



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA**  
**UNIDAD XOCHIMILCO**

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

MAESTRÍA EN ECOLOGÍA APLICADA

IDÓNEA COMUNICACIÓN DE RESULTADOS

**“BIOGEOQUÍMICA DE DOS CABECERAS ESTUARINAS DE LA LAGUNA DE  
TÉRMINOS, CAMPECHE: ESTUDIO BASE PARA GENERAR PROPUESTAS  
DE CONSERVACIÓN”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN ECOLOGÍA APLICADA  
PRESENTA:

Biól. Ezel Jacome Galindo Pérez

Matrícula: 2172800601

COMITÉ TUTORAL

Dr. Luis Amado Ayala Pérez. Director

Dra. Rocío Jetzabel Alcántara Hernández. Asesora

Dr. Javier Aldeco Ramírez. Asesor

Ciudad de México, septiembre de 2020

Galindo-Pérez, 2020

El jurado asignado por la Comisión Académica de la Maestría en Ecología Aplicada de la Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco, aprobó la Idónea Comunicación de Resultados titulada:

"Biogeoquímica de dos cabeceras estuarinas de la Laguna de Términos, Campeche: Estudio base para generar propuestas de conservación"

Que presentó: Ezel Jacome Galindo Pérez

El día 30 de octubre de 2020 en la Ciudad de México, para la obtención del Grado de Maestría en Ecología Aplicada.

#### JURADO DE EXAMEN

Dr. Francisco Xavier Chiappa Carrara.  
Escuela Nacional de Estudios Superiores Mérida.  
Universidad Nacional Autónoma de México.  
Presidente.



Dr. Javier Aldeco Ramírez.  
Departamento El Hombre y su Ambiente.  
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco.  
Secretario.



Dr. Antonio Zoilo Márquez García.  
Departamento Hidrobiología.  
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.  
Vocal.



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco infinitamente al Dr. Luis por creer y confiar en mí, por acompañarme y respaldarme a lo largo de esta investigación y proceso de aprendizaje, ya que en diversas ocasiones apoyó muchas de las inquietudes (locuras) que tenía en mente. Gracias por brindarme su confianza como persona y estar siempre atento para no perder el camino y dirección e impulsarme a colaborar dentro de sus proyectos. Agradezco su comprensión, aliento, y mucha paciencia dentro de este camino, en verdad conocí a una persona que me inspira para seguir adelante, no puedo expresar lo que representa para mí en tan pocas palabras, muchas, muchas, muchas gracias doc.

Agradezco a la Dra. Rocío, por todo el apoyo y aprendizaje que me otorgó, aprendí muchísimo al entrar a un campo del conocimiento nuevo, gracias por todo su conocimiento, carisma, y observaciones muy precisas que me hizo para realizar una mejor investigación.

Agradezco al Dr. Javier que, con sus opiniones y conocimientos me permitió tener una nueva perspectiva sobre mi investigación, gracias por todos sus comentarios, todos sumaron para enriquecer más mi proyecto.

Agradezco al Dr. Xavier Chiappa Carrara por ser parte del jurado durante la defensa de este trabajo.

Agradezco al Dr. Antonio Zoilo, por todo el apoyo que me ha otorgado, no solo por el análisis de muestras de sedimento, sino por apoyarme en diversos procesos académicos, muchas gracias.

Agradezco a las personas que ayudaron en la realización de esta investigación, a Zenón, quien nos guio en campo a través de la Laguna de Términos, gracias por enseñarnos y ayudarnos. Gracias a Esli por todo el apoyo que me brindaste en campo y en el laboratorio, por tus sonrisas en el labo, y siempre estar ahí para escucharme. A mi amigo Augusto, más que amigo hermano, gracias por estar siempre, por todas las aventuras que tuvimos en la maestría y ser parte de esta

historia, he aprendido mucho de ti y seguiré aprendiendo. A mis amigos Rosa, Lalo, Andrés, por estar siempre en el labo, por escucharme, comprenderme y hacer el ambiente más ameno. A Brenda, muchas gracias por apoyarme en todo, por integrarme en tus proyectos, lo que me ayudó crecer, tanto en la parte profesional como personal, he aprendido mucho de ti, te agradezco por tu confianza y conocimiento, por escucharme y darme tu punto de vista. A Karen, por el apoyo en el laboratorio para el análisis de muestras, gracias por tu confianza, y por permitirme asesorarte. A Aurea por el apoyo en uno de los muestreos en campo, muchas gracias por todo tu apoyo. A Kari, Swetenia y Aarón quienes me ayudaron al procesamiento de muestras sedimentarias, gracias por enseñarme y abrirme su confianza, aprendí mucho de ustedes.

Agradezco a todos mis profesoras y profesores de la maestría por su vasto conocimiento, que enriquecieron mi percepción de las cosas, sin ello no podría tener un nuevo punto de vista, el cual seguirá cambiando conforme siga aprendiendo de grandes personas como ustedes.

Gracias a mis amigos de la maestría, Saritah, Esbe, Jenny, Toño y Lupita que, sin su conocimiento, risas, enojos, y aventuras no tendría este cachito de historia que pueda contar y recordar, gracias por ser como son.

A todas las personas que me permitieron transmitirles lo poco que sé, y a las personas que faltaron, amigos, conocidos, etc., mil gracias a todos.

Al pueblo de México que con sus contribuciones permiten mantener una educación universal y gratuita.

## **DEDICATORIA**

A mi papá que me forjaste para ser un profesionalista, el espacio y tiempo puede ser tan relativo, tanto que, aunque no estés físicamente llegas a estar siempre conmigo.

A mi mamá y hermanos por todo el apoyo que siempre me han proporcionado, agradezco profundamente todo lo que me ayudan para crecer día a día.

## **PREFACIO**

En la actualidad, los ecosistemas costeros se encuentran bajo diversas presiones ambientales y antrópicas, lo que genera una disminución significativa en las funciones y servicios ambientales que ofrecen. El Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos (APFFLT) mantiene diversos servicios ecosistémicos y una gran biodiversidad de aves, mamíferos, invertebrados, vegetación acuática, de manglar, etc.

El APFFLT se integra por cuatro sistemas estuarinos, entre los más importantes se encuentran los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada-Del Este, en estos sitios se conservan algunos de los ecosistemas más vulnerables que se pueden encontrar en esta región. Su degradación se ha generado a partir diversas actividades de desarrollo, como el cambio de uso de suelo, la explotación pesquera, la explotación petrolera dentro de la Sonda Campeche, la contaminación acuática autóctona y alóctona, las actividades agrícolas como el cultivo de arroz, la ganadería extensiva, la deforestación, etc.

Debido a las diversas problemáticas ambientales, se tiene la necesidad de realizar monitoreo en estos sistemas, esto permite determinar las condiciones de los servicios ecosistémicos de diversos componentes ambientales, como son la hidrósfera, atmósfera, litósfera y biósfera, y su interacción con el componente antrópico.

Por lo anterior la presente obra, da un acercamiento de las condiciones ambientales de los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este y sus interacciones con el componente antrópico, con lo cual permita la generación de propuestas de vigilancia, monitoreo, manejo, restauración y conservación de los ecosistemas asociados a estos sistemas fluvio-lagunares.

Se comienza con una breve introducción que contempla el marco teórico y conceptual sobre los sistemas estuarinos, la Laguna de Términos, los diferentes

componentes ambientales, para determinar la importancia de realizar los monitoreos ambientales.

El capítulo uno comprende la caracterización ambiental de los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este, se describen las condiciones de temperatura y humedad atmosférica a lo largo de un periodo de treinta años, así como las condiciones que prevalecieron durante el muestreo que comprendió de noviembre 2017, abril 2018 y agosto 2018. Posteriormente se analizan las condiciones fisicoquímicas de la columna de agua, las concentraciones de nutrientes y clorofila-a que se presentaron en ambos sistemas, durante la temporada de nortes, secas y lluvias. En la última parte del capítulo se evalúan los cambios de cobertura de manglar a lo largo de un periodo de treinta y cuatro años, y se categorizan las zonas con mayor presión a la deforestación.

El capítulo dos se enfoca en el análisis de la información recabada en la caracterización ambiental y se implementan indicadores de respuesta que permiten evaluar las diversas presiones antropogénicas. Primero se hace una evaluación y análisis de las condiciones tróficas de los sistemas estuarinos Pom-Atasta y Palizada-Del Este a partir del índice de estado trófico TRIX. Continúa con la evaluación del Índice de Huella Humana, en el que se observan las presiones ejercidas por los cambios de uso de suelo a partir de un marco histórico de las diferentes actividades que se desarrollan en las zonas que confluyen en ambos sistemas. Por último, se evalúan las condiciones de Desarrollo Humano que se mantienen en los municipios que integran los sistemas estuarinos del presente estudio y se determina su relación con las presiones antrópicas que se ejercen en ambos sistemas.

En el tercer capítulo se realiza el meta-análisis de los datos ambientales y de los indicadores que fueron evaluados, se evalúa un análisis de sustentabilidad a partir de un modelo Presión-Estado-Impacto-Respuesta, con lo cual se determina las condiciones y presiones de los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este. Por último, se describen las propuestas de vigilancia, mitigación y conservación para ambos sistemas.

Posteriormente se describe la realización de la transferencia de conocimiento, la cual consiste en la integración de información, su intercambio y discusión con directivos del Área Natural Protegida y de la estación “El Carmen” de la Universidad Nacional Autónoma de México, así como participantes de la Secretaría de Marina, investigadores de instituciones locales y representantes de asociaciones civiles como la Red de Manglar México.

Con esta investigación se espera que, a partir de los datos generados, se tenga un marco de las condiciones ambientales, sociales, y económicas actuales que prevalecen en los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este, y permita a los tomadores de decisiones integrar esta información en los planes y programas de vigilancia, monitoreo, restauración y conservación del Área de Protección de Flora y Fauna de la Laguna de Términos.

Ezel Jacome Galindo Pérez

# ÍNDICE

CAPÍTULO 1.....	1
Descripción y análisis de la estructura y dinámica de los cuatro componentes ambientales (biósfera, litósfera, hidrósfera y atmósfera) de las cabeceras estuarinas Pom-Atasta y Palizada-Del Este.....	1
RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN .....	3
Caracterización ambiental de los sistemas estuarinos Pom-Atasta y Palizada-Del Este. ....	3
Dinámica del ciclo del carbono de los sistemas estuarinos Pom-Atasta y Palizada-Del Este. ....	3
Ciclo de nitrógeno en los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este .....	6
Ciclo del fósforo en los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este. ....	8
Percepción remota para la caracterización de la dinámica biogeoquímica de las cabeceras estuarinas. ....	9
MATERIAL Y MÉTODO.....	9
Área de estudio.....	9
Campañas de muestreo.....	16
CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL ATMOSFÉRICA.....	17
Análisis histórico de la temperatura y precipitación.....	17
Análisis ambiental de los periodos de muestreo .....	18
ANÁLISIS DE LA HIDRÓSFERA.....	18
Parámetros fisicoquímicos .....	18
ANÁLISIS DE LA BIÓSFERA .....	19
Determinación de clorofila <i>a</i> fitoplanctónica.....	19
Análisis de cobertura de manglar.....	20
Análisis sedimentario .....	21
Análisis de Sistemas de Información Geográfica.....	23
RESULTADOS.....	23
Variabilidad ambiental .....	23
ANÁLISIS DE LA HIDRÓSFERA.....	30
SISTEMA POM-ATASTA.....	30
Temperatura.....	31
Salinidad .....	32

Oxígeno disuelto.....	34
pH.....	36
Análisis de agrupamiento de las variables fisicoquímicas.....	38
NUTRIENTES.....	39
Nitratos.....	39
Nitritos.....	41
Amonio.....	43
Nitrógeno Inorgánico Disuelto.....	44
Fosfatos.....	46
Fósforo Inorgánico Disuelto.....	47
Concentraciones de CO <sub>2</sub> .....	48
SISTEMA PALIZADA-DEL ESTE.....	51
Temperatura.....	51
Salinidad.....	53
Oxígeno disuelto.....	55
pH.....	56
Análisis de agrupamiento de los parámetros fisicoquímicos.....	58
NUTRIENTES.....	59
Nitratos.....	59
Nitritos.....	61
Amonio.....	63
Nitrógeno Inorgánico Disuelto.....	64
Fosfatos.....	66
Fósforo Inorgánico Disuelto.....	67
Concentraciones de CO <sub>2</sub> .....	69
ANÁLISIS DE LA BIÓSFERA.....	71
Análisis de clorofila a en el SPA.....	71
Análisis de clorofila <i>a</i> en el SPE.....	74
Análisis de Correspondencias Canónicas (ACC).....	77
Análisis de cobertura de manglar.....	78
ANÁLISIS DE SEDIMENTOS.....	82
DISCUSIÓN.....	86
VARIABILIDAD AMBIENTAL.....	86

VARIABLES HIDROLÓGICAS.....	88
ANÁLISIS DE LA BIÓSFERA .....	105
ANÁLISIS DE SEDIMENTOS.....	110
CONCLUSIONES.....	113
REFERENCIAS .....	116
CAPÍTULO 2.....	128
Identificación de las principales fuentes de impactos antropogénicos asociados a las cabeceras Pom-Atasta y Palizada-Del Este y descripción de sus efectos ecológicos actuales y potenciales. ....	128
RESUMEN.....	128
INTRODUCCIÓN .....	130
Eutrofización.....	131
Índice de estado trófico TRIX.....	132
MATERIAL Y MÉTODOS.....	132
Índice de Estado Trófico TRIX .....	132
Análisis de Índice de Huella Humana .....	133
Índice de Desarrollo Humano .....	134
RESULTADOS.....	134
Índice de Estado Trófico TRIX.....	134
Análisis del Índice de Huella Humana .....	139
Índice de Desarrollo Humano.....	141
DISCUSIÓN .....	144
Índice de Estado Trófico TRIX.....	144
Índice de Huella Humana .....	145
Índice de Desarrollo Humano.....	149
CONCLUSIONES.....	151
REFERENCIAS .....	153
CAPÍTULO 3 .....	157
Propuestas de estrategias de vigilancia y conservación del Sistema Pom-Atasta y Sistema Palizada-Del Este.....	157
RESUMEN.....	157
INTRODUCCIÓN .....	159
MATERIAL Y MÉTODO.....	160
RESULTADOS.....	161

CONCLUSIONES.....	171
REFERENCIAS .....	171
ANEXOS.....	173

## **Unidades de medida**

°C: Grados Celsius

nM: Nanomoles

µM: Micromoles

mM: Milimoles

mm: milímetros

cm: centímetros

m: metros

m<sup>3</sup>: metros cúbicos

l: litro

mg: miligramos

Km: Kilómetros: 1 Km = 1000 m

ha: hectáreas: 1 ha = 10 000 m<sup>2</sup>

Ton: Tonelada: 1 Tonelada = 1000 kilogramos

MgC: Megagramos de carbono: 1 Megagramo = 1000 kilogramos

GgC: Gigagramos de carbono: 1 Gigagramo = 1000 toneladas métricas

GtC: Gigatoneladas de carbono: 1 Gigatonelada = 1000 millones de toneladas

TgC: Teragramos de carbono: 1 Tera-gramo = 1 millón de toneladas

PgC: Pentagramos de carbono: 1 Peta-gramo = 1000 millones de toneladas

## CAPÍTULO 1

### **Descripción y análisis de la estructura y dinámica de los cuatro componentes ambientales (biósfera, litósfera, hidrósfera y atmósfera) de las cabeceras estuarinas Pom-Atasta y Palizada-Del Este.**

#### **RESUMEN**

Los sistemas fluvio-lagunares que integran el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos (APFFLT) se han visto alterados por diferentes actividades humanas, las cuales inducen la inestabilidad ecológica y biogeoquímica particularmente de los sistemas Pom-Atasta (SPA) y Palizada-Del Este (SPE). El objetivo fue analizar la estructura y dinámica de los componentes ambientales de los SPA y SPE. Se analizó la dinámica ambiental de las temperaturas y precipitación durante un periodo de 30 años de datos recopilados del Servicio Meteorológico Nacional. Se realizó el monitoreo de nutrientes y clorofila-a (Chl-a) de la columna de agua en tres temporadas climáticas, en diez sitios de muestreo. Se evaluaron los cambios en la cobertura de manglar a partir de datos de vegetación y uso de suelo de CONABIO. En el periodo de 1985 a 2015 las temperaturas ambientales máximas alcanzaron 44°C en mayo y las mínimas de 10°C en enero. Se observó un incremento de la temperatura durante el periodo de 1991 a 1995. En la temporada de secas se encontraron las mayores concentraciones de nutrientes. El Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) osciló entre 1.45-6.69 mg/L, el Fósforo Inorgánico Disuelto (FID) entre 0.02-0.21 mg/L, el CO<sub>2</sub> entre 13-18.6 mg/L. Las máximas concentraciones de Chl-a se registraron en la temporada de nortes (49.06 mg/m<sup>3</sup>). El mayor porcentaje de pérdida de cobertura de manglar se observó durante el periodo 1981-2005 con un 14.57 % que corresponde a una cobertura de 135.24 km<sup>2</sup>. La variabilidad ambiental la determina la dinámica climática de la región del Golfo de México. Ambos sistemas mantienen un activo metabolismo de fijación de nitrógeno. Las concentraciones de nutrientes se deben a las características intrínsecas y geomorfológicas de cada sistema y a los diferentes aportes autóctonos y alóctonos. Las políticas de protección de manglar favorecen la conservación de los SPA y SPE.

**Palabras clave:** Caracterización ambiental, biogeoquímica, sumidero de nitrógeno, fijación de carbono, pérdida de manglar, conservación.

## **ABSTRACT**

The fluvio lagoon systems that make up the Laguna de Terminos Flora and Fauna Protection Area (TFFPA) have been altered by different human activities, which induce ecological and biogeochemical instability, particularly the Pom-Atasta (SPA) and Palizada-Del Este (SPE) systems. The objective was to analysis of the structure and dynamics of the environmental components in the SPA and SPE. The environmental dynamics of temperatures and precipitation were analysed over a period of 30 years from data collected from the National Meteorological Service. Nutrient and chlorophyll (Chl-a) monitoring of the water column was carried out in three climatic seasons, in ten sampling sites. Changes of the mangrove cover were evaluated from based on vegetation and land use data from CONABIO. In the period from 1985 to 2015, the maximum environmental temperatures reached 44 °C in May and the minimum temperatures of 10 °C in January. An increase in temperature was recorded during the period from 1991 to 1995. In the dry season the highest concentrations of nutrients were found. Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN) ranged between 1.45-6.69 mg/L, Dissolved Inorganic Phosphorus (DIP) between 0.02-0.21 mg / L, CO<sub>2</sub> between 13-18.6 mg/L. The maximum concentrations of Chl-a were recorded in the northern season (49.06 mg/m<sup>3</sup>). The highest percentage of loss of mangrove cover was recorded during the period 1981-2005 with a 14.57 % corresponding to a coverage of 135.24 km<sup>2</sup>. Environmental variability is determined by the climatic dynamics of the Gulf of Mexico region. Both systems maintain an active nitrogen fixation metabolism. Nutrient concentrations are due to the intrinsic and geomorphological characteristics of each system and to the different contributions autochthonous and allochthonous. Mangrove protection policies favor the conservation of SPA and SPE.

**Keywords:** Environmental characterization, biogeochemistry, nitrogen sink, carbon fixation, loss of mangroves, conservation.

## **INTRODUCCIÓN**

### **Caracterización ambiental de los sistemas estuarinos Pom-Atasta y Palizada-Del Este.**

La costa sur de Campeche es una región prioritaria para realizar evaluaciones ambientales y ecológicas precisas con fines de caracterizar y conservar hábitats prioritarios de diversas especies vegetales y animales. Los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este, tienen características particulares con relación a otras cabeceras estuarinas dentro de la Laguna de Términos, lo cual se debe a su gran heterogeneidad ambiental (Ayala-Pérez, 2006).

La caracterización biológica y ambiental de los sistemas estuarinos Pom-Atasta y Palizada-Del Este, ayuda a establecer las bases teóricas y metodológicas sobre el manejo sustentable de los recursos naturales locales aprovechables de manera directa o indirecta; y al mismo tiempo sirven para la generación de nuevo conocimiento teórico sobre los procesos ecológicos locales y globales. Así mismo, la caracterización ambiental es importante para la evaluación actual de la dinámica biogeoquímica de los componentes ambientales (hidrósfera, litósfera, atmósfera y biósfera) de ambas cabeceras y su relación con las actividades humana. Los estudios ambientales en estos sitios permiten diseñar planes de manejo, conservación y restauración de la dinámica ecológica. Es por ello que, la evaluación de los cinco componentes ambientales (biósfera, atmósfera, hidrósfera, litósfera y antropósfera) de los SPA y SPE es fundamental para comprender su dinámica física, química y biológica, y así determinar la influencia que tiene el hombre con estos ecosistemas estuarinos (Méndez y Cartaya, 2008).

### **Dinámica del ciclo del carbono de los sistemas estuarinos Pom-Atasta y Palizada-Del Este.**

La evaluación del ciclo del carbono en los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este, permite conocer sus interacciones de manera integral, y con ello, entender la contribución de estos sitios en su dinámica global (de la Torre y Castro, 2007).

El ciclo del carbono es uno de los ciclos biogeoquímicos fundamentales para el desarrollo de la vida en la tierra, el cual comienza con la fijación carbono inorgánico

(CO<sub>2</sub>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). En la fotosíntesis oxigénica, el CO<sub>2</sub> y el agua reaccionan para formar carbohidratos y simultáneamente se libera oxígeno a la atmósfera. Parte de los carbohidratos que se forman durante esta reacción se utiliza para suministrar energía hacia los organismos fotosintéticos, lo que contribuye al desarrollo de la productividad primaria del planeta (Ivlev, 2016).

La parte estructural formada por el carbono es asimilada por los consumidores primarios, al metabolizar estas estructuras, la utilizan para la formación de órganos y tejidos, así como en el metabolismo energético (heterotrofia), para tener como principales productos dióxido de carbono y agua (Smith y Smith, 2007). Finalmente, al morir estos organismos sirven como sustrato para diversos consorcios microbianos, los cuales, mediante el proceso de degradación aerobio, anaerobio y fermentativo, permiten la reincorporación de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> a la atmósfera (Orellana-Rivadeneira *et al.*, 2012).

Los humedales son uno de los ecosistemas más ricos en carbono en el mundo, y mantienen altas concentraciones de carbono en los suelos de muchos manglares y marismas. Estos pueden llegar a contener dos o tres veces más carbono que las concentraciones medidas en la mayoría de los bosques tropicales y templados, existen sitios en los que se han registrado concentraciones de hasta 400 MgC/ha; mientras que, en zonas de ecosistemas de manglar las reservas llegan a 1100 MgC/ha (Adame *et al.*, 2013).

Hasta ahora, en México existen pocas investigaciones y mediciones continuas que aporten el conocimiento de las características predominantes en los sistemas estuarinos del sureste del país, así como su contribución a la dinámica global de carbono (de la Torre y Castro, 2007; Herrera *et al.*, 2016). Sin embargo, las regiones que se encuentran en la península de Yucatán son las zonas con mayores tasas de fijación de carbono en el almacén aéreo a nivel nacional. Los sistemas más productivos son los que se encuentran en el estado de Campeche, donde la fijación de carbono llega a valores máximos de 306.55 Ton C/ha en la localidad de Pom-Atasta (Herrera *et al.*, 2016; Adame *et al.*, 2013). En Pom-Atasta y Palizada-Del Este se pueden encontrar las especies de manglar como *Rhizophora mangle* y

*Laguncularia racemosa*, las cuales pueden fijar hasta 440 Ton de C/ha (Adame *et al.*, 2015; Villalobos *et al.*, 1999).

La dinámica biológica de fijación de carbono en la columna de agua comienza con el fitoplancton, el cual aporta carbono particulado a los ecosistemas lagunares costeros. Los flujos de carbono en estos sitios están estrechamente relacionados con las variables temporales y espaciales, dentro de los cuales se destacan la estacionalidad, la mezcla de la columna de agua, la velocidad y dirección del viento, la marea, junto con la corriente que ésta produce. Todo esto determina conjuntamente la disponibilidad del carbono orgánico particulado que puede ser utilizado para otros organismos del siguiente nivel de la trama trófica (Contreras-Espinosa *et al.*, 1994; Contreras-Espinosa *et al.*, 2005; de la Torre y Castro, 2007).

Se ha descrito que la fijación de carbono para la Laguna Pom-Atasta se realiza por una biomasa fitoplanctónica de 263 taxas. Donde, las diatomeas son el grupo más representativo con 169 taxas diferentes (representando el 64.26%), seguida de dinoflagelados con 37 taxas (14.07%), las clorofitas con 29 taxas (11.03%) y el 10.64% lo constituye las cianobacterias, las euglenofitas y los ebrideos. Mientras que, en el sistema estuarino Palizada-Del Este la generación de carbono orgánico particulado está relacionada con la presencia de 348 taxa autotróficos, las diatomeas son las más representativas con 176 grupos (50.57%), seguida de las clorofitas con el 25% representadas por 87 taxas, los dinoflagelados con el 15.80% constituidas por 55 taxas y el 8.63% restante lo representan los grupos de cianobacterias, euglenofitas y ebrideos (Muciño-Márquez *et al.*, 2014).

Esta diversidad fitoplactónica mantiene la productividad de clorofila *a*. Las concentraciones de clorofila *a* en los sistemas de Palizada-Del Este llegan a 289.3 mgC/m<sup>3</sup>/h en épocas de secas y 59.2 mgC/m<sup>3</sup>/h en época de lluvias; y en el caso de Pom-Atasta se encuentra entre los 129.5 mgC/m<sup>3</sup>/h en épocas de secas y para épocas de lluvias de 55.7 mgC/m<sup>3</sup>/h. Esto indica que para las zonas tropicales del sureste del país se llegan a tener irradiancias que permiten el florecimiento de microorganismos fotosintéticos y una alta tasa de fijación de carbono (de la Lanza-Espino y Lozano-Montes, 1999), principalmente en la temporada de secas. La

producción fitoplanctónica está determinada por las características hidrológicas, físicas, químicas, de salinidad, pH y temperatura, radiación solar, profundidad, etc., lo que ocasiona diversas variaciones en la tasa de fijación de carbono (Muciño-Márquez *et al.*, 2015).

También en estos sistemas se pueden registrar procesos de emisiones y captura de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> entre la atmósfera-hidrosfera, esto permite que cada sistema actúe como fuente emisora y un sumidero de carbono (de la Torre y Castro, 2007). A nivel mundial se ha estimado que las emisiones de CO<sub>2</sub> llegan a alcanzar hasta 0.8 PgC/año, lo cual hace que estos ecosistemas lleguen a ser fundamentales para la dinámica del carbono global (Tranvik *et al.*, 2009; Mendoza *et al.*, 2013).

Una de las principales fuentes naturales emisoras de CH<sub>4</sub> a la atmósfera son los humedales, estos sitios contribuyen aproximadamente con el 20-25% de las emisiones totales naturales (Matthews y Fung, 1987; Fung *et al.*, 1991; Whalen, 2005). Para la Laguna de Términos, se estima que las concentraciones promedio totales de metano disuelto son de 300 nM, y llegan hasta 8378 nM en algunas zonas; mientras que, en los canales conectados a esta laguna las concentraciones llegan a ser de 3.5 mM (Chuang *et al.*, 2017), y generan una rápida volatilización de este gas de la columna de agua hacia la atmósfera.

Esta dinámica de emisión y fijación de los gases de carbono (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>) en ambas cabeceras se encuentra estrechamente relacionado con las características físicas de los sistemas estuarinos, su entorno ambiental y las actividades humanas que se presentan en estos sistemas (Mendoza *et al.*, 2013; Chuang *et al.*, 2017).

### **Ciclo de nitrógeno en los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este**

El ciclo biogeoquímico del nitrógeno está determinado por las formas químicas y sus vías de aporte y transformación en los diferentes ambientes bióticos y abióticos. La principal entrada o aporte del nitrógeno es por la vía pluvial, introduce principalmente nitratos a las lagunas costeras y estuarios (Martínez-Fernández y Steve-Selma, 2007).

Las formas químicas inorgánicas más comunes de nitrógeno en ambientes acuáticos son el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), el nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ); sin embargo, su concentración varía dependiendo del sistema que se esté estudiando. Por ejemplo, los nitratos son compuestos que se presentan en cantidades mayores en ambientes altamente oxigenados (condición de oxidación); mientras que, los nitritos y el amonio se presentan en condiciones químicas altamente reductoras, con bajo contenido de oxígeno o anaerobiosis (Pacheco y Cabrera, 2003).

Consecuentemente, la distribución y concentraciones de las formas de nitrógeno dependen de las variables espaciales y temporales, debido a las características estacionales que sufren los sistemas estuarinos, en particular en los sitios circundantes a los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este.

La dinámica del nitrógeno es fundamental para el crecimiento de los productores primarios, principalmente del fitoplacton, los compuestos nitrogenados permiten la manutención de otros ciclos biogeoquímicos, como el ciclo del carbono, lo que implica que una vez disueltos en el cuerpo de agua son asimilados por el fitoplancton o la vegetación sumergida (Fuentes-Yaco, 2001; Martínez-Fernández y Steve-Selma 2007). Así mismo, existen ciertas especies de cianobacterias de los géneros *Trichodesmium*, *Nostoc*, *Calothrix*, *Phormidium* y bacterias como *Azotobacter* que realizan el proceso de fijación de nitrógeno molecular, cuando existe escases de  $\text{NH}_4^+$  o  $\text{NO}_3^-$  (de la Lanza-Espino, 2001).

Las cabeceras Pom-Atasta y Palizada-Del Este son enriquecidas de nutrientes por diversas aportaciones de cuerpos de agua como los ríos, arroyo, canales, circundantes, entre otros. En el caso de nitritos, la cabecera Pom-Atasta llega a registrar un máximo de 1.3 mg/L, y para Palizada-Del Este de 0.8 mg/L en la época de lluvias, por último, las concentraciones de amonio para Pom-Atasta presentan máximos de 1.4 mg/L y 0.7 mg/L para el caso del sistema Palizada-Del Este (Ruiz-Marín *et al.*, 2009).

Un factor que determinan la presencia de las especies de nitrógeno presente en ambas cabeceras son los factores fisicoquímicos, para que se realice el proceso de nitrificación debe de haber una oxigenación mayor a 2 mg de  $\text{O}_2/\text{L}$ . Esta oxigenación

se produce en ambas lagunas durante la estación de lluvias (Ruíz-Marín *et al.*, 2009; de la Lanza-Espino, 1999). Así mismo al presentarse una baja oxigenación en los sistemas en épocas de secas, permite que se genere un ambiente reductor, esto implica que se eleven las concentraciones de nitritos y amonio (de la Lanza-Espino, 2001).

### **Ciclo del fósforo en los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este.**

El fósforo es uno de los elementos que conforman los llamados micronutrientes, y se encuentra en distintas formas químicas disueltas y particuladas en el agua. La forma más importante es el fósforo inorgánico, y su presencia en la columna de agua lo determina el pH; por ejemplo, en un sistema acuático circumneutral el fósforo se encuentra como fosfato mono ácido (87%), fosfato diácido (1%) y ortofosfatos (12%). Estos polifosfatos están en el medio acuático principalmente por las actividades humanas, y sus mayores concentraciones se registran en lagunas costeras y estuarios. El fósforo particulado es el menos estudiado y se estima que se presenta de manera inorgánica como flóculos de fosfato férrico (de la Lanza-Espino, 2001).

Al igual que en el ciclo de nitrógeno, el fósforo se integra a los sistemas acuáticos con el acarreamiento fluvial en áreas costeras (lagunas y estuarios). Esta vía de aporte mantiene una dinámica e intercambio de concentraciones significativas con el océano, donde primeramente se distribuye a través de la columna de agua, y luego se transporta a los procesos de sedimentación; donde se transforma en moléculas menos compleja denominadas ortofosfatos, posteriormente el fitoplancton de la columna superficial lo asimila y lo integra a niveles superiores en la trama trófica (de la Lanza-Espino, 2001; Pacheco y Cabrera, 2003; Sosa-Avalos *et al.*, 2013).

La concentración de ortofosfato en Pom-Atasta oscila alrededor de 2.23  $\mu\text{M}$ , y en el sistema Palizada-Del Este llega a 2.15  $\mu\text{M}$ . Las concentraciones elevadas de fosfatos en estos sistemas determinan la gran cantidad de nutrientes provenientes de las descargas urbanas y son acarreados por los ríos que desembocan en ambos sistemas, lo cual produce en algunos sitios procesos de eutrofización, que se induce

a partir de las reacciones geoquímicas del fósforo con la parte sedimentaria, y se generan afectaciones en varios ciclos de nutrientes (de la Lanza-Espino, 1999; Ruiz-Marín *et al.*, 2009; Calva-Benítez y Torres-Alvarado, 2011).

### **Percepción remota para la caracterización de la dinámica biogeoquímica de las cabeceras estuarinas.**

La caracterización de los ambientes estuarinos Pom-Atasta y Palizada-Del Este presenta limitantes en cuanto a su análisis y evaluación, principalmente por su extensión. Se requiere de otro tipo de estrategias y herramientas que permitan la evaluación y caracterización de su estructura y función en diferentes escalas temporales y espaciales. La percepción remota permite estimar diferentes características de los sistemas lagunares por medio de métodos que generan información a partir del universo físico de los componentes ambientales. Para ello, se apoya principalmente en la energía electromagnética que llega e interactúa por reflexión, absorción, o transmisión de los elementos presentes en el ecosistema (agua, suelo, vegetación, atmósfera, etc.). Con ello, se pueden establecer las características del medio físico, químico y biológico de las dos cabeceras de la Laguna de Términos (Bocco *et al.*, 2001; Martínez y Díaz, 2005; Ramírez-Bojórquez, 2006).

Por lo anterior, en el presente capítulo tiene como objetivo realizar la descripción y análisis de la estructura y dinámica de los cuatro componentes ambientales (biósfera, litósfera, hidrósfera y atmósfera) de las cabeceras estuarinas Pom-Atasta y Palizada-Del Este, con base en el análisis de muestras experimentales, de información documental e imágenes satelitales.

## **MATERIAL Y MÉTODO**

### **Área de estudio**

La Laguna de Términos está incluida en la provincia fisiográfica de la llanura costera del Golfo y la península de Yucatán (Gutiérrez-Estrada y Castro del Río, 1988; Ortega, 1995). Se encuentra ubicada entre los meridianos 91°10' y 92°00' de longitud oeste y los paralelos 18°20' y 19°00' de latitud norte; en el estado de Campeche, al sur del Golfo de México (Fig. 1). Es una de las lagunas costeras más

grandes de México, presenta una longitud de 70 km de largo y 28 km de ancho, con un área aproximada de 1662 km<sup>2</sup> y una profundidad media de 4 m (Ayala-Pérez *et al.*, 2015).

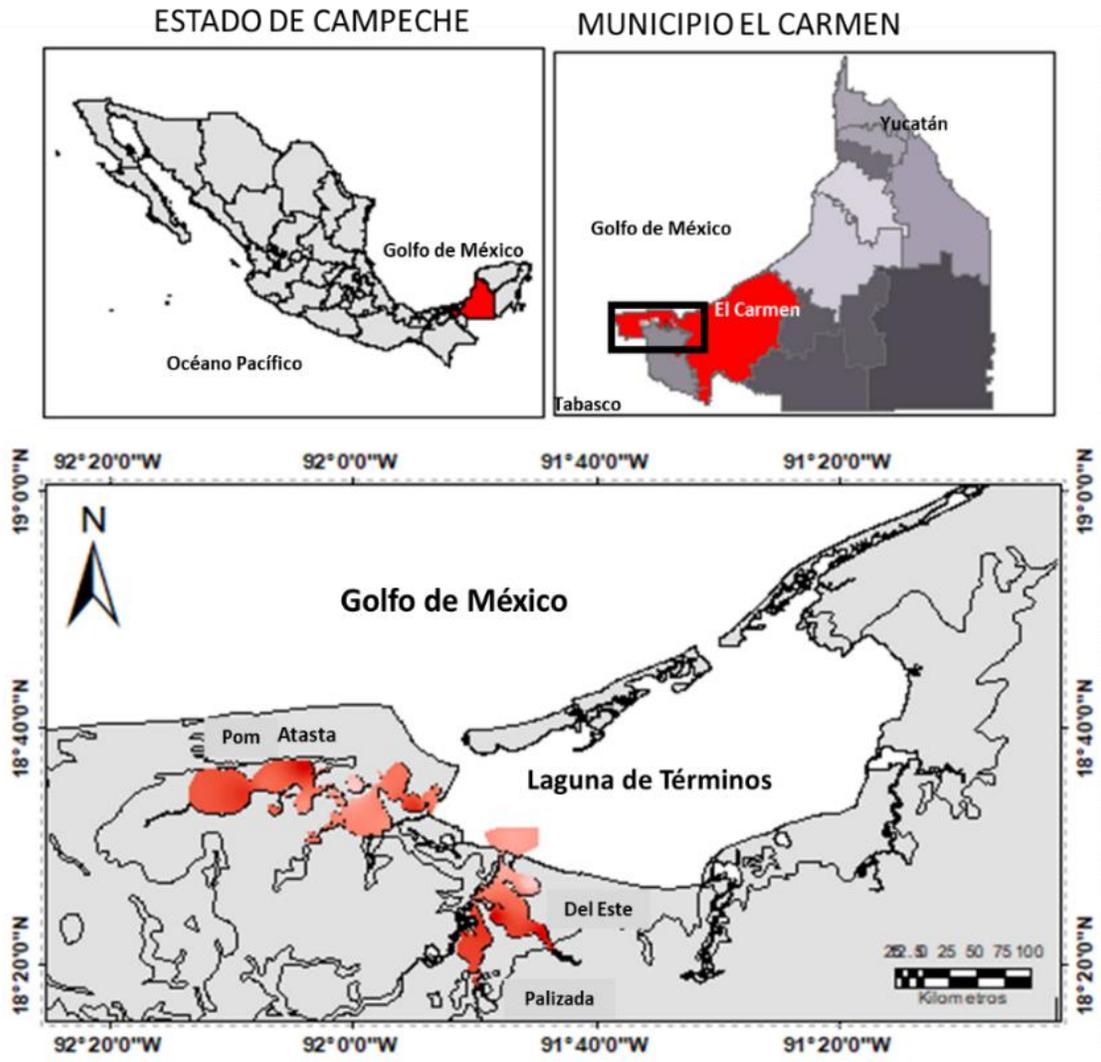


Figura 1. Localización geográfica de los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este.

La laguna se comunica con el mar por dos bocas naturales, la primera se denomina Puerto Real con un ancho promedio de 3.2 km, y la segunda es la boca del Carmen con un ancho promedio de 3.8 km. También tiene una boca menor artificial en la región de Sabancuy (Jiménez, 1979; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007; Ayala-Pérez *et al.*, 2015).

El sistema lagunar de Términos se encuentra en la zona de transición de dos formaciones geológicas, entre la zona caliza de la península de Yucatán y los terrenos aluviales del Golfo de México (Caso *et al.*, 2004). La sedimentación es de tipo terrígena diferencial y presenta una barrera arenosa, ya que se encuentra frente a la provincia terrígena moldeada por el río Usumacinta y la provincia carbonatada de la península de Yucatán (Yáñez-Arancibia, 2010). Es parte del complejo ecológico de la planicie costera que controlan los procesos deltaicos de los ríos Grijalva-Usumacinta, que proporciona sedimentos terrígenos hacia el mar (de la Lanza, 1999; Ayala-Pérez, 2012).

El depósito natural en la Laguna de Términos está balanceado por la barrera de la Isla del Carmen. Sin embargo, las principales aportaciones de sedimentos se provienen de los ríos Palizada, Candelaria, Chumpán, San Pedro y San Pablo, y por el efecto de los vientos (Kuc-Castilla *et al.*, 2015). La sedimentación es muy eficiente dentro de la laguna, el tiempo de residencia de las aguas mezcladas es medio, esto se debe a la dinámica compleja de las bocas estuarinas (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007). Los sedimentos están compuestos principalmente de arenas de grano medio a muy fino, con influencia marina y fluvial, el cual es el grupo textural de mayor distribución en la laguna. Existe una presencia de limo grueso a fino, se encuentra en las porciones internas de la laguna. Las arenas presentes se conforman por feldespatos y cuarzos, con alto contenido de minerales ferromagnesianos en porcentajes de hasta el 75% (Gutiérrez-Estrada y Galaviz-Solís, 1983).

También se presentan sedimentos de tipo calcáreo, principalmente por el acarreo de materiales desde las playas hacia el interior de la laguna, y produce una variación de sedimentos de carbonato de calcio de entre el 10% hasta el 75% (Ortega, 1995)

### **Patrón de circulación de la Laguna de Términos**

La Laguna de Términos presenta el mayor volumen de descarga de agua dulce en América del Norte, con un escurrimiento anual de  $11.92 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/año (Smith *et al.*, 1999). La descarga de este sistema está estrechamente relacionada a la temporalidad climática (Ramos-Miranda *et al.*, 2006). Existen cuatro principales aportaciones de flujo hídrico de agua dulce al sistema lagunar: el río Palizada al sur-

oeste, río Chumpán al sur y los ríos Candelaria y Mamantel al este. El río Palizada desemboca directamente en la Laguna de Términos y constituye un ramal principal del río Usumacinta. El río Chumpán se forma por la unión de varios arroyos, entre los que destacan el Salsipuedes, San Joaquín y Piedad; corre en dirección sur-norte y desemboca en la Laguna de Términos por la boca de Balchacah (Bach *et al.*, 2005; Villalobos-Zapata, 2015).

Otros ríos importantes que incorporan agua continental a la laguna son los ríos San Pedro y San Pablo, los cuales son alimentados por el río Usumacinta. Estos dos ríos descargan en una cadena de lagunas secundarias del Sistema Pom-Atasta, y al desembocar al mar forman la barra de San Pedro (Ayala-Pérez, 2012).

Las cuatro subcuencas de drenaje que desembocan en la laguna (ríos Candelaria y Mamantel, río Chumpan, río Palizada, río San Pedro-San Pablo) son alimentadas por la cuenca del Usumacinta, la cual drena hasta el 80% del total del agua de la zona. El agua dulce, incluyendo las aguas subterráneas, proviene de la zona topográfica cárstica que bordea la laguna (Bach *et al.*, 2005).

El patrón de circulación se encuentra determinada por las mareas astronómicas, viento y caudales descargados por los ríos Palizada, Chumpán y Candelaria, principalmente en épocas de lluvias. Se tiene una mayor velocidad de corrientes en la zona de las bocas del Carmen e isla Aguada, y las velocidades menores se localizan en la boca de Puerto Real (Kuc-Castilla *et al.*, 2015). Sin embargo, en la laguna existe un flujo de circulación predominante de este a oeste, esto permite que el agua marina penetre por la boca Puerto Real y salga por la boca del Carmen (Ramos-Miranda *et al.*, 2006).

### **Variación climática**

El clima que predomina en la región es cálido húmedo (Aw) con lluvias en verano (Am (f)), desde el límite de Tabasco hasta la desembocadura del río Palizada, incluyendo Isla Del Carmen. El gradiente es cálido subhúmedo (Aw2 (w)), y finalmente, un tercer clima se presenta desde Isla Aguada hasta finalizar el estero Sabancuy, el cual es cálido subhúmedo intermedio con lluvias en verano (AW1 (w)). La temperatura media anual se encuentra por arriba de los 26°C, durante la

temporada de secas y puede oscilar entre 40°C y 17°C en temporada de nortes (Ayala-Pérez *et al.*, 2012).

El régimen de lluvia varía en las tres zonas climáticas. En la parte sur, la precipitación es la más alta con un rango entre 1500 y 1800 mm/año; la porción intermedia con 1100 a 1500 mm/año y la menor precipitación es de 1000 a 1100 mm. Existen tres épocas climáticas principales: 1) secas, que va del periodo entre febrero a mayo, 2) lluvias de junio a octubre y 3) nortes de noviembre a enero (Ramos-Miranda *et al.*, 2006; Ayala-Pérez *et al.*, 2012).

### **Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos (APFFLT)**

La laguna de Términos desde 1994 fue declarada Área Natural Protegida, bajo la categoría de Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos. La finalidad de este decreto fue llevar acabo la conservación y aprovechamiento de la flora y fauna a través de acciones que lleven al manejo sustentable de los recursos naturales y ecosistemas aledaños, para la conservación de la biodiversidad, la cual depende directamente de las actividades humanas. La protección de este sitio permite la conservación en el ámbito ecológico, social, político y ambiental, a través de su utilización sustentable como fuente de alimento por ser reservorio natural estratégico de recursos pesqueros, la explotación forestal, industrial, procesos de migración y crecimiento urbano y agropecuario (Villalobos-Zapata, 2015).

La Laguna de Términos tiene una gran diversidad biológica, con una alta riqueza de especies, en este sitio se tienen grupos taxonómicos como: pastos marinos, mangles, peces, aves, crustáceos, moluscos, poliquetos, entre muchos otros. La mayor importancia ecológica de esta laguna es la de proporcionar sitios de alimentación, refugio, reproducción, anidación, desarrollo y crecimiento de diferentes especies. También es la laguna que tiene la mayor interacción ecológica estuario-mar en todo el litoral mexicano del Golfo y su producción primaria neta es mayormente exportada a la plataforma continental (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2007).

### **Sistema estuarino Pom-Atasta (SPA)**

La Laguna de Términos está constituida por diversos sistemas fluvio-lagunares entre los que se destacan los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del-Este. El sistema

Pom-Atasta se encuentra localizado en la porción occidental de la Laguna, entre los meridianos 18°30' y 18°35' N y paralelos 91°50' y 92°20' O, su ubicación geográfica se encuentra dentro de la llanura costera del sur del Golfo de México (Alcocer *et al.*, 2015).

El sistema Pom-Atasta se alimenta por los escurrimientos de la cuenca Grijalva-Usumacinta y está constituida por diez lagunas interiores de diferentes dimensiones (Ayala-Pérez, 2006), denominadas Pom, Atasta, Puerto Rico, Los Negros, las Coloradas, Río Muerto, Palancares, Laguneta San Ignacio, Los esteros de San Ignacio y Torno Largo. Las aguas de estas lagunas desembocan a la parte sur occidental de la Laguna de Términos, a través de la denominada Boca de Atasta. El conjunto de lagunas que integran al Sistema Pom-Atasta presentan una superficie en total de 30 000 ha, las lagunas principales son la Laguna de Pom y la Laguna de Atasta, ambas se interconectan con un canal principal, este canal es remanente de la porción central de los cuerpos de agua, los cuales presentan procesos hidrodinámicos y de sedimentación particulares, que contiene densos pantanos de manglar y favorece el desarrollo de esteros a lo largo del sistema estuarino (Ayala-Castañares, 1966) (Fig. 2).

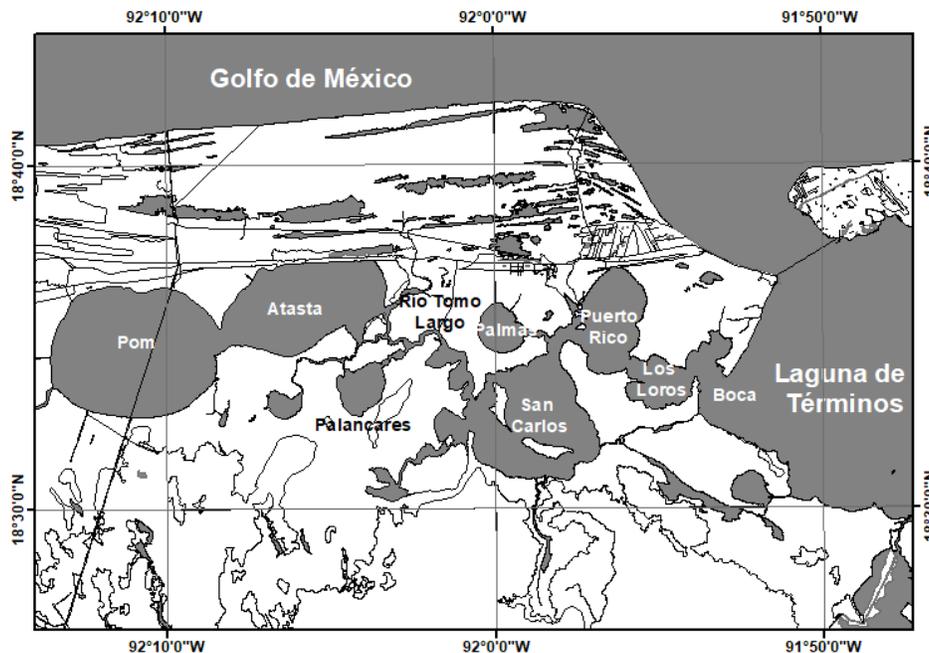


Figura 2. Localización geográfica de las localidades que componen el Sistema Pom-Atasta.

El Sistema Pom-Atasta mantiene procesos de sedimentación de manera irregular, se encuentra constituido principalmente de sedimentos terrígenos con un gradiente diferencial, los cuales se han modificado durante los últimos 5000 años; sin embargo, se presentan sedimentos jóvenes de varios cientos de años. Tiene una depresión interdeltaica marginal, su hidrodinámica la determina el escurrimiento del agua de ríos, que llegan a la laguna a través de ensenadas, lo que provoca una rápida modificación en la forma y batimetría (Yáñez-Correa, 1971).

En las zonas aledañas al Sistema Pom-Atasta se localizan ecosistemas de vegetación de manglar, representada por cuatro especies principales *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus* (Ayala-Pérez, 2006). Este sistema tiene una importante área de cobertura particularmente en la porción occidental donde se ha descrito el bosque más robusto y antiguo de Mesoamérica, por lo que mantiene diversos servicios ecosistémicos (Agraz-Hernández *et al.*, 2009).

### **Sistema estuarino Palizada-Del Este (SPE)**

El sistema Palizada-Del Este se encuentra en el municipio de Palizada, el cual tiene una extensión territorial de 2071 km<sup>2</sup>, y representa el 3.65% de la superficie del estado de Campeche (Escamilla Rivera *et al.*, 2015) La hidrología de este sistema la integra la desembocadura de los ríos Palizada, Marentes y las Piñas que fluyen hacia los cuerpos lagunares Vapor, Del Este y San Francisco (Ayala-Pérez, 2006). Este sistema fluvio lagunar se encuentra en la porción suroeste de la Laguna de Términos, entre los meridianos 18° 29' 13" y 18° 29' 04" N y los paralelos 91° 44' 36" y 91° 51' 31" O (Alcocer *et al.*, 2015; Ayala Pérez, 2012)

El cauce del río Palizada tiene un volumen de escurrimiento anual de 9.08 m<sup>3</sup>, forma parte de la red hidrológica de los ríos Mezcalapa, Grijalva y Usumacinta, y sus ramales se conjuntan con otros ríos menores, los cuales dan origen a lagunas interiores del sistema estuarino (Smit *et al.*, 1999; Escamilla-Rivera *et al.*, 2014; Sánchez *et al.*, 2015). En este sistema se presentan nueve tipos de vegetación: manglar, popal-tular, selva baja perennifolia, selva baja subperennifolia, selva alta

perennifolia, selva alta y mediana subperennifolia, pastizal cultivado, sabana y vegetación halófila (Ayala-Pérez, 2012) (Fig.3).

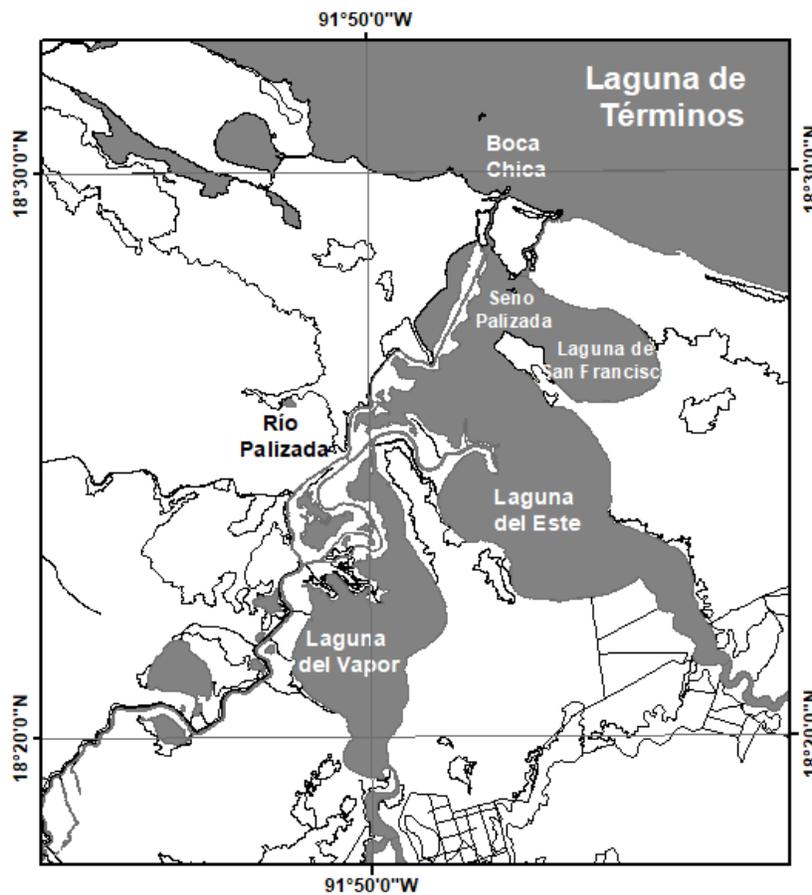


Figura 3. Localización geográfica de las localidades que componen el Sistema Palizada-Del Este.

Las actividades antropogénicas en el área protegida son diversas y con una tendencia de incremento continuo, entre las que destacan los asentamientos humanos, la pesca, la agricultura, la ganadería y la exploración y explotación petrolera (Bach *et al.*, 2005; Rivera-Arriaga, 2015).

### **Campañas de muestreo**

Se realizaron tres campañas de muestreo durante el año 2017 y 2018 en las diferentes temporadas climáticas que se presentan en la región (secas, lluvias y nortes). Se evaluaron 10 sitios de muestreo en cada sistema de estudio, los cuales fueron asignados según los criterios de gradiente salino, patrones de circulación, profundidad, y diversas características para que se tuviese una buena

representación de cada ambiente (Fig. 4). Para la toma de muestras se realizó un muestreo sistemático comenzando la recolecta de muestras desde las bocas de conexión con la Laguna de Términos hasta los sitios donde se ubicaban las lagunas interiores de cada sistema. Los sitios de muestreo fueron geoposicionados con ayuda de un GPS marca Garmin (Ayala-Pérez, 2006).

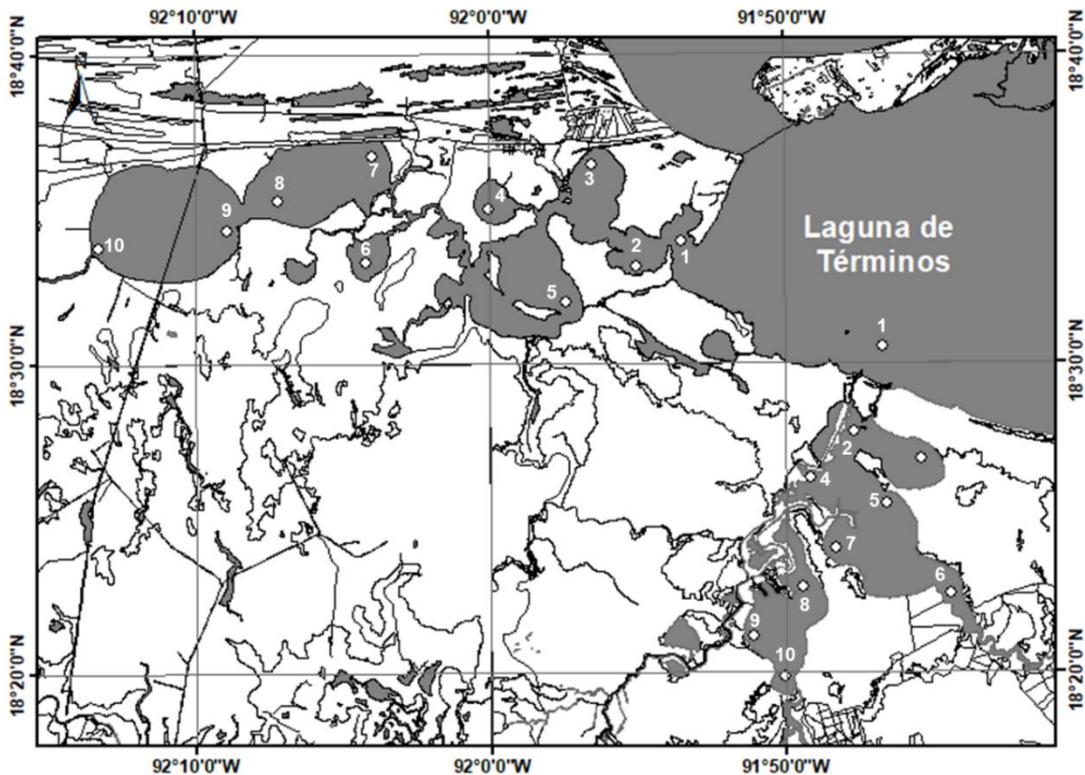


Figura 4. Sitios de muestreo de los SPA y SPE

## CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL ATMOSFÉRICA

### Análisis histórico de la temperatura y precipitación

Se evaluó el registro de temperatura a lo largo de 30 años (1985-2015) con datos obtenidos de la Estación Meteorológica Automática de Ciudad del Carmen, Campeche, la cual es la más cercana a las cabeceras Pom-Atasta y Palizada-Del Este.

A partir de los datos de temperatura recopilados se generaron series de tiempo mediante el modelo ARIMA, se obtuvo la dinámica y cambios históricos de las

variables atmosféricas de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación que se presenta en el sistema estuarino. Estos análisis se realizaron utilizando el programa SPSS v20.

### **Análisis ambiental de los periodos de muestreo**

Para determinar las características ambientales de la zona a lo largo de las tres diferentes temporadas de muestreo se recabaron datos meteorológicos de precipitación y temperatura, se obtuvieron de la estación meteorológica de Isla del Carmen de la Comisión Nacional del Agua. Se realizaron diagramas de caja y bigote para determinar la dinámica de cada variable ambiental.

## **ANÁLISIS DE LA HIDRÓSFERA**

### **Parámetros fisicoquímicos**

En cada sitio de muestreo se midieron los parámetros fisicoquímicos de temperatura, conductividad, pH, salinidad, sólidos disueltos totales (TDS), concentración de oxígeno disuelto y porcentaje de saturación de oxígeno, con ayuda de una sonda multiparamétrica YSI 556. Se consideraron dos niveles de profundidad de la columna de agua (superficie y fondo). La transparencia se registró con ayuda de un disco de Secchi y la profundidad con una sondaleza (Ayala-Pérez *et al.*, 2003), los datos de las variables se anotaron en hojas de campo.

Para la determinación de la concentración de formas de nitrógeno ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ) y fósforo ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) de la hidrósfera se tomaron muestras por duplicado de la parte superficial y de fondo, con ayuda de una botella Van-Dorn, las cuales se depositaron en botellas de 600 ml. Posteriormente éstas fueron etiquetadas y se mantuvieron a una temperatura de 4°C hasta su análisis en laboratorio (Ayala-Pérez *et al.*, 2003).

Las concentraciones de las formas nitrogenadas (amonio, nitratos y nitritos) y fósforo (fosfatos) fueron determinadas a partir de los protocolos estandarizados Hanna, y se utilizó un fotómetro multiparamétrico modelo Hi83200.

Las concentraciones de nutrientes fueron agrupadas para la obtención de las concentraciones de Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) el cual es la suma de las concentraciones de los nitratos, nitritos y amonio; y el Fósforo Inorgánico Disuelto

(FID) el cual contempla las concentraciones de ortofosfatos (Muciño-Márquez *et al.*, 2015).

Para la determinación de las concentraciones de CO<sub>2</sub> disuelto en la columna de agua se recolectaron por duplicado muestras de superficie y fondo, esta determinación se realizó siguiendo los protocolos estandarizados con el kit para determinación de concentraciones de Dióxido de Carbono marca Hanna, que se basa en la neutralización con hidróxido de sodio y titulado con el indicador de fenolftaleína (método HI3818).

## **ANÁLISIS DE LA BIÓSFERA**

### **Determinación de clorofila a fitoplanctónica**

Se determinó la concentración de clorofila-a a partir de muestras superficiales y de fondo de la columna de agua, se tomó un volumen de entre 150 y 250 ml de cada sitio y se filtraron con ayuda de membranas de fibra de vidrio de 0.45 µm de diámetro hasta su saturación. Al terminar la filtración se fijaron las muestras con una solución saturada de MgCO<sub>3</sub>. Los filtros fueron etiquetados y se mantuvieron a una temperatura de 4°C hasta su análisis en el laboratorio (de la Lanza *et al.*, 1998).

Los filtros fueron macerados con una varilla de vidrio en un tubo de centrifuga de 15 ml, posteriormente con una pipeta se les agregó 4 ml de solución acuosa de acetona al 90%, las muestras se mantuvieron en obscuridad y en refrigeración durante 24 horas. Se determinó la absorbancia con ayuda de un espectrofotómetro UV-Visible marca Perkin Elmer. Las mediciones de absorbancia se realizaron a 750 nm (corrección por turbidez), 665 nm (máximo de absorción de clorofila a), 645 nm (absorción de clorofila b), y 630 (absorción de clorofila c). Las concentraciones de clorofila-a se calcularon a partir de la ecuación de Pearson y Strickland (1963) (Ortiz, 2010).

$$\text{Clorofila } - a \left( \frac{mg}{m^3} \right) = \frac{11.8 (\text{Abs } 664) - 1.54 (\text{Abs } 647) - 0.08 (\text{Abs } 630) \times v}{V + 1}$$

Abs = Densidad óptica leída en el espectrofotómetro a la longitud de onda indicada

$v$  = volumen del solvente expresado en ml (volumen utilizado 10ml)

$V$  = Volumen de muestra filtrada

$l$  = Tamaño del paso del haz de luz que atraviesa la celda (1cm)

### **Análisis estadístico**

Con los resultados obtenidos en laboratorio y campo de las variables de nutrientes, CO<sub>2</sub> y clorofila-*a* se determinó la normalidad de los datos a partir de la prueba de Shapiro-Wilks la cual indica si los datos se ajustan a una distribución normal y la prueba de Levene utilizada para determinar la homocedasticidad de los datos (González *et al.* 2011).

Posteriormente, las variables que no se ajustaron a una distribución normal se analizaron con la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para varias muestras independientes con una significancia de  $p < 0.05$  entre los sitios de muestreo y la columna de agua (Mendoza *et al.*, 2013).

Se evaluaron los patrones espaciales y temporales de las variables que determinan las características fisicoquímicas en los SPA y SPE, a partir del Análisis de Correspondencia Canónica (ACC), el cual permitió determinar la correlación entre las variables ambientales y las concentraciones de nutrientes y clorofila-*a* (de la Lanza-Espino *et al.*, 1998; Díaz-Ruiz *et al.*, 2018).

Se realizó un Análisis de Conglomerados, a partir de la técnica de ligamiento promedio con distancias Euclídeana, para comparar la similitud entre los sitios de muestreo y agruparlos según sus características ambientales (de la Lanza *et al.*, 1998; Varona-Cordero y Gutiérrez-Mendieta, 2003).

### **Análisis de cobertura de manglar**

Se realizó un análisis de cobertura de manglar en la zona que comprende los dos sistemas fluvio-lagunares en estudio y en la zona de influencia que interactúa fuera del ANP (Zona II), estas aéreas fueron asignadas por la cercanía a los sistemas monitoreados. Este análisis se evaluó durante tres periodos a partir de datos de cobertura de manglar de CONABIO (2019), durante los años 1981-2005, 2005-2010 y de 2010-2015 (Fig. 5).

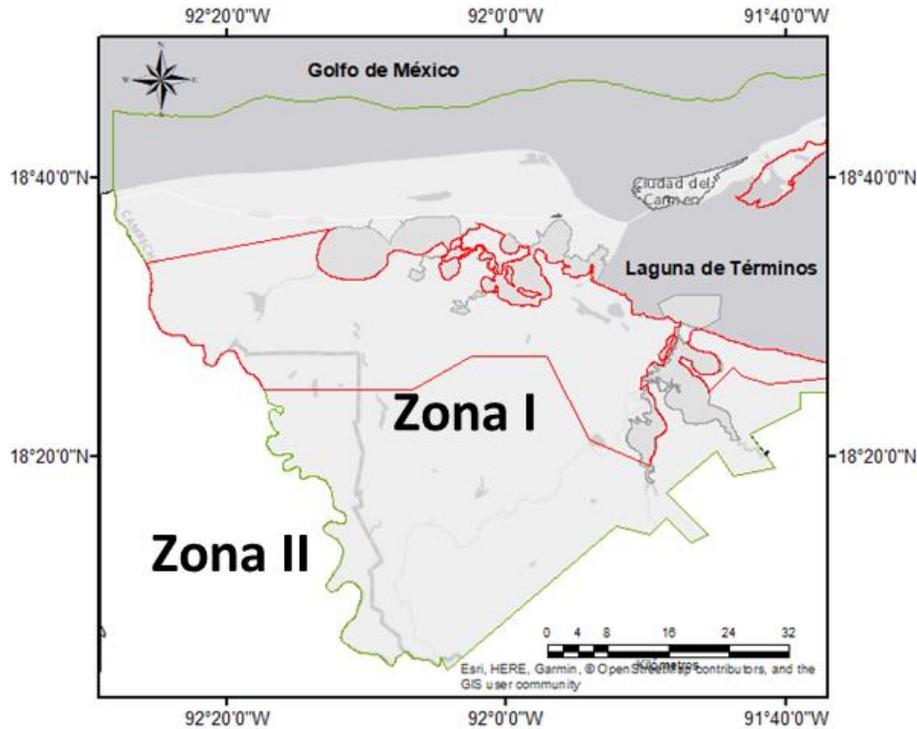


Figura 5. Zonificación del área para la evaluación de la cobertura de manglar, y el Índice de Desarrollo Humano.

Con los datos obtenidos se realizó la clasificación del área de cobertura total del bosque de manglar, el área de manglar sin transformación, la ganancia de manglar y la tasa de pérdida de manglar, para ambas zonas evaluadas (Rodríguez-Zúñiga *et al.* 2013).

### **Análisis sedimentario**

En cada sitio se realizó un muestreo de sedimentos durante la temporada de nortes con ayuda de una draga Van Veen, las muestras adquiridas se conservaron en bolsas plásticas selladas y etiquetadas para su posterior análisis en el laboratorio.

Se caracterizó el sedimento a partir del método de pipeteo, se siguieron las técnicas reportadas por Pérez-Rojas y Márquez-García (2017). Se tomó una muestra de 10 g y se puso en un vaso de precipitado. Se realizó la digestión de la materia orgánica de cada muestra con ayuda de peróxido de hidrogeno ( $H_2O_2$  al 30%), el cual se agregó hasta cubrir el sedimento, posteriormente se mantuvieron en oxidación entre 12 y 24 horas. Las muestras fueron lavadas y tamizadas con el tamiz 4 Ø para

separar la fracción gruesa de la muestra, esta fracción se colocó en una caja Petri previamente pesada y etiquetada.

La fracción restante que se filtró por la malla de 4 Ø se incorporó a una probeta de 1000 ml, la muestra se aforó hasta llegar a los 1000 ml y se agitó por un tiempo de 2 minutos y se dejó reposar durante 24 horas para descartar floculación.

Posterior a este tiempo se agitaron las muestras nuevamente durante 2 minutos y se contabilizó el tiempo de sedimentación de las partículas al momento de retirar el agitador. Se midieron los tiempos de sedimentación de cada muestra y se realizaron las separaciones de los sedimentos de 4 Ø, 5 Ø, 6 Ø, 7 Ø, 8 Ø y 9 Ø, las muestras fueron guardadas en una caja petri previamente etiquetadas, las cuales se secaron en un horno a una temperatura menor de 60 °C. Después de enfriarse se pesaron con una precisión de 0.0001 gramos.

Se realizaron los cálculos para obtener los porcentajes acumulados de cada tamaño de grano, se utilizó la siguiente formula:

$$\% \text{ Acumulado} = \frac{A + F - P}{A + F} (100)$$

Donde:

A = Peso de la arena retenida en el tamiz 4 Ø.

F = Peso de la primera muestra pipeteada X 40

P = Peso de cada muestra pipeteada X 40

Se determinaron los porcentajes de arena, limos y arcillas presentes en cada muestra y se clasificaron con base en el tamaño de grano, se asignó cada grupo textural con ayuda del diagrama ternario de Shepard (1957).

Los resultados se graficaron a partir de los porcentajes de arenas, limos y arcillas que se obtuvieron en cada muestra. Posteriormente se realizaron mapas de distribución para cada tamaño de grano.

## **Análisis de Sistemas de Información Geográfica**

Con los datos obtenidos de las variables de nutrientes, fisicoquímicas, CO<sub>2</sub>, clorofila a, coberturas de manglar, etc. en el sistema Pom-Atasta y Palizada-Del Este, se realizaron mapas de distribución espacial y temporal, se realizaron planos de isoconcentraciones de las diferentes variables para cada uno de los sitios seleccionados. Para ello se usó el software ArcGis V.10.5. y se aplicó el método de grillado geoestadístico de la Distancia Inversa Ponderada (IDW por sus siglas en inglés), el cual permite realizar una interpolación de los diferentes datos para cada estación de muestreo. Este análisis geoestadístico permitió la correlación espacial de manera predictiva (Melo, 2010; Barberis *et al.*, 2017).

## **RESULTADOS**

### **Variabilidad ambiental**

Se evaluó el registro de temperatura ambiental durante un periodo de treinta años (1985-2015) con datos obtenidos de la Estación Meteorológica Automática de Ciudad del Carmen, Campeche. Para el periodo de treinta años se registraron las temperaturas máximas en la temporada de secas, en el mes de mayo se registró un promedio de 36°C, las menores temperaturas fueron registradas en los meses de enero y diciembre, las temperaturas mínimas fueron de 19°C (Fig. 6).

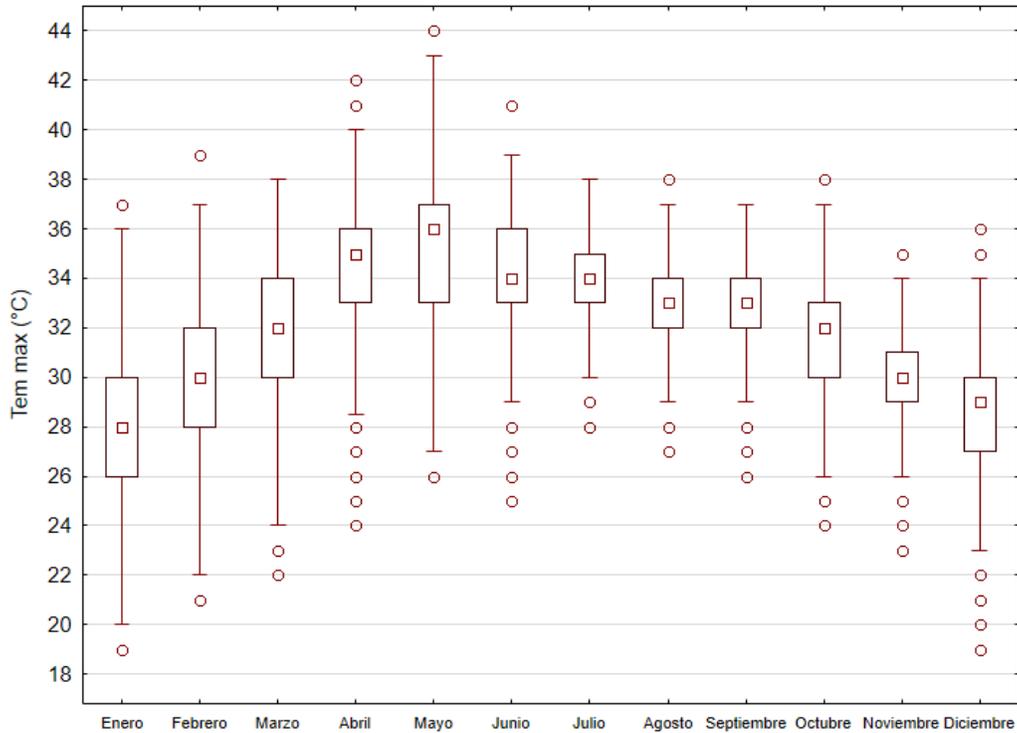


Figura 6. Temperaturas máximas registradas en la Estación Meteorológica Automática de Ciudad del Carmen durante el periodo 1985-2015.

Así mismo, se generó un análisis de series de tiempo utilizando el modelo de media móvil integrada autorregresiva (ARIMA, por sus siglas en inglés), en el cual se observó una tendencia estacional de temperatura máxima de 31.6°C. Se realizó una proyección del comportamiento de la temperatura del periodo 2015 al 2025, se observó una tendencia estacionaria entre los 31 y 32 °C en promedio (Fig. 7).

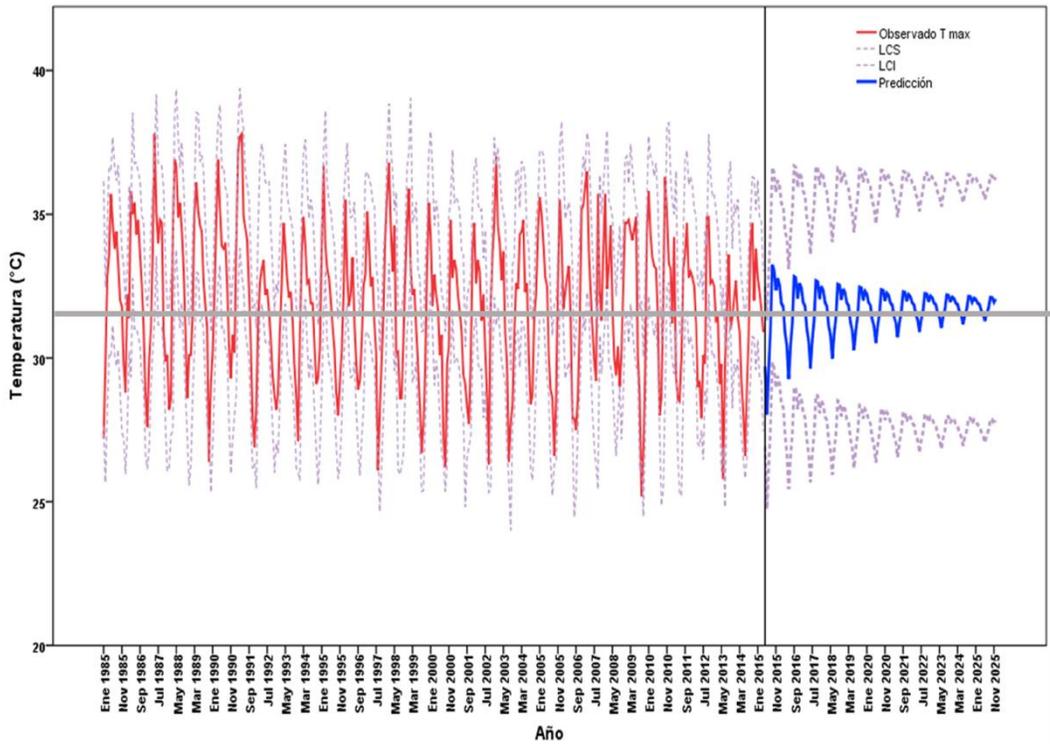


Figura 7. Modelo ARIMA de las Temperaturas máximas registradas en la Estación Meteorológica Automática de Ciudad del Carmen durante el periodo 1985-2015.

Se realizó el análisis de las temperaturas mínimas, en donde se registró el periodo más cálido en mayo, con temperaturas de 24°C. Para las temperaturas mínimas se registraron durante enero y diciembre, con temperaturas de hasta 20°C (Fig. 8).

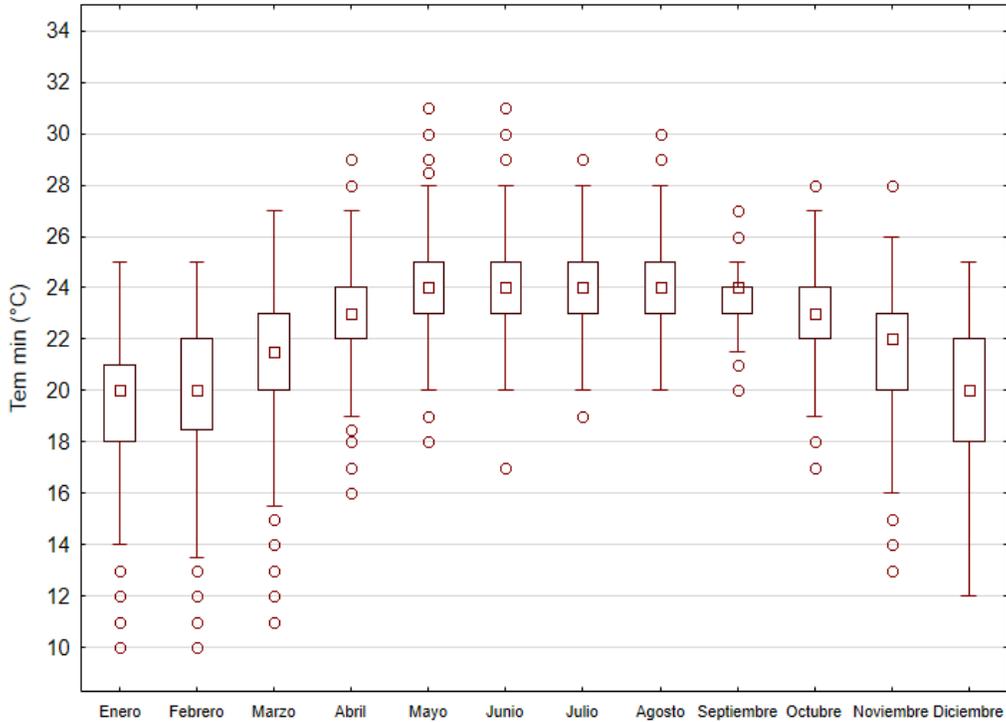


Figura 8 Temperaturas máximas registradas en la Estación Meteorológica Automática de Ciudad del Carmen durante el periodo 1985-2015.

Para el análisis de series de tiempo de las temperaturas mínimas registradas durante el periodo 1985 al 2015, se obtuvo una oscilación estacional entre los 22.2°C en promedio. Se realizó un modelo de proyección del año 2015 al 2025 donde las temperaturas mínimas oscilaron entre los 22 y 23 °C (Fig. 9).

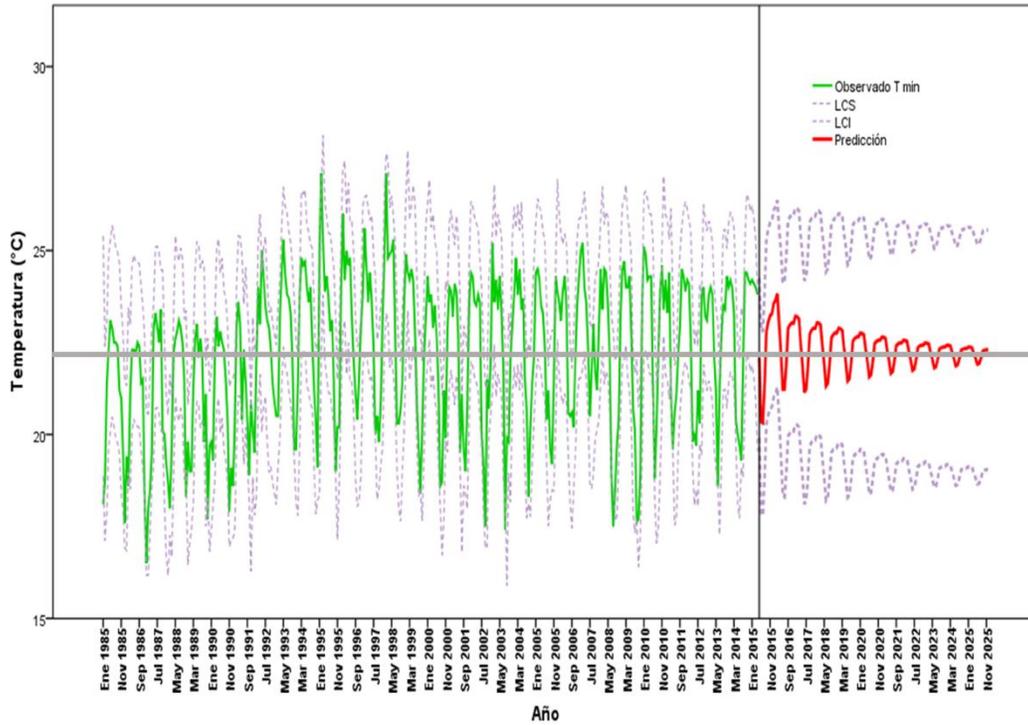


Figura 9. Modelo ARIMA de las Temperaturas mínimas registradas en la Estación Meteorológica Automática de Ciudad del Carmen durante el periodo 1985-2015.

Se realizó un análisis de la precipitación durante el periodo 1985-2015, el periodo con máxima precipitación se registró desde el mes de junio al mes de septiembre, con valores de 40 mm, este periodo corresponde a la época de lluvias que se registran en la zona. Para los meses octubre y noviembre se observó una precipitación considerable correspondiente a la época de nortes, se observaron valores máximos de 24 mm de precipitación (Fig.10).

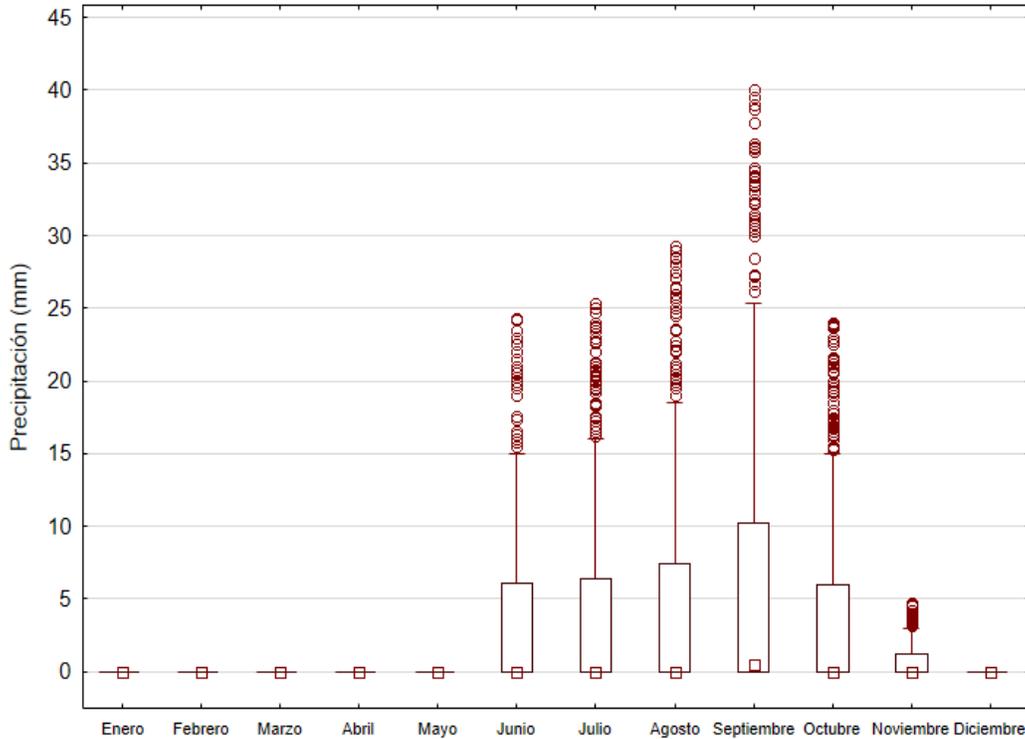


Figura 10. Precipitación mensual registrada en la Estación Meteorológica Automática de Ciudad del Carmen durante el periodo 1985-2015.

Los datos obtenidos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación durante el periodo de noviembre 2017 a octubre 2018 que corresponde al ciclo de los muestreos realizados, se registraron las temperaturas máximas altas de hasta 35.5°C que corresponden al mes en el cual se realizó el muestro de la temporada de secas, las temperaturas mínimas registradas fueron de 16.7°C durante enero, el cual corresponde a la temporada de nortes. Las precipitaciones máximas fueron de 238 mm, estas fueron registradas en septiembre, lo que corresponde a la temporada de lluvias (Fig. 11).

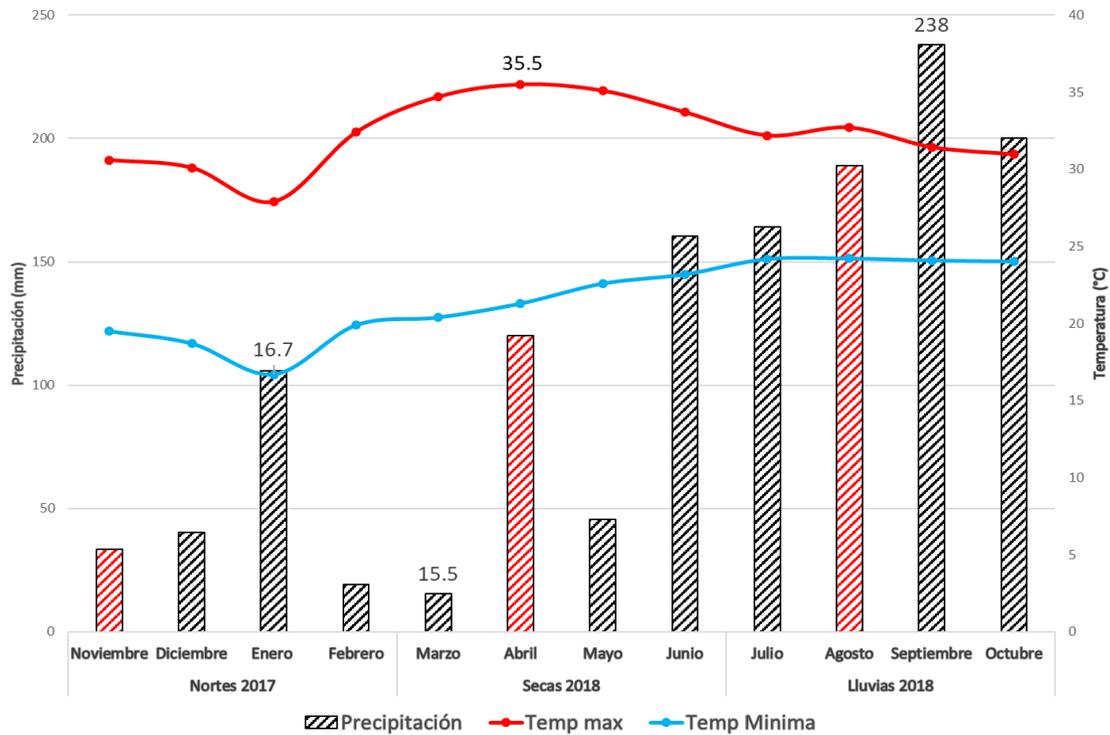


Figura 11. Dinámica de temperaturas máximas, mínimas y precipitación de las temporadas de nortes, secas y lluvias (noviembre 2017 a octubre 2018), de la estación El Carmen.

Se registró la dinámica de la velocidad de viento a partir de los datos climatológicos de la estación de Ciudad del Carmen. Durante la temporada de nortes se observó el predominio de vientos en dirección de noreste a suroeste, las velocidades máximas fueron de 11.10 m/s, y mínimas entre 0.50 y 2.10 m/s, la mayor influencia de los vientos se registró en el sistema Pom-Atasta. Las velocidades del viento durante la temporada de secas se registraron en dirección de sureste a noroeste, con velocidad de 3.60 a 5.7 m/s, estos vientos durante esta temporada no influyen significativamente en los SPA y SPE. En la temporada de lluvias se registraron velocidades mayores a 11.10 m/s con dirección noreste a suroeste, las cuales influyen directamente a ambos sistemas (Fig. 12).

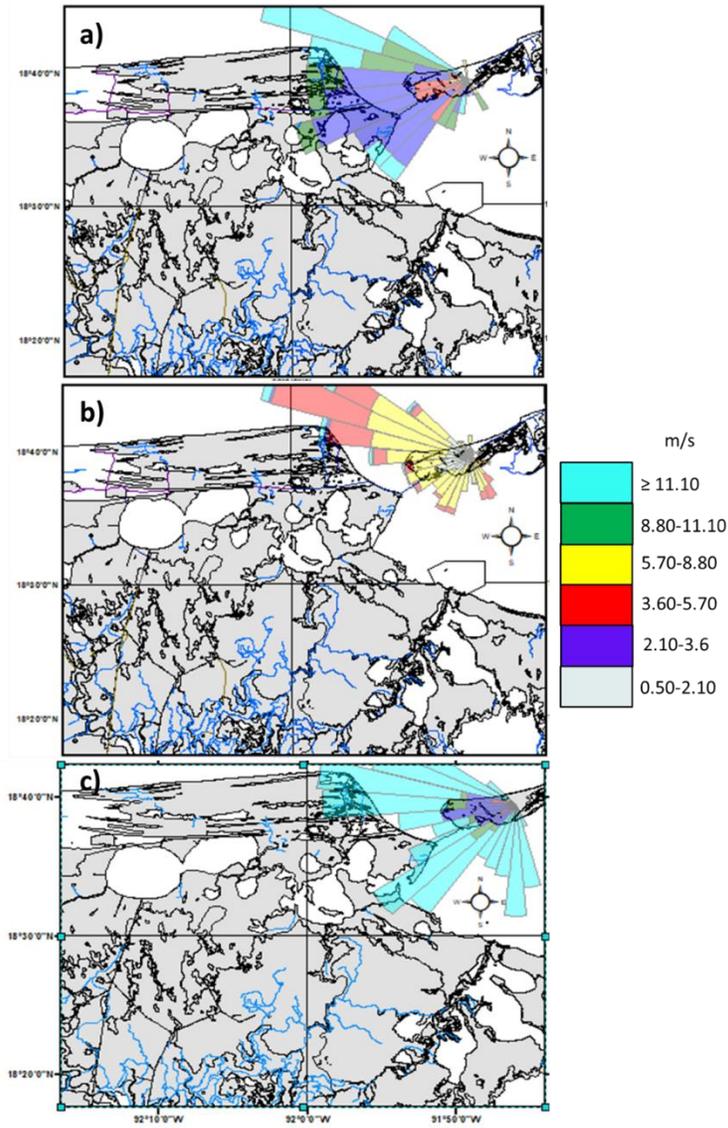


Figura 12. Modelos de velocidad de vientos que influyen en los SPA y SPE durante tres temporadas climáticas: a) nortes, b) secas y c) lluvias.

## ANÁLISIS DE LA HIDRÓSFERA

### SISTEMA POM-ATASTA

Se describen las variables fisicoquímicas y de nutrientes que fueron registradas a escala espacial y temporal, a lo largo de los diferentes sitios de muestreo y en dos estratos de la columna de agua (superficial y fondo) durante tres temporadas climáticas: nortes (noviembre de 2017), secas (abril de 2018) y lluvias (agosto de 2018).

## Temperatura

En el SPA la temperatura mínima fue de 23.7°C en el sitio tres de la temporada de nortes, la temperatura máxima fue de 33.9°C registrada en la estación seis en la temporada de secas (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de las variables fisicoquímicas registradas en el SPA en tres temporadas de muestreo.

		Estación										Promedio
		PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6	PA7	PA8	PA9	PA10	
Nortes	Temperatura (°C)	24.5	25.3	23.7	23.9	25.7	25.2	26.1	25.7	25.2	24.7	25.0
	Salinidad (UPS)	0.6	1.1	1.0	1.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.6
	OD (mg/L)	3.4	3.2	2.8	3.9	3.2	3.1	3.7	3.8	3.4	2.8	3.3
	pH	7.0	7.5	7.6	7.6	7.2	7.3	7.3	7.3	7.3	7.6	7.4
Secas	Temperatura (°C)	29.4	28.7	29.8	30.3	30.6	33.9	30.9	30.8	30.7	30.5	30.6
	Salinidad (UPS)	26.4	24.4	21.5	11.9	10.9	2.1	1.4	0.9	0.5	0.4	10.0
	OD (mg/L)	3.8	3.9	3.5	4.2	4.5	5.0	4.3	4.2	4.1	4.2	4.2
	pH	6.9	7.2	7.5	7.4	7.3	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.4
Lluvias	Temperatura (°C)	29.7	29.0	29.7	30.4	30.6	31.0	31.1	31.0	30.8	31.1	30.4
	Salinidad (UPS)	20.9	20.2	18.9	17.1	12.3	5.6	3.0	1.8	0.8	0.7	10.1
	OD (mg/L)	3.6	3.9	4.0	4.0	4.0	4.5	4.5	4.2	4.4	4.1	4.1
	pH	6.6	6.3	7.0	6.6	7.4	8.8	8.7	8.8	8.7	8.4	7.7

La temperatura promedio registrada en la temporada de nortes osciló entre los 25°C, para la temporada de secas fue de 30.6°C, en la temporada de lluvias de 30.4°C (Fig. 11). El análisis Kruskal-Wallis no presentó diferencias significativas con relación a las diferentes temporadas y sitios de muestreo (nortes:  $p = 0.34$ ; secas:  $p = 0.16$ ; lluvias:  $p = 0.08$ ).

En el caso de la distribución de temperatura superficial durante la temporada de nortes fue de 25.4°C y de fondo de 24.5°C, en la temporada de secas se registraron temperaturas superficiales de 31.3°C y de fondo de 29.7°C, en la temporada de lluvias se registraron valores superficiales de 30.67°C y de fondo de 30.19°C. El análisis Kruskal-Wallis demostró diferencias significativas entre la temperatura superficial y de fondo en la temporada de nortes, en la temporada de secas y lluvias

no se registraron diferencias estadísticas (nortes:  $p = 0.045$ ; secas:  $p = 0.06$ ; lluvias:  $p = 0.13$ ) (Fig. 13).

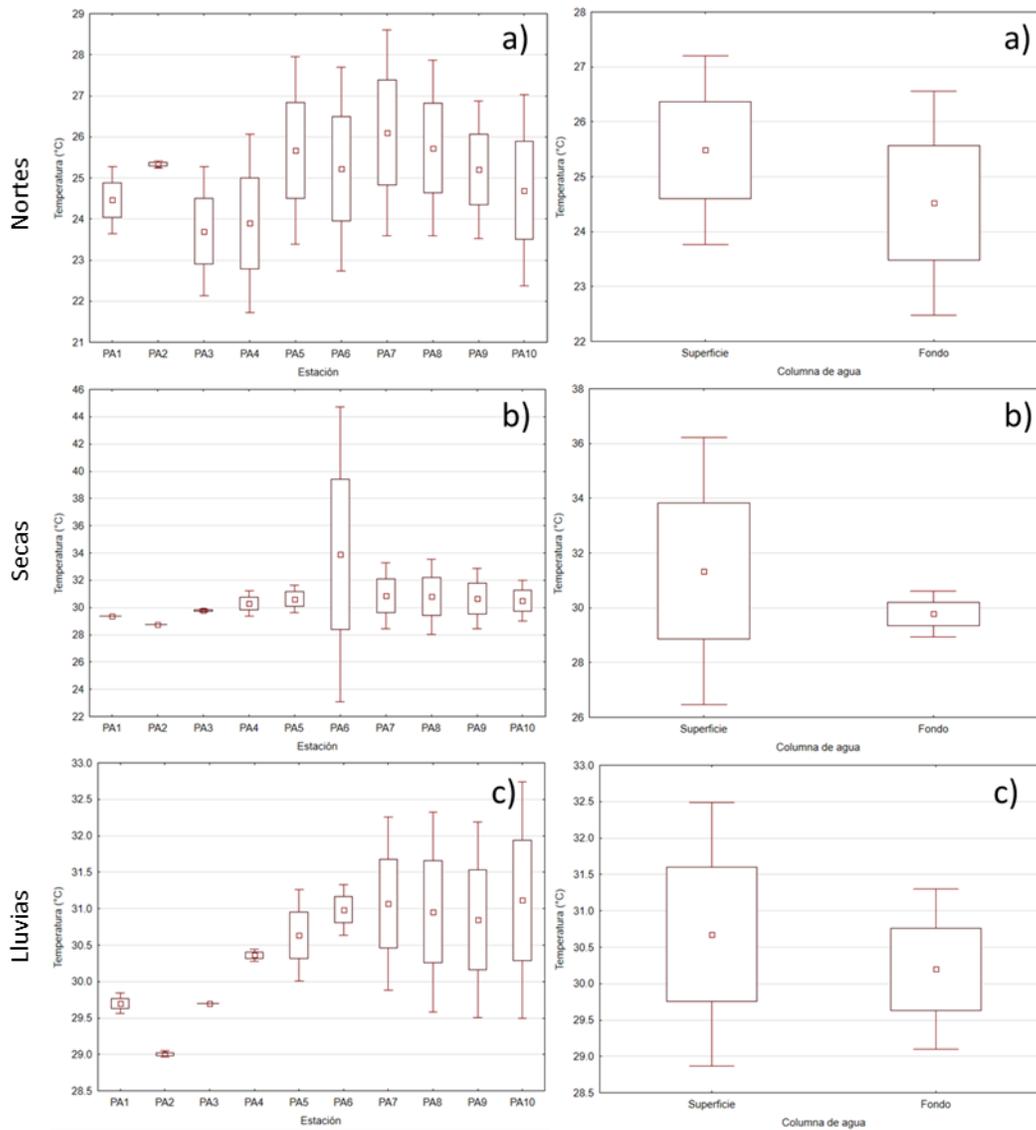


Figura 13. Dinámica de temperatura en diferentes temporadas en los sitios de muestreo, a dos diferentes profundidades de la columna de agua del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

## Salinidad

Los valores mínimos de salinidad se registraron en la estación nueve de la temporada de nortes, los niveles fueron de 0.24, las salinidades máximas fueron de 26.4, se registraron en la estación uno durante la temporada de secas.

La distribución de salinidad en la columna de agua presentó un gradiente de concentración que va desde la estación uno a la estación diez, en las tres temporadas climáticas monitoreadas. En la temporada de nortes se registraron concentraciones entre los 0.3 - 0.6, para la temporada de secas fue entre 40.3 - 0.41, y en la temporada de lluvias entre 0.78 - 21.9 (Fig. 13). El análisis Kruskal-Wallis demostró diferencias significativas entre sitios y temporadas de muestreo, durante la temporada de nortes se observaron diferencias entre los sitios tres y cuatro y el resto de los sitios, para la temporada de secas se observó un patrón temporal de salinidad que disminuye considerablemente a partir del sitio tres. En la temporada de secas se observa una disminución a partir del sitio cuatro (nortes:  $p = 0.35$ ; secas:  $p = 0.0263$ ; lluvias:  $p = 0.0262$ ).

La salinidad superficial promedio durante la temporada de nortes fue de 0.49 y 0.66, para el agua de fondo en la temporada de secas fue de 11.43 para el agua superficial y de 10.08 en el agua de fondo, y para la temporada de lluvias se registraron concentraciones promedio en el agua superficial de 10.09 y en el agua de fondo de 10.15 (Fig. 14). El análisis comparativo de Kruskal-Wallis no presentó diferencias significativas entre los sitios de muestreo y las tres temporadas (nortes:  $p = 0.73$ ; secas:  $p = 0.85$ ; lluvias:  $p = 0.93$ ).

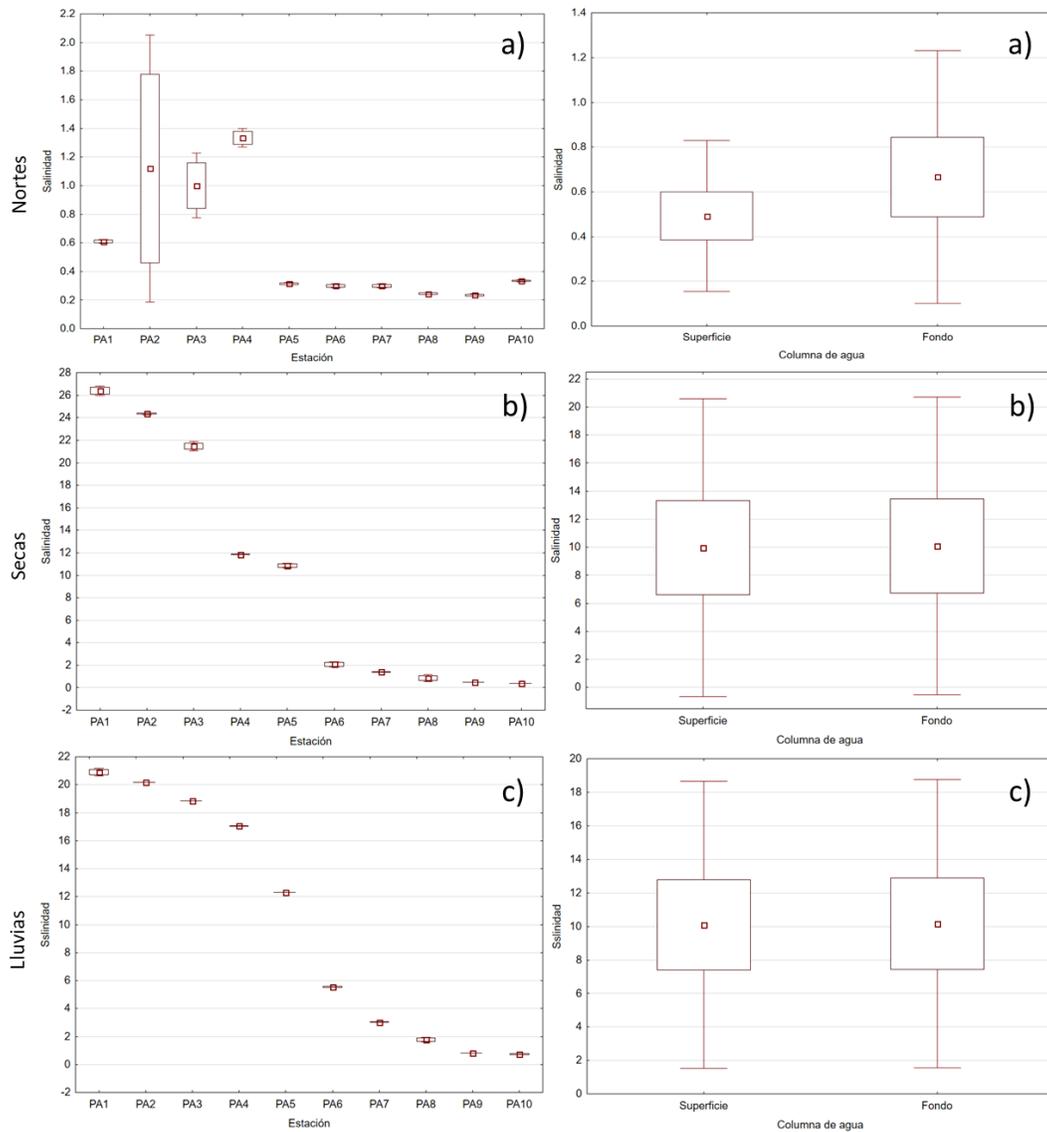


Figura 14. Dinámica de salinidad en los sitios de muestreo y a dos distintas profundidades de la columna de agua del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

## Oxígeno disuelto

Las concentraciones máximas de oxígeno disuelto fueron de 4.95 mg/L, registradas durante la temporada de secas en el sitio seis y las concentraciones mínimas fueron de 2.82 mg/L en el sitio tres de la temporada de nortes.

La concentración de oxígeno disuelto promedio en la temporada de nortes fue de 3.34 mg/L, en la temporada de secas fue de 4.17 mg/L, y en la temporada de lluvias se registró una concentración promedio de 4.10 mg/L (Fig. 15). El análisis Kruskal-

Wallis no demostró diferencias significativas entre los sitios de muestreo y cada temporada (nortes:  $p = 0.15$ ; secas:  $p = 0.06$ ; lluvias:  $p = 0.10$ ).

Los promedios de oxígeno superficial en la temporada de nortes fueron de 3.55 mg/L y de fondo de 3.11 mg/L, para la temporada de secas se registraron concentraciones superficiales de 4.2 mg/L y de fondo de 4.1 mg/L y para la temporada de lluvias fue de 4.0 mg/L en superficie y en el fondo de 4.11 mg/L. El análisis Kruskal-Wallis no presentó diferencias significativas entre los sitios de muestreo y la columna de agua (nortes:  $p = 0.058$ ; secas:  $p = 0.36$ ; lluvias:  $p = 0.54$ ).

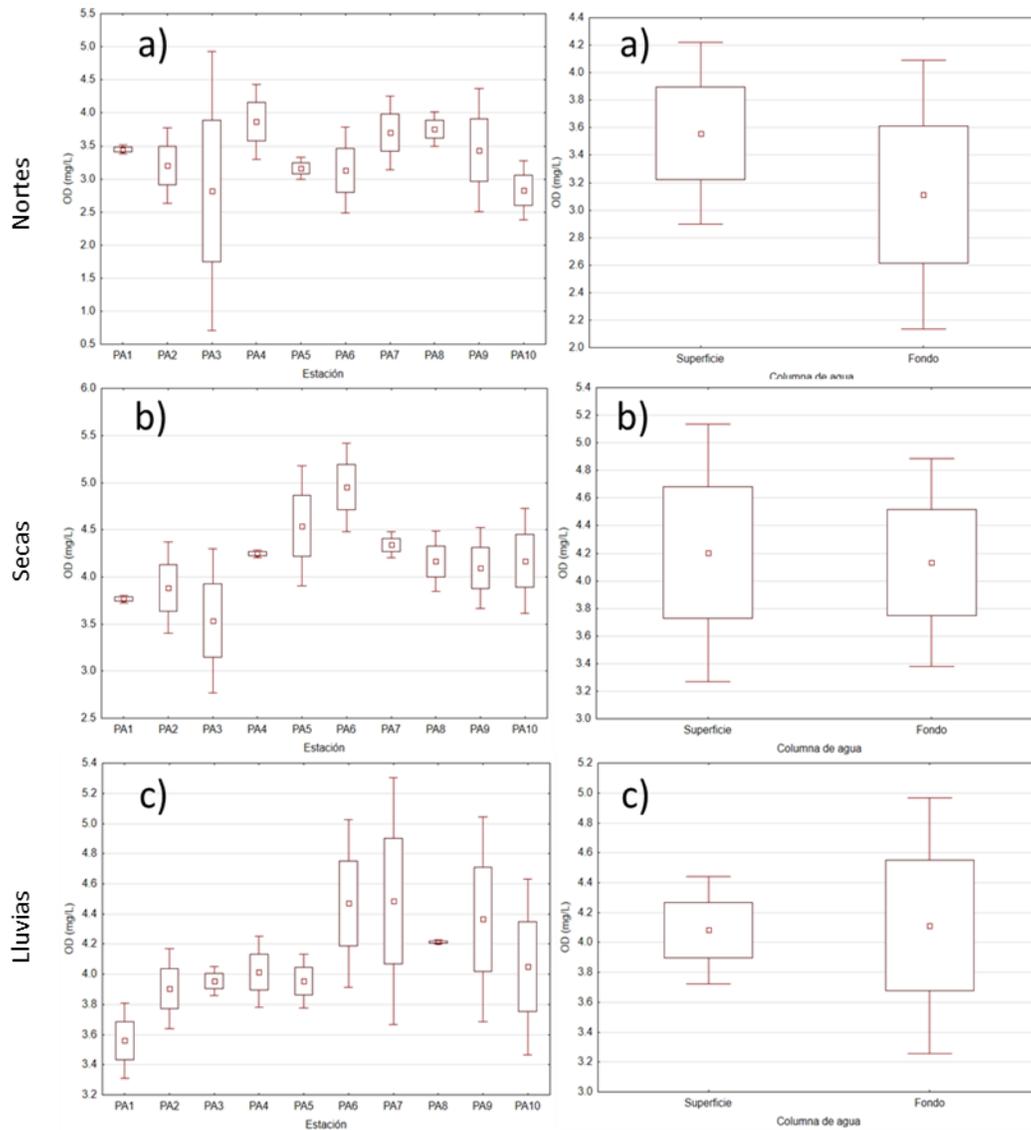


Figura 15. Concentración de oxígeno disuelto de los sitios de muestreo, a dos diferentes profundidades de la columna de agua del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

## pH

Para la variable de pH se registraron valores mínimos de 6.3 en el sitio dos durante la temporada de lluvias, los valores máximos fueron de 8.8, los cuales se registraron en el sitio ocho durante la temporada de lluvias, en la cual se observó la mayor variabilidad con relación a los diferentes sitios de muestreo.

En la temporada de nortes el pH promedio superficial fue de 7.4 y de fondo en 7.3, para la temporada de secas se registraron valores superficiales de 7.49 y de fondo

de 7.37, durante la temporada de lluvias se registraron niveles superficiales de 7.81 y de fondo de 7.61 (Fig. 16).

El análisis estadístico de Krukall-Wallis solo mostró diferencias significativas en la temporada de lluvias entre los primeros sitios de muestreo (nortes:  $p = 0.05$ ; secas:  $p = 0.11$ ; lluvias:  $p = 0.040$ ).

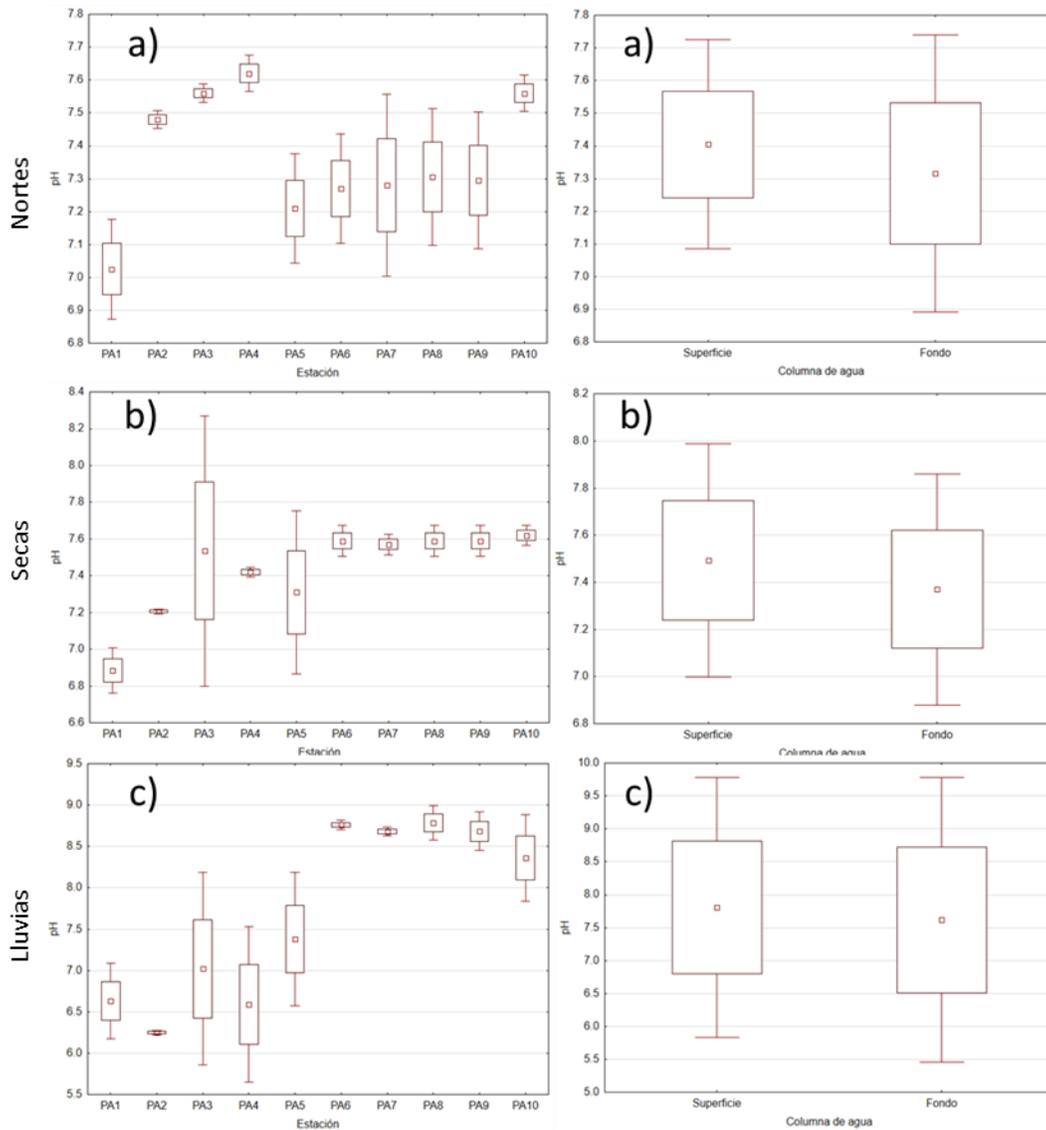


Figura 16. Dinámica de pH en los sitios de muestreo a dos diferentes profundidades de la columna de agua en diferentes temporadas climáticas del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

### **Análisis de agrupamiento de las variables fisicoquímicas**

En el análisis clúster en la temporada de nortes se observó una homogeneidad entre los sitios monitoreados para los distintos parámetros fisicoquímicos, e integra los sitios con las condiciones similares con excepción a los sitios tres y cuatro, que presentaron características particulares, con esto se puede clasificar a partir de la variable de salinidad que los sitios monitoreados presentaron características de un ambiente oligohalino homogéneo a lo largo de todo el SPA.

En la temporada de secas se observaron dos grupos con distintos comportamientos ambientales respecto a las variables fisicoquímicas evaluadas. El primer grupo relaciona los sitios uno, dos y tres, los cuales presentaron una mayor interacción con la Laguna de Términos lo que determina condiciones particulares, con relación a la salinidad presentan condiciones polihalinas, y el grupo dos lo constituyen el resto de los sitios, en los cuales se generan ambientes oligohalinos.

Durante la temporada de lluvias se observaron condiciones polihalinas en los sitios uno, dos, tres, cuatro y cinco, y condiciones oligohalinas en los sitios seis, siete, ocho, nueve y diez, por lo cual la variable de salinidad determinó los diferentes cambios temporales en el sistema (Fig. 17).

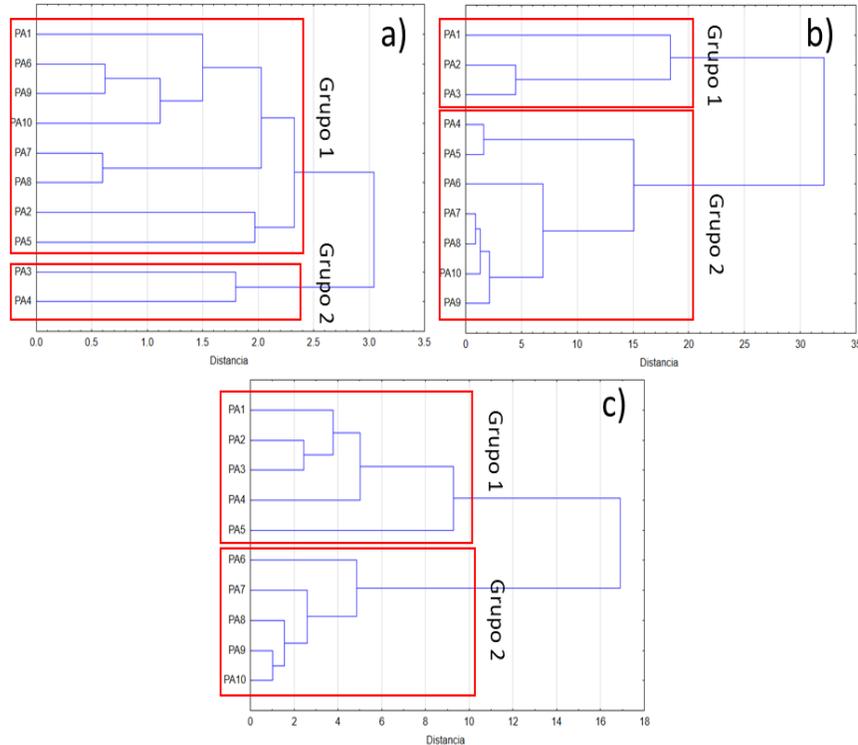


Figura 17. Análisis de clúster de las variables fisicoquímicas del SPA durante tres temporadas climáticas. a) Temporada de nortes. b) Temporada de secas. c) Temporada de lluvias.

## NUTRIENTES

### Nitratos

En el caso de los nutrientes se registraron concentraciones máximas de nitratos de 13.85 mg/L en el sitio cuatro durante la temporada de secas, las concentraciones mínimas fueron de 0.30 mg/L en el sitio tres de la temporada de lluvias (Tabla 2). El análisis estadístico de Kruskal-Wallis entre las tres diferentes temporadas y sitios de muestreo y sitios no presentó diferencias estadísticas (nortes:  $p = 0.43$ ; secas:  $p = 0.58$ ; lluvias:  $p = 0.16$ ).

Tabla 2. Concentración de nutrientes durante la temporada de nortes, secas y lluvias.

		Estación										Promedio
		PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6	PA7	PA8	PA9	PA10	
Nortes	Amonio (mg/L)	0.16	0.2	0.26	0.31	0.37	0.33	0.22	0.18	0.17	0.27	0.25
	Nitritos (mg/L)	0.07	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04
	Nitratos (mg/L)	1.1	4.93	5.5	4.43	3.38	5.05	2.13	3.25	2.63	6.38	3.88
	Fosfatos (mg/L)	0.03	0.03	0.03	0.04	0.21	0.09	0.06	0.02	0.02	0.03	0.05
Secas	Amonio (mg/L)	1.01	0.58	0.14	0.2	0.23	0.22	0.27	0.27	0.24	0.16	0.33
	Nitritos (mg/L)	0.05	0.04	0.04	0.05	0.06	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04
	Nitratos (mg/L)	11.05	10.95	3.35	13.85	12.3	4.45	13.75	4.7	12.05	5.85	9.23
	Fosfatos (mg/L)	0.04	0.53	0.82	0.42	0.55	0.1	0.11	0.07	0.07	0.09	0.28
Lluvias	Amonio (mg/L)	0.62	0.81	0.68	0.12	0.2	0.18	0.09	0.11	0.03	0.13	0.3
	Nitritos (mg/L)	0.04	0.05	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05	0.05	0.11	0.05
	Nitratos (mg/L)	0.8	2.93	0.3	0.5	0.7	0.35	2.68	1.35	0.95	2.7	1.33
	Fosfatos (mg/L)	0.05	0.11	0.27	0.06	0.16	0.12	0.1	0.17	0.14	0.11	0.13

Durante la temporada de nortes se registraron concentración promedio de nitrato en el agua superficial de 3.16 mg/L y el agua de fondo de 4.59 mg/L, en la temporada de secas se registraron concentraciones superficiales de 9.81 mg/L y 8.65 mg/L en el agua de fondo, para la temporada de lluvias se registraron concentraciones superficiales de 1.52 mg/L y de fondo de 1.12 mg/L (Fig. 18). No se registraron diferencias significativas entre los nitratos superficiales y de fondo de la columna de agua para las tres temporadas de muestreo (nortes:  $p = 0.13$ ; secas:  $p = 0.73$ ; lluvias:  $p = 0.70$ ).

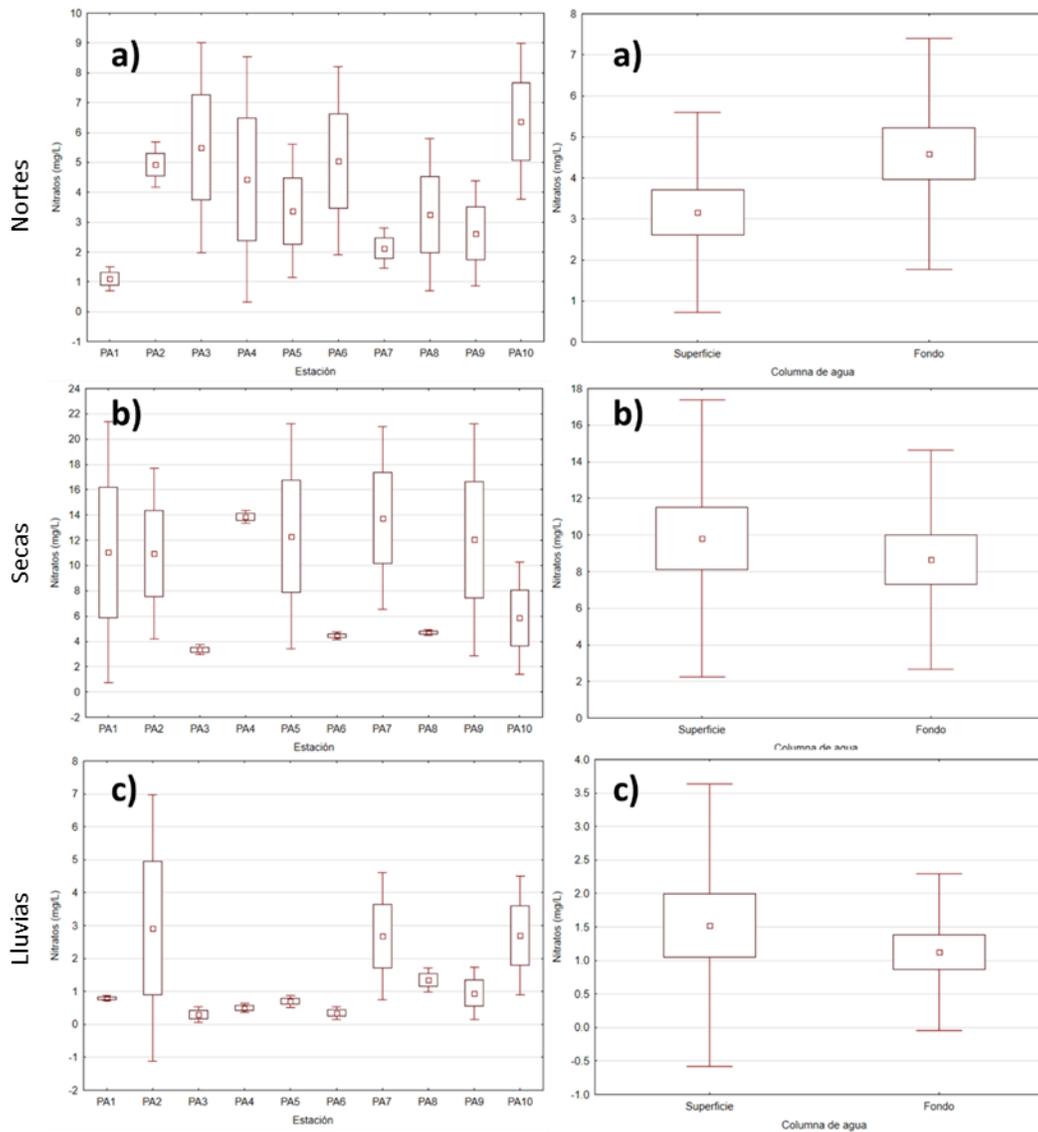


Figura 18. Dinámica de nitratos a escala espacial y temporal del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

## Nitritos

Se registraron concentraciones de nitritos máximas de 0.11 mg/L en la estación diez durante la temporada de lluvias, los valores mínimos fueron de 0.03 mg/L en las tres temporadas climáticas. Con el análisis estadístico Kruskal-Wallis no se encontraron diferencias significativas entre los sitios monitoreados y las diferentes temporadas de muestreo (nortes:  $p= 0.80$ ; secas:  $p= 0.64$ ; lluvias:  $p= 0.88$ ).

El promedio superficial de nitritos en la temporada de nortes fue de 0.043 mg/L, y de fondo de 0.03 mg/L, para la temporada de secas se registraron concentraciones superficiales de 0.036 mg/L y de fondo de 0.042 mg/L, en la temporada de lluvias se registró un promedio superficial y de fondo de 0.046 mg/L (Fig. 19).

El análisis estadístico Kruskal-Wallis entre las tres diferentes temporadas y sitios de muestreo no se observaron diferencias estadísticas (nortes:  $p= 0.67$ ; secas:  $p= 0.66$ ; lluvias:  $p= 0.19$ ).

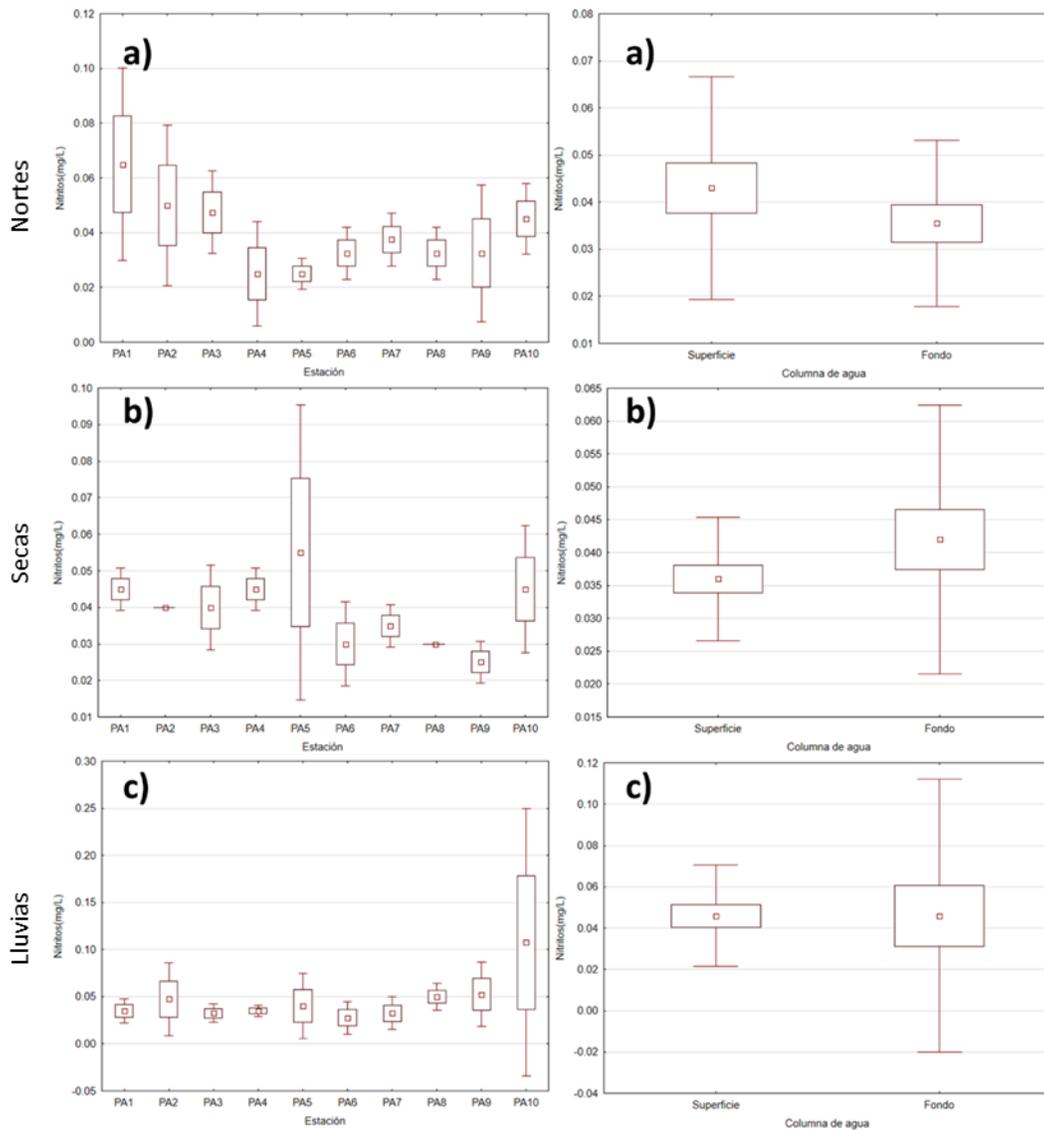


Figura 19. Dinámica de nitritos a escala espacial y temporal del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

## Amonio

Las concentraciones máximas promedio de amonio fueron de 1.01 mg/L en la estación uno durante la temporada de secas, y las concentraciones mínimas fueron de 0.03 mg/L en la estación nueve de la temporada de lluvias. El análisis estadístico de comparación de medias no presentó diferencias entre los sitios de muestreo y las tres temporadas monitoreadas (nortes:  $p = 0.14$ ; secas:  $p = 0.20$ ; lluvias:  $p = 0.10$ ).

Las concentraciones promedio superficiales durante la temporada de nortes fueron de 0.25 mg/L y de fondo de 0.23 mg/L, para la temporada de secas en el agua superficial se registraron valores de 0.10 mg/L y en el agua de fondo de 0.25 mg/L, en la temporada de lluvias se registraron concentraciones superficiales de 0.16 mg/L y de fondo de 0.42 mg/L (Fig. 20). La comparación estadística con relación a las temporadas climáticas y el agua superficial y de fondo no presentaron diferencias significativas (nortes:  $p = 0.93$ ; secas:  $p = 0.40$ ; lluvias:  $p = 0.59$ ).

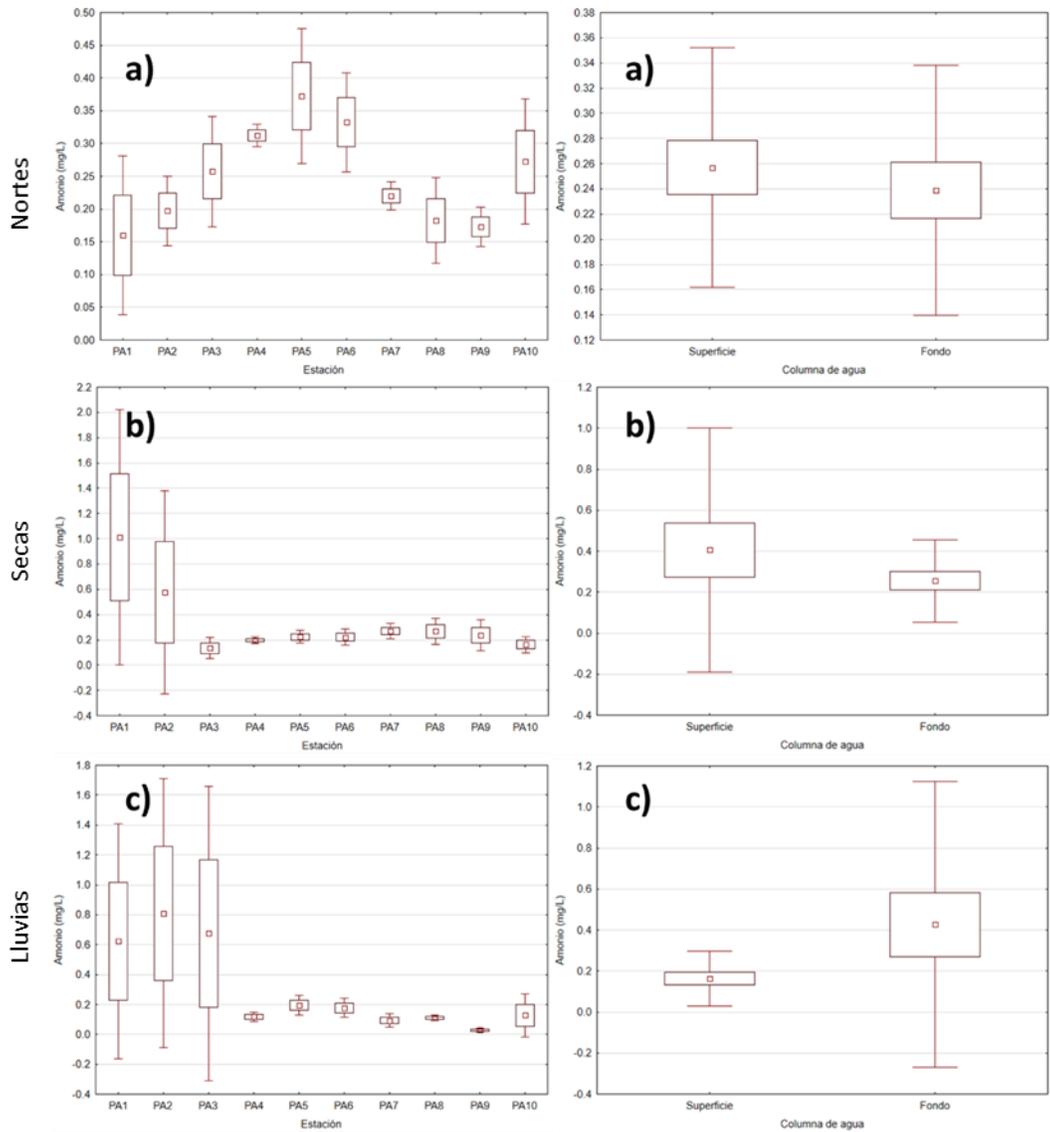


Figura 20. Dinámica de amonio a escala espacial y temporal del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

### Nitrógeno Inorgánico Disuelto

Las concentraciones de los compuestos nitrogenados de nitratos, nitritos y amonio se sumaron para la obtención de Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID), las concentraciones máximas de la temporada de nortes fueron de 6.05 mg/L en el sitio diez, durante la temporada de secas se registraron concentraciones máximas de 14 mg/L en los sitios cuatro y siete, en la temporada de lluvias se registraron máximos de 3.78 mg/L en el sitio dos.

Asimismo, las mayores concentraciones de NID se registraron en la temporada de secas en la zona que tiene interacción con la Laguna de Términos que corresponde a la Boca del SPA, Laguna de San Carlos, Las Palmas y Laguna de Atasta. Durante la temporada de nortes se observó un comportamiento homogéneo con relación a esta variable a lo largo de los sitios evaluados, se registraron valores por debajo de 6.05 mg/L. En la temporada de lluvias las concentraciones fueron menores a 4 mg/L a lo largo del sistema.

El análisis estadístico Kruskal-Wallis presentó diferencias significativas con relación a las concentraciones de Nitrógeno Inorgánico Disuelto y las tres temporadas climáticas ( $p = 0.005$ ) (Fig. 21).

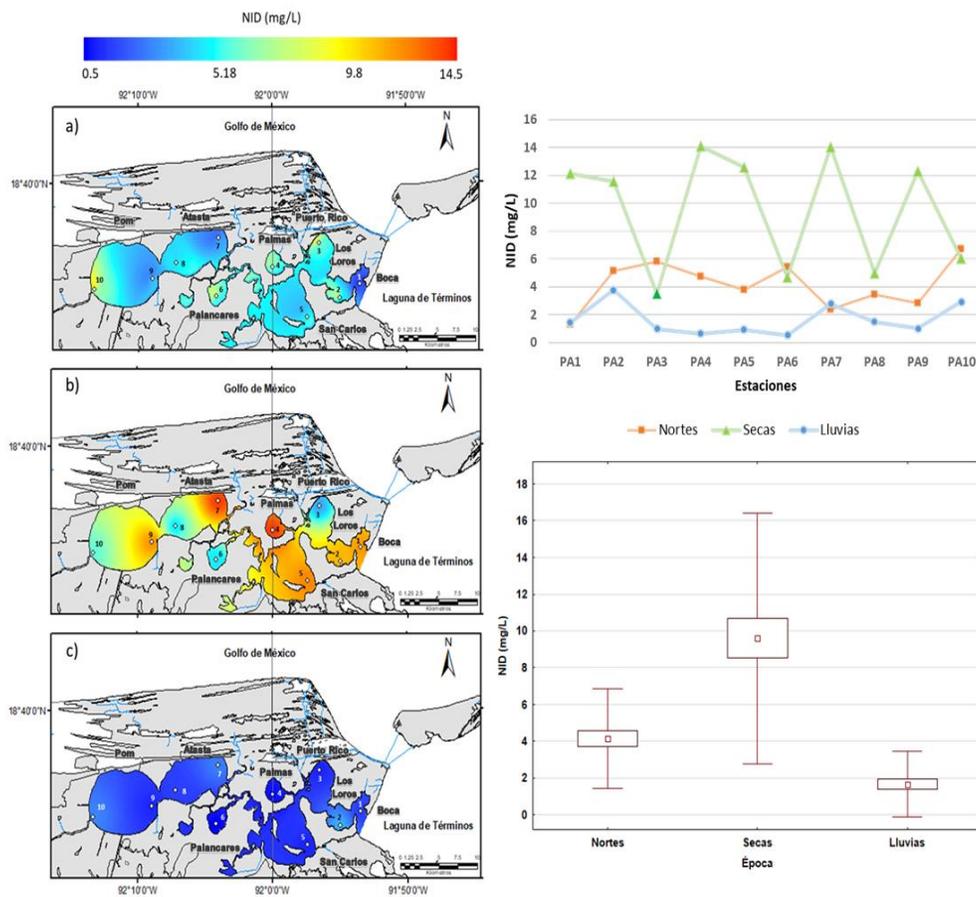


Figura 21. Distribución de isoconcentraciones del Nitrógeno Inorgánico Disuelto del SPA en tres temporadas climáticas: a) Nortes, b) Secas, c) Lluvias.

## Fosfatos

En el caso de los fosfatos se registraron concentraciones máximas de 0.82 mg/L en el sitio tres durante la temporada de secas, los niveles mínimos fueron de 0.02 mg/L y se registraron en los sitios ocho y nueve durante la temporada de nortes. El análisis estadístico determinó que no existen diferencias significativas entre los diferentes sitios (nortes:  $p= 0.39$ ; secas:  $p= 0.61$ ; lluvias:  $p= 0.52$ ).

Las concentraciones superficiales promedio en la temporada de nortes de los ortofosfatos fueron de 0.07 mg/L, para el agua de fondo fue de 0.36 mg/L, en la temporada de secas en el agua superficial se detectaron concentraciones de 0.30 mg/L, y en el fondo de 0.25 mg/L, en la temporada de lluvias se registró en el agua superficial y de fondo niveles de 0.1 mg/L (Fig. 22). El análisis estadístico de comparación registró diferencias significativas entre las temporadas de lluvias con respecto a las temporadas de nortes y secas (nortes:  $p= 0.18$ ; secas:  $p= 0.10$ ; lluvias:  $p= 0.02$ ).

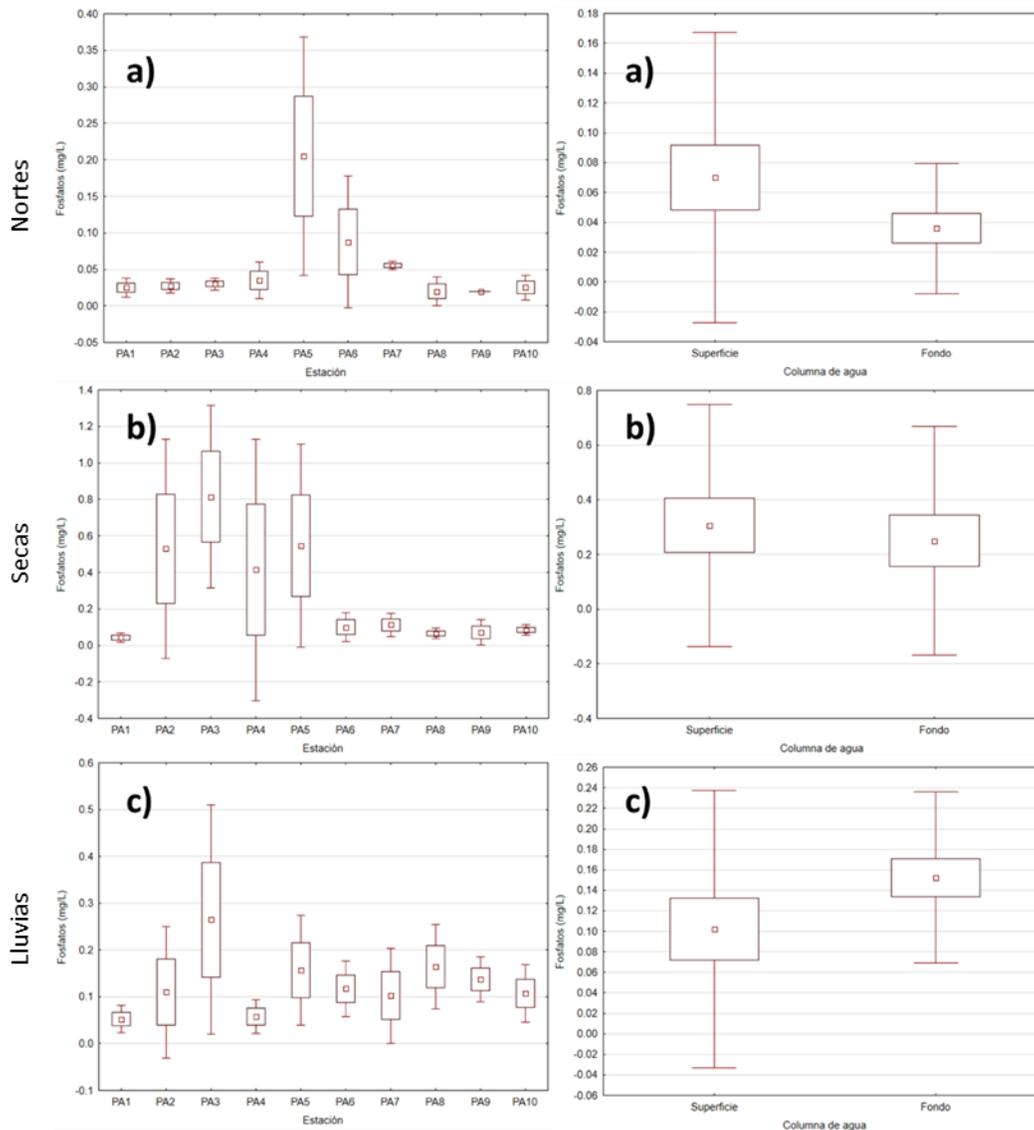


Figura 22. Dinámica de fosfato a escala espacial y temporal del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

### Fósforo Inorgánico Disuelto

Se conjuntaron las concentraciones de ortofosfatos para la obtención de Fósforo Inorgánico Disuelto (FID), en la temporada de nortes se registraron valores máximos de 0.20 mg/L en la estación cinco, en la temporada de secas se registraron máximos de 0.81 mg/L en la estación tres y en lluvias de 0.26 mg/L en la estación tres.

Las mayores concentraciones de FID se registraron en la temporada de secas coincidiendo en las zonas con mayor concentración de NID las cuales se encuentran

en sitios que interactúan con la Laguna de Términos. En la temporada de nortes y lluvias el SPA presenta un comportamiento homogéneo a lo largo de los puntos de muestreo.

El análisis estadístico Kruskal-Wallis presentó diferencias estadísticas entre las concentraciones de Fósforo Inorgánico Disuelto y las temporadas de nortes-secas ( $p < 0.05$ ) y nortes-lluvias ( $p < 0.05$ ), durante las temporadas secas-lluvias no se presentaron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) (Fig. 23).

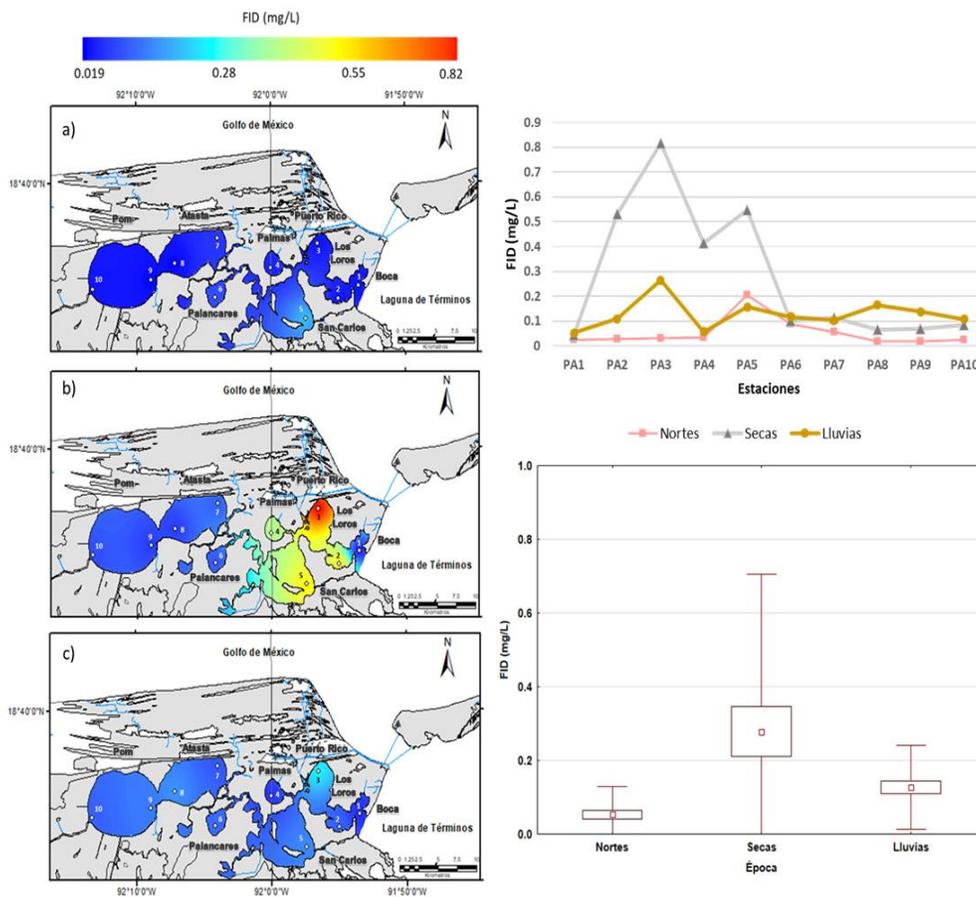


Figura 23. Concentraciones de Fósforo Inorgánico Disuelto del sistema Pom-Atasta durante tres épocas de muestreo.

### Concentraciones de CO<sub>2</sub>

En la distribución espacial se observaron las mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> durante la temporada de secas en los sitios uno y dos que interactúan directamente con la Laguna de Términos. En la temporada de lluvias se observó un

máximo de 16.3 mg/L y para la temporada de nortes de 14.9 mg/L, esto representa una homogeneidad de CO<sub>2</sub> a lo largo de los sitios de muestreo del SPA.

Las concentraciones mayores de CO<sub>2</sub> fueron de 21.2 mg/L las cuales se detectaron en el sitio dos en la temporada de secas, los valores mínimos fueron de 10 mg/L en la estación siete en la temporada de lluvias.

Para el análisis estadístico de Kruskal-Wallis no se registraron diferencias estadísticas entre las concentraciones de CO<sub>2</sub> disuelto entre las tres temporadas de muestreo ( $p > 0.05$ ) (Fig. 24).

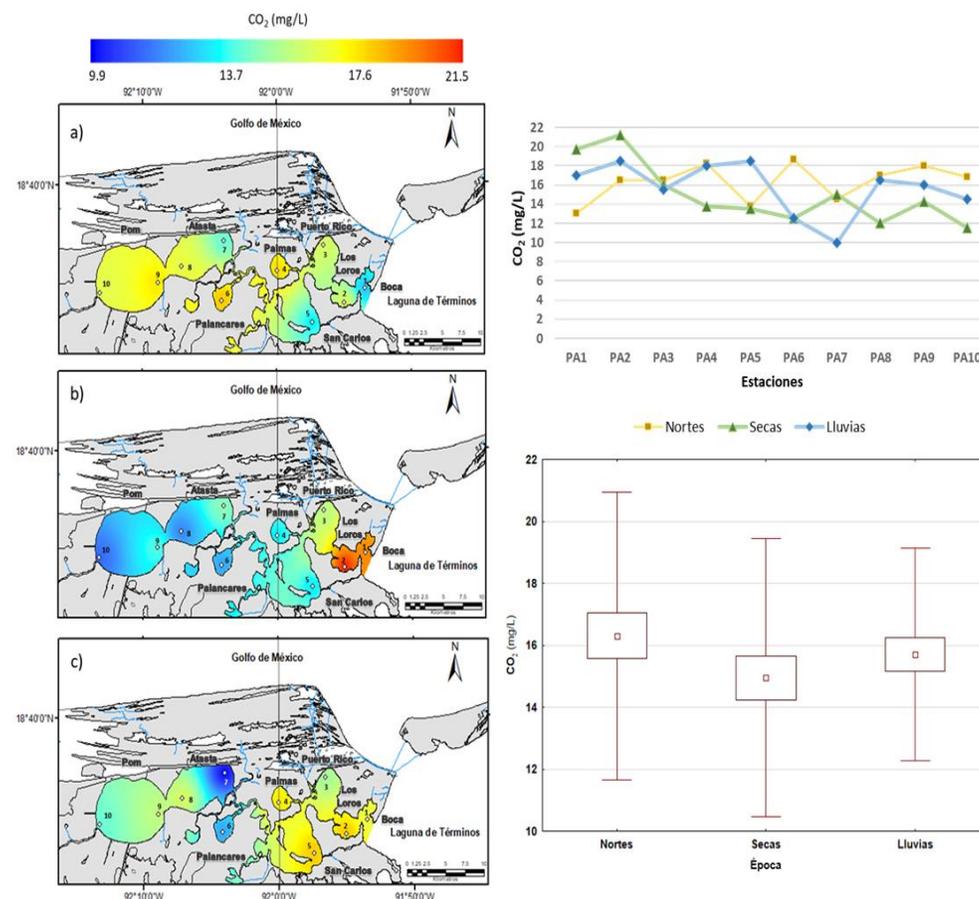


Figura 24. Distribución de isoconcentraciones del CO<sub>2</sub> Disuelto del SPA en tres temporadas climáticas: a) Nortes, b) Secas, c) Lluvias.

El análisis Kruskal-Wallis no presentó diferencias significativas entre los sitios de muestreo y las temporadas climáticas (nortes:  $p= 0.49$ ; secas:  $p= 0.19$ ; lluvias:  $p= 0.11$ ). Durante la temporada de nortes se monitorearon concentraciones

superficiales de 14.9 mg/L y de fondo de 17.6 mg/L, para la temporada de secas fue de 6.05 mg/L en el agua superficial y en el agua de fondo de 13.8 mg/L, para la temporada de lluvias las concentraciones superficiales fueron de 15.5 mg/L y de fondo de 15.8 mg/L (Fig. 25). El análisis estadístico no presentó diferencias significativas con relación a las concentraciones superficiales y de fondo en las diferentes temporadas climáticas (nortes:  $p = 0.08$ ; secas:  $p = 0.11$ ; lluvias:  $p = 0.62$ ). En el análisis de Kruskal-Wallis no se obtuvieron diferencias significativas en la comparación por temporadas, sitios de muestreo y niveles de la columna de agua, sin embargo, se observa que durante las diferentes temporadas el SPA presenta un comportamiento de fijación heterotrófica que finaliza con la respiración y la dilución de CO<sub>2</sub> en la columna de agua en la temporada de nortes. En la temporada de secas el sistema tiene un comportamiento de fijación autótrofa, lo que promueve la utilización del CO<sub>2</sub> para la generación de biomasa.

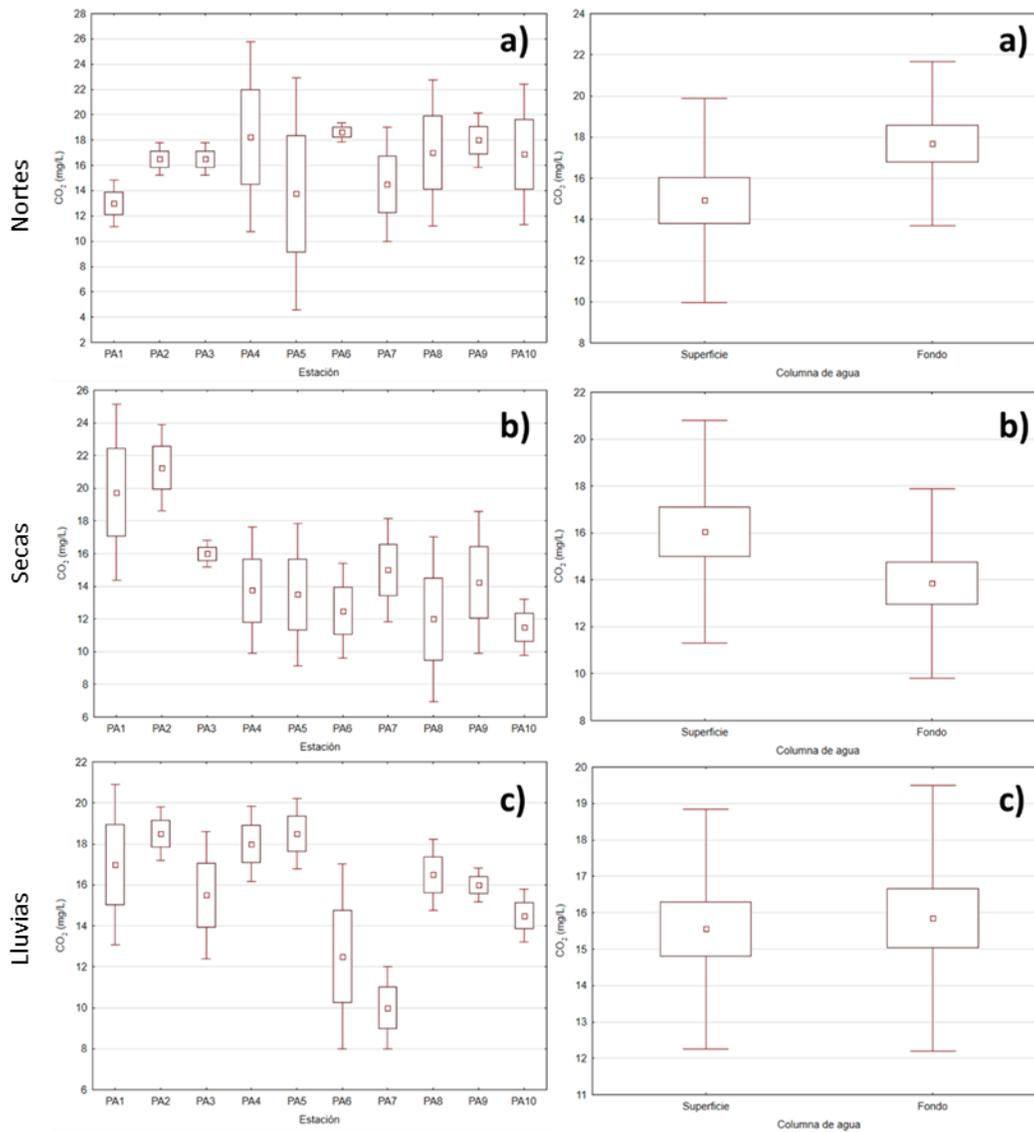


Figura 25. Dinámica de CO<sub>2</sub> a escala espacial y temporal del SPA. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

## SISTEMA PALIZADA-DEL ESTE

### Temperatura

La temperatura mínima en el SPE fue de 23.71°C la cual se registró en el sitio nueve durante la temporada de nortes, la temperatura máxima de 31.4°C se registró en la estación nueve durante la temporada de secas (Tabla 3).

Tabla 3. Valores de las variables fisicoquímicas del SPE registradas durante las temporadas de muestreo.

		Sitios de Muestreo										Promedio
		PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6	PE7	PE8	PE9	PE10	
<b>Nortes</b>	Temperatura (°C)	24.6	26.0	26.2	25.4	26.0	25.0	26.0	25.5	23.7	24.1	25.3
	Salinidad (UPS)	0.3	0.2	0.1	0.1	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2
	OD (mg/L)	1.6	1.1	1.3	1.4	1.4	0.4	1.4	1.4	1.7	1.5	1.3
	pH	7.2	7.5	7.5	7.5	7.6	7.4	7.4	7.4	7.1	7.8	7.4
<b>Secas</b>	Temperatura (°C)	29.1	30.1	30.2	29.8	30.6	30.8	30.7	30.7	31.1	31.4	30.5
	Salinidad (UPS)	27.2	21.8	12.8	1.0	6.1	1.6	0.9	0.4	0.4	0.4	7.3
	OD (mg/L)	2.0	2.3	3.0	2.8	2.0	2.0	2.2	2.4	3.4	3.1	2.5
	pH	8.2	6.9	5.3	5.2	5.9	6.9	6.8	6.8	7.6	7.3	6.7
<b>Lluvias</b>	Temperatura (°C)	27.5	29.5	29.9	30.2	25.0	25.2	24.6	24.4	31.4	31.3	27.9
	Salinidad (UPS)	28.9	0.3	1.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	3.3
	OD (mg/L)	1.7	2.0	1.8	2.3	2.7	2.9	2.8	1.5	2.5	2.2	2.2
	pH	5.3	7.5	7.0	8.8	8.4	8.3	8.8	8.2	8.6	9.2	8.0

El análisis Kruskal-Wallis no demostró diferencias significativas entre los sitios de la temporada de nortes y lluvias, sin embargo, en la temporada de lluvias se presentaron diferencias estadísticas entre los sitios cinco, seis, siete y ocho con respecto a los restantes sitios de muestreo (nortes:  $p = 0.18$ ; secas:  $p = 0.10$ ; lluvias:  $p = 0.02$ ).

La temperatura superficial promedio osciló entre 25.74°C y 24.78° C para el agua de fondo en la temporada de nortes, para la temporada de secas la temperatura superficial fue de 30.66°C y para fondo fue de 30.24°C. En la temporada de lluvias la temperatura superficial fue de 27.77°C y de fondo de 28.03°C.

En el caso de la distribución de temperaturas superficiales y de fondo para el SPE se registraron diferencias significativas durante la temporada de nortes ( $p = 0.04$ ), donde se observó estratificación en los sitios seis, siete, ocho, nueve y diez que osciló entre los 29.83°C a 31.93°C (Fig. 26), para la temporada de secas y lluvias no se presentaron diferencias significativas con relación a las temperaturas superficiales y de fondo (secas:  $p = 0.40$ ; lluvias:  $p = 0.96$ ).

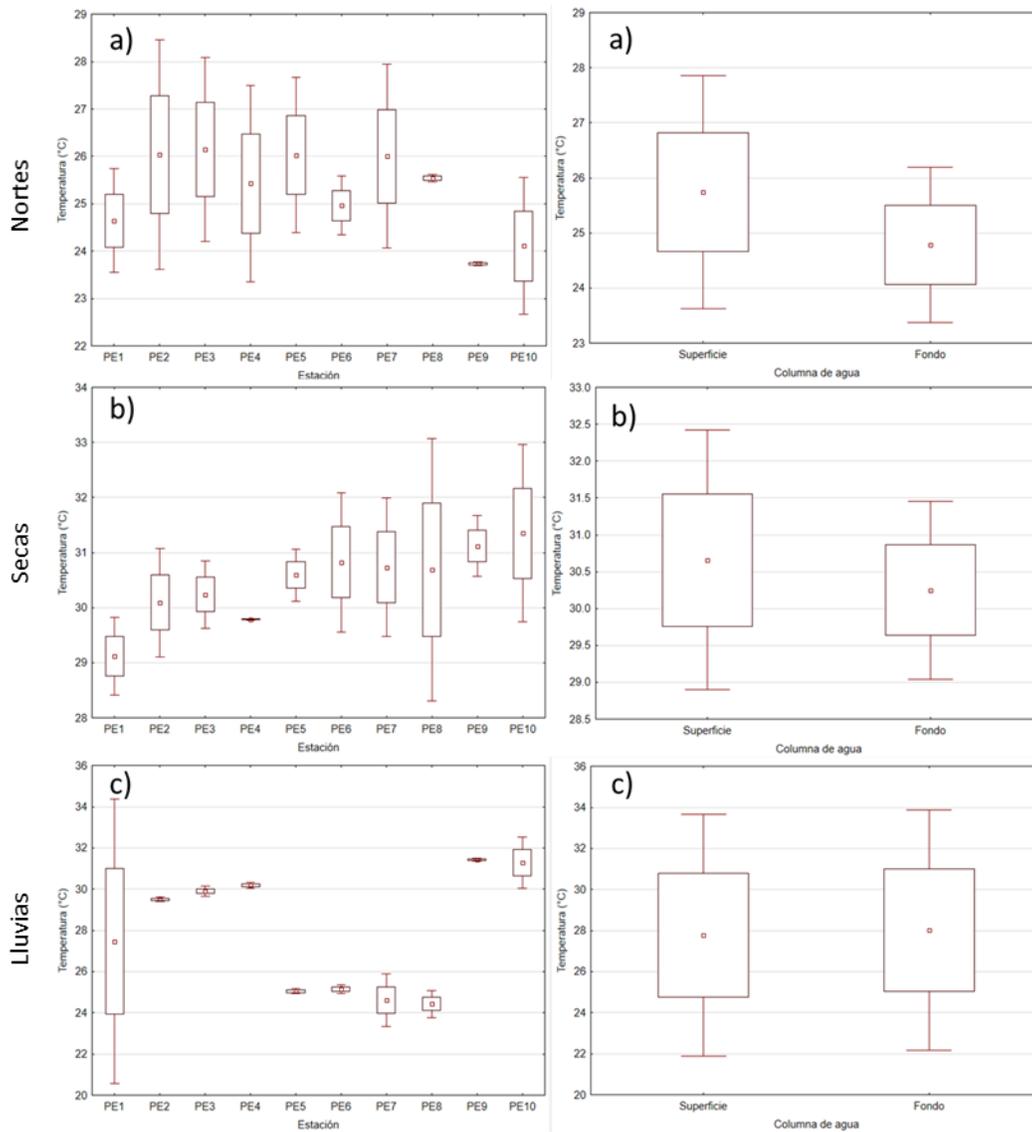


Figura 26. Temperatura registrada en los sitios de muestreo a diferentes profundidades del SPE. a) Temporada de nortes. b) Temporada de secas. c) Temporada de lluvias.

## Salinidad

La variable de salinidad registró un máximo de 27.2 durante la temporada de secas en el sitio uno, las concentraciones mínimas fueron de 0.03 durante la temporada de lluvias. El análisis Kruskal-Wallis permitió encontrar diferencias estadísticas entre los sitios y las temporadas de nortes y lluvias (nortes:  $p = 0.029$ ; lluvias:  $p = 0.027$ ), para la temporada de secas no se presentaron diferencias significativas ( $p = 0.10$ ).

Se observaron concentraciones promedio de salinidad superficial de 0.21 durante la temporada de nortes y de 0.23 en la temporada de lluvias, durante la temporada de secas se registró un promedio superficial de 6.8 y para el agua de fondo de 7.72, en la temporada de lluvias se registraron promedios superficiales de 2.94 y de fondo de 3.57 (Fig. 27). Para la salinidad no se registraron diferencias significativas entre el agua superficial y de fondo en las diferentes temporadas de muestreo (nortes:  $p = 0.67$ ; secas:  $p = 0.44$ ; lluvias:  $p = 0.90$ ).

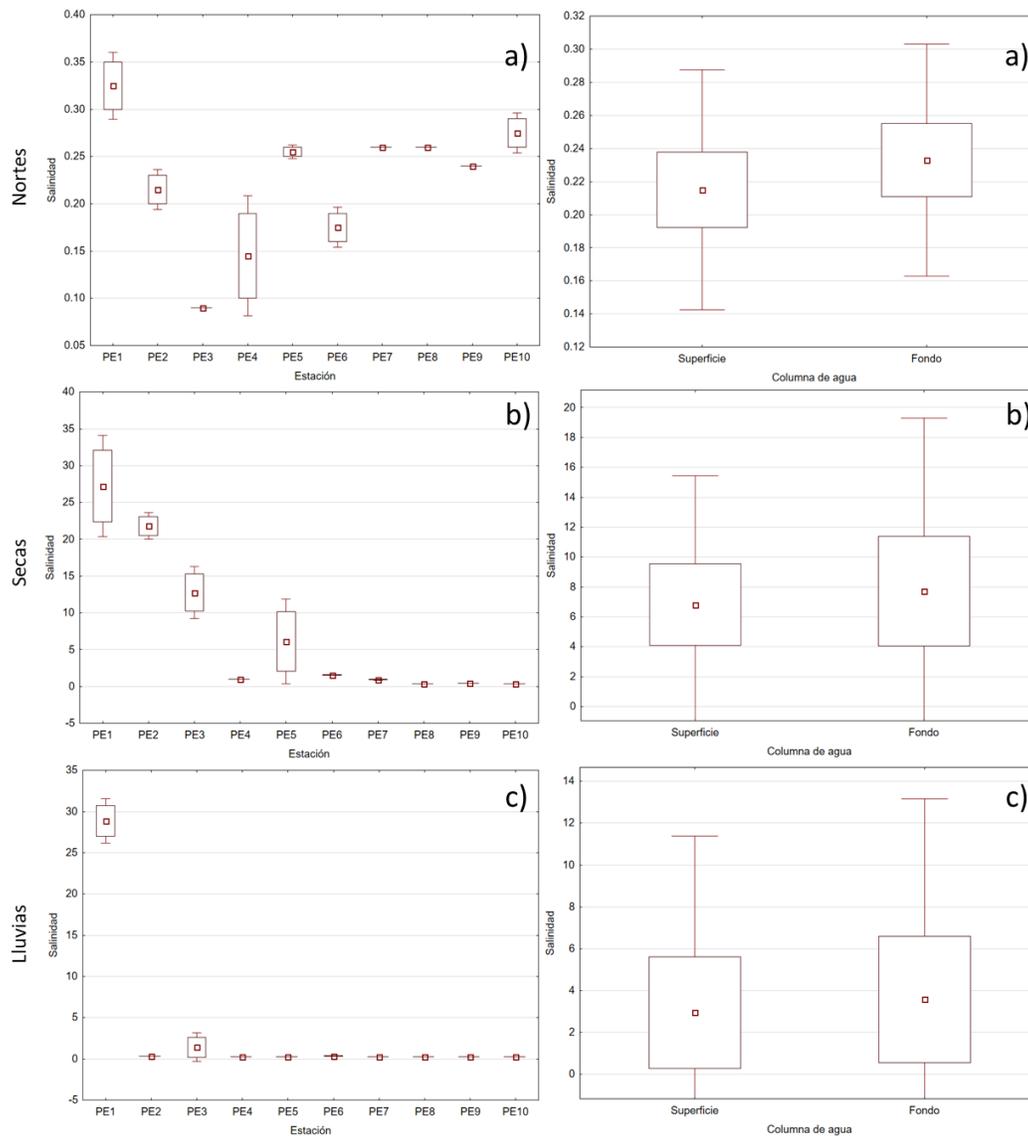


Figura 27. Dinámica de la salinidad en los sitios de muestreo y a dos niveles de profundidad en el SPE. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

En cuanto a la dinámica de la salinidad se observó una distribución homogénea a lo largo del SPE en la temporada de nortes. Durante la temporada de secas se registraron gradientes de salinidad. Se observaron las mayores salinidades en los sitios uno, dos, tres y cuatro, los cuales son los sitios que tienen la mayor interacción con la Laguna de Términos, esto propicia que se mantengan condiciones polihalinas. En la temporada de lluvias se registraron condiciones polihalinas en la estación uno, y en el resto de los sitios se presentaron condiciones oligohalinas, debido a las diferentes descargas de agua continental presentes en el SPE.

### **Oxígeno disuelto**

El oxígeno disuelto máximo fue de 3.4 mg/L en el sitio nueve de la temporada de secas, las concentraciones mínimas registradas fueron de 1.5 mg/L durante la temporada de lluvias en el sitio ocho. Con relación al análisis Kruskal-Wallis no se presentaron diferencias significativas entre las concentraciones de oxígeno y los sitios de muestreo en las tres temporadas climáticas, se observó que esta variable se distribuía homogéneamente en todo el SPE (nortes:  $p= 0.33$ ; secas:  $p= 0.29$ ; lluvias:  $p= 0.17$ ).

El oxígeno disuelto promedio superficial fue de 1.48 mg/L y para fondo de 1.14 mg/L en la temporada de nortes, durante la temporada de secas se registraron valores en el agua de superficie de 2.86 mg/L y de fondo de 2.18 mg/L, para la temporada de lluvias el oxígeno superficial fue de 2.25 mg/L y de fondo de 2.21 mg/L (Fig. 28). Por el análisis de Kruskal-Wallis se registraron diferencias significativas entre superficie y fondo durante la temporada de nortes ( $p = 0.034$ ), en las temporadas de secas y lluvias no se presentaron diferencias entre los diferentes sitios (secas:  $p = 0.05$ ; lluvias:  $p = 0.54$ ).

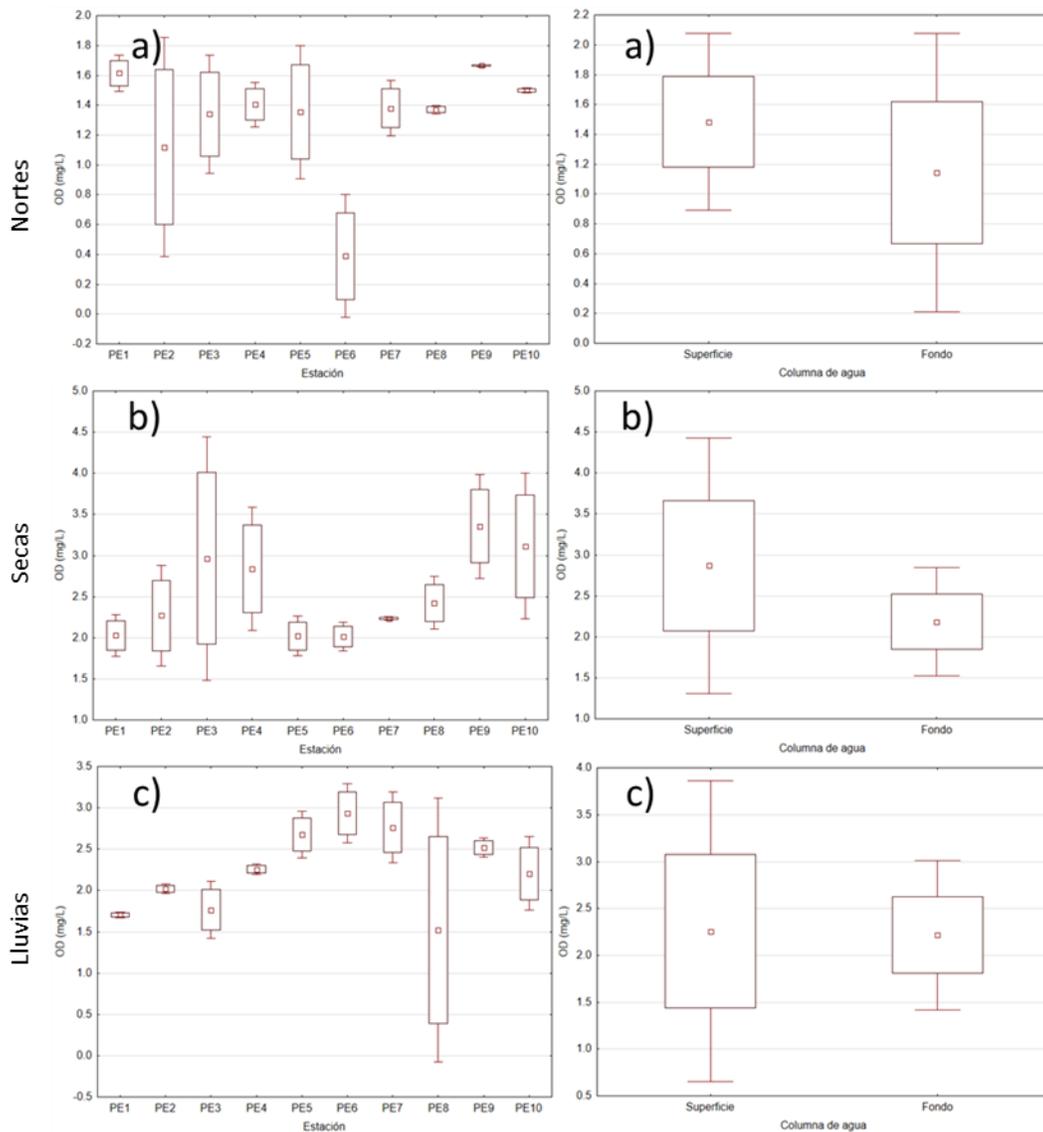


Figura 28. Dinámica del Oxígeno Disuelto en las diferentes temporadas en los sitios de muestreo y niveles de profundidad en el SPE. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

## pH

Se registraron valores máximos de pH de 8.8 en los sitios cuatro y siete durante la temporada de lluvias, los valores mínimos fueron de 5.2 en el sitio cuatro de la temporada de secas. El análisis Kruskal-Wallis identificó diferencias significativas durante la temporada y los sitios de muestreo (nortes:  $p = 0.03$ ), en el caso de la temporada de secas y lluvias no se presentaron diferencias estadísticas (secas:  $p = 0.07$ ; lluvias:  $p = 0.05$ ).

Durante la temporada de nortes se registraron valores promedio superficiales y de fondo de 7.4, para la temporada de secas se registraron valores superficiales de 6.7 y de fondo entre 6.6, en la temporada de lluvias se registraron valores superficiales de 8.0 y en el agua de fondo de 7.96.

Se observó en el análisis entre el pH superficial y de fondo una dinámica homogénea durante la temporada de nortes, para la temporada de secas se presentó un gradiente horizontal entre sitios de muestreo, donde disminuyó el pH desde el sitio uno hacia el interior del SPE, y en la temporada de lluvias se observó un incremento del pH desde la boca del sistema hacia el interior del SPE (Fig. 29). El análisis Kruskal-Wallis no registró diferencias significativas entre los niveles superficiales y de fondo para ninguna sitio y temporada de muestreo (nortes  $p = 0.70$ ; secas:  $p = 0.59$ ; lluvias:  $p = 0.47$ ).

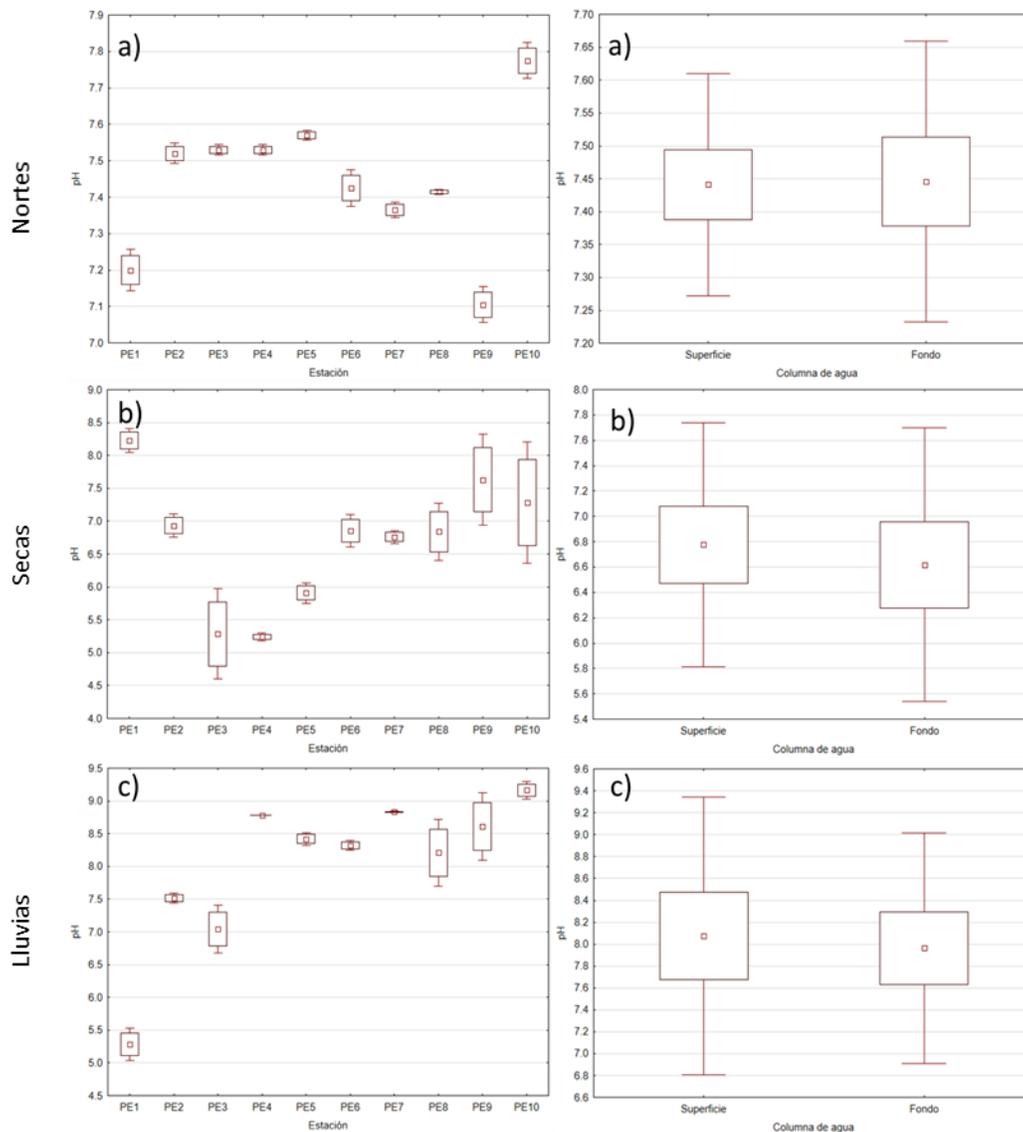


Figura 29. Dinámica de pH en los sitios de muestreo y niveles de profundidad en las diferentes épocas climáticas del SPE. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

### **Análisis de agrupamiento de los parámetros fisicoquímicos**

El análisis de agrupamiento de la temporada de nortes registró una dinámica homogénea para los parámetros evaluados, esto indicó que su comportamiento durante esta temporada con respecto a la salinidad corresponde a condiciones de ambientes oligohalinos. Para el caso de la temporada de secas se obtuvo un clúster característico definido por dos grupos, el primero agrupó los sitios uno y dos, en los cuales las condiciones salinas determinaron un estado hiperhalino, para el segundo

grupo se obtuvo condiciones características de un ambiente mesohalino. Durante la temporada de lluvias el análisis determinó dos condiciones particulares, se agrupó al sitio uno en el primer grupo, la condición presente en este sitio está determinada por la interacción directa de la Laguna de Términos, por lo cual las concentraciones de salinidad mantuvieron características de un ambiente oligohalino. El segundo grupo se integró por el resto de los sitios, los cuales presentaron características de un ambiente oligohalino (Fig. 30).

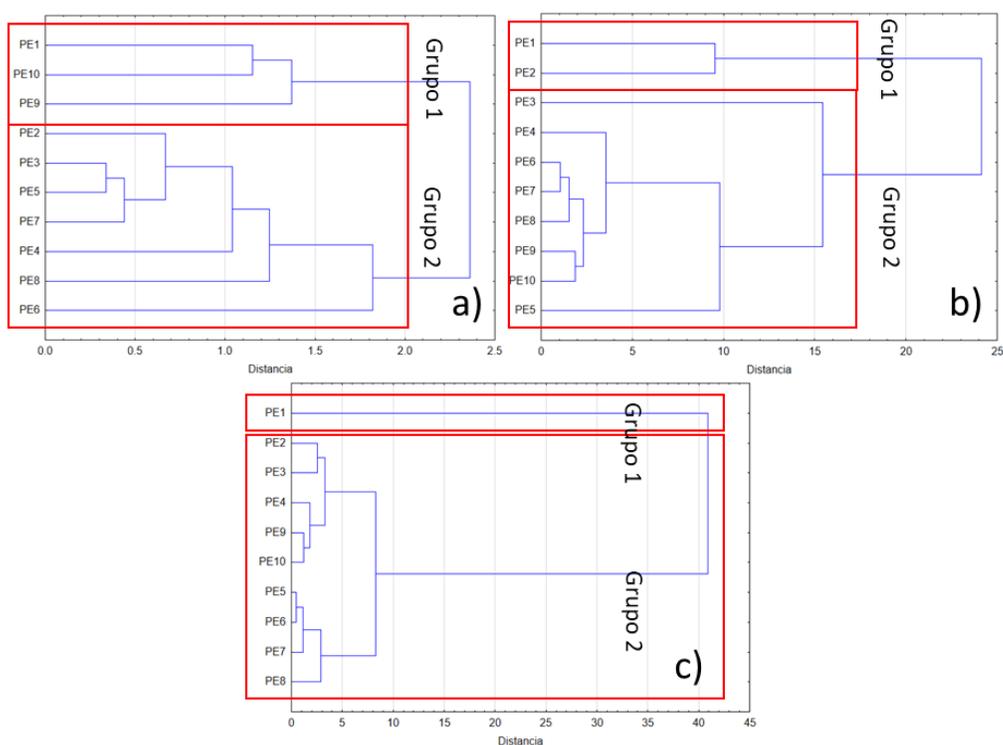


Figura 30. Análisis clúster de las variables fisicoquímicas del SPE en tres temporadas climáticas. a) Temporada de nortes. b) Temporada de secas. c) Temporada de lluvias.

## NUTRIENTES

### Nitratos

Los nitratos registraron concentraciones máximas de 13.73 mg/L en la estación ocho durante la temporada de secas, los valores mínimos oscilaron en 0.15 mg/L en la estación uno de la temporada de secas (Tabla 4).

Tabla 4. Valores promedios de nutrientes del SPE durante las temporadas de muestreo.

		Estación										Promedio
		PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6	PE7	PE8	PE9	PE10	
Nortes	Amonio (mg/L)	0.22	0.14	0.22	0.14	0.17	0.22	0.16	0.24	0.19	0.21	0.19
	Nitritos (mg/L)	0.03	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04
	Nitratos (mg/L)	1.7	5.18	5.98	2.03	3.95	11.9	2.6	0.83	5.7	10.03	4.99
	Fosfatos (mg/L)	0.07	0.02	0.02	0.3	0.55	0.02	0.05	0.78	0.04	0.09	0.19
Secas	Amonio (mg/L)	0.25	0.15	0.21	0.17	0.18	0.14	0.19	0.18	0.2	0.25	0.19
	Nitritos (mg/L)	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.07	0.03	0.03	0.04
	Nitratos (mg/L)	0.15	0.4	0.34	0.9	2.42	9.48	9.23	13.73	2.78	11.78	5.12
	Fosfatos (mg/L)	0.09	0.09	0.08	0.15	0.13	0.73	0.94	0.28	0.18	0.38	0.3
Lluvias	Amonio (mg/L)	0.05	0.08	0.07	0.04	0.16	0.1	0.1	0.05	0.09	0.1	0.08
	Nitritos (mg/L)	0.06	0.1	0.06	0.06	0.1	0.08	0.07	0.06	0.12	0.05	0.08
	Nitratos (mg/L)	0.88	1.28	0.68	0.3	3.03	1.85	2.9	2.2	1.5	2.65	1.73
	Fosfatos (mg/L)	0.16	0.1	0.15	0.09	0.18	0.04	0.09	0.04	0.1	0.09	0.38

El análisis de Kruskal-Wallis determinó la existencia de diferencias significativas entre los sitios de muestreo y las temporadas climáticas (nortes  $p = 0.004$ ; secas:  $p = 0.002$ ; lluvias:  $p = 0.008$ ) (Fig. 31).

El monitoreo por temporadas y la columna de agua registró, durante la temporada de nortes, un promedio de nitratos en agua superficial de 4.77 mg/L y de fondo de 5.2 mg/L, para la temporada de secas se registraron concentraciones superficiales de 5.28 mg/L y de fondo de 4.95 mg/L, en la temporada de lluvias se registraron valores superficiales promedio de 1.13 mg/L, y de fondo de 2.29 mg/L (Fig. 30); sin embargo, entre el agua superficial y de fondo durante las temporadas de nortes y secas no se obtuvieron diferencias estadísticas (nortes:  $p = 0.83$ ; secas:  $p = 0.26$ ), en la temporada de lluvias se presentaron diferencias estadísticas entre las concentraciones superficiales y de fondo ( $p = 0.02$ ).

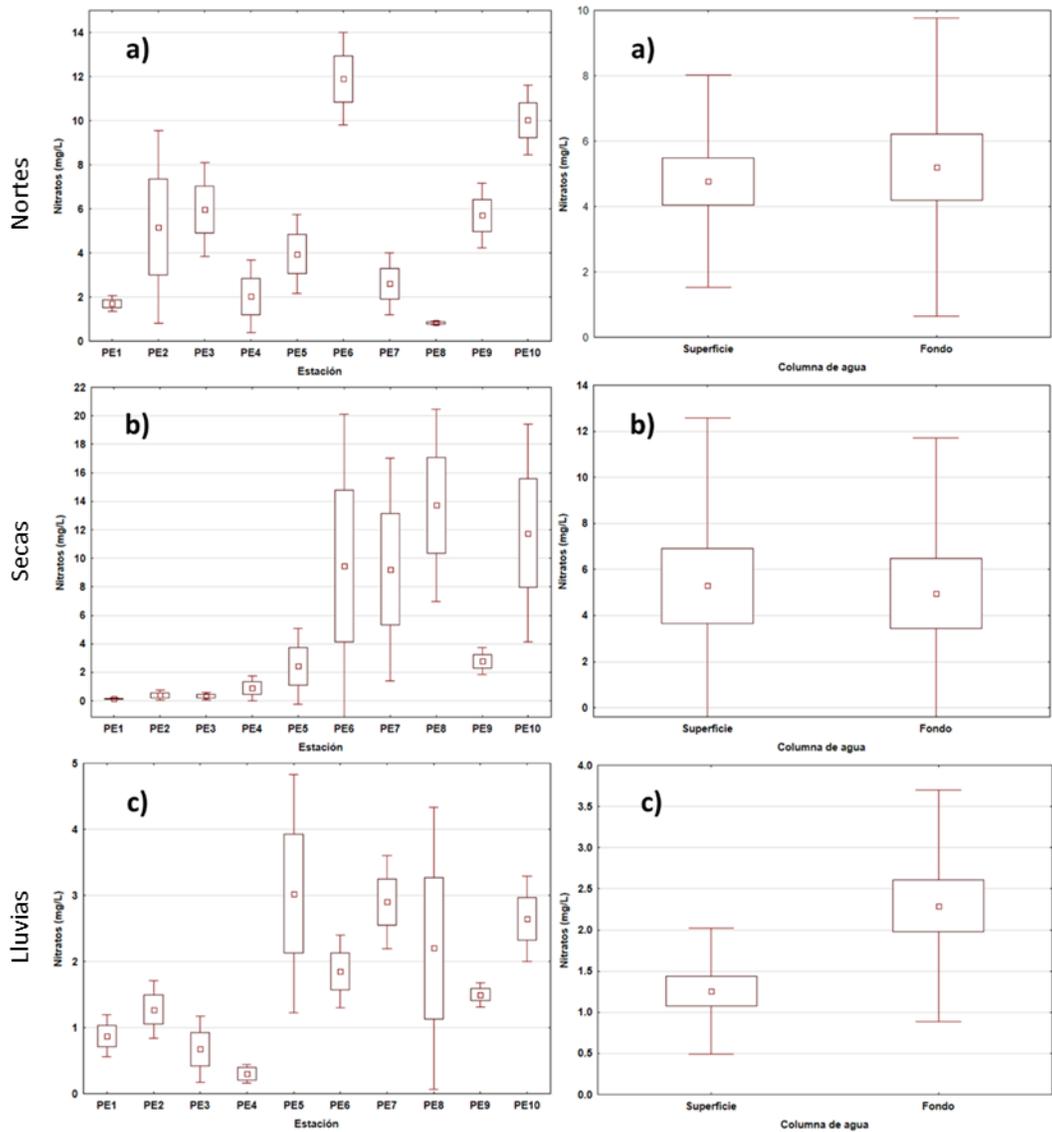


Figura 31. Concentraciones de nitratos a escalas espacial y temporal del SPE. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

## Nitritos

Las concentraciones máximas de nitritos en la temporada de nortes fueron de 0.12 mg/L en el sitio nueve de la temporada de lluvias, las concentraciones mínimas registradas fueron de 0.02 mg/L las cuales obtuvieron en los sitios uno, cinco, seis, ocho, nueve y diez de la temporada de nortes y estas mismas concentraciones se encontraron en los sitios dos, tres, nueve y diez de la temporada de secas. No se registraron diferencias estadísticas entre los sitios durante las temporadas de muestreo (nortes:  $p= 0.10$ ; secas:  $p= 0.37$ ; lluvias:  $p= 0.40$ ).

La concentración promedio superficial y de fondo de la temporada de nortes fue de 0.03 mg/L, para la temporada de secas se registró en el agua superficial 0.02 mg/L y de fondo de 0.04 mg/L, durante la temporada de lluvias se registró concentraciones superficiales de 0.06 mg/L, y de fondo de 0.07 mg/L (Fig. 32). La comparación entre las diferentes sitios y el agua de fondo y superficial no presentaron diferencias significativas en la prueba de Kruskal-Wallis (nortes:  $p=0.34$ ; secas:  $p=0.30$ ; lluvias:  $p=0.94$ ).

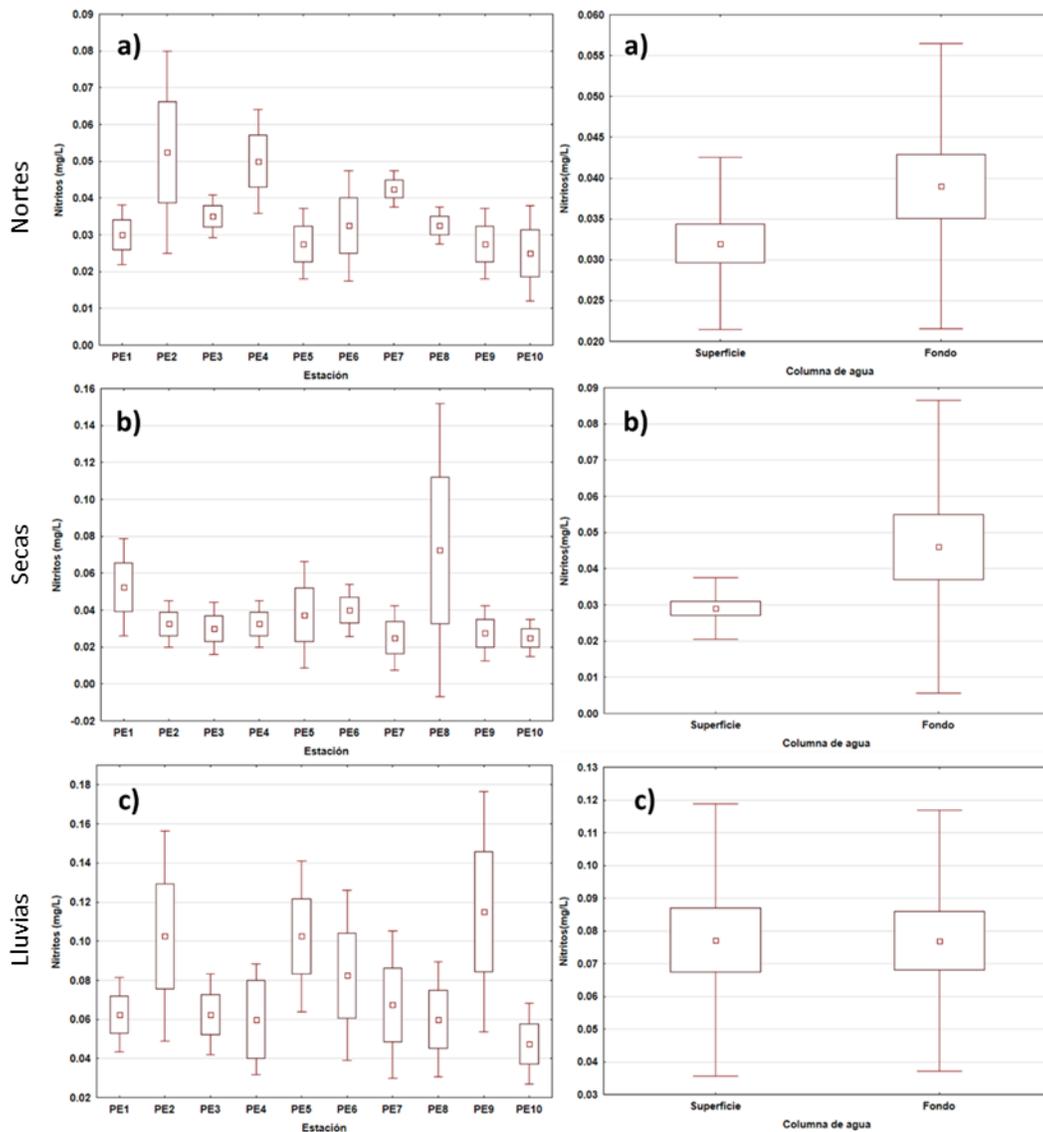


Figura 32. Dinámica de nitritos a escala espacial y temporal del SPE. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

## Amonio

Las concentraciones de amonio máximas registradas fueron de 0.25 mg/L en los sitios uno y diez de la temporada de secas, y las mínimas fueron de 0.04 mg/L en el sitio cuatro de la temporada de lluvias. No se registraron diferencias significativas en el análisis de Kruskal-Wallis entre los sitios en cada temporada de muestreo (nortes:  $p= 0.30$ ; secas:  $p= 0.24$ ; lluvias:  $p= 0.17$ ).

Las concentraciones superficiales en la temporada de nortes oscilaron entre 0.17 mg/L y para el agua de fondo en 0.20 mg/L, durante la temporada de secas se registraron concentraciones superficiales de 0.19 y de fondo de 0.18 mg/L, en la temporada de lluvias se registraron valores superficiales de 0.09 mg/L y de fondo de 0.072 mg/L (Fig. 33). Sin embargo, no presentaron diferencias significativas en el análisis de Kruskal-Wallis entre los sitios de muestreo y la columna de agua (nortes:  $p= 0.33$ ; secas:  $p= 0.59$ ; lluvias:  $p= 0.17$ ).

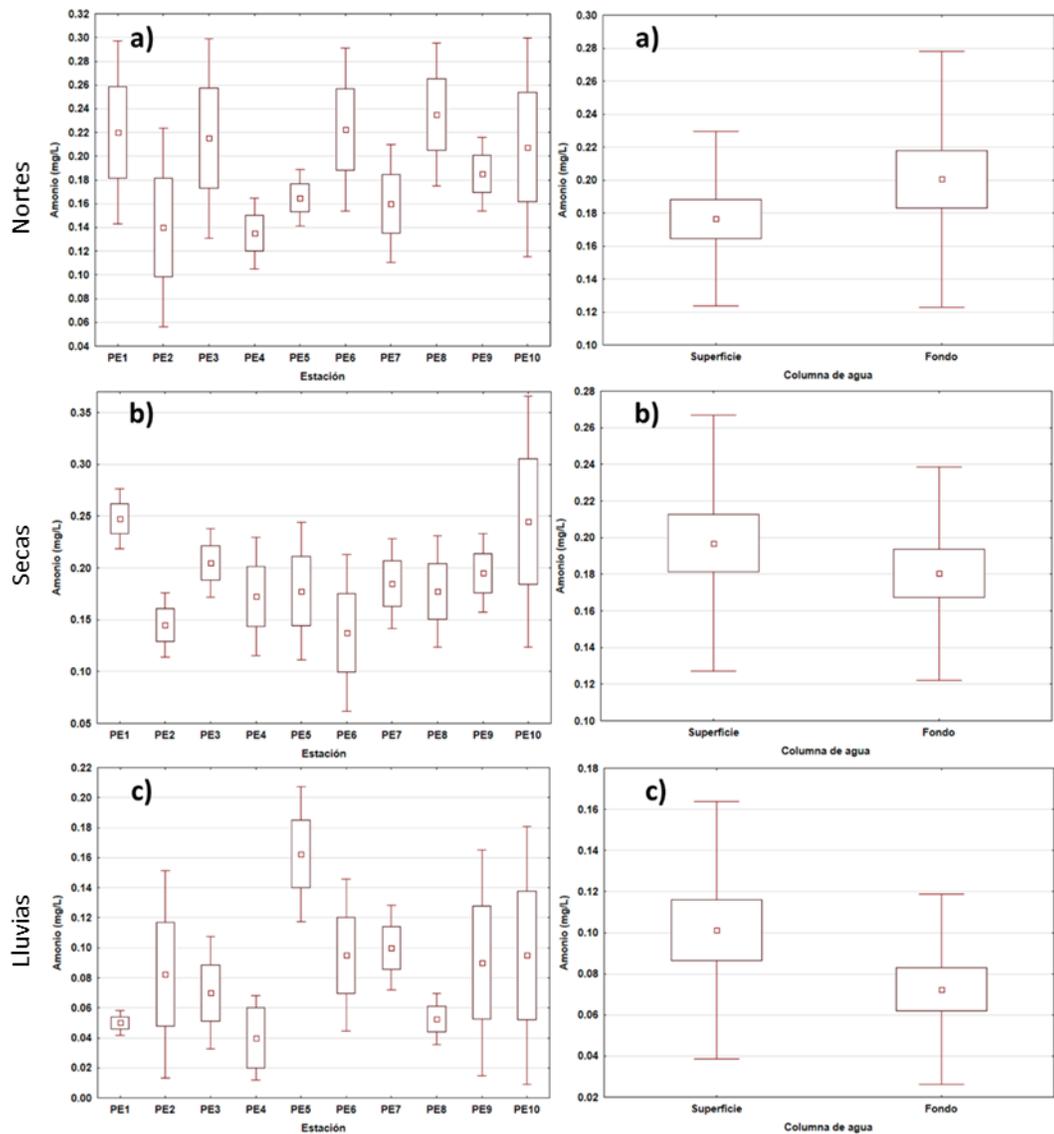


Figura 33. Análisis de amonio a escala espacial y temporal del SPE. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

### Nitrógeno Inorgánico Disuelto

La concentración máxima de Nitrógeno Inorgánico Disuelto fue de 13.9 mg/L, y se presentaron en la estación ocho de la temporada de secas, en la temporada de nortes se registró máximos de 12.1 mg/L en el sitio seis, en la temporada de lluvias se observaron concentraciones máximas de 3.2 mg/L.

En cuanto a la distribución del NID en el SPE, se observan las mayores concentraciones en la temporada de secas, en los sitios cercanos a las descargas de los ríos Las Piñas, Marentes y Las Cruces. Las concentraciones más altas en la

temporada de nortes se presentaron en los sitios cercanos a estos ríos, y para la temporada de lluvias se observó una distribución homogénea a lo largo del sistema fluvio-lagunar.

En el análisis estadístico se observaron diferencias significativas entre las concentraciones de Nitrógeno Inorgánico Disuelto y las temporadas de nortes-secas ( $p = 0.04$ ) y nortes-lluvias ( $p = 0.0005$ ), entre las temporadas secas-lluvias no se presentaron diferencias significativas ( $p = 0.53$ ) (Fig. 34).

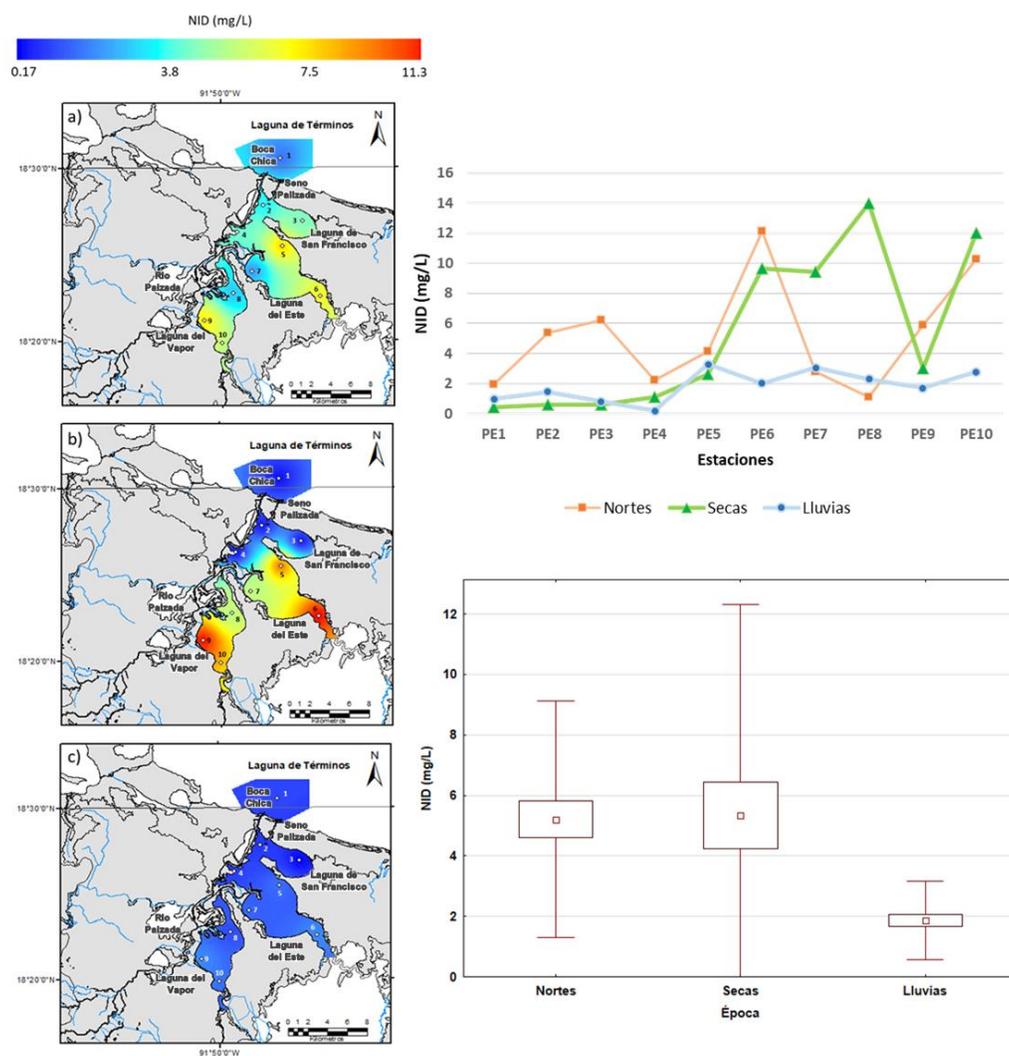


Figura 34. Distribución de isoconcentraciones del Nitrógeno Inorgánico Disuelto del SPE en tres temporadas climáticas: a) Nortes, b) Secas, c) Lluvias.

## Fosfatos

Con relación a los ortofosfatos la concentración máxima registrada fue de 0.94 mg/L en el sitio siete de la temporada de secas, las concentraciones mínimas registradas fueron de 0.02 mg/L, se registraron en los sitios dos, tres y seis de la temporada de nortes. El análisis de Kruskal-Wallis registró diferencias significativas entre los sitios de muestreo durante la temporada de nortes ( $p = 0.03$ ), en la temporada de secas y lluvias no se registraron diferencias estadísticas (secas:  $p = 0.36$ ; lluvias:  $p = 0.10$ ).

Durante la temporada de nortes se obtuvieron concentraciones superficiales de 0.09 mg/L y de fondo de 0.29 mg/L, en el caso de la temporada de secas en el agua de superficie se registraron concentraciones de 0.27 mg/L, y de fondo de 0.33 mg/L, para la temporada de lluvias en el agua de superficie fueron de 0.11 mg/L y de fondo de 0.08 mg/L (Fig. 35). Con la prueba Kruskal-Wallis no se obtuvieron diferencias entre el estrato superficial y de fondo para las distintas temporadas climáticas (nortes:  $p = 0.39$ ; secas:  $p = 0.07$ ; lluvias:  $p = 0.60$ ).

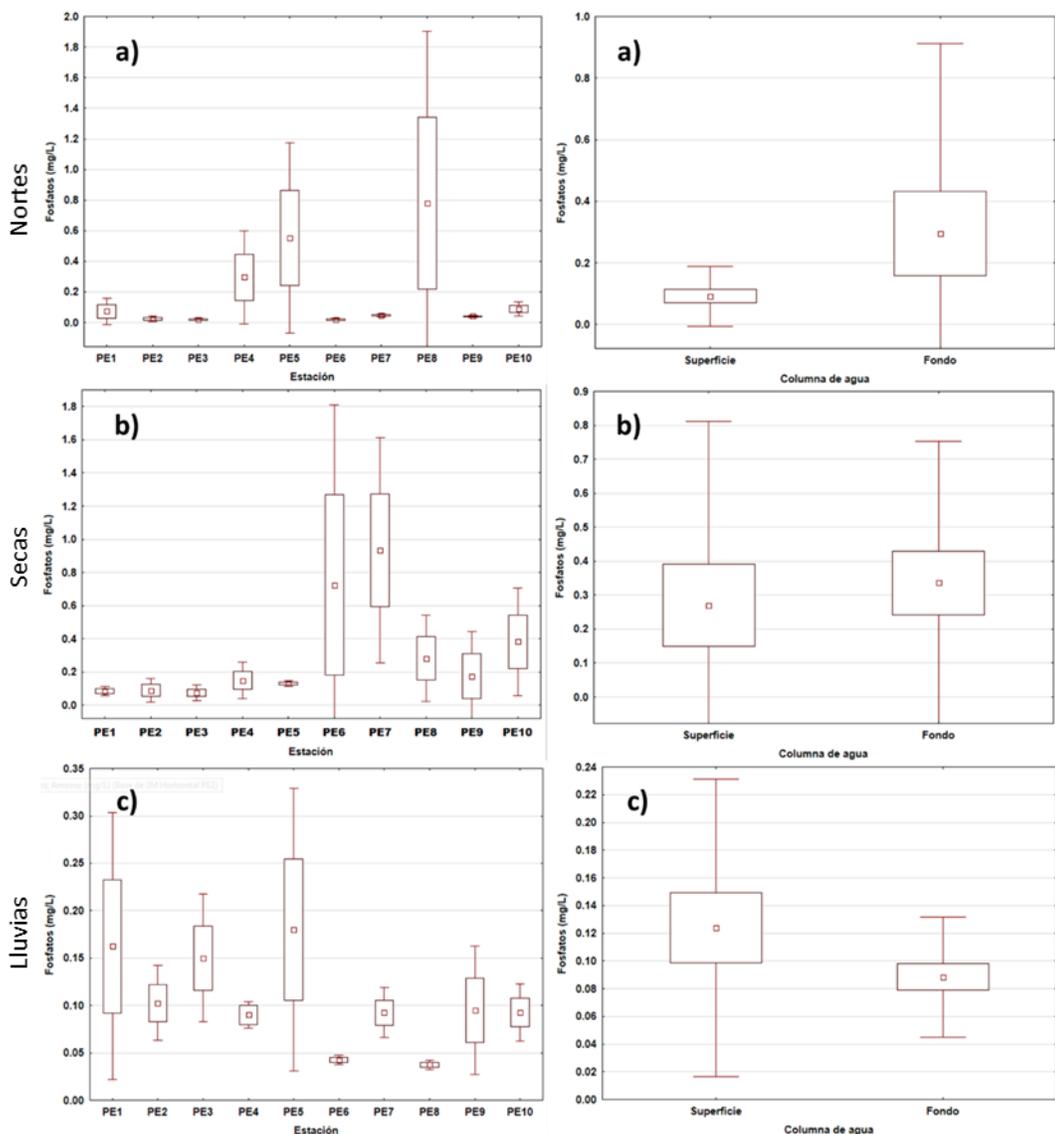


Figura 35. Dinámica de fosfatos a escala espacial y temporal del SPE. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

**Fósforo Inorgánico Disuelto**

El Fósforo Inorgánico Disuelto del SPE presentó máximos en la temporada de secas de 1.14 mg/L en el sitio siete, en el caso de la temporada de nortes se registraron máximos de 1.04 mg/L en el sitio ocho, y para la temporada de lluvias se registraron niveles de hasta 0.44 mg/L en el sitio cinco.

En la distribución del FID se observó que en la temporada de secas los niveles máximos se presentaron en las descargas del río Las Cruces, durante la temporada

de nortes y lluvias las concentraciones se observaron homogéneas a lo largo del sistema.

El análisis estadístico de Kruskal-Wallis presentó diferencias significativas entre las concentraciones de Fósforo Inorgánico Disuelto y las temporadas de nortes-secas ( $p = 0.002$ ), entre las temporadas secas-lluvias y nortes-lluvias no se presentaron diferencias estadísticas ( $p = 0.26$ ) (Fig. 36).

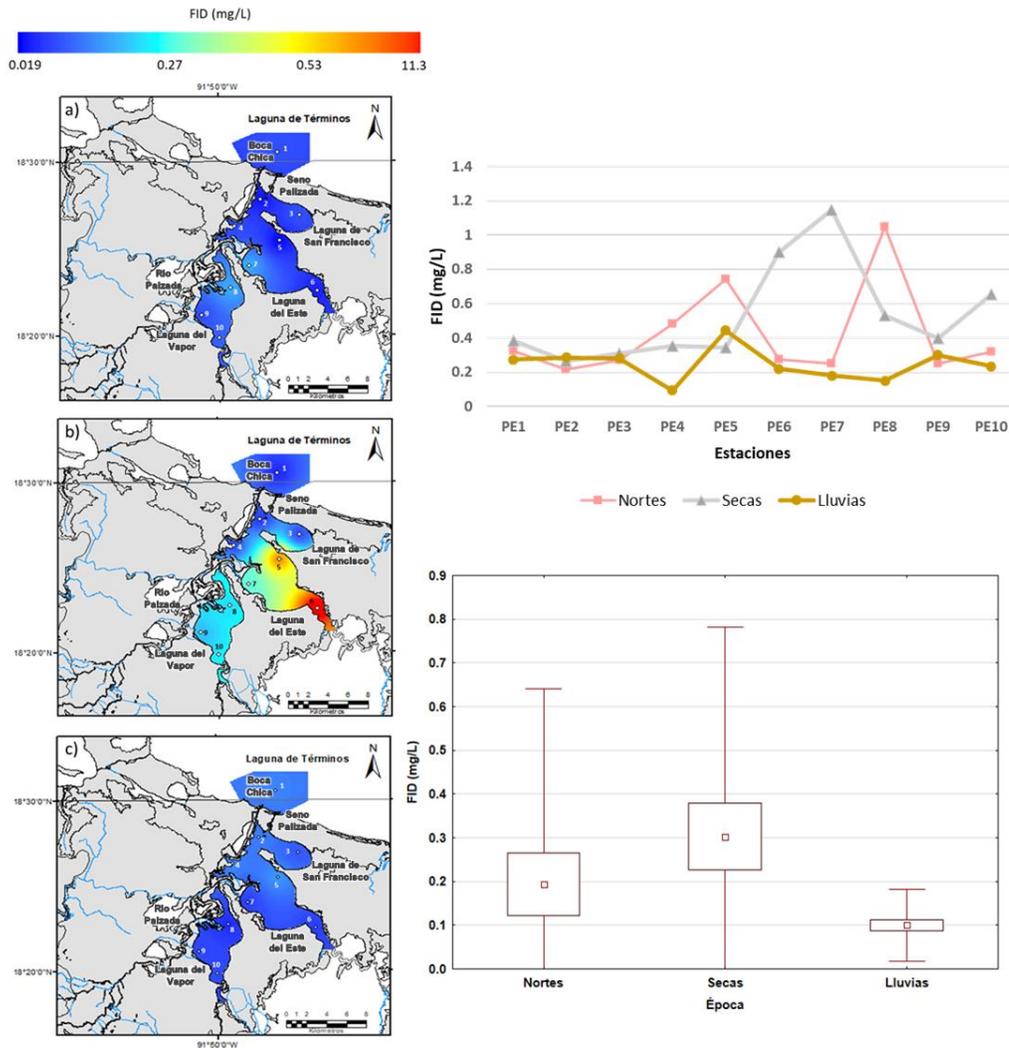


Figura 36. Distribución de isoconcentraciones del Fósforo Inorgánico Disuelto del SPE en tres temporadas climáticas: a) Nortes, b) Secas, c) Lluvias.

## Concentraciones de CO<sub>2</sub>

El CO<sub>2</sub> registró un promedio máximo de 27 mg/L en la estación uno de la temporada de lluvias, la concentración mínima fue de 6.5 mg/L en el sitio tres de la temporada de nortes. En el análisis Kruskal-Wallis se observó diferencias estadísticas entre los diferentes sitios de muestreo en la temporada de nortes y lluvias (nortes:  $p = 0.014$ ; lluvias:  $p = 0.003$ ), durante la temporada de secas no se registró diferencia estadística ( $p = 0.15$ ),

Para la distribución espacial de concentraciones de CO<sub>2</sub> en el SPE se registraron durante la temporada de secas y lluvias las mayores concentraciones en el sitio uno, el cual está directamente en la boca de salida hacia la Laguna de Términos. En el caso de la temporada de nortes se presentan las mayores concentraciones en la Laguna del Vapor, sin embargo, para el resto del sistema el comportamiento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> fueron homogéneas.

Con el análisis de Kruskal-Wallis se observaron diferencias significativas entre las concentraciones de CO<sub>2</sub> disuelto y las temporadas de nortes-secas ( $p = 0.001$ ) y secas-lluvias ( $p < 0.005$ ), entre las temporadas nortes-lluvias no se observaron diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ) (Fig. 37).

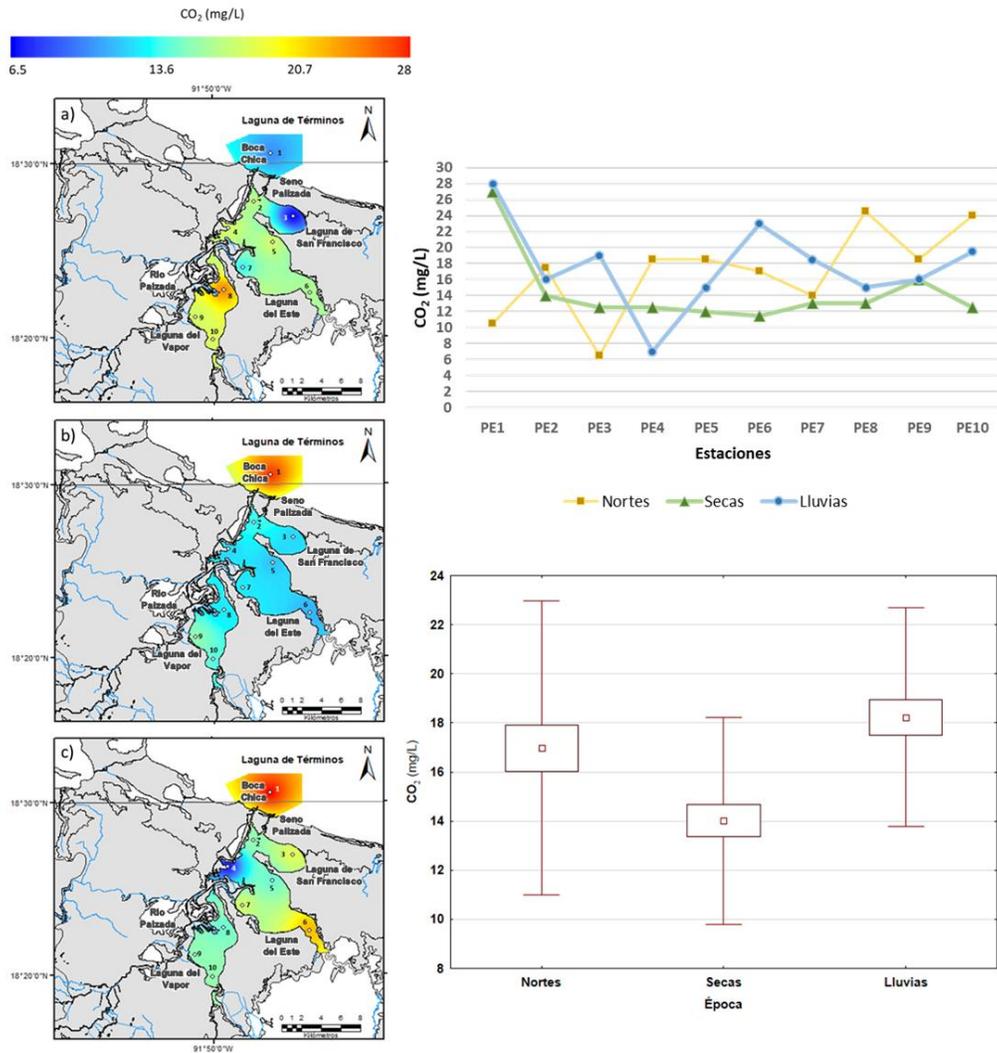


Figura 37. Distribución de isoconcentraciones del CO<sub>2</sub> del SPE en tres temporadas climáticas: a) Nortes, b) Secas, c) Lluvias.

En el agua superficial de la temporada de nortes se registraron concentraciones promedio de 15.5 mg/L y para el agua de fondo 18.45 mg/L, en la temporada de secas se registraron valores promedio superficiales de 14.45 mg/L y de fondo de 13.6 mg/L, en la temporada de lluvias las concentraciones promedio superficiales de 15.6 mg/L y de fondo en 19.05 mg/L (Fig. 38). No se registraron diferencias estadísticas entre las concentraciones superficiales y de fondo para las tres temporadas de muestreo (nortes:  $p = 0.09$ ; secas:  $p = 0.83$ ; lluvias:  $p = 0.41$ ).

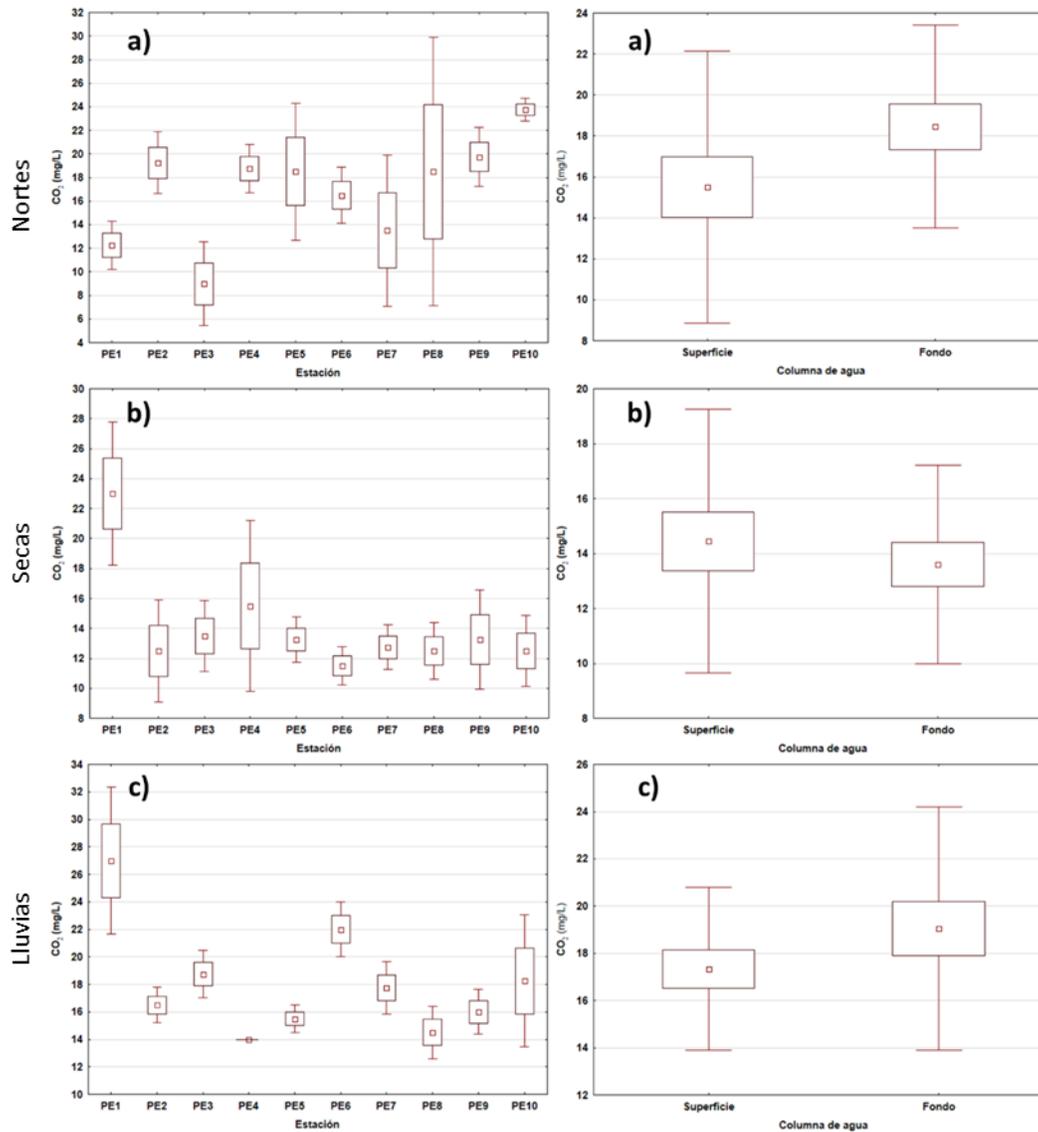


Figura 38. Dinámica del CO<sub>2</sub> a escala espacial y temporal del SPE. a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

## ANÁLISIS DE LA BIÓSFERA

### Análisis de clorofila a en el SPA

En el SPA se registró una concentración máxima de 49.1 mg/m<sup>3</sup> en el sitio dos durante la temporada de nortes y mínima de 0.98 mg/m<sup>3</sup> en el sitio siete en la temporada de lluvias (Tabla 5). El análisis de Kruskal-Wallis presentó diferencias

estadísticas entre los sitios y las temporadas de muestreo (nortes:  $p = 0.45$ ; secas:  $p = 0.11$ ; lluvias:  $p = 0.08$ ).

Tabla 5. Valores promedios de las concentraciones de clorofila *a* ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en los SPA y SPE durante las tres temporadas climáticas de muestreo.

	Estación										Promedio
	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6	PA7	PA8	PA9	PA10	
<b>Nortes</b>	44.5	49.1	23.6	22.1	40.3	24.0	34.8	36.7	44.1	10.7	33.0
<b>Secas</b>	2.6	12.5	2.6	5.6	2.3	8.9	4.4	5.4	1.8	6.3	5.2
<b>Lluvias</b>	4.9	5.0	7.4	6.0	2.6	5.1	0.98	1.8	3.4	5.4	4.3
	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6	PE7	PE8	PE9	PE10	Promedio
<b>Nortes</b>	1.7	24.8	6.0	9.1	2.3	15.8	8.0	3.8	4.2	5.2	8.1
<b>Secas</b>	6.9	5.0	2.3	7.3	7.3	9.2	5.7	4.5	7.7	6.9	6.3
<b>Lluvias</b>	3.2	0.8	3.0	1.9	2.4	3.6	2.7	4.4	7.5	4.3	3.4

La concentración superficial promedio en la temporada de nortes fue de  $24.8 \text{ mg}/\text{m}^3$  y de fondo de  $41.1 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Durante la temporada de secas se registraron concentraciones en el agua de superficie de  $5.9 \text{ mg}/\text{m}^3$  y en fondo de  $4.5 \text{ mg}/\text{m}^3$ , en la temporada de lluvias se registraron valores superficiales de  $4.1 \text{ mg}/\text{m}^3$  y de fondo de  $4.4 \text{ mg}/\text{m}^3$  (Fig. 39). Para el análisis entre los sitios y la columna de agua se observaron diferencias estadísticas en la temporada de nortes ( $p = 0.03$ ), en la temporada de secas y lluvias no se observaron diferencias estadísticas (secas:  $p = 0.73$ ; lluvias:  $p = 0.82$ ).

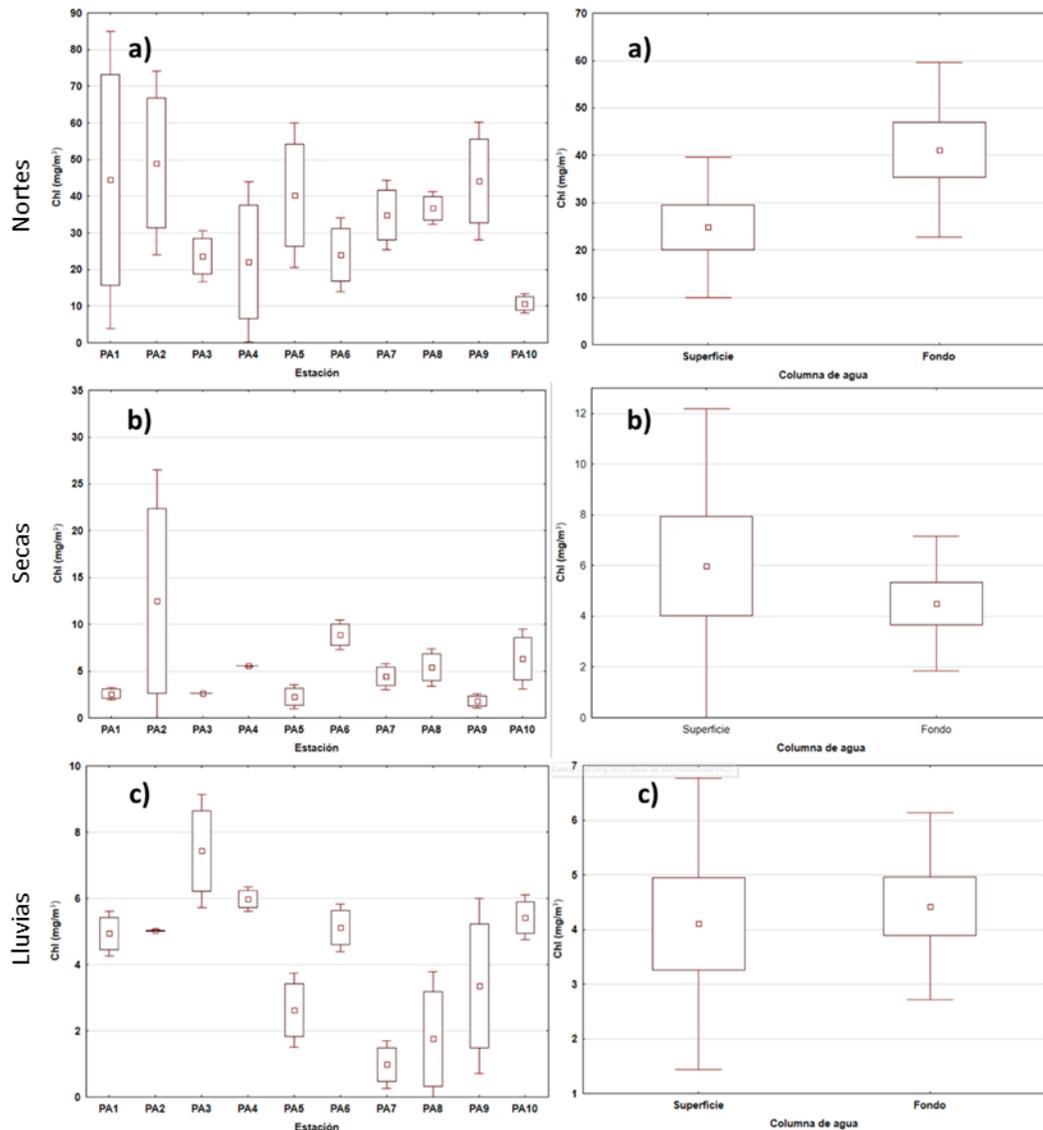


Figura 39. Variación de la concentración de Clorofila a en escalas espacial y temporal del SPA:  
a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

En el caso de la distribución de clorofila a en el SPA se observaron concentraciones máximas durante la temporada de nortes en los sitios de la boca de descarga de la Laguna de Términos y en la Laguna de Pom. En el caso de las temporadas de secas y lluvias se observó una distribución homogénea a lo largo del SPA (Fig. 40).

En el análisis de comparación de medias se registraron diferencias significativas entre las concentraciones de clorofila a de las temporadas de nortes-secas ( $p = 0.05$ ) y nortes-lluvias ( $p < 0.05$ ), entre las temporadas secas-lluvias no se observaron diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ).

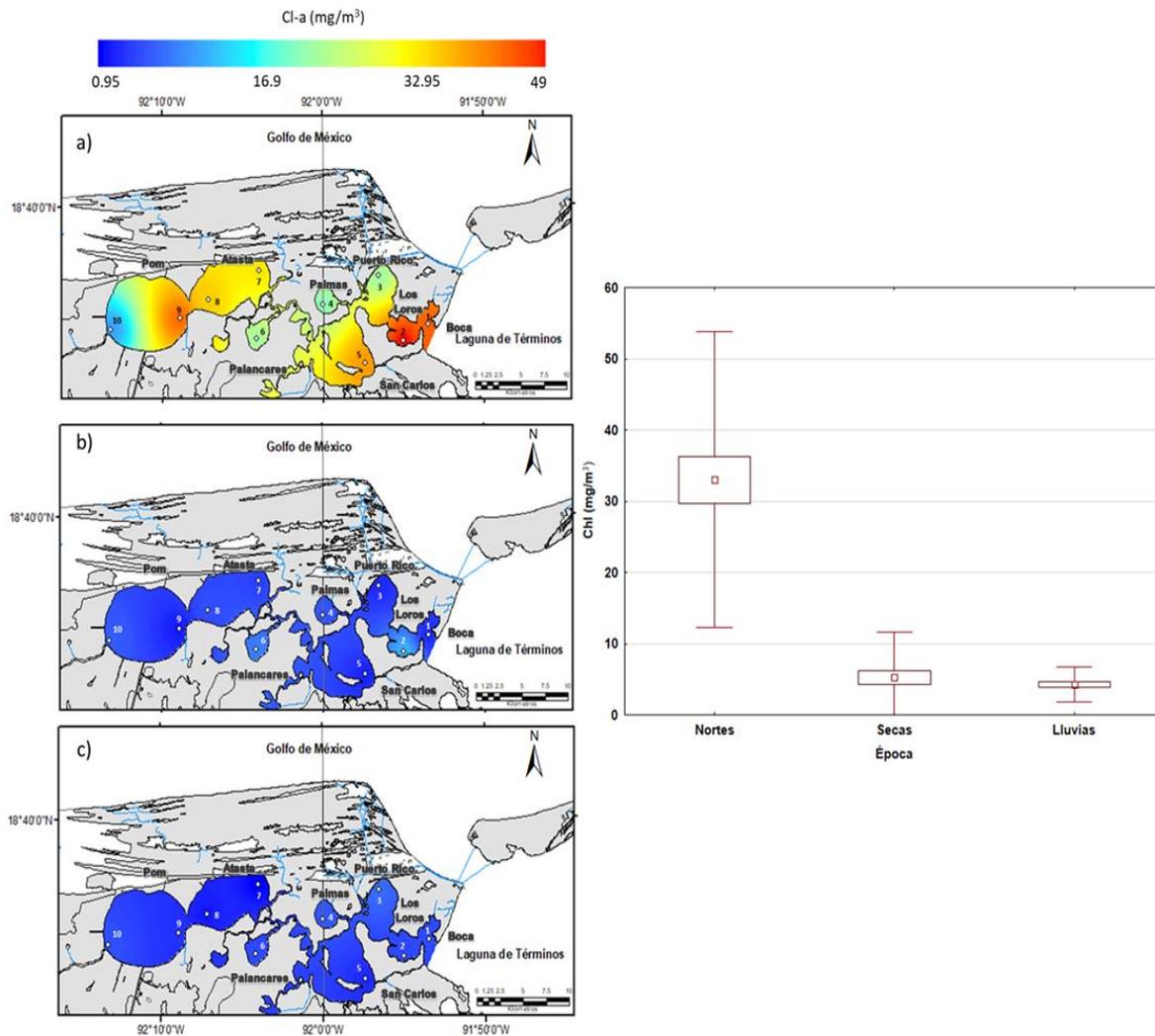


Figura 40. Distribución de isoconcentraciones del Clorofila a en el SPA en tres temporadas climáticas: a) Nortes, b) Secas, c) Lluvias.

### Análisis de clorofila a en el SPE

El análisis de la concentración de clorofila a en el SPE presentó un valor máximo de  $24.8 \text{ mg/m}^3$  durante la temporada de nortes en el sitio dos, la concentración mínima de clorofila a fue de  $0.8 \text{ mg/m}^3$ , la cual se registró en el sitio dos de la temporada de lluvias (Tabla 5). La prueba de Kruskal-Wallis para comparar los sitios de las tres temporadas climáticas de muestreo presentó diferencias significativas (nortes:  $p = 0.0005$ ; secas:  $p = 0.016$ ; lluvias:  $p = 0.003$ ).

Durante la temporada de nortes se obtuvo un promedio de concentración de clorofila a superficial de  $9.71 \text{ mg/m}^3$  y de fondo de  $6.48 \text{ mg/m}^3$ , en la temporada de secas se

registraron concentraciones superficiales de  $5.44 \text{ mg/m}^3$  y de fondo de  $7.12 \text{ mg/m}^3$ , durante la temporada de lluvias se registraron concentraciones superficiales de  $3.4 \text{ mg/m}^3$  y de fondo de  $3.13 \text{ mg/m}^3$  (Fig. 41). Con relación al análisis comparativo de Kuskal-Wallis entre la clorofila a superficial y de fondo de las tres temporadas de muestreo no se presentaron diferencias estadísticas (nortes:  $p = 0.62$ ; secas:  $p = 0.054$ ; lluvias:  $p = 0.72$ ).

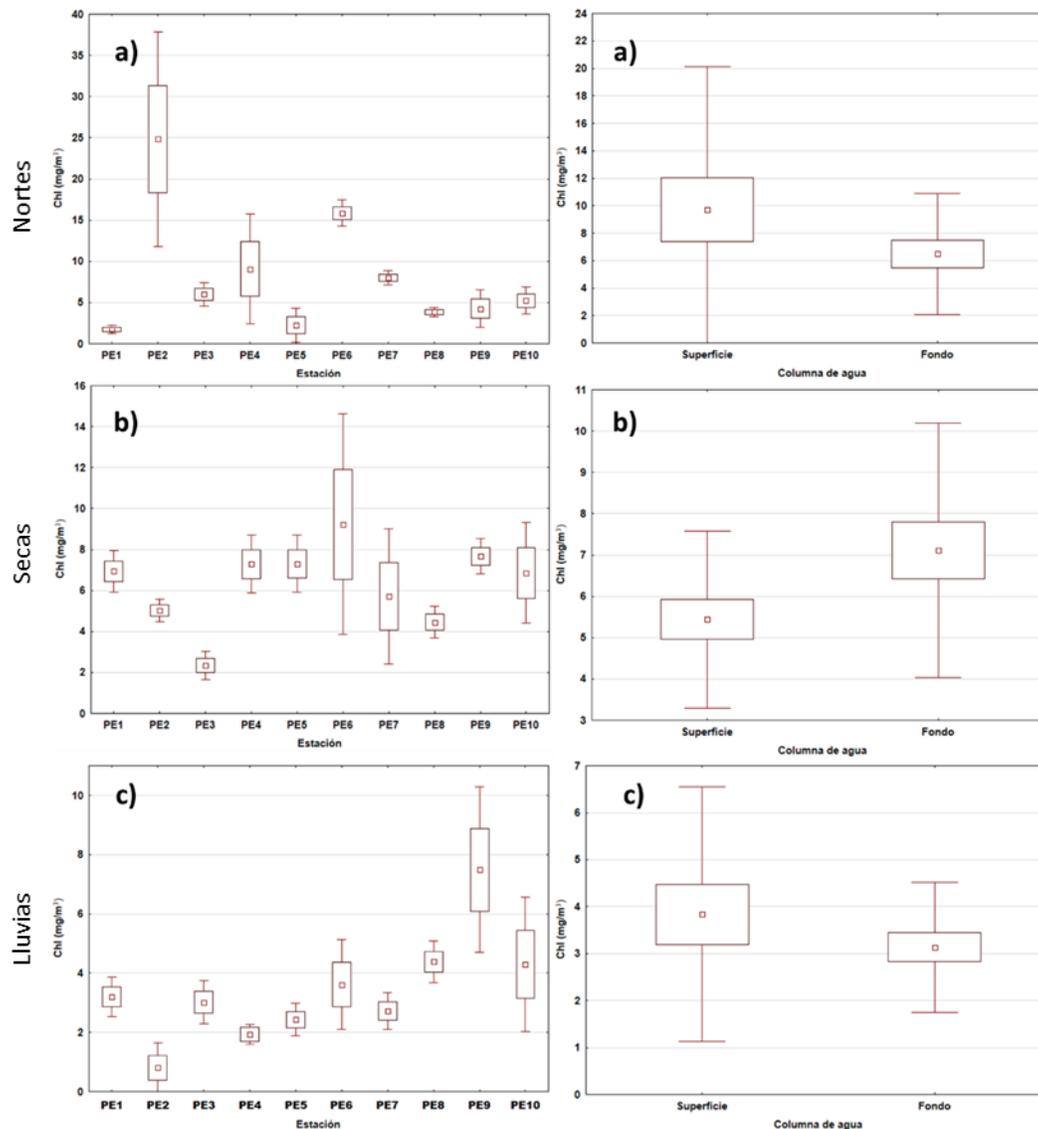


Figura 41. Variación de la concentración de Clorofila a en escalas espacial y temporal del SPE:  
a) Temporada de nortes, b) Temporada de secas, c) Temporada de lluvias.

Las mayores concentraciones de clorofila a se presentaron en la temporada de nortes, se observa una distribución máxima en los sitios uno y dos que interaccionan

directamente con la Laguna de Términos. Para la temporada de secas el comportamiento de esta variable fue homogéneo a lo largo de todo el sistema, durante la temporada de lluvias, las mayores concentraciones se presentaron en la Laguna del Vapor donde descargan los ríos Las Piñas y Marentes (Fig. 42).

En el análisis de comparación de medias se observaron diferencias significativas entre las concentraciones de clorofila *a* para las temporadas de nortes-lluvias ( $p = 0.0006$ ) y secas-lluvias ( $p < 0.00002$ ), para la temporada nortes-secas no se observaron diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ).

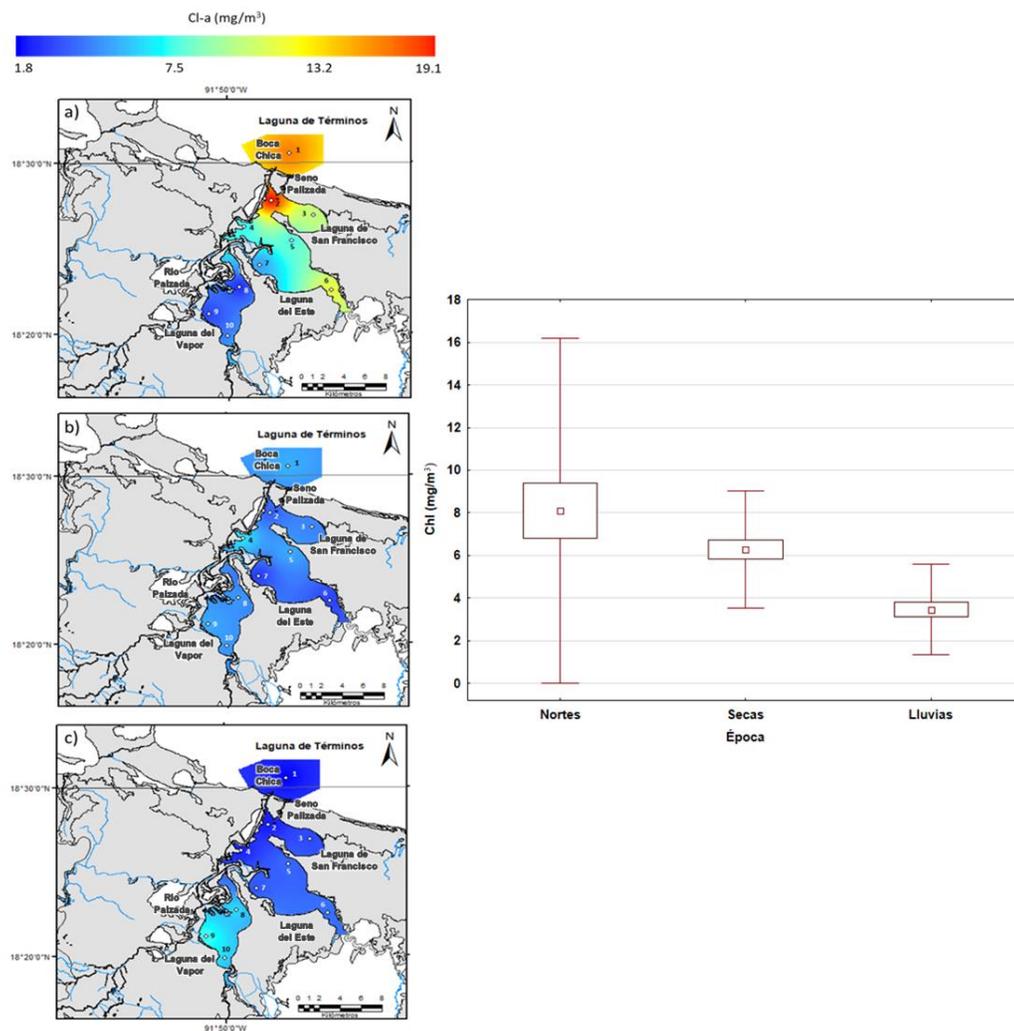


Figura 42. Distribución de isoconcentraciones del Clorofila *a* del SPE en tres temporadas climáticas: A) Nortes, b) Secas, c) Lluvias.

## Análisis de Correspondencias Canónicas (ACC)

El ACC del SPA entre las variables ambientales y los parámetros fisicoquímicos de las tres temporadas de muestreo presentó un porcentaje máximo de varianza acumulada en las dos primeras componentes de 99.9 %, el eje 1 representa el 98.3% de la varianza y la segunda componente representa el 1.6% restante.

Se observó que las variables salinidad, oxígeno disuelto y temperatura mantienen una correlación durante la temporada de secas, los cuales tienen una estrecha relación y agrupación con los nutrientes de nitratos y amonio en esta temporada (Fig. 43). El pH no mantiene una relación significativa con respecto a algún nutriente en las diferentes temporadas de muestreo y sobre la distribución de los nutrientes en el SPA.

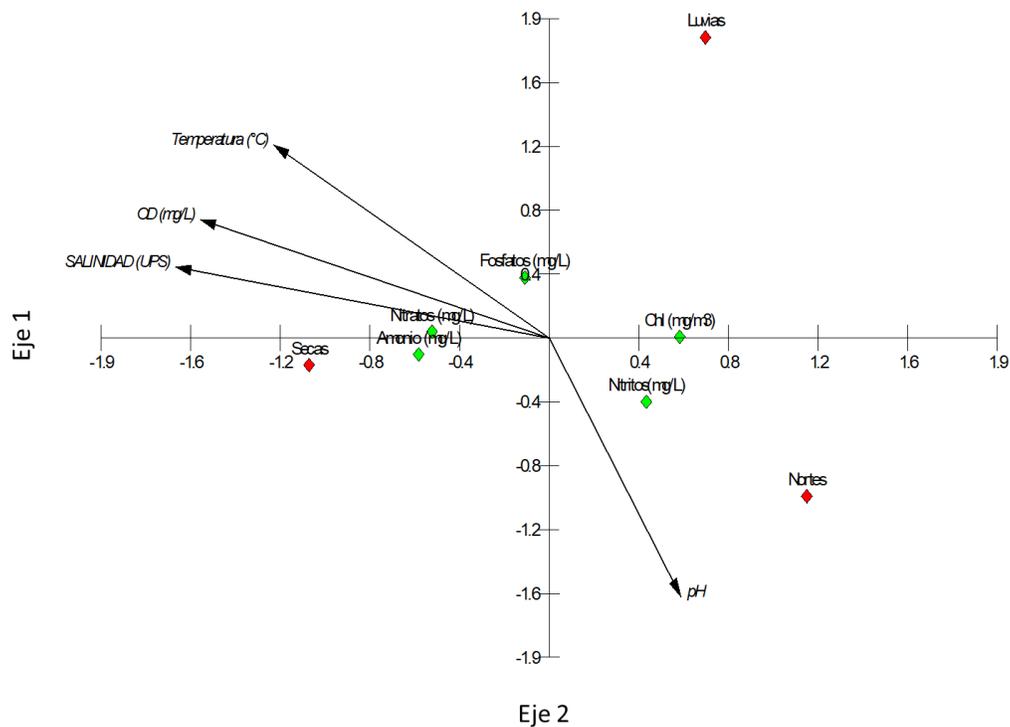


Figura 43. Análisis de correlación entre los parámetros fisicoquímicos, nutrientes y clorofila a en tres temporadas de muestreo (Nortes, Secas, Lluvias) en el SPA.

El ACC del SPE determinó que las variables de oxígeno disuelto y temperatura contribuyen de manera significativa en el eje 1, estas variables se encuentran correlacionadas de manera positiva durante la temporada de secas, con una correlación de 0.98 para la temperatura y el oxígeno disuelto, en cambio, las variables de pH y salinidad no presentaron una correlación significativa con los nutrientes en las diferentes temporadas de muestreo. se registraron correlaciones para la sanidad de 4.9 y en el caso del pH de 0.65 con relación al eje 1 (Fig. 44).

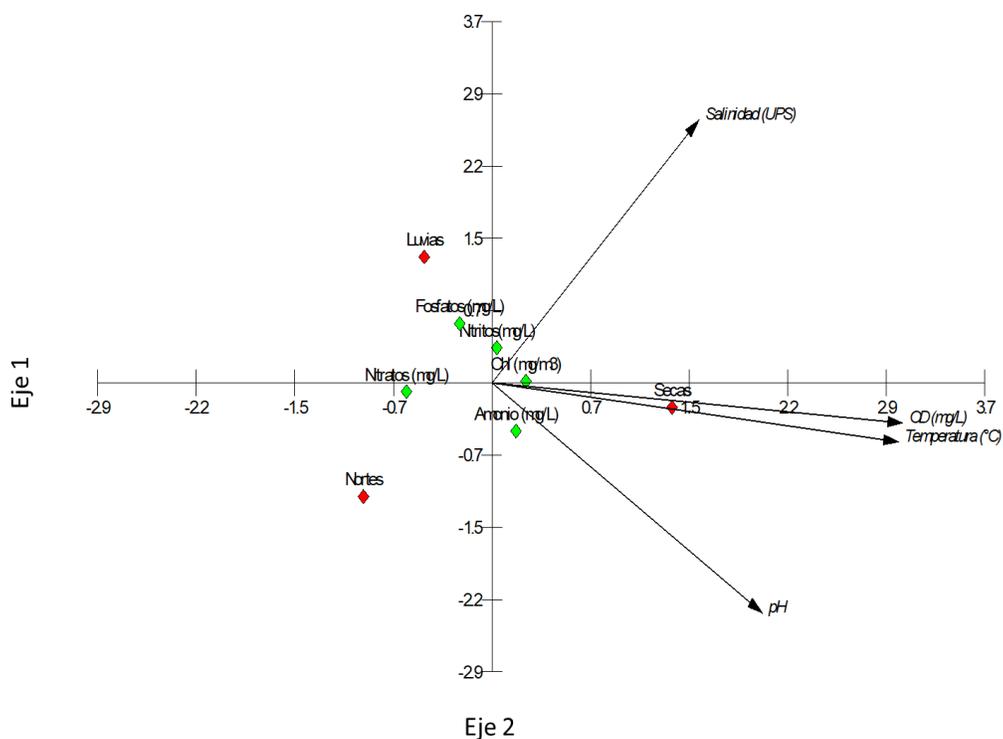


Figura 44. Análisis de correlación entre los parámetros fisicoquímicos, nutrientes y clorofila a en tres temporadas de muestreo (Nortes, Secas, Lluvias) en el SPE.

### Análisis de cobertura de manglar

Se realizó un análisis de la cobertura de manglar en la zona que comprende el APFFLT y en la zona de influencia que interactúa con el ANP, el análisis se evaluó

durante tres distintas temporadas a partir de datos de cobertura de manglar de la CONABIO, durante los años 1981-2005, 2005-2010 y de 2010-2015.

En el área natural protegida, durante la temporada 1981-2005 se registró una cobertura sin cambios de 761.15 km<sup>2</sup>, y se observó una pérdida en la cobertura de 135.24 km<sup>2</sup> durante este periodo. También se registró una ganancia en la cobertura de 31.67 km<sup>2</sup> dentro de la zona SPA y SPE del APFFLT. Para el periodo de 2005 a 2010 se registró una pérdida de manglar de 16.62 km<sup>2</sup>, una ganancia de la cobertura de 11.53 km<sup>2</sup> y una extensión sin cambios de 775.46 km<sup>2</sup>. Durante el periodo 2010 a 2015 se registró una pérdida de 15.31 km<sup>2</sup>, una ganancia en la cobertura de manglar de 22.29 km<sup>2</sup>, y una extensión sin cambios de 771.68 km<sup>2</sup> (Fig. 45)

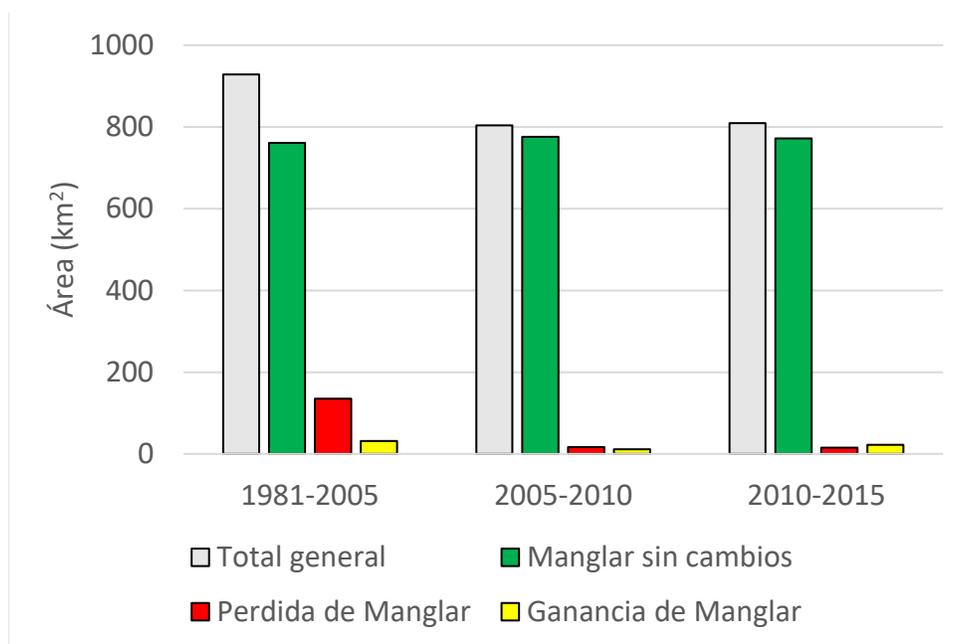


Figura 45. Cambio de cobertura de manglar aledaño a los SPA y SPE dentro del APFFLT para los periodos de 1981 a 2015.

El cambio más importante en la cobertura de manglar se registró durante el periodo 1981-2005, lo que corresponde a un decremento del 14.57%, el porcentaje de pérdida en los siguientes periodos fue de 2.07% para el periodo de 2005-2010 y de 1.89% para el periodo de 2010-2015. La mayor ganancia de la cobertura de manglar se presentó en el periodo 2010-2015, se registraron ganancias de 22.29 km<sup>2</sup>, lo que corresponde al 2.75% del área total evaluada (Tabla 6).

Tabla 6. Cambio de la cobertura de manglar presente en la zona del APFFLT durante el periodo 1981-2005, 2005-2010 y de 2010 a 2015.

Categoría	1981-2005		2005-2010		2010-2015	
	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Manglar sin cambios	761.15	82.02	775.46	96.50	771.68	95.35
Pérdida de Manglar	135.24	14.57	16.62	2.07	15.31	1.89
Ganancia de Manglar	31.67	3.41	11.53	1.43	22.29	2.75
Total general	928.06		803.61		809.28	

Se realizó el análisis de cobertura de la Zona de Influencia (Zona II) del APFFLT, durante el periodo 1981 a 2005. Se registró una pérdida de cobertura de manglar de 3.0 km<sup>2</sup>, la ganancia de la cobertura de manglar fue de 1 km<sup>2</sup> y la extensión sin modificar fue de 37 km<sup>2</sup>. Para el periodo 2005 a 2010 la pérdida de manglar fue de 1.13 km<sup>2</sup>, la ganancia en su cobertura fue de 1.80 km<sup>2</sup> y el manglar sin modificación de 40.29 km<sup>2</sup>. Para el periodo 2010 a 2015 se registró una pérdida en la cobertura de 0.48 km<sup>2</sup>, una ganancia de 0.42 km<sup>2</sup> y un total de manglar sin cambio de 41.61 km<sup>2</sup> (Fig. 46).

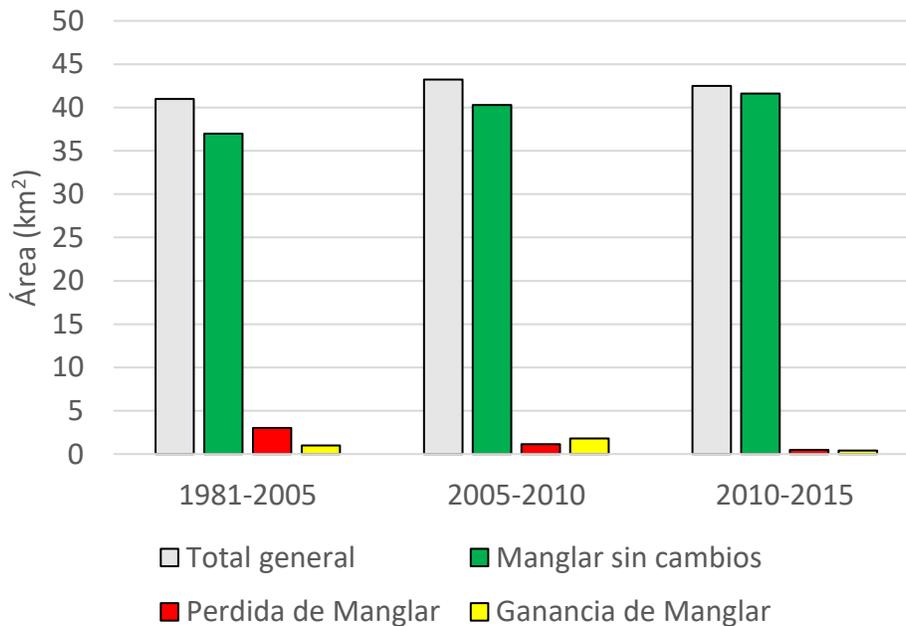


Figura 46. Cambio de cobertura de manglar aledaño a los SPA y SPE de la Zona de Influencia del APFFLT para los periodos de 1981 a 2015.

A partir de los cambios presentes en la Zona del Influencia del APFFLT se registró el mayor porcentaje de pérdida durante el periodo 1981 a 2005 del 7.32% y para los últimos periodos de 2005 a 2015 se registró un porcentaje de 2.61% y 1.13%. La mayor ganancia de cobertura de manglar respecto al tiempo evaluado se presentó durante el periodo 2005-2010 con un total de 4.17% (Tabla 7).

Tabla 7. Cambio de la cobertura de manglar presente en la Zona del Influencia del APFFLT durante el periodo 1981-2005, 2005-2010 y de 2010 a 2015.

Categoría	1981-2005		2005-2010		2010-2015	
	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Manglar sin cambios	37	90.24	40.29	93.21	41.61	97.89
Pérdida de Manglar	3	7.32	1.13	2.61	0.48	1.13
Ganancia de Manglar	1	2.44	1.80	4.17	0.42	0.98
Total general	41		43.23		42.51	

Se realizaron los mapas de distribución de manglar con los cambios en cuanto a pérdida de manglar (zona roja), ganancia del manglar (zona amarilla) y las zonas de manglar en donde no se registraron cambios (zona verde) los cuales se observan en la siguiente figura.

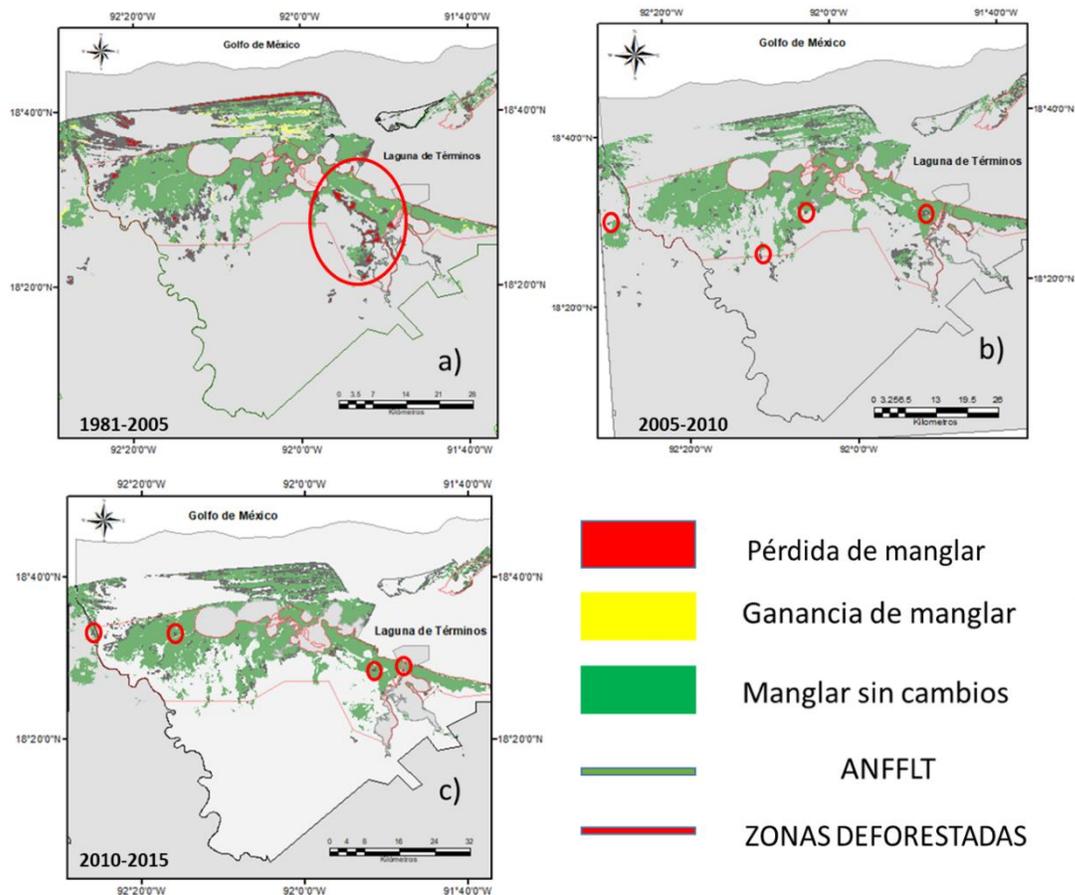


Figura 47. Cobertura de manglar de APFFLT y el área de influencia. A) Periodo de 1981-2005, b) 2005-2010, c) 2010-2015.

## ANÁLISIS DE SEDIMENTOS

Se obtuvieron los porcentajes granulométricos de los sedimentos en los SPA y SPE durante la temporada de nortes. En el SPA los mayores porcentajes de arenas se encontraron en la porción correspondiente a las lagunas de Pom y Atasta, con 65-77% de arenas. La zona intermedia de la laguna de San Carlos presentó la mayor concentración de limos con un 78%, sin embargo, a lo largo de las lagunas interiores del sistema se registró un intervalo entre el 36 y 56 % de limos. Los tamaños granulométricos correspondientes a las arcillas se encontraron en mayor porcentaje (53%) en la zona correspondiente a la Boca del SPA, este sitio es el que permanece con una interacción constante con la Laguna de Términos (Fig. 48).

Se encontraron cuatro categorías texturales en los sedimentos del SPA, la categoría con un mayor porcentaje fue la que presentó arena y arcilla con un 40%, seguida de la categoría de arena limosa con un 30% (Fig. 48).

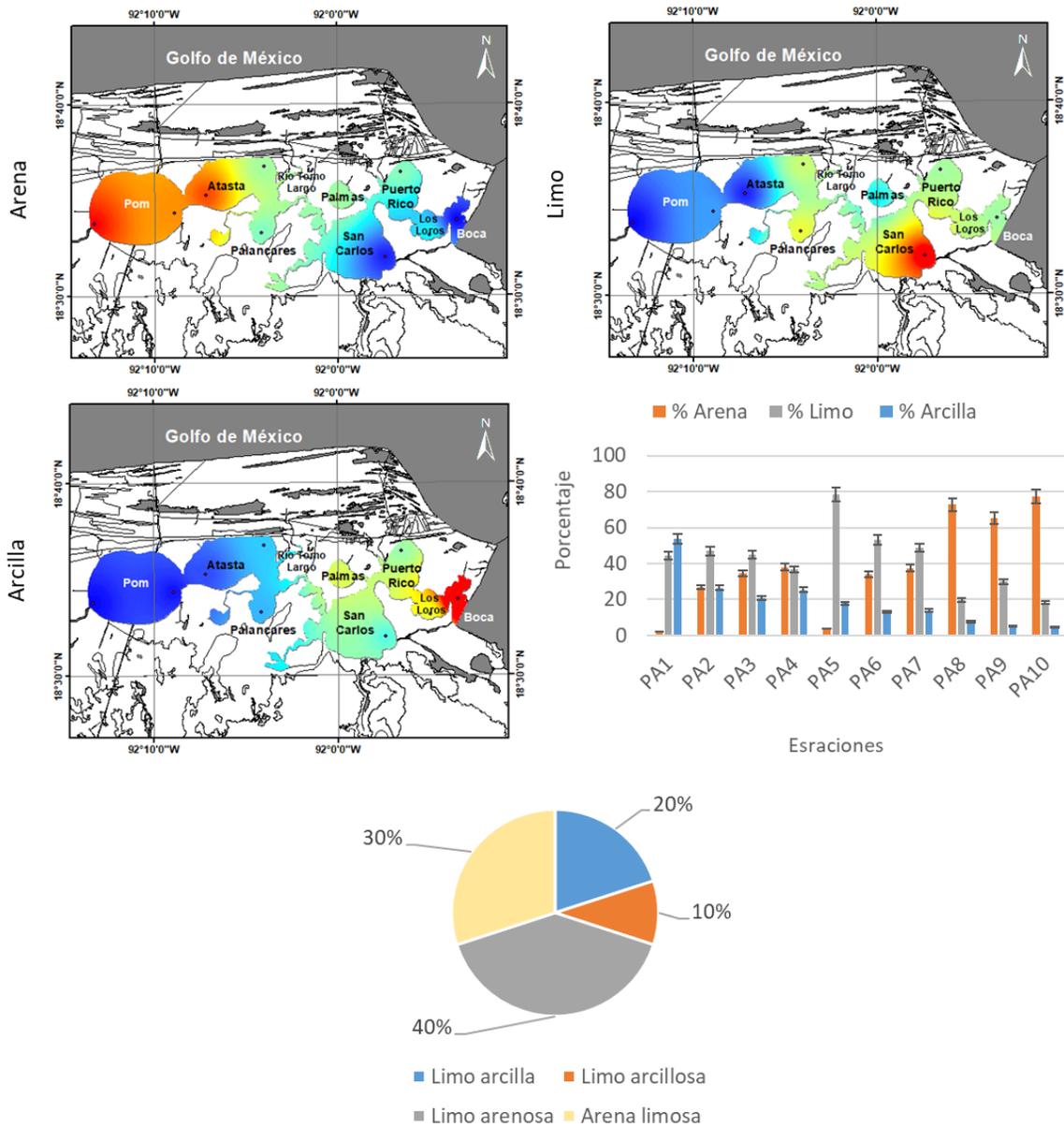


Figura 48. Distribución de porcentajes granulométrico de cada fracción sedimentaria (arenas, limos, arcillas) del SPA. Porcentajes de los grupos texturales de los sedimentos presentes en el SPA durante la temporada de nortes.

En el SPE las zonas con mayores porcentajes de arenas fueron las desembocaduras de los ríos Palizada y el río Las Cruces, entre 55 y 66%. En el

caso de la fracción limosa el mayor porcentaje se encontró en la Laguna Del Este, con un total de 56%. Las mayores concentraciones de arcillas fueron de 72%, este porcentaje se encontró en el Seno de Palizada el cual desemboca en el sitio de Boca Chica, esta es la zona que mantiene una mayor interacción con la Laguna de Términos (Fig. 49).

Se encontraron cinco categorías texturales en el SPE, se observó que la categoría de arena limosa tuvo mayor representación con un 40%, seguida de la arcilla limosa junto con la categoría arcilla-limo con un 20 %, por último, la categoría de limo arcilloso y arena arcilloso con un 10%. (Fig. 49).

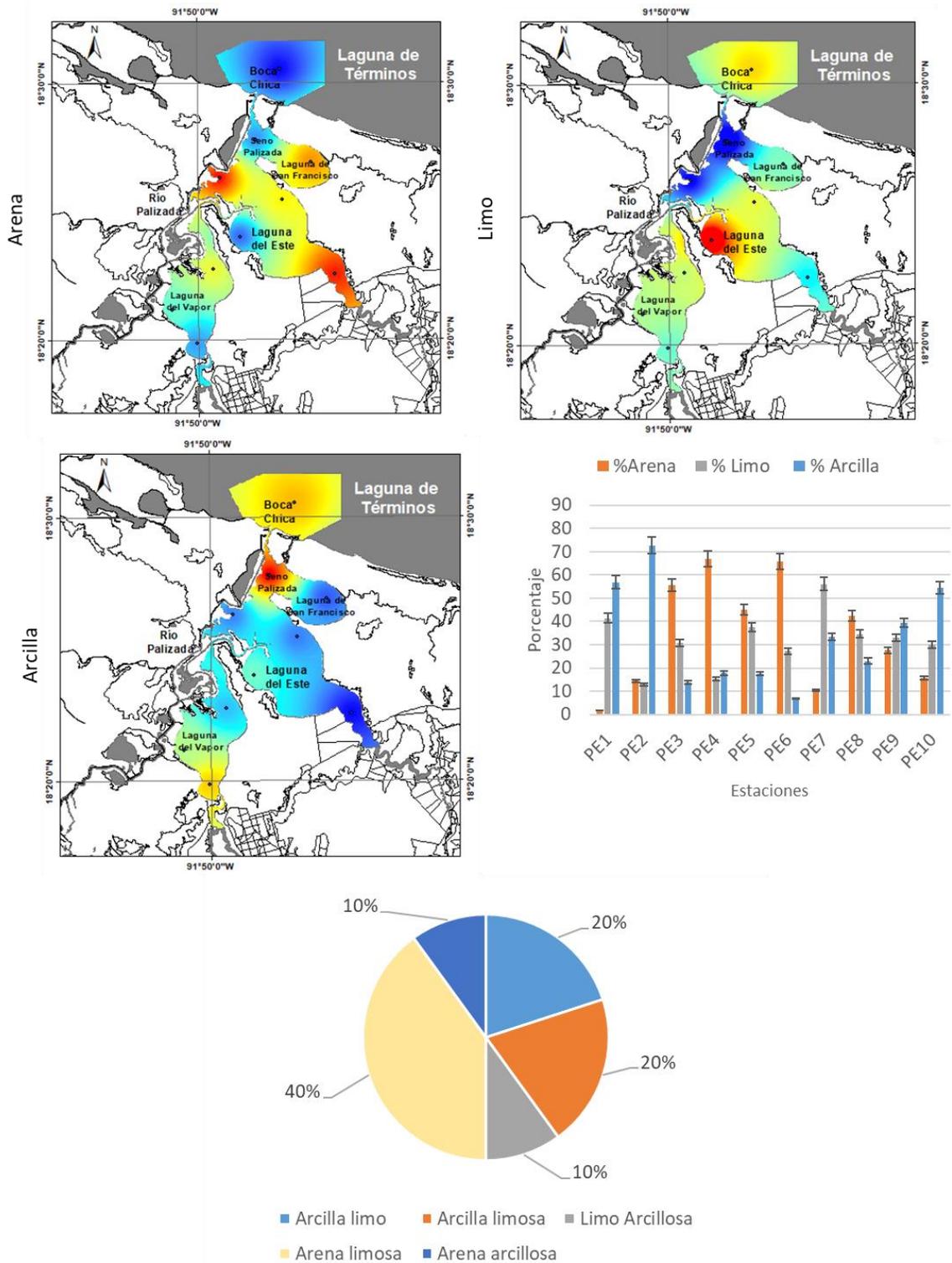


Figura 49. Distribución de porcentajes granulométrico de cada fracción sedimentaria (arenas, limos, arcillas) del SPE. Porcentajes de los grupos texturales de los sedimentos presentes en el SPE durante la temporada de nortes.

## **DISCUSIÓN**

### **VARIABILIDAD AMBIENTAL**

#### **Temperatura ambiental**

Se registraron temperaturas históricas máximas de 44°C durante el mes de mayo, y mínimas de 10°C, en el mes de enero. Datos registrados por Ramos-Miranda *et al.* (2006) mencionan que en el sitio se presentan temperaturas máximas de 40°C y mínimas de 17°C, esto muestra que en los últimos años existen anomalías térmicas en valores máximos de temperatura atmosférica de 4°C para la zona.

En las series de tiempo se observó que la temperatura se mantiene sobre una media de máximas de 34°C, y mínimas de 22.5°C, lo que corresponde con los valores que registró Ruíz (2017), donde determinó las anomalías térmicas para la Laguna de Términos durante los meses de mayo a junio de los años 2009 y 2010, e indica que estos meses son los más cálidos y establece la existencia de una temporada de estiaje muy acentuada, también registra máximos de temperatura de 36°C durante mayo de 2010. Para esta investigación se observó que durante el periodo 1985-1990 se presentó un ligero aumento en la variable de temperatura, a partir del periodo de 1991-1995 la temperatura disminuye y mantiene promedios de 30°C de temperaturas máximas, en el periodo 2010 al 2015 se observa una tendencia creciente de temperatura, y para una proyección al 2025 mantiene este incremento. Ayala-Pérez (2006), menciona que la temperatura media anual para la región durante un periodo de 30 años es de 26.8°C.

#### **Precipitación**

De los registros de precipitaciones durante los meses de junio a octubre de 1985 a 2015, se observan máximos de 40 mm durante el mes de septiembre, los meses de precipitación en la región determinan la temporada de lluvias, diversos autores mencionan que la temporada de lluvias es de junio a octubre, con un rango entre 1100 y 2000 mm/año (Yáñez-Arancibia *et al.*, 1980; Yáñez-Arancibia *et al.*, 1982; de la Lanza-Espino y Lozano-Montes, 1999; Robadue *et al.*, 2004; Ramos-Miranda *et al.*, 2006).

La precipitación máxima durante los muestreos se registró en septiembre con 238 mm, y la mínima se registró en marzo con 15.5 mm. Ayala-Pérez (2012) menciona que para la zona de Laguna de Términos se llegan a presentar precipitaciones promedio en la temporada de lluvias de 976.7 mm.

### **Velocidad de viento**

Se registraron vientos máximos en dirección noreste-noroeste en la temporada de nortes, con velocidades máximas de 8.10 m/s. En la temporada de secas se registraron velocidades de 11.10 m/s en dirección sureste a noroeste, las velocidades máximas entre los tres muestreos se registraron en la temporada de lluvias, con velocidades mayores de 11.10 m/s. Diversos autores han detectado que la dirección es de este a sureste en marzo, y de norte a noroeste en los meses de octubre a febrero (Yáñez-Arancibia *et al.*, 1982; De la Lanza-Espino y Lozano-Montes, 1999; Ayala-Pérez, 2012). Los vientos máximos se registran durante la temporada de lluvias, esto coincide con los fenómenos hidrometeorológicos que pasan por la Laguna de Términos (Ruíz, 2017).

Yáñez-Arancibia, *et al.*, (1982) mencionan que las máxima velocidades de vientos se registran durante la temporada de nortes, con velocidades mayores a los 8 m/s, el resto del año existen brisas del mar con velocidades de 4 a 6 m/s con dirección este-sureste. Estos registros son similares a los obtenidos durante la presente investigación.

De acuerdo con García (1998) el clima que se presenta en la zona oriental es característico de un clima cálido húmedo con lluvias en verano (A(mf)), se mantiene otro clima en la parte central de la Laguna de Términos y la Ciudad del Carmen, el cual se caracteriza por tener un clima cálido subhúmedo con mayor humedad (AW1(w)) (Ramos-Miranda *et al.*, 2006).

Durante el monitoreo ambiental de los sistemas fluvio-lagunares PA y PE se tuvieron en cuenta las condiciones meteorológicas que se presentan en los sitios, debido a que el clima es un factor que determina las condiciones para el desarrollo de las especies, éstas presentan tolerancias a rangos de temperaturas, humedad, radiación solar, etc. Como consecuencia del aumento de la temperatura y la

variación de la precipitación, producto del calentamiento global, muchos de estos hábitats serán modificados, principalmente en las zonas costeras con el incremento del mar y la temperatura en sus aguas, lo que afectará la distribución, fenología, reproducción y metabolismo de los organismos acuáticos y terrestres (Lorente *et al.*, 2004; Useros, 2013)

## **VARIABLES HIDROLÓGICAS**

### **Temperatura**

La distribución de temperatura promedio de la columna de agua en los SPA y SPE osciló entre los 25°C a 30.6°C durante las temporadas de muestreo, destacándose las temperaturas mínimas durante noviembre (temporada de nortes) y las mayores temperaturas en abril (temporada de secas). Ayala-Pérez (2006), registró temperaturas entre 23.7°C en enero que corresponde a la temporada de nortes y de 31.3 °C en agosto que corresponde a la temporada de lluvias. Muciño-Márquez *et al.* (2014) registraron temperaturas que oscilaron entre los 21.6 y 23.8°C durante la temporada de nortes. Se observa que para el presente estudio en la temporada de nortes se presentó un incremento en la temperatura de la columna de agua con respecto a los autores anteriores que reportan temperaturas para el año 2006 y 2014.

La fluctuación de este parámetro se debe a diversos factores; principalmente a la comunicación que existe entre la Laguna de Términos y los SPA y SPE, que mantiene flujos de circulación naturales y artificiales, así como a las diversas entradas de ríos, arroyos y de escurrimientos de aguas templadas hacia los sistemas. Otro factor a considerar y que influye en la temperatura de la columna de agua es la estacionalidad intrínseca de ambos sitios, que determinan los cambios de temperatura superficial y de fondo (De la Lanza-Espino y Lozano-Montes, 1999).

La profundidad influye en la distribución de la temperatura en la columna de agua, en ambos sistemas se registraron profundidades menores a 2.2 m, esta variable es fundamental para que exista un flujo de calor directo entre la temperatura del aire hacia la columna de agua. Por lo tanto, el incremento gradual que se ha registrado en los últimos años de la temperatura atmosférica, provocada por el calentamiento

global puede inducir el incremento de la temperatura de las condiciones de la columna de agua en ambos sistemas (Salas-Pérez y González-Gándara, 2016).

### **Salinidad**

La salinidad más alta que se registró en el SPA durante la temporada de secas fue en los sitios uno, dos, tres, cuatro y cinco. En el SPE las concentraciones máximas fueron registradas en el primer sitio de muestreo. Sin embargo, en este sistema durante la temporada de lluvias se observó un incremento en la salinidad en los sitios dos y tres, los cuales son sitios con mayor interacción con la Laguna de Términos.

Estudios elaborados por De la Lanza-Espino y Lozano-Montes (1999) registraron concentraciones de salinidad máximas de 29.0, asimismo Ayala (2006) registró salinidades máximas en el SPE de 33.3, en el caso del SPA registró máximos de 14.9 en diciembre.

La salinidad se encuentra determinada por el efecto de las corrientes de agua de la Laguna de Términos sobre los SPA y SPE. La salinidad es un excelente indicador del movimiento del agua, permite la observación de estratificación de la columna de agua de manera espacial y temporal. En el SPA debido a su ubicación, geomorfología y conexión con la Laguna de Términos se observan sitios con alta salinidad, lo que determina que la temporalidad, el régimen de marea, la tasa de evaporación, la precipitación y los vientos, permite diferenciar diversos ambientes. Estos ambientes son: i) comportamiento polihalino (18-30 unidades), se presenta durante la temporada de secas y lluvias en los sitios con interacción con la laguna, los cuales lo conforman las lagunas de Loros, Puerto Rico, Las Palmas, San Carlos, y el Corte, y ii) un ambiente oligohalino (0.5- 5 unidades) en los sitios internos del sistema, lo representan las lagunas Palancares, Atasta, Pom, y La Colorada, estas lagunas que interaccionan con las entradas de las escorrentías y van a descargar su flujo por el canal de conexión llamado Río Torno Largo, el cual separa las aguas y los ríos asociados. Existen otras contribuciones hidrológicas como el Canal del Gallego, el cual inducen las bajas salinidades, aporta un volumen pequeño de agua dulce y desemboca en la Laguna Pom. Este canal es alimentado por escorrentías

del Río San Pedro y San Pablo, que es ramal del sistema Grijalva-Usumacinta (Ramírez-Carrillo, 2007).

Aguirre-León *et al.*, (2010) determinaron el comportamiento fisicoquímico del SPA, en el cual registran una marcada diferencia entre la zona de interacción con la Laguna de Términos, la cual clasifican como ambiente con influencia marina, y la zona interna que interactúa con las Lagunas Pom y Atasta, que se caracterizan por presentar condiciones de ambientes de influencia dulceacuícola. Asimismo, en SPA observaron una estratificación salina en la columna de agua que permite clasificar estos dos ambientes con variaciones hidrológicas bien definidas.

En el caso del SPE se observaron las mayores concentraciones de salinidad en la zona de Boca Chica y la Laguna de San Francisco que corresponden a los tres primeros sitios de muestreo durante la temporada de secas, esto se debe a que existe un flujo de agua salobre producto del sistema de marea de la Laguna de Términos durante esta temporada, y a la disminución de los caudales provenientes de los ríos Las Cruces, Las Piñas y Marentes, con lo cual se genera un ambiente polihalino (18 - 30 unidades). En la temporada de nortes los aportes de los ríos asociados generan un ambiente oligohalino (0.5 - 5) a lo largo de los sitios de muestreo. Durante la temporada de lluvias se observa que el aporte de estos ríos permite que se genere un ambiente oligohalino (0.5 - 5) a lo largo del sistema, con excepción del primer sitio, el cual se encuentra en Boca Chica, este punto se mantiene en constante interacción con la Laguna de Términos.

La salinidad estacional de los ambientes del SPA y SPE fueron clasificadas de acuerdo con Mitsch y Gosselink (2015). Esta clasificación comprende a ambientes marinos y estuarinos, a partir del gradiente salino que determina los sistemas en oligohalino con un rango de salinidad de 0.5 - 5, mesohalino entre 5 - 18, polihalino de 18 - 30, eurihalino de 30 - 40 e hipersalino con salinidades mayores a 40.

Muciño-Márquez *et al.* (2014) observaron en el SPE concentraciones máximas de salinidad de 6.3 durante la temporada de nortes, y registraron un gradiente de concentraciones desde la boca que desemboca en la Laguna de Términos hacia el interior del sistema fluvio-lagunar.

Ayala-Pérez (2006) registró en el SPE concentraciones promedio máximas de 33.3 de salinidad en temporada de secas en un sitio que se encuentra directamente en la Laguna de Términos, las zonas interiores del sistema registraron valores mínimos de 0.01, lo cual coincide con los resultados obtenidos.

La dinámica de salinidad que se presentó en ambos sistemas está relacionada directamente al volumen de descarga, escorrentías y temporalidad de la región circundante de los SPA y SPE, ya que el flujo de descarga afecta considerablemente el gradiente salino de cada sistema (Ayala-Pérez, 2006).

Los gradientes de salinidad que se encontraron en los SPA y SPE determina la composición biológica de las zonas costeras, muchos de los organismos de la estructura trófica de las zonas costeras se encuentran adaptadas a condiciones de salinidad específicas, a salinidades bajas la biota es típica de aguas salobres, y con altas salinidad se mantiene una biota de aguas salobres y la biota de agua dulce comienza a desaparecer o es desplazada hacia otros microambientes menos salinos (Fernández *et al.*, 2010). Esta distribución se debe a que los organismos estuarinos y de agua dulce presentan adaptaciones para vivir en estos ambientes, estas adaptaciones se encuentran determinadas por el sistema de osmorregulación y excreción ante el contenido de salinidad en su sistema (Re *et al.*, 2004; López-Martínez *et al.*, 2008). Por lo tanto, el flujo de las aportaciones en estos sistemas es de suma importancia para el mantenimiento de la diversidad biológica y la productividad de los SPA y SPE.

### **Oxígeno disuelto**

Las concentraciones que se registraron de oxígeno disuelto del SPA determinan a los sitios de muestreo como aguas oxigenadas (3.1 – 5.0 mg/L), las cuales regulan el mantenimiento y desarrollo de los organismos presentes en este sistema. En el SPE se registraron concentraciones menores con respecto al SPA durante las tres temporadas de muestreo, se observó que estas condiciones mantienen aguas ligeramente oxigenadas (1.1 – 3.0 mg/L). Sin embargo, durante la temporada de nortes, en la estación seis, se registraron concentraciones de oxígeno disuelto mínimas, lo que generó condiciones escasamente oxigenadas (0.1 – 1.0 mg/L).

Estas variaciones locales son inducidas por la variación salina, ya que se observa una relación inversa entre el gradiente salino y el gradiente de oxígeno, en el cual a mayor presencia de salinidad se registraron valores menores en la concentración de oxígeno disuelto, esto se muestra en la figura 42 del Análisis de Correspondencias Canónicas.

Se han reportado en el SPA variaciones de oxígeno disuelto desde 4.2 hasta 8.2 mg/L, según la localidad (Ayala-Pérez, 2006). Aguirre-León *et al.*, (2010) observaron que los cambios de esta variable no fluctuaban a lo largo del sistema, no obstante, las variaciones más evidentes se observaron al comparar las concentraciones superficiales y de fondo, registraron las mayores concentraciones en abril, con valores máximos de 8.3 y 7.6 mg/L, en la superficie y en el fondo de 8.1 y 8.5 mg/L, las cuales fueron registradas en el sistema de lagunas que presenta interacción directa con la Laguna de Términos.

Muciño-Márquez *et al.* (2014) reportaron concentraciones máximas de 9.37 mg/L en la laguna de San Carlos del SPA para febrero del 2011, las menores concentraciones fueron de 4.0 mg/L en la boca que confluye con la Laguna de Términos. En el SPE se registraron concentraciones máximas de 8.05 mg/L cerca de la descarga de los ríos Las Piñas y Marentes del SPE. Las menores concentraciones fueron de 4.4 mg/L en la cuenca Palizada. Se observa que el SPE presenta menores concentraciones de oxígeno a comparación al SPA.

La concentración del oxígeno disuelto que se registró en el agua de ambos sistemas está determinada por diversos factores ambientales, químicos, y biológicos. Dentro de los factores ambientales la temperatura es una de las variables fundamentales que determinan la concentración de oxígeno disuelto en cada sitio, ya que al incrementarse esta variable disminuye la capacidad del oxígeno para disolverse, esto se debe a la relación inversamente proporcional de ambas variables (Muñoz *et al.*, 2015). Otra de las variables que determinan la concentración de oxígeno disuelto en los SPA y SPE es la estacionalidad de la región, el viento y la precipitación, que, al influir directamente en las lagunas de los sistemas permiten la oxigenación y mezcla de la columna de agua (Riđanović *et al.*, 2010).

Entre los procesos químicos que determinan las concentraciones de oxígeno en los sistemas estudiados se encuentran los procesos de óxido-reducción, los productos químicos del metabolismo, la descomposición de materia orgánica, la transformación de nutrientes, las reacciones donde influye la salinidad, los procesos de fotosíntesis oxigénica, etc. Las descargas de diferentes compuestos y contaminantes de las actividades humanas establecen las condiciones de oxígeno de los sistemas, ya que el SPE tiene una mayor influencia con relación a las descargas antrópicas, las concentraciones que se registraron en este sitio las mantienen en condiciones ligeramente oxigenadas (De la Lanza y Aguirre 1999; Fernández *et al.*, 2010).

Con relación a los procesos biológicos que influyen en la concentración de oxígeno en ambos sistemas, se encuentran la fotosíntesis de los productores primarios (fitobentos), principalmente del fitoplancton y algunas especies de vegetación sumergida acuática, así mismo por la respiración de la biota acuática, descomposición por microorganismos de materiales orgánicos en el agua, etc. (De la Lanza Espino y Aguirre, 1999; Sosa-Avalos, 2013; Muñoz *et al.*, 2015).

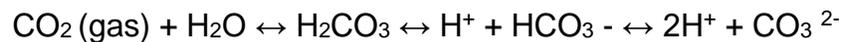
## **pH**

La influencia directa o indirecta del pH de los SPA y SPE en los organismos es difícil de determinar, sin embargo, la concentración en cada sitio se debe a la morfogénesis sedimentaria y geológica de cada sistema, así como a las aportaciones de los diversos ríos y escorrentías, a los procesos de fijación de carbonatos y a la degradación de la materia orgánica que se presenta en las zonas de manglar y en la parte de la interfase agua-sedimento. Sin embargo, en aguas naturales el pH óptimo para mantener y facilitar la vida de diversos organismos oscila entre 4.8 y 10.5, por lo tanto, las concentraciones obtenidas durante las temporadas de muestreo en ambos sistemas permiten el desarrollo y el mantenimiento de los organismos de manera óptima (Flores-Verdugo *et al.*, 2007).

Ayala-Pérez (2006), registró mínimas variaciones entre el pH superficial y de fondo de los SPA y SPE, con niveles entre 7.8 y 8 a lo largo de diferentes temporadas climáticas, siendo abril el que mantuvo la mayor variabilidad de este parámetro en

el SPA. Ayala-Pérez *et al.*, (2014) determinaron que el pH en el SPA puede variar entre 7.0 a 9.0, y para el SPE se registraron variaciones entre 7.2 y 8.7, esta variabilidad es similar a lo registrado en el presente estudio.

Los efectos indirectos más importantes del pH en los ecosistemas monitoreados se relacionan con los procesos calcio-ácido carbónico en el cual el CO<sub>2</sub> disuelto reacciona con el agua, formando ácido carbónico y productos de disociación como bicarbonato y carbonato:



Con el consumo de CO<sub>2</sub> por los productores primarios o disolución hacia la atmósfera la reacción genera que las concentraciones de H<sup>+</sup> disminuyan y con esto induce que el pH aumente, esto provoca que los ambientes se alcalinicen. Cuando existen procesos de respiración se induce a un incremento de concentración de CO<sub>2</sub> disuelto, lo que causa que las concentraciones de H<sup>+</sup> aumenten y con esto disminuye el pH, dando lugar a ambientes ácidos (Álvarez-Borrego, 2007).

Otro efecto que llega a determinar el cambio en el pH de los SPA y SPE es la disociación de iones metálicos, los cuales pueden ser tóxicos para la vida en ambos sistemas, ya que cuando disminuye el pH aumenta la solubilidad de metales como el Zn, Pb, Cd, Fe, Ni, etc. (Ruiz *et al.*, 1994). Cuando el pH aumenta en un sistema acuático ocasiona que los metales precipiten y se sedimenten (Fernández *et al.*, 2010).

Un factor fundamental por considerar con esta variable en los sistemas evaluados es la dinámica de nutrientes, en particular con el ion amonio, el cual llega a tener efectos directos en la biota cuando existe un cambio considerable en la columna de agua. Cuando el pH se encuentra a niveles por debajo de 8, el amonio predomina, al incrementarse el pH a niveles de 10, el amonio se transforma en amoniaco, el cual es altamente tóxico para mantener la vida acuática. Por lo cual el pH puede condicionar la química acuática de los SPA y SPE, aunado a esto, esta variable determina las condiciones biológicas de los organismos acuáticos que mantienen ambos ecosistemas (Fernández *et al.*, 2010).

## **Análisis de agrupamiento**

En la temporada de secas se presentaron dos agrupaciones en el SPA entre los sitios de muestreo que se encuentran en la Boca del sistema y las lagunas de Los Loros y Puerto Rico. Esto se debe a que en estos sitios se mantienen flujos hidrodinámicos con la Laguna de Términos, lo que implica un comportamiento diferencial en la dinámica de las variables de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y pH.

Durante la temporada de lluvias se observó una agrupación entre los cinco primeros sitios de muestreo, con respecto a las variables fisicoquímicas, se determinó dos ambientes particulares en el SPA, el primero con características estuarinas y otro con características de ambientes de agua dulce.

Durante la temporada de lluvias el comportamiento estuarino se encontró hasta el interior de la laguna de San Carlos, la cual correspondió al sitio cinco de muestreo, las aguas menos estuarinas fueron las agrupadas con el resto de los sitios, los cuales se encuentran en las lagunas Palancares, Atasta y Pom, el cambio fisicoquímico lo determina el Río Torno Lagarto, el cual separa a las masas de agua, y genera características particulares durante las diferentes temporadas climáticas.

Para el SPE se observaron condiciones similares, durante la temporada de nortes la dinámica fisicoquímica fue homogéneas a lo largo del sistema. En la temporada de secas se registraron dos grupos particulares, el primero es el que tiene influencia directa con la Laguna de Términos y mantienen condiciones estuarinas, este se ubica a partir de la Boca Chica y Seno Palizada.

Durante la temporada de lluvias las condiciones dentro del sistema cambiaron drásticamente, se presentaron condiciones de agua dulce, esto se debe al volumen de descarga que aportan los diferentes ríos, principalmente del Río Palizada, seguida del Río Las Cruces, Las Piñas y Marentes. Estas descargas permitieron el lavado de la laguna y mantienen las concentraciones oligohalinas (Ayala-Pérez *et al.*, 2012).

Aguirre-León *et al.* (2010) observaron un comportamiento similar en el SPA, atribuyen que la dinámica fisicoquímica la determinan las épocas climáticas, los fenómenos meteorológicos y las descargas naturales.

### **Dinámica de nutrientes**

La cantidad de nutrientes suministrados a un sistema acuático lo determina la dinámica biológica, ambiental y antrópica del mismo. Muchos de los compuestos que estimulan o limitan el estado productivo de un sistema ecológico natural son los compuestos no-conservativos, los cuales son tomados por el fitobentos en diferentes concentraciones, para posteriormente integrarlos a las tramas tróficas o sedimentarlos cuando mueren a través de procesos fisicoquímicos como la floculación.

### **Amonio**

Las concentraciones máximas de amonio en el SPA durante la temporada de secas, se registraron en el primer sitio que corresponde a la Boca del sistema, Laguna de Los Loros y Puerto Rico. En el caso del SPE se observaron concentraciones máximas durante las temporadas de nortes y secas. Las distribuciones de isoconcentraciones fueron homogéneas a lo largo de este sistema.

El amonio en bajas concentraciones puede ser inocuo para muchos organismos del medio acuático, los niveles comunes en aguas naturales superficiales y subterráneas oscilan entre 10 mg/L, y para aguas residuales mayores a 30 mg/L (Fernández *et al.*, 2010).

Gómez (2015) registró concentraciones de 0.05 mg/L en el Sistema Lagunar Chantuto-Panzacola en el estado de Chiapas. Lin *et al.*, (2018) observaron concentraciones de amonio de entre 1.27 a 3.33 mg/l en la laguna Milagros, Quintana Roo, estas altas concentraciones de amonio las atribuye a las descargas de aguas residuales, que aportan concentraciones de materia orgánica. Además de las descargas, los aportes de este nutriente se generan por las escorrentías terrestres, aguas subterráneas que acarrean directamente fertilizantes nitrogenados y excrementos animales.

Carbajal-Pérez (2009), registró en su estudio valores máximos de 2.4 mg/L durante julio-agosto del 2007 en el Sistema Lagunar de Nichupté-Bojórquez, Quintana Roo. Estas concentraciones las relaciona a las aportaciones de aguas residuales, provenientes a la zona hotelera y a depósitos de origen municipal, para el resto del sistema las concentraciones fueron bajas, por lo cual la carga de amonio es puntual y de origen antropogénico.

El amonio es un indicador de altas concentraciones de materia orgánica nitrogenada, la cual es mineralizada por la acción bacteriana y es transformada en productos químicos como el amonio durante el proceso de amonificación a partir de los procesos de descomposición anaeróbica, por lo cual en los sitios que presentan altas concentraciones de amonio describen ambientes con un alto contenido de materia orgánica disuelta en la columna de agua, en ambos sistemas esta materia orgánica puede provenir de diversos escurrimientos y ríos que aportan agua al sistema (Flores-Verdugo *et al.*, 2007). En el SPA los ecosistemas de manglar que se encuentran a su alrededor llegan a exportar la mayor cantidad de materia orgánica a partir de la biomasa en descomposición, hojarasca y detritus, estos aportes constituyen la principal fuente de energía para la producción heterótrofa de microorganismos como hongos y bacterias (Flores-Verdugo *et al.*, 1992). Para el SPE el aporte principal se debe a los ríos (Ayala-Pérez, 2006).

En los sistemas evaluados el amonio puede ser considerado como indicador del reciclaje de nitrógeno y de diversos procesos de mineralización de la materia orgánica, este proceso es fundamental para satisfacer la demanda de nitrógeno por el fitoplancton (Ferguson *et al.*, 2004).

### **Nitritos**

Las concentraciones de nitritos en el SPA se mantuvieron en un rango entre 0.4-0.5 mg/L a lo largo de las tres temporadas. El sitio con mayor concentración fue el sitio diez que se encuentra en la laguna Pom, en el canal La Colorada, cercana al cauce del río San Pedro y San Pablo, de donde proviene parte del drenaje estacional de agua dulce.

En el SPE se observaron las mayores concentraciones durante la temporada de lluvias, donde se registraron concentraciones máximas en el sitio dos, la cual mantiene interacción con el río Palizada y las masas de agua de la Laguna de Términos y en el sitio nueve, el cual mantiene aportaciones directas de los ríos Las Piñas y Marentes.

Contreras *et al.* (1996) en su estudio de 39 lagunas costeras del Golfo de México, entre las cuales se encuentra la Laguna de Términos, destaca que las mayores concentraciones de nitritos se alcanzan durante la época de lluvias. Determina que la presencia de las formas nitrogenadas se transforma y mantienen a partir de los procesos de regeneración de nutrientes, que se llevan a cabo a través de la interfaz agua-sedimento, por medio de las diversas actividades microbianas.

Diversos autores determinan que la presencia en los sistemas fluviolagunares de compuestos nitrogenados como nitritos se encuentran relacionados con las características productivas y el aporte de materia orgánica hacia las lagunas costeras, lo que mantiene la generación significativa de nutrientes y otros compuestos, como el reflejo del intenso proceso de degradación de materia orgánica (Contreras *et al.*, 1996; Valenzuela-Siu *et al.*, 2007; González-Gándara, 2011).

Las formas nitrogenadas oxidadas como los nitritos son un estado de oxidación intermedio entre el amonio y nitratos, o de la reducción de nitrato a amonio. Este nutriente se genera posterior a la amonificación, a partir de la oxidación del amonio por grupos bacterianos (ej. *Nitrosomonas*), y el producto final son nitritos. Los nitritos son altamente reactivos, por lo que permanece en el medio de forma breve y se considera como altamente tóxico para los organismos acuáticos cuando los niveles superan concentraciones de 0.6 mg/L (Fernández *et al.*, 2010). Por lo anterior, el SPE presentó concentraciones que pueden influir directamente en la biología de las especies que se encuentran en estos sitios.

## **Nitratos**

Entre los principales compuestos nitrogenados se encuentran los nitratos, en el SPA se registró un promedio máximo de nitratos de 9.3 mg/L en la temporada de secas,

los niveles máximos se observaron en la estación tres y seis, la estación tres corresponde a la laguna Puerto Rico, la cual se destaca por encontrarse en el sitio donde confluyen las masas de agua provenientes del interior del SPA y la masa de agua provenientes de la Laguna de Términos. En la estación seis la cual corresponde a la laguna Palancares, se presenta una particular geomorfología que determina un mayor tiempo de residencia del volumen de agua.

Se han realizado estudios que determinan que en la Laguna de Términos las concentraciones de nitratos y nitritos pueden ser de 35 a 140 veces mayores que otros sistemas del Golfo de México, atribuyen estas altas concentraciones a los aportes fluviales y escurrimientos de las actividades agrícolas que se desarrollan en la zona, los cuales contienen diversos fertilizantes nitrogenados y fosforados (De la Lanza-Espino y Lozano-Montes, 1999).’

La transformación del nitrógeno a nitratos es la última etapa del ciclo de nitrógeno en el medio acuático, esta transformación es a partir de procesos oxidativos por consorcios microbianos, principalmente por microorganismos del phylum Proteobacteria (Orchet, 2019).

En el presente estudio se registraron en el SPA concentraciones que permiten el mantenimiento de la vida acuática durante las temporadas de secas, nortes y lluvias. Sin embargo, los valores máximos de nitratos que se registraron se deben a las altas concentraciones de materia orgánica presente en esta temporada, la cual mantiene altas tasas de degradación, debido a las condiciones de temperatura.

### **Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID)**

En el SPA se registraron las mayores concentraciones de NID durante la temporada de secas (NID =14 mg/L), en los sitios que corresponde a la Laguna de Las Palmas, donde se presentan particularidades geomorfológicas, las cuales mantienen altos tiempos de residencia de agua. El sitio siete del mismo sistema mantuvo concentraciones similares (NID =14 mg/L), este sitio se encuentra en la salida del sistema Atasta, en el cual se registra el mayor flujo proveniente de las lagunas Pom y Atasta.

Las concentraciones máximas de NID del SPE se registraron durante la temporada de lluvias (13.9 mg/L), en el sitio seis que se encuentra en la desembocadura del río Las Cruces, y en el sitio nueve, el cual se encuentra en la desembocadura de los ríos Las Piñas y Marentes.

En una investigación realizada por Muciño–Márquez *et al.*, (2014) para ambos sistemas determinan que los sitios con mayores valores de NID se registraron en la Laguna Las Palmas del SPA, y para el SPE se registraron valores máximos en el sitio que corresponde a la Laguna del Vapor, no observaron diferencias significativas en las concentraciones de ambos sistemas.

Muciño-Márquez *et al.*, (2017) determinaron los compuestos de NID en los SPA y SPE, y las máximas concentraciones se obtuvieron en la estación siete del SPA que corresponde a la Laguna de Atasta, los valores mínimos se registraron en la mayor parte del sistema en la temporada de nortes (noviembre 2008). En el SPE se encontraron las máximas concentraciones en la Laguna de San Francisco, sin embargo, no observaron diferencias significativas entre los diferentes sitios, meses y sistemas evaluados.

En el mismo estudio determinaron que la contribución de la composición del NID en su mayoría lo aportan las concentraciones de amonio. En el SPA el valor máximo se registró en la estación que se encuentra en la Laguna de Pom, y para el SPE se registró en la estación que se encuentra en la Laguna Del Este, lo cual coincide con los sitios evaluados en el presente estudio y mantienen las máximas concentraciones de NID.

Así mismo, otro componente del NID es el nitrato, el SPA se registraron concentraciones similares entre los sitios muestreados. Para el SPE el máximo de este nutriente se registró en la estación que se encuentra en la Laguna Del Este.

Como se observa en ambas investigaciones registran las mayores concentraciones en los mismos sitios evaluados en esta investigación, con lo cual se determinan que estos sitios mantienen a lo largo del tiempo sus características de generación, flujo y mineralización de nutrientes de compuestos nitrogenados.

## Fosfatos

En el SPA durante la temporada de secas se registraron a lo largo del sistema las mayores concentraciones de fosfatos en la columna de agua ( $\bar{x} = 0.28$  mg/L) en los sitios dos, tres, cuatro y cinco, los cuales corresponden a las lagunas de Los Loros, Puerto Rico, Palmas, y San Carlos, que se encuentran en la primera sección del sistema.

En el caso del SPE se observaron concentraciones máximas durante la temporada de secas ( $\bar{x} = 0.38$  mg/L), las cuales se registraron en los sitios seis y siete, donde se encuentran las descargas del río Las Cruces, y llegan a la Laguna Del Este. Se sugiere que, con la entrada de los aportes de los ríos y la entrada de agua de la Laguna de Términos hacia la fase sedimentaria, produce un aporte de compuestos de fosfatos del agua intersticial sedimentaria hacia la columna de agua (Aguíñiga-García y Álvarez-Borrego, 1989; Valdes y Real, 2004).

Los compuestos de fósforo en aguas naturales se encuentran en menor proporción con respecto al nitrógeno, debido a que existe una adsorción directa en los sedimentos, principalmente los que mantienen concentraciones de carbonato de calcio, convirtiéndolo en un nutriente limitante para la producción primaria (Escalona, 1985; Montalvo-Estévez *et al.*, 2013).

De la Lanza-Espino y Lozano-Montes (1999) en su comparación entre la Laguna de Alvarado y la Laguna de Términos observaron que las aportaciones de los ríos determinan el flujo de los fosfatos, registran que en la Laguna de Alvarado presenta mayores concentraciones de fosfatos, lo atribuyen a las aportaciones del Río Papaloapan juntamente con la Laguna de Tlaxicoyan. En este caso, sus caudales cruzan diversas zonas agrícolas y urbanas, con lo cual mantienen altas cargas de fosfatos.

De la Lanza-Espino y Gutiérrez-Mendieta (2017) registraron un incremento de fosfatos en la Laguna de Términos desde el año de 1974 hasta el año de 1987. Los autores mencionan que estas concentraciones no solo dependen de las descargas antropogénicas, sino a las características geomorfológicas particulares de cada sitio, y a la dinámica biogeoquímica de este nutriente, principalmente en la fase

sedimentaria, la cual juega un papel importante durante el proceso de sedimentación. Otros factores que contribuyen a la biogeoquímica de este nutriente son el sustrato mineral, las condiciones hidrodinámicas, la remoción por efecto del viento y marea, los procesos de óxido-reducción entre otros, los cuales incrementan o reducen las concentraciones, lo cual lo vuelve un compuesto limitante.

Las concentraciones de fosfatos en ambos complejos fluvio-lagunares también se debe a la tasa de generación de materia orgánica, ya que permite la incorporación de fosfatos al medio. Sin embargo, en los sitios con mayor concentración de fosfatos influyen los aportes de escurrimientos de los ríos y las descargas de actividades agrícolas, urbanas y pecuarias que se desarrollan alrededor de la zona (De la Lanza y Lozano, 1999).

Así mismo, el fósforo que se genera por meteorización de las rocas, y se transporta por diferentes mecanismos erosivos, hasta terminar en algún cuerpo de agua, generalmente, no sufren cambios en su estructura química y se encuentra como fosfato (predominantemente como compuestos de ortofosfatos) (Flores-Verdugo *et al.*, 2007). Este nutriente es fundamental para el crecimiento de los productores primarios, los cuales lo absorben rápidamente, ya que es un elemento limitante y necesario para su reproducción. Los organismos autótrofos lo incorporan a su metabolismo y lo utilizan para la formación de ácidos nucleicos, sus membranas celulares, como almacén de energía y de diversas estructuras rígidas como caparazones, esqueletos, etc. (Alventosa, 2015).

### **Fósforo Inorgánico Disuelto (FID)**

En el caso del FID, se registraron valores máximos durante la temporada de secas (FID = 0.81 mg/L) en el sitio tres de la Laguna de Puerto Rico. En el caso del SPE se registraron los máximos valores (1.14 mg/L) en la temporada de secas en el sitio siete que corresponde a la Laguna Del Este.

Las mayores concentraciones de FID del SPA se han registrado en diversos estudios en el sitio de la Laguna Las Palmas, y en el sitio de la Laguna de Pom. Para el SPE se registraron los valores máximos en la cuenca Palizada y en el sitio de descarga del río Las Cruces (Muciño–Márquez *et al.*, 2014). Las concentraciones

del FID son asociadas a los diferentes mecanismos de descarga de los cuerpos de agua, así como a la mineralización, hidrodinámica y las descargas que se desarrollan alrededor de los sistemas evaluados.

Muciño-Márquez *et al.*, (2017) registraron concentraciones máximas de FID para el SPA en los sitios de La Boca y la Laguna Las Palmas, en el caso del SPE se registraron en los sitios de Boca Chica y la Cuenca Palizada. No registraron diferencias significativas entre los sitios y las temporadas de muestreo.

Los ríos asociados a los sistemas, el tiempo de residencia hídrica, la geomorfología, la asimilación por los organismos, la sedimentación, la volatilización, la reactividad química de los compuestos y los procesos hidrodinámicos que se encuentran en cada sitio, son fundamentales para la aportación flujo y mineralización de los diversos compuestos nitrogenados y fosforados, y así mantener los procesos biogeoquímicos locales.

Se ha determinado que en la Laguna de Términos la relación N:P varía de 3:1 a 18:1, lo que sugiere que el nitrógeno es el elemento limitante de la producción primaria. Sin embargo, en algunos sitios se mantienen tasas de concentración superiores al propuesto por Redfield (16:1), esto demuestra que las condiciones y relaciones entre los nutrientes tiene una gran variabilidad en ambos sistemas (Grenz *et al.*, 2017).

En estudios biogeoquímicos que se han realizado en la Laguna de Términos, determinan que esta laguna mantiene un comportamiento global de sumidero de nitrógeno (Conan *et al.*, 2017). La alta asimilación de nitrógeno se debe a la reducción de partículas y materia orgánica que se mantiene en el sistema, lo que coincide con los resultados obtenidos en la presente investigación.

El amplio intervalo de concentraciones de nutrientes que se registraron en el presente estudio se debe a la variación natural que se encuentra en los SPA y SPE, ya que existe una complejidad en el marco ambiental espacio-temporal que influye en las características fisicoquímicas de los sistemas. Sin embargo, se pueden describir tendencias que se mantienen a lo largo de un tiempo en el que se realizaron los muestreos y en los estudios comparados.

## **Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)**

En el SPE se presentaron las mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> en comparación al SPA. Este comportamiento se debe a las condiciones ambientales del sistema, en la mayoría de los sitios evaluados del SPE se registran las menores salinidades y las mayores aportaciones de aguas continentales. Estas condiciones son similares a las descritas por Álvarez-Borrego (2007), quien menciona que las concentraciones en la columna de agua se deben a la baja solubilidad de CO<sub>2</sub> en aguas con temperaturas cálidas, y con altas salinidades, lo cual induce a la transferencia de la columna del agua hacia la atmósfera, por lo tanto, la solubilidad del CO<sub>2</sub> se mantiene en el SPE, evitando la emisión de este gas a la atmósfera durante las diferentes temporadas de muestreo.

Por otro lado, en el SPA durante la temporada de secas mantiene condiciones mesohalinas en los sitios de La Boca, y la Laguna de Loros, lo que genera una menor solubilidad de este gas en la columna de agua, principalmente por la dinámica de entrada y salida de las masas de agua y la salinidad. Por lo cual se registran menores concentraciones de CO<sub>2</sub> en comparación al SPE. En el interior del sistema se presentan condiciones homogéneas donde se mantiene la distribución del dióxido de carbono disuelto.

La distribución de CO<sub>2</sub> en los sistemas evaluados depende de diversos factores específicos en cada sitio, tales como las condiciones ambientales, la hidrodinámica del sitio, aportaciones de aguas continentales, y las diversas actividades antrópicas que se desarrollan a su alrededor (Borges y Frankignoulle, 2002).

En el SPA al no presentar aportaciones fluviales mantiene concentraciones de entre 10.0 y 21.25 mg/L, en comparación al SPE donde las concentraciones son entre 6.5 y 28.0 mg/L, esto se debe a que en el SPE se mantiene una mayor aportación fluvial por los ríos Las Cruces, Las Piñas, Marentes y Palizada (Ayala-Pérez, 2006).

Así mismo, se observa que el SPA en la temporada de secas mantiene condiciones metabólicas de fijación de CO<sub>2</sub> en la gran mayoría de los sitios estudiados, en esta temporada se presentan las menores concentraciones en promedio, sin embargo en las temporadas de nortes y lluvias se observan condiciones heterótrofas del

sistema, por lo cual la emisión de este gas incrementa, no obstante la poca variabilidad de las concentraciones permiten describir que este sistema se mantiene un estado en equilibrado entre la fijación y emisión de CO<sub>2</sub> (Mendoza *et al.*, 2013).

Con relación al SPE se mantiene una dinámica similar, en la temporada de secas se registran las menores cantidades de CO<sub>2</sub>, por lo cual se determina a este sistema con una mayor fijación de este gas. En comparación de las temporadas de nortes y lluvias, se observa un incremento en las concentraciones de CO<sub>2</sub>, esto se debe a un metabolismo heterotrófico en el sistema, que propicia la emisión de este gas.

Mendoza *et al.*, (2013), determinaron la capacidad de emisión y captura de CO<sub>2</sub> en dos lagunas costeras del Pacífico, concluyeron que la emisión y captura de este gas se encuentra determinada por el tipo de manejo que se mantenga en cada sitio, a las aportaciones de los afluentes que se presentan en los cuerpos de agua, a las concentraciones de materia orgánica y a la productividad intrínseca de cada laguna. En el presente estudio se observa que estas variables también son fundamentales para los SPA y SPE. Ya que el SPA mantiene menores presiones antropogénicas en comparación al SPE.

## **ANÁLISIS DE LA BIÓSFERA**

### **Análisis de la clorofila a fitoplanctónica**

Se observaron diferencias significativas entre las concentraciones de clorofila a en los sitios que interaccionan con la Laguna de Términos y la zona de influencia de la marea. Estas zonas las conforman la Boca del sistema, las Lagunas Los Loros, Puerto Rico y en ocasiones La Laguna de San Carlos y Las Palmas para el SPA, y en el caso del SPE Boca Chica, Seno de Palizada y Laguna de San Francisco.

Las concentraciones de clorofila a ayudaron a caracterizar los sistemas a lo largo de las temporadas de estudio, se ha mencionado que esta variable biológica permite observar las condiciones tróficas y productivas de los ecosistemas costeros (Vázquez-Botello *et al.*, 2006).

Diversos estudios han demostrado que las zonas estuarinas son los sitios que presentan las mayores tasas de productividad y fijación de carbono. En estos sitios

se llega a tener una productividad primaria de 1800-2000 g/m<sup>2</sup>/año, y en ocasiones superior a este intervalo en sitios asociados a manglares y pantanos (Vázquez-Botello *et al.*, 2009).

Se ha descrito que, los microorganismos autotróficos con clorofila *a* son capaces de fijar de entre 2 a 24 mg de carbono por cada hora de luz. Sin embargo, esto depende de la calidad de luz que llega a incidir a lo largo de la columna de agua y a los nutrientes limitantes que determinan la productividad primaria. En sitios tropicales se ha evaluado la tasa de fijación de carbono, dando como resultado que se logran fijar 10 mg de carbono por cada gramo de clorofila *a* por cada hora de iluminación (Barreiro-Güemes y Aguirre-León, 1999).

Los sistemas fluvio-lagunares que se encuentran en la Laguna de Términos, en particular el SPA y el SPE son de gran importancia, debido a su alta productividad, lo que permite la exportación directa de nutrientes y materia orgánica hacia la Laguna de Términos e indirectamente a la Sonda Campeche (Barreiro-Güemes y Aguirre-León, 1999).

Las concentraciones máximas de clorofila *a* que se registraron en la temporada de nortes en el SPA se asocian a que en los sitios evaluados llegan a desarrollarse florecimientos masivos de fitoplancton ocasionales, los cuales se determinan por las condiciones hidrodinámicas y la dinámica de nutrientes que hace a ambos sistemas altamente productivos (Barreiro-Güemes y Aguirre-León, 1999; Vázquez-Botello *et al.*, 2009).

Los Florecimientos Algales Nocivos (FAN) en los SPA y SPE determinan la concentración de clorofila *a*, y si se mantienen condiciones para su desarrollo pueden generar efectos nocivos en los sistemas fluvio-lagunares. Algunas especies ocasionan la mortalidad de peces y la disminución considerable de oxígeno, o exudan subproductos de su metabolismo como neurotoxinas que pueden provocar la muerte de animales acuáticos, ganado e incluso del hombre (Muciño-Márquez, 2015).

Las concentraciones de clorofila *a* que se registraron en los SPA y SPE se deben a las diversas especies que se desarrollan en cada sitio. Muciño-Márquez *et al.*,

(2014) atribuyen las mayores concentraciones de clorofila *a* en el SPA a la composición del fitoplancton el cual se lo representan las diatomeas con el 64.26%, seguida de dinoflagelados con 14.07%, de clorofitas con 11.3% y cianobacterias con el 10.64%. En el caso del SPE determina que las concentraciones de fitoplancton la constituyen las diatomeas con el 50.57%, las clorofitas con el 25%, los dinoflagelados con el 15.80%, y las cianobacterias con el 8.63%.

Las concentraciones de clorofila *a* obtenidas en el presente estudio (SPA = 4.3-33 mg/m<sup>3</sup>) se pueden comparar con las investigaciones de Barreiro-Güemes y Aguirre-León (1999), quienes determinan que en el SPA se registran concentraciones superiores a 80.0 mg/m<sup>3</sup>. Las variaciones de clorofila *a* las refiere al amplio intervalo de que se presenta en el ciclo anual.

La variabilidad de clorofila *a* de los sistemas estuarinos de la Laguna de Términos también están determinada por las diversas condiciones ambientales tales como intensidad de luz, temperatura, variables fisicoquímicas, geomorfología de los sistemas evaluados, cambios en el régimen hídrico (que se encuentran determinados por las variaciones de marea, precipitación, escurrimientos, evapotranspiración, profundidad, aportaciones de ríos), etc. (De la Lanza-Espino, 2015; Cervantes, 2017). Sin embargo, otros factores como a la ubicación geográfica como la latitud, profundidad de muestreo, hora de muestreo, la variabilidad de marea, son otros factores que se deben de tener en cuenta al evaluar la clorofila *a* en las lagunas costeras y sistemas estuarinos (Muñoz-Barbosa *et al.*, 1991; Barreiro-Güemes y Aguirre-León, 1999).

### **Cobertura de manglar**

Se determinó la cobertura de manglar durante tres intervalos de tiempo en el área que integra el APFFLT, se registraron los mayores porcentajes de pérdida de manglar durante los años 1981-2005 (14.57%). Para la zona que se encuentra circundante al ANP se determinó una pérdida del 7.32%. Las principales zonas deforestadas se encontraron al norte del SPA, noroeste del mismo sistema y en la parte sur. En el SPE las mayores zonas deforestadas de manglar se observaron en la zona oeste, y a lo largo del río Palizada.

A partir de este periodo, las políticas públicas, en particular la declaración de Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, permitió la protección de los recursos sociales, económicos y naturales, en particular se generó una mayor protección a las diversas asociaciones vegetales terrestres y acuáticas, tales como la vegetación de manglar y vegetación de pantano como tular, carrizal y popal, selva baja inundable (SEMARNAT, 1997). La importancia de los ecosistemas de manglar en la Laguna de Términos y en los sistemas fluvio-lagunares adyacentes es la de mantener diversos servicios ambientales locales y globales, entre las cuales se destacan los servicios de control de inundaciones y como barreras contra huracanes e intrusión salina, el control de la erosión y la protección de las costas, el mejoramiento de la calidad del agua al funcionar como filtro biológico, son sitios de alimentación, refugio y crecimiento de juveniles de crustáceos y alevines (CONABIO, 2009). Por lo cual, en estos sitios se mantiene la productividad pesquera que se tiene en la Laguna de Términos y la Sonda Campeche.

Durante el periodo 2005-2010 se registraron zonas de pérdida de manglar del 2.07% dentro de la zona del ANP, y para la zona adyacente se registró una pérdida de 2.61%. En este periodo las pérdidas de manglar se atribuyen a las diversas presiones ejercidas por las actividades humanas en las zonas externas a estos sitios, aun cuando se mantiene la protección de las zonas del Área Natural Protegida.

En el año 2007 se realizó un decreto de protección y conservación de los ecosistemas de manglar a nivel nacional, en donde destaca la prohibición de cualquier transformación, obra o actividad que afecte la integridad de la cobertura de manglar, ya sea de manera directa con la remoción, relleno, trasplante o poda, o de manera indirecta afectando el flujo hídrico de los ecosistemas de manglar y en su zona de influencia (DOF, 2003; DOF, 2007).

En el periodo del 2010 al 2015 se observa la menor tasa de pérdida de manglar, se registró un porcentaje de 1.89% en la zona que incluye el ANP, y del 1.13% en la zona circundante. Por lo cual se observa que aun cuando existen diversas medidas

de protección dentro y fuera del ANP se mantiene una tasa de pérdida de manglar considerable.

La pérdida de manglar registrada a lo largo del tiempo se debe principalmente a las diversas presiones antropogénicas que se presentan en la región, particularmente se observan actividades como el cambio de uso de suelo para actividades agropecuarias, urbanas e industriales, que conlleva a la pérdida de la cobertura de grandes extensiones de vegetación, otra actividad es la extracción directa para uso como leña, la contaminación de manglar por derrames de hidrocarburos, etc. (Villalobos, 2015).

Los sistemas de manglar asociados a los sistemas fluvio-lagunares PA y PE son los más conservadas y longevos de Mesoamérica y presentan características de una elevada productividad y biodiversidad (CONABIO, 2009). Así mismo, contribuyen a evitar la mayor extinción de humedales de México, ya que representan el 25% de la cobertura de manglar a nivel nacional (Agraz-Hernández *et al.*, 2015).

La conservación y protección de los ecosistemas de manglar en las zonas del SPA y SPE es de gran relevancia, ya que mantienen una alta productividad, generación de nutrientes, mineralización, generación de materia orgánica que es exportada hacia la Laguna de Términos. Se han realizado diversos estudios que determinan que el Sistema Pom-Atasta mantiene las mayores tasas de almacén de carbono de toda la Península de Yucatán, la estructura de manglar en este sistema mantiene valores máximos de 306.55 Mg C/ha. En la región se mantienen los almacenes de carbono en sedimento y de carbono azul más altos del Golfo de México, con un promedio de 218.98 55 Mg C/ha (Herrera-Silveira *et al.*, 2016).

Por lo cual, al mantener una constante pérdida de este ecosistema en los sitios evaluados, se genera una pérdida en la función de captura de carbono en la región, y en su función de producción y de exportación de compuestos orgánica y de nutrientes hacia la Laguna de Términos. Se han registrado que los manglares asociados a la Laguna de Términos exportan partículas orgánicas de carbono (70 mM), nitrógeno (10 mM) y fósforo (0.5 mM) (Grenz *et al.*, 2017).

Lo anterior se relaciona con los resultados obtenidos en la presente investigación, donde se encontraron las mayores concentraciones de clorofila *a* y nutrientes a lo largo del Sistema Pom-Atasta, ya que en este sistema se presenta la mayor cobertura de manglar, el cual incorpora los nutrientes desde la fase sedimentaria hacia la columna de agua.

En la actualidad el calentamiento global es otro factor que rige la distribución de los ecosistemas de manglar de la Laguna de Términos. La geomorfología donde se desarrollan los manglares en la Laguna de Términos es vulnerable ante las fuerzas naturales que se registran en la región, principalmente a las que están relacionadas a los fenómenos hidrometeorológicos, como los huracanes, pérdida de la línea de costa, incremento acelerado del nivel del mar, etc. (Yáñez-Arancibia y Day, 2010; Torres-Rodríguez *et al.*, 2011).

La elevación del mar del Golfo de México es una de las causas provocada por el cambio climático. En las costas de la Laguna de Términos se han realizado estudios de vulnerabilidad costera ante el cambio climático, donde se determina que las zonas más vulnerables se localizan en la península de Atasta, al incrementarse 8 cm el nivel del mar para el año del 2030. Hacia el año 2050 se estima un incremento de 3.5 cm, con lo cual se afectarán los sistemas fluvio-lagunares de la Laguna de Términos, principalmente el Sistema Pom-Atasta y Palizada-Del Este (Torres *et al.*, 2011). Esta transgresión hacia los sistemas fluvio-lagunares, pone en riesgo inminente a los ecosistemas de manglar presente en el APFFLT, por lo cual se deben de realizar propuestas de adaptación al cambio climático en la región.

## **ANÁLISIS DE SEDIMENTOS**

Los sedimentos juegan un papel importante en la remineralización de los ciclos biogeoquímicos, sin embargo, en los SPA y SPE se han realizado pocos trabajos que determinen la caracterización y clasificación de las facies sedimentarias típicas de estos sistemas costeros, en ambos sitios se presentan tres zonas de sedimentación acordes a su dinámica energética, estos se asocian a las corrientes dentro de los sistemas fluvio-lagunares, e influye directamente en los mecanismos

de transporte y sedimentación de los materiales provenientes de los ríos, lo cual genera un ambiente de depósito diferencial por tamaños a lo largo del SPA y SPE.

En el SPA se observó un gradiente granulométrico sedimentario, donde las zonas con mayores porcentajes de arenas se encontraron en las lagunas interiores de Pom y Atasta, estos materiales, por sus dimensiones y pesos, son los que se distribuyen, transportan y descargan los ríos San Pedro y San Pablo, esto indica la existencia de una circulación activa con procesos de transporte de materiales aloctonos.

Estos resultados son similares a los reportados por Gutiérrez-Estrada *et al.*, (1981) donde encuentran una sedimentación terrígena en las lagunas Pom y Atasta, con una composición de fracción ligera de arenas compuestas de cuarzos y feldespatos. durante la temporada de nortes, la principal composición sedimentaria es por las arenas, seguida de los limos y arcillas provenientes de los ríos Grijalva-Usumacinta, y San Pedro y San Pablo.

Así mismo, la composición en ambas lagunas interiores, llegan a tener porcentajes de fragmentos de conchas y otros materiales de origen biogénicos (En la fracción orgánica se identificaron ostrácodos, 5 a 20%; foraminíferos, 2 a 8%; espículas 20 a 60%, conchas 5 a 80%; fibras vegetales, 10 a 28%; y diatómeas, 10 a 15%) (Gutiérrez-Estrada *et al.*, 1981).

La sección intermedia del SPA mantiene un gran aporte de limos en los sedimentos, este aporte es principalmente de origen biogénico. En la zona circundante del río Torno Largo, Palancares, Las Palmas y la Laguna de San Carlos se encuentra un extenso bosque de manglar, el cual aporta grandes cantidades de materia orgánica hacia el sistema sedimentario, esta materia orgánica está relacionada con el aporte de sedimentos limosos que se presentan en la zona (González y Torruco, 2001). Así mismo es el resultado del drenaje superficial y el transporte de sedimentos más ligeros (Lotze *et al.*, 2006). Hernández-Alcántara y Solís Weiss (1995) registraron sedimentos con mayor contenido de limos y arcillas (60%) se encuentran asociados a zonas de manglar.

Otros aspectos fundamentales que determina los porcentajes altos de sedimentos limo-arenosos se debe a la velocidad de la corriente que se presenta en los sistemas (Contreras, 1993). Las velocidades intermedias en estos sitios generan procesos físicos de consolidación, cohesión y floculación de sólidos suspendidos en la columna de agua que permiten sedimentarse y así formar zonas con tasas de sedimentación diferencial (García-Navarro *et al.*, 2016).

Por último, la facie sedimentaria limo arcilloso presente en la Boca del SPA se debe a la interacción directa con la Laguna de Términos, este sitio es la tercera zona de transporte de sedimentos, se caracteriza por presentar amplias zonas de manglar con sitios someros. Los sistemas de mangla permiten la reducción de la velocidad de corriente, y genera trampas de sedimentos, donde predominan los limos y arcillas, estos sitios son característicos de ambientes de baja energía de corriente (Chávez-López y Álvarez-Arellano 2006).

Villéger *et al.*, (2010) realizó una comparación histórica desde 1980 a 1999 de la fase sedimentaria de la zona de la Boca de la Laguna, determinó que los principales aportes y estructura sedimentaria son los limos arcillosos con arenas finas, con fuerte influencia rivereña, lo que es similar a los resultados encontrados en esta investigación.

En el SPE se encontraron las zonas con mayor porcentaje de arenas en los sitios de descarga de los ríos Palizada y Las Cruces, así como los arroyos presentes en la laguna de San Francisco. En estos sitios las descargas de los cuerpos de agua mantienen el transporte de sedimentos de tipo terrígenos, lo que genera bancos de sedimentos con granulometría de arenas gruesas. Se han registrado zonas con porcentajes considerables de hasta el 85.6 % en sitios como la Laguna del Vapor, en los sitios cercanos a la Laguna de San Francisco y en una interconexión del río Palizada, durante la temporada de secas y lluvias. Los sedimentos terrígenos compuestos por arenas se encuentran conformados en su gran mayoría por fierro, el cual incrementa su concentración en temporada de secas (Montalvo *et al.*, 2018).

En el caso de las secciones intermedias de las lagunas de SPE se registraron concentraciones mayores de limos con mezclas de arenas y arcillas, esto se debe

a la dinámica y velocidad de las corrientes de agua, así como a los procesos de sedimentación que induce la vegetación riverense. Este tipo de vegetación está compuesta en su mayoría por vegetación de sabana, manglar, tular, popal, carrizal, vegetación riparia, etc. (Amezcuca-Linares y Yáñez-Arancibia, 1978; SEMARNAT, 1997), la cual es diferente a la encontrada en el SPA. La estructura vegetal ejerce una importante función en la sedimentación de cada sitio, debido a que en el SPE la vegetación riverense permite el aporte de materia orgánica y su sedimentación por la reducción de las partículas de la columna de agua (Lotze, *et al.*, 2006).

La zona que comprende Seno Palizada y Boca Chica mantiene sedimentos en mayor porcentaje de tipo arcillo limoso, lo que indica una zona de menor flujo energético, por lo cual se produce un mayor depósito de sedimentos de menor peso y dimensiones, estos sedimentos son principalmente de origen biogénico, que se desarrolla a lo largo de los canales y vegetación circundante, los cuales contienen altas concentraciones de materia orgánica (Montalvo *et al.*, 2018).

Se han descrito trabajos para la zona con composiciones similares a las reportadas en este trabajo, compuesta en mayor proporción por una mezcla de sedimentos de arenas, limos y arcillas, en diferentes porcentajes (Pheleger, 1971, Ayala-Castañares, 1971; Gómez-Criollo *et al.*, 2007).

Los diferentes sedimentos que se distribuyen a lo largo del SPE son provenientes de la cuenca y subcuencas del Río Palizada, están determinados por las descargas de los diferentes ríos, proveniente de las descargas del río Grijalva-Usumacinta, el cual acarrea diversos materiales alóctonos, entre los cuales se pueden encontrar materiales minerales, materiales orgánicos, y metales pesados como Mg, Cd, Fe, Cu y Mn, los cuales provienen de una fuente en común, principalmente de actividades antrópicas, como las descargas urbanas, la ganadería y agricultura (Montalvo *et al.*, 2018).

## **CONCLUSIONES**

El comportamiento histórico de la temperatura ambiental mantiene oscilaciones a lo largo de un periodo de 30 años, presenta anomalías térmicas con máximos de 44°C durante los periodos 1985-1990, con disminución en el periodo de 1991-1995, se

observó una tendencia al incrementó de la temperatura posterior al año 2015. El comportamiento histórico determina tres temporadas climáticas marcadas que corresponden a la temporada de nortes, secas y lluvias.

La variación en la dirección y velocidad de los vientos presentes en los SPA y SPE, lo determina la estacionalidad, se registraron valores máximos durante la temporada de nortes, esto indica que los viento que influyen directamente sobre ambos sistemas se relacionan con las masas de aire provenientes del hemisferio norte.

Durante la temporada de secas se registraron las máximas concentraciones de las variables fisicoquímicas y de nutrientes. Las variables que mantuvieron relaciones significativas con los nutrientes fueron la salinidad, temperatura y oxígeno disuelto. El pH no mantiene una relación significativa con respecto a algún nutriente en las diferentes temporadas de muestreo y sobre la distribución de los nutrientes en los SPA y SPE.

La concentración de las variables fisicoquímicas y de nutrientes en la columna de agua en los SPA y SPE la determinan factores como la geomorfología propia de cada sitio, la temporalidad climática, la cuenca de drenaje que transporta los nutrientes provenientes de las actividades antrópicas y son transportados por los ríos (río Palizada, Las Cruces, Marentes, Las Piñas, La Colorada), los escurrimientos provenientes del sistema Grijalva-Usumacinta, que mantienen flujos de nutrientes hacia ambos sistemas. Así como la dinámica intrínseca entre la Laguna de Términos y la boca de cada sistema fluvio-lagunar, que mantienen condiciones fisicoquímicas diferenciales.

Ambos sistemas, en particular el SPA, mantiene un comportamiento global de sumidero de nitrógeno, al registrarse concentraciones de nitratos máximos en la temporada de secas. Se observó un cambio en el metabolismo del N a nivel espacial y temporal. Esto implica la existencia de procesos metabólicos de oxidación de nitritos en los SPA y SPE, principalmente por microorganismos del phylum Proteobacteria.

En el SPA el flujo de carbono en la temporada de secas, se caracteriza por mantener condiciones metabólicas de fijación de CO<sub>2</sub> en la primera sección del sistema que

integra las lagunas de Puerto Rico, Las Palmas y San Carlos. Mientras que, en las temporadas de nortes y lluvias se observan condiciones de mayor emisión a lo largo del sistema, y aunque existe fijación por organismos fitoplanctónicos y procariotas, la emisión de este gas incrementa posiblemente por heterotrofia. Por lo que este gas puede diluirse y pasar a la atmósfera rápidamente en estas dos temporadas. En el SPE se mantienen las máximas concentraciones en la temporada de secas en los sitios de aportes del río Las Cruces. Esto se relaciona con las bajas concentraciones de oxígeno que se registraron en esta temporada, lo que implica un metabolismo que mantiene las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la columna de agua.

Las altas concentraciones de clorofila *a* en la temporada de nortes están asociadas a las concentraciones de nitratos y fosfatos que se presentan en el SPA, así como a las condiciones particulares del sistema que permiten el crecimiento de diferentes especies de microalgas, entre las cuales se encuentran especies que contribuyen a los Florecimientos Algales Nocivos (FAN's).

Las políticas de protección de manglar que se han desarrollado en diferentes periodos históricos locales influyen directamente en la conservación de las diversas especies de mangle de las zonas evaluadas. Se debe de tomar en cuenta que tras la instauración de la Laguna de Términos como APFF, se desarrollaron estrategias para conservación y protección de los ecosistemas de manglar, ya que, en las zonas que se encuentran fuera del ANP se registraron una mayor presión hacia estos ecosistemas, lo que ha generado una mayor pérdida en su cobertura. El SPA, aun cuando mantiene los manglares más longevos de Mesoamérica, en su parte norte mantiene una mayor tasa de pérdida de cobertura.

Los sistemas fluviolagunares evaluados mantienen características sedimentarias particulares las cuales son consecuencia de los procesos de sedimentación autóctonos y alóctonos. En ambos sistemas las granulometrías más gruesas provienen de fuentes terrígenas y es transportada por los ríos y arroyo tributario que desembocan a los cuerpos de agua interiores, en su gran mayoría se encuentran compuestos por arenas, estos sedimentos se registran en las zonas de las lagunas interiores de Pom, Atasta, en las desembocaduras de los ríos Palizada, Las Cruces

y en la laguna San Francisco. Los limos se encuentran asociados a las lagunas intermedias de ambos sistemas, y son característicos de las zonas con alta generación de materia orgánica, principalmente por los sistemas de manglar, vegetación rarápá y la vegetación acuática asociados a los diferentes cuerpos de agua. El mayor porcentaje de arcillas, se encontraron en la boca de ambos sistemas, son características de zonas con una baja dinámica y flujo energético, lo que permite su precipitación gradual a la fase sedimentaria.

## REFERENCIAS

- Adame M. F., Kauffman J. B., Medina I., Gamboa J. N., Torres O., Caamal J. P., y Herrera-Silveira J. A. 2013. Carbon stocks of tropical coastal wetlands within the karstic landscape of the Mexican Caribbean. PLoS One, 8(2), e56569
- Adame M. F., Santini N. S., Tovilla C., Vázquez-Lule A., Castro L., y Guevara M. 2015. Carbon stocks and soil sequestration rates of tropical riverine wetlands. Biogeosciences, 12(12) 3805-3818.
- Agraz-Hernández C. M., García-Zaragoza C., Osti-Saenz J. y Chan-KeB C. 2009. Caracterización de los manglares en los estados de Campeche y Quintana Roo, México. Jaina Boletín Informativo, 20(2), 5-14.
- Agraz-Hernández C. M., Chan-KeB C. A., Iriarte-Vivar S., Posada-Venegas G., Vega-Serratos B., y Osti-Saenz J. 2015. Phenological variation of *Rhizophora mangle* and ground water chemistry associated to changes of the precipitation. Hidrobiológica, 25(1), 49-61.
- Aguñiga-García S., y Álvarez-Borrego S. 1989. Petacheo y variación temporal de amonio y fosfato en aguas intersticiales de sedimentos de entre mareas de una laguna costera. Ciencias Marinas, 15(3), 97-120.
- Aguirre-León A., y Díaz-Ruiz S. 2006. Estructura de tallas, madurez gonádica y alimentación del pez *Diapterus rhombeus* (Gerreidae) en el sistema fluvio-deltáico Pom-Atasta, Campeche, México. *Revista de biología tropical*, 54(2), 599-611.
- Aguirre-León A., Díaz-Ruiz S., y Ramírez-Huerta, A. B. 2010. Ecología de peces dominantes costeros tropicales. Estudio para el sistema fluvio-deltáico Pom-Atasta, Campeche. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, México, 210p.
- Alcocer J., Merino-Ibarra M., Escobar-Briones E. 2015. Tendencias de investigación en Limnología tropical: Perspectivas universitarias en Latinoamérica. Asociación Mexicana de Limnología, A.C., Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México. 486p.

- Álvarez-Borrego S., 2007. Flujos de carbono en los golfos de California y México. En: Hernández de la Torre, B., Gaxiola Castro, G. (Eds.), Carbono en ecosistemas acuáticos de México. SEMARNAT, INE, CICESE, 337–353.
- Alventosa F. J. 2015. Calidad de las aguas costeras del municipio de Denia. Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia. 44p.
- Amezcuca-Linares F. y Yáñez-Arancibia A. 1980. Ecología de los sistemas fluvio-lagunares asociados a la Laguna de Términos. El hábitat y estructura de las comunidades de peces. An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México, 7(1): 68–118.
- Ayala-Castañares, A., 1966. A preliminary comparison of the marine geology of three Mexican coastal lagoons. (Comparaciones preliminares de la geología marina de tres lagunas costeras mexicanas). Res. Second International Oceanographic Congress. Moscú. 13p.
- Ayala-Pérez L. A., Ramos M. J., y Flores H. D. 2003. La comunidad de peces de la Laguna de Términos: estructura actual comparada. Revista de Biología Tropical. 51(3-4), 783-793.
- Ayala-Pérez L. A. 2006. Modelo de simulación de la comunidad de peces en el área natural protegida Laguna de Términos Campeche, México. Universidad Autónoma, Metropolitana, México. 208p.
- Ayala-Pérez L. A., Terán-González G. J., Flores-Hernández D., Ramos-Miranda J., y Sosa-López A. 2012. Variabilidad espacial y temporal de la abundancia y diversidad de la comunidad de peces en la costa de Campeche, México. Latin american journal of aquatic research, 40(1), 63-78.
- Ayala-Pérez L. A., Terán-González G. J., Ramos-Miranda J., y Flores-Hernández D. 2012. Cambios interanuales en la abundancia de la comunidad de peces en la costa occidental de Campeche, México. Ciencias marinas, 38(2), 395-410.
- Ayala-Pérez L. A., Pineda-Peralta A. D., Álvarez-Guillen H., y Amador-del Ángel L. E. 2014. El pez diablo (*Pterygoplichthys spp.*) en las cabeceras estuarinas de la Laguna de Términos, Campeche. 313-336pp. En: Low P. A. M., Quijón P. A., Peters R. E. M. 313-336pp. Especies invasoras acuáticas: casos de estudio en ecosistemas de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), University of Prince Edward Island (UPEI). 645p.
- Ayala-Pérez L.A., Ramos-Miranda J. Flores Hernández D., Sosa López A., y E. Martínez Romero G. 2015. Ictiofauna marina y costera de Campeche. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. 502p.
- Bach L., Calderón R., Cepeda M. F., Oczkowski A., Olsen S. B., y Robadue D. 2005. Resumen del Perfil de Primer Nivel del Sitio Laguna de Términos y su Cuenca. México Narragansett, En: Coastal Resources Centre, University of Rhode Island, 30p.

- Barberis G. M. Campodonico A. Cesaratto P. P. Di Noto G. C. y Marinzalda J. M. 2017. Comparación de métodos de estimación de semivariogramas para el mapeo de variabilidad espacial del rendimiento intralote, Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 17p.
- Barreiro-Güemes M. T., y Aguirre-León A. 1999. Distribución espacio-temporal de la biomasa fitopláctica en el sistema lagunar Pom-Atasta, Campeche, México. *Revista de Biología Tropical*, 27-35.
- Bocco G., Mendoza M., y Velázquez A. 2001. Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping—a tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology*, 39(3-4), 211-219.
- Borges A. V., y Frankignoulle M. 2002. Distribution and air-water exchange of carbon dioxide in the Scheldt plume off the Belgian coast. *Biogeochemistry*, 59(1-2), 41-67.
- Calva-Benítez L. G., y Torres-Alvarado R. 2011. Carbono orgánico y características texturales de sedimentos en áreas del pasto marino *Thalassia testudinum* en ecosistemas costeros del sureste del Golfo de México. *Universidad y ciencia*, 27(2), 133-144.
- Carbajal-Pérez N. 2009. Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el Sistema Lagunar de Nichupté-Bojórquez, Quintana Roo. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, AC. SNIB-CONABIO proyecto No. CQ063. México D. F.
- Caso M., Pisanty I. y Ezcurra E. 2004. Diagnóstico ambiental del Golfo de México. Vols. I and II. INE/Semarnat. 627pp.
- Cervantes-Carrillo F., Pérez J., y Gómez J. 2000. Avances en la eliminación biológica del nitrógeno de las aguas residuales. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 42(2), 73-82.
- Cervantes D. R., Rodríguez M. L. M., y López L. S. 2017. Efecto de la marea en la concentración de nutrientes, clorofila ay parámetros físicos y químicos en una laguna costera subtropical (Bahía Magdalena, México). *Hidrobiológica*, 27(2), 253-264.
- Chávez-López S., y Álvarez-Arellano A. D. 2006. Batimetría, sedimentos y ambientes de depósito en la laguna costera de Guásimas Sonora, México. *Investigaciones geográficas*, (60), 7-21.
- Chuang P. C., Young M. B., Dale A. W., Miller L. G., Herrera-Silveira J. A., y Paytan A. 2017. Methane fluxes from tropical coastal lagoons surrounded by mangroves, Yucatán, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(5), 1156-1174.
- CONABIO. 2009. Manglares de México: Extensión y distribución. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 100p.

- CONABIO. 2019. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB). Geoportal CONABIO. México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- Conan P., Pujo-Pay M., Agab M., Calva-Benítez L., Chifflet S., Douillet P., Dussud C., Fichez R., Grenz C., Gutiérrez-Mendieta F., Origel-Moreno M., Rodríguez-Blanco A., Sauret C., Severin T., Torres-Alvarado R., Ghiglione J. F. y Origel-Moreno M. 2017. Biogeochemical cycling and phyto-and bacterioplankton communities in a large and shallow tropical lagoon (Terminos Lagoon, Mexico) under 2009–2010 El Niño Modoki drought conditions. *Biogeosciences*, 14(4), 959-975.
- Contreras E. F. 1993. Ecosistemas Costeros Mexicanos. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. México. 67p.
- Contreras-Espinosa F., Castañeda-López O. y García-Nagaya A. 1994. La clorofila a como base para un índice trófico en lagunas costeras mexicanas. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*. 21: 55-66.
- Contreras, F., Castañeda, O., Torres-Alvarado, R., y Gutiérrez, F. 1996. Nutrientes en 39 lagunas costeras mexicanas. *Revista de Biología Tropical*, 417-425.
- Contreras-Espinosa F., Rivera-Guzmán N. E. y Segura-Aguilar R. 2005. Nutrients and primary productivity on intermittent tropical coastal lagoon (La Mancha, Ver.) Gulf of Mexico. *Hidrobiológica*. 15(3), 299-310.
- Cruz M. P. 2013. Calidad del agua en la laguna de Coyuca, guerrero, y geovisualización de los paisajes asociados. Tesis de Licenciatura cita incompleta: institución. 103 pp.
- De la Lanza-Espino G., Sánchez-Santillán N. y Esquivel H. A. 1998. Análisis temporal y espacial fisicoquímico de una laguna tropical a través del análisis multivariado. *Hidrobiológica*. 8(2), 89-96.
- De la Lanza Espino G., y Aguirre S. G. 1999. Fisicoquímica del agua y cosecha de fitoplancton en una laguna costera tropical. *CIENCIA ergo-sum*. 6(2), 147-153.
- De la Lanza-Espino G., y Lozano-Montes H. 1999. Comparación fisicoquímica de las lagunas de Alvarado y Términos. *Hidrobiológica*. 9(1), 15-30.
- De la Lanza-Espino G. 2001. Características físico-químicas de los mares de México (Vol. 1). Ed. Plaza y Valdes. 137p.
- De la Lanza Espino G., Rodríguez S. A. S. y Pérez J. L. C. 2015. Cálculo del flujo ambiental como sustento para la reserva de agua al ambiente del río Piaxtla, Sinaloa, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. 87: 25-38.
- De la Lanza-Espino G. D. L., y Gutiérrez-Mendieta F. J. 2017. Intervalos de parámetros no-conservativos en sistemas acuáticos costeros de México. *Hidrobiológica*. 27(3), 369-390.

- De la Torre B. H., y Castro G. G. 2007. Carbono en ecosistemas acuáticos de México. Instituto Nacional de Ecología. 508p.
- Diario Oficial de la Federación. 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-22-SEMARNAT-2003, que determina que establece las especificaciones para la preservación, conservación y restauración de los humedales costeros. Diario Oficial de la Federación.
- Diario Oficial de la Federación. 2007. Decreto por el que se adiciona un artículo 60 TER; y se adiciona un segundo párrafo al artículo 99; todos ellos de la Ley General de Vida Silvestre. Diario Oficial de la Federación.
- Díaz-Ruiz S., Aguirre-León A., Mendoza-Sánchez E. y Lara-Domínguez A. L. 2018. Factores ambientales que influyen en la ictiofauna de la laguna La Mancha, sitio Ramsar, Golfo de México. *Revista de Biología Tropical*. 66(1), 246-265.
- Escalona R. L. 1985. Relación clorofila a: ATP en lagunas costeras tropicales. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*. Universidad Nacional Autónoma de México. 12(1), 33-45.
- Escalona R. L. 1985. Un método para estimar flujos de nitrógeno reciclado en lagunas costeras someras. Nota científica. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, Universidad Nacional Autónoma de México. 12(1), 269.
- Escamilla-Rivera V, González-Iturbe J, y Villalobos Zapata G 2014 Desarrollo de estrategias para la planeación ambiental y gestión de riesgo en la microcuenca del río Palizada, Campeche. *Soc Amb*. 5(1),73–91.
- Escamilla-Rivera V. I., Villalobos-Zapata G. J. y González-Iturbe A. J. A. 2015. Análisis de vulnerabilidad socioeconómica y percepción de riesgo por inundaciones en la microcuenca del río Palizada, Campeche. 75-86pp En: Ramos Miranda J. y G. J. Villalobos Zapata (Eds.). *Aspectos Socioambientales de la Región de la Laguna de Términos Campeche*. Universidad Autónoma de Campeche. 210p.
- Espina S., y Vanegas C. 2005. Ecofisiología y contaminación, 53-78pp. En: A. V. Botello, J. Rendón von Osten, G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds.). *Golfo de México Contaminación e Impacto. Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*, 2da Edición. Universidad Autónoma de Campeche, Univ. Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología. 696p
- Ferguson A., Eyre B. y Gay J. 2004. Nutrient cycling in the sub-tropical Brunswick estuary, Australia. *Estuaries*. 27(1), 1-17.
- Fernández A. M. A., Gama F. J. L., Pavón M. E. L., Pérez T. R. y López O. Á. 2010. Análisis de calidad del agua. Relación entre factores bióticos y abióticos. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. UNAM. 119p.
- Flores-Verdugo F., González-Farías F., Zamorano D. S. y Ramírez-García P. 1992. Mangrove ecosystems of the Pacific coast of Mexico: distribution, structure, litterfall, and detritus dynamics. 269-288pp. En: *Coastal plant communities of Latin America*. Academic Press. 392p.

- Flores-Verdugo F.J., Agraz-Hernández C.M. y Benítez-Pardo D. 2007. Ecosistemas acuáticos costeros: importancia, retos y prioridades para su conservación. 147-167pp En: O. Sánchez, M. Herzig, E. Peters, R. Márquez-Huitzil y L. Zambrano (Eds). Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. Instituto Nacional de Ecología. 297p.
- Fuentes-Yaco C., de León D. A. S., Monreal-Gómez M. A. y Vera-Herrera F. 2001. Environmental forcing in a tropical estuarine ecosystem: The Palizada River in the southern Gulf of Mexico. *Marine and freshwater research*. 52(5), 735-744.
- Fung I., John J., Lerner J., Matthews E., Prather M., Steele L. P. y Fraser P. J. 1991. Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 96(D7), 13033-13065.
- García-Navarro J., Bautista-Vargas M. E., Hernández-Sánchez A. y Ramírez Velázquez C. R. 2016. Generación de energía sustentable por medio de una Celda de Combustible Microbiana. Caso de estudio: Marismas de Altamira, Tamaulipas y Pueblo Viejo, Veracruz. *Revista de Energía Química y Física*. 3(7). 15-26.
- Gómez-Criollo F., Flores-Hernández D., Ramos-Miranda J., Ayala-Pérez L. y Sosa-López A. 2007. Caracterización textural de los sedimentos en la zona costera Campeche – Tabasco. *JAINA*. 17(1). 31-41.
- Gómez M. B. 2015. Análisis fisicoquímico y microbiológico del sistema lagunar Chantuto-Panzacola y san Nicolás, Chiapas, México. Tesis de Licenciatura. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. 46p.
- González C. G., Liste A. V. y Felpeto A. B. 2011. Tratamiento de datos con R, Estadística y SPSS. Madrid, España. Diaz de Santos. 974p.
- González-Gándara C. 2011. La zona marina. 289-296pp. En: La biodiversidad en Veracruz estudio del estado. Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 541p.
- González-Lozano M. C., Méndez-Rodríguez L. C. López-Veneroni D. G., y Vázquez-Botello A. 2006. Evaluación de la contaminación en sedimentos del área portuaria y zona costera de Salina Cruz, Oaxaca, México. *Interciencia*, 31(9), 647-656.
- González-Solis A. y Torruco-Gómez, D. 2001. La fauna béntica Del Estero de Sabancuy, Campeche, México. *Revista de biología tropical*. 49(1), 31-45.
- Grenz C., Fichez R., Silva C. Á., Benítez L. C., Conan P., Esparza A. C. R., y Ghiglione J. F. 2017. Benthic ecology of tropical coastal lagoons: Environmental changes over the last decades in the Terminos Lagoon, Mexico. *Comptes Rendus Geoscience*. 349(6-7), 319-329.
- Gutiérrez E. M., Malpica C. V. M., y Martínez R. J. 1982. Geomorfología y sedimentos recientes del Sistema Lagunar Atasta-Pom, Campeche, México. *Anales del Instituto en Ciencias del Mar y Limnología*, 9, 89-100.

- Gutiérrez-Estrada M., y Galaviz-Solís A. 1983. Morfología y sedimentos recientes de las lagunas el Carmen, Pajonal y la Machona, Tabasco, México. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. 10(1): 249-270.
- Gutiérrez E., M. y A. Castro R., 1988. Origen y desarrollo geológico de la laguna de Términos. 89-110pp. En: Yañez-Arancibia A., DAY J. W. JR. (EDS.). Ecología de los Ecosistemas Costeros en el Sureste del Golfo de México: La Región de la Laguna de Términos. UNAM-OEA. 518p.
- Hernández-Alcántara P., y Solís-Weiss V. 1995. Algunas comunidades macrobénticas asociadas al manglar (*Rhizophora mangle*) en laguna de Términos, Golfo de México. Revista de biología tropical, 117-129.
- Herrera-Silveira J. A., Camacho-Rico A., Pech E., Pech M., Ramírez-Ramírez J., y Teutli-Hernández C. 2016. Dinámica del carbono (almacenes y flujos) en manglares de México. Terra Latino Americana. 34(1), 61-72.
- Ivlev A. A. 2016. Global redox carbon cycle and photosynthesis development. J Ecosys Ecograph S, 5, 2.
- Jiménez S. O. H. 1979. Análisis granulométrico de los sedimentos superficiales de la boca de puerto real, en la Laguna de Términos, estado de Campeche. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Tomo. XL. 20p.
- Kuc-Castilla A. G., Posada-Vanegas G., y Vega-Serratos B. E. 2015. Evaluación hidrodinámica de la laguna de Términos. 145-166pp. En: Ramos Miranda J. y G. J. Villalobos Zapata (Eds.). Aspectos Socioambientales de la Región de la Laguna de Términos Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. 210p.
- Lin Y. L., Delgado-Blas V. H., Cervantes-Martínez A. y Gutiérrez-Aguirre M. A. 2018. Batimetría y calidad de agua de la laguna Milagros, Quintana Roo, México. Teoría y Praxis. 25. 9-30.
- López-Martínez J., Vázquez S. H., Valdivia E. H., Romero J. R. y Chávez E. A. 2008. Influencia ambiental en la pesquería de camarón. 115-127pp. En: López-Martínez, J. Variabilidad Ambiental y Pesquerías de México. Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca, México. 195p.
- Lorente I., Gamo D., Gómez J. L., Santos R., Flores L., Camacho A., Galindo L. y Navarro J. 2004. Los efectos biológicos del cambio climático. Revista Ecosistemas. 13(1). 103-110.
- Lotze H. K., Lenihan H. S., Bourque B. J., Bradbury R. H., Cooke R. G., Kay M. C., Kidwell S. M., Kirby M. X., Peterson C. H., y Jackson J. B. C. 2006. Depletion, degradation, and recovery potential of estuaries and coastal seas. Science 312:1806-1809.
- Martínez-Fernández J., y Steve-Selma M. A. 2007. Gestión integrada de cuencas costeras: dinámica de los nutrientes en la cuenca del Mar Menor (sudeste de España). Revista de Dinámica de Sistemas. 3(1). 22 p.

- Martínez-Gaxiola M. D., Durazo R., y Gaxiola-Castro G. 2010. Influence of the geostrophic transport of phosphates on primary production off Baja California (Mexico). *Ciencias Marinas*. 36(2), 135-145.
- Martínez J. M., Díaz A. P. 2005. Percepción remota. Fundamentos de teledetección espacial. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 62p.
- Matthews E., Fung I., 1987. Methane emission from natural wetlands: global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Global Biogeochemical cycles*. 1(1), 61–86.
- Melo M. C. E. 2010. Análisis geoestadístico espacio tiempo basado en distancias y splines con aplicaciones. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Barcelona, España. 275p.
- Méndez W., y Cartaya S. 2008. Caracterización ambiental en los proyectos de investigación de geografía física. Lineamientos metodológicos. *Geoenseñanza*. 13(1), 31-50.
- Mendoza, M. M., Martínez, A. A., Espinosa, F. M. D. L. L., Peralta, R. O., y Castro, R. T. 2013. Caracterización de dos lagunas costeras del Pacífico tropical mexicano en relación con el contenido de carbono y la captura y emisión de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 29(2): 145-154.
- Mitsch W.J. and Gosselink J.G. 2015. *Wetlands*, 5 ed. John Wiley and Sons, NY. 582p.
- Montalvo-Estévez, J. F., de los Ángeles García-Ramil, I., Perigó-Arnaud, E., Alburquerque-Brook, O. C., y García-García, N. 2013. Calidad química del agua y sedimento en las bahías del archipiélago Sabana-Camagüey. *Revista Cubana de Química*, 25(2): 123-133.
- Montalvo C., Aguilar C., Argas J., Cerón R. M., Cerón J. G., Amador L.E. y Ramírez M.A. 2018. Cuantificación de los niveles de metales pesados en el río Palizada. 181-213pp. En: Villegas Sierra J., y R.M. Cerón Bretón. 2018. Análisis del Espacio Urbano y sus Consecuencias Ambientales en la Región de la Laguna de Términos. Universidad Autónoma de Campeche. 214p.
- Muciño-Márquez, R. E., Figueroa-Torres, M. G., y Aguirre-León, A. 2014. Composición fitoplanctónica en los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada Del Este, adyacentes a la laguna de Términos Campeche, México. *Acta Biológica Colombiana*, 19(1): 63-84.
- Muciño-Márquez, R. E., Figueroa-Torres, M. G., y Aguirre-León, A. 2015. Cianofitas de los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada Del Este, adyacentes a la Laguna de Términos, Campeche, México. *Polibotánica*, (39): 49-78.
- Muciño-Márquez, R. E., Aguirre-León, A., y Figueroa-Torres, M. G. 2017. Evaluación del estado trófico en los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada Del Este, Campeche, México. *Hidrobiológica*. 27(3): 281-291.

- Muñoz-Barbosa, A., Gaxiola-Castro, G. y Segovia-Zavala, J.A. 1991. Variabilidad temporal de productividad primaria, clorofila y seston en la Bahía de los Angeles. Golfo de California. Ciencias Marinas, 17(4): 47-68.
- Muñoz, H., Orozco, S., Vera, A., Suárez, J., García, E., Neria, M., y Jiménez, J. 2015. Relación entre oxígeno disuelto, precipitación pluvial y temperatura: río Zahuapan, Tlaxcala, México. Tecnología y ciencias del agua, 6(5): 59-74.
- Orchet, P. J. 2019. Microdiversidad y detección de genes de degradación de contaminantes en sedimentos de las cabeceras estuarinas Pom-Atasta y Palizada-Del Este en Laguna de Términos, Campeche. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 87p.
- Orellana-Rivadeneira, G., Sandoval-Solís, M. L., Linares-Fleites, G., García-Calderón, N. E., y Tamariz-Flores, J. V. 2012. Descripción de la dinámica de carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorios. Avances en Ciencias e Ingeniería, 3(1). 123-135.
- Ortega M. M. 1995. Observaciones del fitobentos de la Laguna de Términos, Campeche, México. Anales del Instituto de Biología serie Botánica. 66(1). 1-36.
- Ortiz P. J. S. 2010. Macrobentos sublitoral somero del fiordo Baker, región de Aysén: relaciones entre la estructura comunitaria y la variabilidad ambiental. Tesis de licenciatura en biología marina. Universidad Austral de Chile. 114p.
- Pacheco J. A. y Cabrera A. S. 2003. Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. Ingeniería. 7(2), 47-54.
- Pérez-Rojas A. Márquez-García A. Z. 2017. Sedimentología. Universidad Autónoma Metropolitana. Iztapalapa, Ciudad de México. 57p.
- Phleger F. B., y Ayala-Castañares A. 1971. Processes and history of Terminos lagoon, Mexico. AAPG Bulletin. 55(12), 2130-2140.
- Ramírez-Bojórquez P. R. 2006. Análisis espacial de la cobertura de manglar en los municipios de Tecuala y Santiago Ixcuintla, Nayarit en el periodo de 1973-2005. Tesis de maestría, CIAD-Unidad Mazatlán en Acuicultura y Manejo Ambiental. México. 95p.
- Ramos-Miranda J., Flores-Hernández D., Ayala-Pérez L. A., Rendón-von Osten J., Villalobos-Zapata G. y Sosa-López A. 2006. Atlas hidrológico e ictiológico de la Laguna de Términos. Campeche, Campeche, México: Universidad Autónoma de Campeche. 173p.
- Re A. D., Díaz F., Sierra E. y Gómez-Jiménez S. 2004. Consumo de oxígeno, excreción de amonio y capacidad osmorreguladora de *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson) expuesto a diferentes combinaciones de temperatura y salinidad. Ciencias marinas. 30(3): 443-453.
- Riđanović L., Riđanović S., Jurica D. y Spasojević P. 2010. Evaluation of water temperature and dissolved oxygen regimes in River Neretva. 1-8.

- Rivera-Arriaga E. 2015. La gobernanza ambiental en la región de la laguna de Términos Campeche. 21-40pp. En: Ramos-Miranda J., y Villalobos Z. G.J. Aspectos socioambientales de la región de la laguna de Términos, Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. 210p.
- Robadue D., Calderón R., Oczkowski A., Bach L., Cepeda F. M. 2004. Characterization of the Region of the Laguna de Terminos Campeche, Mexico Level One Profile, Fresh Water Inflow to Estuaries Project. The Nature Conservancy and the University of Rhode Island. 50p.
- Ruiz E., Echenandía A. y Romero F. 1994. Relaciones entre agua y sedimento en río de origen torrencial. *Limnética*, 10(1): 101-107.
- Ruiz-Marín A., Campos-García S., Zavala-Loría J. y Canedo-López Y. 2009. Hydrological aspects of the lagoons of Atasta and Pom, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 10(1). 63-74.
- Ruí, E. A. C. 2017. Respuesta y vulnerabilidad ante eventos atmosféricos de la Laguna de Términos. Universidad Nacional Autónoma Metropolitana. Tesis doctoral. 194p.
- Smith R. L. y Smith T. M. 2007. *Ecología*. Cuarta edición, Adison Wesley, México, 642p.
- Sosa-Avalos R., Gaxiola-Castro G., Olivos-Ortiz A. y Silva-Iñiguez L. 2013. Nutrientes inorgánicos y producción del fitoplancton en una laguna costera subtropical de México. *Revista de biología marina y oceanografía*. 48(1): 143-154.
- Ramírez Carrillo L. A. 2007. En la ruta del petróleo: impacto de una eventual explotación petrolera en Yucatán/Ramírez Fundación Plan Estratégico de Mérida, A.C. México. 503p.
- Ramos-Miranda J., Flores-Hernández D., Ayala-Pérez L. A., Rendón-von Osten J., Villalobos-Zapata G. y Sosa-López A. 2006. Atlas hidrológico e ictiológico de la Laguna de Términos. Centro de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX)-Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, Campeche. 75p.
- Rodríguez-Zúñiga M.T., Troche-Souza C., Vázquez-Lule A.D., Márquez-Mendoza J. D., VázquezBalderas B., Valderrama-Landeros L., Velázquez-Salazar S., Cruz-López M.I., Ressler R., UribeMartínez A., Cerdeira-Estrada S., Acosta-Velázquez J., Díaz-Gallegos J., Jiménez-Rosenberg R., Fueyo-Mac Donald L. y Galindo-Leal C. 2013. Manglares de México: extensión, distribución y monitoreo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México D. F. 128p.
- Sánchez A. J., Salcedo M. A., Florido R., Mendoza J. D., Ruiz-Carrera V., y Álvarez-Pliego N. 2015. Ciclos de inundación y conservación de servicios ambientales en la cuenca baja de los ríos Grijalva-Usumacinta. *ContactoS*. 97, 5-14.

- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 1997. Programa de manejo del Área de Protección de Flora y Fauna "Laguna de Términos", México. Instituto Nacional de Ecología. 22p.
- Smith S. V., Crossland J. M. y Crossland C. J. 1999. Mexican and central American coastal lagoon systems: carbon, nitrogen and phosphorus fluxes (regional workshop II). LOICZ International Project Office, Netherlands Institute for Sea Research. 11p.
- Torres-Rodríguez V., Márquez-García A., Bolongaro C. A., Chavarria H. J., Expósito D. G., y Márquez G. E. 2011. Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático. 413–432pp. En: Botello, A. V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático (segunda edición). Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 754p.
- Tranvik L.J., Downing J.A., Cotner J.B., Loiselle S.A., Striegl R.G., Ballatore T.J., Dillon P., Finlay K., Fortino K., Knoll L.B., Kortelainen P.L., Kuster T., Larsen S., Laurion I., Leech D.M., McCallister S.L., McKnight D.M., Melack J.M., Overholt E., Porter J.A., Prairie Y., Renwick W.H., Roland F., Sherman B.S., Schindler D.W., Sobek S., Tremblay A., Vanni M.J., Verschoor A.M., von Wachenfeldt E., y Weyhenmeyer G.A. 2009. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate: Limnol. Oceanogr. 54, 2298-2314.
- Useros J. L. 2013. El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales. Anales de la real academia de medicina y cirugía de Valladolid. 50: 71-98.
- Valdes D. S. y Real E. 2004. Nitrogen and phosphorus in water and sediments at Ria Lagartos coastal lagoon, Yucatan, Gulf of Mexico. Indian Journal of Marine Sciences, 33(4): 338-345.
- Valenzuela-Siu M., Arreola-Lizárraga J. A., Sánchez-Carrillo S., y Padilla-Arredondo G. 2007. Flujos de nutrientes y metabolismo neto de la laguna costera Lobos, México. Hidrobiológica, 17(3): 193-202.
- Varona-Cordero F. y Gutiérrez Mendieta F. J. 2003. Estudio multivariado de la fluctuación espacio-temporal de la comunidad fitoplanctónica en dos lagunas costeras del estado de Chiapas. Hidrobiológica, 13(3): 177-194.
- Vázquez-Botello A., Contreras-Espinosa F., De La Lanza-Espino G., y Villanueva S. 2009. Primary production in coastal lagoons. 339-349pp. En: Islas F. I. y Iribarne O. Encyclopaedia of Life Support Systems.
- Villalobos Z. G. J., Yáñez-Arancibia A., Day Jr J. W. y Lara-Domínguez A. L. 1999. Ecología y manejo de los manglares en la Laguna de Términos, Campeche, México. Ecosistemas de Manglar en América Tropical. 263-274pp. En: Yáñez-Arancibia A. y Lara-Domínguez A. L. Ecosistemas de Manglar en América Tropical. Instituto de Ecología A.C. México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA. 380p.

- Villalobos Z. G. J. 2015. Conservación y manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos (1994-2015). 1-20pp. En: Ramos-Miranda J., y Villalobos Z. G.J. Aspectos socioambientales de la región de la laguna de Términos, Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. 210.
- Villéger S., Miranda J. R., Hernández D. F. y Mouillot D. 2010. Contrasting changes in taxonomic vs. functional diversity of tropical fish communities after habitat degradation. *Ecological applications*, 20(6), 1512-1522.
- Whalen S. C. 2005. Biogeochemistry of methane exchange between natural wetlands and the atmosphere. *Environmental Engineering Science*, 22(1): 73-94.
- Yáñez-Arancibia A., Linares F. A. y Day Jr J. W. 1980. Fish community structure and function in Terminos Lagoon, a tropical estuary in the southern Gulf of Mexico. 465-482pp. En: Kennedy. *Estuarine perspectives*. Academic Press. London. 532p.
- Yáñez-Arancibia A. y Day Jr J. W. 1982. Ecological characterization of Terminos Lagoon, a tropical lagoon-estuarine system in the southern Gulf of Mexico. *Oceanologica Acta*, 5(4): 431-440.
- Yáñez-Arancibia, A., y J. W. Day, 2010. La zona costera frente al cambio climático: vulnerabilidad de un sistema biocomplejo e implicaciones en el manejo costero, 3-22pp. En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual y G.J. Villalobo-Zapata (eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Universidad Autónoma de Campeche CetyS-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944p.
- Yáñez-Arancibia A., Twilley R. R. y Domínguez A. L. L. 1998. Los ecosistemas de manglar frente al cambio climático global. *Madera y Bosques*, 4(2): 3-19.
- Yáñez-Arancibia A. Lara-Domínguez A. L., Sánchez-Gil, P., y Day, J. W. 2007. Estuary-sea ecological interactions: a theoretical framework for the management of coastal environment. *Environmental analysis of the Gulf of Mexico*. The Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. Special Publication, (1): 271-301.
- Yáñez-Arancibia A. 2010. *Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera*. Instituto de Ecología A.C. Inecol, Texas Sea Grant Program Houston, INE-Semarnat, México DF. 180p.
- Yáñez-Correa A. 1971. Procesos costeros y sedimentos recientes de la plataforma continental al sur de la Bahía de Campeche. *Biol. Soc. Geol. Mexicana*, 32(2): 75-115.

## CAPÍTULO 2

### **Identificación de las principales fuentes de impactos antropogénicos asociados a las cabeceras Pom-Atasta y Palizada-Del Este y descripción de sus efectos ecológicos actuales y potenciales.**

#### **RESUMEN**

Los sistemas Pom-Atasta (SPA) y Palizada-Del Este (SPE) se han visto alterados por las diferentes actividades humanas a lo largo de su historia. Al evaluar las condiciones actuales de ambos sistemas, distintos indicadores permiten determinar las presiones antropogénicas actuales. En el presente capítulo se evaluaron las condiciones socioambientales y las principales presiones e impactos antropogénicos en ambos sistemas. Se determinaron las condiciones tróficas de la columna de agua a partir del Índice de Estado Trófico (TRIX). Se evaluó la presión ejercida por el cambio de uso de suelo en las zonas aledañas a los SPA y SPE a partir del Índice de Huella Humana (IHH). Se evaluaron los factores socioeconómicos de los municipios de los sistemas fluvio-lagunares a partir del Índice de Desarrollo Humano (IDH). Se registraron valores máximos de TRIX de 4.08 en el SPA y de 4.10 para el SPE, lo que indica un estado mesotrófico. El análisis de IHH demostró que las zonas adyacentes presentan un grado de transformación entre media, alta y muy alta, la mayor transformación se registró en la zona externa del ANP que influye directamente en la cobertura de manglar del SPE, la cual presentó 374.8 km<sup>2</sup> (14.3%) de área transformada. Se registró una amplia brecha de desigualdad social, económica, de educación y salud entre los municipios el Carmen, Palizada y Jonuta. Se determinó que los municipios Palizada y Jonuta mantienen bajos IDH entre 0.69 y 0.67 respectivamente, esta relación implica una relación intrínseca entre la desigualdad social y la degradación ambiental. Se deben tener estrategias para conocer las tendencias de cambio a corto, mediano y largo plazo de los índices tróficos y del uso de suelo en ambos sistemas, y así conservar la biodiversidad local. El incremento del IDH a partir de la mejora de las condiciones socioambientales locales permitirá minimizar las presiones ambientales sobre los SPA y SPE.

**Palabras clave:** TRIX, IHH, IDH, Laguna de Términos, Pom-Atasta, Palizada-Del Este.

## **ABSTRACT**

The Pom-Atasta (SPA) and Palizada-Del Este (SPE) systems have been altered by different human activities throughout their history. When evaluating the current conditions of both systems, different indicators allow to determine the current anthropogenic pressures. In this chapter the socioenvironmental conditions and the main anthropogenic pressures and impacts of both systems were evaluated. The trophic conditions of the water column were determined from the Trophic Status Index (TRIX). The pressure exerted by the change of land use in the areas adjacent to the SPA and SPE was evaluated from the Human Footprint Index (HHI). The socioeconomic factors of the municipalities of the lagoon fluvial systems were evaluated based on the Human Development Index (HDI). Maximum TRIX values of 4.08 were recorded in the SPA and 4.10 for the SPE, indicates a mesotrophic state. The IHH analysis showed that adjacent areas have a degree of transformation between medium, high and very high, the greatest transformation was recorded in the external area of the ANP that directly influences the mangrove cover of the SPE, which presented 374.8 km<sup>2</sup> (14.3 %) of transformed area. There was a wide gap in social, economic, education and health inequality between the municipalities of El Carmen, Palizada and Jonuta. It was determined that the Palizada and Jonuta municipalities maintain low HDI between 0.69 and 0.67 respectively, this relationship implies an intrinsic relationship between social inequality and environmental degradation. Strategies should be taken to know the trends of short, medium and long-term change of trophic indices and land use in both systems, and thus conserve local biodiversity. The increase in HDI from the improvement of local socio-environmental conditions will minimize environmental pressures on SPA and SPE.

**Keywords:** TRIX, IHH, HDI, Laguna de Terminos, Pom-Atasta, Palizada-Del Este.

## INTRODUCCIÓN

El área de protección de flora y fauna Laguna de Términos (APFFLT) en el estado de Campeche, al igual que otras muchas áreas naturales protegidas juegan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad. Sin embargo, las diversas actividades antropogénicas como la pesca intensiva, la agricultura y la explotación petrolera, ejercen una fuerte presión sobre los sistemas fluvio-lagunares que se encuentran en esta zona (Rivera-Arriaga, 2015).

Aunado a los diversos estudios realizados en la Laguna de Términos para su conservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, presenta una gran presión antropogénica, lo que provoca desequilibrios en los procesos ecosistémicos presentes en esta laguna (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2009).

En la actualidad la actividad pesquera es uno de los factores que generan mayor presión a la biota y a los sedimentos de la Laguna de Términos y sus cabeceras aledañas a los ríos Palizada, Candelaria y Mamantel. La principal especie por la que se ha destacado la pesquería de la Laguna de Términos es la extracción de camarón, siendo esta laguna el sitio de desarrollo de juveniles de camarón blanco (Villalobos, 2015).

Otra de las principales actividades que determina la vulnerabilidad de estas cabeceras estuarinas es la actividad petrolera, la cual surge en los años setenta, y se desarrolló la explotación petrolera en la zona de Campeche, ya que es la zona considerada como la más importante en explotación de petróleo y de gas natural (Ramos-Miranda *et al.*, 2006). Esto propicia impactos indirectos por cambio de uso de suelo, principalmente por los nuevos asentamientos de empresas y servicios asociados a la actividad petrolera, lo cual genera la expansión poblacional principalmente en Isla del Carmen, donde se desarrollan grandes proyectos habitacionales, e infraestructura de caminos, rellenos sanitarios, desechos sólidos y líquidos. Consecuentemente, esto genera la contaminación de los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este y sus alrededores como son los municipios del Carmen y Palizada (Bach *et al.*, 2005; Villalobos, 2015).

Aunado a esta actividad se encuentran los diferentes daños ambientales históricos provenientes de los derrames petroleros, los cuales impactaron a la dinámica ecológica de la región, en particular las costas de la Laguna de Términos, y provocaron impactos ambientales, económicos y sociales desde el año 1979 (García-Cuéllar *et al.*, 2004; Kuc-Castilla *et al.*, 2015).

Así mismo, la Laguna de Términos presenta una gran problemática relacionada con el calentamiento global. La vulnerabilidad de esta laguna costera está relacionada con la elevación del nivel medio del mar (Torres-Rodríguez *et al.*, 2011). Los estados de Quintana Roo y Tabasco son uno de los sitios que podrían ser los más vulnerables con el incremento del mar, al afectar un 6.58 y 9.47% de su superficie (Ramos *et al.*, 2016), las zonas de costa de Campeche se verían más impactadas en un escenario con una elevación del mar de entre 8 y 13 cm, lo que provocaría afecciones en la península de Atasta, e Isla del Carmen. Sin embargo, si el nivel medio del mar se eleva 33 cm la región comprendida por la Laguna de Términos sería declarada bahía para el año 2100, se reducirían las áreas que comprenden a los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este (Torres-Rodríguez *et al.*, 2011).

### **Eutrofización**

El impacto humano induce que los Sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este tengan diferentes condiciones hidrobiológicas. La eutrofización es un ejemplo de las condiciones de carga de nutrientes que se generan en estos sistemas, en muchos casos es un proceso natural. Sin embargo, estos procesos llegan a acelerarse a partir de un incremento en las aportaciones de nutrientes, sedimentos y diversos materiales alóctonos y autóctonos que se generan durante las diversas actividades humanas a lo largo de la cuenca de drenaje (Zouiten, 2012).

La eutrofización es un proceso de cambio en el tiempo de un sistema acuático a partir del incremento en las concentraciones de nutrientes, los estados tróficos se encuentran categorizados por diferentes niveles e influyen las concentraciones de nutrientes y oxigenación que limitan la producción primaria. El primer grado trófico es el oligotrófico, se caracteriza por concentraciones mínimas de nutrientes, alta oxigenación y transparencia en la columna de agua. El estado mesotrófico es una

fase intermedia, donde la concentración de nutrientes permite que exista mayor cantidad de organismos acuáticos. La condición eutrófica se presenta cuando las condiciones del sistema acuático son ricas en materia orgánica, nutrientes, concentración de clorofila *a*, etc. Por último, el estado hipertrófico presenta una concentración de nutrientes excesiva y el oxígeno presente en la columna de agua es mínimo (Moreno *et al.*, 2010; Gómez-Ortega *et al.*, 2017).

### **Índice de estado trófico TRIX**

Se han desarrollado diversos modelos e índices de monitoreo de los niveles de eutrofización de los cuerpos de agua costeros, entre los cuales se destaca el índice TRIX (Trophical Index), el cual es un índice multiparamétrico que considera las concentraciones de clorofila *a*, nitrógeno inorgánico, fósforo total y porcentaje de oxígeno disuelto. Para su evaluación se realiza una ponderación y suma de cada variable y el resultado obtenido se encuentra entre un rango de 0 (sistemas oligotróficos) y 10 (sistemas hipertróficos) (Vollenweider *et al.*, 1998; Gómez-Ortega *et al.*, 2017; Muciño-Márquez *et al.*, 2017).

El presente capítulo tiene como objetivo identificar las principales fuentes de impactos asociados a los SPA y SPE, y así discutir los efectos ecológicos actuales y potenciales que influyen en cada sistema.

## **MATERIAL Y MÉTODOS**

### **Índice de Estado Trófico TRIX**

Con las concentraciones del NID, FID, Chl *a* y porcentaje de Oxígeno Disuelto se evaluó el Índice de estado trófico (TRIX, por sus siglas en inglés) en el SPA y SPE durante los periodos de muestreo, este índice determinó el estado trófico del sistema (Vollenweider *et al.*, 1998; Muciño-Márquez *et al.*, 2017), siguiendo la siguiente fórmula:

$$\text{TRIX} = (\text{Log } 10 (\text{Chl } a \times aD\%O \times \text{NID} \times \text{FID}) + k) / m$$

Donde:

Chl *a* = concentración de clorofila *a*, en mg/m<sup>3</sup>

aD%O = valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, esto es,  $100 - \%OD$ .

NID = nitrógeno inorgánico disuelto

FID = fósforo inorgánico disuelto

Las constantes  $k = 1.5$  y  $m = 12/10 = 1.2$

A partir de la evaluación del índice TRIX se estimó el nivel de estado trófico de cada sitio de muestreo, el cual se clasificó en cuatro categorías dependiendo de la condición trófica (Tabla 8).

Tabla 8. Clasificación de nivel de estado trófico TRIX.

Nivel de estado trófico	Valor del índice TRIX	Condición trófica
Oligotrófico	0-2.5	Pobremente productiva
Mesotrófico	2.6-5	Moderadamente productiva
Eutrófico	5.1-7.5	Entre moderada y altamente productiva
Hipertrófico	7.6-10	Altamente productiva

### **Análisis de Índice de Huella Humana**

Se evaluó el índice de huella humana (IHH) para la zona del APFFLT (Zona I) y en la Zona de Influencia (Zona II), esto permitió determinar la influencia de las actividades humanas a través de la transformación de la tierra en infraestructura (asentamientos humanos, vías de transporte y líneas eléctricas), zonas productivas (agricultura, acuicultura, silvicultura y ganadería) y de manera indirecta por los subproductos que podrían dispersarse, lo que nos indica los patrones de modificación del entorno del ser humano que se generan alrededor de los SPA y SPE (Wackernagel *et al.*, 2006; González-Abraham *et al.*, 2015).

Para la evaluación de este índice se utilizaron los datos de mapas vectoriales digitales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México, de uso de suelo de la CONABIO, así como los obtenidos por González-Abraham *et al.*, (2015), quienes realizaron la evaluación del índice para determinar el cambio de huella humana a nivel nacional. Se realizó el procesamiento y análisis a partir del manejo

de los Sistemas de Información Geográfica para obtener los registros de los SPA y SPE.

Se determinaron cinco categorías de IDH, las cuales representan el grado de transformación presente en cada zona, estas categorías fueron clasificadas en: sin transformación, transformación baja, media, alta y muy alta. Posteriormente se obtuvo el área de transformación de cada categoría, estas áreas fueron graficadas y comparadas para determinar las zonas con mayor transformación, correlacionándolas con las diferentes problemáticas que se presentan en la zona cercana a los SPA y SPE.

### **Índice de Desarrollo Humano**

Se evaluó el Índice de Desarrollo Humano (IDH) para los años 2000, 2005 y 2010 para cada municipio a partir de los datos generados por INEGI de los municipios El Carmen, Palizada y Jonuta, los cuales integran las zonas que influyen al SPA y SPE del APFFLT. Este Índice determina las capacidades del proceso de expansión de las libertades de los individuos que les permiten el disfrute de una vida prolongada y saludable, adquirir conocimiento y lograr un nivel de vida digno. El Índice de Desarrollo Humano permite la evaluación de los avances y retrocesos en las condiciones de vida de la población, combina elementos socioeconómicos del PIB, la salud, y la educación de cada municipio, etc. (PNUD, 2014).

A partir de los datos registrados por Instituto Nacional de Estadística y Geografía, se realizaron mapas del IDH durante los periodos evaluados, se destacaron los factores que se presentan en los tres municipios. Se relacionaron las condiciones socioeconómicas que valora el IDH con los principales factores y presiones antropogénicas que influyen en las zonas aledañas al SPA y SPE, para su posterior evaluación y generación de propuestas de mitigación, vigilancia y conservación.

## **RESULTADOS**

### **Índice de Estado Tráfico TRIX**

A partir de las concentraciones del NID, FID, Chl a y porcentaje de Oxígeno Disuelto se evaluó el Índice de estado tráfico TRIX en los SPA y SPE durante las temporadas

de nortes, secas y lluvias, este índice determinó el estado trófico en los sistemas costeros.

Para el caso de la temporada de nortes del SPA se registraron en los diez sitios de muestreo valores de entre 2.9 y 4.11 que clasificaron al sistema con condiciones mesotróficas, así mismo las condiciones fueron similares para la temporada de secas donde se registraron valores de entre 2.96 y 4.37. En la temporada de lluvias estos valores disminuyeron en los sitios uno, cuatro, cinco, seis, siete y ocho, se registraron valores menores a 2.49, clasificándolos con características de una condición oligotrófica. En el caso de los sitios dos, tres, nueve y diez se presentaron en un rango de entre 2.51 y 3.05, por lo cual estos sitios presentaron condiciones mesotróficas (Tabla 9).

Tabla 9. Índice de Estado Trófico TRIX para los sistemas Pom-Atasta durante las temporadas de nortes, secas y lluvias.

<b>Pom-Atasta</b>						
Nortes			Secas		Lluvias	
Estación	Valor índice TRIX	Nivel trófico	Valor índice TRIX	Nivel trófico	Valor índice TRIX	Nivel trófico
PA1	2.99	Mesotrófico	2.92	Mesotrófico	2.48	Oligotrófico
PA2	3.56	Mesotrófico	4.37	Mesotrófico	3.06	Mesotrófico
PA3	3.39	Mesotrófico	3.54	Mesotrófico	3.05	Mesotrófico
PA4	3.30	Mesotrófico	4.04	Mesotrófico	2.27	Oligotrófico
PA5	4.11	Mesotrófico	3.75	Mesotrófico	2.45	Oligotrófico
PA6	3.74	Mesotrófico	3.25	Mesotrófico	2.37	Oligotrófico
PA7	3.38	Mesotrófico	3.49	Mesotrófico	2.31	Oligotrófico
PA8	3.17	Mesotrófico	3.00	Mesotrófico	2.49	Oligotrófico
PA9	3.18	Mesotrófico	2.96	Mesotrófico	2.51	Mesotrófico
PA10	2.90	Mesotrófico	3.22	Mesotrófico	2.99	Mesotrófico

Por otra parte, la distribución espacial de las mayores concentraciones del índice TRIX en temporada de nortes y secas se observaron en los primeros cinco sitios que comprenden las zonas de interacción con la Laguna de Términos. Durante la temporada de lluvias se observó que existe una disminución en los valores del TRIX a lo largo del sistema Pom-Atasta (Fig. 50).

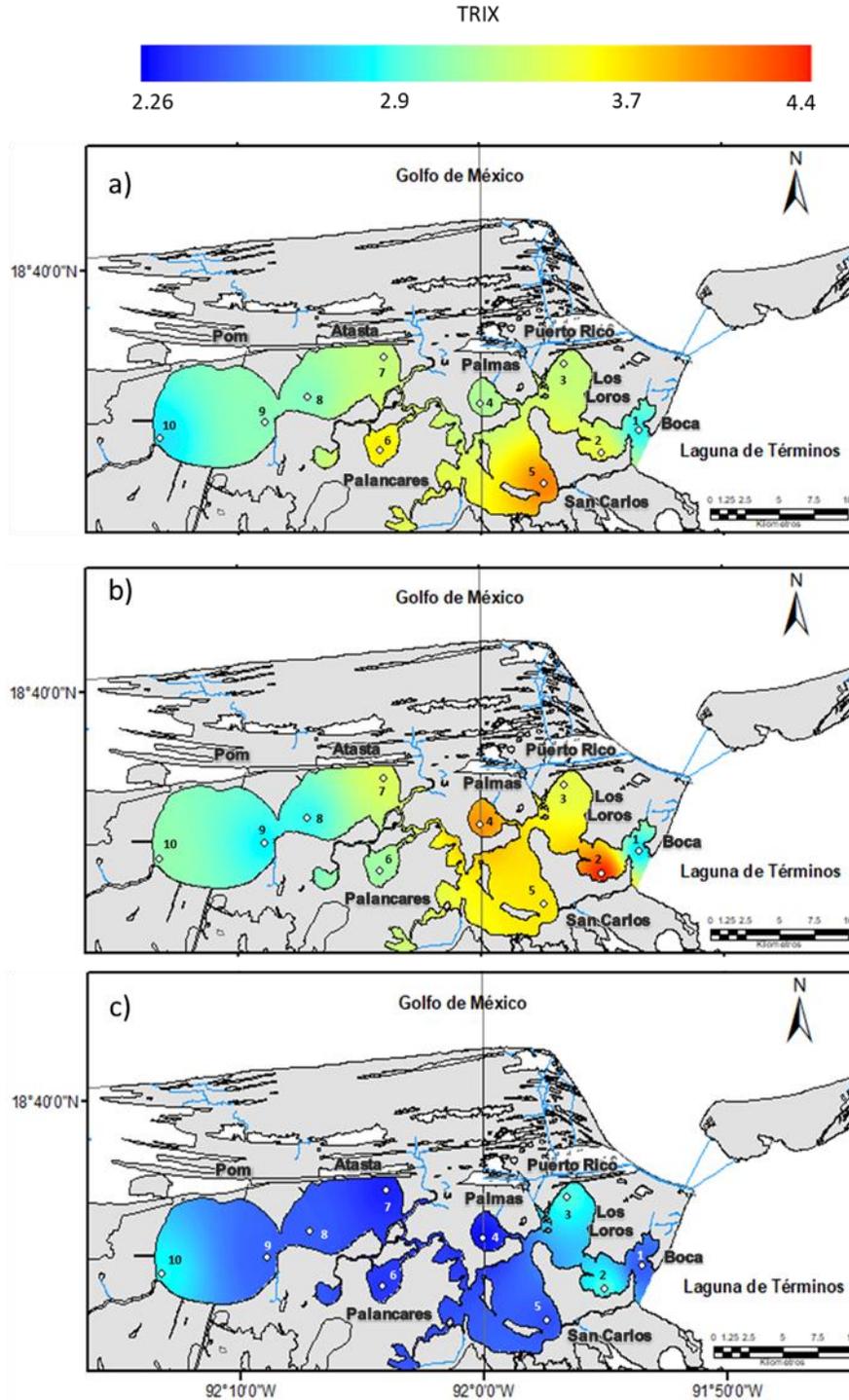


Figura 50. Distribución espacio-temporal del índice de estado trófico TRIX del Sistema Pom-Atasta. En el SPE los valores tróficos del índice TRIX durante la temporada de nortes oscilaron entre 2.87 y 3.39, por lo tanto en esta temporada se observaron condiciones mesotróficas en los diez sitios de monitoreo, sin embargo, para la

temporada de secas se determinó un estado oligotrófico en las sitios uno, dos, tres y cuatro, donde se registraron niveles tróficos entre 1.90 y 2.20, así mismo en los sitios cinco, seis, siete, ocho, nueve y diez se presentaron condiciones mesotróficas con valores que oscilaron entre 3.40 y 4.10. Durante la temporada de lluvias las condiciones tróficas llegaron a características de un ambiente oligotrófico en los sitios uno, dos, tres, cuatro, siete, y ocho, donde se registraron valores tróficos entre 1.74 y 2.38, en el resto de los sitios se mantuvieron las características mesotróficas registrándose valores entre 2.58 y 2.87 (Tabla 10).

Tabla 10. Índice de Estado Trófico TRIX para los sistemas Palizada-Del-Este durante las temporadas de nortes, secas y lluvias.

<b>Palizada-Del Este</b>						
	<b>Nortes</b>		<b>Secas</b>		<b>Lluvias</b>	
	Valor índice		Valor índice		Valor índice	
Estación	TRIX	Nivel trófico	TRIX	Nivel trófico	TRIX	Nivel trófico
PE1	3.18	Mesotrófico	1.90	Oligotrófico	2.31	Oligotrófico
PE2	3.10	Mesotrófico	1.94	Oligotrófico	2.27	Oligotrófico
PE3	3.39	Mesotrófico	2.09	Oligotrófico	1.74	Oligotrófico
PE4	3.24	Mesotrófico	2.20	Oligotrófico	2.37	Oligotrófico
PE5	2.92	Mesotrófico	4.10	Mesotrófico	2.83	Mesotrófico
PE6	3.27	Mesotrófico	4.02	Mesotrófico	2.58	Mesotrófico
PE7	3.20	Mesotrófico	3.41	Mesotrófico	2.38	Oligotrófico
PE8	3.01	Mesotrófico	3.45	Mesotrófico	2.38	Oligotrófico
PE9	3.11	Mesotrófico	3.61	Mesotrófico	2.87	Mesotrófico
PE10	2.87	Mesotrófico	3.40	Mesotrófico	2.80	Mesotrófico

Así mismo, se observó una distribución homogénea con condiciones mesotróficas a lo largo del SPE durante la temporada de nortes. En el caso de la temporada de secas se observaron condiciones mesotrofica en las zonas que mantiene interacción con las entradas de los ríos Las Piñas y Marentes, y dentro de las Laguna del Vapor, Laguna Del Este y Laguna San Francisco. Por último, en la temporada de lluvias se presentaron condiciones homogéneas de un estado entre oligotrófico y mesotrófico dentro del SPE (Fig. 51).

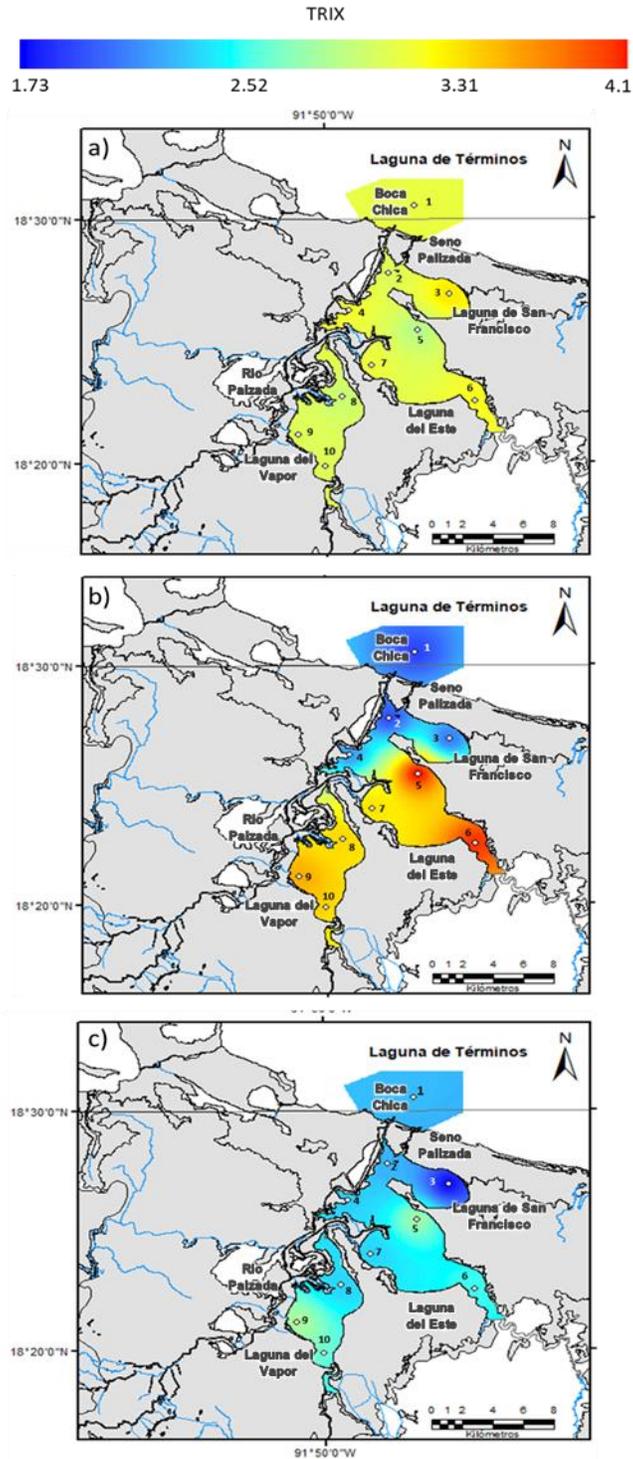


Figura 51. Distribución espacio-temporal del índice de estado trófico TRIX del Sistema Palizada-Del Este.

## Análisis del Índice de Huella Humana

El Índice de Huella Humana permite determinar la influencia de las actividades humanas a lo largo de su historia, a través de la transformación de la tierra en infraestructura (asentamientos humanos, vías de transporte y líneas eléctricas), zonas productivas (agricultura, acuicultura, silvicultura y ganadería) y, de manera indirecta, por los subproductos que podrían dispersarse, lo que nos indican los patrones de modificación del entorno del ser humano (Sanderson *et al.*, 2002).

Por lo anterior se determinó el Índice de Huella Humana (IHH) que se genera dentro de la zona del APFFLT y en la Zona de Influencia. Se obtuvo un área correspondiente a la categoría sin transformación del IHH del 72% del área total evaluada, sin embargo, el 28% restante se encuentra bajo alguna presión de transformación, el cual está dividido en la categoría de baja huella humana que constituye un área de 288.3 km<sup>2</sup>, seguida de una huella humana media con un área de 274.7 km<sup>2</sup>, la categoría de una huella humana alta constituye un área de 292.2 km<sup>2</sup>, y por último la mayor huella que se presenta dentro del ANP está determinada por 49.2 km<sup>2</sup>. En el caso de la Zona de Influencia presenta un área sin transformación de 1463.2 km<sup>2</sup>, una categoría baja con un área de 404.4 km<sup>2</sup>, en la categoría media se determinó un área de 389.2 Km<sup>2</sup>, para la huella humana alta se tiene un área de 305 km<sup>2</sup> y por último la huella humana con la categoría muy alta fue de 69.8 km<sup>2</sup> (Tabla 11).

Tabla 11. Categorías del Índice de Huella Humana presentes en el APFFLT y la Zona de Influencia.

Categoría	Área de la ANP (km <sup>2</sup> )	Área de la ANP (%)	Zona de influencia del ANP (km <sup>2</sup> )	Zona de influencia del ANP (%)	Área total (km <sup>2</sup> )	Área total (%)
Sin transformación	2334.6	72.1	1463.2	55.6	3797.8	64.7
Bajo	288.3	8.9	404.4	15.4	692.7	11.8
Medio	274.7	8.5	389.2	14.8	663.9	11.3
Alto	292.2	9.0	305.0	11.6	597.2	10.2
Muy Alto	49.2	1.5	69.8	2.7	119.0	2.0
Total	3238.9		2631.6		5870.6	

En general se observó que en la zona que integra el APFFLT tiene un 28% de presión antropogénica debido a las transformaciones que se encuentran dentro de la ANP, así mismo las mayores transformaciones se presentan en la Zona de Influencia, el cual representa el 43.4% del área de la Zona de Influencia total, dentro del cual el 15.4% de esta área se encuentra en la categoría de huella humana baja, el 14.8% dentro de la categoría media, el 9% en la categoría alta, y por último el 2% en la categoría de muy alta huella humana.

Las mayores zonas con categorías entre altas y muy altas se encuentran al norte del SPA, en el sur del SPE, y alrededor de los sistemas hídricos de los ríos circundantes del área de influencia, sin embargo, las zonas más conservadas son las que están dentro de la zona núcleo del APFFLT (Fig. 52).

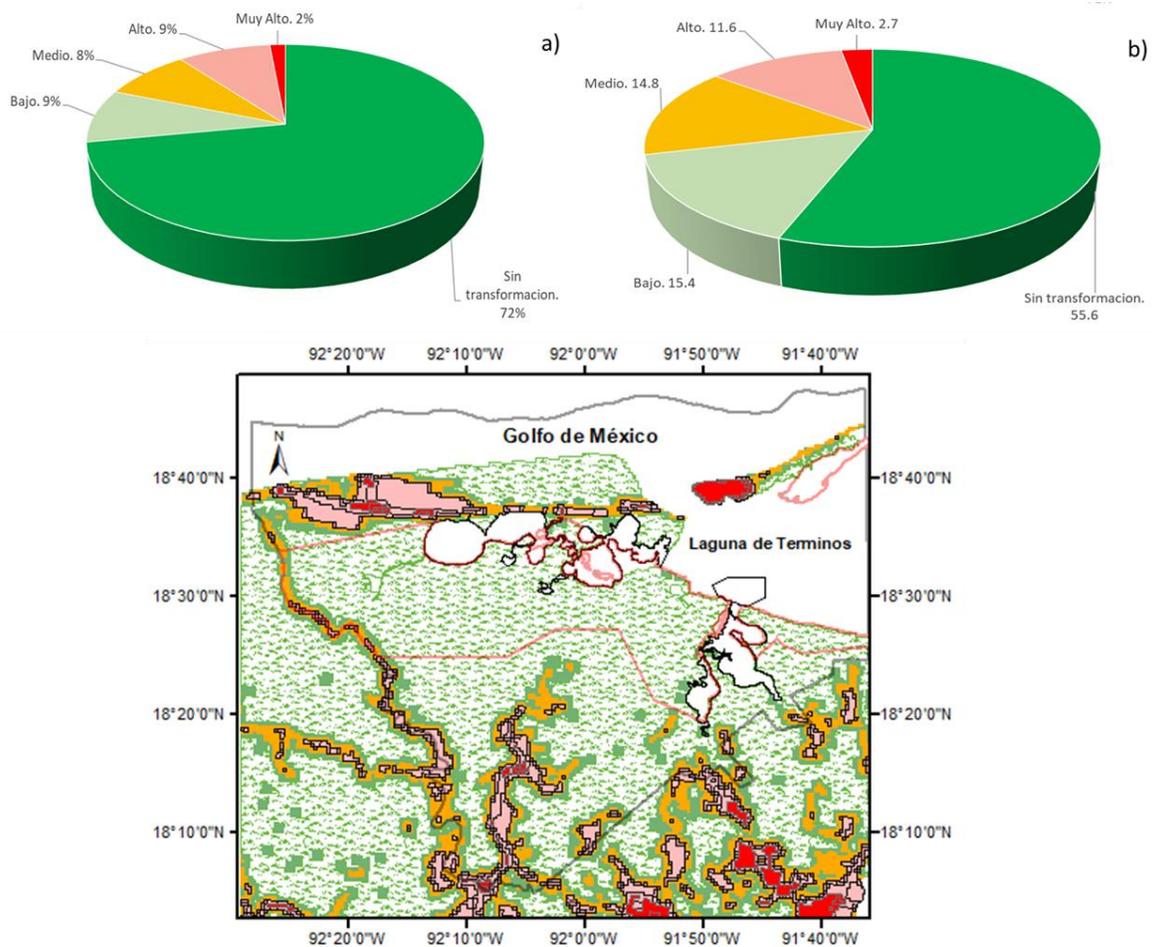


Figura 52. Categorías del Índice de Huella Humana presentes en el APFFLT. a) Zona circundante a los SPA y SPE. B) Zona de influencia del APFFLT.

## Índice de Desarrollo Humano

Se evaluó el Índice de Desarrollo Humano a partir de los datos generados por INEGI para los municipios El Carmen, Palizada y Jonuta, los cuales integran el APFFLT. Este Índice determina las capacidades del proceso de expansión de las libertades de los individuos que les permiten el disfrute de una vida prolongada y saludable, adquirir conocimiento y lograr un nivel de vida digno. El Índice de Desarrollo Humano permite la evaluación de los avances y retrocesos en las condiciones de vida de la población, combina elementos del PIB, la salud, y la educación.

El Índice de Desarrollo Humano (IDH) se evaluó para los años 2000, 2005 y 2010, el municipio de El Carmen presentó una categoría de muy alto desarrollo humano con valores entre 0.73-0.81, para el municipio de Palizada, se observó un incremento del índice de 0.72 a 0.78 para el año 2005, dándole una categoría de muy alto desarrollo humano, sin embargo, existe un decremento que llegó a 0.69 clasificándolo en una escala de bajo desarrollo humano para el año 2010. En el caso del municipio de Jonuta se presentó un valor de 0.71 en el año 2000 lo que se catalogó como bajo desarrollo humano, en el año 2005 incrementó a 0.74 clasificándose como desarrollo humano alto y posteriormente decreció a valores de 0.67 durante el año del 2010, catalogándolo en una escala baja para el IDH (Tabla 12).

Tabla 12. Índice de Desarrollo Humano de los municipios que integran el APFFLT.

Municipio	Año	Tasa de mortalidad infantil	Índice de educación	Índice de ingresos	PIB	IDH	Escala
Carmen	2000	22.63	0.82	0.78	10693.27	0.81	Muy Alto
	2005	15.32	0.83	0.84	15773.58	0.86	Muy Alto
	2010	12.84	0.72	0.75	18552.80	0.78	Muy Alto
Palizada	2000	30.27	0.77	0.64	4512.92	0.72	Alto
	2005	21.54	0.81	0.70	6456.82	0.78	Muy Alto
	2010	11.45	0.58	0.64	8437.39	0.69	Bajo
Jonuta	2000	28.85	0.76	0.61	3830.85	0.71	Bajo
	2005	23.90	0.78	0.63	4339.02	0.74	Alto
	2010	12.08	0.58	0.59	5952.36	0.67	Bajo

La dinámica del índice representa el cambio del desarrollo que llegan a tener los habitantes de los diferentes municipios, se observa que los municipios de Palizada y Jonuta llegaron a escalas bajas, lo que implica que el desarrollo en estos municipios tuvo un retroceso, esto determina el cambio y el desarrollo mayor de las actividades primarias y generan una presión diferencial en los ecosistemas circundantes al APFFLT.

El cambio del Índice de Desarrollo Humano para los años 2000, 2005 y 2010 se representan en las siguientes figuras, donde se observa la influencia que tiene cada municipio y la categoría del IDH con relación a las zonas dentro del APFFLT (Fig. 53).

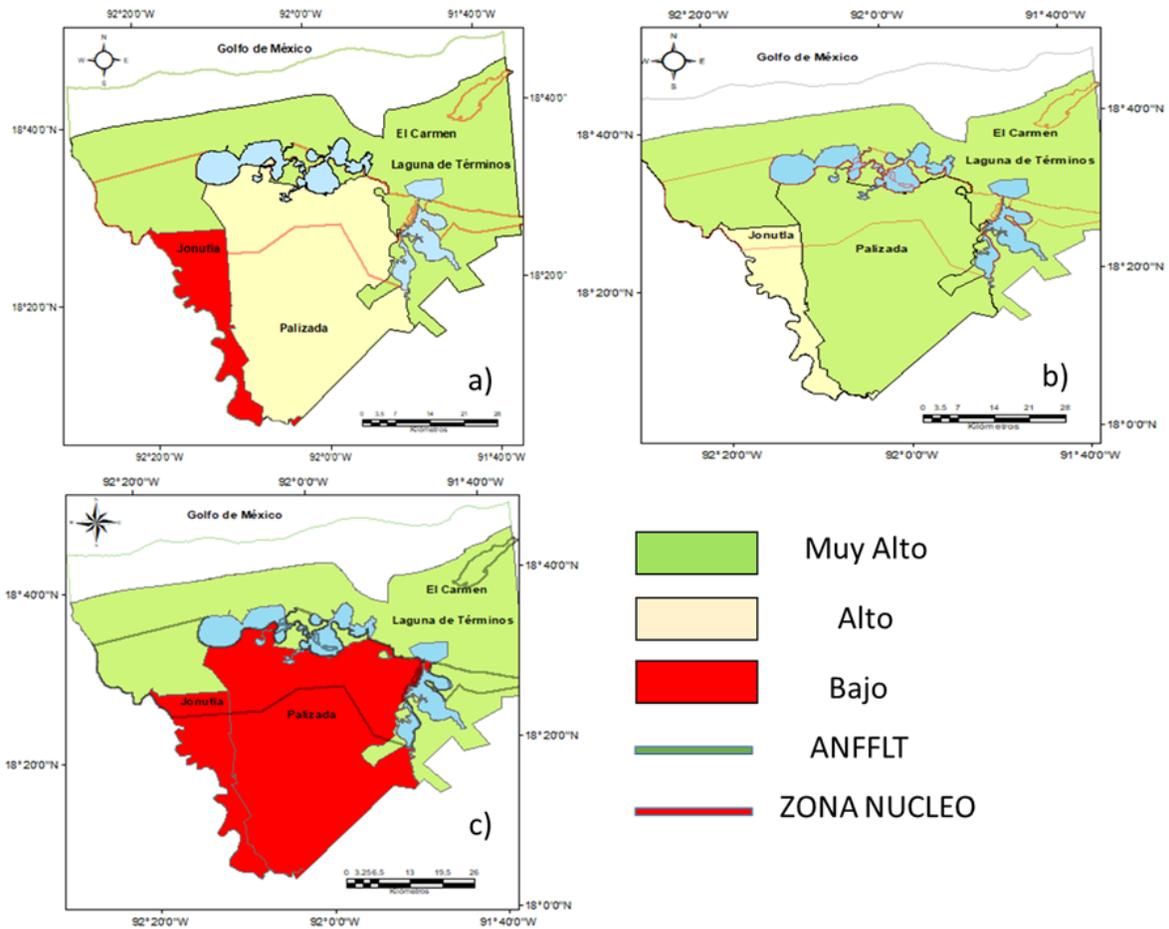
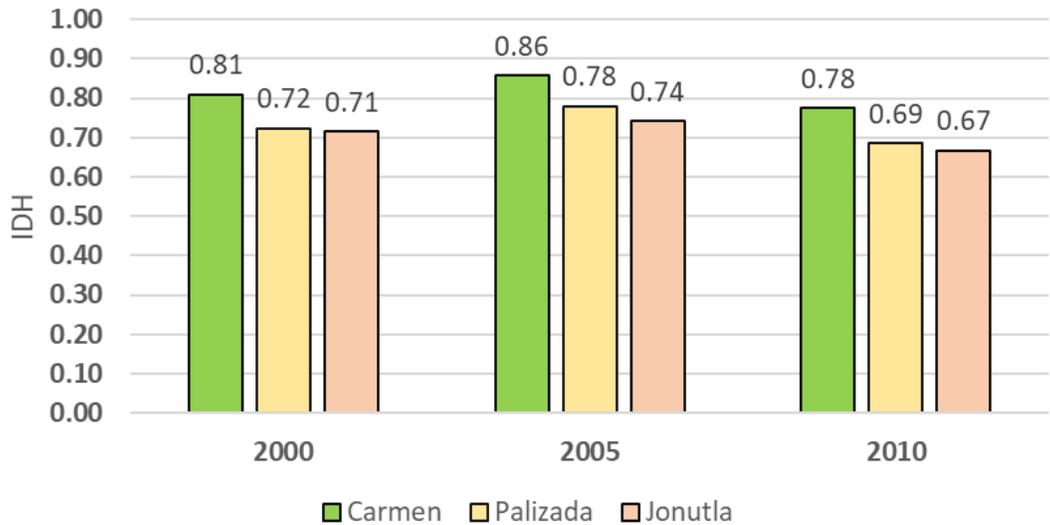


Figura 53. Dinámica del cambio de Índice de Desarrollo Humano de los municipios El Carmen, Palizada y Jonutla, en los años 2000 (a), 2005 (b) y 2015 (c).

## DISCUSIÓN

### Índice de Estado Trófico TRIX

A partir de la evaluación del estado trófico de los sistemas se observa que el SPA mantiene condiciones mesotróficas durante la temporada de nortes y secas, y en algunos sitios mantiene tendencias eutróficas. En la temporada de lluvias estas condiciones disminuyeron considerablemente, se presentaron condiciones oligotróficas en la mayor parte de los sitios, principalmente en las lagunas interiores. Sin embargo, en las lagunas de Los Loros y Puerto Rico fueron las que presentaron mayor estado trófico. Históricamente estos sitios se han clasificado y caracterizado entre un estado oligotrófico y mesotrófico (Muciño *et al.*, 2014; Muciño *et al.*, 2017).

En el SPE se registraron condiciones mesotróficas en la temporada de nortes a lo largo del sistema, en la temporada de secas se mantuvieron condiciones oligotróficas en las zonas correspondientes a Boca Chica, Seno Palizada, Laguna de San Francisco y la Cuenca Palizada, en el resto del sistema se registraron condiciones mesotróficas. Cabe destacar que los sitios cinco y seis que corresponden a sitios dentro de la laguna Del Este mantuvieron tendencias a la eutrofia, ya que en este sitio se registran las descargas del Río Las Cruces, el cual como anteriormente se mencionó, influye en la incorporación de compuestos nitrogenados y fosforados. Por último, en la temporada de lluvias las condiciones tróficas registradas en la mayoría de los sitios fueron oligotróficas, sin embargo, en los sitios cinco, seis, nueve y diez presentaron condiciones mesotróficas, debido a que en estos sitios mantienen constantemente aportaciones de los ríos Las Cruces, Las Piñas y Marentes, lo que incide en la proactividad y flujo de nutrientes del sistema fluviolagunar (Muciño *et al.*, 2017; Montalvo *et al.*, 2018).

El índice TRIX tiene la finalidad de clasificar un sistema natural o impactado, a partir de múltiples variables fisicoquímicas y biológicas. Sin embargo, este índice presenta la dificultad de tener una visión fragmentada sobre la eutrofización de un sitio, y en un tiempo determinado (Gómez-Ortega *et al.*, 2017).

Muciño-Márquez *et al.*, (2017) registran para los SPA y SPE valores entre 0-3.9, por lo cual clasificaron a ambos sistemas con un estado oligotrófico con tendencias a mesotrófico.

En el mismo estudio se determinó que ambos sistemas mantienen una calidad ecológica, con concentraciones de nutrientes permitidas para que sean utilizados como fuente de abastecimiento de agua potable, de riego agrícola, para la acuicultura y la protección de la vida acuática dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos.

Gómez-Ortega *et al.*, (2014) enfatiza la gran importancia establecer intervalos de nutrientes que permitan una buena gestión costera, a partir de una clasificación de calidad de agua que considere su estado trófico, también destacan que la utilización de los índices tróficos no sustituye la información hidrológica, y no permite una caracterización más compleja de los ecosistemas costeros.

### **Índice de Huella Humana**

Se evaluó el IHH dentro y en la zona circundante del APFFLT que interacciona con los SPA y SPE, se observó que para la zona que comprende el Área Natural Protegida (ANP) se encuentra la mayor extensión sin transformación (72.1 %), y en la zona de influencia mantiene el 55.6% sin transformación. Esto se debe a las diversas medidas de regulación de las actividades productivas y a la realización de nuevas actividades que promueven un desarrollo sustentable para la región, acompañadas de políticas y acciones de protección, conservación y monitoreo dentro y fuera del ANP. En este sentido, las zonas que no presentan transformación mantienen presiones antropogénicas que paulatinamente generan una reducción en su área (DOF, 2003; Agraz-Hernández *et al.*, 2015).

En los SPA y SPE se mantienen sitios que presentan una menor transformación por acción humana, principalmente en las zonas de difícil acceso como son zonas de humedales, estos sitios son poco productivos para las actividades agrícolas o ganaderas, por lo cual la geografía es un factor importante que controla las diversas transformaciones antropogénicas de los ecosistemas (Foley *et al.*, 2005; González-Abraham *et al.*, 2015).

En la comparación de la zona que corresponde al ANP y la zona de influencia, se observa que mantiene la cubierta vegetal con una baja transformación, ya que aquí se presenta la zonificación de la zona núcleo y la zona de amortiguamiento. Lo anterior es similar a lo que describe González-Abraham *et al.*, (2015), menciona que las zonas que no mantienen algún grado de IHH son las zonas catalogadas como prístinas o áreas protegidas decretadas por el gobierno federal.

Las categorías con bajo y medio Índice de Huella Humana dentro del ANP sumó un área total de 17.4%, en el caso de la zona circundante al APFFLP fue de 30.2 %, se observa que el impacto humano a partir del cambio de actividades se va incrementando alrededor de la zona de protección.

En el caso de las categorías alto y muy alto Índice de Huella Humana para la zona que se encuentra dentro del ANP es del 10.5% del área total, estas zonas se encuentran al norte del sistema Pom-Atasta, paralela a la línea de costa, la cual corresponde a los poblados de Emiliano Zapata, Nuevo Progreso, San Antonio Cárdenas, Atasta y Ciudad del Carmen, así mismo se observa en los márgenes del río Usumacinta, y en la parte sur en la zona correspondiente al poblado de Palizada y crece al norte hacia el poblado de Plan del Carmen.

Para la zona circundante al ANP se observa una cobertura entre las categorías de alto y muy alto de IHH del 14.3%, el mayor crecimiento se observa para la parte sur del SPE, correspondiente a los poblados de Entre Hermanos, La Concepción, Las Cruces, La Fortuna y San Antonio de la Sabana. Se ha descrito que las zonas costeras con mayor transformación antrópica se encuentran en las costas del Golfo de México (González-Abraham *et al.*, 2015).

El estado de Campeche se encuentra en una región que a lo largo de su historia mantiene una menor alteración en el uso de suelo, sin embargo, las zonas modificadas datan del periodo preclásico con la presencia de asentamientos mayas, con lo cual las modificaciones en su entorno generaron una Huella Humana en la zona, en particular en Isla del Carmen, este sitio actualmente presenta una categoría de muy alto IHH.

En el siglo XX, entre los años de 1920 y 1930 se registraron las primeras actividades económicas importantes en la Isla del Carmen, constituida por el auge y consolidación del cultivo de coco, se presentó su mayor éxito durante la época de los sesenta, durante esta actividad productiva se registró una densidad de cultivo de 143 palmeras de coco/hectárea, lo que provocó con esta transformación una pérdida directa de la vegetación de duna, mangle, etc. (Cabrera, 2011).

Durante los años 40's se inició una de las más significativas actividades pesqueras, la extracción de camarón en la sonda Campeche, esta actividad fue una de las más relevantes a nivel nacional e internacional, permitió marcar un crecimiento considerable en las actividades económicas de la región, ya que la Laguna de Términos se consideró como una de las zonas de mayor importancia para la cría de juveniles de camarón (Hernández y Gutiérrez, 2015). La Ciudad del Carmen fue un sitio de gran aprovechamiento de camarón, el cual contribuyó con el 7% de la producción de camarón del Golfo de México, con lo cual la transformación se incrementó paulatinamente. Durante este periodo la densidad de desarrollo de asentamientos humanos mantuvo un incremento considerable en el occidente de la Isla, así como en la rivera de río Palizada y en las localidades de Puerto Rico, Atasta, Pom, San Antonio Cárdenas y Nuevo Campechito, estos sitios son los que presentan una categoría de entre alto y muy alto IHH (Vadillo-López, 2008; Villalobos, 2015).

En la década de los 70's en Ciudad del Carmen se comenzó la explotación de hidrocarburos en la sonda Campeche, pasó de una economía pesquera a una economía petrolera (Vadillo-López, 2008). Esta actividad generó una gran cantidad de empleos, sin embargo, estos empleos los adquiría en su mayoría trabajadores de lugares ajenos a la zona, lo que provocó la inmigración de una gran cantidad de personas hacia estos sitios. Este proceso de desarrollo económico y de inmigración a la Ciudad del Carmen y sus alrededores generó una acelerada transformación local, lo que indujo a cambios en la vida de la población y en el ambiente circundante (Cabrera, 2010; Hernández y Gutiérrez, 2015; Pérez *et al.*, 2018).

Otras actividades importantes, aunque en menor proporción son las actividades agrícolas y pecuarias. La actividad ganadera a lo largo de la historia detonó el cambio de uso de suelo en la región. Las principales zonas que presentaron esta actividad fueron: Nuevo Campechito, San Antonio Cárdenas, Atasta, Puerto Rico; Isla Aguada, Sabancuy, Mamantel, Aguacatal y Palizada (Mendoza *et al.*, 2015).

En los municipios de Palizada y El Carmen mantienen entre sus principales actividades el cultivo extensivo de arroz, el cual induce de manera indirecta la eutrofización y contaminación de los cuerpos de agua, sedimentos y en los organismos de los sistemas acuáticos durante la fertilización de este cultivo. Estos cultivos se presentan en la zona sur del sistema fluvio lagunar Palizada-Del Este, San Francisco y la propia Laguna de Términos (Villalobos, 2015).

Por lo tanto, los patrones de cambio en los ecosistemas terrestres y acuáticos que existen alrededor de los SPA y SPE se encuentra influenciados por las diversas actividades humanas, principalmente por las transformaciones de la tierra (infraestructura como asentamientos humanos, vías de transporte, líneas eléctricas, producción de fertilizantes, proyectos de extracción de hidrocarburos, infraestructura para el turismo, telecomunicaciones, etc.) y zonas productivas (zonas agrícolas, acuícolas, ganadería, explotación pesquera y para aprovechamiento forestal) o de manera indirecta a través de los subproductos de las distintas actividades humanas que se incorporan a los sistemas y causan diversas afectaciones en las funciones de los mismos (Rivera-Arriaga, 2015).

Así mismo, las transformaciones antrópicas en las zonas estudiadas se encuentran determinadas por un mosaico ambiental y topográfico particular, en donde se pueden encontrar las condiciones más favorables para dichas transformaciones (Foley *et al.*, 2005). Sin embargo, no solo el factor geográfico y ambiental determina la transformación y los asentamientos humanos en la región de la Laguna de Términos, también existen componentes históricos, tecnológicos y culturales que determinan el desarrollo en diferentes ambientes alrededor de los sistemas fluvio-lagunares (Vandam *et al.*, 2013; González-Abraham *et al.*, 2015) esto es

fundamental para una mejor comprensión del cambio de uso de suelo en las zonas de estudio.

Por lo tanto la Huella Humana determinó el proceso de degradación histórico de los ecosistemas a partir de la influencia que presenta el cambio de uso de suelo y las actividades humanas, el cual se encuentra relacionado con la intensidad que mantienen las actividades humanas, y lo determina el tipo de actividad y el área de ocupación.

### **Índice de Desarrollo Humano**

El Índice de Desarrollo Humano indicó que el municipio del Carmen mantuvo valores más elevados de desarrollo, con niveles de 0.81 para el año 2000, 0.86 para el año 2005, por último, aunque se registró una baja en el índice se obtuvieron valores de 0.78 para el año 2010.

En el caso del municipio de Palizada se observó un incremento en el IDH durante los años 2000 y 2005, sin embargo, existe un decremento para el año 2010, manteniendo una categoría de índice bajo. Sin embargo, el PNUD (2019), menciona que los municipios de Palizada y el Carmen ascendieron a categorías de Desarrollo Humano mayor en comparación a años anteriores.

En el municipio de Jonuta se observó un incremento para el año 2000 a 2005, pasando de una categoría baja a alta en el IDH, sin embargo, para el año 2010 se presenta una baja en esta categoría, en el cual pasó nuevamente a una escala baja del IDH.

En investigaciones del Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo en México menciona que Jonuta es el municipio de Tabasco más rezagado, esto se debe a la desigualdad que prevalece en la región, por lo cual este municipio podría tardar 24 años en igualar a los municipios con mayor Índice de Desarrollo Humano del País (PNUD, 2019).

A nivel municipal el Índice de Desarrollo Humano del Carmen, Palizada y Jonuta toma en cuenta características más específicas de las variables de salud, educación e ingresos, lo que permite medir el impacto real de la población, a partir de la

incidencia directa de los gobiernos municipales, y la dirección del gasto público hacia la creación de obras y servicios, lo que impacta de manera significativa en el nivel de vida de los municipios evaluados (Sarur, 2015).

El estado de Campeche es una de las entidades a nivel nacional que ha escalado tres posiciones en la lista nacional de IDH, se observa que las condiciones de bienestar en este estado han mejorado, lo que demuestra que ha alcanzado los mayores logros de Desarrollo Humano (PNUD, 2015). Estos resultados indican que el IDH del estado de Campeche es comparable al nivel de desarrollo de países como Albania y Trinidad y Tobago (PNUD, 2014).

Existe una relación intrínseca entre el Desarrollo Humano y la degradación ambiental (PNUD, 2018), se observó una relación entre las presiones antrópicas que se presentan en la zona del ANP y su zona circundante, ya que los municipios Palizada y Jonuta mantienen un mayor IHH y menor IDH, por lo cual presentan una mayor degradación ambiental, lo que genera riesgos en materia de desarrollo humano de las generaciones actuales y futuras dentro de las zonas que comprenden a los SPA y SPE.

En los municipios evaluados se mantienen diversos estados de presiones antropogénicas que provocan la degradación ambiental, entre las cuales se consideran la contaminación atmosférica, acuática, del suelo, la transformación de las zonas naturales, la sobrepesca, que se generan a partir de las diversas actividades primarias, secundarias y terciarias de la zona, lo que provoca el declive de la biodiversidad de los SPA, SPE y sus alrededores. Esto implica una disminución de los diversos servicios ambientales que se generan localmente y que influyen directamente en la calidad de vida de las poblaciones de cada municipio (Villalobos-Zapata, 2015).

Esta crisis de degradación ambiental de las zonas circundantes al APFFLT en particular en los SPA y SPE son una amenaza directa para el Desarrollo Humano local, ya que disminuyen las opciones de libertad de los individuos y las posibilidades de que un individuo pueda desarrollarse en un ambiente óptimo para el disfrute de una vida digna, prolongada, saludable y creativa (PNUD, 2018). Por lo

cual el progreso mundial y local mantienen presiones de degradación, como son el cambio de usos de suelo, el cambio climático, la disminución masiva de la biodiversidad, el agotamiento de los recursos terrestres e hídricos, etc., lo que genera una gran amenaza para las comunidades locales y regionales. Por tal motivo se necesita un cambio en las políticas de manejo, restauración y conservación de los recursos naturales de las zonas evaluadas.

Se ha descrito que el IDH mantiene una estrecha relación con la Agenda 2030 y los 17 Objetivos de Desarrollo Sustentable, los cuales reconocen el tener una visión multidimensional sobre la urgencia de impulsar el Desarrollo Humano local a partir del entorno social y ambiental (PNUD, 2019).

Para llegar al Desarrollo Humano sustentable en los municipios evaluados se deben de tener en cuenta las capacidades municipales, ya que este nivel de gobierno es el que mantiene la mayor cercanía con las personas del municipio, por lo cual deben generar políticas, programas y proyectos que estén relacionados con la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sustentable, con esto se permitirá minimizar la brecha de desigualdad, dando una base para un mejor Desarrollo Humano en los municipios del Carmen, Palizada y Jonuta (Sarur, 2015).

Se observa que la extrema desigualdad que se mantiene entre los municipios de Campeche (El Carmen y Palizada) y Tabasco (Jonuta), generan una gran distancia en el Índice de Desarrollo Humano, por lo tanto, los gobiernos municipales deben de contribuir a mejorar la calidad de vida de las personas, realizando una eficiente distribución del gasto público que permita cubrir las desigualdades en educación, salud, expectativas de vida e ingresos (Sarur, 2015; Martínez, 2015).

## **CONCLUSIONES**

Debido a las concentraciones de nutrientes, de oxígeno disuelto y clorofila a presente en el SPA se observa que las condiciones tróficas se mantienen en un estado mesotrófico durante la temporada de lluvias y secas, estas condiciones indican una alta productividad y generación de materia orgánica *in situ* y por las diferentes aportaciones en el sistema. En el SPE las condiciones cambian entre un ambiente mesotrófico y oligotrófico en la temporada de secas. Cabe destacar que

las diferentes condiciones de ambos sistemas se encuentran estrechamente relacionadas con las aportaciones antrópicas, variables ambientales, temporales y espaciales de los sistemas, por lo cual el monitoreo constante a largo del tiempo permitirá realizar tendencias y predicciones que ayuden a determinar los sitios que mantengan una presión ambiental y generen cambios en su estado trófico y así ayude a mitigar o reestablecer las condiciones ante un incremento en su estado trófico.

La Huella Humana en los SPA y SPE la determinan diversas transformaciones históricas, tecnológicas y culturales, así como el amplio mosaico ambiental y topográfico que se tiene alrededor de los SPA y SPE, y en general en el APFFLT. Las principales transformaciones que se registraron se encuentran en la zona noroeste del SPA y sureste del SPE, así como a lo largo de los ríos circundantes a ambos sistemas. Los distintos usos de suelo que se registran en la zona determinan las condiciones de los procesos biogeoquímicos que se mantienen en los sistemas, tal es el caso en la hidrósfera, las actividades agropecuarias determinan los aportes de nutrientes hacia los sistemas, por lo cual acelera los cambios en el estado trófico. Por otra parte, el cambio de usos de suelo para la realización de actividades primarias secundarias y terciarias, generan la pérdida de hábitats y cobertura de manglar, lo que influye directamente en los procesos biológicos y ecológicos de las especies que se mantienen en el APFFLT y en particular en los SPA y SPE.

Se observó una relación intrínseca entre el Desarrollo Humano y la degradación ambiental, principalmente en las capacidades y libertades que tienen los individuos de los municipios que integran los SPA y SPE, se registró una amplia brecha de desigualdad social, económica, de educación y salud entre los municipios de El Carmen, Palizada y Jonuta. Así mismo, se determinó que los municipios Palizada y Jonuta mantienen un mayor IHH y menor IDH, por lo cual esta relación implica una mayor degradación ambiental y una mayor desigualdad social. Es por esto, que al existir menores oportunidades en los sectores de los municipios con menor IDH, disminuyen las opciones para que un individuo pueda desarrollarse en un ambiente óptimo y mantenga el disfrute de una vida digna, prolongada, saludable y creativa,

y así se propicie la degradación ambiental en los ecosistemas aledaños a los municipios.

## REFERENCIAS

- Agraz-Hernández C., Osti J., Chan C., Arriaga V., Martínez J., Acosta J., Castillo S., Gómez D., Reyes J., Conde P. y Martínez J. K. 2015. Grado de Conservación del Ecosistema de Mangle en la Laguna de Términos, Campeche: Propuesta de Políticas ambientales y acciones de restauración. 117-132pp. En: Ramos-Miranda J., y Villalobos Z. G.J. 2015. Aspectos socio ambientales de la región de la laguna de Términos, Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. 210p.
- Aguirre-León A., y Díaz-Ruiz S. 2006. Estructura de tallas, madurez gonádica y alimentación del pez *Diapterus rhombeus* (Gerreidae) en el sistema fluvio-deltáico Pom-Atasta, Campeche, México. *Revista de biología tropical*. 54(2), 599-611.
- Bach L., Calderón R., Cepeda M. F., Oczkowski A., Olsen S. B., y Robadue D. 2005. Resumen del Perfil de Primer Nivel del Sitio Laguna de Términos y su Cuenca. México Narragansett, En: Coastal Resources Center, University of Rhode Island. 30p.
- Cabrera C. M. 2010. El estudio de la extracción petrolera como determinante en el crecimiento y desarrollo económico de los habitantes de Ciudad del Carmen Campeche, México. Global Conference on Business and Finance Proceedings. 5(1). 1114.
- Cabrera C. M. 2011. Análisis del desarrollo social de Ciudad del Carmen, Campeche, desde una perspectiva económica. México. Global Conference on Business and Finance Proceedings. 6(2), 910.
- Diario Oficial de la Federación. 2003. NOM-022-SEMARNAT-2003. Especificaciones para la preservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros en zonas de manglar. 10 p.
- Foley J. A., DeFries R., Asner G. P., Barford C., Bonan G., Carpenter S. R., Stuart C. F., Coe M. T., Daily G. C., Gibbs H. K., Helkowski J. H., Holloway T., Howard E. A., Kucharik C. J., Monfreda C., Patz J. A., Colin P. I., Ramankutty N., Snyder P. K. 2005. Global consequences of land use. *Science*. 309(5734), 570-574.
- García-Cuellar J. Á., Arreguín-Sánchez F., Hernández-Vázquez S., y Lluch-Cota D. B. 2004. Impacto ecológico de la industria petrolera en la Sonda de Campeche, México, tras tres décadas de actividad: una revisión. *Interciencia*. 29(6), 311-319.
- Gómez-Ortega R., Tovilla C., Barba E., Castañeda O., Valle F. J., Romero E. I., y Ramos E. 2014. Índices tróficos de importancia ecológica y su relación con algunas variables físico-químicas en el sistema lagunar estuarino Chantuto-

- Panzacola, Chiapas, México. Revista cubana de investigaciones pesqueras. 31(2), 47-57.
- Gómez-Ortega R., de la Lanza-Espino G., Tovilla-Hernández C., Barba-Macías E., Valle-Mora, J., Castañeda-López O., y Ramos-Santiago E. 2017. Cambios ambientales y tróficos a través de un análisis a largo plazo del sistema lagunar Chantuto-Panzacola, Chiapas, México. Revista Ciencias Marinas y Costeras, 75-100.
- González-Abraham C., Ezcurra E., Garcillán P. P., Ortega-Rubio A., Kolb, M., y Creel J. E. B. 2015. The human footprint in Mexico: physical geography and historical legacies. PloS one. 10(3), e0121203.
- Hernández M. G. D. A., y Gutiérrez M. J. G. 2017. El reto de la política fiscal ante una industria petrolera inestable. El caso de Ciudad del Carmen, México Revista En-contexto. (6), 233-258.
- Kuc-Castilla A. G., Posada-Vanegas G., y Vega-Serratos B. E. 2015. Evaluación hidrodinámica de la laguna de Términos. En: Ramos-Miranda, J., y Villalobos-Zapata, G. J. Aspectos socio ambientales de la región de la laguna de Términos, Campeche. México: Universidad Autónoma de Campeche. 145-166.
- Martínez A. L. 2015. Desigualdad y corrupción: ¿Cómo romper el círculo vicioso? En: Índice de Competitividad Internacional. La corrupción en México: Tranzamos y no avanzamos. Instituto Mexicano para la Competitividad. A. C. 67-70.
- Mendoza J. V., Kú Q. V., Pool N. L., Agurre C. E. 2015. El impacto de prácticas agropecuarias en los recursos naturales del Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, Campeche. El caso de Palizada y Sabancuy. 65-73pp. En: Ramos-Miranda J., y Villalobos Z. G.J. 2015. Aspectos socio ambientales de la región de la laguna de Términos, Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. 210 p.
- Montalvo C., Aguilar C., Argas J., Cerón R. M., Cerón J. G., Amador L.E. y Ramírez M.A. 2018. Cuantificación de los niveles de metales pesados en el río Palizada. 181-213pp. En: Villegas Sierra J., y R.M. Cerón Bretón. 2018. Análisis del Espacio Urbano y sus Consecuencias Ambientales en la Región de la Laguna de Términos. Universidad Autónoma de Campeche. 214p.
- Moreno F. D. P., Quintero M. J. y López C. A. 2010. Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. Contactos. 78, 25-33.
- Muciño-Márquez, R. E., Figueroa-Torres, M. G., y Aguirre-León, A. 2014. Composición fitoplanctónica en los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada Del Este, adyacentes a la laguna de Términos Campeche, México. Acta Biológica Colombiana, 19(1): 63-84.
- Mucino-Márquez R. E., Aguirre-León A., y Figueroa-Torres M. G. 2017. Evaluation of trophic status in the Pom-Atasta and Palizada Del Este Fluvial-lagoon systems Campeche, Mexico. Hidrobiologica. 27(3), 281-291.

- Pérez F. A., Rivas M. M. I., Martínez L. D., y Venegas V. J. A. 2018. Reestructuración de Pemex y su efecto en los salarios y el mercado de trabajo en Ciudad del Carmen, Campeche. *Análisis Económico*. 33(82), 111-124.
- PNUD. 2014. Índice de Desarrollo Humano municipal en México: Nueva metodología. Ciudad de México: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. 102p.
- PNUD. (2015). Índice de Desarrollo Humano para las entidades federativas, México 2015. Avance continuo, diferencias persistentes. 24p.
- PNUD. 2018. Índices e indicadores de desarrollo humano: Actualización estadística de 2018. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. 112p.
- PNUD. 2019. Informe de Desarrollo Humano Municipal 2010-2015. Transformando México desde lo local. Ciudad de México. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. 348p.
- Ramos-Miranda J., Flores-Hernández D., Ayala-Pérez L. A., Rendón-von O. J., Villalobos-Zapata G. y Sosa-López, A. 2006. Atlas hidrológico e ictiológico de la Laguna de Términos. Centro de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX)-Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, Campeche. 75p.
- Ramos R. R., Gama C. L. M., Núñez G. J. C., Sánchez H. R., Hernández T. H. y Ruíz Á. O. 2016. Adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 7(13): 2551-2563.
- Rivera-Arriaga E. 2015. La gobernanza ambiental en la región de la laguna de términos Campeche. 21-40pp. En: Ramos Miranda J. y G. J. Villalobos Zapata (Eds.). Aspectos Socioambientales de la Región de la Laguna de Términos Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. 210p.
- Sanderson E. W., Jaiteh M., Levy M. A., Redford K. H., Wannebo A. V., y Woolmer G. 2002. The human footprint and the last of the wild: the human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not. *BioScience*. 52(10), 891-904.
- Sarur Z. M. S. 2015. Relación del gasto público municipal con el Índice de Desarrollo Humano, en los municipios del estado de Veracruz, en el periodo 2000-2010. *Ciencia Administrativa*. 15-27.
- Torres-Rodríguez V., Márquez-García A., Bolongaro C. A., Chavarria H. J., Expósito D. G., y Márquez G. E. 2011. Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático. 325-344pp. En: Botello, A. V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático (segunda edición). Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 754p.

- Vadillo-López C. 2008. Una historia regional en tres tiempos: Campeche siglos XVIII-XX. *Península*. 3(2), 45-56.
- Vandam R., Kaptijn E., y Vanschoenwinkel B. 2013. Disentangling the spatio-environmental drivers of human settlement: An eigenvector based variation decomposition. *PloS one*. 8(7), e67726.
- Villalobos-Zapata G. J. 2015. Conservación y manejo del Área de Protección de Flora y Fauna "Laguna de Términos" (1994-2015). 1-20pp. En: Ramos Miranda J. y G. J. Villalobos Zapata (Eds.). *Aspectos Socioambientales de la Región de la Laguna de Términos Campeche*. Universidad Autónoma de Campeche. 210p.
- Vollenweider R. A., Giovanardi F., Montanari G. y Rinaldi A. 1998. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics: The official journal of the International Environmetrics Society*. 9(3), 329-357.
- Wackernagel M., Kitzes J., Moran D., Goldfinger S., y Thomas M. 2006. The ecological footprint of cities and regions: comparing resource availability with resource demand. *Environment and Urbanization*. 18(1), 103-112.
- Yáñez-Arancibia A., Day, J., y Currie-Alder, B. 2009. Functioning of the Grijalva-Usumacinta River Delta, Mexico: Challenges for Coastal Management. *Ocean Yearbook Online*. 23(1), 473-501.
- Zouiten H. 2012. Análisis mediante modelado avanzado de procesos de eutrofización en lagunas litorales: aplicación a masas de agua Atlánticas y Mediterráneas. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria. 347p.

## CAPÍTULO 3

### Propuestas de estrategias de vigilancia y conservación del Sistema Pom-Atasta y Sistema Palizada-Del Este.

#### RESUMEN

Los sistemas Pom-Atasta y Palizada-Del Este mantienen una alta diversidad biológica, además de procesos biogeoquímicos y diversos servicios ambientales. El estudio de los procesos biogeoquímicos permite identificar diversas presiones antrópicas, así como focalizar las zonas con mayor perturbación. Estos estudios son fundamentales para generar estrategias de manejo que incluyan la mitigación, restauración y conservación de hábitat y recursos. Se realizó un ejercicio de transferencia de los resultados del proyecto de investigación Biogeoquímica de dos cabeceras estuarinas de la Laguna de Términos, Campeche: estudio base para generar propuestas de conservación con actores principales en el área natural protegida Laguna de Términos y se evaluaron propuestas para la vigilancia y conservación de los SPA y SPE. Se realizó una valoración jerárquica de las condiciones ambientales y las actividades humanas que ejercen presión sobre los ecosistemas mediante un análisis de Presión-Estado-Impacto-Respuesta (PEIR) lo que permitió identificar estrategias de manejo. Se proponen estrategias de protección, manejo y conservación dentro de los ejes de los sistemas hídricos, la productividad biológica, los sistemas agroforestales, con relación al cambio de uso de suelo, y el desarrollo social y humano.

**Palabras clave:** PEIR, ANP, conservación, tomadores de decisiones, transferencia de conocimiento.

## **ABSTRACT**

The Pom-Atasta and Palizada-Del Este systems maintain high biological diversity, biogeochemical processes and various environmental services. The study of biogeochemical processes makes it possible to identify various anthropic pressures, as well as focus on the areas with the greatest disturbance. These studies are essential to generate management strategies that include the mitigation, restoration and conservation of habitat and resources. A transfer exercise was carried out on the results of the research project Biogeochemical of two estuarine headwaters of Laguna de Terminos, Campeche: base study to generate conservation proposals with main actors in the protected natural area Laguna de Terminos, and were evaluated. Proposals for the surveillance and conservation of SPA and SPE. A hierarchical assessment of environmental conditions and human activities that exert pressure on ecosystems was carried out through a Pressure-State-Impact-Response (PSIR) analysis, what allowed to identify management strategies. Protection, management and conservation strategies are proposed within the axes of water systems, biological productivity, agroforestry systems, in relation to land use change, and social and human development.

**Keywords:** PSIR, NPA, conservation, decision makers, knowledge transfer

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad es fundamental la conservación de los ecosistemas costeros como los SPA y SPE. Estos sitios resguardan una alta biodiversidad y diversas funciones ecosistémicas, conservan interacciones ecológicas fundamentales que determinan el flujo energético de la Laguna de Términos, a su vez mantienen procesos ecológicos para el aprovechamiento humano, tal es el caso de las pesquerías dentro y fuera de los sistemas (Ramos-Miranda *et al.*, 2006; Ayala Pérez, 2012).

El estudio de las interacciones biogeoquímicas en estos sistemas es clave para dar una visión completa y clara de los procesos ecológicos y las presiones antropogénicas que determinan su funcionalidad de los ecosistemas fluvio-lagunatres, y coadyuve la generación e implementación de políticas y acciones de conservación (Chirino *et al.*, 2008).

Sin embargo, la generación de nuevo conocimiento sobre la caracterización ambiental y biofísica no implica que este llegue directamente a las personas que mantienen una estrecha interrelación con el ANP. El mecanismo que permite la integración de la información de los procesos que se generan en los sistemas fluvio-lagunares y su transferencia a los tomadores de decisiones es la transferencia de conocimiento, la cual proporciona herramientas, capacidades y habilidades a los actores involucrados en la conservación, y así puedan generar instrumentos de planeación que ayuden a mantener una buena vigilancia y conservación de los recursos naturales presentes en los sistemas fluvio-lagunares (Castillo *et al.*, 2009; Fera, 2009).

La transferencia de conocimiento en el área de conservación no solo permite generar conocimiento básico, si no que mantiene una responsabilidad desde las universidades y centros de investigación que repercute directamente en la sociedad que se dedica a la conservación, restauración y vigilancia de los SPA y SPE (Arias y Aristizábal, 2011).

Existen métodos que permiten conjuntar los datos adquiridos en las investigaciones y generar propuestas para los diferentes actores involucrados en la conservación de los SPA y SPE. El análisis Presión-Estado-Impacto-Respuesta es un modelo de

organización simple, que pretende determinar una progresión causal de las acciones humanas que ocasionan presiones sobre los ecosistemas de las ANP's y los recursos naturales que llevan a un cambio en el estadio ecológico, y a su vez se generan propuestas o medidas que permite reducir o prevenir su impacto (Rodríguez-Cardozo, 2015).

Este modelo es un indicador ambiental de sustentabilidad desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente y la Organización para el Desarrollo Económico (OCDE). El modelo PEIR determina en un ecosistema o componente ambiental cuales son las condiciones de presiones antrópicas (Presión), como se encuentra dicho ecosistema o componente ambiental (Estado), otra variable es la interrelación entre las presiones y el estado en el que se encuentra un ecosistema, lo que ayuda a determinar los impactos sobre aspectos socio ambientales (Impacto), por último se establecen las medidas que la sociedad y los tomadores de decisiones realizarán para mitigar, corregir o prevenir impactos negativos (Respuesta) (Schütz *et al.*, 2008; Sotelo *et al.*, 2011)

El indicador de impacto mantiene una ventaja en comparación a otros modelos, este favorece el establecimiento de prioridades en el desarrollo de las respuestas y soluciones para minimizar los impactos negativos (Vázquez-Valencia y García-Almada, 2018).

El objetivo de este documento es informar sobre las estrategias de vigilancia y conservación de los SPA y SPE, que se logró desarrollar mediante un ejercicio de transferencia de conocimiento dirigido a tomadores de decisiones en el área natural protegida de Laguna de Términos.

## **MATERIAL Y MÉTODO**

A partir de análisis ambiental, económico y social se realizó un diagnóstico de los resultados obtenidos, con lo cual se determinaron los principales factores y condiciones que influyen entre las presiones antropogénicas en los SPA y SPE.

Los índices e indicadores desarrollados fueron evaluados a partir de un modelo de análisis de Presión-Estado-Impacto-Respuesta (PEIR). Este análisis permitió determinar las relaciones entre las condiciones ambientales y las actividades humanas, a partir de tres condiciones de presiones ejercidas al sistema, el estado en el que se encuentra dicho sistema, los impactos que se generan ante estas presiones y posteriormente se valoraron las propuestas más importantes que permitan mantener condiciones estables de los ecosistemas (Vázquez-Valencia y García-Almada, 2018).

El modelo de Presión-Estado-Impacto-Respuesta, es una derivación del modelo de Presión-Estado-Respuesta, sin embargo presenta otro esquema de análisis, donde las actividades humanas generan las presiones de manera directa o indirecta y así se evalúan los indicadores de estado, que se refieren a las condiciones ambientales presentes en el sistema, los impactos se determinan a partir de los efectos a la salud humana y los ecosistemas, con lo cual se proponen estrategias que ayuden a mitigar estos impactos generados por las actividades humanas (Plasencia *et al.*, 2018; Vázquez-Valencia y García-Almada, 2018).

A partir del análisis PEIR y las propuestas de mitigación, restauración y conservación, se realizó la transferencia de conocimiento, a los directivos y personal interesado que trabajan e investigan en el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, a los investigadores del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología Estación El Carmen de la Universidad Nacional Autónoma de México, a miembros de la Secretaría de Marina y personas interesadas de la Sociedad Civil.

## **RESULTADOS**

La evaluación del análisis PEIR de los ocho componentes ambientales y socioeconómicos determinó las principales presiones que se ejercen en las diferentes esferas ambientales de los SPA y SPE. En el caso de la atmósfera las presiones más importantes se relacionan con el cambio climático y los efectos del mismo sobre los sistemas fluvio-lagunares. Las propuestas fundamentales ante estas presiones están relacionadas con la mitigación y adaptación ante el cambio

climático regional, la conservación de la cobertura vegetal y el mantenimiento de los sistemas ecológicos presentes en ambos sistemas.

En el caso del sistema hídrico se observó que las mayores presiones se deben a la contaminación y el aporte de nutrientes hacia la columna de agua, las actividades antrópicas y eventos naturales como el aporte de nutrientes de diversas fuentes como ríos, arroyos, etc. Las principales propuestas para la mitigación del sistema hídrico se relacionan con el tratamiento de las descargas residuales que se incorporan a los cuerpos de agua y permita minimizar la eutrofización y así mantener estados tróficos estables a lo largo de los sistemas.

El sistema forestal de los SPA y SPE mantienen a lo largo del tiempo pérdidas de su cobertura, por lo cual se propone mantener estrategias de restauración de los ecosistemas de manglar, así como programas de monitoreo y vigilancia para su conservación.

Para el componente del cambio y uso de suelo se encontró que las actividades productivas de la región inducen la pérdida de coberturas naturales, biodiversidad, humedales y bosques de manglar. Se proponen minimizar estas presiones a través del seguimiento de programas de manejo y desarrollo urbano acorde a los objetivos del desarrollo sustentable.

El componente social y humano registró diversas condiciones de desigualdad de los diferentes municipios que contemplan los sistemas fluvio lagunares. Para que se genere una mayor inclusión y se minimice la brecha de desigualdad entre los municipios se propone la gestión y distribución de un gasto público equitativo y así mejorar la calidad de vida de la población local. Así mismo, mantener políticas públicas acorde a la agenda 2030 y los objetivos del desarrollo sustentable (Tabla 13).

Tabla 13 .- Evaluación de propuestas a partir del modelo de PEIR,

Componente	Variable	Presión	Estado	Impacto - Efecto	Respuesta
Atmósfera y Clima	Temperatura	Cambio climático	Incremento de la temperatura global	Pérdida de zona costera, incremento del nivel del mar.	Mitigación en zonas costeras ante el cambio climático. Participación en convenios y tratados nacionales e internacionales.
		Emisiones de gases de efecto invernadero	Emisiones de gases de efecto invernadero en Ciudad del Carmen, Pom, Atasta y Palizada. Emisiones por la actividad ganadera.	Exposición de contaminantes atmosféricos hacia la población, incremento de los niveles globales de CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub>	Participación en convenios y tratados nacionales e internacionales. Implementación de nuevas tecnologías que reduzcan las emisiones de CO <sub>2</sub> .
		Reducción de fijación de CO <sub>2</sub> por la vegetación	Pérdida de fijación por la agricultura. Pérdida de fijación por el cambio de uso de suelo. Pérdida por deforestación de manglar.	Incremento de CO <sub>2</sub> atmosférico global	Restauración de zonas de manglar altamente fijadoras.
Eventos naturales	Desastres naturales	Ciclones y Huracanes	Población afectada por desastres naturales	Pérdidas económicas Pérdidas humanas Pérdidas ambientales	Planes estratégicos nacionales de desastres naturales. Fondos nacionales para desastres naturales.

Componente	Variable	Presión	Estado	Impacto - Efecto	Respuesta
		Variables fisicoquímicas			
Sistema hídrico	Temperatura	<p>Incremento de la temperatura atmosférica por el calentamiento global.</p> <p>Incremento de la temperatura por procesos de eutrofización y descargas en los cuerpos de agua</p>	Temperatura variable, mantiene una dinámica estacional.	<p>Calentamiento de los sistemas fluvio lagunares, estrés térmico hacia las especies del ANP.</p> <p>Incremento en la velocidad de reacción de los compuestos químicos del agua.</p>	<p>Participación en programas internacionales contra el cambio climático.</p> <p>Programas de adaptación ante el cambio climático.</p> <p>Identificar fuentes puntuales de contaminación en agua, sedimento y organismos.</p>
	Salinidad	<p>Cambios hidrodinámicos de las zonas cercanas a la Laguna de Términos.</p> <p>Incremento del nivel del mar.</p>	La salinidad mantiene una dinámica estacional, incrementa durante la temporada de secas con interacción con la Laguna de Términos.	<p>Incremento del nivel del mar y salinización de los SPA y SPE.</p> <p>Cambio en la hidrodinámica de los sistemas.</p> <p>Pérdida de hábitats oligohalinos.</p> <p>Pérdida de biodiversidad de aguas poco salobres.</p> <p>Incremento de especies nocivas.</p>	<p>Tratamiento de aguas naturales.</p> <p>Reducción en el uso de fertilizantes químicos nitrogenados y fosforados.</p> <p>Restauración de las funciones de los sistemas acuáticos para mantener la fijación de CO<sub>2</sub>.</p> <p>Promover acciones de prevención de contaminantes junto con las autoridades ambientales del APFFLT</p>

Componente	Variable	Presión	Estado	Impacto - Efecto	Respuesta
Variables fisicoquímicas					
Sistema hídrico	Oxígeno Disuelto	Reducción del oxígeno disuelto por alto contenido de materia orgánica.	En algunos sitios en se mantiene nivel bajo y prevalecen las condiciones anóxicas	<p>Estrés por oxígeno de diversas especies de peces.</p> <p>Pérdida de stock pesquero.</p> <p>Disminución de la biodiversidad acuática.</p> <p>Impactos sobre las cadenas tróficas de ambos sistemas</p>	<p>Participación en programas internacionales contra el cambio climático.</p> <p>Programas de adaptación ante el cambio climático.</p> <p>Identificar fuentes puntuales de contaminación en agua, sedimento y organismos.</p> <p>Tratamiento de aguas naturales.</p>
	pH	Reducción de pH por acidificación del agua	En algunos sitios esta variable se incrementa, y en otras disminuye considerablemente.	<p>Disminución en el pH por la acidificación de los cuerpos de agua a través de las reacciones oxido-reducción del CO<sub>2</sub> y la materia orgánica.</p> <p>Pérdida funcional de la fijación de CO<sub>2</sub> en la columna de gua</p>	<p>Reducción en el uso de fertilizantes químicos nitrogenados y fosforados.</p> <p>Restauración de las funciones de los sistemas acuáticos para mantener la fijación de CO<sub>2</sub>.</p> <p>Promover acciones de prevención de contaminantes junto con las autoridades ambientales del APFFLT</p>

Componente	Variable	Presión	Estado	Impacto - Efecto	Respuesta
Variables de Nutrientes					
Sistema hídrico	Amonio	Incremento de las concentraciones por descargas de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales con altos contenidos de materia orgánica y nutrientes.	Se mantienen concentraciones bajas de este nutriente	Problemas por procesos de eutrofización.	Participación en programas internacionales contra el cambio climático.
	Nitrato		Se detectaron concentraciones que pueden ser tóxicas.		Incremento de los compuestos nitrogenados e intoxicación por los organismos acuáticos.
	Nitrato		Se detectaron concentraciones que pueden ser tóxicas.	Incremento de los compuestos nitrogenados e intoxicación por los organismos acuáticos.	Identificar fuentes puntuales de contaminación en agua, sedimento y organismos.
	Fósforo		Se registraron las mayores concentraciones en las desembocaduras de los ríos del SPE		Tratamiento de aguas naturales. Reducción en el uso de fertilizantes químicos nitrogenados y fosforados.
	CO <sub>2</sub>		Se observó que los sistemas mantienen una dinámica autótrofa o heterótrofa según la estacionalidad.		Restauración de las funciones de los sistemas acuáticos para mantener la fijación de CO <sub>2</sub> .
				Eliminación de los procesos biológicos de fijación de CO <sub>2</sub> disuelto en agua	Promover acciones de prevención de contaminantes junto con las autoridades ambientales del APFFLT

Componente	Variable	Presión	Estado	Impacto - Efecto	Respuesta
		Biósfera			
Productividad biológica	Clorofila <i>a</i> fitoplanctónica	<p>Incremento de nutrientes por descargas municipales.</p> <p>Lavado de nutrientes en zonas agrícolas</p> <p>Incremento en la temperatura global.</p>	<p>Concentraciones elevadas de clorofila <i>a</i>, en las zonas que interaccionan con la Laguna de Términos y en las desembocaduras de los ríos de los SPA y SPE</p>	<p>Incremento de la clorofila y afloramiento de algas nocivas que provoquen la muerte organismos acuáticos.</p> <p>Disminución en la concentración de oxígeno en el cuerpo de agua.</p>	<p>Tratamiento de aguas naturales. Reducción en el uso de fertilizantes químicos nitrogenados y fosforados.</p> <p>Restauración de las funciones de los sistemas acuáticos para mantener la fijación de CO<sub>2</sub>.</p>
Sistema forestal	Cobertura de manglar	<p>Cambio de uso de suelo.</p> <p>Utilización de recursos forestales a nivel local</p>	<p>Zonas con alto porcentaje de deforestación, principalmente en los sitios circundantes al APFFLT.</p>	<p>Pérdida de la cobertura vegetal de manglar.</p> <p>Pérdida de las funciones del manglar.</p> <p>Disminución considerable en la fijación de CO<sub>2</sub>.</p> <p>Incremento de las emisiones de CH<sub>4</sub> presente en el sedimento.</p>	<p>Restauración de ecosistemas y las funciones de manglar.</p> <p>Fortalecer las medidas de control y vigilancia sobre la pérdida de manglar y la tala ilegal.</p> <p>Educación ambiental para la protección de los manglares.</p>

Componente	Variable	Presión	Estado	Impacto - Efecto	Respuesta
Variables sociales, económicas y ambientales					
Estado Trófico	TRIX	Incremento del estado trófico de los SPA y SPE por la incorporación de nutrientes	Se registraron condiciones entre oligotróficas y mesotróficas.	Eutrofización de los sistemas fluvio lagunares.	Tratamiento de aguas residuales para disminuir la carga de nutrientes y evitar la eutrofización de los sistemas fluvio lagunares.
Desarrollo y Cambio de Uso de Suelo	IHH	Cambio de uso de suelo para el desarrollo de actividades primarias, secundarias y terciarias. Incremento de la población de la zona.	Las mayores áreas registradas de Huella Humana se encontraron en la zona norte del SPA y sur del SPE.	Pérdida de zonas naturales. Pérdida de biodiversidad. Disminución de bosques de manglar y humedales de la zona.	Implementación del plan de manejo. Proyectos sustentables sobre el uso del suelo.  Restauración de las zonas del ANP
Desarrollo Social y Humano	IDH	Desigualdad social, económica, de educación y salud.  Contaminación ambiental de los sistemas fluvio lagunares.	Las zonas con menor IDH son las más impactadas por las actividades humanas	Degradación de los sistemas ambientales, disminución en el IDH, incremento en la desigualdad social, económica y ambiental.	Distribución eficiente del gasto público para la implementación de proyectos que minimicen la brecha de desigualdad en educación, salud, ingresos y expectativas de vida.  Desarrollo de nuevas políticas públicas que se encuentren relacionados con la agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sustentable.

A partir de las respuestas del análisis PEIR se realizaron e integraron las propuestas que eran viables para el manejo, protección, restauración y conservación de los recursos naturales que se encuentran en el APFFLT y en los SPA y SPE.

La transferencia de conocimiento se realizó a partir de los resultados obtenidos del análisis biogeoquímico de las dos cabeceras estuarinas Pom-Atasta y Palizada-Del Este. Esta transferencia fue realizada en la Unidad de Vinculación y Educación del Sureste, de la Universidad Nacional Autónoma de México el 8 de abril de 2019.

Se expuso la transferencia a tomadores de decisiones, investigadores, y miembros de asociaciones de la sociedad civil. Participó el director del Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, el jefe de la estación El Carmen, del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, miembros de la Secretaría de Marina, Investigadores de la Universidad Autónoma del Carmen, del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, de diversas asociaciones civiles como Red Manglar México A.C. y personas interesadas en el conocimiento del comportamiento de la Laguna de Términos (Fig. 54).



Figura 54. Transferencia de conocimiento, con los diferentes tomadores de decisiones; Director del APFFLT, Director de la estación Biológica de la UNAM, Representantes de la Secretaria de Marina, Integrantes de la sociedad civil, etc.

Durante la transferencia se realizó una exposición de los resultados que se obtuvieron de los análisis de laboratorio, bibliográficos e imágenes satelitales. Posteriormente se realizó un debate e intercambio de ideas sobre las conclusiones y propuestas que se desarrollaron, a partir de las diversas problemáticas que se presentaron.

Los participantes mantuvieron una discusión en torno a las diversas características tróficas que se presentan en el sitio, a la distribución de los sedimentos que

descarga el río Palizada, así como, a las nuevas problemáticas que enfrentan los sistemas fluvio-lagunares, en particular al Sistema Pom-Atasta, ya que se mencionaron registros de la introducción de aguas salobres provenientes del Golfo de México. Otra problemática que se discutió fue sobre los diferentes accidentes petroleros que se han presentado en la región.

La Idónea Comunicación de Resultados se entrega al director del Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, y al jefe de la estación El Carmen, del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Además, se entrega este informe sobre la transferencia de conocimiento con la intención de que sean considerados como herramientas de apoyo las diversas acciones de vigilancia e investigación que se realizan en el área natural protegida.

## **CONCLUSIONES**

La transferencia de conocimiento hacia los tomadores de decisiones del APFFLT fue fundamental, generó la discusión en torno a las diversas problemáticas que se presentan en la Laguna de Términos y los SPA y SPE, manifestando su interés hacia los resultados obtenidos en la presente investigación.

Se integró información y propusieron medidas pertinentes que permitan mantener, restaurar y conservar las condiciones óptimas en los SPA y SPE.

## **REFERENCIAS**

- Arias P. J. E. y Aristizábal B. C. A. 2011. Transferencia de conocimiento orientada a la innovación social en la relación ciencia-tecnología y sociedad. *Pensamiento y gestión*. (31), 137-166.
- Ayala-Pérez L. A., Terán-González G. J., Flores-Hernández D., Ramos-Miranda J., y Sosa-López A. 2012. Variabilidad espacial y temporal de la abundancia y diversidad de la comunidad de peces en la costa de Campeche, México. *Latin american journal of aquatic research*, 40(1), 63-78.
- Castillo A., Corral-Verdugo V., González-Gaudio E., Paré L., Paz M. F., Reyes, J., y Schteingart, M. 2009. Conservación y sociedad. 761-801pp. En: *Capital natural de México*. 2, 821p
- Chirino Miranda E., Abad Chaves J., y Bellot Abad J. F. 2008. Uso de indicadores de Presión-Estado-Respuesta en el diagnóstico de la comarca de la Marina Baixa, SE, España. *Ecosistemas*. 17(1), 107-114.

- Feria V. 2009. Propuesta de un modelo de transferencia de conocimiento científico-tecnológico para México. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia España. 23-32.
- Plasencia S. J. A., Marrero D. F. M., Bajo S. A. M. B., y Nicado G. M. N. 2018. Modelos para evaluar la sostenibilidad de las organizaciones. Estudios Gerenciales. 63-73.
- Ramos-Miranda J., Flores-Hernández D., Ayala-Pérez L. A., Rendón-von Osten J., Villalobos-Zapata G. y Sosa-López A. 2006. Atlas hidrológico e ictiológico de la Laguna de Términos. Centro de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX)-Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, Campeche. 75p.
- Rodríguez Cardozo. L. 2015: Metodologías de evaluación de la sustentabilidad en Áreas Naturales Protegidas. Estado del arte y propuesta metodológica para México. *Studia Politicae*. 34, 91-116.
- Schütz G., Hacon S., Silva H., Moreno-Sánchez A. R. y Nagatani K. 2008. Principales marcos conceptuales aplicados para la evaluación de la salud ambiental mediante indicadores en América Latina y el Caribe. *Revista Panamericana de Salud Pública*. 24, 276-285.
- Sotelo J. A., Tolón A., y Lastra X. 2011. Indicadores por y para el desarrollo sostenible, un estudio de caso. *Estudios Geográficos*. 72(271), 611-654.
- Vázquez-Valencia R. A., y García-Almada R. M. 2018. Indicadores PER y FPEIR para el análisis de la sustentabilidad en el municipio de Cihuatlán, Jalisco, México. *Nóesis. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*. 27(53-1), 1-26.

# ANEXOS



## COMISIÓN NACIONAL DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA LAGUNA DE TÉRMINOS

"2019, año del Caudillo del sur, Emiliano Zapata"

Oficio No. APFFLT/096/19

Ciudad del Carmen, Campeche, a 08 de abril de 2019.

COMISIÓN ACADÉMICA DE LA  
MAESTRÍA EN ECOLOGÍA APLICADA  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA XOCH  
PRESENTE:

Sirva la presente para hacer constancia del ejercicio de transferencia de tecnología que desarrolló el Biól. Ezel Jacome Galindo Pérez al ofrecer la plática titulada: BIOGEOQUÍMICA DE LOS SISTEMAS POM-ATASTA Y PALIZADA-DEL ESTE DEL ANP LAGUNA DE TÉRMINOS: LÍNEA BASE PARA SU CONSERVACIÓN en la Unidad de Vinculación y Educación del Sureste – UNAM, Playa Norte, Ciudad del Carmen, Campeche, el lunes 8 de abril de 2019.

Los resultados de su trabajo de investigación constituyen una aportación al conocimiento del área natural protegida y apoyan las acciones de conservación.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

M. EN C. JOSÉ HERNÁNDEZ NAVA  
DIRECTOR DEL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y  
FAUNA LAGUNA DE TÉRMINOS

C.c.p. Archivo

JHN/masm



Av. Adolfo Lopez Mateos #1965, Esq. Héroes del  
21 de Abril, Prolongación Playa Norte, C.P.  
24140,  
Ciudad del Carmen, Campeche.  
Tel. (938) 3826270 y 3828813 Ext. 19301 y 19302  
jhernandez@conanp.gob.mx  
www.gob.mx/conanp



2019  
CENTENARIO DE LA REVOLUCIÓN  
EMILIANO ZAPATA



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

## INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA ESTACIÓN EL CARMEN

CARRETERA CARMEN-PUERTO REAL KM. 9.5, CD. DEL CARMEN, CAM., MÉXICO  
TELS. (01-938) 383.18.45-383.18.49, FAX 383.18.47  
CORREO-E: jefecc@cmarl.unam.mx

### COMISIÓN ACADÉMICA DE LA MAESTRÍA EN ECOLOGÍA APLICADA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA XOCHIMILCO

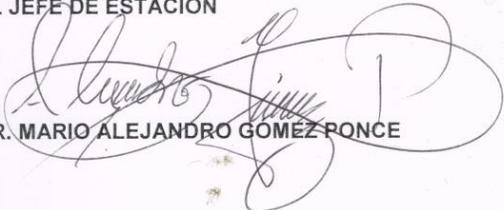
Sirva la presente para hacer constancia del ejercicio de transferencia de tecnología que desarrolló el Biól. Ezel Jacome Galindo Pérez al ofrecer la plática titulada: BIOGEOQUÍMICA DE LOS SISTEMAS POM-ATASTA Y PALIZADA-DEL ESTE DEL ANP LAGUNA DE TÉRMINOS: LÍNEA BASE PARA SU CONSERVACIÓN en la Unidad de Vinculación y Educación del Sureste Mtro. Justo Sierra Méndez ICML – UNAM, Playa Norte, Ciudad del Carmen, Campeche, el lunes 8 de abril de 2019.

Los resultados de su trabajo de investigación constituyen una aportación al conocimiento del área natural protegida y apoyan las acciones de conservación.

Sin más por el momento, agradezco la atención y quedo de ustedes.

Atentamente,  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Ciudad del Carmen, Camp. 8 de abril de 2019

EL JEFE DE ESTACIÓN



DR. MARIO ALEJANDRO GÓMEZ PONCE

UNAM  
La Universidad  
de la Nación



Casa abierta al tiempo

**UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA**  
UNIDAD IZTAPALAPA  
DEPARTAMENTO DE HIDROBIOLOGIA

7 de diciembre de 2018

**Coordinación Académica**  
**Maestría en Ecología Aplicada**  
**UAM-Xochimilco**  
Presente

Por este medio me permito informar a ustedes, que el alumno **Ezel Jacome Galindo Pérez** del posgrado en Ecología Aplicada con número de cuenta **2172800601**, realizará una estancia de investigación en el Laboratorio de geología y limnología, de la UAM-Iztapalapa, durante el trimestre 19-I (enero-abril de 2019), realizando el trabajo de investigación: **"Caracterización de sedimentos recientes en los sistemas fluviolagunares Pom-Atasta y Palizada-Del Este de la Laguna de Términos, Campeche, México"**, bajo mi dirección.

El trabajo consistirá en el procesamiento de muestras sedimentarias que permita obtener su caracterización granulométrica y composición de sedimentos terrígenos y carbonatados.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarles saludos cordiales.

Atentamente

Dr. Antonio Zoilo Márquez García  
Laboratorio de Geología y Limnología  
UAM-Iztapalapa

San Rafael Atlixco 186, Vicentina, Iztapalapa, 09340 Ciudad de México, D.F.01 55 5804 4600  
ext.3054. correo azoilo@yahoo.com