucatán (Anónimo, 2007).

De acuerdo a los criterios de desarrollo socioeconómico actual y potencial, fisiografía, paisaje y ecológicos, se puede dividir el litoral quintanarroense en tres grandes regiones: Región Bahía de Chetumal-Bacalar-Río Hondo, Región Caribe Sur y Región Caribe Norte (Anónimo, 2007).

La Región Caribe Norte del estado de Quintana Roo, se encuentra constituida por la franja litoral de los Municipios Solidaridad, las partes continental e insular de Cozumel, Benito Juárez, y las porciones continental e insular de Isla Mujeres y Lázaro Cárdenas, el cual colinda por el occidente con el Estado de Yucatán, de modo que esta región costera abarca la porción quintanarroense del Golfo de México (Anónimo, 2007).

Clima

La zona norte del estado de Quintana Roo se encuentra en la Zona Intertropical de Convergencia, esto es al norte del Ecuador, su clima es cálido húmedo con lluvias abundantes en verano y aisladas durante otoño e invierno. Registra una temperatura media anual entre los 24 y 26 °C. El promedio anual de precipitación oscila entre los 1000 y 1500 mm, concentrándose de mayo a octubre, con máximos en junio y septiembre y una disminución relativa importante, llamada canícula, en agosto.

Los vientos dominantes son los alisios, provienen del mar Caribe durante el verano y el otoño; pierden intensidad durante el invierno, su dirección es este-sureste. A finales del otoño y durante el invierno se registra la presencia de vientos llamados nortes, que se originan en Canadá y llegan a México siguiendo una dirección norte-sureste, ocasionan fuertes vientos y marejadas que afectan principalmente a Cozumel, la temporada de huracanes abarca de mayo a noviembre (Xacur-Maiza, 1999).

Vegetación

La selva tropical es el ecosistema más extenso en el estado y base de su riqueza forestal, ocupa el 91.44% de la superficie estatal. En Quintana Roo, se diferencian la selva alta, mediana y baja. La selva alta alcanza de 30 a 50 m de altura, se localiza en el sur del estado; árboles característicos son el cedro rojo, chicozapote, chechem y caoba. La selva mediana alcanza de 15 a 25 m, abarca la mayor parte de la entidad; árboles característicos son el ramón, chacaj, tsitsilche, tzalam. La selva baja alcanza de 8 a 10 m; se caracteriza por la alta presencia de orquídeas, bromelias y helechos.

La vegetación de Quintana Roo está relacionada con el nivel freático y la cercanía del mar como los manglares, marismas, dunas costeras, tular, carrizales, saibales y petenes. Además se reconocen formaciones vegetales en condiciones ambientales particulares como corozales, tasistales, tintales, chechenales, pucteales y bucidales que se caracteriza por su peculiar fisonomía, composición florística y las frecuentes inundaciones a que están expuestas durante la época de lluvias (Xacur-Maiza, 1999).

Flora

La flora de Quintana Roo se compone de aproximadamente 1500 especies de plantas vasculares, de las cuales se conocen actualmente 1350, es decir el 90%. El número de especies conocidas se agrupa en 150 familias, de entre las que concentran un mayor número de especies son: Fabaceae con 150, Graminae con 110, Asteraceae con 95, Euphorbiaceae con 80 y Rubiaceae con 50. A través de los siglos los mayas Peninsulares lograron domesticar plantas tan importantes como el cacao, el henequén y la chaya (Xacur-Maiza, 1999).

Entre la flora quintanarroense se encuentran: el achiote, alacranillo, algodón, anacahuite, azahar de monte, bejuco de pescado, cacao, caimito, campanilla, cantil, carao, carrizo, coco, cocoite, copal, corozo, chit, dziuché, ele´muy, flor de mayo, guaya, guayabillo, hongos, huano, huas, huesitos, icao, jalal, jícara, kuka´, kitam che´, lengua de vaca, maíz, majawa, mangle blanco, mangle prieto, mangle rojo, margaritade mar, matapalo, orquídeas, palmito, palode tinte, palo mulato, pastos marinos, pata de gallo, piich, piñuela, pucté, ruda de monte, sakchakaj, sakpaj, uña de gato, uva de mar, waaxiim, xiaat, xiínche´, yaité, zacate (Xacur-Maiza, 1999).

Fauna

La fauna quintanarroense agrupa a los animales típicos de clima cálido-húmedo y vegetación exuberante. Algunas especies han desaparecido y otras están en peligro de extinción por la caza irracional, como sucede con el pecarí o cerdo de monte, el lagarto, el venado, el hocofaisán, el manatí, el tapir y varias especies de tortugas.

Entre las especies más significativas figuran: mamíferos (tepezcuintle, mono araña, saraguato, puma, ocelote, tigrillo, tejón, oso hormiguero y murciélagos), aves (tórtolas, momotos, cardenales, ruiseñor, carpintero, tucán, chachalacas, palomas, codornices hocofaisán, pavo montés, tapacaminos, jaribú, gaviotas, martin pescador, golondrinas), insectos (moscos, chaquistes, tábanos, arañas, tarántula, alacranes, libélulas, campamochas), peces (mero, cazón, sierra) y reptiles (iguanos, lagartijas y víboras) (Xacur-Maiza, 1999).

Laguna Colombia

La Laguna Colombia se localiza en la Isla de Cozumel, ésta última se encuentra entre las coordenadas extremas al norte 20° 36' N, al sur 20° 16' N, al este 86° 44' O y al oeste 87° 20' O, tiene una extensión total 647.33 km², la isla tiene alrededor de 39 km de largo y una anchura media de 12.8 km. Cozumel y su área Marina de Influencia se encuentra localizada en el suroeste de la República Mexicana, el 75% de la Isla está cubierta por una vegetación consistente en selva mediana subperenifolia con asociaciones de manglar en zonas inundables y la línea de costa.

En la isla existen entradas de agua marina que se conectan con lagunas (Colombia, laguna Ciega y Chankanab) y se caracterizan por contener agua salobre (Anónimo, 2007).

La laguna Colombia (Fig. 1) se encuentra en el extremo sur de la Isla de Cozumel, está formada por dos embalses principales: el primero es la porción noroeste del sistema, caracterizado por el flujo permanente de agua marina a través de una boca de unos cuatro a seis metros de ancho con un metro y medio de profundidad que la comunica con el mar, el segundo es una cuenca ubicada en la

porción sureste, con un flujo hidráulico limitado y temporal que depende de régimen de mareas y de la precipitación anual.

En este sistema lagunar existe un petén por lo cual también hay una aportación de agua dulce, presenta las cuatro especies típicas de manglar; *Conocarpus erecta*, *Laguncularia racemosa*, *Acicennia germinans* y *Rhizophora mangle* (Xacur-Maiza, 1999), este sistema lagunar está representado en su mayoría por pastos marino tales como; *Thalassia testudinum*, *Halodule sp.* y *Syringodium filiforme*, una de las características de la Laguna Colombia es la alta tasa de evapotranspiración del sistema lagunar y las intrusiones marinas al mismo (Anónimo, 1998).

Los puntos de colecta analizados en el presente estudio, se ilustran en la Fig. 1 y se mencionan en la Tabla 1.

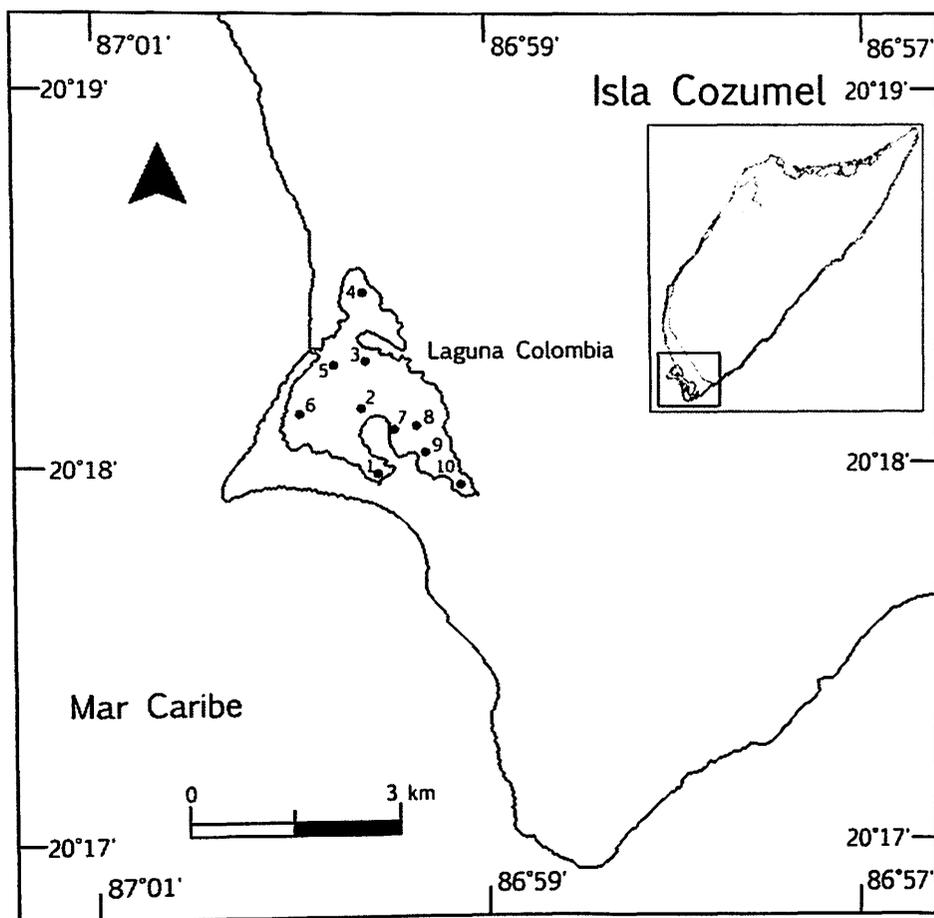


Fig. 1. Mapa donde se aprecian las estaciones de muestreo de la Laguna Colombia.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo de la Laguna Colombia, Cozumel, Quintana Roo.

Estación	Latitud Norte	Longitud Oeste
1	20°18,071'	87°00,290'
2	20°18,354'	87°00,363'
3	20°18,566'	87°00,348'
4	20°18,861'	87°00,360'
5	20°18,552'	87°00,489'
6	20°18,332'	87°00,644'
7	20°18,262'	87°00,212'
8	20°18,281'	87°00,113'
9	20°18,164'	87°00,074'
10	20°18,019'	86°59,925'

Laguna Macax

Laguna Macax se encuentra en el Municipio de Isla Mujeres, en Quintana Roo. El Municipio tiene coordenadas extremas al norte 21° 39' N, al sur 21° 08' N, al este 86° 42' O y al oeste 87° 13' O. Tiene una superficie de 1,100 Km² y comprende la Isla Mujeres, Isla Blanca, Isla Contoy y una parte continental. Por otro lado, propiamente Isla Mujeres tiene una longitud de 7 km por 1 km en su parte más ancha y cuenta con una laguna importante, conocida como Laguna Macax, que en realidad es una entrada del Mar Caribe (Anónimo, 2007).

La Laguna Macax se localiza en la parte noroeste de Isla Mujeres (Fig. 2), mide aproximadamente 2.4 km de largo y 0.5 km de ancho, con un área de 3.4 km². Es un cuerpo de agua somero cuya profundidad promedio es de 2.5 metros, tiene comunicación permanente con el mar a través de un canal de aproximadamente 400 metros de longitud que comunica con la Bahía de Mujeres, su eje de longitud es prácticamente paralelo a la línea de costa y se tiene acceso a ella a través de la carretera perimetral (Azcorra-Esquivel, 1997). Los puntos de colecta analizados en Macax, se ilustran en la Fig. 2 y se mencionan en la Tabla 2.

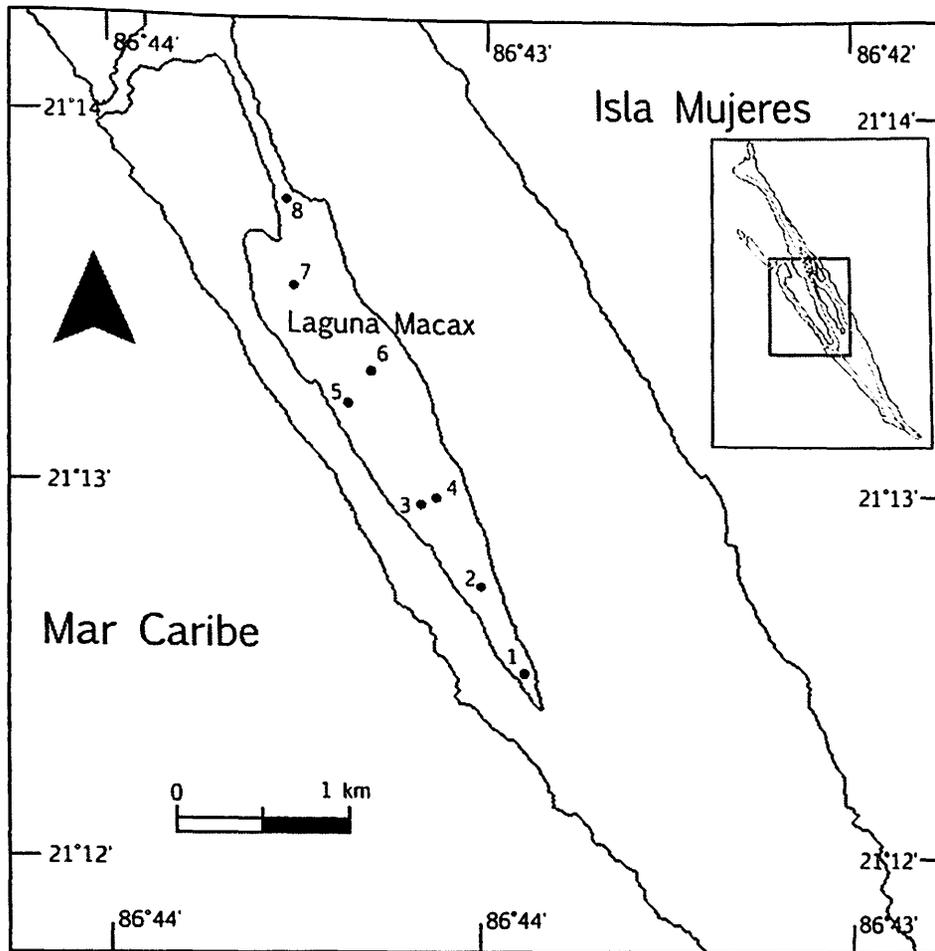


Fig. 2. Localización de las estaciones de muestreo de la Laguna Macax (Modificado de Azcorra-Esquivel, 1997).

Tabla 2. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo de la Laguna Macax, Isla Mujeres, Quintana Roo.

Estación	Latitud Norte	Longitud Oeste
1	21°13,348'	86°43,854'
2	21°13,493'	86°43,935'
3	21°13,630'	86°44,040'
4	21°13,645'	86°44,015'
5	21°13,804'	86°44,176'
6	21°13,855'	86°44,135'
7	21°13,995'	86°44,278'
8	21°14,160'	86°44,305'

MATERIALES Y MÉTODOS

En Quintana Roo se reconocen tres épocas climáticas; secas (febrero-mayo), lluvias (junio-octubre) y nortes (noviembre-enero) Schmitter-Soto *et al.* (2002), sin embargo en el norte de Quintana Roo se presenta un clima relativamente estable con dos estaciones climáticas; secas (mínima precipitación, con promedio entre 50 mm/mes) y lluvias (máxima precipitación con promedios entre 150 y 211.5 mm/mes) (Carriquiry-Beltrán, 2010) partiendo de esta premisa y para cumplir con los objetivos planteados en este proyecto se realizaron un total de 4 salidas de campo, dos para cada laguna; una en la época de secas (mayo de 2010) y otra en la época de lluvias (octubre de 2010).

Trabajo de Campo

Se establecieron un total de 18 sitios de muestreo en las dos lagunas costeras, 10 en laguna Colombia y 8 en laguna Macax, todas las estaciones fueron geoposicionadas con un GPS Garmin Etrex. Los sitios fueron seleccionados de acuerdo a: 1) complejidad del sistema, 2) ubicación con respecto a la línea de costa y 3) dimensión de la laguna.

Durante las dos épocas climáticas de estudio se colectaron *in situ* un total de 504 muestras de agua; 280 en laguna Colombia y 224 en Laguna Macax. En campo se realizaron mediciones *in situ* de la profundidad (m) y transparencia (m) esto con la ayuda de un disco de Secchi y una sondaleza, mientras que la temperatura del agua (°C), salinidad (u.p.s), conductividad (mS/cm), oxígeno disuelto (mg/l) y pH, se obtuvo con la ayuda de una sonda multiparamétrica digital Hydrolab-DataSonde 5.

Para determinar la concentración de nutrientes inorgánicos [ortofosfatos (PO_4), nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-) y silicatos (SiO_4)], las muestras de agua se colectaron en recipientes de vidrio de 250 ml (previamente lavados con mezcla sulfocrómica y detergente libre de fosfatos), mientras que para Clorofila "a" (mg/cm^3), DQO (mg/l) y DBO_5 (mg/l) se tomaron muestras en botellas de plástico de 1 litro de capacidad. Todas las muestras se conservaron en una nevera con hielo para su posterior análisis en laboratorio. Todas las variables contaron con una muestra y dos réplicas, los datos fueron registrados en una bitácora de campo (ver Anexo).

Trabajo de laboratorio

Los métodos analíticos empleados en la determinación de los nutrimentos fueron de acuerdo a los descritos en Parsons *et al.* (1984), así como en las Normas Oficiales Mexicanas (Anónimo 2001c), fundamentados en técnicas colorimétricas, mismas que se describen a continuación:

Nitratos (NO^{-3}) se determinaron al pasar 20 ml de la muestra en una columna de cadmio-cobre para reducir los nitratos a nitritos; una vez hecho lo anterior, los Nitratos (NO^{-3}) y Nitritos (NO^{-2}) se calcularon agregando a la muestra de agua 0.4 ml y 0.2 ml de solución de sulfanilamida respectivamente y después de 10 minutos se le adicionó 0.4 ml y 0.2 ml de N (1-naftil) (respectivamente), posteriormente se prosiguió a su lectura en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 543 nm.

Para la determinación de los silicatos (SiO_4) se tomaron 50 ml de muestra a la cual se le adicionó 20 ml de heptamolibdato de amonio ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$) y 20 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) hasta formar una coloración azul en donde después de 10 min y antes de 20 min se realizó la lectura a una longitud de onda de 810 nm, siguiendo la técnica de Korolef.

Para el cálculo de ortofosfatos (PO_4^-) (como fósforo reactivo soluble), se aplicó el método modificado de Murphy y Riley que consiste en hacer reaccionar el fosforo con iones de molibdato y antimonio para posteriormente reducirlo en un medio ácido, utilizando ácido sulfúrico, tartrato de antimonio y potasio ($\text{C}_8\text{H}_4\text{K}_2\text{O}_{12}\text{Sb}_2$) molibdato de amonio y ácido ascórbico, adquiriendo una coloración azul misma que se midió a una longitud de onda 880 nm, mismo que fue calibrado para cada prueba.

Las lecturas en longitud de onda, se tradujeron a concentración de Nitratos, Nitritos Silicatos y Ortofosfatos de cada muestra, con el uso de curvas de calibración previamente estandarizadas, de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 3. Ecuación asociada a las curvas de calibración de nutrimentos.

Nutrimento	Ecuación regresión lineal	r ²	Ecuación para calcular la concentración
Nitratos	$y = 0.0252x + 0.0116$	0.99777	$x = (y - 0.0116) / 0.0252$
Nitritos	$y = 0.0162x - 0.0028$	0.99982	$x = (y + 0.0028) / 0.0162$
Ortofosfatos	$y = 0.0131x + 0.001$	0.99637	$x = (y - 0.001) / 0.0131$
Silicatos	$y = 0.0205x + 0.0077$	0.99992	$x = (y - 0.0077) / 0.0205$

Donde,

x= concentración (nutrimento)

y= absorbancia (longitud de onda)

Para la obtención de clorofila "a", las muestras se filtraron con la ayuda de una bomba de vacío y filtros Millipore con apertura de poro de 0.45 μm . El filtro obtenido se depositó en tubos de ensaye Pirex de 15 ml, se le agregó 10 ml de acetona al 90% para obtener el pigmento, 24 hrs después se llevaron las muestras a la centrifuga Solbat C-600 a 2500 revoluciones por minuto durante 5 min para aislar el pigmento del solvente posteriormente se prosiguió a su lectura a tres longitudes de onda (630, 647 y 664 nm), antes de cada cambio de longitud de onda se calibró el equipo con acetona utilizando un volumen similar al de la muestra (A.P.H.A. 1986). Todas las lecturas colorimétricas se realizaron con la ayuda de un espectrofotómetro Thermo Spectronic Genesys 20.

La concentración del pigmento, se calcula siguiendo la siguiente relación (APHA, 1986):

$$\text{mgChla/m}^3 = (\text{Ca} \cdot v) / (V \cdot 10)$$

Donde:

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

v = Volumen de acetona (10 ml)

V = Volumen de la muestra filtrada en litros

Chla = Clorofila "a"

Para los cálculos de DQO y DBO₅ se analizaron un total de 72 muestras a lo largo del estudio. Para la determinación de DQO se utilizó la metodología de la NMX-

AA-030-SCFI-2001 (Anónimo, 2001b), el principio de este método se basa en colocar la muestra problema en ácido crómico y sulfúrico en ebullición y reflujo, en una disolución de ácido fuerte con un exceso conocido de dicromato de potasio, después de la digestión, el dicromato no reducido se midió por titulación para determinar la cantidad de dicromato consumido para calcular la materia oxidable en términos de oxígeno equivalente.

Para determinar la DBO_5 se siguió la metodología descrita en NMX-AA-028-SCFI-2001 (Anónimo, 2001a), consistió en verter la muestra en botellas Winkler de vidrio con capacidad de 300 ml, mismas que se llevan a incubación a 20 °C por un total de 5 días para determinar la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días.

Una vez terminados todos los análisis los resultados se compararon con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 y los indicadores para la evaluación de la calidad del agua expuestos por la Comisión Nacional del Agua (CNA) para determinar la calidad del agua de ambas lagunas.

Método estadístico

Para determinar si existen diferencias significativas en las variables analizadas entre épocas climáticas (secas y lluvias) se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis con un nivel de confianza del 95%.

Finalmente se realizó el método estadístico de conglomerados (dendogramas) con la ayuda del software Multi Variate Statistical Package (MVSP, Ver. 3.2 para Windows 98 o posterior) para cada laguna costera y por época climática de acuerdo al índice de distancia métrica Euclideana y el algoritmo de agrupamiento UPGMA, basado en semejanzas y/o discontinuidades entre los sitios de muestreo, para dicho análisis de agrupamiento se transformaron los resultados de las variables a logaritmo (excepto el pH) y posteriormente se determinó el promedio ya que los datos analizados se encuentran en diferentes magnitudes, dando como resultado sitios, áreas o grupo de sitios potenciales a considerar en un plan de monitoreo.

A partir de los resultados obtenidos en los conglomerados, se realizó la propuesta de áreas para monitoreo en cada una de las lagunas, así como de indicadores de calidad del agua.

RESULTADOS

LAGUNA COLOMBIA

VARIABLES FÍSICAS

Profundidad y transparencia (m)

Considerando ambas temporadas climáticas, de manera general la Laguna Colombia presentó una profundidad promedio de 0.94 ± 0.17 m. El máximo fue de 1.29 ± 0.0 m, correspondiente a la época de lluvias, en la estación 6. El valor mínimo fue de 0.53 ± 0.0 m, encontrado en la estación 10 en la época de secas. A nivel espacial en la columna de agua se observó un incremento de 0.22 m en promedio durante la época de lluvias en comparación con secas en 8 estaciones de un total de 10 (1, 2, 4-6, 8-10) (Fig. 3) sin embargo estas variaciones no produjeron diferencias significativas entre épocas climáticas ($H= 29.79$, $p>0.05$). Los valores de transparencia en todas las estaciones de muestreo y durante las dos épocas climáticas fueron totales.

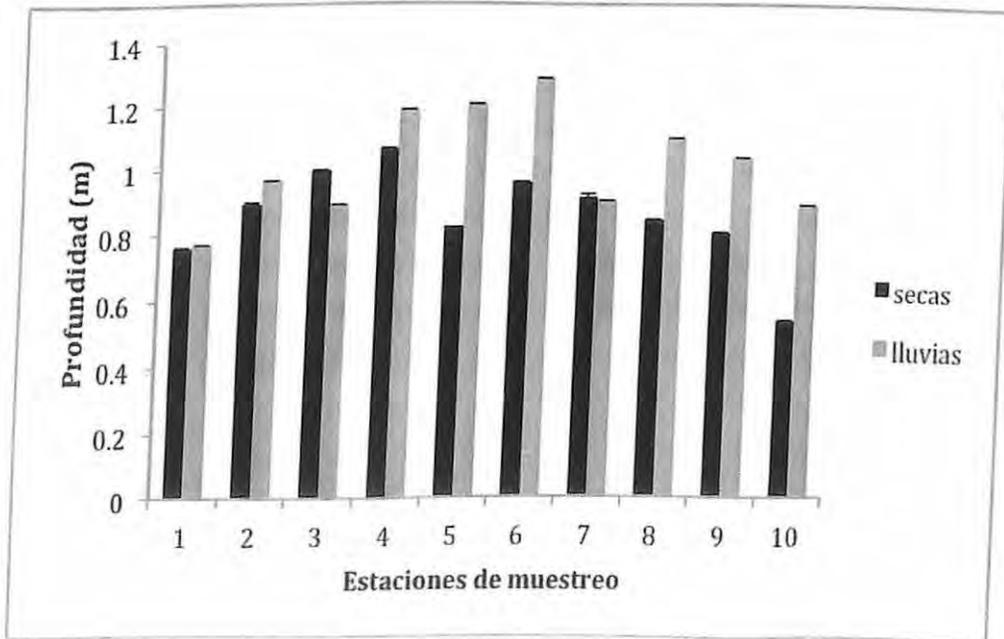


Fig. 3. Promedio de la profundidad por estación de muestreo y época climática.

Temperatura (°C)

El promedio de la temperatura en la columna del agua alcanzó un valor de 28.14 ± 0.75 °C.

De manera temporal los niveles más elevados fueron registrados en la época de secas, siendo la estación 10 donde se presentó el valor más alto (29.52 ± 0.0 °C), mientras que el valor mínimo (27.15 ± 0.07 °C) fue registrado en lluvias en la estación 1 (Fig. 4), la prueba estadística reveló diferencias significativas entre épocas climáticas ($H= 44.56, p<0.05$).

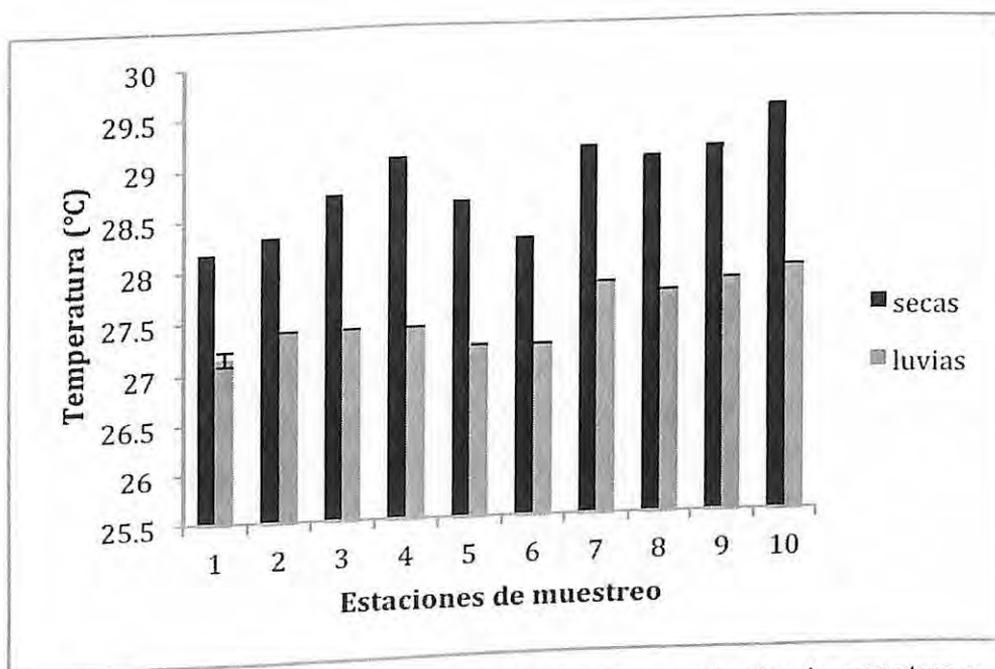


Fig. 4. Promedio de la temperatura del agua por estación de muestreo y época climática.

VARIABLES QUÍMICAS

Salinidad (u.p.s)

El promedio general de la salinidad en la Laguna Colombia fue de 40.64 ± 4.10 u.p.s.

El valor más elevado (48.75 ± 0.0 u.p.s) se reportó en la época de secas en la estación 10. Mientras que las estaciones 3 y 4 presentaron los valores mínimos con 36.5 ± 0.0 u.p.s ambos en la época de lluvias (Fig. 5), las diferencias de salinidad (mayor en secas y menor en lluvias) fueron estadísticamente significativas ($H= 44.5$, $p<0.05$).

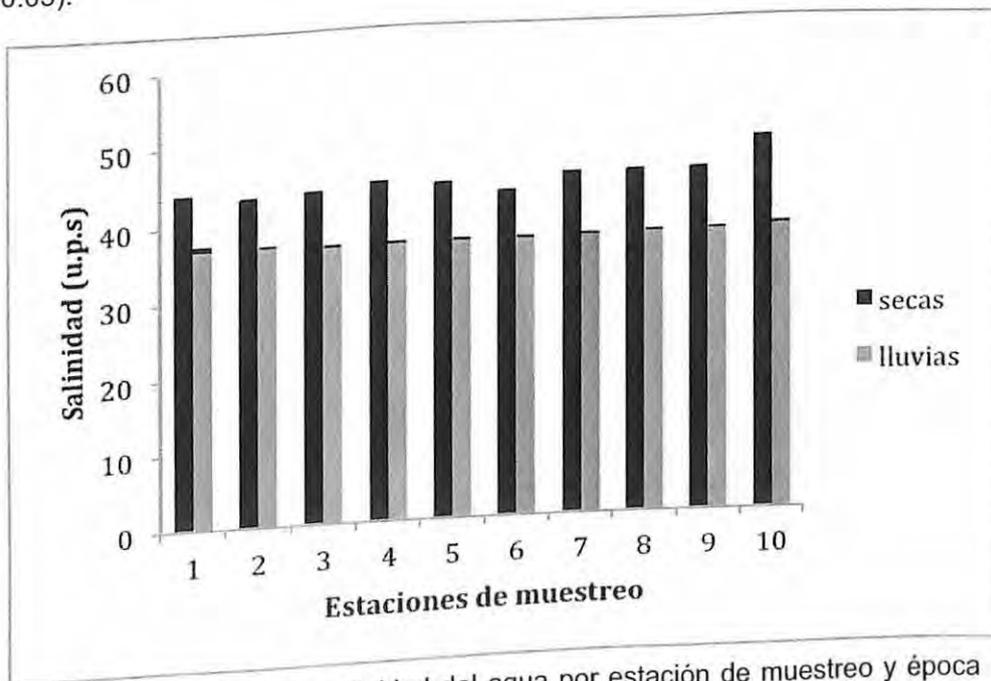


Fig. 5. Promedio de la salinidad del agua por estación de muestreo y época climática.

Conductividad (mS/cm)

Los valores de conductividad fueron en promedio de 61.51 ± 4.20 mS/cm.

En la estación 10 se reportó un máximo de 72.05 ± 0.07 mS/cm durante la época de secas. Por otro lado en la estación 4 se reportó el valor mínimo 55.1 ± 0.0 mS/cm durante lluvias (Fig. 6).

Las oscilaciones de la conductividad a nivel temporal describen un comportamiento similar a los de salinidad (Fig. 5) en donde se puede observar que existe un comportamiento casi homogéneo por época climática, valores inferiores (27.15 – 27.9 mS/cm) en lluvias y valores superiores (28.16 – 29.52 mS/cm).

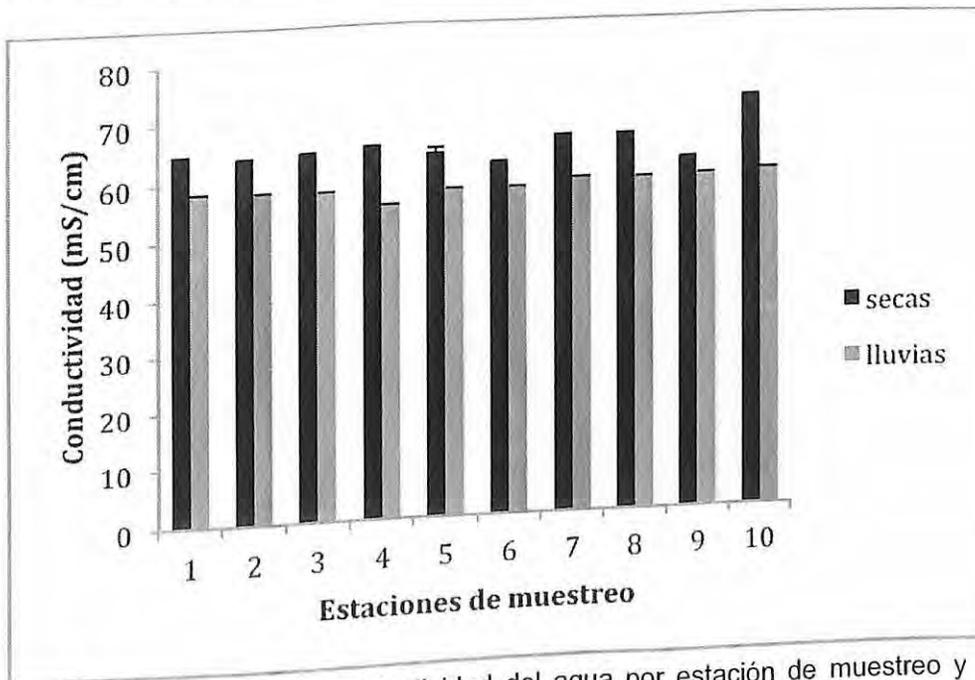


Fig. 6. Promedio de la conductividad del agua por estación de muestreo y época climática.

Oxígeno disuelto (mg/l)

El promedio del oxígeno disuelto en la Laguna Colombia fue de 5.82 ± 1.13 mg/l.

El valor máximo fue de 8.35 ± 0.0 mg/l, se reportó en la estación 10 durante la época de secas. Mientras que el mínimo (3.28 ± 0.07 mg/l) se observó en la estación de muestreo 1 durante la época de lluvias. Se reportaron los valores más bajos en la época de lluvias y los valores más elevados en secas (Fig. 7), de igual manera la prueba estadística evidenció que si existen diferencias significativas de manera temporal ($H= 29.79$, $p<0.05$).

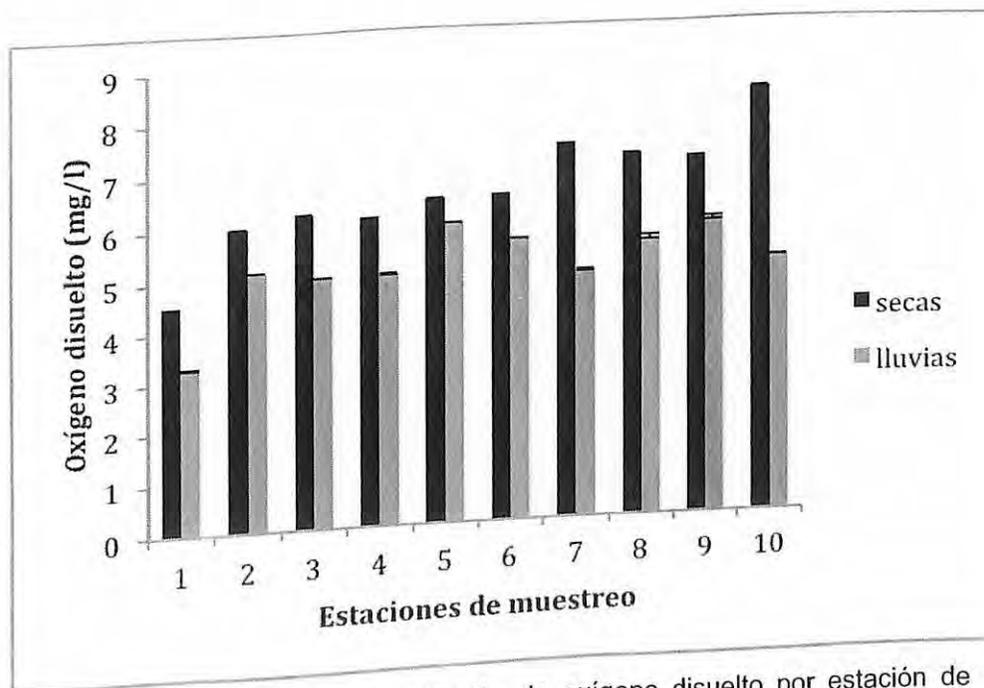


Fig. 7. Promedio de la concentración de oxígeno disuelto por estación de muestreo y época climática.

pH

En promedio la laguna Colombia presentó un valor de pH de 8.14 ± 0.30 .

El valor máximo reportado fue de (8.54 ± 0.01) en la estación 9 durante la época de lluvias. Por otro lado el mínimo fue de (7.7 ± 0.1) en la estación 1 en la época de secas. Durante la época de lluvias se registraron los valores más elevados en comparación con secas (Fig. 8), con diferencias significativas entre épocas ($H=34.43, p<0.05$).

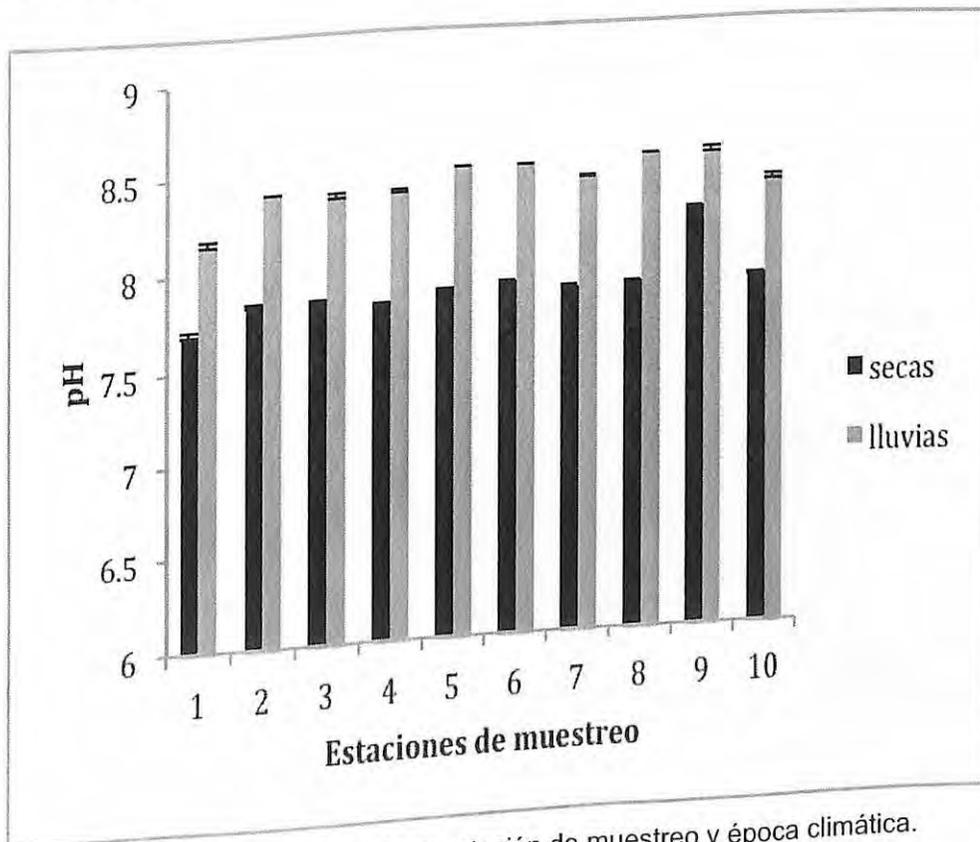


Fig. 8. Promedio del pH por estación de muestreo y época climática.

Clorofila "a" (mg/m³)

El promedio general de la concentración de clorofila "a" fue de 0.43 ± 0.32 mg/m³.

La concentración más alta (1.52 ± 0.34 mg/m³) se encontró en la estación 5 y la más baja (0.09 ± 0.005 mg/m³) en la estación 2, ambos valores correspondieron a la época de secas (Fig. 10), por lo consiguiente a nivel temporal la herramienta estadística no reveló la existencia de diferencias significativas ($H= 0.49 \times 10^{-3}$, $p>0.05$).

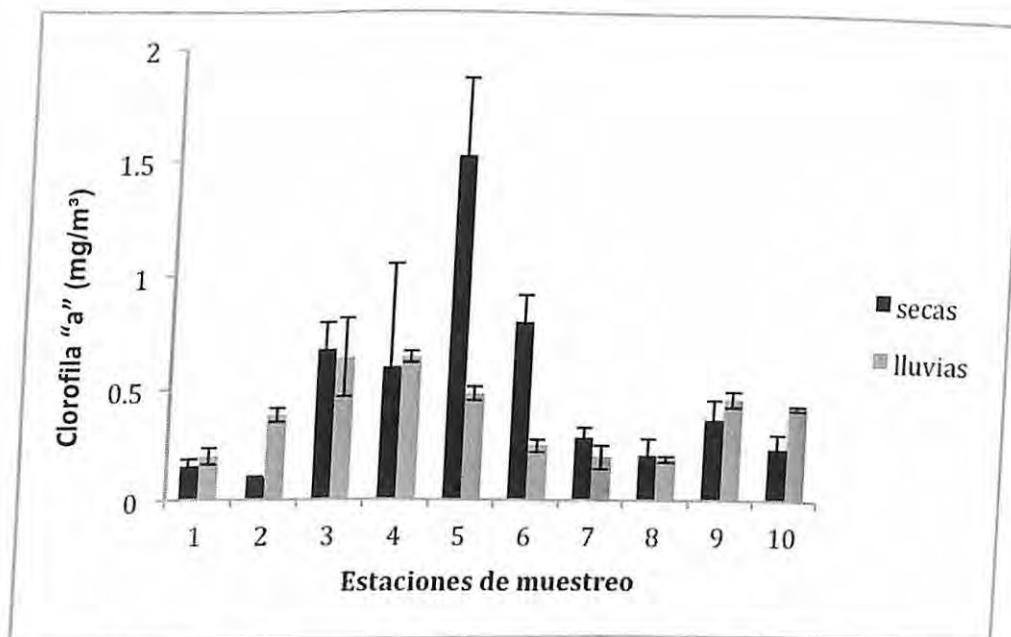


Fig. 9. Promedio de la concentración de clorofila "a" por estación de muestreo y época climática.

DQO (mg/l)

De manera general el valor promedio de esta variable fue de 734.96 ± 1003.08 mg/l.

En todas las estaciones de muestreo los valores más altos (3128 ± 260.21 mg/l) se encontraron en la estación 6, en la época de lluvias y los valores más bajos (2.1 ± 0.14 mg/l) en la estación 10, en secas (Fig. 10), estadísticamente se encontraron diferencias significativas entre temporadas ($H= 38.65$, $p<0.05$).

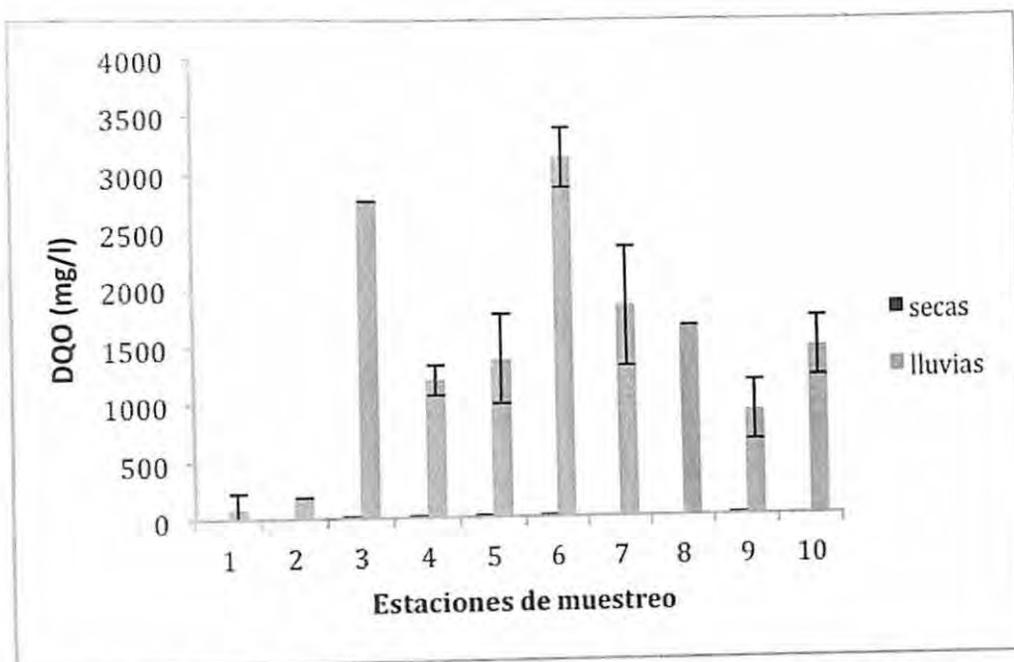


Fig. 10. Promedio de la DQO por estación de muestreo y época climática.

DBO₅ (mg/l)

En la DBO₅ se registró un promedio general de 2.82 ± 1.66 mg/l.

Durante la época de secas se observaron los niveles más altos en 8 estaciones de un total de 10 (1-6, 8-9), con un valor máximo de 5.8 ± 0.28 mg/l en la estación 1. Por otro lado el valor más bajo fue de 0.2 ± 0.28 mg/l en la estación 4 durante la época de lluvias (Fig. 11), temporalmente fue posible observar diferencias significativas ($H=23.05$, $p<0.05$).

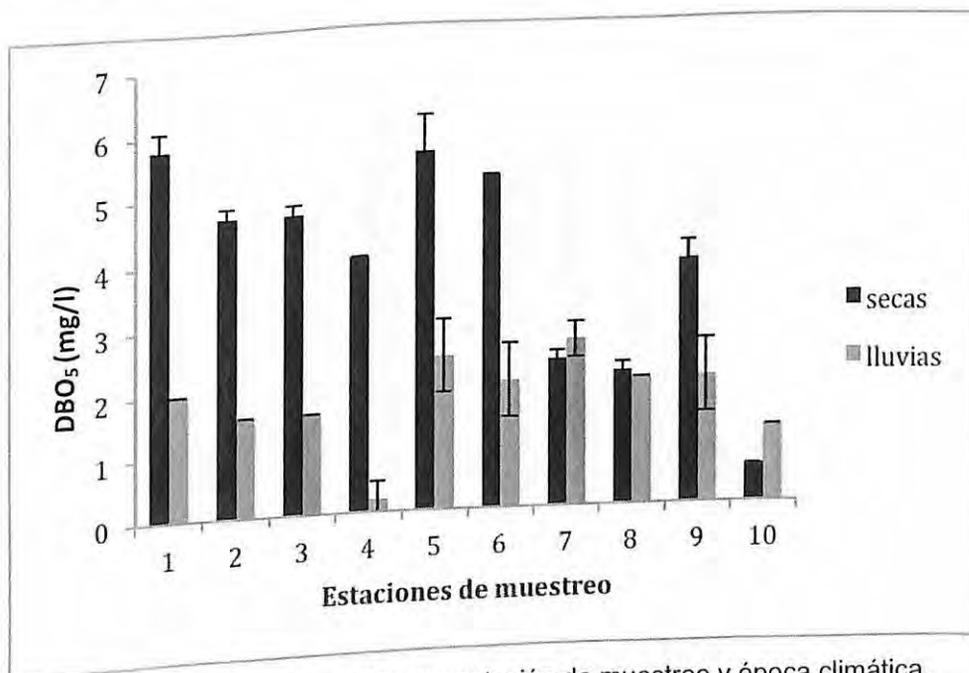


Fig. 11. Promedio de la DBO₅ por estación de muestreo y época climática.

Ortofosfatos ($\mu\text{M/l}$)

Los ortofosfatos presentaron un promedio general de $0.28 \pm 0.18 \mu\text{M/l}$.

Durante la época de secas se presentaron en 9 estaciones (1-9) los niveles más elevados de ortofosfatos, la estación 4 presentó en ambas épocas climáticas el valor máximo $0.53 \pm 0.0 \mu\text{M/l}$. El valor más bajo fue de $0.007 \pm 0.0 \mu\text{M/l}$ en la estación 2 durante la época de lluvias (Fig. 12), la prueba estadística reveló que por época climática existen diferencias significativas ($H= 13.48, p<0.05$).

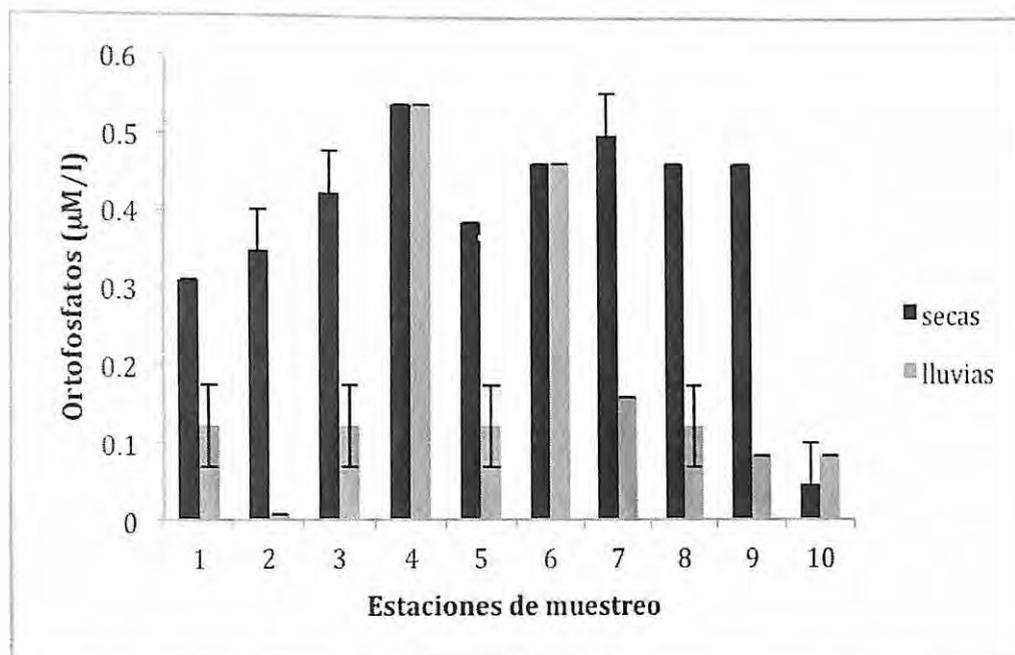


Fig. 12. Promedio de ortofosfatos por estación de muestreo y época climática.

Nitratos ($\mu\text{M/l}$)

Esta variable presentó valores promedio de $0.51 \pm 0.41 \mu\text{M/l}$.

El valor máximo registrado fue $1.36 \pm 0.67 \mu\text{M/l}$ en la estación 1, mientras que el valor más bajo fue de $0.01 \pm 0.0 \mu\text{M/l}$ en la estación 5, ambos valores corresponden a la época de lluvias (Fig. 13), de manera temporal se encontraron diferencias significativas ($H= 33.14, p<0.05$).

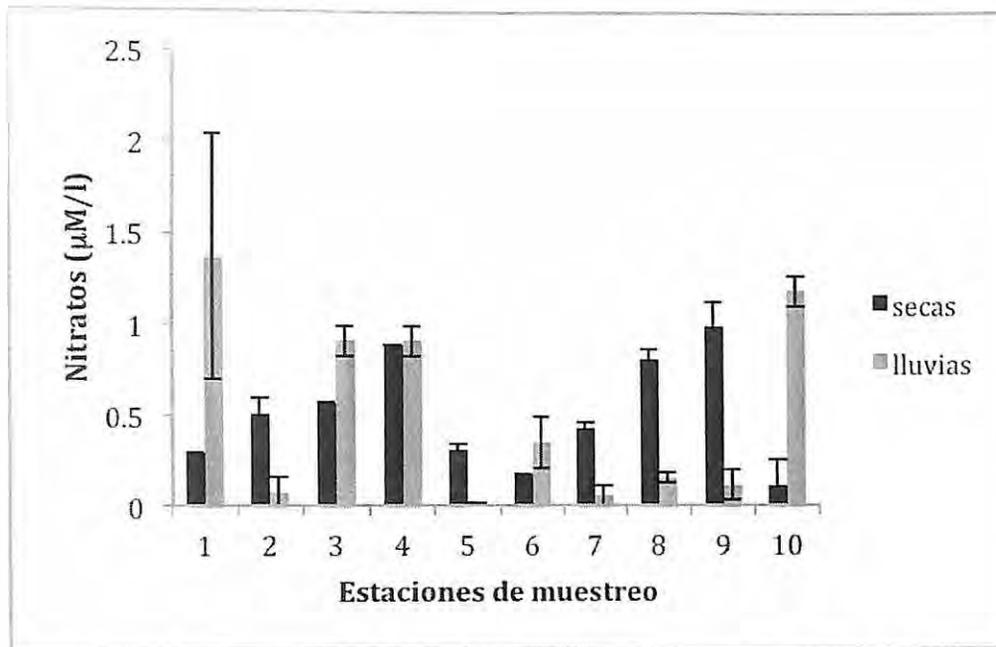


Fig. 13. Promedio de nitratos por estación de muestreo y época climática.

Nitritos ($\mu\text{M/l}$)

El comportamiento en promedio de los nitritos fue de $1.04 \pm 0.68 \mu\text{M/l}$.

Esta variable presentó el valor más alto en la estación 4 durante la época de secas ($2.39 \pm 0.08 \mu\text{M/l}$) y el nivel más bajo ($0.35 \pm 0.08 \mu\text{M/l}$) en la estación 5 durante lluvias (Fig. 14), sin embargo a nivel temporal no se encontraron diferencias significativas ($H=0.014$, $p>0.05$).

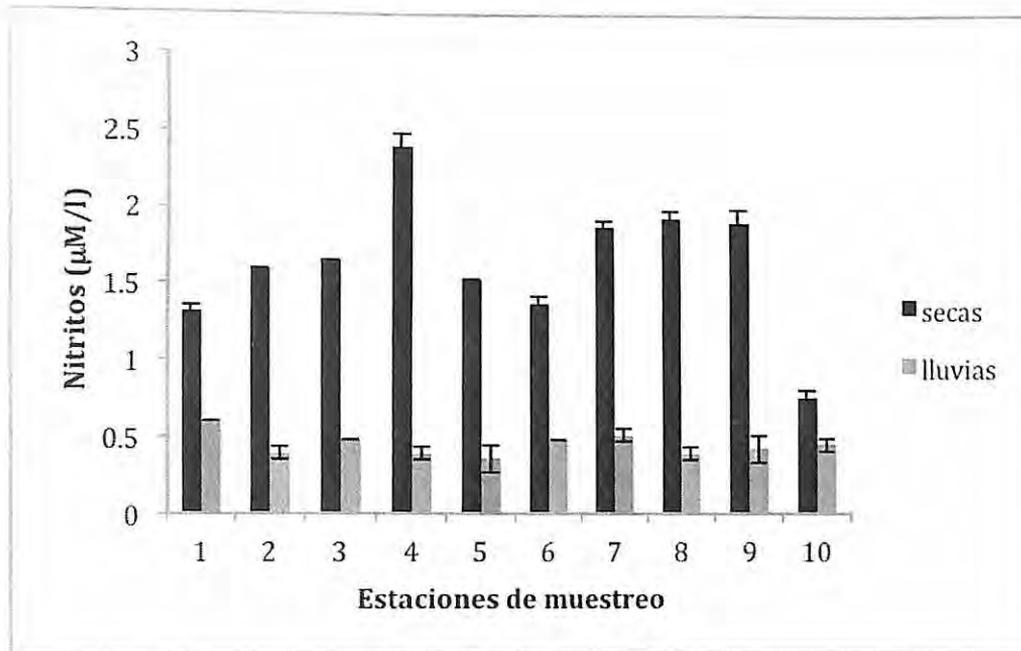


Fig. 14. Promedio de nitritos por estación de muestreo y época climática.

Silicatos ($\mu\text{M/l}$)

En general los silicatos presentaron en promedio valores de $6.39 \pm 7.51 \mu\text{M/l}$.

El comportamiento de esta variable presentó ciertas oscilaciones en el tiempo, el máximo ($37.55 \pm 0.03 \mu\text{M/l}$) se registró en la estación 10 durante la época de secas. El mínimo ($2.28 \pm 0.03 \mu\text{M/l}$) fue encontrado igual en la estación 10 durante la época de lluvias (Fig. 15), sin embargo a nivel temporal no se encontraron diferencias significativas ($H= 1.71, p>0.05$).

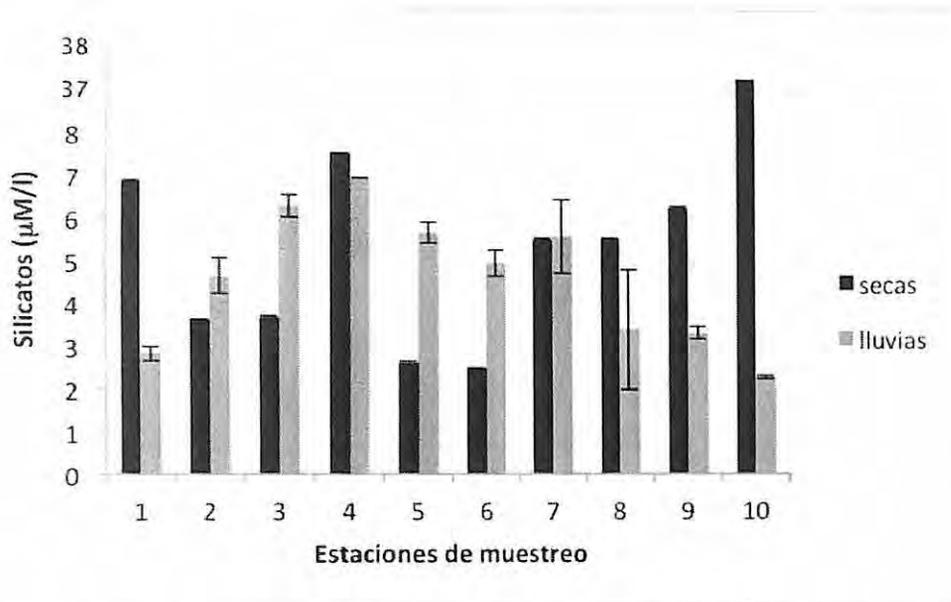


Fig. 15. Promedio de silicatos por estación de muestreo y época climática.

LAGUNA MACAX

VARIABLES FÍSICAS

Profundidad y transparencia (m)

El valor promedio de la profundidad en la laguna Macax fue de 1.92 ± 0.84 m (Fig. 16).

Durante la época de secas se observó el máximo (4 ± 0.0 m) en la estación 8 y el mínimo (0.95 ± 0.0 m) en la estación 6. A nivel temporal se observaron pequeñas oscilaciones, sin embargo no se encontraron diferencias significativas ($H= 0.13$, $p>0.05$). Los niveles de transparencia registrados fueron totales en ambas épocas climáticas y en todos los sitios de muestreo.

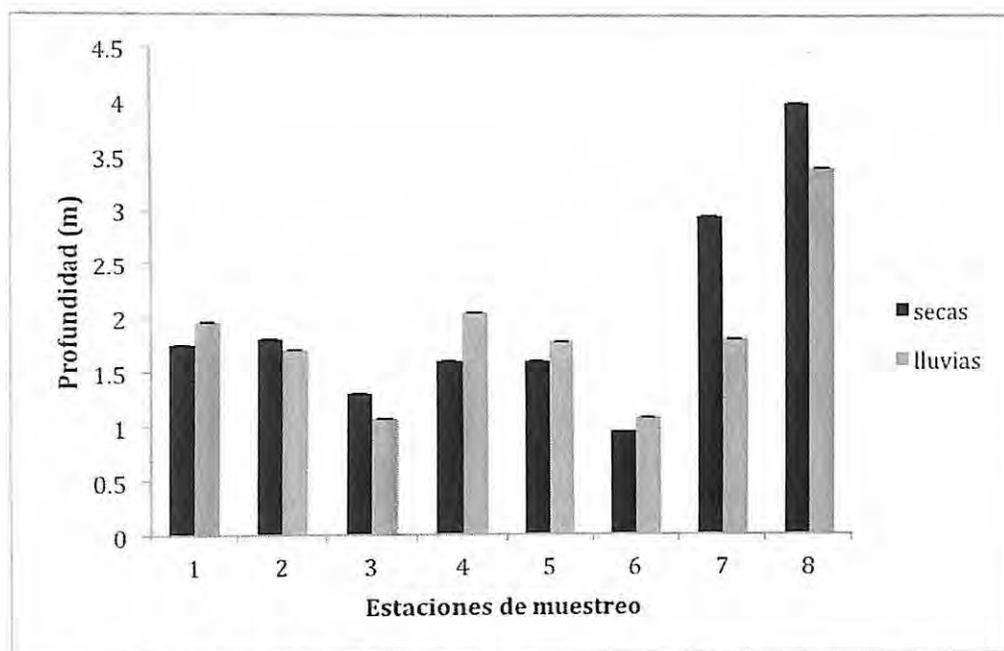


Fig. 16. Promedio de la profundidad por estación de muestreo y época climática.

Temperatura (°C)

El valor promedio de la temperatura fue de 29.98 ± 0.82 °C.

En la época de secas se observaron los niveles más altos en 7 estaciones (1-7), el máximo fue de 31.4 ± 0.0 °C en la estación 6. Se observó un mínimo de 29 ± 0.0 °C en 2 estaciones (1 y 8) durante las dos épocas climáticas (Fig. 17), de manera temporal se encontraron diferencias significativas ($H= 20.9$, $p<0.05$).

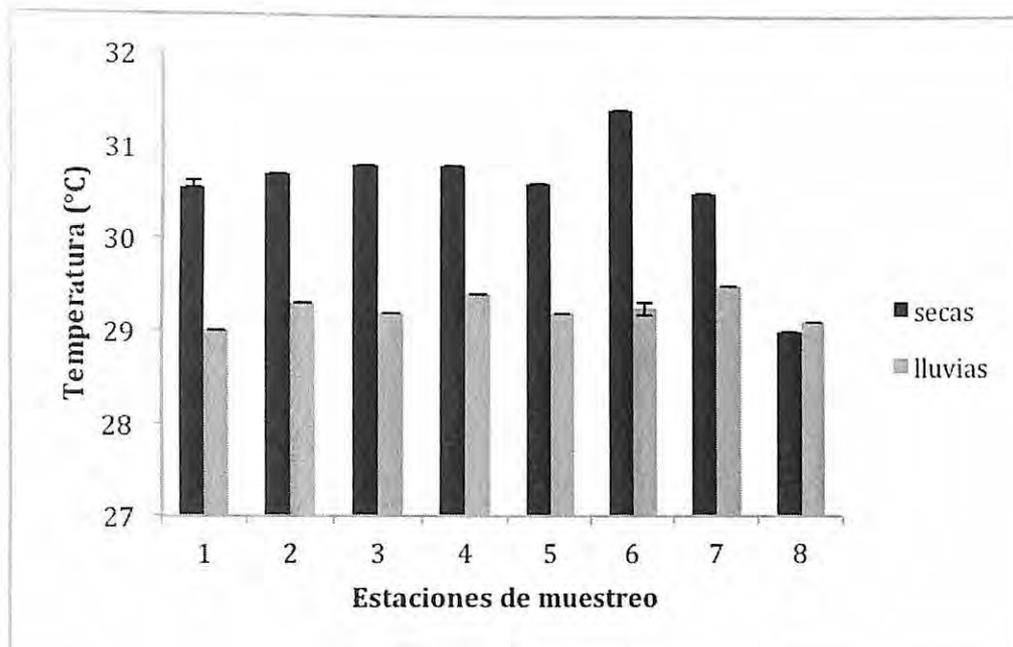


Fig. 17. Promedio de la temperatura del agua por estación de muestreo y época climática.

VARIABLES QUÍMICAS

Salinidad (u.p.s)

De manera general esta variable presentó valores promedio de 35.38 ± 1.45 u.p.s.

Durante la época de secas se encontraron los niveles más altos; 37.2 ± 0.0 u.p.s (estación 4) y 37.1 ± 0.0 u.p.s en las estaciones (1 y 2). Se observó un mínimo de 33.7 ± 0.0 u.p.s en la estación 1, durante la época de lluvias (Fig. 18); así mismo la prueba estadística mostró diferencias significativas a nivel temporal ($H= 35.77$, $p<0.05$).

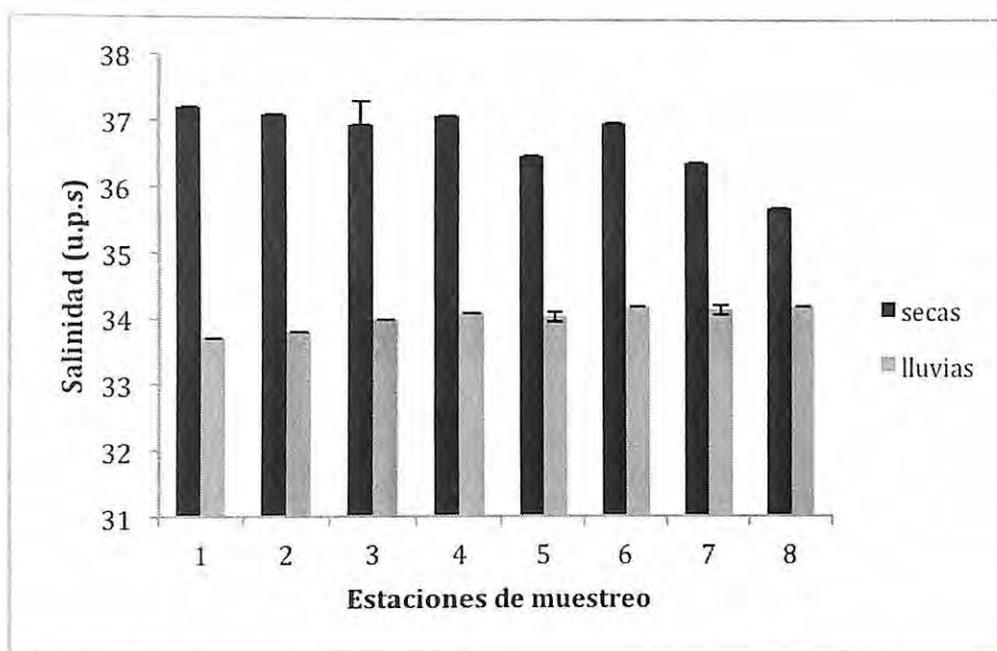


Fig. 18. Promedio de la salinidad del agua por estación de muestreo y época climática.

Conductividad (mS/cm)

La conductividad presentó en promedio valores de 57.43 ± 4.30 mS/cm.

Esta variable mostró un comportamiento similar al de la salinidad (Fig. 18); durante la época de secas se encontraron los niveles más altos $62.3.2 \pm 0.14$ mS/cm (estación 4), 62.2 ± 0.0 y 62.05 mS/cm en las estaciones 2, 1 respectivamente. Se observó un mínimo de 51.4 ± 0.0 mS/cm en la estación 1, durante la época de lluvias (Fig. 19).

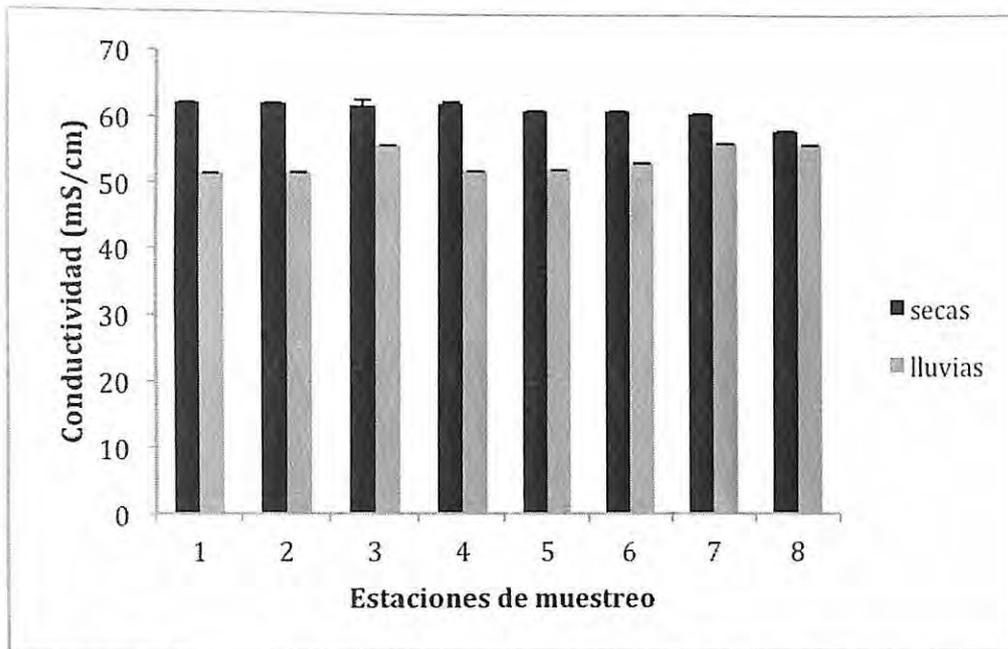


Fig. 19. Promedio de la conductividad del agua por estación de muestreo y época climática.

Oxígeno disuelto (mg/l)

Los valores de oxígeno disuelto presentaron un promedio general de 5.11 ± 1.78 mg/l.

De acuerdo a la distribución temporal el valor más alto (7.69 ± 0.007 mg/l), se registró en la estación 2. Valores similares también fueron encontrados en las estaciones 3-8. El valor más bajo (2.51 ± 0.0 mg/l) se registró en la estación 1, ambos valores se encontrarán durante la época de secas (Fig. 20). La prueba estadística mostró a nivel temporal, diferencias significativas ($H= 19.89$, $p<0.05$).

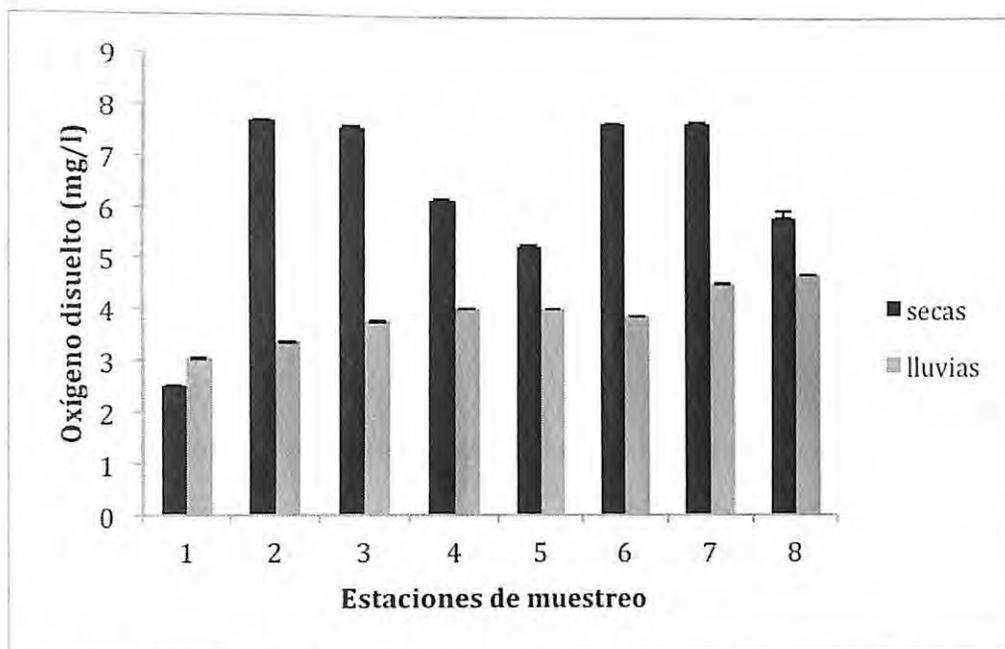


Fig. 20. Promedio de la concentración de oxígeno disuelto por estación de muestreo y época climática.

pH

De manera general el promedio del pH fue de 8.05 ± 0.12 .

Los valores más elevados (8.25 ± 0.01) se registraron en la estación 6. Valores similares se registraron en 2-5 y 7, 8. El valor más bajo (7.73 ± 0.0), se registró en la estación 1, en ambos casos (máximo y mínimo) se registró durante la época de secas (Fig. 21); sin embargo por época climática se encontraron diferencias significativas ($H=4.1$, $p<0.05$).

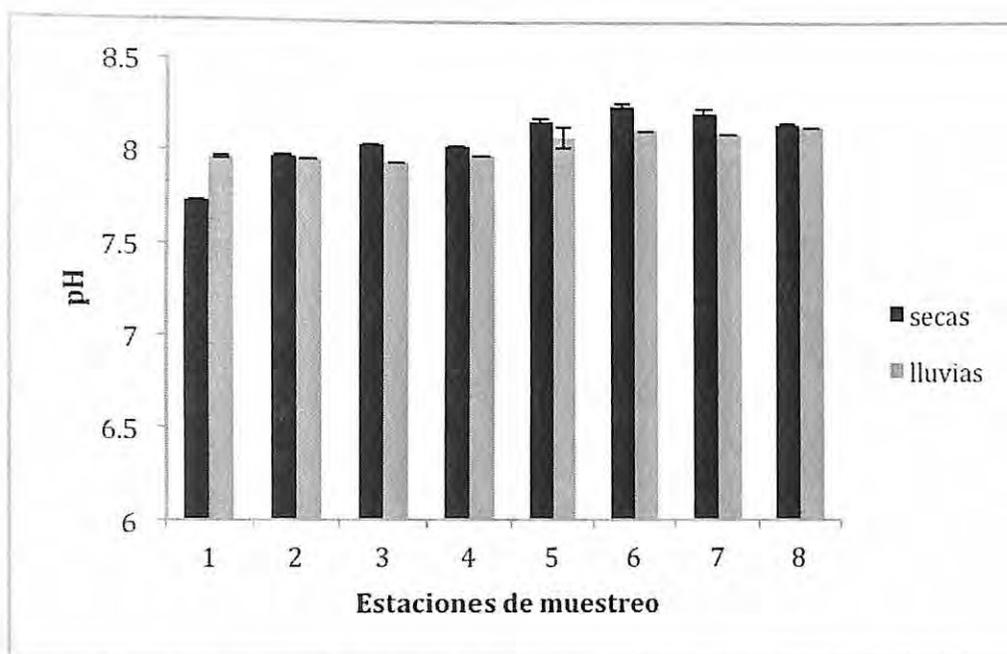


Fig. 21. Promedio del pH por estación de muestreo y época

Clorofila "a" (mg/m³)

La concentración de clorofila "a" presentó un promedio general de 0.17 ± 0.08 mg/m³.

Esta variable no mostró grandes oscilaciones a nivel temporal, su máxima concentración 0.34 ± 0.01 mg/m³ se encontró en la estación 2 durante la época de lluvias. El valor más bajo (0.06 ± 0.05 mg/m³) se presentó en la estación 1 durante la época de secas (Fig. 22), por época climática no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($H= 0.2, p>0.05$).

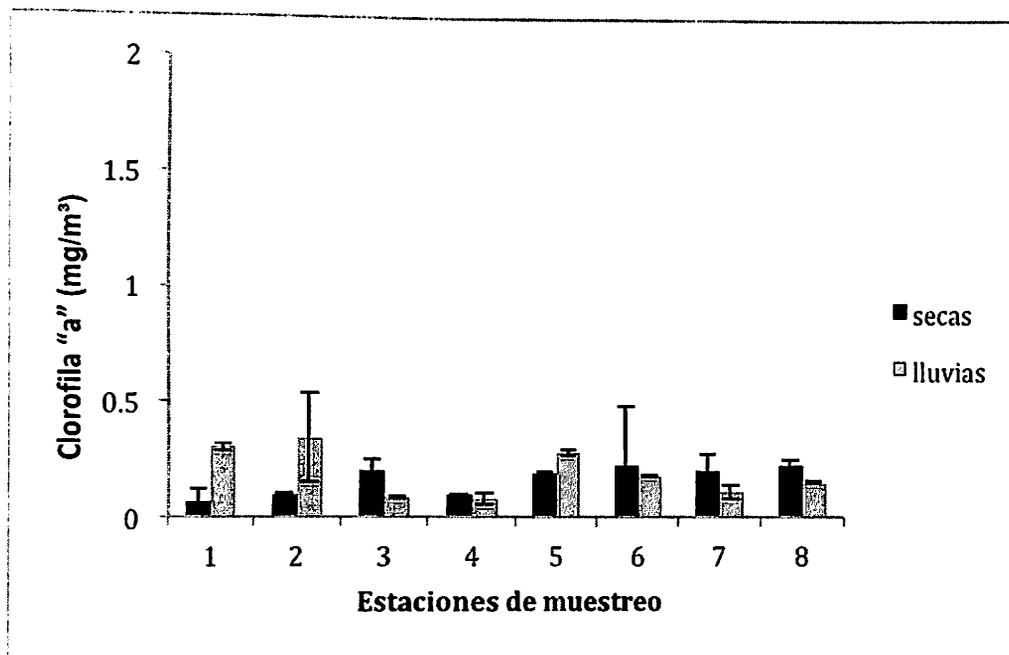


Fig. 22. Promedio de la concentración de clorofila "a" por estación de muestreo y época climática.

DQO (mg/l)

El promedio general de la DQO fue 2444.75 ± 351.09 mg/l.

Los niveles más altos de esta variable se encontraron en 3 estaciones (3, 6 y 8), con el máximo de 3220 ± 130.107 mg/l en la estación 3, durante la época de lluvias. Valores mínimos (2000 ± 0.0 mg/l) fueron encontrados en 3 estaciones de muestreo (4, 7 y 8) durante la época de secas (Fig. 23), el análisis estadístico mostró que si existen diferencias significativas entre temporadas ($F= 35.53$, $p<0.05$).

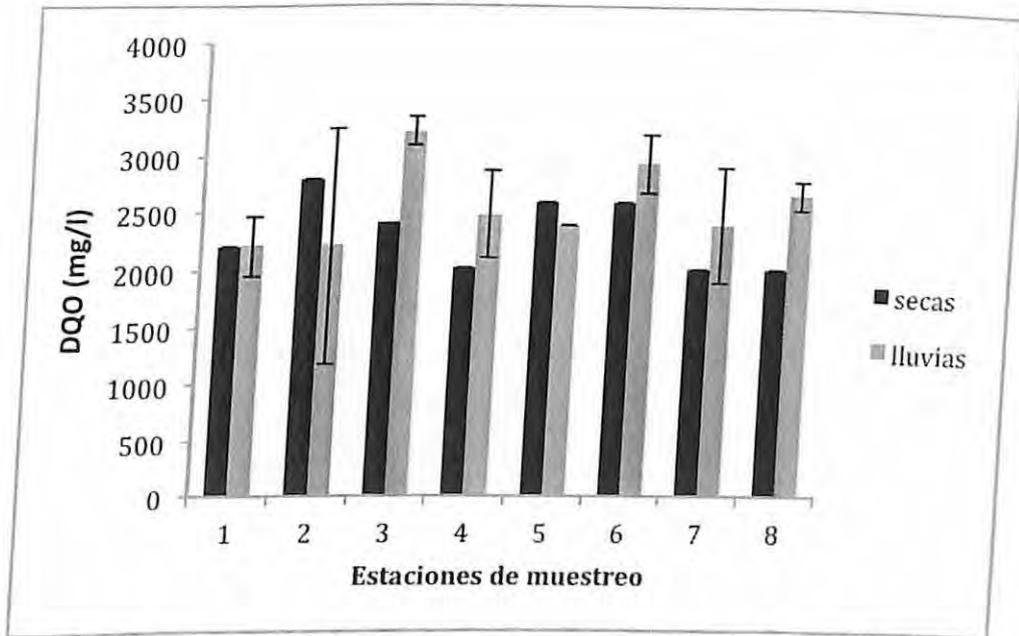


Fig. 23. Promedio de la DQO por estación de muestreo y época climática.

DBO₅ (mg/l)

El promedio general de esta variable fue de 3.26 ± 2.22 mg/l.

El valor más elevado (6.2 ± 0.28 mg/l) fue registrado en la estación 8, durante la época de lluvias. El valor más bajo (0.4 ± 0.0 mg/l) se registró en las estaciones 1 y 2, durante la época de secas (Fig. 24), la prueba estadística reveló diferencias significativas entre épocas ($H= 34.21$, $p<0.05$).

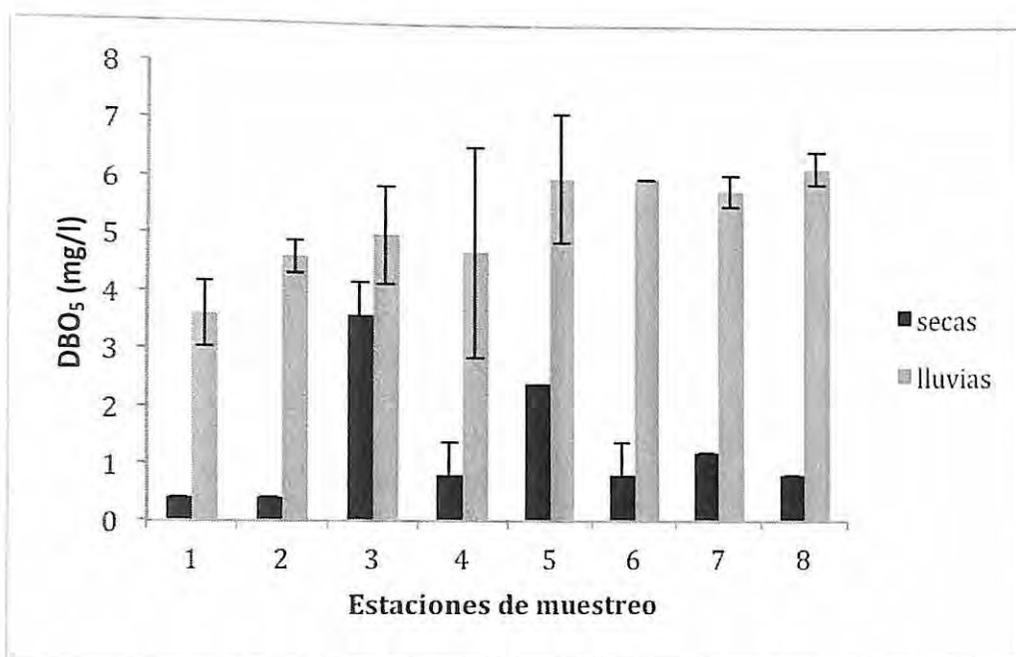


Fig. 24. Promedio de la DBO₅ por estación de muestreo y época climática.

Ortofosfatos ($\mu\text{M/l}$)

El promedio general de esta variable fue de $0.32 \pm 0.30 \mu\text{M/l}$.

El valor máximo de $0.68 \pm 0.0 \mu\text{M/l}$ se encontraron en dos estaciones (2 y 4) durante la época de secas. A nivel espacio-temporal se puede observar una marcada disminución en los valores de esta variable ($0.007 \pm 0.0 \mu\text{M/l}$) en 6 de los 8 sitios de muestreo (3-8) durante la época de lluvias (Fig. 25). La prueba estadística mostró diferencias significativas por época climática ($H= 37.75, p<0.05$).

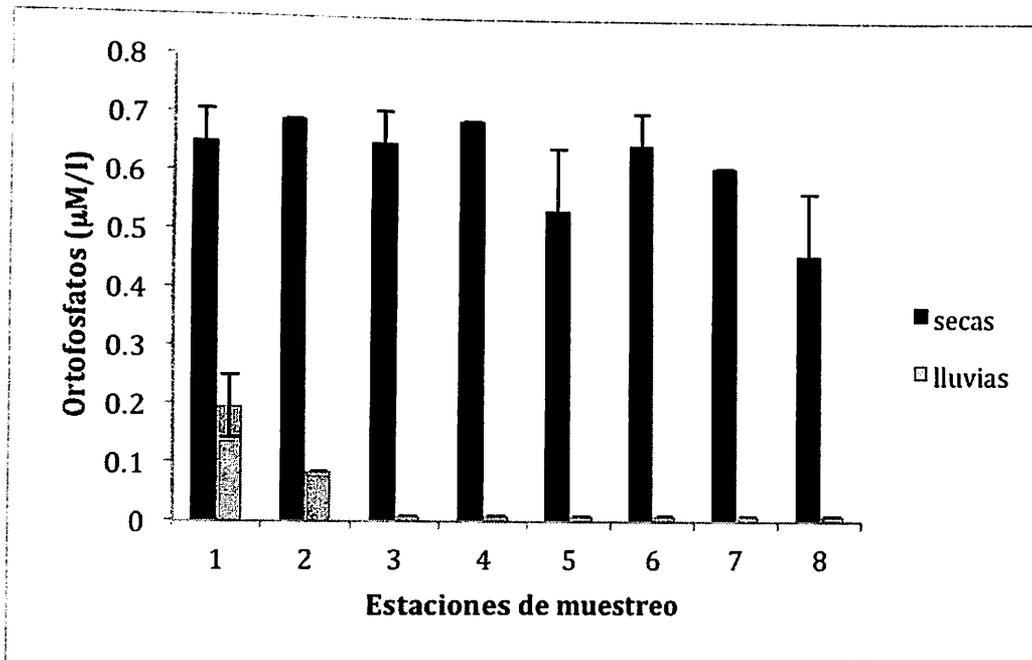


Fig. 25. Promedio de ortofosfatos por estación de muestreo y época climática.

Nitratos ($\mu\text{M/l}$)

El comportamiento del nitrato presentó un promedio general de $1.02 \pm 0.97 \mu\text{M/l}$.

El valor máximo de esta variable ($2.57 \pm 0.97 \mu\text{M/l}$) se encontró durante la época de lluvias, mientras que el valor mínimo ($0.23 \pm 0.14 \mu\text{M/l}$) se registró durante la época de secas, ambos valores fueron registrados en la estación 2. Por otro lado durante esta misma época se presentó ausencia nitratos en 6 estaciones de muestreo, (3-8) (Fig. 26). La prueba estadística mostró diferencias significativas entre épocas ($H=23.74$, $p<0.05$).

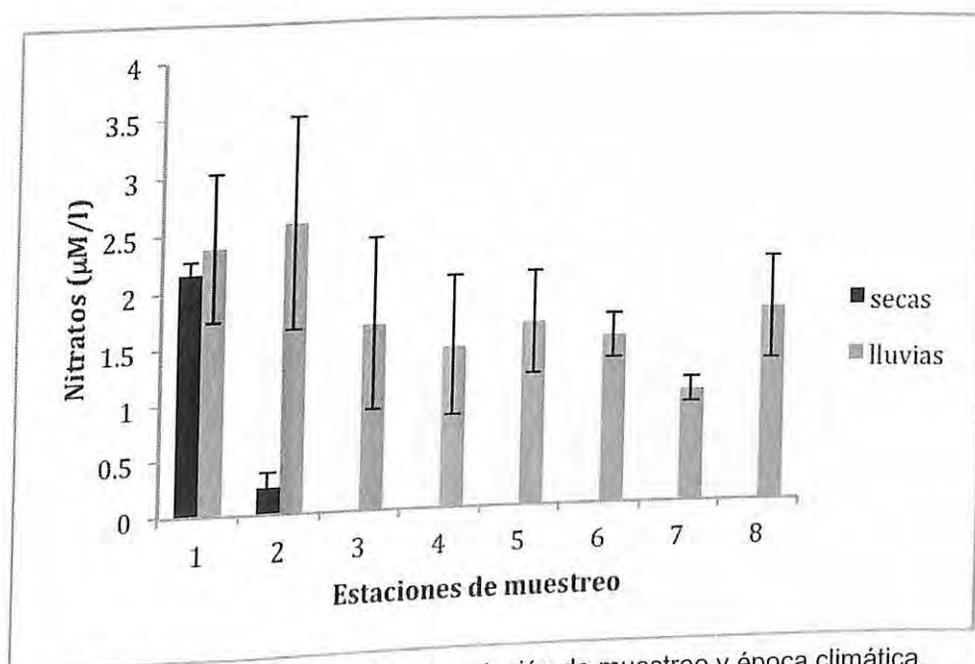


Fig. 26. Promedio de nitratos por estación de muestreo y época climática.

Nitritos ($\mu\text{M/l}$)

El comportamiento de los nitritos presentó un promedio general de $0.21 \pm 0.30 \mu\text{M/l}$.

El valor más alto de esta variable ($1.16 \pm 0.00 \mu\text{M/l}$) se encontró en la estación 1, durante la época de secas. A nivel espacio-temporal se puede observar una marcada disminución en los valores de esta variable en todos los sitios de muestreo, con un mínimo de ($0.003 \pm 0.00 \mu\text{M/l}$) en la estación 7, durante la época de lluvias (Fig. 27). Entre épocas climáticas se encontraron diferencias significativas ($H= 35.66$, $p<0.05$).



Fig. 27. Promedio de nitritos por estación de muestreo y época climática.

Silicatos ($\mu\text{M/l}$)

Esta variable presentó un promedio general a lo largo del estudio de $3.84 \pm 1.27 \mu\text{M/l}$.

Los valores más altos se encontraron en la época de lluvias, alcanzando un valor máximo de $6.30 \pm 0.55 \mu\text{M/l}$ en la estación 1. Los valores más bajos se reportaron en la época de secas, con un valor mínimo de $1.77 \pm 0.0 \mu\text{M/l}$, el cual se registró en la estación 6 (Fig. 28). De manera temporal la prueba estadística mostró diferencias significativas ($H= 21.56, p<0.05$).

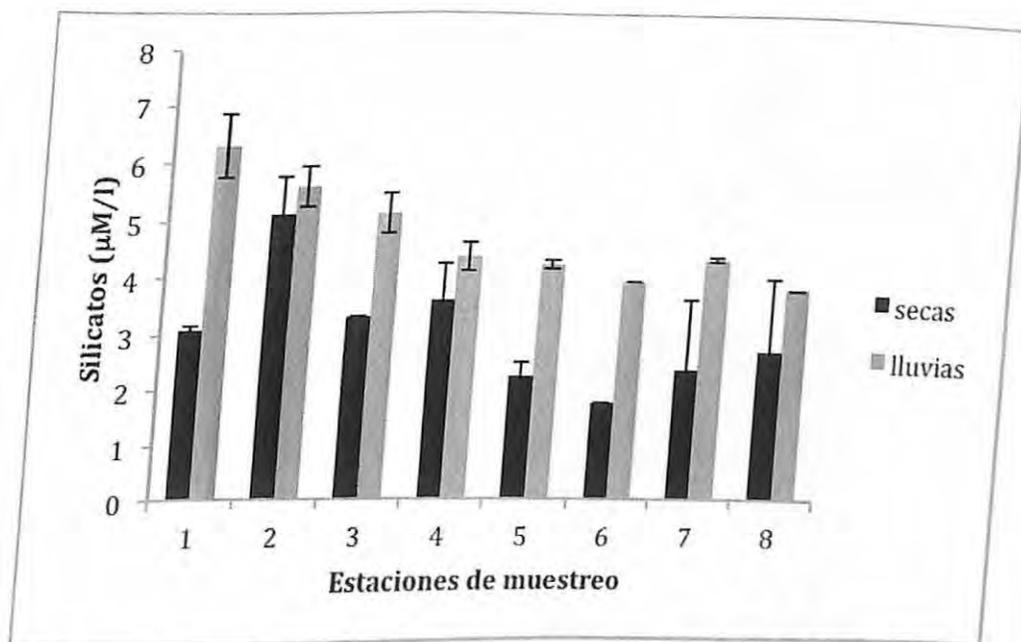


Fig. 28. Promedio de silicatos por estación de muestreo y época climática.

SITIOS DE MONITOREO

Después de aplicar el método estadístico Kruskal-Wallis, fue posible observar que en LC y LM la mayoría de las variables resultaron con diferencias significativas, por lo tanto se aplicó un análisis clúster que permitió sugerir sitios de monitoreo en función de los resultados de las variables físicas y químicas de manera temporal (secas y lluvias) para los sitios de estudio, así como también sugerir cuáles son las variables más informativas como indicadores de calidad del agua en las lagunas analizadas.

Laguna Colombia (secas)

De acuerdo con el análisis de conglomerados es posible observar dos principales grupos, los cuales agrupan puntos de muestreo en función de las semejanzas de las variables físicas y químicas durante secas; el primer grupo (I) conformado por las estaciones (5 y 6) y el segundo (II) por las estaciones (1-4, 7-9); la estación 10 se aísla del resto (Fig. 29).

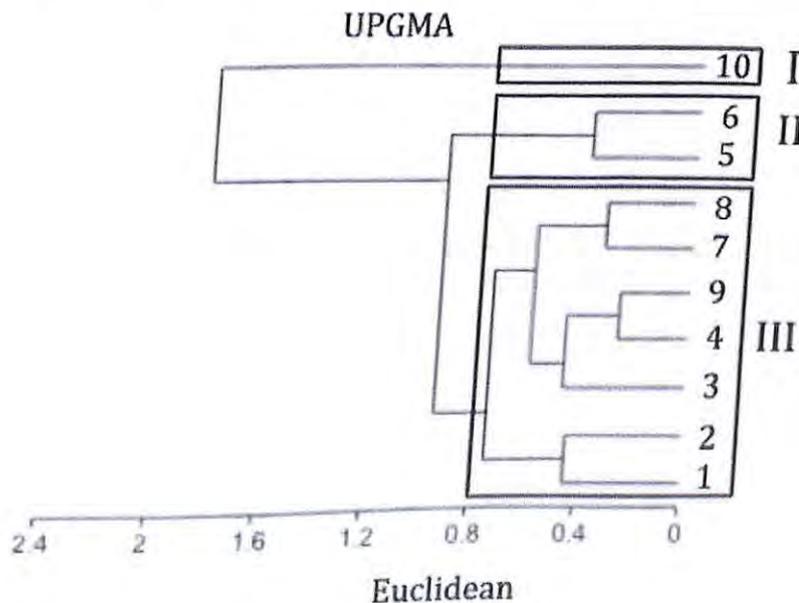


Fig. 29. Dendrograma de los sitios de muestreo sugeridos, de acuerdo al índice de distancia métrica Euclídeana y el algoritmo de agrupamiento UPGMA para la época de secas en la Laguna Colombia.

Laguna Colombia (lluvias)

De acuerdo con el análisis de conglomerados aplicado a las variables físicas y químicas de la Laguna Colombia durante la época de lluvias, fue posible identificar únicamente a dos grupos homogéneos; el primer grupo (I) conformado por las estaciones (5-9), el segundo grupo (II) por las estaciones (3 y 10); las estaciones 1, 2 y 4 se observan aisladas (Fig. 30).

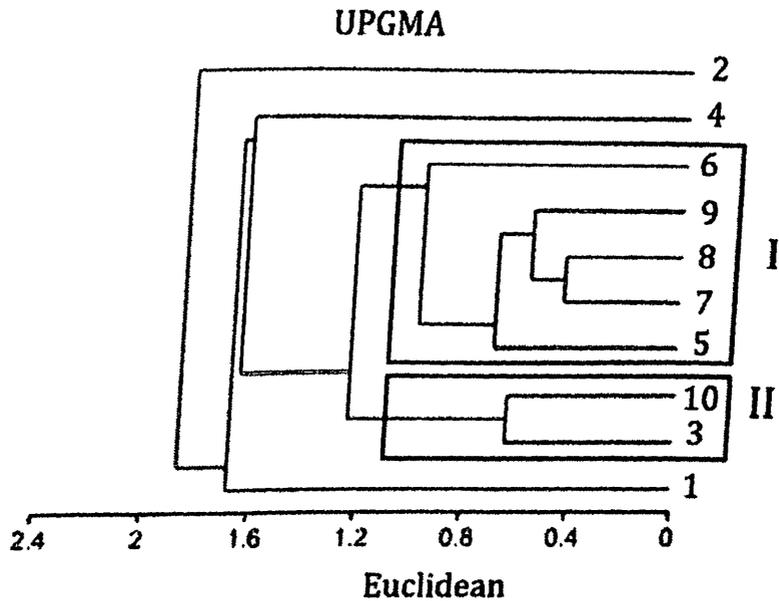


Fig. 30. Dendrograma de los sitios de muestreo sugeridos, de acuerdo al índice de distancia métrica Euclídeana y el algoritmo de agrupamiento UPGMA para la época de lluvias en la Laguna Colombia.

Laguna Macax (secas)

De acuerdo con el análisis de conglomerados aplicado a las variables físicas y químicas de la Laguna Macax durante la época de secas, nos sugiere considerar un grupo (I) de monitoreo de calidad del agua, conformado por las estaciones 3 a 8; mientras que las estaciones 1 y 2 están aisladas del resto (Fig. 31).

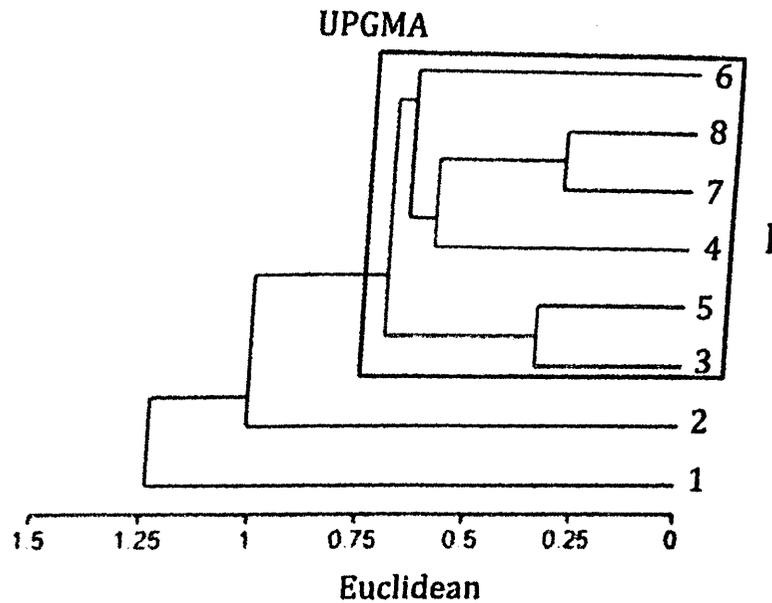


Fig. 31. Dendrograma de los sitios de muestreo sugeridos, de acuerdo al índice de distancia métrica Euclídeana y el algoritmo de agrupamiento UPGMA para la época de secas en la Laguna Macax.

Laguna Macax (lluvias)

De acuerdo con el análisis de conglomerados aplicado a las variables físicas y químicas de la Laguna Macax durante la época de lluvias se puede observar claramente dos grupos principales; el primer grupo (I) compuesto por las estaciones 3-8 y el segundo grupo (II) por las estaciones 1 y 2 (Fig. 32).

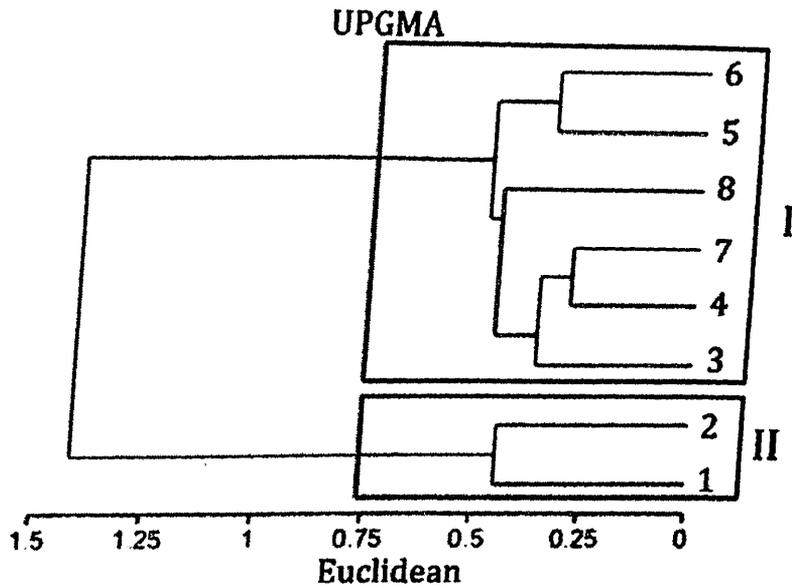


Fig. 32. Dendrograma de los sitios de muestreo sugeridos, de acuerdo al índice de distancia métrica Euclídeana y el algoritmo de agrupamiento UPGMA para la época de lluvias en la Laguna Macax.

DISCUSIÓN

Profundidad y transparencia (m)

En términos de profundidad la laguna Colombia (LC) y Laguna Macax (LM) pueden ser clasificadas como sistemas someros, como la mayoría de las lagunas costeras (Vergara-Sánchez, 2007) para el período de estudio, debido a su profundidad promedio, si bien se presentaron pequeñas oscilaciones entre épocas, estas no presentaron diferencias significativas, esto podría deberse a la alta evaporación que presenta la Península de Yucatán (Herrera-Silveira y Comín, 2000) así mismo los resultados de transparencia en las 2 épocas climáticas (secas y lluvias), en ambas lagunas las transparencias fueron totales dando como resultado un sistema con aguas claras y transparentes, dicho comportamiento puede estar relacionado con; 1) una baja producción primaria y 2) baja concentración de nutrientes. Dichas variables se abordarán y discutirán ampliamente más adelante.

Temperatura (°C)

Contreras-Espinoza (2001) menciona que en las lagunas costeras mexicanas sus temperaturas se consideran altas (30 °C en promedio en época de secas) y que esta variable actúa de forma interactiva con la salinidad. Expresamente en las figuras 4 y 17 de LC y LM respectivamente, se aprecian niveles elevados durante la época de secas y valores más bajos en lluvias, esto debido a que diversos factores, principalmente ambientales, propician que la temperatura del agua varíe continuamente (Barrenechea-Martel, 2004): durante la época de secas se presentó la mayor incidencia de calor en la región influenciando directamente en la temperatura del agua de las lagunas costeras, dando como resultado aguas cálidas.

De igual forma los gradientes térmicos reportados en los sistemas de estudio, difieren en comparación con lo reportado en sistemas lagunares del sur de Quintana Roo (38 -36 °C) (Avilés-Torres *et al.* 2001).

Salinidad (u.p.s) y conductividad (mS/cm)

La salinidad y la conductividad son dos variables que están estrechamente relacionadas, por lo que sus comportamientos se discutirán en términos de salinidad para fines de este trabajo, se presentaron variaciones estacionales estadísticamente

significativas en ambas lagunas, y se vio reflejado en un incremento de esta variable durante la época de secas. Este comportamiento se puede explicar debido a que en esta época se registró un aumento de temperatura, ocasionando la evaporación del sistema y por consiguiente un incremento en los niveles de salinidad, este fenómeno se reflejó en la LC durante la época de secas en la estación 10 donde se registró la mayor temperatura y el mayor nivel de salinidad, debido probablemente a la alta tasa de evapotranspiración del sistema o en su defecto a las intrusiones salinas del mismo (Anónimo, 1998) o como lo ha explicado antes Herrera-Silveira (1994) en la época de secas el agua de mar tiene mayor influencia en las lagunas costeras de Yucatán. Por otro lado en LM durante la época de lluvias se describe un pequeño aumento en orden de sur a norte (1-8), en el caso de las primeras estaciones posiblemente se deba a que existen descargas pluviales de aguas subterráneas que ocasionan mayor dilución del sistema, por otro lado las estaciones más cercanas a la boca resultaron ligeramente más salinas debido a la cercanía y el flujo del agua de mar, por lo consiguiente el monitoreo de esta variable tiene importantes implicaciones en el manejo de los ecosistemas costeros, puesto que es el reflejo de la importancia relativa de cada uno de los controles y el nivel de conectividad entre ecosistemas (Herrera-Silveira, 2006). Por lo tanto se puede caracterizar a LM como una laguna eurihalina por presentar valores de salinidad entre 30 a 40 ups y a LC como eurihalina en lluvias e hiperhalina (>40 ups) en secas.

Oxígeno disuelto (mg/l)

La presencia de oxígeno disuelto en el agua depende de la temperatura, la presión y la mineralización de la misma, su comportamiento natural sugiere que guarda una relación directamente proporcional a la presión parcial e inversamente proporcional a la temperatura (Barrenechea-Martel, 2004). En este sentido en las lagunas costeras estudiadas este fenómeno físico no explica el comportamiento estacional de esta variable; en la época de secas se registraron los valores más bajos y en lluvias (época más fría) se registraron los niveles más altos.

En el presente estudio LC y LM presentaron aguas bien oxigenadas de acuerdo a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89), para la protección de la vida acuática en áreas costeras, el cual establece que el nivel mínimo es 5 mg/l (Anónimo, 1989), por lo que en ningún caso se reportaron sitios con anoxia, con diferencias significativas a nivel temporal. Posiblemente la elevada concentración de oxígeno disuelto en ambas lagunas esté asociada a un intercambio a nivel espacial del

sistema, con influencia directa del mar a través de la bocana de cada laguna, provocado por la acción del viento, en el caso de LC y por el oleaje constante de las embarcaciones en LM, de igual manera si se toma como referencia que en la zona costera del Mar Caribe se han reportado valores promedio anual de 5.2 mg/l (Álvarez-Cadena, 2007), muy similares a los de LC (5.82 ± 1.13 mg/l) y LM (5.11 ± 1.78 mg/l), por lo que los datos aquí expuestos pueden considerarse normales.

pH

De manera normal en la zona eufótica (zona donde se realiza la fotosíntesis) la radiación solar calienta el agua y se facilita la utilización del CO_2 en el proceso de fotosíntesis para aumentar el pH (Hernández-Ayón *et al.*, 2003), lo que se conoce como una relación positiva entre la temperatura y el pH (Castillo-Rodríguez y Carrillo-Ramírez, 2004), sin embargo esta generalidad no se presentó en las lagunas estudiadas, por lo que dichos resultados pueden estar mayormente asociados a las características de los sistemas costeros de regiones con suelos cársticos (Herrera-Silveira, 1996a) dando como resultado valores casi homogéneos por época climática en ambas lagunas costeras y cercanos a la alcalinidad. A nivel temporal los valores de pH presentaron diferencias significativas tanto en LC como en LM, por lo que los

De acuerdo a estos resultados se puede asumir que los niveles de pH son muy estables, por lo que un monitoreo permanente de esta variable permitirá determinar cambios en función del tiempo, teniendo en cuenta que las mediciones siempre deben realizarse *in situ*, ya que esta variable puede presentar cambios debido a procesos químicos o de temperatura.

Clorofila "a" (mg/m³)

La productividad primaria de un ecosistema se puede estimar al medir la concentración de clorofila "a", esta variable es una de las principales indicadores de la presencia de organismos fotosintéticos y por lo tanto de su calidad (Buenfil-Friedman, 2009).

No se reportaron diferencias significativas de acuerdo a las concentraciones de clorofila "a" durante el periodo de estudio, LC y LM pueden clasificarse como sistemas oligotróficos, debido a que sus valores se encontraron dentro de los rangos 0 a 2.60 mg/m³ de acuerdo con Contreras-Espinoza *et al.* (1994) para lagunas costeras

mexicanas.

Es por ello que estos datos de la concentración de clorofila "a" deben considerarse como un antecedente para posibles planes de monitoreo y se ha demostrado ser buen indicador para la evaluación de la calidad de las aguas y el control de la eutrofización.

DQO (mg/l) y DBO₅ (mg/l)

Tanto la DQO y DBO₅ son ampliamente empleados como parámetros indicadores de contaminación orgánica aplicables tanto en aguas residuales industriales como en aguas superficiales y municipales, en ambientes residuales la DQO suele ser mayor a su correspondiente DBO₅, este fenómeno puede apreciarse en ambas lagunas costeras adjudicándosele a que existe un mayor número de compuestos cuya oxidación tiene lugar por vía química frente a los que se oxidan por vía biológica (Cuba-Terán, 2004).

Referente al DQO y específicamente en la laguna Colombia durante la época de secas las estaciones 1-4 y 7-10 podrían considerarse como aguas que no exceden el límite máximo permisible (concentraciones de DQO ≤ 10 mg/l), salvo las estaciones 6 y 7 se describen como de buena calidad; aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable ($10 < \text{DQO} \leq 20$ mg/l), sin embargo en la época de lluvias las estaciones 1 y 2 resultaron dentro de la escala de contaminados ($40 < \text{DQO} \leq 200$ mg/l) y el resto de las estaciones 3-10 se experimentaron valores muy por encima de lo que se considera fuertemente contaminado (concentraciones de DQO > 200 mg/l) probablemente por estar asociados a un fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales (CNA, 2010), este mismo fenómeno se experimento en la LM, pero durante las dos épocas climáticas de estudio, por lo que bajo esta variable caracterizó al sistema como fuertemente contaminado, sería pertinente determinar si estos valores reportados son característicos de la región en lagunas costeras ya que los datos son muy similares a lo que reportaron Torres-Alvarado y Calva-Benítez (2007) donde describen que es posible encontrar incrementos de la DQO en la época de lluvias (en lagunas costeras y arrecifes) con valores que superan en varios ordenes de magnitud (300–800 mg/l aprox.) en comparación a lo determinado para la zona litoral del los arrecifes (1.2–7 mg/l aprox.) pudiéndose deber a la descarga de aguas residuales, característicos de ambientes con alto crecimiento poblacional y gran afluencia turística,

como sería el caso de los importantes polos turísticos con los que cuenta el Estado de Quintana Roo.

De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua ambas lagunas presentan aguas con buena calidad para la variable DBO_5 por lo que la predominancia de esta se debe a que en estos sistemas están influenciados por una de baja contenido de materia orgánica biodegradable, salvo en la LM en su estación 8 presentó valores ($6 < DBO_5 \leq 30$) pegados a la caracterización de "aceptable", lo que indica cierta contaminación, proveniente de aguas superficiales posiblemente provenientes del mar debido a su cercanía a la bocana o de algunas descargas de aguas residuales, de origen municipal y no municipal sin llegar a ser datos alarmantes ya que con estos valores un sistema tiene la capacidad de autodepuración (Anónimo, 2010).

Ortofosfatos ($\mu M/l$)

En general los escurrimientos continentales aportan fósforo en tres formas principales: fósforo orgánico disuelto, materia orgánica particulada y ortofosfatos disueltos (fosfatos) (Valdés-Lozano, 1996). En las lagunas costeras en condiciones normales mantienen niveles bajos de esta variable pero suficientes y de rápida redistribución para que los organismos lo aprovechen (De La Lanza-Espino y Gómez, 1999).

En ambas lagunas los niveles de esta variable presentaron valores superiores al máximo permisible de acuerdo a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, para la protección de la vida acuática en áreas costeras ($0.002 \mu M$) (Anónimo, 1989), la razón normalmente esta asociada a los efectos de escurrimientos terrestres, como se ha demostrado por De La Lanza-Espino (2006) en la costa del Caribe Mexicano, donde se detectaron concentraciones normales desde lo indetectable ($0.0 \mu M$) hasta $2.2-3.0 \mu M$, otra explicación de la existencia de fuentes importantes de fosfatos en las aguas superficiales normalmente se debe a las descargas de aguas que contienen como residuo detergentes comerciales (Barrenechea-Martel, 2004), relacionado también con descargas de aguas subterráneas (Herrera-Silveira *et al.* 1998)

Nitratos ($\mu M/l$) y Nitritos ($\mu M/l$)

Los nutrientes inorgánicos nitratos y nitritos son dos de las formas inorgánicas en las que se puede encontrar al nitrógeno (Carriquiry-Beltrán, 2010), la importancia de

ellos radica en que son como nutrientes limitantes en los ambientes acuáticos para el desarrollo de los animales y plantas acuáticas (Barrenechea-Martel, 2004) sin embargo concentraciones elevadas de nitrato pueden ser responsables de la eutrofización de un sistema, en este mismo sentido el nitrito a altas concentraciones puede ser considerado como tóxico para la vida acuática (Herrera-Silveira, 2008).

En los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua para protección de la vida acuática en áreas costeras refiere a los nitratos con un máximo permisible de 0.04 $\mu\text{M/l}$ por lo que de manera general bajo esta variable en ambas lagunas la mayoría de las estaciones se encontraron por encima del máximo permisible, salvo en LM durante secas; 3-8 (valores indetectables). Al igual que los nitratos, las concentraciones de los nitritos excedieron los valores máximos permisibles (0.04 $\mu\text{M/l}$) sugeridos por los CE-CCA-001/89, valores similares se han reportado en ambientes marinos y continentales (Solidaridad, Quintana Roo), con oscilaciones de nitritos entre 0 $\mu\text{M/l}$ (indetectables) hasta 1.0 $\mu\text{M/l}$ (De La Lanza, 2006).

Por otro lado los aumentos en las concentraciones de los nutrimentos no concuerdan con las bajas concentraciones de clorofila "a" ni mucho menos con la presencia de aguas claras y transparentes para ambas lagunas y épocas climáticas.

Silicatos ($\mu\text{M/l}$)

Los silicatos son considerados nutrientes para el desarrollo del fitoplancton, específicamente para las diatomeas, en la Península de Yucatán es utilizado como un buen indicador de descargas de aguas subterráneas en la costa (Herrera-Silveira, 2008), además de que se ha demostrado que es característico de las zonas kársticas (Álvarez-Góngora y Herrera-Silveira, 2005)

Los silicatos se comportaron de forma similar a los nitritos; sin diferencias significativas en LC y con diferencias significativas en LM. Para ambos casos y para la Península de Yucatán por su naturaleza kárstica contiene aportaciones de agua dulce proveniente de su formación subterránea, fuente principal del aporte de silicatos (Medina-Gómez y Herrera-Silveira, 2003). En lo que respecta la Laguna Macax, el comportamiento entre épocas climáticas presentó una relación inversa con la salinidad; a menor concentración de salinidad provocado por las descargas de aguas subterráneas de la región en la época de lluvias es consecuencia de mayor aporte de

nutrientes (silicatos) y viceversa, tanto en LC como en LM, los valores se encuentran muy por debajo de lo reportado en lagunas costeras de la Península de Yucatán (Álvarez-Góngora y Herrera-Silveira, 2005), o como el caso, Laguna Bojorquez de la parte norte de Quintana Roo, donde se han reportado valores hasta de 18.67 $\mu\text{M/l}$ (Valdés-Lozano *et al.* 2006), salvo el caso de LC en la estación 10 donde se reporto un máximo durante la época de secas que podría considerarse atípico dentro de la muestra de datos.

SITIOS DE MONITOREO

Laguna Colombia (secas)

Para ésta época climática se proponen tres áreas de monitoreo de la calidad del agua, en función de los resultados expuestos en el dendrograma (Fig. 29).

Se sugiere que el primer punto de monitoreo sea la estación 10 (canal angosto de conexión entre Laguna Colombia y Laguna Chunchacaab), donde se registran concentraciones elevadas de silicatos (37.5 $\mu\text{M/l}$); baja DBO_5 (0.6 mg/l) y DQO (2.1 mg/l) y baja concentración de ortofosfatos (0.04 $\mu\text{M/l}$) y nitratos (0.11 $\mu\text{M/l}$); así como una concentración de clorofila "a" oscilante entre 0.23 mg/m³.

La segunda área de monitoreo estaría comprendida en la región oeste del sistema (estaciones 5 y 6), que se caracteriza por presentar una región de conexión entre la laguna y el mar, a través de un canal angosto (20 a 30 m de ancho). En esta área se registraron las concentraciones de silicatos (2.5-2.6 $\mu\text{M/l}$) y nitratos (0.17-0.31 $\mu\text{M/l}$) más bajas durante secas, con una tendencia de mayor DBO_5 (5.2-5.6 mg/l) y una concentración intermedia de ortofosfatos (0.38-0.46 $\mu\text{M/l}$), así como una elevada DQO (10.3-11.2 mg/l) en comparación con el resto de la laguna.

La tercer área de monitoreo estaría comprendida desde la región centro, hacia el este del sistema (estaciones 1-4, 7-9) con concentraciones intermedias de silicatos (3.6-7.5 $\mu\text{M/l}$), una DBO_5 intermedia (2.1-5.8 mg/l), una concentración de ortofosfatos oscilante entre 0.31 a 0.53 $\mu\text{M/l}$, una DQO intermedia (4.1 a 8.4 mg/l) y una concentración de nitratos más alta en comparación con el resto del sistema (0.2-0.9 $\mu\text{M/l}$). En esta región la concentración de clorofila "a" osciló entre 0.09 a 0.79 mg/m³, en promedio durante secas.

Laguna Colombia (lluvias)

El análisis de agrupamiento nos sugiere que, con las variables consideradas, durante lluvias la laguna se comporta de una manera más diferencial (Fig. 30), con una regionalización poco clara dentro del sistema.

Debido a lo anterior se sugiere que durante lluvias se implementen dos áreas y tres puntos aislados para el monitoreo de la calidad del agua en el sistema.

La primer área para monitoreo, estaría comprendida de las estaciones 5 a 9, que corresponden al este y oeste del sistema, donde se presentaron concentraciones de nitratos de 0.01 a 0.35 $\mu\text{M/l}$, ortofosfatos de 0.08 a 0.46 $\mu\text{M/l}$, DBO_5 de 2.0 a 2.6 mg/l , DQO de 920 a 3128 mg/l y clorofila "a" de 0.18 a 0.47 mg/m^3 .

En el grupo formado por las estaciones 3 y 10 (extremos sureste y norte de la laguna) se registraron concentraciones de nitratos más altas que en el grupo anterior (0.9-1.18 $\mu\text{M/l}$). Estos extremos geográficos de la laguna se sugieren como la segunda área para el monitoreo de calidad del agua del sistema, donde además las concentraciones ortofosfatos oscilaron entre (0.08-1.12 $\mu\text{M/l}$) y clorofila "a" (0.41-0.63 mg/m^3); así como la DBO_5 (1.2-1.6 mg/l) y la DQO (1472-2760 mg/l) tienden a ser menores que las registradas en el grupo anterior.

Puntos aislados lo constituyen las estaciones 1, 2 y 4, donde las variables se manifestaron como de transición entre las áreas este y oeste del sistema.

Laguna Macax (secas)

Durante esta época se observó un cambio gradual de las variables analizadas, bajo la influencia de la bocana amplia que comunica al sistema lagunar con el mar (Fig. 2), esta laguna se caracteriza por contar con un eje principal con dirección sureste-noroeste y el mencionado canal de comunicación cuenta con aproximadamente 600 m de longitud, con 80 a 100 m de ancho.

Durante secas, fue posible detectar un incremento gradual de sureste a noroeste en la DBO_5 (de 0.4 hasta 3.6 mg/l), concentración de clorofila (de 0.06 a 0.2 mg/l), pH (de 7.7 a 8.2) y en la concentración de oxígeno disuelto (de 3.0 a 4.7 mg/l). Mientras que en la misma dirección se observó un decremento gradual en la

concentración de nitritos (1.1 a 0.2 $\mu\text{M/l}$), silicatos (5.1 a 1.7 $\mu\text{M/l}$) y nitratos (de 2.1 a 0 $\mu\text{M/l}$).

Por lo tanto se sugiere que durante secas, se establezca un área de monitoreo de calidad del agua; desde la región centro (estaciones 3 a 5) hasta la región noroeste del sistema (estaciones 6, 7 u 8), estaciones aisladas la sección extremo sureste de la laguna (1 ó 2). (Fig. 31).

Laguna Macax (lluvias)

El comportamiento es semejante al descrito anteriormente; se observó una disminución gradual de sureste a noroeste en la concentración de nitritos y nitratos.

Sin embargo durante lluvias se encontraron discontinuidades en dos áreas de la laguna, debido a la concentración de ortofosfatos, que fue variable entre 0.08 a 0.19 $\mu\text{M/l}$ en las estaciones 1 y 2 y constante (0.007 $\mu\text{M/l}$) en las estaciones 3 a 8.

Por otro lado la concentración de clorofila "a" fue mayor en las estaciones 1 y 2 (0.3-0.34 mg/cm^3), en comparación con la registrada en las estaciones 3 a 8 (oscilante entre 0.08 a 0.2 mg/cm^3).

Debido a lo anterior, se sugiere establecer dos puntos de monitoreo de calidad del agua en Laguna Macax durante lluvias; uno al extremo sureste del sistema (estaciones 1 ó 2) y el segundo considerando cualquier punto desde el centro hacia el extremo noroeste de la laguna (estaciones 3 a 8) (Fig. 32).

Para la determinación de los sitios de monitoreo se tomaron en cuenta los resultados obtenidos de todas las variables estudiadas, sin embargo algunas variables resultaron ser mejores indicadores de calidad del agua para dichos sistemas; la temperatura, transparencia, oxígeno disuelto, pH, clorofila "a", ortofosfatos y silicatos.

CONCLUSIONES

A nivel temporal ambas lagunas demostraron diferencias significativas en la mayoría sus variables (10 de las 14 estudiadas), por lo que queda evidenciada la dinámica ambiental de estos sistemas en función del tiempo.

Debido a los anterior es indispensable tomar en cuenta ambas épocas climáticas para un monitoreo de calidad del agua en ambas lagunas.

De acuerdo a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, las variables nitratos, nitritos y ortofosfatos, excedieron los niveles máximos permisibles para la protección de la vida acuática y solamente el oxígeno disuelto se encuentra dentro del rango de aceptable bajo este criterio.

Sin embargo es recomendable tomar con cautela dichas aseveraciones ya que no se reflejan signos de eutrofización en estos ambientes, por lo que es conveniente auxiliarse de otras variables como la concentración clorofila "a" o la transparencia, lo cual permitiría caracterizar mejor a estos sistemas debido a estrecha relación que existe entre la concentración de nutrientes y la clorofila a en los ambientes acuáticos.

De acuerdo a los Criterios de Calidad del Agua de Comisión Nacional del Agua, la DQO permitió caracterizar a los sistemas en diferentes criterios: con calidad del agua excelente en secas y contaminada en lluvias para Laguna Colombia, hasta fuertemente contaminadas para la Laguna Macax en ambas épocas climáticas.

Para la DBO₅ los resultados pueden considerarse característico de un sistema con buena calidad del agua, de acuerdo a los criterios arriba mencionados.

Los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua para la protección de la vida acuática en áreas costeras (CE-CCA-001/89) y los criterios de Calidad del Agua de Comisión Nacional del Agua para la evaluación de la calidad del agua, no se pueden aplicar con certeza en parte por qué dichos criterios fueron elaborados para evaluar la calidad del agua residual y no contemplan otras variables útiles para evaluar la calidad del agua (por ejemplo, la clorofila a y la salinidad). Por lo tanto, es recomendable que se actualicen o modifiquen dichos criterios en función de las características geográficas regionales e incluso locales, con el fin de no generalizar el comportamiento de los sistemas acuáticos costeros del país.

Fue posible sugerir sitios de monitoreo representativos por laguna costera y época climática en función de las variables que describieron un mejor comportamiento de los sistemas lagunares de manera temporal y espacial, lo cual permitirá la implementación de un plan de monitoreo para detectar la existencia de una posible afectación en el estado de salud de los sistemas estudiados.

Se recomienda tomar en cuenta las siguientes variables; la temperatura, transparencia, oxígeno disuelto, pH, clorofila "a", ortofosfatos y silicatos ya que resultaron ser buenas indicadores de calidad del agua dentro de las lagunas estudiadas.

Los resultados que se obtuvieron en esta investigación pueden tomarse como referencia para un estudio posterior que describa el comportamiento hidrológico de ambos sistemas. Un monitoreo permanente de dichas variables podría predecir o alertar el comportamiento de estos ambientes influenciados por las actividades humanas y turísticas, además que contribuye con información para poder determinar acciones de manejo, conservación y/o aprovechamiento de lagunas insulares del estado de Quintana Roo ya en la mayoría de estos ecosistemas, dicha información es escasa o fragmentada.

LITERATURA CITADA

- Anónimo. 2001a. NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas- Método de prueba (cancela a la NMX-AA-028-1981). 24p.
- Anónimo. 2001b. NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-030-1981). 23 p.
- Anónimo. 2001c. NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis de aguas – determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas – método de prueba (cancela la NMX-AA-079-1986).
- Anónimo. 2010. Situación de los recursos hídricos. En: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Capitulo_2.pdf Consultado: 10/junio2011.
- Anónimo. 1989. Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (D.O.F. 13 Diciembre 1989).
- Anónimo. 1998. Programa de Manejo Parque Marino Nacional Arrecifes de Cozumel, Quintana Roo. Quintana Roo, México. Instituto Nacional de Ecología. 161 p.
- Anónimo. 2007. Programa Rector de Desarrollo Costero del Estado de Quintana Roo. 86 p.
- Anónimo. 2008. Modificación del Programa de Conservación y Manejo del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc.
- A.P.H.A. 1986. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, D.C., United State of America. 16 th ed. American Public Health Association. 1527p.
- Álvarez-Cadena, J., Ordóñez-López, U., Almaral-Mendivil, A., M. Ornelas-Roa y A. Uicab-Sabido. 2007. Larvas de peces del litoral arrecifal del norte de Quintana

- Roo, México. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica Puerto Morelos. 139-150 p.
- Álvarez-Góngora, C. y J. Herrera-Silveira. 2005. Variations of phytoplankton community structure related to water quality trends in a tropical karstic coastal zone. Mérida, Yucatán, México. 13 p.
- Arreola-Lizárraga, J. 2009. Propuesta de Manejo para Tres Lagunas Costeras Prioritarias del Noreste de México. Guaymas, Sonora. 104p.
- Avilés-Torres, T., J.J. Schmitter-Soto y R. Barrientos-Medina. 2001. Patrones espaciales de la riqueza de peces en lagunas costeras del sur de Quintana roo, México. Universidad Autónoma Metropolitana- Iztapalapa Distrito Federal, México. 141-148 p.
- Azcorra-Esquivel, J. 1997. Experiencia laboral como trabajador de la federación periodo 1992-1996. Universidad Autónoma Metropolitana. División de ciencias biológicas y de la salud. 75p.
- Barrenechea-Martel, A. 2004. Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua, in: Vargas. L. Tratamiento de agua para consumo humano.
- Buenfil-Friedman, J. 2009. Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales del Golfo de México. Secretaría de Medio Ambiente y Ecología. Volumen I. México, D. F. 376 p.
- Carrquiry-Beltrán, J. 2010. Monitoreo del bentos, nutrientes e isótopos en relación a la salud arrecifal de áreas naturales protegidas del norte de Quintana Roo con mayor vulnerabilidad al cambio de fase arrecifal. Ensenada, BC, México. 48 p.
- Cervantes, M. 2007. Conceptos fundamentales sobre ecosistemas acuáticos y su estado en México. Conservation International, México, A.C. 31p. En Sánchez, O., M. Herzing., E. Peters., R. Márquez y L. Zambrano. 2007. Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales. México. D. F. 293p.

- Castillo-Rodríguez, I y Carrillo-Ramírez, A. 2004. Diagnóstico sobre la situación que guarda la bahía de Chetumal debido al impacto ocasionado por las descargas de las aguas residuales y pluviales.
- Cuba-Terán, F. 2004. Tratamiento de Aguas Residuales. Capacitación para la EPSA Boliviana. No. 17. pp 155.
- CONABIO. 2006. Capital natural y bienestar social. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Contreras-Espinoza, F. 2001. Caracterización de lagunas costeras mexicanas a través de variables ecológicas seleccionadas. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma Metropolitana. 110 p.
- Contreras-Espinoza, F. y O. Castañeda. 2004. La biodiversidad de las lagunas costeras. Universidad Autónoma de México Distrito Federal, México. 46-56 p.
- Contreras-Espinoza, F., O. Castañeda-López y A. García-Nagaya. 1994. La clorofila a como base para un índice trófico en las lagunas costeras mexicana. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*. Universidad Nacional Autónoma de México. 21: 1-12 p.
- Cupul-Magaña, G. 1999. La laguna el Quelele, Nayarit, México, como hábitat de aves acuáticas. 25-31p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2007. En: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/DQO.pdf>
Consultado: 18/mayo/2011.
- De la Lanza-Espino, G. y S. Gómez. 1999. Físicoquímica del agua y cosecha de fitoplancton en una laguna costera tropical. México. 147-153.
- De la Lanza-Espino, G. 2006. Evaluación de la calidad ambiental y dinámica de playas para la certificación bandera azul del municipio Solidaridad, Quintana Roo, México. Influencia de la calidad del agua en el estado de salud de los arrecifes
-
- Calidad del agua y sitios de monitoreo de dos lagunas costeras insulares de Quintana Roo

- coralinos de la Riviera Maya; Municipio Solidaridad-CONABIO 2004-2005. Coyoacán, México, D. F. 113 p.
- Hernández-Ayón, J., A. Zirino, S. Marinone, R. Canino-Herrera y S. Galindo-Bect. 2003. Relación pH-Densidad en el agua de mar. Universidad Autónoma de Baja California, México. 13 p.
- Herrera-Silveira, J. 1994. Correlaciones de parámetros hidrobiológicos de la laguna de Celestún, Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
- Herrera-Silveira, J. 1996a. Biodiversidad de productores primarios de lagunas costeras del norte de Yucatán, México. Mérida, Yucatán, México. 65: 13-15 p.
- Herrera-Silveira, J. 1996b. Salinity and nutrients in a tropical coastal lagoon with groundwater discharges to the Gulf of Mexico. Kluwer Academic Publishers. Printed in Belgium. 321: 165-176 p.
- Herrera-Silveira, J. 1998. Nutrient-phytoplankton production relationships in a groundwater-influenced tropical coastal lagoon. Mérida, Yucatán, México. 373-385 p.
- Herrera-Silveira J., J. Ramírez-Ramírez y J. Zaldivar. 1998. Overview and Characterization of the Hidrology and Primary Producer Communities of Selected Coastal Lagoons of Yucatan, Mexico. Aquatic Ecosystem Health and Management Society, 1: 353-372 pp.
- Herrera-Silveira, J. y F. Comín. 2000. An introductory account of the types ecosystems of Yucatán Península (SE México). En: Munawar, M., Lawrence, S. N., Munawar, I. F. y Malley, D. F. (Eds.). Aquatic ecosystems of Mexico: Status and Scope (pp. 213 – 227). Leiden, The Netherlands. BackhuysPublishers.
- Herrera-Silveira, J. 2006. Lagunas costeras de Yucatán (SE, México): Investigación, diagnóstico y manejo. Mérida, Yucatán, México. 94-108 p.

- Herrera-Silveira, J., F. Comín, N. Aranda-Cirerol, L. Troccoli, y L. Capurro. 2004. Coastal water quality assessment in the Yucatán Península: management implications. *Ocean & Coastal Management*. 625-639 p.
- Herrera-Silveira, J., T. Cortés Balán, J. Ramírez Ramírez, J. Cámara Ramos, J. Trejo Peña, I. Osorio, E. Alvarado, J. Caamal Sosa, A. Aguilar Trujillo, J. Ascencio Evia y T. Zaldivar. 2008. "Monitoreo de la condición trófica de la columna del agua de los ambientes costeros del Parque Marino Costa Occidental de isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc: primera etapa". CINVESTAV-CONABIO-CONANP. 71 p.
- Kjerfve, B. 1994. Coastal lagoon processes. Elsevier Science B.V., Amsterdam. Chapter 1. 6 p.
- Molina, C., P. Rubinoff y J. Carranza. 1998. Normas practicas Para el Desarrollo Turístico: De la Zona Costera de Quintana Roo, México.
- Medina-Gómez, I. y J. Herrera-Silveira. 2003. Spatial characterization of water quality in a karstic coastal lagoon without anthropogenic disturbance: a multivariate approach. Mérida, Yucatán, México. 11 p.
- Ortiz-Borges, I. 2010. Caracterización Físico-Química y Producción Primaria de la Laguna Colombia, Cozumel, Quintana Roo, México. Tesis de Licenciatura, Universidad de Quintana Roo, Cozumel, México. 62p.
- Ortiz-Pérez, M. y G. De La Lanza-Espino. 2006. Diferenciación del espacio costero de México: Un inventario regional. Universidad Nacional Autónoma de México Instituto de Geografía. México. D. F. 137p.
- Parsons, T.R., Y. Maïta y C.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Oxford.
- Rodríguez, J. y E. Villamizar. 2006. Alimentación del pez tropical Gobioides broussonnetii (*Pisces: Gobiidae*) en la Laguna de Unare, Venezuela. 1093-1098 p.

- Schmitter-Soto J. J., F. A. Comín, E. Escobar-Briones, J. Herrera-Silveira, J. Alcocer, E. Suárez-Morales, M. Elías-Gutiérrez, V. Díaz-Arce, L. E. Marín & B. Steinich. 2002. Hydrogeochemical and Biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia* 467: 215-228.
- Soria García, M. y M. Sahuquillo-Llinares. 2009. 1150 Lagunas Costeras. 303p.
- Torres-Alvarado, M. y L. Calva-Benítez. 2007. Diagnóstico de la calidad y tecnologías para la depuración y recuperación de agua Costa Maya, sección; calidad del agua y contaminación de sedimentos en la costa maya (río Bacalar chico a Mahahual).
- Valdés-Lozano, D. 1996. Balance de nitrógeno y fósforo en la Laguna Río Lagartos. Mérida, Yucatán, México. 89 p.
- Valdés-Lozano, D., M. Chumacero y E. Real. 2006. Sediment oxygen consumption in a developed coastal lagoon of the Mexican Caribbean. Mérida, Yucatán, México. 8 p.
- Varona-Cordero, F. y F. Gutiérrez-Mendieta. 2006. Composición estacional Del fitoplancton de dos lagunas costeras del Pacífico tropical. Distrito Federal, México. 159-174p.
- Vergara-Sánchez, M. 2007. Desarrollo Integral y Sustentable de las lagunas costeras mexicanas. 25 p.
- Xacur-Maiza, J. 1999. Enciclopedia de Quintana Roo. México, D.F. Tomo 7. 150 p.

ANEXO

Bitácora de campo		
Lugar: _____		Fecha: ____ / ____ / ____
Hora de llegada: _____		Hora de salida: _____
Variable	Estación __ Muestra	Estación __ Replica
GPS Lat N		
GPS Lat W		
Profundidad (m)		
Transparencia (m)		
Temperatura (°C)		
Salinidad (u.p.s)		
Conductividad (mS/cm)		
oxígeno disuelto (mg/l)		
pH		
Observaciones		