



**Centro de Investigación en Alimentación y
Desarrollo, A.C.**

**EVALUACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL ESTADO TRÓFICO
EN BAHÍA SANTA MARÍA-LA REFORMA**

Por:

IBT. Paulina Monserrat Reyes Velarde

TESIS APROBADA POR LA

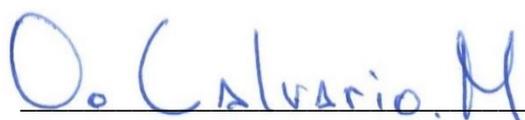
COORDINACIÓN REGIONAL EN ACUICULTURA Y MANEJO AMBIENTAL

Como requisito parcial para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS

APROBACIÓN

Los miembros del comité designado para la revisión de la tesis de Paulina Monserrat Reyes Velarde, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestra en Ciencias.



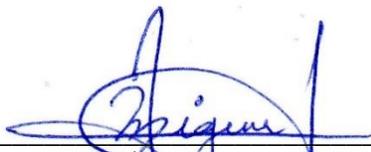
Dr. Omar Calvario Martínez
Director de tesis



Dra. Rosalba Alonso Rodríguez
Co-directora de tesis



Dr. Miguel Betancourt Lozano
Integrante del comité de tesis



MC. Miguel Ángel Sánchez Rodríguez
Integrante del comité de tesis

DECLARACIÓN INSTITUCIONAL

La información generada en la tesis “Evaluación Espacio-Temporal del Estado Tráfico en Bahía Santa María-La Reforma” es propiedad intelectual del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD). Se permiten y agradecen las citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial de la autora Paulina Monserrat Reyes Velarde, siempre y cuando se dé crédito correspondiente. Para la reproducción parcial o total de la tesis con fines académicos, se deberá contar con la autorización escrita de quien ocupe la titularidad de la Dirección General del CIAD.

La publicación en comunicaciones científicas o de divulgación popular de los datos contenidos en esta tesis, deberá dar los créditos al CIAD, previa autorización escrita del director(a) de tesis.



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
ALIMENTACIÓN Y DESARROLLO, A.C.**
Coordinación de Programas Académicos

Dr. Pablo Wong González
Director General

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado durante el posgrado.

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. (CIAD, A.C.) por mi formación académica.

Este trabajo fue apoyado con recursos propios de Laboratorio de Química y Productividad Acuática del CIAD Unidad Mazatlán, Agradezco las facilidades otorgadas.

Al Dr. Omar Calvario Martínez, por la dirección de la tesis, apoyarme y guiarme durante el posgrado, brindarme su tiempo y ayuda en la realización de los muestreos, pero sobre todo por ser un gran amigo.

A la Dra. Rosalba Alonso Rodríguez, el Dr. Miguel Betancourt Lozano y el M. en C. Miguel Ángel Sánchez Rodríguez, integrantes del comité de tesis, por su apoyo, guía y aportaciones brindadas para la realización de este trabajo.

A la Biol. Virginia Patricia Domínguez Jiménez, técnico titular del laboratorio, por su tiempo y ayuda en la realización de los muestreos y análisis de laboratorio.

Al Dr. Julio Medina Galván por su apoyo y enseñanzas brindadas en la realización de los análisis NMDS.

Al personal del CIAD, maestros y encargados del posgrado por su apoyo y guía.

A mi familia por apoyarme, escucharme y comprenderme durante el posgrado y por confiar en mí siempre.

DEDICATORIA

A mis Padres, Anabel Velarde Osuna y Felix Reyes Bonilla, por apoyarme y confiar en mí siempre, por estar conmigo en este proceso de mi formación académica y profesional y educarme con la idea de que soy capaz de lograr todo lo que me proponga, gracias por siempre inspirarme a ir por más, a ser una buena persona y siempre estar para mí en las buenas y en las malas.

A mi hermana, Ana Cristina Reyes Velarde, por su ayuda y comprensión durante este proceso, por siempre mostrar interés en los temas que investigo, estar orgullosa de las actividades que realizo y sobre todo por ser mi compañera y amiga.

A mi pareja, Jesús Raymundo Guzmán Rodríguez, por ser un gran compañero de vida, por estar para mí siempre incluso en los momentos difíciles y estresantes de este proceso, por escucharme y comprenderme, gracias por siempre mostrar interés y sorprenderte con los temas y pláticas que te comparto acerca del posgrado, por estar orgulloso de mí y recordarme que puedo con esto y más.

CONTENIDO

APROBACIÓN	2
DECLARACIÓN INSTITUCIONAL	3
AGRADECIMIENTOS	4
DEDICATORIA	5
CONTENIDO	6
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE CUADROS	11
RESUMEN	12
ABSTRACT	14
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 Área de Estudio.....	17
1.2 Importancia Económica en el Estado	21
2. ANTECEDENTES	22
3. HIPÓTESIS	26
4. OBJETIVOS	27
4.1. Objetivo General	27
4.2. Objetivos Específicos	27
5. MATERIALES Y MÉTODOS	28
5.1 Muestreo	28
5.2 Parámetros de Campo.....	30
5.3 Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID): Amonio, Nitritos y Nitratos	30
5.4 Fósforo.....	30
5.5 Clorofila <i>a</i>	31
5.6 Materia Orgánica.....	31
5.7 Índice Trófico TRIX.....	31
5.8 Análisis Estadístico	33
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES	34
6.1 Época de Lluvias, Septiembre 2020.....	34
6.1.1 Parámetros de Campo	34
6.1.2 Materia Orgánica	37
6.1.3 Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) y Fósforo.....	37
6.1.4 Índice Trófico TRIX	39
6.1.5 Regresión Múltiple	40
6.2 Época de Transición Lluvias – Secas, Noviembre 2020.....	41
6.2.1 Parámetros de Campo	41
6.2.2 Materia Orgánica	44

CONTENIDO (continuación)

6.2.3 Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) y Fósforo.....	44
6.2.4 Índice Trófico TRIX.....	46
6.2.5 Regresión Múltiple.....	47
6.3 Época de Secas, Febrero 2021.....	48
6.3.1 Parámetros de Campo.....	48
6.3.2 Materia Orgánica.....	51
6.3.3 Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) y Fósforo.....	51
6.3.4 Índice Trófico TRIX.....	53
6.3.5 Regresión Múltiple.....	54
6.4 Época de Transición Secas – Lluvias, Mayo 2021.....	55
6.4.1 Parámetros de Campo.....	55
6.4.2 Materia Orgánica.....	58
6.4.3 Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) y Fósforo.....	58
6.4.4 Índice Trófico TRIX.....	60
6.4.5 Regresión Múltiple.....	61
6.5 Distribución Estacional del Índice Trófico TRIX.....	68
6.6 Análisis de Modelo de Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS) Anual.....	70
6.6.1 Análisis NMDS de los Parámetros Físico-Químicos.....	70
6.6.2 Análisis NMDS del Índice Trófico TRIX.....	73
6.7 Regresión Múltiple Anual.....	75
7. CONCLUSIONES.....	84
8. RECOMENDACIONES.....	86
9. BIBLIOGRAFIA.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Localización geográfica del área de estudio Bahía Santa María-La Reforma (Línea café: municipios colindantes, línea verde: cuenca del río Mocorito, línea azul: ríos que desembocan a la bahía).....	18
2 Variación del rango (área rosa) y temperatura promedio (línea roja), conjuntamente con el valor de precipitación (líneas azules) para Bahía Santa María-La Reforma. Cada punto, para cada día representa el valor promedio de los valores registrados durante el período 1962 - 2019.....	19
3 Estaciones seleccionadas para el muestreo en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (•), estaciones dentro del sistema lagunar (•) y drenes que descargan en la bahía (•).....	29
4 Resultados de la medición de parámetros de campo de la época de lluvias (septiembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (•), estaciones dentro del sistema lagunar (•) y drenes que descargan en la bahía (•). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).....	36
5 Resultados de la concentración de materia orgánica de la época de lluvias (septiembre 2020) en bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (•), estaciones dentro del sistema lagunar (•) y drenes que descargan en la bahía (•).....	38
6 Resultados de la concentración de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) y fósforo de la época de lluvias (septiembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma. Estaciones ubicadas en las bocas (1-3) estaciones dentro del sistema (4 - 47) y estaciones situadas en los drenes que descargan a la bahía (48 - 60). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).....	38
7 Resultados del índice trófico TRIX en época de lluvias (septiembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma.....	39
8 Resultados de la medición de parámetros de campo de la época de transición lluvias-secas (noviembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (•), estaciones dentro del sistema lagunar (•) y drenes que descargan en la bahía (•). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).....	43
9 Resultados de la concentración de materia orgánica de la época de transición lluvias-secas (noviembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (•), estaciones dentro del sistema lagunar (•) y drenes que descargan en la bahía (•).....	44

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Página		Figura
10	Resultados de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) y fósforo de la época de transición lluvias-secas (noviembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma. Estaciones ubicadas en las bocas (1-3) estaciones dentro del sistema (4 - 47) y estaciones situadas en los drenes que descargan a la bahía (48 - 60). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).....	45
11	Resultados del índice trófico TRIX en época de transición lluvias-secas (noviembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma.....	46
12	Resultados de la medición de parámetros de campo de la época de secas (febrero 2021) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (•), estaciones dentro del sistema lagunar (•) y drenes que descargan en la bahía (•). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).....	50
13	Resultados de la concentración de materia orgánica de la época de secas (febrero 2021) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (•), estaciones dentro del sistema lagunar (•) y drenes que descargan en la bahía (•).	51
14	Resultados de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) y fósforo de la época de secas (febrero 2021) en Bahía Santa María-La Reforma. Estaciones ubicadas en las bocas (1-3) estaciones dentro del sistema (4 - 47) y estaciones situadas en los drenes que descargan a la bahía (48 - 60). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).....	53
15	Resultados del índice trófico TRIX en época de secas (febrero 2021) en Bahía Santa María-La Reforma.....	54
16	Resultados de la medición de parámetros de campo de la época de transición secas-lluvias (mayo 2021) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (•), estaciones dentro del sistema lagunar (•) y drenes que descargan en la bahía (•). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).....	57
17	Resultados de concentración de la materia orgánica de la época de transición secas-lluvias (mayo 2021) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (•), estaciones dentro del sistema lagunar (•) y drenes que descargan en la bahía (•).....	58
18	Resultados de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) y fósforo de la época de transición secas-lluvias (mayo 2021) en Bahía Santa María-La Reforma. Estaciones ubicadas en las bocas (1-3) estaciones dentro del sistema (4 - 47) y estaciones situadas en los drenes que descargan a la bahía (48 - 60). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).....	60

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Página		Figura
19	Resultados del índice trófico TRIX en época de transición secas-lluvias (mayo 2021) en Bahía Santa María-La Reforma.....	61
20	Resultados de la distribución estacional del índice trófico TRIX para cada época climática en Bahía Santa María-La Reforma (mediana línea negra, media línea blanca, caja 25%-75%, bigotes 10%-90%, círculos valores atípicos).....	70
21	Resultados del análisis NMDS anual de los parámetros físico-químicos en Bahía Santa María-La Reforma.....	72
22	Resultados del análisis NMDS anual del índice trófico TRIX en Bahía Santa María-La Reforma.....	74
23	Factores responsables de la evaluación espacio-temporal del estado trófico en Bahía Santa María-La Reforma.....	79

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Nivel de estado trófico y características del agua correspondientes al índice trófico TRIX.....	32
2	Resultados de la regresión múltiple para la época de lluvias (septiembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma.....	40
3	Resultados de la regresión múltiple para la época de transición lluvias-secas (noviembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma.....	47
4	Resultados de la regresión múltiple para la época de secas (febrero 2021) en Bahía Santa María-La Reforma.....	55
5	Resultados de la regresión múltiple para la época de transición secas-lluvias (mayo 2021) en Bahía Santa María-La Reforma.....	62
6	Resultados de la regresión múltiple anual para Bahía Santa María-La Reforma.....	76

RESUMEN

Actualmente las zonas costeras se encuentran sujetas a problemas de contaminación provenientes de efluentes de la industria, tratamiento inadecuado de aguas residuales y otros residuos arrojados a dicha zona, conjuntamente con escurrimientos superficiales los cuales contribuyen al deterioro de la calidad del agua y eventualmente a procesos de eutrofización. Si bien, la eutrofización es un proceso que se da de forma natural en los cuerpos de agua, esta también puede presentarse debido a la contaminación por factores antropogénicos. El propósito de esta investigación fue determinar la variación espacio-temporal del estado trófico del sistema lagunar Bahía Santa María-La Reforma durante cuatro épocas climáticas, así como observar la importancia de las variables bióticas y abióticas del sistema y su interacción. Se establecieron cuatro muestreos de agua representativos de las épocas climáticas que se presentan en la bahía durante un ciclo anual (lluvias, transición lluvias-secas, secas y transición secas-lluvias), dentro del sistema lagunar se definieron 44 estaciones de muestreo, 3 estaciones en las bocas del sistema y 13 estaciones correspondientes a los drenes que desembocan en el sistema lagunar. En cada una de las estaciones se realizó la medición de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto conjuntamente con la determinación analítica de la concentración de N-NO₂, N-NO₃, N-NH₄, P-PO₄, clorofila *a* y materia orgánica. Para la determinación del estado trófico en cada una de las estaciones se calculó el índice trófico TRIX. Los resultados obtenidos para la evaluación del estado trófico muestran diferencias en los parámetros físico-químicos para las diferentes épocas climáticas, los cuales varían y son respuesta de las diferentes condiciones tanto espaciales como estacionales. A lo largo del año, el estado trófico se modifica paulatinamente mostrando condiciones hipertróficas en época de secas, mesotróficas en lluvias y condiciones intermedias durante las épocas de transición. De acuerdo con los análisis realizados se observa que el índice trófico TRIX muestra un mayor agrupamiento en los estados de mesotrófico a eutrófico. Como resultado de la información colectada y de los análisis realizados en este trabajo se considera a la agricultura, acuicultura, descargas urbanas, tiempo de residencia, temperatura, precipitación y la descarga del estero El Tule como los factores que contribuyen a definir la condición trófica del área de estudio, este último factor se destaca debido a que presenta condiciones tróficas muy marcadas. Adicionalmente se concluye que los factores bióticos y abióticos que mayor contribuyen y predicen la variación del estado trófico en el sistema

lagunar son el NID, P-PO₄, clorofila *a* y salinidad.

Palabras claves: Índice TRIX, zona costera, actividades antropogénicas.

ABSTRACT

Currently, coastal areas are subject to pollution problems from industrial effluents, inadequate treatment of wastewater and other wastes thrown into these areas, together with surface runoff which contribute to the deterioration of water quality and eventually to eutrophication processes. Although eutrophication is a process that occurs naturally in water bodies, it can also be influenced by contamination by anthropogenic factors. The purpose of this research was to identify the spatial-temporal variation of the trophic state of the Bahía Santa María-La Reforma lagoon system during four climatic periods, as well as to observe the importance of the biotic and abiotic variables of the system and their interaction. Four water sampling dates were established which are representative of the climatic periods that occur in the bay during an annual cycle (rainy, rainy-dry transition, dry and dry-rainy transition); within the lagoon system 44 sampling stations were defined, 3 stations at the entrance of the system and 13 stations corresponding to the drains that discharge into the lagoon system. In each of the stations, temperature, salinity and dissolved oxygen measurements were carried out together with the analytical determination of the concentration of N-NO₂, N-NO₃, N-NH₄, P-PO₄, chlorophyll *a* and organic matter. For the determination of the trophic state in each of the stations, the trophic index TRIX was calculated. The results obtained for the evaluation of the trophic state show differences in the physico-chemical parameters for the different climatic periods, which vary and are a response to the different spatial and seasonal conditions. Throughout the year, the trophic state gradually changes with hypertrophic conditions exhibited in the dry season, mesotrophic in the rainy season and intermediate conditions during the transition periods. It is observed that the trophic index TRIX shows a greater grouping in the mesotrophic to eutrophic states. As a result of the information collected and the analyses carried out in this work, agriculture, aquaculture, urban discharges, residence time, temperature, precipitation, and El Tule discard are considered as the factors that contribute to define the trophic condition of the study area, the latter factor stands out because it presents very marked trophic conditions. Additionally, it is concluded that the biotic and abiotic factors that contribute the most and predict the variation of the trophic state in the lagoon system are NID, P-PO₄, chlorophyll *a*, and salinity.

Keywords: TRIX index, coastal zone, anthropogenic activities.

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras son ecosistemas de gran importancia ecológica y económica ya que conjugan la interacción entre el ecosistema marino, terrestre y la atmósfera, por lo que cuentan con gran productividad biológica y recursos valiosos para los seres vivos que habitan en él y para el humano, la adaptabilidad de la zona costera le permite amortiguar la energía del oleaje, del viento y de las corrientes; por ello, uno de los principales beneficios que brinda a la sociedad es su riqueza ecológica, la protección de sus habitantes, de sus posesiones y de sus medios de vida (Silva *et al.*, 2017).

En los ecosistemas acuáticos, el crecimiento del plancton, microalgas y macroalgas es de gran importancia ya que constituye la base de la cadena alimenticia que se transfiere a los consumidores primarios, secundarios y terciarios. El proceso mediante el cual se genera la base de la cadena alimenticia es conocido como fotosíntesis, los productores primarios requieren de la disponibilidad de bióxido de carbono y nutrientes inorgánicos tales como el nitrato, amonio y fosfatos que son obtenidos del agua utilizando la energía solar, que es captada y convertida en energía biológica almacenada en forma de compuestos orgánicos de gran potencial energético, estos a su vez, serán consumidos por los subsecuentes miembros en la cadena alimenticia y también por el mismo fitoplancton y algas, que, al romper estos compuestos a otros más simples, obtienen la energía necesaria para el proceso de la respiración. El crecimiento y la distribución del fitoplancton están controlados por varios factores, tanto físicos (luz, temperatura, corrientes), como biológicos (índices de crecimiento, interacciones entre especies) y químicos (disponibilidad de nutrientes o de sustancias promotoras del crecimiento). Para un buen desarrollo de los organismos autótrofos es necesario un abastecimiento suficiente de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes (silicio, hierro, etc.) (Pereira *et al.*, 2008).

Sin embargo, cuando se presenta un enriquecimiento excesivo de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, se presenta un proceso de deterioro de la calidad del recurso agua conocido como eutrofización, que puede ejercer impactos ecológicos, sanitarios y económicos a escala regional (Ledesma *et al.*, 2013). La palabra eutrófico significa rico en nutrientes (griego eu “bien” y trophein “nutrido”). Un sistema eutrófico presenta un desequilibrio en la multiplicación de biomasa vegetal, que al descomponerse provoca daños como la disminución del oxígeno disuelto,

necesario para la vida acuática (Barreto *et al.*, 2013). Si bien, la eutrofización es un fenómeno que puede manifestarse de manera natural en los cuerpos de agua, ésta también puede presentarse debido a la contaminación e interacción de factores antropogénicos, la eutrofización de forma natural se da de manera lenta y escalonada, sin embargo, la eutrofización inducida o cultural conlleva cambios rápidos en el estado trófico del sistema. La causa de la eutrofización es siempre una aportación de elementos nutritivos de diversa procedencia, de estos nutrientes, los más efectivos son aquellos para los que existe una limitación natural, principalmente, el nitrógeno y el fósforo. El primer elemento puede ser extraído de la atmósfera por organismos fijadores del nitrógeno (bacterias y otros organismos procariontes), seguido del fósforo, el cual es otro de los principales elementos limitantes del proceso eutrófico (Moreta, 2008).

La gestión y manejo de los recursos hídricos requiere de información sobre calidad y disponibilidad de los mismos. Para lograrlo Barreto *et al.*, (2013) proponen realizar monitoreos sistemáticos, que resulten en series temporales de datos los cuales permitan evaluar el estado de la calidad del cuerpo acuático y conocer las tendencias de su variación.

Los índices de calidad de agua son herramientas usadas para establecer clasificaciones tróficas y brindan información conveniente que sirve para implementar criterios de manejo en los cuerpos de agua. Los índices proporcionan información sinóptica sobre el estado trófico de los ecosistemas, lo cual permite generar criterios ecológicos para definir acciones de gestión y conservación de estos ambientes (Muciño *et al.*, 2017). De acuerdo con Contreras-Espinoza *et al.* (1994) cuantificar los nutrientes de los cuerpos de agua se vuelve esencial para la evaluación de la dinámica trófica, permite clasificar a los cuerpos de agua desde la categoría de oligotróficos hasta hipertróficos donde la concentración de nutrientes es muy alta.

El TRIX, es un índice del estado trófico propuesto por Vollenweider *et al.*, (1998), conjuga factores relacionados con la productividad primaria y con los nutrientes, sirviendo así de herramienta para clasificar el estado trófico de un cuerpo de agua, analizando la condición ambiental y la estimación del grado de deterioro de los sistemas acuáticos.

Nebel y Wright (1999), clasifican cuatro estados tróficos para determinar las características de un sistema:

Oligotrófico: bajo nivel de productividad biológica. Agua clara, algunas plantas acuáticas, pocos peces, escasa flora y fauna y fondo arenoso.

Mesotrófico: moderado nivel de productividad, claridad de agua y plantas acuáticas.

Eutrófico: alto nivel de productividad, claridad de agua y buena cantidad de plantas acuáticas o poca claridad del agua y pocas plantas acuáticas. Potencial para soportar la gran cantidad de peces y vida silvestre.

Hipertrófico: muy altos niveles de productividad biológica, muy pobre claridad de agua y abundancia de plantas acuáticas conjuntamente con potencial para soportar la gran cantidad de peces y vida silvestre presente.

1.1 Área de Estudio

El sistema lagunar Bahía Santa María-La Reforma (BSMR) se localiza al noroeste de México dentro de la denominada biorregión del Golfo de California, en la zona costera centro noroeste del Estado de Sinaloa, en los Municipios de Angostura ocupando un área de 21,951 ha, Guasave con 7,373 ha, Mocorito 2,877 ha y en Navolato ocupando su mayor extensión con 35,438 ha (CONANP, 2013) (Fig. 1). Es un sistema lagunar del tipo III-A (III-C), de acuerdo a Lankford, (1977), es una depresión de planicie costera; es decir, una laguna costera de plataforma de barrera interna con boca permanente y con orientación semiparalela a la costa. Bahía Santa María-La Reforma es uno de los 32 humedales prioritarios en México (Acosta-Velázquez y Vázquez-Lule, 2009), definido por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

De acuerdo a los resultados obtenidos por Martínez-López *et al.* (2013) en BSMR existe una gran cantidad de recursos naturales de importancia económica en las extensas zonas de manglar, en el bosque tropical caducifolio, así como en los manchones de bosque espinoso y vegetación halófila, además de dunas y pantanos, lo que representa un gran capital natural para la región y el estado por la gran disponibilidad de recursos, bienes y servicios, tanto de uso directo como indirecto, de las cuales se benefician las poblaciones humanas en el área, a nivel regional y nacional.

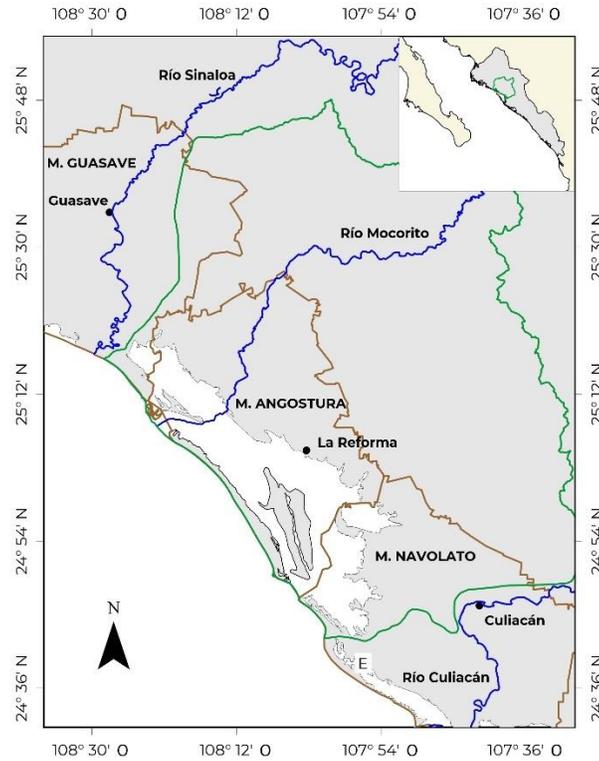


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio Bahía Santa María-La Reforma (Línea café: municipios colindantes, línea verde: cuenca del río Mocorito, línea azul: ríos que desembocan a la bahía).

La distribución histórica de la temperatura ambiental y de la precipitación anual para BSMR se representa en la figura 2. Dicha información fue obtenida a partir de los registros generados por la estación climatológica 25030 El Playón perteneciente a la Red de Estaciones Climatológicas de CONAGUA. En esta figura puede observarse las temperaturas más bajas durante los primeros tres meses del año, incrementándose paulatinamente desde abril hasta junio hasta alcanzar un máximo en julio y mantenerse aproximadamente constante a esa temperatura hasta finales de septiembre. A partir de octubre, la temperatura disminuye hasta alcanzar las temperaturas más bajas hacia finales del año (Fig. 2). Por otra parte, la precipitación es baja de enero a febrero y escasa desde marzo a mediados de junio. Las precipitaciones más altas se manifiestan durante el periodo julio-octubre y disminuyen hacia finales del año.

Dichos factores climatológicos se encuentran asociados a el tiempo de residencia del agua, el cual se modifica conforme al ciclo anual de precipitación y temperatura. Se define tiempo de residencia al tiempo promedio en que los compuestos terrestres permanecen dentro de un sistema acuático

(Molina-Pacheco, 2018). Esta variable rige el comportamiento de la laguna como trampa o sumidero de contaminantes, así como exportador de materia orgánica, enriqueciendo las zonas marinas adyacentes (Herrera-Silveira, 2006). De acuerdo con Martínez-López *et al.* (2013), en BSMR la proporción de mezcla respecto al volumen de la laguna determina un tiempo de recambio de 53.4 días para lluvias y 22.5 días en secas, durante el cual toda el agua de la laguna es reemplazada. Sin embargo, el promedio del tiempo de residencia anual en BSMR es de 18.4 días (Romero *et al.*, 2014), lo cual indica que los tiempos de residencia suelen variar tanto espacial como temporalmente (González-Hernández y López-Monroy, 2020).

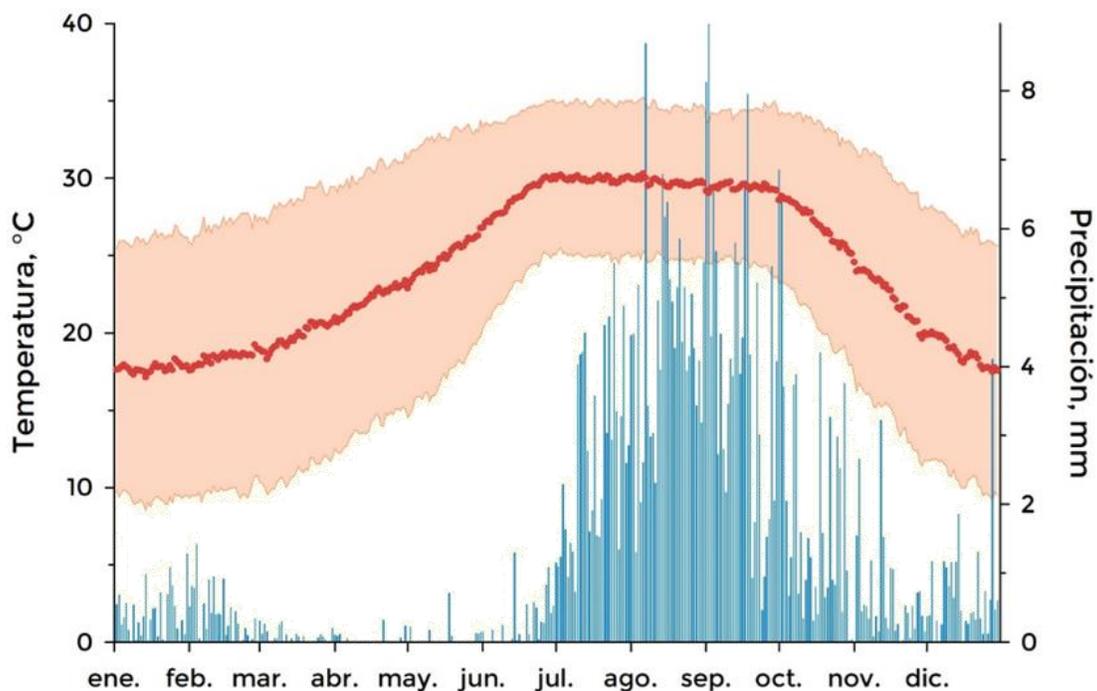


Figura 2. Variación del rango (área rosa) y temperatura promedio (línea roja), conjuntamente con el valor de precipitación (líneas azules) para Bahía Santa María-La Reforma. Cada punto, para cada día representa el valor promedio de los valores registrados durante el período 1962 - 2019.

Presenta una estacionalidad en cuanto a la presencia de vientos húmedos del sureste en verano, mientras que los vientos fuertes del noreste se manifiestan en invierno (Merrifield *et al.*, 1989; Marinone *et al.*, 2004). Esta zona presenta un historial de huracanes y tormentas tropicales: la tormenta tropical Paul, el 26 de junio de 1978, con una velocidad de vientos de aprox. 35 km/h, el

huracán Paine categoría 1, el 2 de octubre de 1986, con velocidad de vientos aprox. 80 km/h y la tormenta tropical Rachel el 2 de octubre de 1990, con velocidad de vientos aprox. 50 km/h (CENAPRED, 2008).

Bahía Santa María-La Reforma está catalogada como Área Natural Protegida, que da albergue aproximadamente a 250 especies de aves, proporciona sitios de descanso y anidación de aves en peligro de extinción como el gallito marino y de 29 especies de aves amenazadas de extinción como el pato bobo de patas azules (CI 2003). El sistema presenta 16 especies de aves de interés para la conservación, de las cuales siete están bajo estatus de protección especial de acuerdo a la NOM-059 SEMARNAT 2010: *Mycteria americana*, *Accipiter striatus*, *Accipiter cooperii*, *Buteogallus anthracinus*, *Parabuteo unicinctus*, *Buteo swainsoni*, *Botaurus lentiginosus*, la última además se encuentra amenazada; nueve presentan algún endemismo para México: *Callipepla duoglasii*, *Corvus sinaloae*, *Pheugopedius felix*, *Polioptila nigriceps*, *Cynanthus latirostris*, *Amazilia violiceps*, *Passerina amoena*, *Icterus cucullatus*, *Peucaea carpalis*, de las cuales las cuatro primeras son endémicas, las siguientes cuatro semi-endémicas y la última cuasi-endémica; además que *Callipepla duoglasii* y *Corvus sinaloae* presentan distribución restringida para Sinaloa (Gurrola-López *et al.*, 2016). Las cuatro especies de manglar (*Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus*) se encuentran bajo la categoría de amenazadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010.

Se distribuye en alrededor de 91 km del litoral del golfo de California, en la biorregión del Golfo de California (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2012), sus límites se encuentran definidos al noroeste por el Río Sinaloa, al noreste por la curva de nivel de 20 m de altura según las cartas topográficas G12D28, G12D29, G12D39, G12D49, G13C41, G13C51 y G13C52 (INEGI, 2015a; 2015b; 2015c; 2015d; 2015e; 2015f; 2015g) y al sureste y suroeste por la cuenca del río Mocorito (RH10) obtenida de la Red Hidrográfica edición 2.0, generada por el INEGI (2010). Ésta se encuentra casi completamente distribuida entre los municipios de Angostura, Guasave y Navolato.

Geográficamente, BSMR se ubica entre los 24° 25' y 25° 30' de latitud norte y entre los 107° 35' y 108° 25' de longitud oeste, se conecta con el Golfo de California por medio de dos bocas, una al norte y otra al sur del sistema lagunar. BSMR es un humedal costero, con una extensión de 53,000 hectáreas. Se encuentra separada del Golfo de California por una barra arenosa de 42 km que prolonga la línea de playa formando la Isla Altamura. La boca norte, Punta del Perihuate tiene una

abertura de 5.3 km, donde se localizan la isla del Rancho e isla Saliaca y al sur se localiza la boca Punta Yameto de 3.4 km de amplitud. En el centro de la bahía se localiza la isla Talchichiltle (Gurrola-López *et al.*, 2016).

1.2 Importancia Económica en el Estado

Bahía Santa María-La Reforma es el sistema lagunar costero más grande del estado y uno de los más importantes por la gran diversidad de flora y fauna silvestre, la subcuenca asociada a este sistema tiene un área total de 21,711 ha de manglar. Entre las principales actividades económicas que se destacan en BSMR se encuentran la agricultura de riego y agricultura temporal, cubriendo 193,481 y 184,547 ha respectivamente (Páez-Osuna *et al.*, 2007), entre los principales cultivos agrícolas que se practican en la región sobresalen el maíz, trigo, garbanzo, sorgo y frijol, siendo el maíz el cultivo más popular en la región (Pronatura Noroeste A. C., 2022).

En su alrededor se hayan instaladas 7,724 ha de estanquerías dedicadas al cultivo de camarón, principalmente en los extremos norte y sur de la laguna (Páez-Osuna *et al.*, 2007). Normalmente se realizan dos ciclos de cultivo semi-intensivos al año con densidad de siembra de 8 a 15 organismos por metro. El primer ciclo de producción tiene una duración entre 95 a 100 días y se realiza de febrero a mayo, mientras que el segundo ciclo tiene una duración entre 120 a 140 días, da inicio a finales de junio y termina a mediados de noviembre.

Así mismo, BSMR presenta diversas especies de importancia pesquera como son camarón y jaiba, almeja, lisa, botete, robalo, pargo y mojarra (Carta Nacional Pesquera, 2000; Romero *et al.*, 2014).

2. ANTECEDENTES

Una de las problemáticas presentes de las zonas costeras en años recientes es la contaminación debido a los efluentes de la industria, tratamiento inadecuado de las aguas residuales y otros desechos arrojados a dicha zona, conjuntamente con escurrimientos superficiales. Estos efluentes pueden aportar altas concentraciones de nutrientes, materia orgánica, plaguicidas, metales pesados entre otros (Martínez *et al.*, 2017). Los impactos ecológicos, sanitarios y económicos a escala regional, condicionan el uso de los ecosistemas (Giuliano-Girão *et al.*, 2007). El enriquecimiento de nutrientes principalmente nitrógeno y fósforo, genera eutrofización, definido como un proceso de deterioro de la calidad del ecosistema, el cual altera temporalmente las condiciones de equilibrio, introduciendo cambios físicos, químicos y biológicos al ecosistema acuático (Margalef *et al.*, 1976).

De acuerdo con Escobedo-Urías (2010), la eutrofización provoca cambios en la estructura de las comunidades, por al menos dos mecanismos (Cloern, 2001): indirectamente, a través de la disminución de oxígeno disuelto y directamente, por medio del aumento de las concentraciones de los nutrientes. La disminución de oxígeno (hipoxia y anoxia) pueden cambiar la estructura de las comunidades eliminando a los organismos más sensibles o menos móviles, reduciendo hábitat, y cambiando las interacciones entre depredadores y presas. Por otro lado, la adición excesiva de nutrientes afecta a las comunidades al alterarse no solo las concentraciones sino la proporción de los nutrientes, lo que modifica directamente la estructura y dinámica de los productores primarios entre ellos, el fitoplancton.

Entre los signos de eutrofización incipiente podemos mencionar como ejemplos (Vollenweider, 1970):

- Aumento de la biomasa o los macrófitos y algas *perifiton* en zonas costeras, o regiones de algas pelágicas planctónicas. En general, este aumento se acompaña con el empobrecimiento de muchas especies típicas de aguas oligotróficas y, al mismo tiempo o más tarde, la aparición de organismos indicadores en las comunidades vegetales.
- Cambio cualitativo y cuantitativo en la fauna costera, bentónicas y planctónicas, así como en las poblaciones de peces. En este último caso, cuando la eutrofización es avanzada, los cambios son más pronunciados, es decir, se observa una disminución en el número de peces.

Por otra parte, la presencia de altas concentraciones de amonio y nitratos en los cuerpos de agua receptores, pueden generar problemas ambientales. De acuerdo al manual de diseño de procesos: Control de nitrógeno, (USEPA, 1975) estos problemas son:

- Toxicidad a animales acuáticos: el amoníaco es tóxico para los organismos como peces.
- Agotamiento del oxígeno disuelto: afecta adversamente a la vida acuática. El amonio aumenta la demanda de oxígeno del cuerpo de agua receptor, necesario para la degradación de materia orgánica.
- Eutrofización de aguas superficiales: la descarga de nitrógeno y fósforo a los cuerpos de agua receptores puede estimular el crecimiento masivo de algas y plantas por asimilación autotrófica. El principal efecto del exceso de fosfato sobre los cuerpos de agua receptores es la eutrofización. El uso más extendido se refiere específicamente a los síntomas que desarrolla un ecosistema en respuesta a la fertilización con nutrientes inorgánicos, además produce de manera general un aumento de la biomasa y un empobrecimiento de la diversidad biológica del ecosistema acuático (Hutchinson, 1973).

De acuerdo con García y Miranda (2018), entre las causas antropogénicas que aceleran el proceso de la eutrofización se encuentran:

- Uso de fertilizantes agrícolas: el uso continuo de fertilizantes y estiércol animal es el principal responsable de la eutrofización. Estos llegan a los cuerpos de agua principalmente por la escorrentía que se produce cuando el agua de lluvia o las prácticas de riego los arrastran hacia zonas bajas, hasta llegar a los cuerpos de agua.
- Descarga de residuos industriales y municipales: este problema se presenta principalmente por la demanda de recursos materiales de la sociedad, ya que al existir una mayor demanda de recursos las actividades industriales aumentan y dentro de estas el uso del recurso agua es primordial para llevar a cabo la elaboración de estos materiales, al hacer usos del recurso debe existir una descarga de este a los cuerpos de agua con lo cual el proceso de eutrofización se acelera.
- Quema de combustibles fósiles. El nitrógeno liberado a la atmósfera puede volver al agua y al suelo a través de las precipitaciones.

Referente a los trabajos realizados sobre eutrofización en México, uno de los primeros estudios fue el de Arenas-Fuentes (1970) el cual estudió la relación entre nutrientes y su efecto en la productividad primaria en el área de Escuinapa-Yavaros, además del trabajo realizado por Edwards (1978) en el Complejo Lagunar de Huizache-Caimanero, dando entrada a la investigación de este

tema en el país, entre los que destaca el de Contreras-Espinosa *et al.* (1994) quienes realizaron un análisis del estado trófico utilizando datos recopilados de concentración de clorofila *a* en 33 lagunas costeras en el Golfo de México y los estados de Chiapas y Oaxaca. La eutrofización puede ser generada por aportes de origen antropogénico, tal como nos señala Ruiz-Ruiz (2017) en su estudio realizado con el objetivo de detectar síntomas de eutrofización y comparar la sensibilidad de índices ambientales en lagunas costeras semiáridas subtropicales del estado de Sonora, México, en cual concluye que la evidencia de síntomas de eutrofización asociados a fuentes antropogénicas de nutrientes, hace necesario realizar acciones enfocadas a mejorar las prácticas agrícolas y acuícolas, además de implementar tratamientos para las aguas residuales para poder preservar los servicios que los ecosistemas costeros brindan a la sociedad. Medina-Galván (2010) utilizó el índice trófico TRIX para determinar el estado hidrológico y estado trófico del sistema lagunar El Rancho-Empalme ubicado en el Golfo de California muestreando en tres ocasiones con una frecuencia semanal en invierno (febrero), primavera (marzo), verano (junio) y otoño (noviembre), el cual tuvo valores < 3 en primavera, verano y otoño, indicando estado oligotrófico; mientras que en invierno se observaron valores de 4 que indicaron un estado mesotrófico, en donde se utilizó el análisis multivariado NMDS.

Existen diversos estudios realizados en lagunas costeras del estado de Sinaloa, uno de ellos es el de Escobedo-Urías (2010) en cual buscó identificar el proceso de eutrofización en los sistemas costeros del norte de Sinaloa, teniendo como sitios de estudio los sistemas lagunares de Topolobampo-Ohuira-Santa María y San Ignacio-Navachiste-Macapule ubicados en los dos municipios costeros del norte del estado, iniciando con la caracterización y cuantificación de las fuentes de nutrientes asociadas a las actividades antropogénicas y procesos naturales, siguiendo con el análisis de la variabilidad temporal de condiciones físicas, químicas y biológicas, con énfasis en las concentraciones de nutrientes en series de tiempo (20 y 10 años) en ambos sitios, con el objetivo de establecer los posibles cambios inducidos en el ciclo anual promedio y buscar síntomas de enriquecimiento, cuantificar el cambio en el nivel trófico a través de la utilización de un índice trófico ajustado para la zona, así como analizar la alteración de las proporciones de las diferentes especies de nutrientes, su efecto en la comunidad fitoplanctónica de cada sitio y por último, integrar toda esta información en la propuesta de un modelo del proceso de eutrofización de los ambientes costeros del norte de Sinaloa. Otro de los trabajos realizados en Sinaloa es el de Medina-Galván *et al.* (2022) en el cual concluyeron que la laguna Santa María funciona asimilando nutrientes con

predominancia de metabolismo autótrofo y fijación de nitrógeno en verano, así como exportando nutrientes con predominancia de metabolismo heterótrofo y desnitrificación en invierno. La laguna mantiene estado mesotrófico en ambas estaciones del año mostrando capacidad de asimilar, transformar y exportar las cargas de nutrientes sin manifestar procesos adversos de eutrofización. Referente al área de estudio, Páez-Osuna *et al.* (2007) realizó un estudio sobre la contaminación por nitrógeno y fósforo en las lagunas costeras de Sinaloa, donde se incluye el estudio del sistema lagunar bahía Santa María La Reforma, los flujos de nutrientes, fuentes, efectos y opciones de manejo, López-Aguiar (2006) concluyó que aplicando el criterio de Smith *et al.* (1999) para evaluar el estado trófico considerando únicamente las concentraciones de nitrógeno total, BSMR puede considerarse como hipertrófica. De acuerdo con el índice trófico TRIX, Romero *et al.* (2014) mencionan que el sistema lagunar Playa Colorada-Santa María-La Reforma presenta un valor promedio anual de 7.13, que corresponde a un estado trófico alto, con aguas altamente productivas, y con posibles cambios temporales en la biota y variaciones en la diversidad. Así como el estudio realizado por Martínez-López *et al.* (2013), en el cual se midió la capacidad de carga ecológica del Sistema Lagunar Santa María-La Reforma durante un ciclo anual con énfasis en la camaronicultura, pero tomando en cuenta los diferentes factores que inducen variabilidad en su calidad ambiental en el cual se obtuvo como resultado un valor en el índice TRIX mayor a 5, de acuerdo con los promedios anuales por época climática en el área de estudio, se obtuvo un valor de P-PO₄ de 1.3 µM para la época de lluvias y 1.4 µM para la época de secas, mientras que para el valor de NID se obtuvo 8.5 µM para lluvias y 6.2 µM para secas.

3. HIPÓTESIS

Las épocas climáticas, conjuntamente con las actividades acuícolas y agrícolas que se realizan en los alrededores del sistema lagunar Bahía Santa María-La Reforma constituyen las principales fuentes de variación del estado trófico del sistema.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Determinar la variación espacio-temporal del estado trófico del sistema lagunar Bahía Santa María-La Reforma durante las cuatro épocas climáticas presentadas en el ciclo anual.

4.2. Objetivos Específicos

- Estimar el estado trófico mediante el uso del índice TRIX en el sistema lagunar Bahía Santa María-La Reforma durante la época de secas y lluvias, así como los periodos de transición entre ellas.
- Identificar las variables bióticas y abióticas que contribuyen a la variación del estado trófico en Bahía Santa María-La Reforma durante las épocas climáticas y periodos de transición.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Muestreo

Considerando la información histórica de temperatura y precipitación anual del sistema lagunar Bahía Santa María-La Reforma (Fig. 2), se establecieron cuatro campañas de muestreo representativas de las épocas climáticas que se presentan en BSMR durante un ciclo anual (lluvias, transición lluvias-secas, secas y transición secas-lluvias), siendo seleccionados los meses de septiembre y noviembre del 2020, febrero y mayo del 2021.

A partir de lo anterior, se establecieron 60 estaciones de muestreo (Fig. 3), de las cuales 44 se localizan a lo largo del sistema lagunar con el fin de abarcar y representar al sistema en general, 3 pertenecen a estaciones en las bocas del área de estudio las cuales contribuyen a definir las condiciones de mezcla entre la zona oceánica y su interacción con el agua de BSMR. Así mismo, se seleccionaron 13 estaciones correspondientes a drenes debido a la importancia que representan en cuanto al flujo de agua y aporte de nutrientes que desembocan en el sistema lagunar provenientes de la cuenca del Río Mocorito. Las coordenadas de cada estación de muestreo fueron obtenidas por medio de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) Garmin, map76.

Con el propósito de poder comparar los resultados de este trabajo con estudios previos, la selección de las estaciones de muestreo ubicadas dentro del sistema lagunar, correspondió siempre que fue posible, con aquellas utilizadas por López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006) en estudios realizados en la misma laguna en el año 2004 y 2005. El número de estaciones seleccionadas consideró el esfuerzo humano, la disponibilidad de recursos económicos y el tiempo necesario para la colecta de muestras de agua en un sistema lagunar tan extenso. La distribución de estaciones seleccionadas cubrió de esta manera zonas representativas del sistema lagunar, así como puntos de intercambio de agua y descargas al sistema.

Las muestras de agua para las estaciones del sistema lagunar y las bocas de la laguna fueron superficiales integradas (un metro de profundidad), se colectaron mediante un tubo rígido de 2 m de longitud y se homogeneizaron en un recipiente y de éste se tomaron las alícuotas en los frascos de plástico correspondientes a cada parámetro de análisis, la toma de muestras de los drenes se

realizó de manera directa en un recipiente de plástico con capacidad de 4 litros y de éste se tomaron las alícuotas. Previo al muestreo, los frascos se lavaron según las especificaciones de cada uno de los parámetros a analizar de acuerdo al documento LQyPA-PM-001.

Antes de la colecta, los frascos fueron ambientados mediante tres lavados previos del recipiente con la misma agua del sitio de muestreo. Las muestras colectadas se colocaron en hielo para mantenerlas a una temperatura entre 4 y 10 °C. Finalmente, las muestras fueron transportadas al laboratorio de Química y Productividad Acuática (LQyPA) del CIAD-Unidad Mazatlán para su posterior procesamiento en un tiempo que no superó las 24 horas entre su colecta y análisis químico.

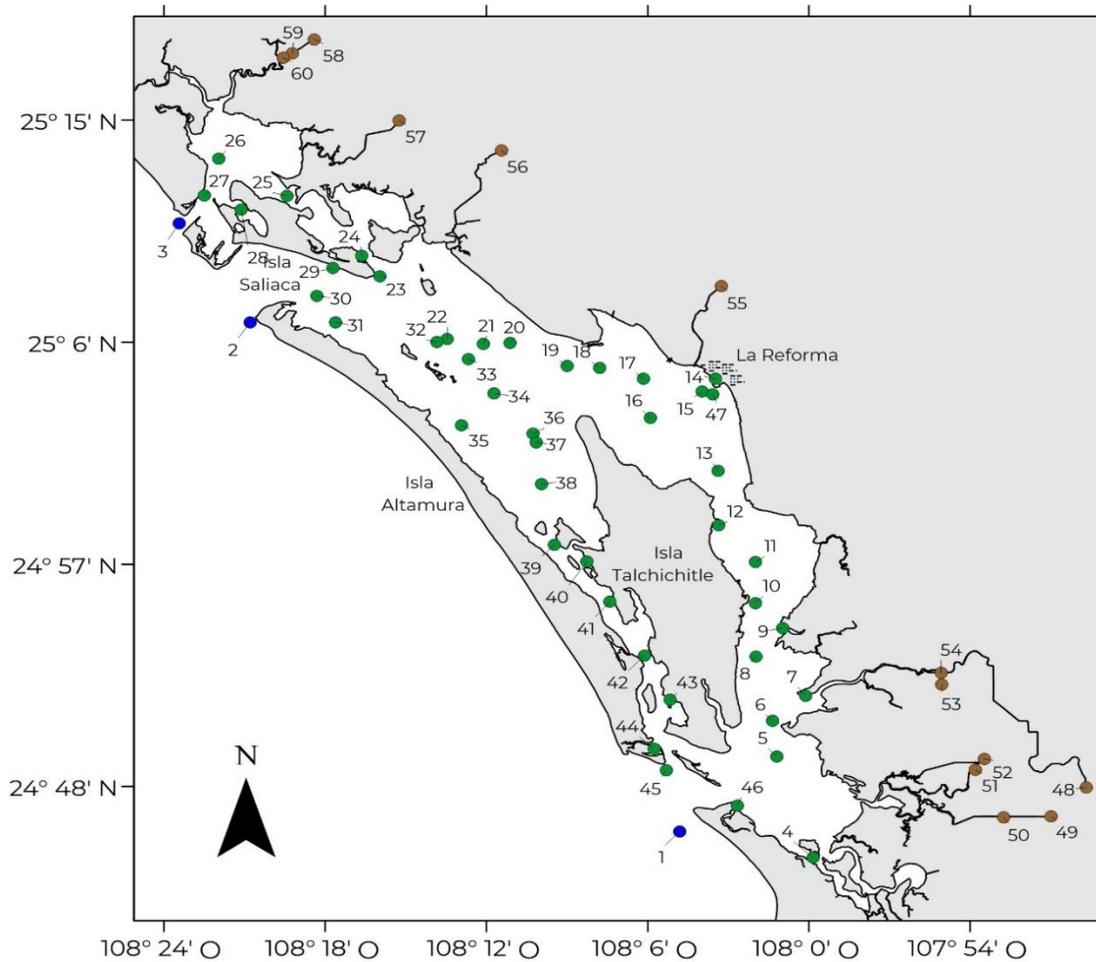


Figura 3. Estaciones seleccionadas para el muestreo en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (●), estaciones dentro del sistema lagunar (●) y drenes que descargan en la bahía (●).

5.2 Parámetros de Campo

Se realizó la determinación de oxígeno disuelto, temperatura y salinidad, utilizando el medidor multiparamétrico Profesional Plus Quatro YSI modelo 6050000. La sonda se sumergió en el recipiente en el cual se colectó la muestra y se tomaron las lecturas *in situ*. Para la determinación de la transparencia se utilizó un disco de Secchi convencional en el momento del muestreo siguiendo la metodología de Boyd y Tucker (1992).

5.3 Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID): Amonio, Nitritos y Nitratos

Para la determinación del NID fue necesario determinar las concentraciones de nitrógeno en forma de amonio, nitritos y nitratos utilizando métodos espectrofotométricos siguiendo la metodología descrita por Parsons *et al.* (1984). La absorbancia de las muestras se determinó por medio de un espectrofotómetro Agilent Technologies, modelo G1103A-8453. Las concentraciones de los diferentes nutrientes se calcularon utilizando las ecuaciones previamente generadas en el Laboratorio de Química y Productividad Acuática (LQyPA) del CIAD en función de la pendiente y la ordenada al origen de la curva de calibración, los resultados obtenidos fueron tabulados y preparados para el análisis e interpretación de los mismos, posterior a la interpretación, se llevó a cabo la sumatoria de amonio, nitritos y nitratos para conocer la concentración de nitrógeno inorgánico disuelto NID.

5.4 Fósforo

La determinación de fósforo en forma de ortofosfato se realizó por métodos espectrofotométricos de acuerdo a Parsons *et al.* (1984). La absorción de las muestras fue determinada por medio del espectrofotómetro Agilent Technologies, modelo G1103A-8453. Las concentraciones de fósforo en forma de ortofosfatos fueron calculadas utilizando las ecuaciones previamente generadas en el

Laboratorio de Química y Productividad Acuática (LQyPA) del CIAD en función de la pendiente y la ordenada al origen de la curva de calibración, los resultados obtenidos se tabularon para su análisis estadístico e interpretación.

5.5 Clorofila *a*

Se llevó a cabo mediante la filtración de las muestras de agua colectadas utilizando filtros GF/F, el volumen filtrado varió dependiendo de la carga particulada de las muestras. Los filtros se cubrieron de la luz con papel aluminio y se conservaron en bolsas con cierre hermético en refrigeración a temperatura entre 4 a 10 °C, se transportaron al laboratorio de Química y Productividad Acuática (LQyPA) del CIAD-Unidad Mazatlán para su posterior procesamiento. Se llevó a cabo la determinación mediante la metodología descrita por Parsons *et al.* (1984), la absorción de las muestras fue determinada por medio de un espectrofotómetro Agilent Technologies, modelo G1103A-8453. Las concentraciones fueron calculadas utilizando las ecuaciones descritas en el método de Parsons *et al.* (1984).

5.6 Materia Orgánica

La determinación de materia orgánica presente en el sistema se realizó utilizando el análisis de sólidos volátiles totales (SVT) mediante métodos gravimétricos de acuerdo a la NMX-AA-034-SCFI-2001.

5.7 Índice Trófico TRIX

Una vez obtenidos los valores y concentraciones de los parámetros anteriores, se llevó a cabo el cálculo del índice trófico TRIX de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$TRIX = (\log_{10}(Clor\ a * aD\%O * NID * P - PO_4) + 1.5)/1.2 \quad (Ec. 1)$$

Dónde:

TRIX, índice de estado trófico

Clor *a*, concentración de clorofila *a* expresado en $\mu\text{g L}^{-1}$

a%OD, valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, [100 - %OD]

NID, concentración de nitrógeno inorgánico disuelto ($\text{N-NO}_2^- + \text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$), expresado en μM

P- PO_4 , concentración de fósforo en forma de ortofosfatos, expresado en μM

Las constantes 1.5 y 1.2 se refieren respectivamente a los valores mínimos de variables que componen el índice y a los niveles de jerarquía en que está diseñado.

Posterior a este cálculo se clasificó a cada estación de muestreo con un nivel de estado trófico y características del agua (Cuadro 1) de acuerdo al resultado obtenido en la escala del índice TRIX (Vollenweider *et al.*, 1998; Penna *et al.*, 2004; Salas *et al.*, 2008; Barraza-Guardado *et al.*, 2014; Nebel y Wright, 1999).

Cuadro 1. Nivel de estado trófico y características del agua correspondientes al índice trófico TRIX.

Índice TRIX	Nivel de estado Trófico (NET)	Características del agua
0 – 3.9	Oligotrófico	Poco productiva, NET bajo
4.0 – 4.9	Mesotrófico	Moderadamente productiva, NET medio
5.0 – 5.9	Eutrófico	Entre moderada y altamente productiva, NET alto
6.0 – 10	Hipertrófico	Altamente productiva, NET muy alto

5.8 Análisis Estadístico

Se llevó a cabo una representación de la distribución estacional de los valores obtenidos del TRIX en cada época climática mediante un diagrama de cajas y bigotes en Sigma Plot versión 11.0, además se realizó un análisis multivariado de modelo de escalamiento multidimensional no paramétrico (NMDS) para representar y analizar la similitud entre estaciones y épocas climáticas de los parámetros físico-químicos anuales y del índice TRIX anual mediante el software PRIMER 6.

Se realizó un análisis de regresión múltiple para cada época climática así como un análisis anual en los cuales se tomó como variables independientes el NID, fósforo en forma de ortofosfatos, clorofila *a*, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto y la materia orgánica, y como variable dependiente el valor del índice TRIX con la finalidad de saber la correlación de la variables y saber que variables predicen la distribución de valores del índice trófico TRIX para cada época muestreada.

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 Época de Lluvias, Septiembre 2020

6.1.1 Parámetros de Campo

Los resultados de temperatura, salinidad, concentración de oxígeno disuelto y clorofila *a* para la época de lluvias se presentan en la figura 4. Para las estaciones correspondientes a las bocas de BSMR, el valor de la temperatura (Fig. 4a) varió entre los 31.4 y 31.9 °C, en tanto, que para las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar, los valores oscilaron entre los 30.0 y 33.8 °C, encontrándose el valor más bajo en la estación 38 ubicada en el centro del sistema. Por otro lado, la temperatura mostró un gradiente creciente de sur a norte, siendo más cálidas las que correspondieron a las estaciones más cercanas al litoral del sistema lagunar, destacando la estación 17 como la de mayor temperatura. Para las estaciones ubicadas en los drenes que desembocan a BSMR, la temperatura varió entre los 23.1 y 34.8 °C, registrándose el valor más alto en la estación 57, ubicada al norte y el valor más bajo en la estación 53 ubicada en el sur. Tomando como referencia los valores reportados por López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006) para el sistema lagunar BSMR en donde la temperatura varió entre 20.2 y 33.0 °C, la mayoría de los valores obtenidos para esta época climática estuvieron dentro del rango reportado por estos autores con excepción de nueve estaciones ubicadas en el interior del sistema lagunar cuyos valores superaron los valores reportados por ambos autores.

Para la salinidad, las estaciones de las bocas de BSMR presentaron valores entre 34.1 y 35.1 ups, mientras que dentro del sistema lagunar la salinidad osciló entre los 26.3 y 39.2 ups, presentando el valor más bajo la estación 7 la cual se ubica en la zona sur del área de estudio, y la estación 12 con el valor más alto, la cual fue la única estación que estuvo fuera del rango de referencia (López-Aguiar, 2006; Del Río-Chuljak, 2006). Por otra parte, en los drenes, la salinidad varió significativamente, presentando valores entre 0.1 y 43.0 ups, con el valor más alto en la estación 58 ubicada al norte, y el valor más bajo la estación 54 ubicada en la parte central, solo la estación

59 presentó un valor de salinidad dentro del rango del sistema, las estaciones 52 y 58 estuvieron por arriba del rango de referencia y el resto por debajo del mismo (Fig. 4b) (López-Aguiar, 2006; Del Río-Chuljak, 2006).

La concentración de oxígeno disuelto (Fig. 4c) para las estaciones situadas en las bocas de BSMR varió desde los 4.34 a los 5.50 mg L⁻¹, mientras que en las estaciones ubicadas el interior del sistema lagunar, las concentraciones se presentaron entre 2.89 y 6.30 mg L⁻¹, siendo la concentración más alta la que corresponde a la estación 18 ubicada en la zona centro, y la menor concentración en la estación 39 ubicada en el centro de BSMR junto a la isla de Altamura. Las estaciones de los drenes mostraron concentraciones de oxígeno disuelto muy variables, encontrándose concentraciones que oscilaron entre 2.60 y 7.99 mg L⁻¹, en donde la estación 48 ubicada al norte de BSMR presentó las mayores concentraciones de oxígeno disuelto, y la estación 59 la cual también está ubicada al norte, mostró la menor concentración de esta variable. La mayoría de las estaciones presentaron concentraciones de oxígeno disuelto por debajo del rango de referencia (4.70 -11.50 mg L⁻¹) (López-Aguiar, 2006; Del Río-Chuljak, 2006).

La concentración de clorofila *a* para las estaciones en las bocas de BSMR se situó entre 0.42 y 0.51 µg L⁻¹, en las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar los valores oscilaron desde no detectados hasta 8.09 µg L⁻¹ con la concentración más alta en la estación 7 ubicada al sur, la cual junto con la estación 12, 15, 30 y 35 presentaron concentraciones por arriba del rango de concentraciones descrito por López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006) (0.10 -5.60 µg L⁻¹). Para los drenes se presentó una variación muy amplia de concentración (desde no detectado hasta 64.69 µg L⁻¹), la concentración más alta se presentó en la estación 56 ubicada al norte de BSMR y la concentración más baja la presentaron las estaciones del sur y la estación 57, ubicado al norte de BSMR, junto a la estación 56 (Fig. 4d).

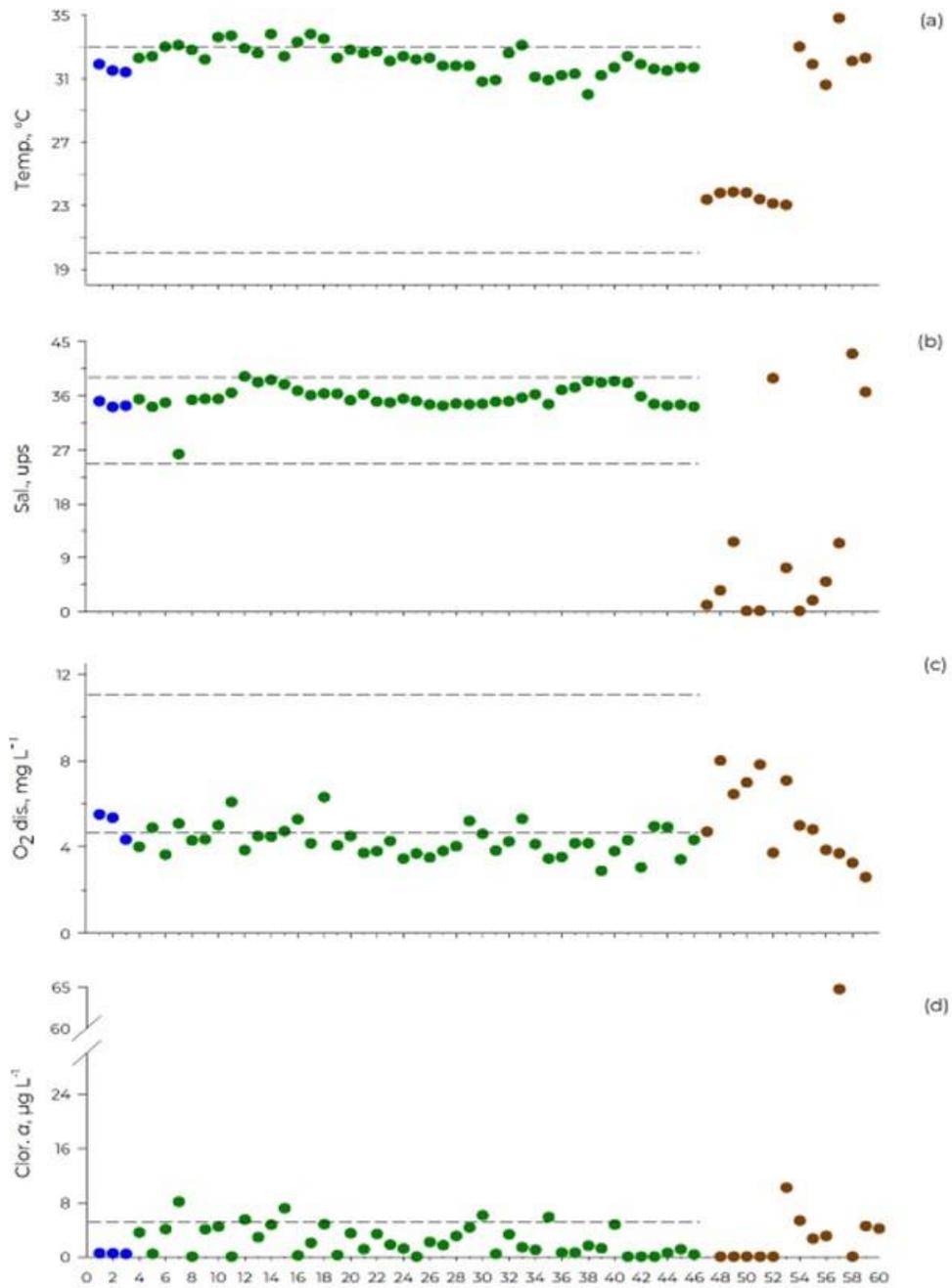


Figura 4. Resultados de la medición de parámetros de campo de la época de lluvias (septiembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (●), estaciones dentro del sistema lagunar (●) y drenes que descargan en la bahía (●). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguilar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).

6.1.2 Materia Orgánica

La distribución de la materia orgánica obtenida para este muestreo se muestra en la figura 5, en donde pueden apreciarse concentraciones entre 6,970 y 8,208 mg L⁻¹ en las bocas de BSMR, mientras que las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar presentaron un rango entre 8,469 y 49,122 mg L⁻¹ con la concentración más baja en la estación 31 y la más alta en la estación 43. Las estaciones ubicadas en los drenes mostraron concentraciones más bajas que el resto de las estaciones, las cuales estuvieron entre los 324 y 9,322 mg L⁻¹ siendo la estación 48 ubicada al sur la de concentración más baja y la estación 59 ubicada al norte la de concentración más alta.

6.1.3 Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) y Fósforo

La distribución de la concentración de NID y fósforo en forma de ortofosfatos para las estaciones muestreadas puede apreciarse en la figura 6. Esta figura muestra dos gráficas para cada nutriente, una para las estaciones ubicadas en las bocas y el sistema lagunar y otra para las estaciones ubicadas en los drenes debido a la diferencia de concentraciones. Con referencia al NID (Fig. 6a), para las estaciones de las bocas se obtuvieron concentraciones entre 1.60 y 2.30 μM, mientras que para las estaciones ubicadas en el interior del sistema lagunar, se obtuvieron concentraciones entre 1.40 y 97.20 μM siendo la estación 7 la de concentración más alta, en esta estación, 88.60 μM correspondieron a N-NH₄. Para las estaciones de los drenes, las concentraciones de NID presentaron un rango entre 26.70 y 1138.50 μM siendo la estación 57 la que presentó de mayor concentración. De acuerdo con los antecedentes de concentración de NID en el sistema lagunar BSMR de López-Aguilar (2006) y Del Río-Chuljak (2006) todas las estaciones estuvieron dentro de rango (1.90 - 87.20 μM) a excepción de la estación 7.

En lo que respecta a las concentraciones de fósforo en forma de ortofosfato para esta época climática, las estaciones ubicadas en las bocas oscilaron entre 0.60 y 1.60 μM, mientras que las estaciones en el interior del sistema lagunar registraron concentraciones entre 0.20 y 10.60 μM, presentando la concentración más alta la estación 7, mientras que las estaciones de los drenes mostraron concentraciones entre 1.40 y 30.00 μM, de acuerdo con el rango de referencia de López-

Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006) ($0.00-5.00 \mu\text{M}$) la estación 7 y 34 estuvieron por arriba del rango (Fig. 6b).

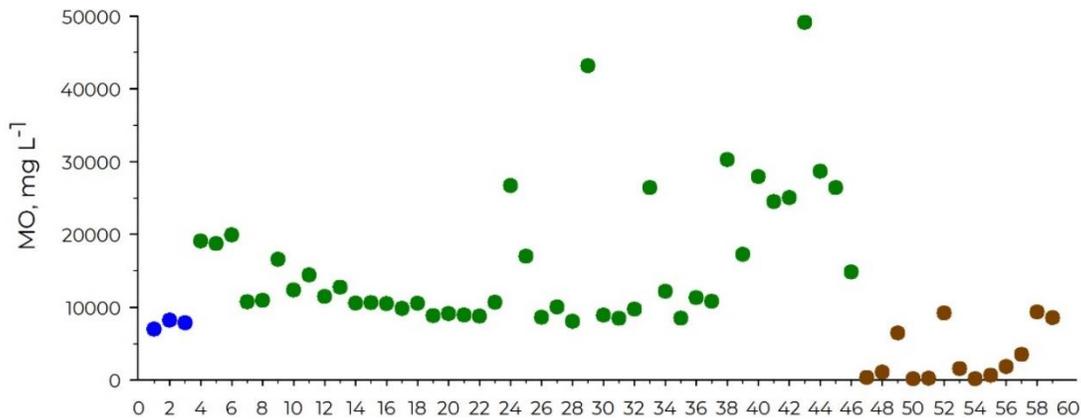


Figura 5. Resultados de la concentración de materia orgánica de la época de lluvias (septiembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (●), estaciones dentro del sistema lagunar (●) y drenes que descargan en la bahía (●).

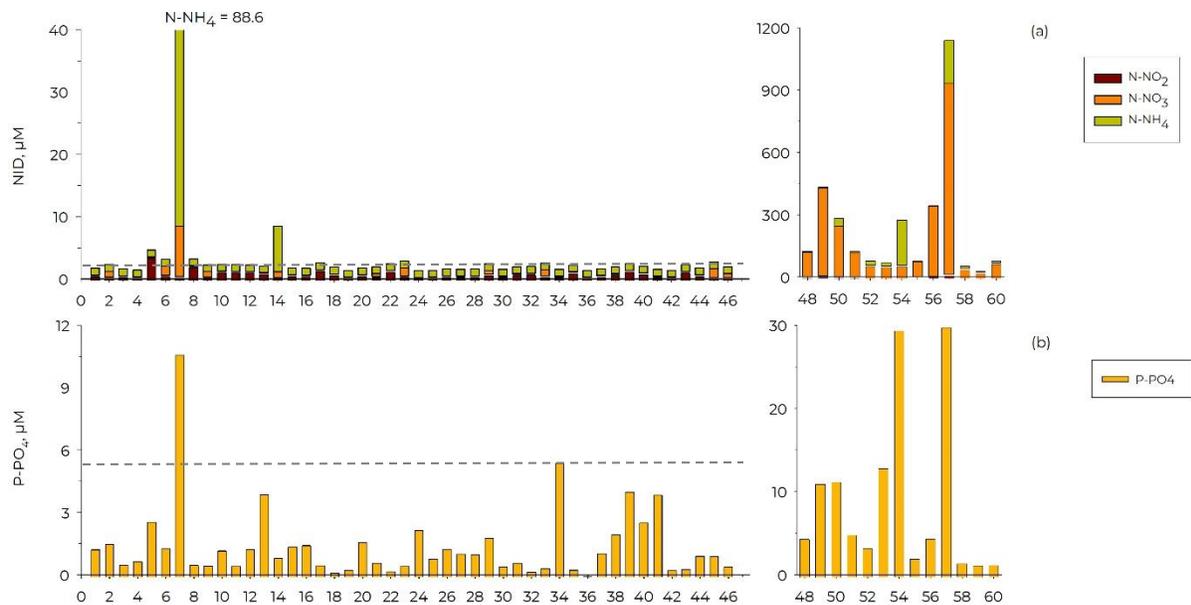


Figura 6. Resultados de la concentración de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) y fósforo de la época de lluvias (septiembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma. Estaciones ubicadas en las bocas (1-3) estaciones dentro del sistema lagunar (4-47) y estaciones situadas en los drenes que descargan a la bahía (48-60). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).

6.1.4 Índice Trófico TRIX

Para la temporada de lluvias, la distribución de valores del índice trófico TRIX para BSMR abarca desde condiciones oligotróficas a hipertróficas (Fig. 7). Sin embargo, la mayoría de los valores se encuentran dentro del rango 2–6. Dentro del sistema lagunar se identifican 12 estaciones con estado oligotrófico, de las cuales, dos estaciones se encuentran ubicadas cerca de la boca del sur, dos al norte y el resto alrededor de la isla Talchichitle, se presentaron condiciones mesotróficas en la parte norte de BSMR, mientras que a lo largo del margen izquierdo y derecho de la isla Talchichitle, se registraron estaciones con condiciones eutróficas conjuntamente con las estaciones ubicadas en la zona aledaña al poblado de La Reforma. Dentro de las estaciones ubicadas en el sistema lagunar, sobresale la estación 7 en las inmediaciones del estero de El Tule con una condición hipertrófica. Por su parte, los drenes situados en la parte sur, dentro del municipio de Navolato (estaciones 47, 48, 49, 50 y 51) mostraron condiciones oligotróficas, a diferencia de los drenes del centro y norte que mantuvieron niveles tróficos hipertróficos.

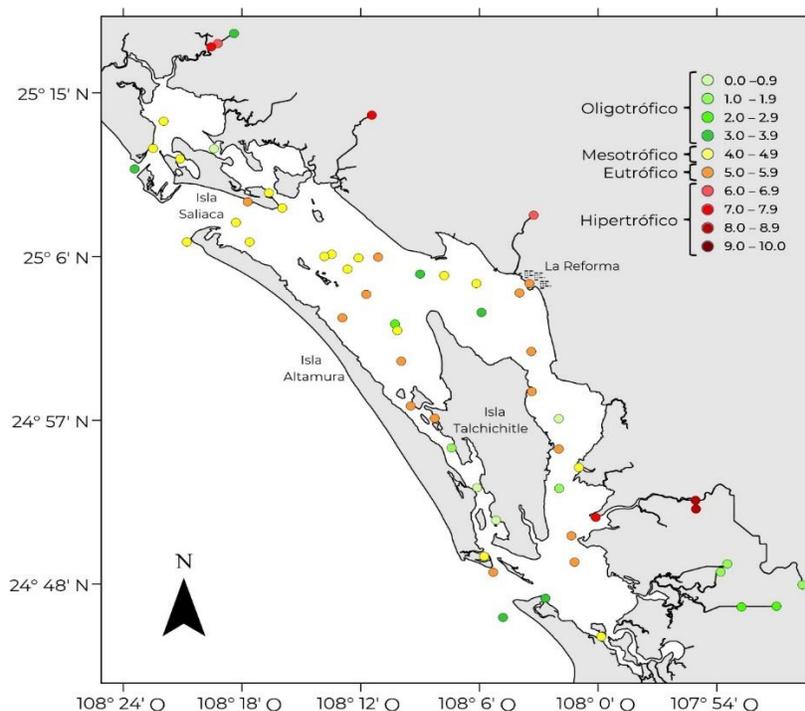


Figura 7. Resultados del índice trófico TRIX en época de lluvias (septiembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma.

6.1.5 Regresión Múltiple

De acuerdo con el análisis de regresión múltiple para la época de lluvias (Cuadro 2) se registró un factor de correlación de 0.694 entre las variables independientes (NID, fósforo en forma de ortofosfatos, clorofila *a*, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto y la materia orgánica) para predecir la variable índice trófico TRIX, además, en la variable dependiente índice trófico TRIX, el 38.5% de la varianza es explicada por el conjunto de las variables independientes, se obtuvo un *p*-valor de 0.00020 el cual al ser menor que $p < 0.05$ permite confirmar que el modelo predice el comportamiento de la variable dependiente. Las variables que predicen la distribución de los valores del índice trófico TRIX (valores en color rojo en el cuadro) para esta época climática son el NID con un *p*-valor de 0.028 y la clorofila *a* con un *p*-valor de 0.030. De acuerdo con este análisis, si las demás variables se mantienen constantes por cada punto de incremento en NID, hay 1.5 puntos de disminución en la variable índice trófico TRIX, mientras que si las demás variables se mantienen constantes por cada punto de incremento en clorofila *a* hay 1.2 puntos de incremento en la variable índice trófico TRIX.

Cuadro 2. Resultados de la regresión múltiple para la época de lluvias (septiembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma.

Resumen de regresión para variable dependiente: TRIX						
R= .69415407 R ² = .48184988 R ² Ajustado= .38544986 F(8,43)=4.9984						
p<.00020 Error típico: .14610						
N= 52	Beta	Error típico de Beta	Coefficientes	Error típico	t(43)	p-valor
Intercepción			0.43179	0.274117	1.57522	0.122535
NID	-1.15533	0.508227	-1.49472	0.657521	-2.27326	0.028064
Ortofosfatos	0.50359	0.313237	0.65187	0.405468	1.60769	0.115222
Clorofila <i>a</i>	0.91307	0.40723	1.23673	0.551585	2.24214	0.030164
Temperatura	-0.11203	0.125329	-0.10756	0.120329	-0.89386	0.376373
Salinidad	-0.33583	0.191725	-0.3069	0.175206	-1.75164	0.086967
OD	0.30523	0.279398	0.27493	0.251657	1.09247	0.280708
ABS SAT	0.45842	0.281425	0.53688	0.32959	1.62892	0.110636
MO	-0.21402	0.12376	-0.00038	0.000222	-1.7293	0.090929

6.2 Época de Transición Lluvias – Secas, Noviembre 2020

6.2.1 Parámetros de Campo

Referente a la temperatura para la época de transición lluvias-secas (Fig. 8a) se observa que la estación 1 ubicada en la boca sur mostró un valor de 20.9 °C, las estaciones 2 y 3 ubicadas en la boca norte, presentaron 19.9 °C y 22.6 °C respectivamente, mientras que las estaciones ubicadas en el sistema lagunar presentaron un rango de 21.0 °C a 25.0 °C, las estaciones con temperatura más baja se localizaron entre las islas de Altamura y Talchichiltle, siendo la estación con la temperatura más baja la 45, la temperatura más alta se registró en la estación 14 ubicada en el área de La Reforma. En lo que respecta a las estaciones de los drenes, el rango de temperatura fue de 23.5 a 26.1 °C cuyos extremos se presentaron en la estación 57 y la 48, respectivamente.

Los valores de la variable de salinidad en las estaciones de las bocas de BSMR mostraron valores entre 33.8 y 33.8 ups, mientras que los valores obtenidos por las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar tuvieron un rango de 33.0 a 38.9 ups, siendo la estación más alta la 45 y la más baja la 12. Referente a los drenes la salinidad varió significativamente entre las estaciones, obteniéndose valores entre 0 a 5.0 ups en las estaciones del sur, mientras que las estaciones ubicadas al norte de BSMR registraron salinidades más altas siendo la de mayor valor la estación 59 con 42.3 ups (Fig. 8b).

En la figura 8c se observa la distribución de la concentración de oxígeno disuelto. Para las estaciones ubicadas en las bocas se presentaron concentraciones entre 5.00 a 6.62 mg L⁻¹ con la concentración más alta en la estación 1 ubicada al sur. La concentración de oxígeno disuelto para las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar fueron muy similares a las concentraciones que mostraron las estaciones de las bocas, se obtuvo un rango entre 4.79 a 6.90 mg L⁻¹ en la estación 20 y 37, respectivamente. Para las estaciones de los drenes, el rango de concentraciones osciló entre 4.00 a 11.00 mg L⁻¹ con excepción de la estación 57, la cual presentó la concentración más baja 1.75 mg L⁻¹.

La concentración de clorofila *a* para las estaciones ubicadas en las bocas de BSMR en esta época fueron de 9.48 a 12.07 µg L⁻¹, siendo la estación 2 ubicada al norte la de menor concentración y la

estación 1 ubicada al sur la de mayor concentración. Para las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar las concentraciones de clorofila *a* oscilaron entre 4.34 a 23.43 $\mu\text{g L}^{-1}$ con la concentración más baja la estación 18 y la concentración más alta en la estación 14. Para los drenes se presentó una variación muy marcada entre las concentraciones de clorofila *a*, la concentración más alta se registró en la estación 55 con un valor de 47.41 $\mu\text{g L}^{-1}$, mientras que la concentración más baja se obtuvo la estación 49 con una concentración de 8.04 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Fig. 8d).

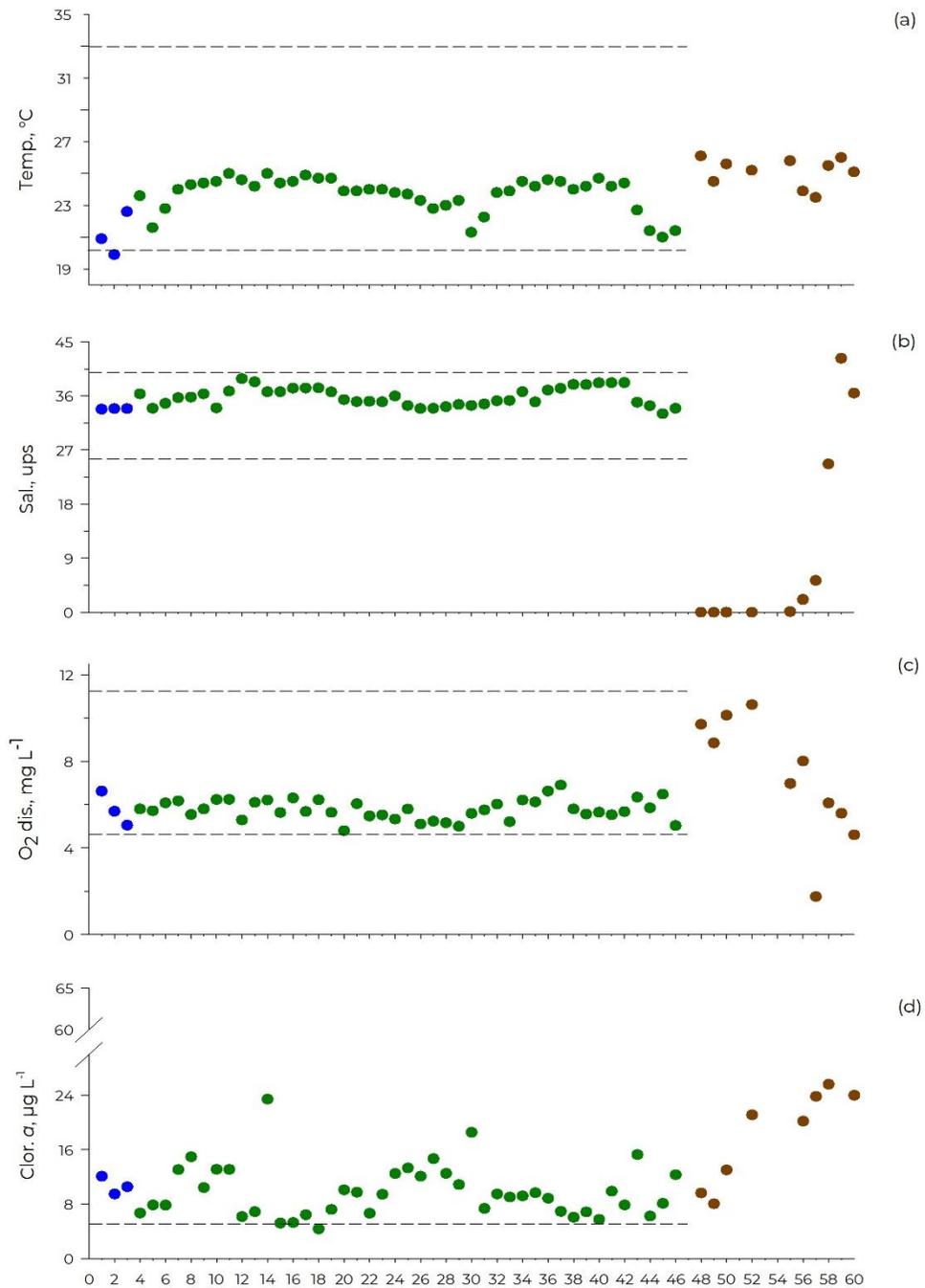


Figura 8. Resultados de la medición de parámetros de campo de la época de transición lluvias-secas (noviembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (●), estaciones dentro del sistema lagunar (●) y drenes que descargan en la bahía (●). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguilar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).

6.2.2 Materia Orgánica

En la figura 9 se observa la distribución de la materia orgánica obtenida en la época de transición lluvias-secas la cual mostró valores similares para la estación 1 y 3 ubicadas en las bocas de BSMR, el valor más bajo observado en las estaciones pertenecientes a las bocas fue la 1 con $17,996 \text{ mg L}^{-1}$ y el más alto la estación 2 con $21,114 \text{ mg L}^{-1}$. En lo que respecta a las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar, los valores muestran una amplia variación desde los $12,066$ a $45,716 \text{ mg L}^{-1}$, con el valor más bajo de MO en la estación 41 ubicada en el canal entre la isla Talchiciltle y Altamura y, el valor más alto lo obtuvo la estación 33 ubicada en el centro de BSMR. La mayoría de las estaciones ubicadas en los drenes presentaron valores de MO por debajo de $10,000 \text{ mg L}^{-1}$ a excepción de las tres estaciones ubicadas al norte del área de estudio, presentando el valor más alto la estación 59 con $15,710 \text{ mg L}^{-1}$ de MO.

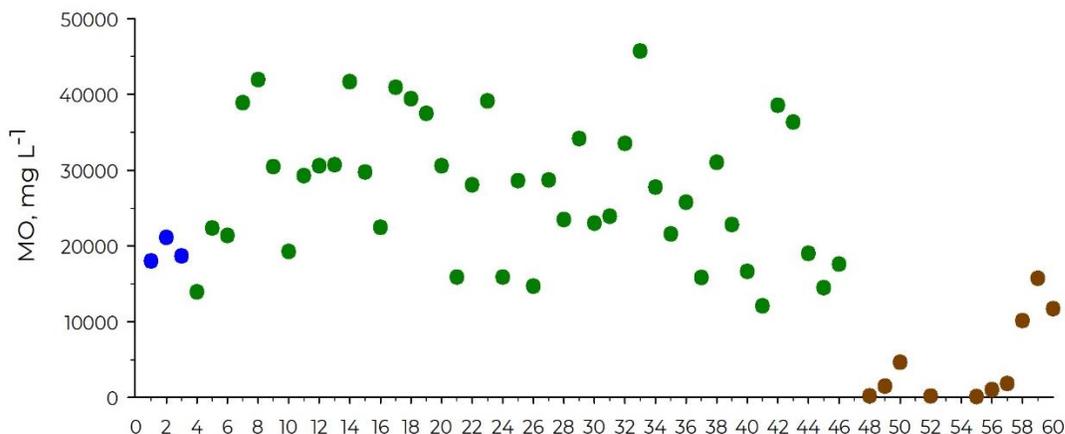


Figura 9. Resultados de la concentración de materia orgánica de la época de transición lluvias-secas (noviembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (●), estaciones dentro del sistema lagunar (●) y drenes que descargan en la bahía (●).

6.2.3 Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) y Fósforo

La concentración de NID se observa en la figura 10a, obteniéndose concentraciones para las

estaciones ubicadas en las bocas de BSMR dentro del rango 2.05 a 9.32 μM , las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar reportaron concentraciones por debajo de 10.00 μM a excepción de la estación 5 la cual presentó una concentración de 28.35 μM . De acuerdo con los antecedentes de López-Aguilar (2006) y Del Río-Chuljak (2006), 19 estaciones mostraron concentraciones por arriba del rango obtenido para su estudio.

Referente a los valores obtenidos para la concentración de fósforo en forma de ortofosfatos, las estaciones ubicadas en las bocas de BSMR reportaron valores similares, desde 2.89 a 3.24 μM , obteniendo la concentración más alta la estación número 3. En cuanto a los resultados de las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar todas las concentraciones registradas para esta época climática estuvieron por debajo de la concentración de referencia de López-Aguilar (2006) y Del Río-Chuljak (2006), la estación 39 fue la que presentó el valor más bajo con 0.03 μM y la más alta la estación 5 con 3.45 μM . Las estaciones ubicadas en los drenes mantuvieron un rango de concentraciones muy amplio desde 1.53 μM en la estación 59, a 27.45 μM en la estación 57.

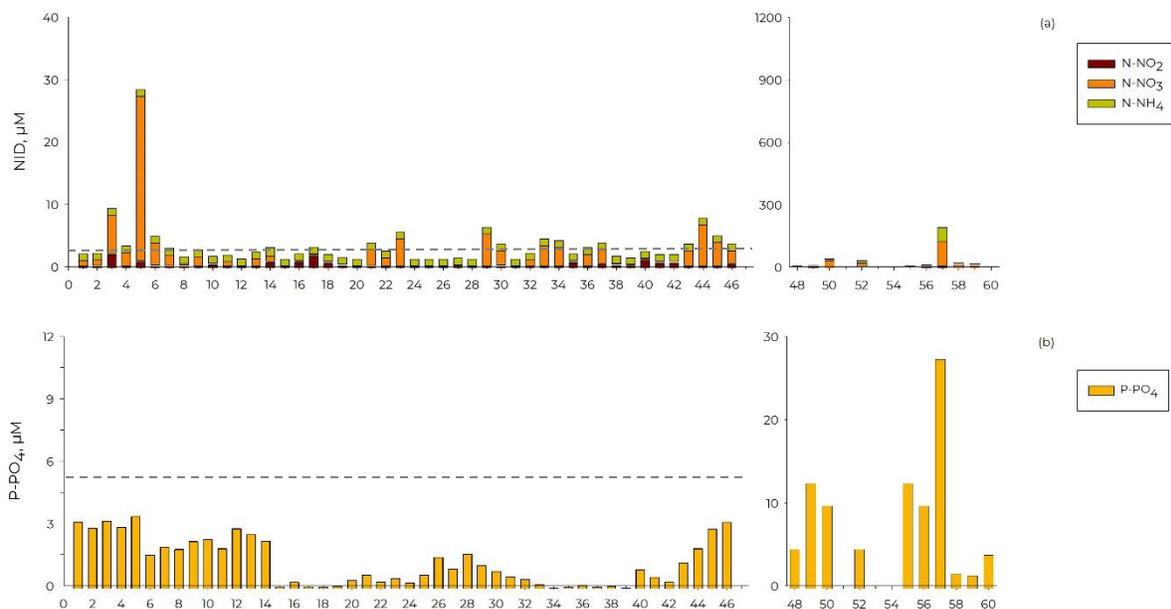


Figura 10. Resultados de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) y fósforo de la época de transición lluvias-secas (noviembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma. Estaciones ubicadas en las bocas (1-3) estaciones dentro del sistema (4-47) y estaciones situadas en los drenes que descargan a la bahía (48-60). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguilar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).

6.2.4 Índice Trófico TRIX

Para la temporada de transición lluvias-secas se puede observar en la figura 11 que al igual que en la época de lluvias, los valores del índice trófico TRIX abarcan toda la escala. Sin embargo, a diferencia de la época de lluvias, la mayoría de las estaciones presentaron un índice trófico por arriba de 2, solo 6 estaciones ubicadas hacia el norte de BSMR registraron un estado oligotrófico, por otro lado, un grupo de estaciones de la parte sur de BSMR mostraron condiciones eutróficas. Referente al área de las bocas, se observa una condición eutrófica en las estaciones 1 y 2, mientras que en la estación 3 ubicada al norte se presentó una condición hipertrófica. Por otra parte, los drenes abarcaron un estado de eutrófico a hipertrófico con el valor más alto en la estación 56 ubicada al norte de BSMR.

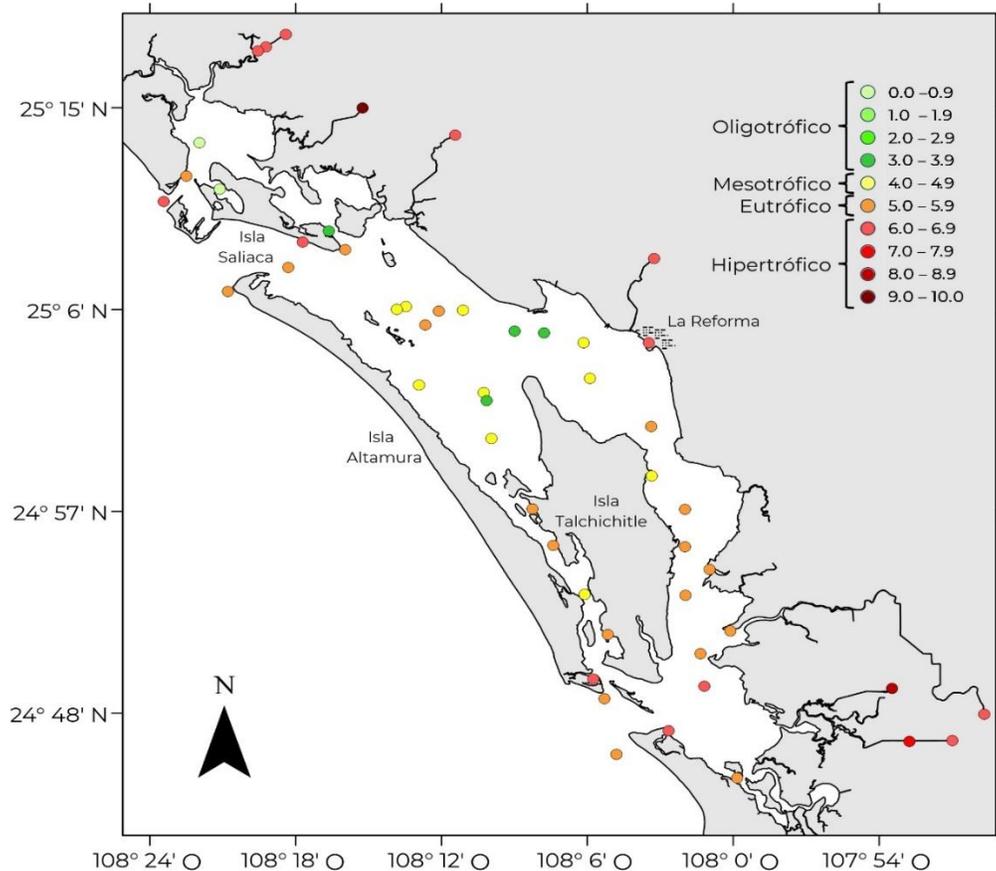


Figura 11. Resultados del índice trófico TRIX en época de transición lluvias-secas (noviembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma.

6.2.5 Regresión Múltiple

Los resultados obtenidos del análisis de regresión múltiple para la época de transición lluvias-secas (Cuadro 3), nos indica un factor de correlación de 0.627 para predecir la variable dependiente (TRIX) con respecto a las variables independientes (NID, fósforo en forma de ortofosfatos, clorofila *a*, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto y la materia orgánica), dichas variables explican el 28.9% de la varianza del índice trófico TRIX. De acuerdo con el *p*-valor del análisis (0.00163) se confirma que el modelo predice el comportamiento de la variable dependiente, las variables independientes que predicen la distribución de valores del índice trófico TRIX (valores de color rojo en el cuadro) para esta época climática son la clorofila *a* con un *p*-valor de 0.028, lo cual nos indica que si las demás variables se mantienen constantes por cada punto de incremento en clorofila *a* hay 0.42 puntos de incremento en la variable del índice trófico TRIX, y el oxígeno disuelto con un *p*-valor de 0.041, indicándonos que si las demás variables se mantienen constantes por cada punto de incremento en el oxígeno disuelto hay 1.88 puntos de incremento en la variable índice trófico TRIX.

Cuadro 3. Resultados de la regresión múltiple para la época de transición lluvias-secas (noviembre 2020) en Bahía Santa María-La Reforma.

Resumen de regresión para variable dependiente: TRIX						
R= .62694018 R ² = .39305399 R ² Ajustado= .28974403 F(8,47)= 3.8046						
p<.00163 Error típico: .19142						
N= 56	Beta	Error típico de Beta	Coefficientes	Error típico	t(47)	p-valor
Intercepción			-1.26437	0.91573	-1.38072	0.173896
NID	0.104981	0.268478	0.17471	0.4468	0.39102	0.697548
Ortofosfatos	0.755318	0.397267	1.06318	0.55919	1.90129	0.063405
Clorofila <i>a</i>	0.333996	0.147535	0.42474	0.187617	2.26384	0.02824
Temperatura	-0.075617	0.143112	-0.07951	0.150487	-0.52838	0.599723
Salinidad	0.939907	0.512833	0.76609	0.417994	1.83277	0.073175
OD	1.246801	0.592826	1.88147	0.894596	2.10315	0.040833
ABS SAT	0.579574	0.460975	0.8486	0.674951	1.25728	0.214865
MO	0.058839	0.159315	0.04717	0.12771	0.36933	0.713544

6.3 Época de Secas, Febrero 2021

6.3.1 Parámetros de Campo

En la figura 12 se observan los valores registrados para temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y clorofila *a* en la época de secas. El valor de temperatura (Fig. 12a) correspondiente a las estaciones ubicadas en las bocas de BSMR, fue de 18.5 °C para la estación 1 y 2, la estación 3 registró el valor más alto entre ellas con 19.8 °C. En relación a las estaciones correspondientes al sistema lagunar, los valores variaron entre 19.0 y 23.0 °C, a excepción de las estaciones 8 y 14, las cuales mostraron un valor de 24.0 °C, las estaciones ubicadas en los drenes presentaron valores similares a las del sistema lagunar, a excepción de las estaciones 54 y 55 las cuales reportaron un valor de temperatura por arriba de 25.0 °C.

En la gráfica correspondiente al parámetro de salinidad (Fig. 12b) se observa una distribución aproximadamente lineal entre las estaciones ubicadas en las bocas y dentro del sistema lagunar, con un rango de variabilidad entre 31.0 a 36.0 ups, a excepción de la estación 7 ubicada a la salida del estero El Tule la cual presentó un valor de 30.0 ups. las estaciones de las bocas y el sistema lagunar, se encuentran dentro del rango de salinidad reportado por López-Aguilar (2006) y Del Río-Chuljak (2006) para BSMR. Las estaciones 59 y 60 ubicada en la parte norte de los drenes registraron valores de 35.0 ups. el resto de las estaciones pertenecientes a los drenes reportaron valores que van desde 0 a 6.0 ups con excepción de la estación 58 la cual presentó 16.0 ups.

El comportamiento obtenido para la concentración de oxígeno disuelto (Fig. 12c) en esta época climática mostró similitud entre estaciones de acuerdo a su ubicación, presentando las concentraciones más altas las estaciones de la 29 a la 38 ubicadas en la parte del centro hacia el norte del área de estudio con valores entre 3.00 a 6.00 mg L⁻¹. Estas estaciones estuvieron dentro del rango de referencia obtenido por López-Aguilar (2006) y Del Río-Chuljak (2006). Referente a los drenes, se reportaron valores entre 2.00 y 4.00 mg L⁻¹, a excepción de la estación 53, la cual registró un valor de 12.05 mg L⁻¹.

La concentración de clorofila *a* (Fig. 12d) para las estaciones ubicadas en las bocas de BSMR fueron muy diferentes entre ellas, obteniéndose valores de 3.35, 9.24 y 15.81 µg L⁻¹,

respectivamente. El rango de concentración de clorofila *a* presentado para las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar varió entre 3.00 y 17.00 $\mu\text{g L}^{-1}$, con excepción de la estación 15 la cual mostró una concentración de 24.00 $\mu\text{g L}^{-1}$. Para las estaciones ubicadas en los drenes, el rango de clorofila *a* fue entre 3.34 $\mu\text{g L}^{-1}$, obtenido por la estación 49, a 25.12 $\mu\text{g L}^{-1}$, registrado por la estación 52, la mayoría de las estaciones presentaron valores por arriba de los reportados por López-Aguilar (2006) y Del Río-Chuljak (2006) para BSMR.

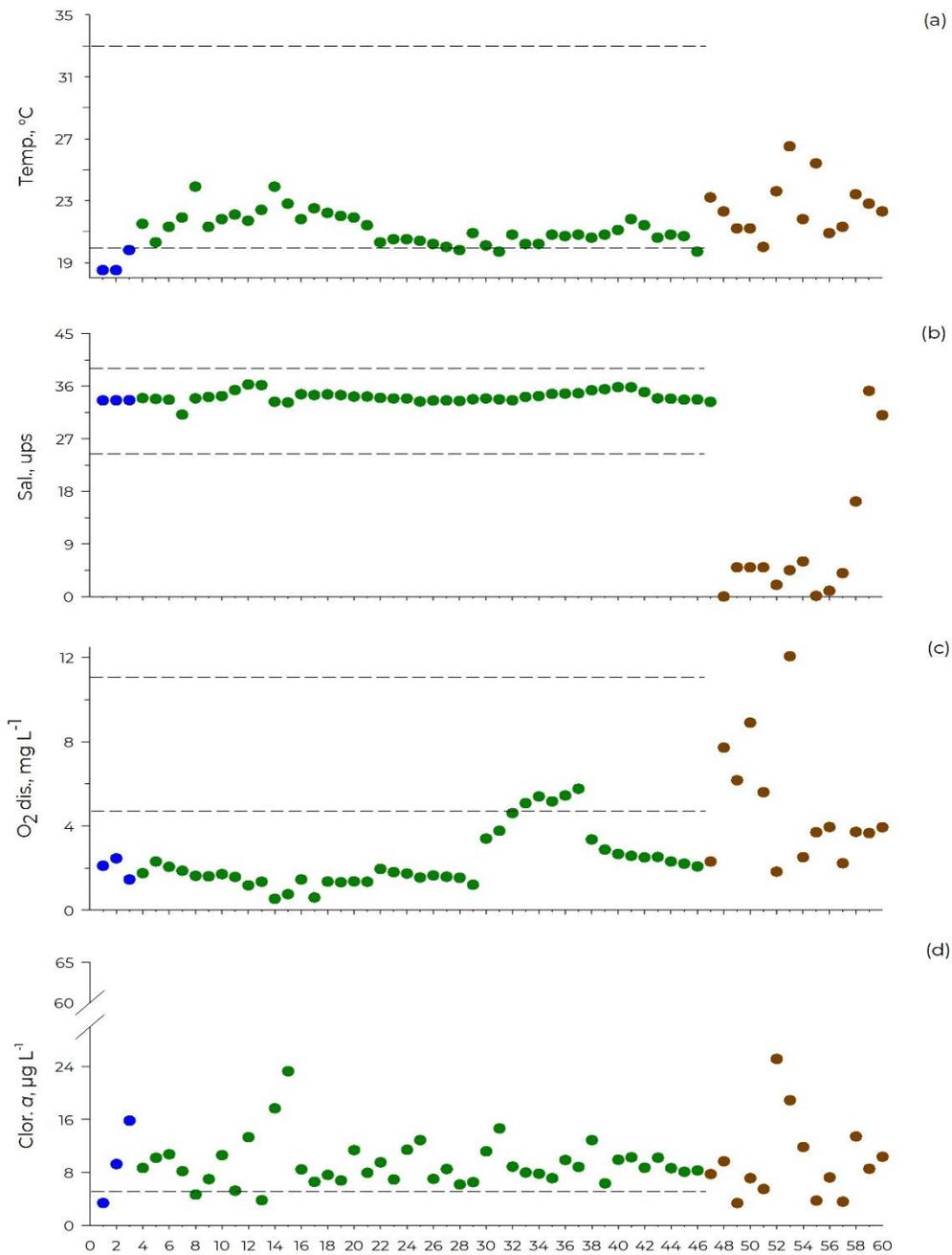


Figura 12. Resultados de la medición de parámetros de campo de la época de secas (febrero 2021) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (●), estaciones dentro del sistema lagunar (●) y drenes que descargan en la bahía (●). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguilar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).

6.3.2 Materia Orgánica

La distribución de la materia orgánica para la época de secas se muestra en la figura 13, en la cual se puede observar que las estaciones 1 y 3 pertenecientes a las bocas de BSMR presentaron valores similares, alrededor de 6,000 mg L⁻¹, mientras que la estación 2 fue la más alta con un valor de 12,466 mg L⁻¹. El rango de valores para las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar varió desde los 138 mg L⁻¹ reportado por la estación 47 la cual se encuentra ubicada cerca del estanque de estabilización de la CONAGUA, la cual funciona para el tratamiento de las aguas residuales de La Reforma, a 29,724 mg L⁻¹, encontrado en la estación 35 ubicada en el centro del área de estudio cerca de la isla Altamura. Las estaciones ubicadas en los drenes presentaron valores entre 54 a 8,318 mg L⁻¹, siendo el valor más bajo el de la estación 54 la cual se localiza en el canal que conecta al estero El Tule y el más alto en la estación 52 la cual se localiza al sur de BSMR.

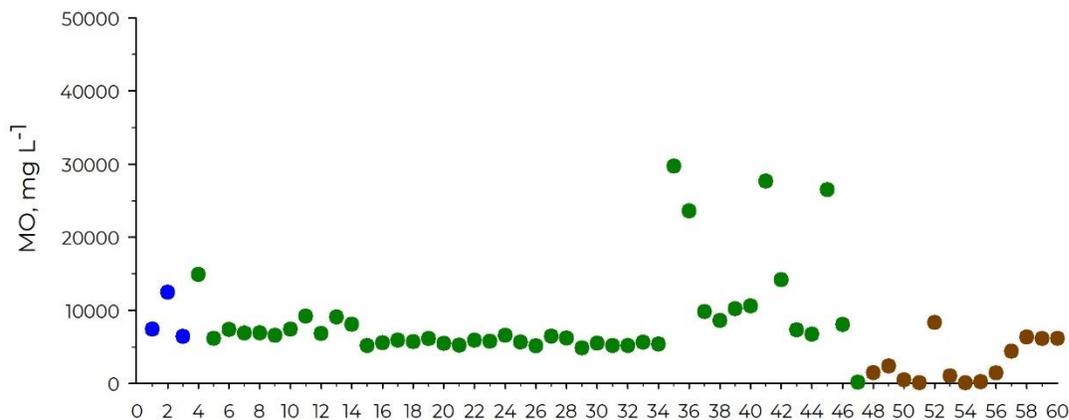


Figura 13. Resultados de la concentración de materia orgánica de la época de secas (febrero 2021) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (●), estaciones dentro del sistema lagunar (●) y drenes que descargan en la bahía (●).

6.3.3 Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) y Fósforo

La distribución de la concentración de NID se muestra en la figura 14a, en la cual se puede observar que, de las estaciones pertenecientes a las bocas, la 1 y 2 obtuvieron concentraciones por arriba de

10.00 μM , siendo los valores más altos en la estación 2 con una concentración de 11.02 μM , la estación 3 presentó una concentración de 4.91 μM . Para las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar, la concentración de NID abarcó un rango de variación amplio, desde 1.64 μM para la estación 25, a 37.55 μM para la estación 7, en la que la mayor concentración de NID se debió a la especie N-NH_4 , las estaciones tanto de las bocas como del sistema lagunar presentaron concentraciones por arriba de los valores obtenidos por López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006). La distribución de la concentración de NID para las estaciones de los drenes muestran un amplio rango, desde 4.38 μM obtenido en la estación 53, a 188.43 μM obtenido en la estación 54. La concentración de fósforo en forma de ortofosfatos (Fig. 14b) determinada en las estaciones pertenecientes a las bocas presentaron concentraciones similares entre ellas, alrededor de 2.00 μM , mientras que el rango de concentración de fósforo en forma de ortofosfatos de las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar varió entre 0.24 a 6.29 μM , mostrando la concentración más baja para la estación 13 y la más alta en la estación 47 ubicada cerca del estanque de estabilización de la CONAGUA, dicha estación fue la única que registró una concentración de P-PO_4 por arriba de los antecedentes de López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006). Las estaciones ubicadas en los drenes reportaron concentraciones de P-PO_4 entre 1.27 μM en la estación 58 ubicada al norte de BSMR, a 27.64 μM en la estación 51 ubicada al sur del área de estudio.

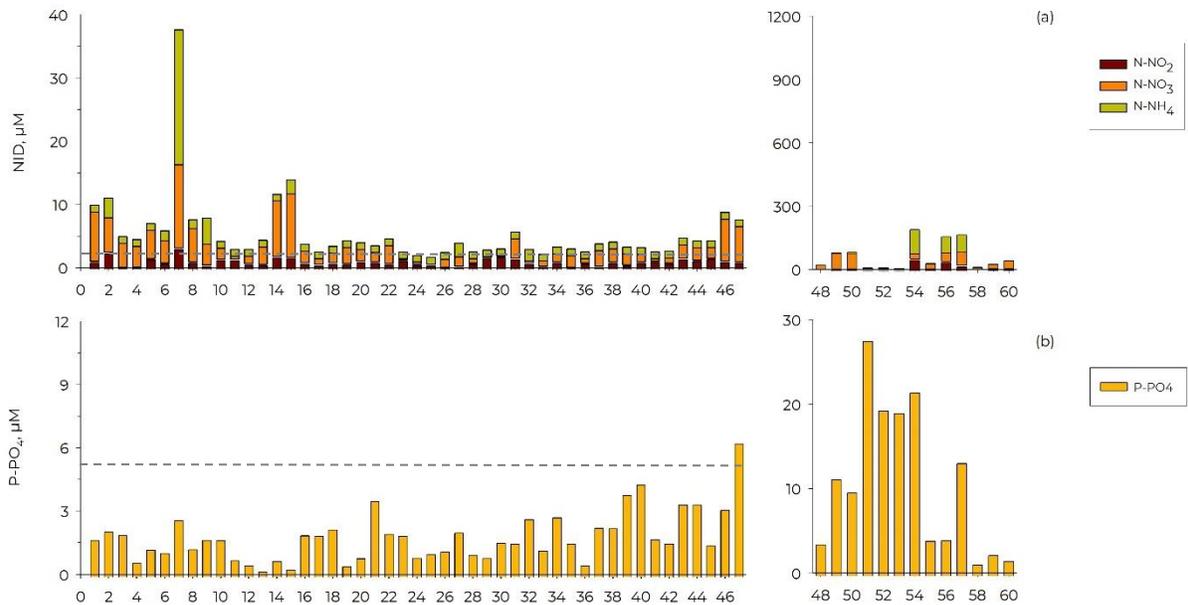


Figura 14. Resultados de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) y fósforo de la época de secas (febrero 2021) en Bahía Santa María-La Reforma. Estaciones ubicadas en las bocas (1-3) estaciones dentro del sistema (4-47) y estaciones situadas en los drenes que descargan a la bahía (48-60). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguilar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).

6.3.4 Índice Trófico TRIX

La distribución del estado trófico para Bahía Santa María-La Reforma durante la época de secas se observa en la figura 15. El análisis del índice trófico TRIX, muestra que la mayoría de las estaciones de BSMR pertenecieron a un estado hipertrófico, incluyendo las tres estaciones ubicadas en las bocas con valores entre 6.4 a 6.9, así como las 35 estaciones ubicadas alrededor del sistema lagunar. El valor más alto se registró en la estación 7 la cual se ubica en la desembocadura del canal El Tule con un valor de 7.4, mientras que, 12 de las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar presentaron un estado eutrófico, las cuales se ubican del centro de la isla Talchichiltle hacia el norte del área de estudio, registrando el valor más alto la estación 36 con un valor de 5.4. Las estaciones ubicadas en los drenes estos obtuvieron una condición hipertrófica, con el valor más alto en la estación 54 ubicada en el canal que desemboca al estero El Tule en la parte sur del área de estudio con un valor de 8.9.

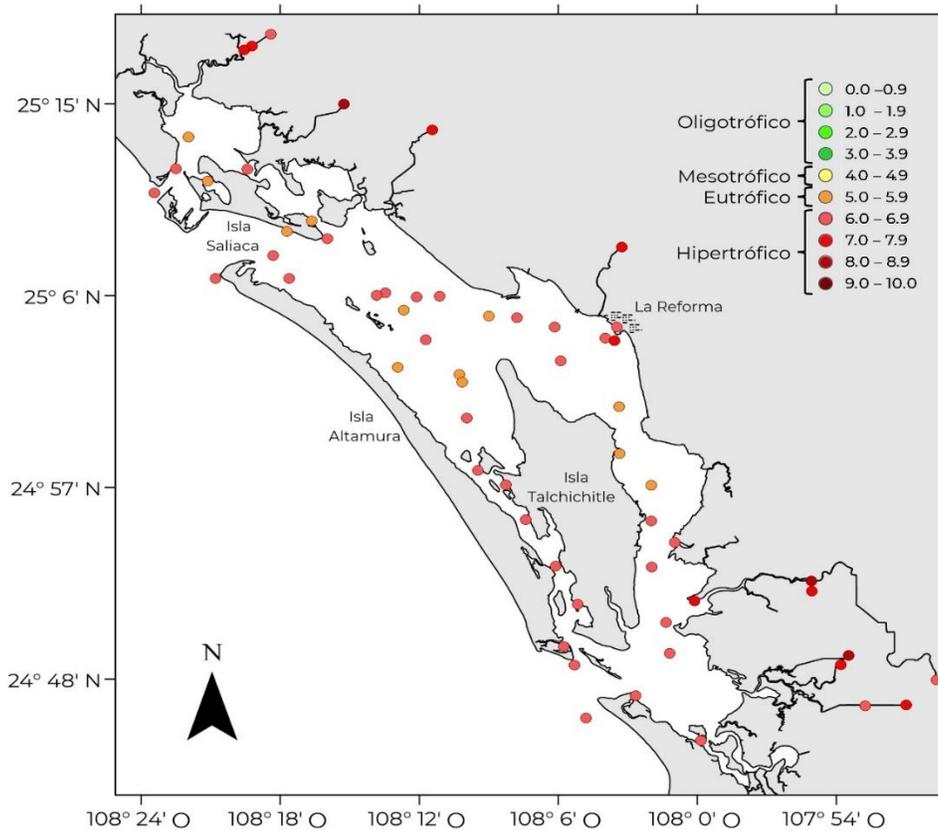


Figura 15. Resultados del índice trófico TRIX en época de secas (febrero 2021) en Bahía Santa María-La Reforma.

6.3.5 Regresión Múltiple

El análisis de regresión múltiple para la época de secas se presenta en la Cuadro 4, en la que se muestra un factor de correlación de 0.884 en la predicción de la variable dependiente (índice trófico TRIX) de acuerdo con las variables independientes (NID, fósforo en forma de ortofosfatos, clorofila *a*, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto y la materia orgánica) las cuales explican el 74.7 % de la varianza de la variable índice trófico TRIX. El *p*-valor del análisis fue menor que $p < 0.05$, lo cual nos confirma que el modelo predice el comportamiento de la variable dependiente, las variables que predicen la distribución de valores del índice trófico TRIX (valores en color rojo en el cuadro) para esta época climática son el NID, fósforo en forma de ortofosfatos y clorofila *a*, las cuales presentaron un *p*-valor de 0.000, 0.001 y 0.004 respectivamente. El análisis indica que, si las demás

variables se mantienen constantes por cada punto de incremento en NID, hay 0.480 puntos de aumento en la variable índice trófico TRIX, por cada punto de incremento en ortofosfatos, hay 0.339 puntos de aumento en la variable índice trófico TRIX y por cada punto de incremento en clorofila *a*, hay 0.215 puntos de aumento en la variable índice trófico TRIX.

Cuadro 4. Resultados de la regresión múltiple para la época de secas (febrero 2021) en Bahía Santa María-La Reforma.

Resumen de regresión para variable dependiente: TRIX						
R= .88386165 R ² = .78121142 R ² Ajustado= .74689164 F(8,51)= 22.763						
p<.00000 Error típico: .09794						
N= 60	Beta	Error típico de Beta	Coefficientes	Error típico	t(51)	p-valor
Intercepción			0.268137	0.133594	2.00709	0.050054
NID	0.50547	0.093286	0.480299	0.088641	5.41848	0.000002
Ortofosfatos	0.351481	0.102668	0.339504	0.099169	3.42348	0.001227
Clorofila <i>a</i>	0.215746	0.071857	0.214768	0.071531	3.00245	0.004141
Temperatura	0.074128	0.082159	0.079472	0.088082	0.90225	0.371165
Salinidad	-0.112332	0.138214	-0.067453	0.082995	-0.81274	0.420144
OD	-0.120374	0.159752	-0.127911	0.169755	-0.7535	0.454612
ABS SAT	0.008743	0.15135	0.007318	0.126697	0.05776	0.954163
MO	-0.105863	0.074745	-0.100643	0.071059	-1.41632	0.16276

6.4 Época de Transición Secas – Lluvias, Mayo 2021

6.4.1 Parámetros de Campo

Los resultados de medición in situ de la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y la determinación de la concentración de la clorofila *a* para la época de transición secas-lluvias se muestran en la figura 16, en la cual la temperatura de la estación 1 y 2 registraron valores de 27.8 °C, mientras que la estación 3 reportó 28.5 °C. En lo que respecta a las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar el rango de temperatura se presentó entre 28.0 °C por la estación 30 ubicada cerca de la estación 2

en la boca norte, a 30.9 °C por la estación 14 ubicada en La Reforma. El rango de temperaturas fue más amplio para las estaciones correspondientes a los drenes, el cual varía entre 22.9 a 35.0 °C.

Los valores registrados en las estaciones de las bocas para el parámetro de salinidad (Fig. 16b) fueron muy similares, con valores entre 33.5 y 33.7 ups, mientras que el rango para las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar fue más amplio, variando desde 30.5 ups en la estación 47, a 38.8 ups en la estación 12, tanto las estaciones ubicadas en las bocas como las ubicadas en el sistema lagunar presentaron valores dentro del rango de referencia de López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006). Referente a las estaciones ubicadas en los drenes el rango de salinidad fue muy amplio para este grupo de estaciones, variando desde 0.2 hasta 45.8 ups.

La concentración de oxígeno disuelto se observa en la figura 16c, las estaciones ubicadas en las bocas de BSMR presentaron concentraciones entre 4.90 y 5.90 mg L⁻¹, el rango de las concentraciones para las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar fue entre 3.95 y 8.08 mg L⁻¹, registrando la concentración más baja la estación 19 y la más alta la estación 15, la mayoría de las estaciones mostraron concentraciones dentro del rango de referencia obtenidos por López-Aguiar (2006) y Del Río-Chuljak (2006). Mientras que el rango obtenido para las estaciones de los drenes fue más amplio, de 3.15 mg L⁻¹ en la estación 54 a 11.00 mg L⁻¹ en la estación 56.

Por último, en la figura 16d se observan las concentraciones para el parámetro de clorofila *a*, donde se aprecia que las estaciones 1 y 3 obtuvieron concentraciones similares, alrededor de 4.83 µg L⁻¹, mientras que la estación 2 presentó concentración de 0.75 µg L⁻¹, las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar reportaron concentraciones de 0.58 a 11.56 µg L⁻¹, obteniéndose la concentración más baja en la estación 47 ubicada cerca del estanque de estabilización de la CONAGUA y del tratamiento de aguas residuales de La Reforma, la concentración más alta en la estación 39 ubicada en el canal entre la isla Altamura y la isla Tachichiltle. Las estaciones pertenecientes a los drenes mantuvieron un rango de clorofila *a* muy amplio, el cual va de 3.82 a 117.42 µg L⁻¹.

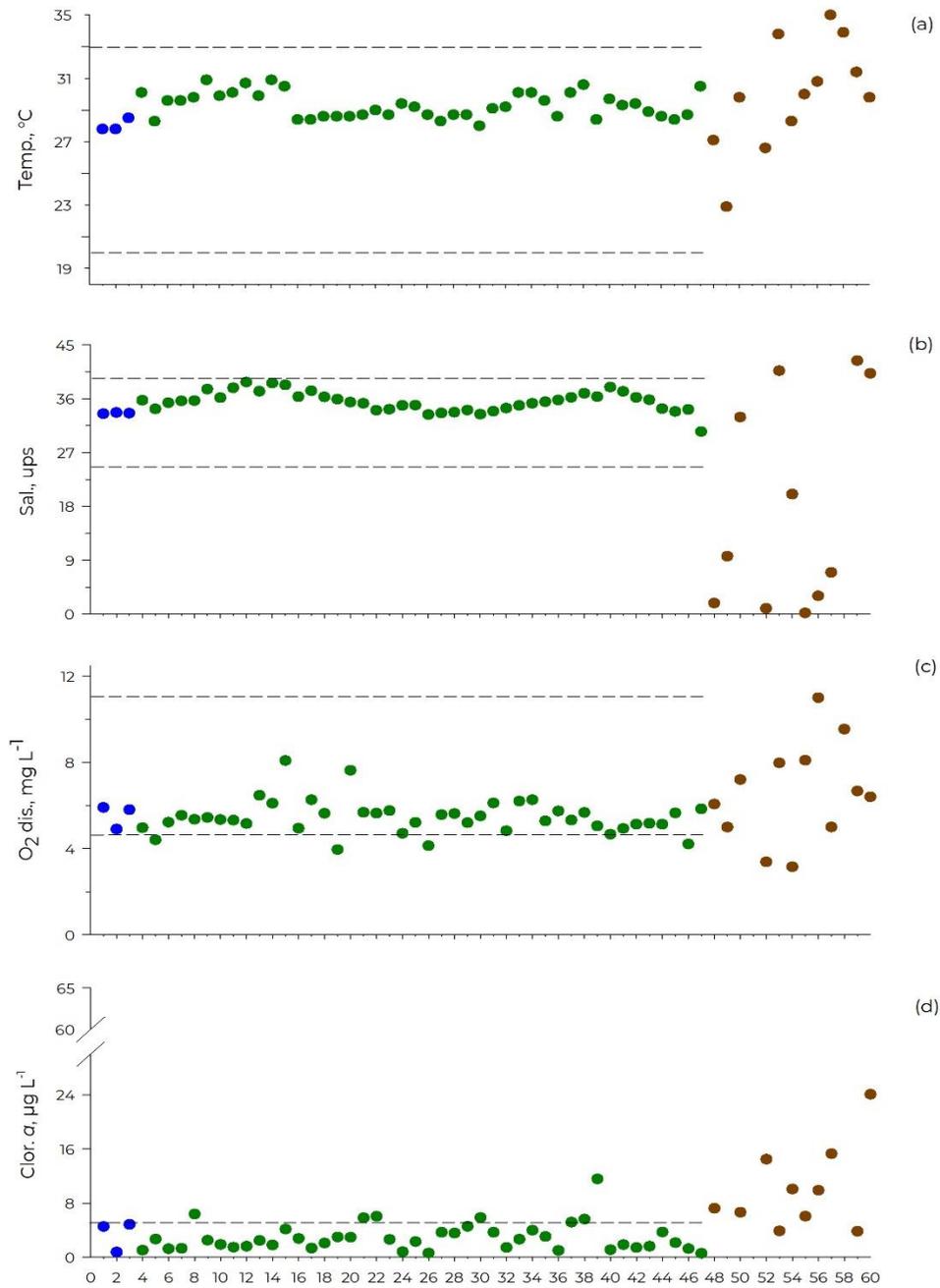


Figura 16. Resultados de la medición de parámetros de campo de la época de transición secas-lluvias (mayo 2021) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (●), estaciones dentro del sistema lagunar (●) y drenes que descargan en la bahía (●). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguilar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).

6.4.2 Materia Orgánica

La distribución espacial de la concentración de materia orgánica para la época climática de transición secas-lluvias se muestra en la figura 17, en donde se observa que tanto las estaciones pertenecientes a las bocas como las ubicadas dentro del sistema lagunar, presentaron valores similares generando una variabilidad casi lineal entre ellas, la cual varía entre 6,692 a 8,418 mg L⁻¹, con excepción de la estación 47 la cual obtuvo un valor de 420 mg L⁻¹, comportamiento que se asemeja más al obtenido por algunas estaciones ubicadas en los drenes de importancia que desembocan al sistema lagunar, el rango de variación para MO en estas estaciones varió de 148 a 122,848 mg L⁻¹, presentando el valor más bajo la estación 54 y el más alto la estación 53, ambos ubicados en el canal que desemboca al estero El Tule.

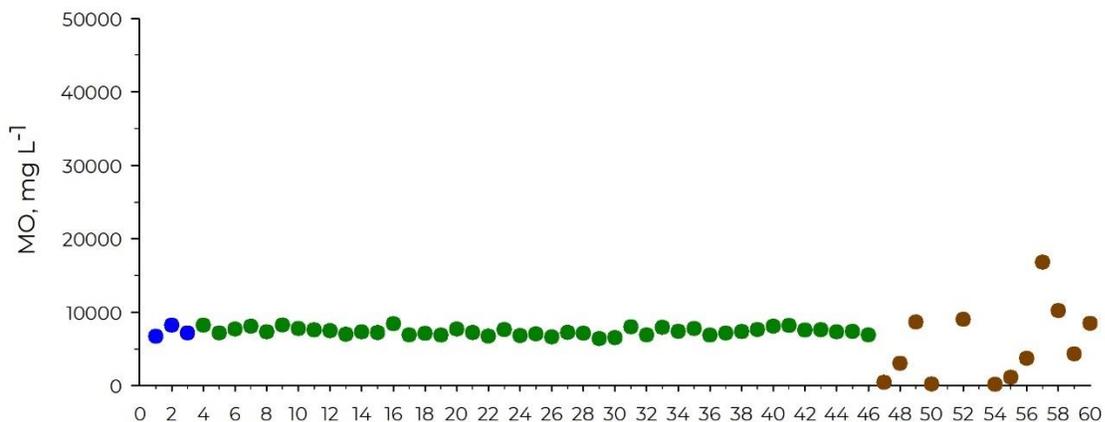


Figura 17. Resultados de concentración de la materia orgánica de la época de transición secas-lluvias (mayo 2021) en Bahía Santa María-La Reforma, estaciones ubicadas en las bocas (•), estaciones dentro del sistema lagunar (•) y drenes que descargan en la bahía (•).

6.4.3 Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) y Fósforo

La distribución de la concentración de nitrógeno inorgánico disuelto para la época de transición secas-lluvias se muestra en la figura 18 en donde en una gráfica se muestra las concentraciones

obtenidas para las estaciones en las bocas y las ubicadas dentro del sistema lagunar, se observa que la mayoría de las estaciones obtuvieron concentraciones similares, entre 1.18 y 3.79 μM , registrando la concentración más alta la estación 41 ubicada en el canal entre la isla Altamura y la isla Talchichiltle, concentraciones cercanas al límite inferior presentado por López-Aguilar (2006) y Del Río-Chuljak (2006) para BSMR. En lo que respecta a las estaciones ubicadas en los drenes, se registró un rango muy variado, desde 2.74 μM en la estación 53, hasta 234.28 μM presentado por la estación 54, ambas estaciones se localizan al sur de BSMR y se encuentran ubicadas en el canal que desemboca al estero El Tule.

La distribución en la concentración de fósforo en forma de ortofosfatos se observa en la figura 18b, las estaciones 1 y 3 ubicadas en las bocas de BSMR presentaron concentraciones similares, alrededor de 1.29 μM , mientras que la estación 2 reportó una concentración de 0.89 μM . A cerca de las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar, el rango de concentración fue de 0.14 μM presentado por la estación 13 ubicada en el centro de BSMR a 2.52 μM obtenido por la estación 46 ubicada al sur del área de estudio, mientras que el rango de variación de las estaciones ubicadas en los drenes registró una variación amplia, la cual va desde 0.30 μM , presentado por la estación 58 ubicada al norte, hasta 24.99 μM , para la estación 54 ubicada al sur.

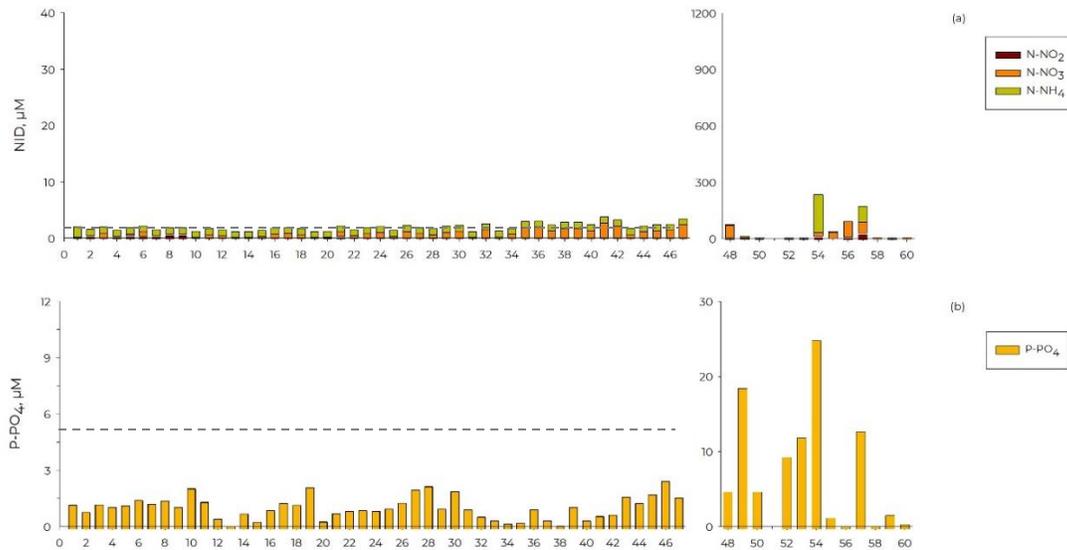


Figura 18. Resultados de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) y fósforo de la época de transición secas-lluvias (mayo 2021) en Bahía Santa María-La Reforma. Estaciones ubicadas en las bocas (1-3) estaciones dentro del sistema (4-47) y estaciones situadas en los drenes que descargan a la bahía (48-60). Las líneas punteadas indican los valores de referencia reportados por López-Aguilar (2006) y Del Río-Chuljak (2006).

6.4.4 Índice Trófico TRIX

En la temporada de transición secas-lluvias, la distribución del índice trófico TRIX, es mostrada en la figura 19, se observa que dos de las estaciones pertenecientes a las bocas de BSMR presentaron un estado eutrófico (estación 1 y 3) mientras que la estación 2 mostró un estado mesotrófico. En lo que respecta a las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar, resultaron 3 estados tróficos, 8 de las estaciones presentaron estado oligotrófico, ubicadas en la parte del centro al norte de BSMR, mientras que la mayoría de las estaciones registraron un estado mesotrófico, obteniéndose 27 estaciones en dicho estado trófico, finalmente 9 de las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar pertenecieron a un estado eutrófico, las cuales se encuentran ubicadas del centro al sur de BSMR, alrededor de la isla Talchichiltle. Referente a las estaciones ubicadas en los drenes la mayoría presentó un estado hipertrófico, registrando los valores más altos las estaciones 49, 53 y 56, mientras que 3 de las estaciones obtuvieron un estado eutrófico, estación 50 ubicada al sur, estación 58 y 59 ubicadas al norte de BSMR.

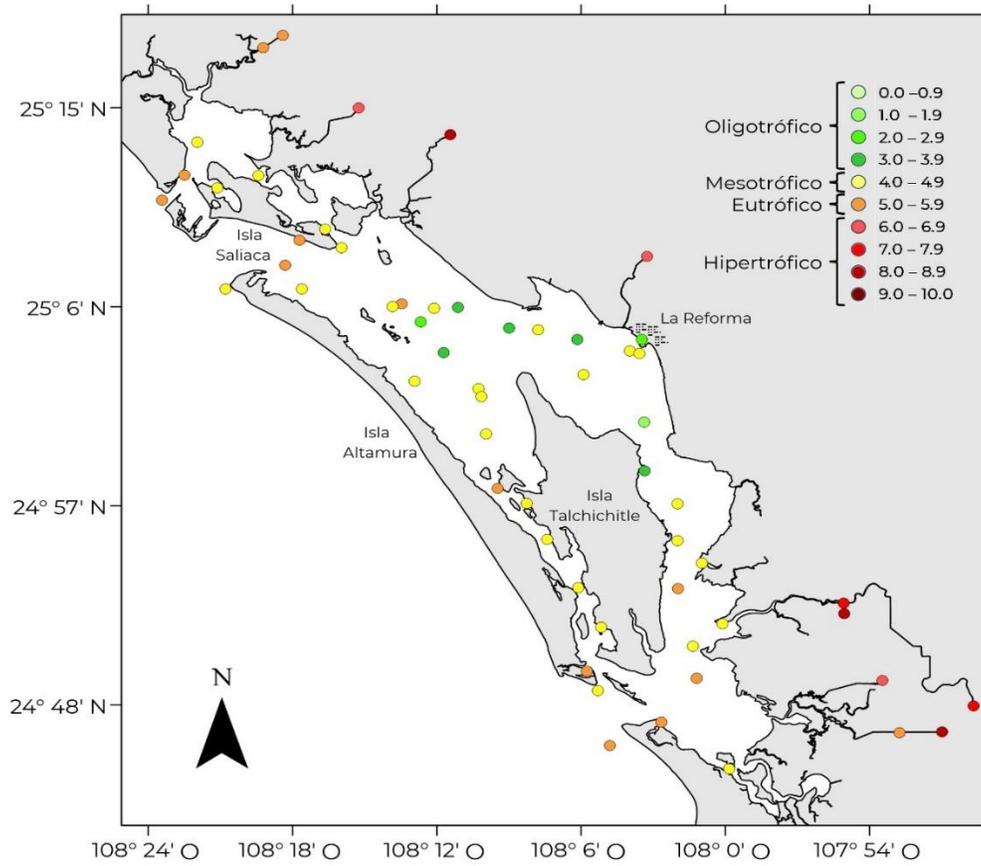


Figura 19. Resultados del índice trófico TRIX en época de transición secas-lluvias (mayo 2021) en Bahía Santa María-La Reforma.

6.4.5 Regresión Múltiple

Para predecir la variable dependiente (índice trófico TRIX) en relación a las variables independientes (NID, fósforo en forma de ortofosfatos, clorofila *a*, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto y la materia orgánica) se realizó un análisis de regresión múltiple, donde se presentó un factor de correlación de 0.923, el conjunto de las variables independiente explica el 82.9% de la varianza de la variable del índice trófico TRIX, se obtuvo un p -valor < 0.5 lo cual confirma que el modelo predice el comportamiento de la variable dependiente, las variables que predicen la distribución de los valores del índice trófico TRIX (valores en color rojo en el cuadro) son fósforo en forma de ortofosfatos con un p -valor 0.042 lo cual nos indica que si las demás variables se mantienen

constantes por cada punto de incremento en esta variable hay 0.303 puntos de incremento en la variable índice trófico TRIX, clorofila *a* con un *p*-valor de 0.008 que indica que por cada punto de incremento en esta variable hay 0.349 puntos de incremento en la variable índice trófico TRIX, además de la variable dependiente de salinidad con un *p*-valor 0.000 que indica que por cada punto de incremento hay 0.289 puntos de disminución en la variable dependiente índice trófico TRIX, finalmente la cuarta variable que predice la distribución de la variable dependiente es el valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, la cual presentó un *p*-valor de 0.009 e indica que por cada punto de incremento en esta variable hay 0.211 puntos de incremento en el índice trófico TRIX.

Cuadro 5. Resultados de la regresión múltiple para la época de transición secas-lluvias (mayo 2021) en Bahía Santa María-La Reforma.

Resumen de regresión para variable dependiente: TRIX						
R= .92343097 R ² = .85272476 R ² Ajustado= .82916072 F(8,50)= 36.188						
p<.00000 Error típico: .08138						
N= 59	Beta	Error típico de Beta	Coefficientes	Error típico	t(50)	p-valor
Intercepción			0.476374	0.086909	5.48132	0.000001
NID	0.228197	0.125935	0.264633	0.146043	1.81202	0.07599
Ortofosfatos	0.275276	0.13227	0.30282	0.145505	2.08117	0.042559
Clorofila <i>a</i>	0.239092	0.08616	0.349988	0.126123	2.77497	0.007744
Temperatura	-0.051698	0.093735	-0.072242	0.130984	-0.55153	0.583727
Salinidad	-0.330727	0.079243	-0.289709	0.069415	-4.17356	0.00012
OD	-0.021164	0.077648	-0.024962	0.091582	-0.27256	0.786314
ABS SAT	0.216413	0.079784	0.21147	0.077962	2.71248	0.009133
MO	0.098892	0.094654	0.156387	0.149686	1.04477	0.301156

El sistema lagunar Bahía Santa María–La Reforma presenta diferentes condiciones de eutrofización, dependiendo tanto de la ubicación de la estación, la época climática y los factores antropogénicos realizados alrededor y dentro del sistema lagunar.

Los resultados obtenidos para la evaluación del estado trófico del sistema lagunar Bahía Santa María-La Reforma muestran diferencias de temperatura entre las estaciones, dicha variación se puede explicar por las diferentes profundidades de las estaciones de muestreo y la incidencia de

radiación solar en ellas. Como fue señalado por Del Rio-Chuljak (2006) la hidrodinámica del sistema lagunar Santa María-La Reforma es uno de los factores que influyen sobre la variación de la temperatura, ya que las zonas más someras se encuentran en la zona más alejadas de las bocas, donde la temperatura es mayor y las tasas de recambio son menores, lo cual concuerda con los resultados presentados en este estudio. Los promedios de temperatura del agua registrados para cada época climática están dentro de los rangos obtenidos en la variación histórica de temperatura ambiente y precipitación para BSMR obtenida de la red de estaciones climatológicas de CONAGUA (Fig. 2) donde se observa que la temperatura ambiente es más bajas durante los primeros tres meses del año, incrementándose paulatinamente desde abril hasta junio para alcanzar un máximo en julio y mantenerse aproximadamente constante a esa temperatura hasta finales de septiembre. La temperatura del agua más baja presentada en BSMR durante el ciclo anual estudiado fue de 18.5 °C durante la época de secas, mientras que la más alta fue 35.0 °C en las épocas climáticas de transición secas-lluvias y la época de lluvias.

La variabilidad reportada por el parámetro salinidad muestra una relación entre los valores obtenidos y la ubicación de las estaciones en el sistema, obteniéndose un rango anual entre 26.29 a 38.88 ups, ambas durante época de lluvias, el cual se encuentra dentro del rango reportado por Del Rio-Chuljak (2006) y López-Aguiar (2006) en sus estudios sobre BSMR, indican variaciones de acuerdo a la distribución de las estaciones, esto debido a que existe un desfase de las mareas tanto en pleamar como en bajamar entre las dos bocas de entrada y los diferentes puntos dentro de ella, adicionalmente BSMR es un sistema muy somero, lo que permite que se lleve a cabo un rápido calentamiento de la columna de agua y por lo tanto se incremente la evaporación (López-Aguiar, 2006). Los factores determinantes de cambios en la salinidad están causados por los niveles de precipitación y evaporación, los cuales ocasionan que la salinidad sea mayor en algunas de las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar y las bocas. Por otra parte, la variación en los valores de salinidad de los drenes se debe a las actividades antropogénicas sobre los cuerpos de agua receptores los cuales reciben los efluentes de las unidades de cultivo de camarón.

La concentración de oxígeno disuelto es otra de las variables de respuesta a la eutrofización considerada dentro del índice trófico TRIX (Ruiz-Ruiz, 2017). El rango de concentración de oxígeno disuelto en las estaciones situadas en las bocas y el sistema lagunar durante las cuatro épocas climáticas, muestra que las concentraciones más altas se obtuvieron durante las épocas de

transición, mientras que las concentraciones más bajas se presentaron durante la época de secas. Cloern (2001) señala que la disminución de la concentración de oxígeno disuelto es una de las consecuencias indirectas de la eutrofización debido a que la hipoxia y la anoxia pueden modificar la estructura de las comunidades eliminando a los organismos más sensibles o menos móviles, reduciendo el hábitat y modificando las interacciones en el ecosistema. El promedio anual de la concentración de oxígeno disuelto presentada en este estudio fue de 4.47 mg/L, la cual es similar al promedio de concentración reportada por Medina-Galván *et al.* (2022) para Bahía Santa María, Topolobampo, sistema lagunar cercano al área de estudio, de ~5 mg/L durante verano e invierno. Por su parte dentro de los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (1989) para la protección de la vida acuática marina, el límite máximo permisible para la concentración de oxígeno disuelto es 5 mg/L.

Al igual que la concentración de oxígeno disuelto, la clorofila *a* es un variable de respuesta de la calidad del cuerpo de agua, por medio de la cual puede obtenerse una estimación de la cantidad total de biomasa fitoplanctónica. Las concentraciones más altas de clorofila *a* en este trabajo se obtuvieron durante la época de transición de lluvias-secas y en secas, si consideramos este parámetro para definir una clasificación trófica para aguas marinas costeras de acuerdo a lo señalado por Smith *et al.* (1999) ambas épocas climáticas presentan un estado hipertrófico. Por su parte, las épocas de lluvias y transición de secas-lluvias presentaron condiciones mesotróficas. La concentración de clorofila *a* es un indicativo confiable para la cuantificación y el seguimiento de las variaciones de biomasa, que permite determinar la calidad del agua y del ecosistema (Contreras *et al.*, 1994; De la Lanza Espino *et al.*, 2008).

La materia orgánica en ambientes litorales proviene de diversas fuentes como la producción primaria dentro del ecosistema acuático, la biota terrestre, el material erosionado y el lixiviado que llega a las lagunas y estuarios a través de los ríos de procedencia continental (De la Lanza, 1984). La concentración de la materia orgánica en las estaciones correspondientes a las bocas de BSMR fue similar para todas las épocas climáticas, obteniéndose un rango entre 6,000 a 12,466 mg L⁻¹, a excepción de la época de transición lluvias-secas, en la cual las concentraciones de MO para las bocas fueron casi el doble de la concentración mostrando un rango que va desde 17,996 a 21,114 mg L⁻¹. La variación obtenida para las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar fue desde 138 mg L⁻¹ hasta 49,122 mg L⁻¹, las concentraciones más bajas se observaron en las estaciones cercanas a La Reforma, mientras que las concentraciones más altas se observaron en el centro de

BSMR. Se registraron concentraciones más altas para las estaciones de las bocas y del sistema lagunar, que la mayoría de las estaciones ubicadas en los drenes. De acuerdo con De la Lanza (1984), la mezcla que sucede en las aguas estuarinas, alcalinas y con alta tensión iónica, remueven compuestos orgánicos e inorgánicos, además son ambientes de alta productividad biológica, dando como resultado una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos. La concentración de MO para las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar y en los drenes fue muy variada dependiendo tanto de la ubicación de las estaciones como de las diferentes épocas climáticas.

La Bahía Santa María–La Reforma presenta diferentes condiciones de eutrofización las cuales responden a la variación en la concentración de los parámetros y factores que se presentan en el ciclo anual.

Para la época de lluvias se obtuvieron condiciones de eutrofización dentro del rango de oligotrófica a eutrófica, reportándose un estado mesotrófico en la mayoría de las estaciones, lo cual se relaciona con características del agua moderadamente productivas y un nivel trófico medio. Durante esta época resalta una condición hipertrófica en la zona cercana al canal El Tule tanto en las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar como en los drenes en los cuales desembocan las descargas de las actividades antropogénicas cercanas a este canal. Esta condición provoca cambios en la estructura de las comunidades, presentando características de agua altamente productiva y niveles tróficos muy altos (Vollenweider *et al.*, 1998; Penna *et al.*, 2004; Salas *et al.*, 2008; Barraza-Guardado *et al.*, 2014), lo cual modifica directamente la estructura y dinámica de los productores primarios, valores del índice trófico TRIX mayores a 6 y para esta zona implica niveles de productividad biológica, muy altos, muy pobre claridad de agua, abundancia de plantas acuáticas y potencial para soportar la vida de una gran cantidad de peces y vida silvestre (Nebel y Wright, 1999).

Con respecto a los drenes, se presentaron estaciones en el sur de BSMR con condiciones oligotróficas, la baja concentración de nutrientes registrado en los drenes del sur responde al inicio del ciclo acuícola de verano-otoño, en los cuales se realizan muy pocos recambios de agua al inicio de los ciclos de producción de camarón. Adicionalmente, se registraron drenes con estados tróficos de eutrófico a hipertrófico. Entre las principales causas antropogénicas que aceleran el proceso de la eutrofización se encuentran el uso de fertilizantes agrícolas y la descarga de residuos industriales y municipales a los drenes agrícolas.

Al igual que en la época de lluvias, durante la época de transición lluvias-secas se obtuvieron

condiciones tróficas de oligotróficas a eutróficas en las estaciones ubicadas en las bocas y dentro del sistema lagunar, sin embargo, en esta época algunas de las estaciones muestreadas del norte, sur y una ubicada cerca de La Reforma muestran una condición hipertrófica, posiblemente debido a las actividades agrícolas realizadas en el área de estudio. Con base a las entrevistas realizadas a productores agrícolas pertenecientes al área de estudio (Pronatura Noroeste A. C., 2022) se menciona que el cultivo de maíz y garbanzo comienza en el mes de noviembre, mientras que el de frijol está en curso durante esta época climática, debido a esto se está llevando a cabo la etapa de fertilización durante esta época, la cual abarca entre los meses de septiembre a diciembre (García *et al.*, 2018). La mayoría de las estaciones presentaron condiciones eutróficas durante esta época climática, lo cual significa una productividad biológica entre moderada y alta, y nivel de estado trófico alto (Vollenweider *et al.*, 1998; Penna *et al.*, 2004; Salas *et al.*, 2008; Barraza-Guardado *et al.*, 2014; Nebel y Wright, 1999).

Referente a los drenes durante esta época, todos registraron condiciones hipertróficas, mostrando características del agua altamente productiva con un nivel de estado trófico muy alto (Vollenweider *et al.*, 1998; Penna *et al.*, 2004; Salas *et al.*, 2008; Barraza-Guardado *et al.*, 2014; Nebel y Wright, 1999).

Durante la época de secas, las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar muestran condiciones eutróficas en algunas de las estaciones ubicadas de la zona centro hacia el norte. Sin embargo, la mayoría de ellas presentaron condiciones hipertróficas. En lo que respecta a las estaciones de los drenes, todas mantuvieron condiciones hipertróficas. Dichas condiciones concuerdan con lo descrito anteriormente sobre el sector agrícola, además, algunos autores han observado que en la zona costera las aguas residuales urbanas y el empleo de fertilizantes en la agricultura constituyen la principal fuente de nitrógeno y fósforo de origen antropogénico que ocasionan el deterioro de la calidad del agua costera y marina (Boland *et al.*, 1993; Ferreira *et al.*, 2007; Smith, 2003).

Las condiciones tróficas presentadas en esta época son resultado de las altas concentraciones en los diferentes parámetros evaluados, entre ellos destacan el incremento en las concentraciones de nitrógeno inorgánico disuelto, fósforo en forma de ortofosfatos y clorofila *a*, situación que concuerda con Garay-Moran (2002) quien menciona que de acuerdo a las concentraciones medidas de fósforo y nitrógeno durante el mes de febrero para BSMR se reportan condiciones hipertróficas y mesotróficas respectivamente. Referente a las concentraciones de fósforo, Del Rio-Chuljak (2006) menciona que se observaron concentraciones elevadas para el muestreo realizado durante

esta época climática sobre todo en la parte norte del sistema debido a la gran actividad acuícola realizada en el área.

Otro de los factores que se puede tomar en consideración para la evaluación del estado trófico obtenido en esta época son las condiciones climáticas. Como ha sido mencionado previamente, la variación histórica de la precipitación anual para BSMR (Fig. 2) muestran que es baja de enero a febrero y escasa desde marzo hasta junio, provocando así que no exista un alto nivel de escorrentía del agua, incrementando el tiempo de residencia del agua el cual va variando conforme el ciclo anual, de acuerdo con Martínez-López *et al.*, (2013) en BSMR la proporción de mezcla respecto al volumen de la laguna determina un tiempo de recambio de 22.5 días en secas, durante el cual toda el agua de la laguna es reemplazada. Las lagunas con mayor tiempo de residencia tienen mayor riesgo a la contaminación y eutrofización, en tanto que las de menor tiempo de residencia, además de ser potenciales exportadoras de materia orgánica, son menos vulnerables (Herrera-Silveira 2006).

Para la época transición secas-lluvias, las condiciones tróficas variaron para las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar, la mayoría de ellas mostraron una condición mesotrófica, mientras que, en la parte central de BSMR, las estaciones presentaron condiciones oligotróficas, situación que concuerda con lo descrito por Del Rio-Chuljak (2006) y López-Aguiar (2006), estos autores señalan que los valores mínimos de nutrientes se encontraron en la parte media del sistema, cercanas al poblado de La Reforma, mientras que la mayoría de las estaciones con estado eutrófico se localizaron al norte y sur de BSMR, donde las concentraciones de nutrientes fueron las más bajas reportadas durante las cuatro épocas climáticas, lo cual concuerda con lo descrito por López-Aguiar (2006). Con respecto a los drenes se presentaron algunas estaciones con condiciones eutróficas en el norte y sur de BSMR, mientras que la mayoría de los drenes presentaron condiciones hipertróficas.

Esta situación se puede deber a la actividad agrícola presente en BSMR, pues durante la época de transición secas-lluvias se continúa llevando a cabo el ciclo de cultivo del maíz en donde algunos productores están cosechando el producto y otros todavía están llevando a cabo el ciclo con las consiguientes descargas de nutrientes hacia los drenes agrícolas (Pronatura Noroeste A. C., 2022). Además, durante la época de transición secas-lluvias el ciclo de producción acuícola se está concluyendo, motivo por el cual se estarían realizando recambios de agua más frecuentes y de mayor volumen, lo que contribuye a incrementar la concentración de nutrientes y materia orgánica

en los efluentes de las unidades de producción.

La respuesta de los ecosistemas al enriquecimiento por nutrientes es un proceso continuo más que una condición estática o estado trófico (Cloern, 2001; Smayda, 2005; Glibert y Burkholder, 2006). En nuestro país existen pocos estudios acerca de la condición ambiental de los cuerpos de agua costeros sometidos a presión antropogénica por el vertimiento de aguas residuales sin tratamiento, por lo que este tema representa una línea de interés científico y socioeconómico por los bienes y servicios ambientales que proporcionan las zonas costeras a la sociedad.

6.5 Distribución Estacional del Índice Trófico TRIX

En la figura 20 se observa la distribución estacional del índice trófico TRIX de BSMR mediante un diagrama de cajas y bigotes. En esta figura se excluyen los valores de los drenes. El estado trófico de Bahía Santa María-La Reforma se modifica a lo largo del año, para la época de lluvias el sistema presenta condiciones mesotróficas con algunos valores oligotróficos, incrementándose a eutrófico durante la época de transición lluvias-secas y alcanzando niveles hipertróficos durante la época de secas para posteriormente disminuir a condiciones mesotróficas y oligotróficas durante la transición secas-lluvias. Para la época de lluvias, se observa que el 50% de las estaciones muestreadas presentan una condición mesotrófica, para la época de transición lluvias-secas el 50% de las estaciones muestreadas se encuentran en el rango de mesotrófico a eutrófico, con el 50% de las estaciones muestreadas bajo condiciones eutróficas durante la época de secas, mientras que el 50% de las estaciones muestreadas para la época de transición secas-lluvias obtuvieron condiciones mesotróficas.

De acuerdo a la posición de la mediana obtenida en el análisis, se observa que, para las épocas de lluvia, transición lluvias-secas y secas, la distribución del índice trófico TRIX presentó valores con asimetría negativa, debido a que los datos se concentran en la parte superior del diagrama. Esto significa que el 25% de las observaciones comprendidas entre el segundo y tercer cuartil ocupan un menor tramo en la escala (observaciones más próximas) que la proporción de observaciones correspondientes a valores comprendidos entre el primer y segundo cuartil. Por otra parte, la distribución para la época de transición secas-lluvias fue simétrica, lo cual implica que el 50% de

los datos se distribuyeron de manera homogénea, por lo que tanto la media, mediana y moda de la distribución del índice trófico TRIX en esta época coinciden.

Las líneas verticales en ambos extremos de la caja llamados bigotes, determinan el límite para la detección de valores atípicos. Para la época de lluvias, transición lluvias-secas y transición secas-lluvias el bigote inferior mostró mayor alcance de valores, siendo el más amplio el de la época de transición lluvias-secas. Todas las épocas climáticas presentaron valores atípicos, los cuales son los puntos que están más allá del límite inferior o superior.

Para la época de lluvias se obtuvieron 3 valores atípicos en el bigote inferior, los cuales mostraron valores por debajo de 1 en la escala del índice trófico TRIX (estación 11, 25 y 43), al igual que 3 valores atípicos en la parte superior con valores por arriba de 7 en la escala registrándose el valor más alto la estación 7. Para la época de transición lluvias-secas se obtuvieron dos valores atípicos en la parte inferior de la gráfica con valor de 0.6 presentados por las estaciones 26 y 28, en la parte superior se presentaron 4 valores atípicos los cuales mantuvieron valores por arriba de 6 en la escala del índice trófico TRIX, obteniendo el valor más alto la estación 5 con 6.9. Mientras que para la época de secas los valores atípicos para la parte inferior de la gráfica fueron las estaciones 13, 33, 35 y 36, registrando valores entre 5 y 6 en la escala del índice trófico TRIX, lo cual significa un estado eutrófico, referente a los valores atípicos superiores se obtuvieron 3 valores, registrando el valor más alto la estación 7 con valor de 7.44. Por último, para la época de transición secas-lluvias se obtuvieron 4 valores inferiores atípicos, presentando el valor más bajo la estación 33 con valor de 3.36 en la escala del índice trófico TRIX, en la parte superior se registraron 3 valores atípicos con valores entre 5 y 6 en la escala del índice trófico TRIX, el valor más alto lo mostró la estación 39 con valor de 5.86.

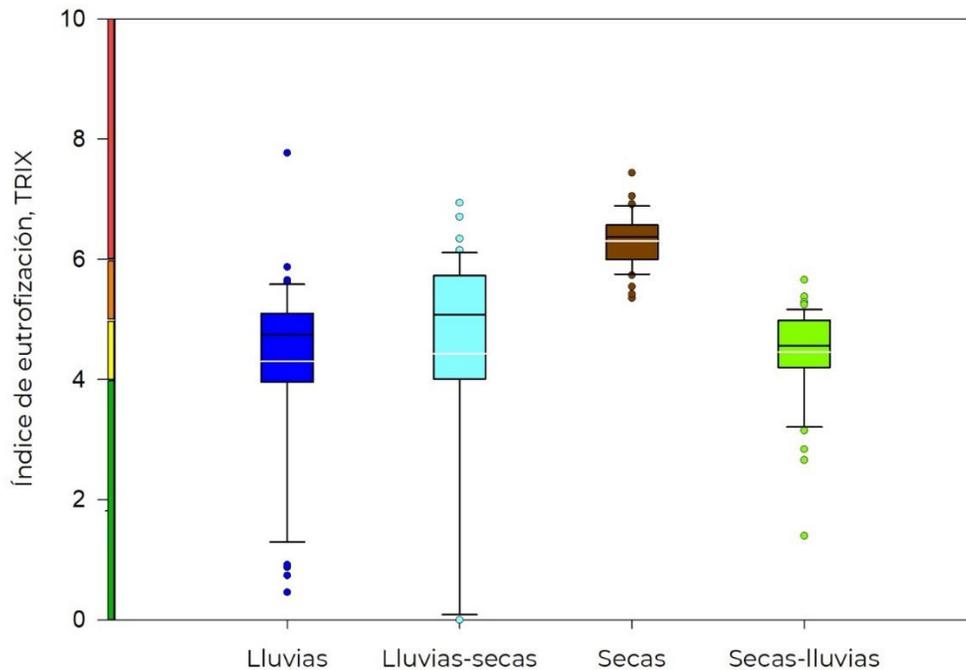


Figura 20. Resultados de la distribución estacional del índice trófico TRIX para cada época climática en Bahía Santa María-La Reforma (mediana línea negra, media línea blanca, caja 25%-75%, bigotes 10%-90%, círculos valores atípicos).

6.6 Análisis de Modelo de Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS) Anual

6.6.1 Análisis NMDS de los Parámetros Físico-Químicos

Con el propósito de representar de manera gráfica los valores y concentraciones de los diferentes parámetros se realizó un análisis NMDS en el cual se incluyeron los parámetros físico-químicos (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nitrógeno inorgánico disuelto, fósforo en forma de ortofosfatos, clorofila *a*) obtenidos en las cuatro épocas climáticas. El análisis arrojó un valor del Stress de 0.12 lo cual indica que existe una buena similitud entre los datos y que el análisis NMDS es viable para representar dichos datos (Fig. 21).

Este análisis mostró un agrupamiento de las estaciones ubicadas en las bocas y dentro del sistema lagunar (Fig. 21a) y otro para las estaciones ubicadas en los drenes (agrupamiento en forma de S ubicado en la parte derecha de la gráfica (Fig. 21). Dentro del agrupamiento de las estaciones

ubicadas en las bocas y dentro del sistema lagunar para la época de lluvias se puede observar que las estaciones que se dispersaron del conjunto son la 34, 36, 39, 40, 41 y 42, las cuales se localizan en el canal que se forma entre la isla Talchichiltle y Altamura y la estación 7 ubicada en el estero El tule, las estaciones pertenecientes a los drenes en esta época climática que más se dispersaron del conjunto son la 57 ubicada en la parte norte de BSMR, así como las estaciones 58 y 60 ubicadas en la parte norte las cuales se acercan más al agrupamiento de las estaciones pertenecientes a las bocas y dentro del sistema lagunar.

La época en la cual hubo más similitud entre las estaciones pertenecientes a las bocas y las ubicadas dentro del sistema lagunar es la de transición secas-lluvias, en la cual la estación más dispersa del conjunto fue la 47, ubicada cerca del estanque de estabilización de la CONAGUA y del tratamiento de aguas residuales de La Reforma, referente a las estaciones pertenecientes a los drenes las más dispersas son la 53 ubicada en el sur de BSMR, así como las estaciones 58 el cual es un dren agrícola y 60 en el cual se juntan los efluentes de salidas agrícolas y acuícolas, ambas estaciones ubicadas en la parte norte de BSMR.

Referente a la época de transición lluvias-secas la estación perteneciente a las bocas y las ubicadas dentro del sistema lagunar que más se dispersó del conjunto de similitud es la 5, posiblemente se deba a la distancia que hay entre dicha estación y el resto, las estaciones 58 y 59 ubicadas en los drenes de la parte norte se agruparon cerca de la estación 5, contrario a esto la estación 57 ubicada al norte fue la estación de los drenes con mayor dispersión del resto en esta época climática.

Finalmente, el comportamiento de la similitud de las estaciones para la época de secas fue de los más variados, entre las más dispersas se encuentra la estación 3 ubicada en una boca del norte, 7 ubicada en el estero El Tule y las estaciones 13, 14, 15, 17 y 47 las cuales pertenecen al grupo de estaciones ubicadas cerca de La Reforma. En el agrupamiento de los drenes la época con más similitud entre las estaciones fue la época de secas, en la cual solo la estación 60 se dispersó del resto del conjunto, dicha estación se comportó de manera similar a las estaciones de las bocas y las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar.

Además, en la gráfica de la figura 21 se observa que las épocas que más se agruparon entre ellas son la de lluvias y transición secas-lluvias. No hubo un agrupamiento de las estaciones entre ambas épocas de transición. Por último, algunas estaciones pertenecientes a la época de secas se agruparon cerca de las estaciones de transición lluvias-secas.

Transform: Log(X+1)
Normalise
Resemblance: D1 Euclidean distance

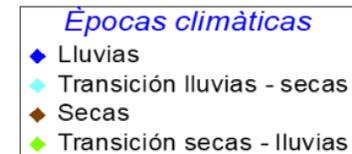
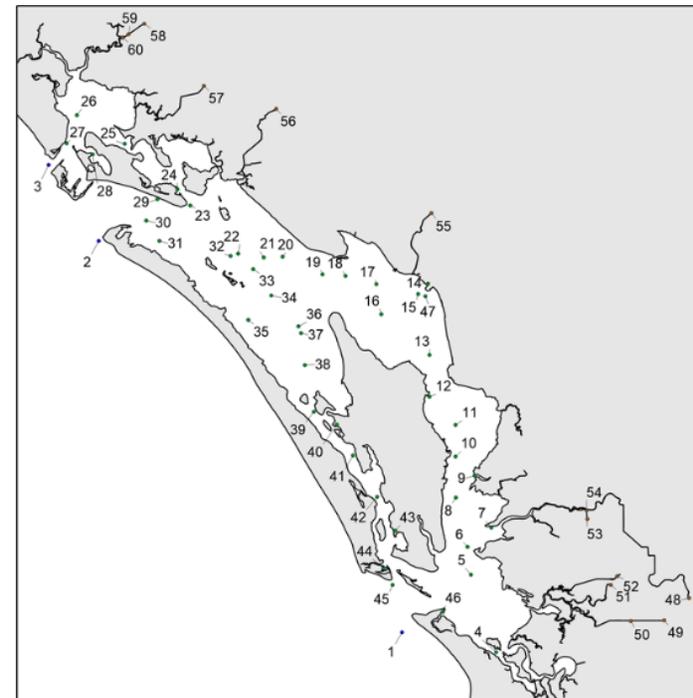
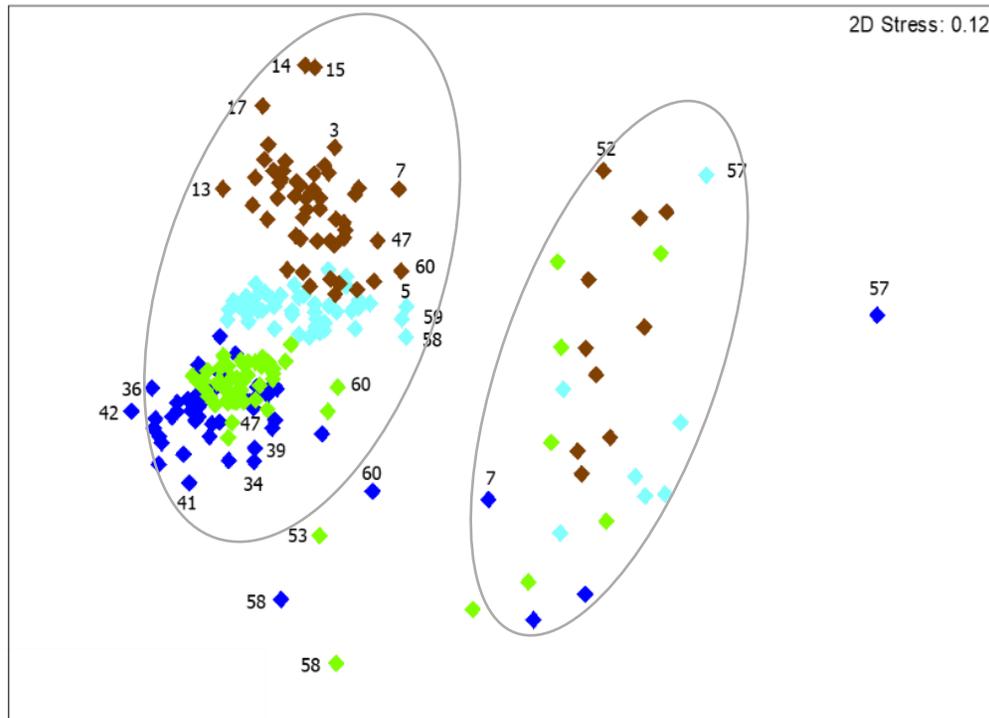


Figura 21. Resultados del análisis NMDS anual de los parámetros físico-químicos en Bahía Santa María-La Reforma.

6.6.2 Análisis NMDS del Índice Trófico TRIX

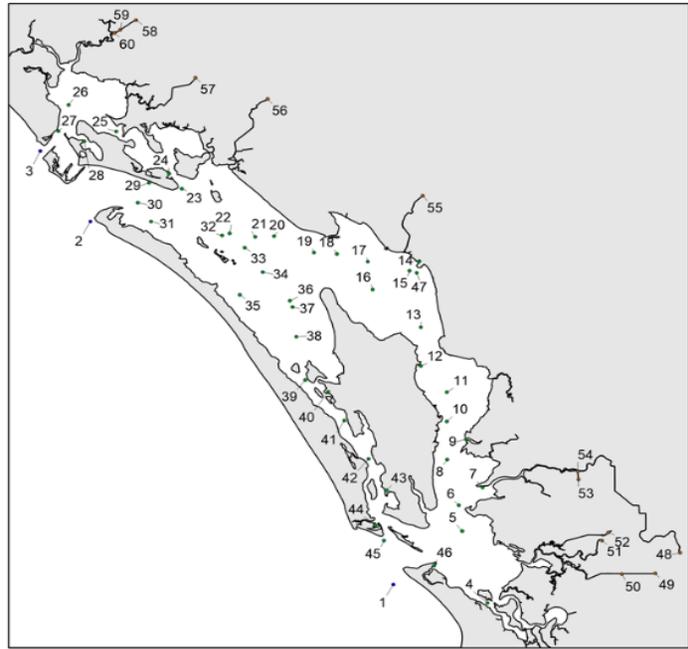
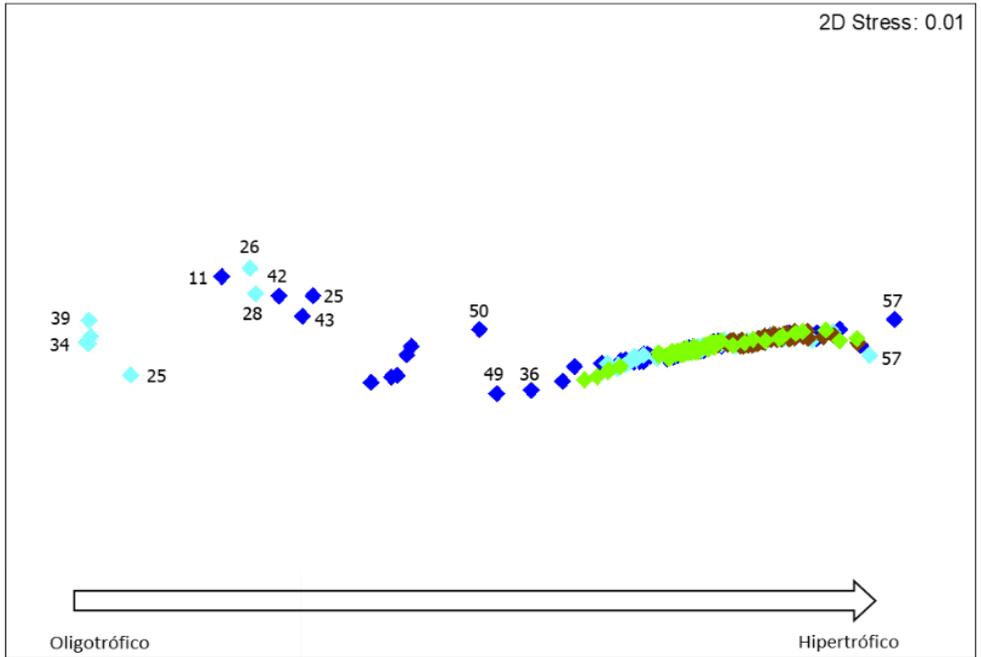
Por otra parte, se realizó un análisis NMDS con el fin conocer la similitud de los valores del índice trófico TRIX y representar de manera gráfica los valores obtenidos para las estaciones ubicadas en BSMR. En el análisis realizado para el índice trófico TRIX se obtuvo un valor de stress de 0.01 lo cual indica que existe mucha similitud entre los datos, por lo cual representarlos mediante este análisis es apropiado.

De acuerdo con los valores obtenidos para este índice de cada estación de muestreo en todas las épocas climáticas, se observa en la figura 22, que los valores del índice se alinean desde una condición oligotrófica en el extremo izquierdo hasta una hipertrófica en el extremo opuesto.

De las cuatro épocas muestreadas, la época de secas es la que mayor similitud del índice trófico TRIX presenta (Fig. 22). Por otro lado, las épocas que tuvieron estaciones con índices tróficos TRIX más dispersos fueron la época de lluvias y la de transición lluvias–secas. Durante el muestreo correspondiente a la época de lluvias, los drenes que se dispersaron más son la estación 57 ubicada al norte de BSMR y que destaca como una estación bajo una condición hipertrófica, por el lado contrario del agrupamiento se destacan las estaciones 49 y 50 ubicadas en la zona de drenes del sur conjuntamente con la estación 36 ubicada en la parte central de BSMR, la estación 25 ubicada al norte, las estaciones 42 y 43 ubicadas en el canal entre la isla Talchichiltle y Altamura y la estación 11 ubicada en el centro de BSMR la cual es la estación más alejada del resto, mostrando un estado oligotrófico.

Al igual que en la época de secas, durante la época de transición lluvias-secas destaca así mismo la estación 57 ubicada en los drenes del norte como la estación más dispersa posicionándose hacia el estado hipertrófico, el resto de las estaciones muestran un comportamiento en forma de línea con alta similitud entre las estaciones, con excepción de las estaciones 25, 26, 28 ubicadas al norte de BSMR, además de la estación 34 y 39 ubicadas en el canal entre las islas Talchichiltle y Altamura, destacándose como las estaciones más dispersas hacia el estado oligotrófico de las cuatro épocas climáticas.

Transform: Log(X+1)
Normalise
Resemblance: D1 Euclidean distance



Épocas climáticas

- ◆ Lluvias
- ◆ Transición lluvias - secas
- ◆ Secas
- ◆ Transición secas - lluvias

Figura 22. Resultados del análisis NMDS anual del índice trófico TRIX en Bahía Santa María-La Reforma

6.7 Regresión Múltiple Anual

De acuerdo con el análisis de regresión múltiple anual, el factor de correlación entre las variables independientes (NID, fósforo en forma de ortofosfatos, clorofila *a*, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto y la materia orgánica) para predecir la variable dependiente índice trófico TRIX fue de 0.676 con el 43.7% de la varianza de la variable dependiente es explicada por el conjunto de las variables independientes. El análisis arrojó un *p*-valor menor a <0.05 , lo cual permite confirmar que el modelo predice el comportamiento de la variable índice trófico TRIX.

Las variables independientes que predicen el comportamiento anual del índice trófico TRIX (valores en color rojo en el cuadro) son NID, fósforo en forma de ortofosfatos, clorofila *a*, salinidad y materia orgánica, indicando que, si las demás variables se mantienen constantes, por cada punto de incremento en NID o fósforo en forma de ortofosfatos, hay 0.33 puntos de incremento en la variable dependiente y por cada punto de incremento en clorofila *a* hay 0.15 puntos de incremento en la variable dependiente. Por otro lado, por cada punto de incremento en la salinidad, hay 0.15 puntos de disminución en la variable dependiente índice trófico TRIX, mientras que, con cada punto de incremento en la materia orgánica, hay 0.10 puntos de incremento en el índice trófico TRIX.

A lo largo del año, el estado trófico de BSMR se modifica paulatinamente mostrando condiciones hipertróficas en época de secas, mesotróficas en lluvias y condiciones intermedias durante las épocas de transición. La condición trófica no solo depende de la época climática y ubicación geográfica de las estaciones de muestreo, también es importante considerar los diferentes impactos causados por las actividades antropogénicas que se llevan a cabo dentro y en los alrededores de BSMR. Como ha sido señalado por Lara-Lara *et al.* (2008), los cuerpos costeros en México se encuentran sujetos a diversas presiones antropogénicas como la pesca, acuicultura, agricultura, minería, turismo y crecimiento urbano, que los han llevado a desarrollar un alto grado de contaminación y a perder o disminuir los servicios ecosistémicos que brindan.

Cuadro 6. Resultados de la regresión múltiple anual para Bahía Santa María-La Reforma.

Resumen de regresión para variable dependiente: TRIX
R= .67634945 R²= .45744858 R² Ajustado= .43753844 F(8,218)= 22.976
p<.00000 Error típico: .16087

N= 227	Beta	Error típico de Beta	Coefficientes	Error típico	t(218)	p-valor
Intercepción			0.345622	0.08136	4.24804	0.000032
NID	0.258159	0.071563	0.330804	0.0917	3.60746	0.000383
Ortofosfatos	0.264164	0.078654	0.325591	0.096943	3.35857	0.000925
Clorofila <i>a</i>	0.137336	0.060691	0.15554	0.068736	2.26287	0.024629
Temperatura	0.070996	0.056385	0.072713	0.057748	1.25913	0.209329
Salinidad	-0.187435	0.08056	-0.152159	0.065398	-2.32667	0.020901
OD	0.12948	0.07896	0.133294	0.081285	1.63983	0.102483
ABS SAT	-0.018428	0.081557	-0.014505	0.064197	-0.22595	0.821451
MO	0.127585	0.056699	0.107265	0.047669	2.2502	0.025434

BSMR presenta condiciones mesotróficas en la mayoría de las estaciones en las épocas de lluvias y transición secas-lluvias, estos resultados son similares a los reportados por López-Aguilar (2006) donde señala que la mayoría de las estaciones presentaron un estado mesotrófico, sin embargo, un poco más del 20% de las estaciones analizadas presentaron condiciones eutróficas. Mientras que en la época de transición lluvias-secas la mayoría de las estaciones presentaron un estado eutrófico y en la época de secas un estado hipertrófico.

Referente al modelo de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) el cual es un enfoque de análisis de gradiente indirecto que produce una ordenación basada en una matriz de distancia o disimilitud, el modelo nos indica que de acuerdo a los valores de Stress obtenido para los parámetros físico-químicos y del índice trófico TRIX, se concluye que existe buena similitud entre los datos (Buttigieg y Ramette, 2014; Guerrero-Casas y Ramírez-Hurtado, 2012). Para la representación de los parámetros físico-químicos se observaron dos agrupamientos de acuerdo a la ubicación de las estaciones muestreadas, uno para las estaciones ubicadas en las bocas y el sistema laguna y otro para las estaciones ubicadas en los drenes. El análisis NMDS complementa lo observado en los resultados obtenidos para los diferentes parámetros en cada época climática en donde se cuantificaron concentraciones diferentes entre estos dos grupos de estaciones, consecuencia de las descargas provenientes de la agricultura, acuicultura y aguas residuales.

En cuanto al NMDS para el índice trófico TRIX se observa una representación lineal para las

estaciones muestreadas, abarcando los cuatro estados tróficos. Sin embargo, se generó un mayor agrupamiento de estaciones dentro del rango de mesotrófico a eutrófico, estados que concuerdan con lo descrito por la mayoría de las referencias que se tiene para BSMR y sistemas lagunares costeros similares (Garay-Moran, 2002; López-Aguiar, 2006; Del Rio-Chuljak, 2006; Martínez-López *et al.*, 2013; Romero *et al.*, 2014; Medina-Galván *et al.*, 2022).

Para ambos análisis NMDS ya mencionados, la época climática con mayor similitud entre estaciones fue la de transición secas-lluvias, en la cual las actividades antropogénicas que se realizan en esta época se encuentran en la parte final de su ciclo, las condiciones de precipitación escasas y la temperatura en aumento. Por otra parte, las estaciones que estuvieron más dispersas de los conjuntos fue la estación 7 ubicada en la desembocadura del estero El Tule en donde a partir del año 2004 recibe los escurrimientos de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales de Culiacán a través de dicho estero (Páez-Osuna *et al.*, 2007), y la 57 ubicada en uno de los drenes del norte con actividad agrícola, presentando concentraciones de clorofila *a*, NID, PO₄ y valores del índice trófico TRIX altos en la mayoría de las épocas climáticas. Estas observaciones concuerdan con lo señalado previamente por (Boland *et al.*, 1993; Ferreira *et al.*, 2007; Smith, 2003), que indica que las descargas de aguas residuales domésticas junto con los efluentes de la acuicultura y la agricultura constituyen la principal fuente de nitrógeno y fósforo antropogénico que ocasionan el deterioro de la calidad del agua costera y marina.

Los análisis de regresión múltiple realizados para este trabajo muestran que los factores bióticos y abióticos que contribuyen en mayor proporción para explicar la variación del estado trófico son el NID, fósforo en forma de ortofosfatos, clorofila *a*, y salinidad. De estos parámetros, destaca la concentración de clorofila *a* como la variable que contribuye a explicar la variación del índice trófico TRIX, independientemente de la época climática muestreada. La concentración de clorofila *a* es una variable de respuesta a los cambios en las proporciones de los nutrientes, lo cual puede afectar las comunidades de fitoplancton, como ha ocurrido en lagunas impactadas por aguas residuales en el Golfo de California (Alonso-Rodríguez y Páez-Osuna, 2003).

El comportamiento del estado trófico en Bahía Santa María-La Reforma es consecuencia de la época climática, el aporte de nutrientes y materia orgánica provenientes de actividades tales como agricultura, acuicultura y descargas de aguas residuales conjuntamente con procesos de intercambio de agua. En conjunto, estos factores modifican el funcionamiento y balance del sistema el cual de acuerdo con Romero *et al.* (2014), presenta un comportamiento autotrófico, donde los

flujos de nitrógeno indican que el sistema lagunar actúa como fuente de nitrógeno y los flujos de fósforo indican que el sistema lagunar funciona como sumidero de fósforo.

El sistema lagunar Bahía Santa María–La Reforma presenta diferentes estados de eutrofización, dependiendo tanto de condiciones ambientales, ubicación geográfica de las estaciones muestreadas, época climática, así como de la actividad antropogénica que se realiza en los alrededores y al interior del área de estudio. Como resultado de la información obtenida y de los análisis realizados en este trabajo se consideran los siguientes factores como aquellos que contribuyen a definir la condición trófica de BSMR.

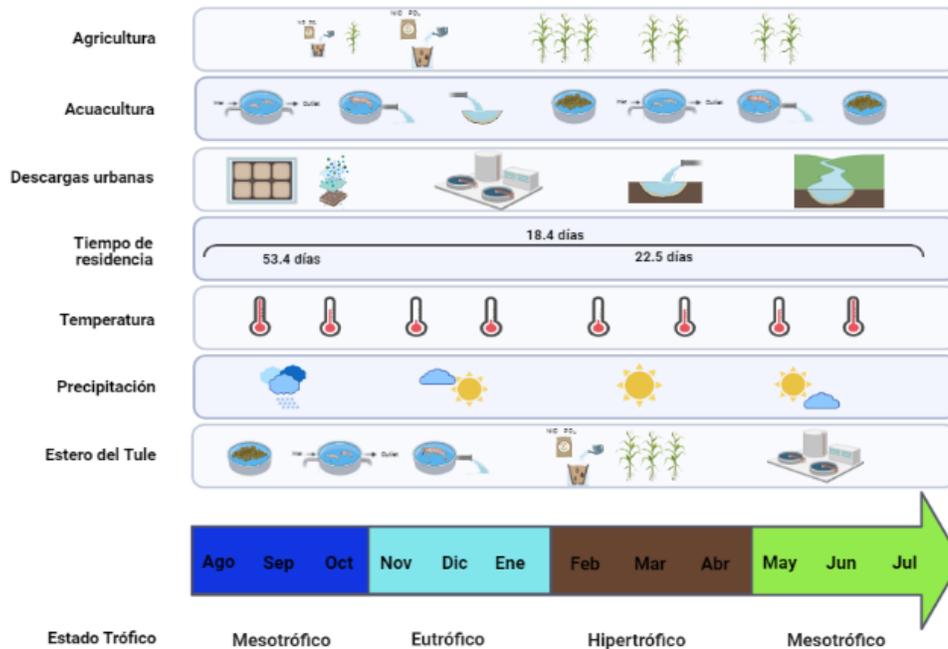
1) Impacto de la agricultura sobre BSMR

La agricultura es uno de los principales factores antropogénicos responsable de la variación del estado trófico en BSMR (Fig. 23). La cuenca del río Mocerito la cual es la cuenca inferior de drenaje asociada a BSMR, tiene una extensión de 782,674 ha donde se desarrolla una agricultura de riego y temporal, cubriendo 193,481 ha y 184,547 ha, respectivamente (Páez-Osuna *et al.*, 2007). Entre los cultivos que se realizan en el área de estudio se encuentra el maíz, frijol, garbanzo, sorgo y cebolla, siendo el maíz el cultivo más importante en la región (Pronatura Noroeste A. C., 2022; Páez-Osuna *et al.*, 2007). Como ha sido mencionado en la introducción para el sector agrícola, las prácticas comunes de fertilización de los diferentes cultivos generan importantes pérdidas de nitrógeno y desperdicio de agua (Turner *et al.*, 2003).

De acuerdo con lo reportado por Pronatura Noroeste A. C. (2022) en los alrededores de BSMR la mayoría de los cultivos se desarrollan entre noviembre y febrero. Sin embargo, para algunos cultivos como el maíz su producción se extiende durante los meses restantes para ser cosechado entre mayo y junio. Por otra parte, una cantidad más pequeña de cultivos son realizados de junio a octubre.

Durante la época de transición lluvias-secas se presentaron condiciones tróficas de oligotróficas a eutróficas en las estaciones ubicadas en las bocas y el sistema lagunar con algunas de las estaciones muestreadas al norte, sur y una ubicada cerca de La Reforma mostrando una condición hipertrófica. Posiblemente estos resultados se deban a esta actividad antropogénica, dado que con base en las entrevistas realizadas a productores agrícolas pertenecientes al área de estudio (Pronatura Noroeste A. C., 2022), se menciona que el cultivo de maíz y garbanzo comienza en el mes de noviembre, mientras que el de frijol está en curso durante esta época climática. Adicionalmente se concluye que el primer riego se realiza a los 60 días después de sembrar, llevándose a cabo la etapa de

fertilización entre los meses de septiembre a diciembre, lo cual concuerda con la información mencionada por García *et al.* (2018).



Created in BioRender.com bto

Figura 23. Factores responsables de la evaluación espacio-temporal del estado trófico en Bahía Santa María-La Reforma.

Otra de las épocas climáticas en la que se pueden ver los cambios debido a este factor es la época de secas, en la cual la mayoría de las estaciones presentaron condiciones hipertróficas. En lo que respecta a las estaciones de los drenes, todas obtuvieron condiciones hipertróficas. Dichas condiciones concuerdan con lo descrito anteriormente sobre la actividad agrícola ya que durante el mes de febrero la mayoría de los cultivos están en curso, a excepción del frijol el cual se cosecha en esta época. Diversos estudios han mostrado que las zonas costeras reciben los efluentes tanto de aguas residuales urbanas como de la agricultura los cuales constituyen la principal fuente de nitrógeno y fósforo antropogénico que ocasionan el deterioro de la calidad del agua costera y marina (Boland *et al.*, 1993; Ferreira *et al.*, 2007; Smith, 2003).

Referente a los drenes muestreados durante la época de transición secas-lluvias, algunas de ellos obtuvieron condiciones eutróficas en el norte y sur del área de estudio, si bien la mayoría de ellos

presentaron condiciones hipertróficas. Estos resultados pueden ser reflejo de la actividad agrícola que se realiza en la zona, durante esta época se continúa cultivando maíz mientras algunos otros agricultores se encuentra en proceso de cosecha del producto con las consiguientes descargas de nutrientes hacia los drenes agrícolas (Pronatura Noroeste A. C., 2022).

2) Impacto de la acuicultura sobre BSMR

Otra de las actividades económicamente importantes que se realizan en el área de estudio es la acuicultura (Fig. 23). Páez-Osuna *et al.* (2007) señalan que se encuentran instaladas alrededor de 7,724 ha de estanquería dedicadas al cultivo de camarón, principalmente en los extremos norte y sur de BSMR. De acuerdo con entrevistas a productores de la región, las unidades de producción se encuentran ubicadas en los márgenes de la bahía, por lo cual toman agua del sistema lagunar para su funcionamiento, mientras que las que se encuentran más retiradas utilizan agua producto de la mezcla de BSMR y de los drenes agrícolas, potencialmente con altas concentraciones de nutrientes.

Para esta zona, el cultivo de camarón es de tipo semi-intensivo y normalmente se realizan dos ciclos al año. La densidad de siembra varía entre 8 a 15 organismos por metro cuadrado (Fig. 23). El primer ciclo de producción tiene una duración entre 95 a 100 días durante los meses de febrero a mayo, mientras que el segundo ciclo tiene una duración entre 120 a 140 días, iniciando a finales de junio y terminando a mediados de noviembre. Entre ciclos de cultivo se lleva a cabo un vacío sanitario.

Durante las primeras semanas de cultivo de camarón, los camaronicultores realizan recambios diarios de agua del 3 al 5%, con excepción de cuando existe presencia de enfermedades o cuando la concentración de oxígeno en los estanques disminuye debido al incremento de la biomasa del cultivo. Bajo estas condiciones los recambios de agua se incrementan pudiendo llegar hasta el 15% diario.

En la época de lluvias, que corresponde con el inicio del segundo ciclo de cultivo de camarón, las bajas tasas de recambio de agua implican bajas concentraciones de nutrientes principalmente en los drenes de la zona sur de BSMR.

Las condiciones tróficas presentadas en la época de secas son resultado de las altas concentraciones obtenidas en los diferentes parámetros medidos, entre ellos destacan el incremento en las concentraciones de nitrógeno inorgánico disuelto, fósforo y clorofila *a*, provenientes de los efluentes acuícolas. Referente a las concentraciones de fósforo Del Rio-Chuljak (2006) reporta

altas concentraciones de este nutriente durante la temporada de secas, principalmente en la parte norte de BSMR, debido a la gran actividad acuícola realizada en el área.

Otra de las épocas en las cuales los efluentes acuícolas modifican el estado trófico de BSMR se presenta durante la transición secas-lluvias. En esta época el ciclo de producción acuícola está concluyendo, motivo por el cual se estarían realizando recambios de agua más frecuentes y de mayor volumen, lo que contribuye a incrementar la concentración de nutrientes y materia orgánica en los efluentes de las unidades de producción acuícola.

3) Impacto de las descargas urbanas sobre BSMR

Una de las problemáticas presentes de las zonas costeras en años recientes es la contaminación debido a los efluentes de la industria, tratamiento inadecuado de las aguas residuales y otros residuos arrojados a dicha zona, conjuntamente con escurrimientos superficiales (Fig. 23). BSMR no es la excepción, entre los efluentes que recibe se encuentran aquellos provenientes de descargas urbanas y rurales en los drenes conjuntamente con aquellas del estanque de estabilización que trata las aguas residuales domésticas de La Reforma. Adicionalmente es importante considerar los escurrimientos provenientes del río Mocorito y conjuntamente con los de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales de Culiacán a través del estero El Tule (Páez-Osuna *et al.*, 2007) (Fig. 23). Estas descargas pueden aportar altas concentraciones de nutrientes, materia orgánica, plaguicidas, metales pesados entre otros (Martínez *et al.*, 2017) e impactar directamente sobre el estado trófico de BSMR.

4) Impacto del tiempo de residencia sobre BSMR

Otro de los factores que deben considerarse para definir el estado trófico en BSMR es el tiempo de residencia del agua. El tiempo de residencia indica la cantidad de tiempo que debe pasar para que el agua contenida en un cuerpo de agua sea reemplazada, ésta se encuentra asociada con la temperatura y precipitación del sistema lagunar. Tiempos de residencia largos permiten que los nutrientes sean incorporados por el fitoplancton a través de fotosíntesis incrementando la biomasa y la concentración de clorofila *a* (Medina-Galván *et al.*, 2022) a diferencia de tiempos de residencia cortos.

La precipitación para BSMR es baja durante los meses de enero a febrero y escasa desde marzo hasta junio, provocando que no exista un alto nivel de esorrentía del agua, incrementando el tiempo de residencia del agua y tiempos de residencia más cortos durante la temporada de secas. De acuerdo con lo reportado por Martínez-López *et al.* (2013) en BSMR la proporción de mezcla

respecto al volumen de la laguna determina un tiempo de recambio de 53.4 días para lluvias y 22.5 días en secas, durante el cual toda el agua de la laguna es reemplazada. Sin embargo, el tiempo de residencia anual es de 18.4 días (Romero *et al.* (2014) lo cual indica que los tiempos de residencia suelen variar tanto espacial como temporalmente a lo largo del ciclo anual. (Fig. 23).

5) Impacto de la temperatura sobre BSMR

Los resultados obtenidos para la evaluación del estado trófico de BSMR muestran diferencias de temperatura entre las estaciones, dicha variación se debe a las diferentes profundidades presentadas en las estaciones de muestreo y la incidencia de radiación solar presente en ellas. La hidrodinámica del sistema lagunar Bahía Santa María-La Reforma es uno de los factores que influyen sobre la temperatura, ya que las zonas más someras se encuentran en la zona más alejadas de las bocas, donde la temperatura es mayor y las tasas de recambio son menores (Del Rio-Chuljak, 2006), lo cual concuerda con los resultados obtenidos en este estudio. Los promedios de temperatura del agua registrados para cada época climática concuerdan con los rangos obtenidos en la variación histórica de temperatura ambiente y precipitación para BSMR obtenida de la red de estaciones climatológicas de CONAGUA (Fig. 2) donde se observa la temperatura ambiente más bajas durante los primeros tres meses del año, incrementándose paulatinamente desde abril hasta junio para alcanzar un máximo en julio y mantenerse aproximadamente constante a esa temperatura hasta finales de septiembre.

6) Impacto de la precipitación sobre BSMR

Otro de los factores a considerar para definir el estado trófico son las condiciones climáticas presentes en BSMR. Diferencias de salinidad entre épocas climáticas y estaciones de muestreo son resultado del efecto combinado de la precipitación y evaporación. La variabilidad de este parámetro muestra una relación entre los valores obtenidos y la ubicación de las estaciones. Las variaciones de salinidad en la zona de estudio son producto del desfase de las mareas entre las bocas del sistema y los diferentes puntos dentro de ella, adicionalmente a la reducida profundidad en BSMR, lo que permite que se lleve a cabo un rápido calentamiento de la columna de agua, se incremente la evaporación y, por lo tanto, que se modifique la salinidad (López-Aguiar, 2006).

7) Impacto del estero El Tule sobre BSMR

Los resultados y análisis de los parámetros físico-químicos y del estado trófico en las cercanías de la descarga del dren El Tule son consistentemente elevadas con respecto a las otras estaciones. Dicha área se encuentra ubicada en la parte sur de BSMR, cubierto por área de manglar y ubicado

en el municipio de Navolato, estero al que llegan los efluentes de aguas residuales, agricultura, acuacultura y escurrimientos de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales de Culiacán a partir del 2004 (Páez-Osuna *et al.*, 2007) (Fig. 23).

7. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para la evaluación del estado trófico del sistema lagunar Bahía Santa María-La Reforma muestran diferencias en los parámetros físico-químicos para las diferentes épocas climáticas, los cuales varían en respuesta a las diferentes condiciones tanto espaciales como estacionales.

En la época de lluvia se obtuvo un estado mesotrófico en la mayoría de las estaciones, lo cual se relaciona con características del agua moderadamente productivas y un nivel trófico medio. Durante la época de transición lluvias-secas la mayoría de las estaciones presentaron condiciones eutróficas lo cual significa una productividad biológica entre moderada y alta, y nivel de estado trófico alto. Las condiciones tróficas presentadas en la mayoría de las estaciones muestreadas durante la época de secas presentaron condiciones hipertróficas. Para la época transición secas-lluvias las condiciones tróficas variaron para las estaciones ubicadas dentro del sistema lagunar, destacándose la mayoría en estado mesotrófico distribuidas en toda el área lagunar. El estado trófico presentado en los drenes fue muy marcado de acuerdo a los residuos provenientes de las actividades antropogénicas que se realizan en las zonas aledañas a cada uno de los drenes.

Se destaca el área de estudio correspondiente a la zona cercana al canal El Tule tanto en las estaciones en el interior del sistema lagunar como en los drenes debido a que presenta condiciones tróficas altas muy marcadas, las cuales corresponden al resultado de las actividades antropogénicas, contaminación y residuos que desembocan a este canal que a un ciclo anual del estado trófico como sucede en la mayoría del resto de las estaciones. Durante las épocas de lluvias y secas se presentan condiciones hipertróficas, mientras que en la época de transición lluvias-secas presenta estado eutrófico y durante la época de transición secas-lluvias un estado mesotrófico.

La época climática con mayor similitud fue la de transición secas-lluvias, en la cual las actividades antropogénicas que se realizan en esta época están en la parte final de su ciclo, las condiciones de precipitación son escasas y la temperatura va en aumento. Por otra parte, las estaciones que estuvieron más dispersas de los conjuntos fue la 7 ubicada en la desembocadura del estero El Tule en donde a partir del año 2004 recibe los escurrimientos de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales de Culiacán a través de dicho estero (Páez-Osuna et al., 2007), y la 57 ubicada en uno de los drenes del norte con actividad agrícola, presentando concentraciones de

clorofila *a*, NID, fósforo en forma de ortofosfatos y valores del índice trófico TRIIX altos en la mayoría de las épocas climáticas.

Para la representación de los parámetros físico-químicos se observaron dos agrupamientos de acuerdo a la ubicación de las estaciones muestrales, uno para las estaciones ubicadas en las bocas y el sistema laguna y otro para las estaciones ubicadas en los drenes, lo cual rectifica lo observado en las gráficas de los diferentes parámetros en cada época climática en donde se observan concentraciones diferentes entre estos dos grupos de estaciones lo cual se debe a la radiación solar, cantidad de agua, flujo y actividades realizadas cerca de los drenes.

A lo largo del año BSMR presenta los 4 estados tróficos de acuerdo a las diferentes épocas climáticas, ubicación geográfica de las estaciones y a los factores antropogénicos que se llevan a cabo dentro y a los alrededores del sistema lagunar. De acuerdo con el NMDS del índice trófico TRIIX se tuvo un mayor agrupamiento de las estaciones en los estados de mesotrófico a eutrófico. De acuerdo a los análisis estadísticos realizados para este estudio se puede concluir que los factores bióticos y abióticos que mayor contribuyen y predicen la variación del estado trófico en BSMR son el NID, fósforo en forma de ortofosfatos, clorofila *a*, y salinidad. Destacándose la clorofila *a* como factor en todas las épocas climáticas debido a que es una variable de respuesta a los cambios en las proporciones de los nutrientes, Además, la variación en la concentración de los nutrientes y la salinidad se ve reflejada debido al aporte obtenido en BSMR por las actividades agrícolas y acuícolas realizadas en el área de estudio, en conjunto con el funcionamiento del metabolismo y balance del sistema.

Como resultado de la información colectada y de los análisis realizados en este trabajo se considera a la agricultura, acuicultura, descargas urbanas, tiempo de residencia, temperatura, precipitación y el estero El Tule, como los factores que contribuyen a definir la condición trófica de BSMR.

8. RECOMENDACIONES

Incrementar el esfuerzo en la investigación científica acerca de la condición ambiental de los cuerpos de agua costeros sometidos a presión antropogénica por el vertimiento de aguas residuales sin tratamiento.

Implementar estrategias de manejo de acuerdo a las necesidades específicas de cada zona costera. Cumplir con las normas y criterios establecidos para los cuerpos de agua costeros existentes en México.

Dar a conocer y hacer valer las estrategias de manejo y normas a los productores y personas que trabajan en las actividades que se realizan y contribuyen a los cambios en las condiciones ambientales de dichas zonas.

Darles un buen seguimiento e interés a las estrategias de manejo actuales por parte de los encargados de las tomas de decisiones.

Poner a disposición las investigaciones y resultados obtenidos en los temas de condición ambiental en zonas costeras.

Realizar campañas para fomentar el interés público hacia los temas de contaminación y manejo en las zonas costeras.

9. BIBLIOGRAFIA

- Acosta-Velázquez J. y Vázquez-Lule A. D. 2009. Caracterización del sitio de manglar Santa María – La Reforma, en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F.
- Alonso-Rodríguez R. y Páez-Osuna F. 2003. Nutrients, phytoplankton and harmful algal blooms in shrimp ponds: a review with special reference to the situation in the Gulf of California. *Aquaculture* 219:317-336.
- Arenas-Fuentes V. 1970. Hidrología y productividad en el área de Escuinapa–Yavaros. En: Informe final de los trabajos contratados en los plantes piloto de Escuinapa-Yavaros México. Instituto de Biología, UNAM, México: 191–233.
- Barraza-Guardado R.H, Martínez-Córdova L. R., Enríquez-Ocaña L. F., Martínez-Porchas M., Miranda-Baeza A. y Porchas-Cornejo A. 2014. Efecto de efluentes de granjas camaronícolas sobre parámetros de la calidad del agua y del sedimento frente a la costa de Sonora, México. *Ciencias Marinas* 40 (4): 221-235. DOI: 10.7773/cm.v40i4.2424.
- Barreto L., Barros F., Bonomo P., Rocha F. y Amorim J. 2013. Eutrofização em ríos brasileiros. *Enciclopedia Biósfera*, 9(16), 2179 pp.
- Boland J. J., Anderson B., Brooks N. H., Eichbaum W. M., Goldman L. R., Harleman D. F., Howarth R., Huggett R. J., Keinath T. M., Mearns A. J., O'melia C., Roesner L. A., Rose J. and Schubel J. R. 1993. Managing wastewater in coastal urban areas. Committee on wastewater management for coastal urban areas National Research Council. National Academy of Sciences. USA. 478 pp.
- Boyd C. E. and Tucker C. S. 1992. Water quality and pond soil analyses for aquaculture. Auburn University. Alabama. 183 pp.
- Buttigieg P. L. and Ramette A. 2014. A guide to statistical analysis in microbial ecology: a community-focused, living review of multivariate data analyses. *FEMS Microbiology Ecology*, 90:543-550. doi: 10.1111/1574-6941.12437.
- Carta Nacional Pesquera, 2000. Diario Oficial de la Federación. 28 agosto de 2000. Tercera sección: 83-91.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. 2008. Buscador de trayectorias de ciclones CENAPRED. Consultado en: www.cenapred.unam.mx.
- Cloern J. E. 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210: 223-253.
- Conservación Internacional. 2003. Conservación y Desarrollo para Bahía Santa María, Sinaloa. Estrategia de Manejo. Comisión Conservación Desarrollo. Bahía Santa María, México. Consultado en: http://www.crc.uri.edu/download/BSMstrategy_final.pdf.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2012. Estudio Previo Justificativo para el establecimiento del área natural protegida con la categoría de Área de Protección de Flora y Fauna Bahía de Santa María, en el Estado de Sinaloa. 1ra ed. México: 142 pp.

- Contreras-Espinosa F., Castañeda-López O. y García-Nagoya A. 1994. La clorofila a como base para un índice trófico en lagunas costeras mexicanas. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología-UNAM*. 21 (1-2): 55-66.
- Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89. (1989). Diario Oficial de la Federación. Consultado en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989#gsc.tab=0.
- De la Lanza-Espino G. 1984. Materia orgánica en los sedimentos del sistema lagunar Huizache y Caimanero: importancia, comportamiento y significado en modelos de predicción. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología. Consultado en: <http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1986-1/articulo203.html>.
- De la Lanza-Espino G., Alcocer-Durand J., Moreno-Ruiz J. R. y Hernández-Pulido S. 2008. Análisis químico-biológico para determinar el estatus trófico de la Laguna de Tres Palos, Guerrero, México. *Hidrobiológica*, 18(1): 21-30.
- Del Río-Chuljak A. (2006). Distribución espacial y temporal de fósforo y silicio en aguas de las lagunas costeras de Sinaloa (tesis de maestría) Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Mazatlán, Sinaloa.
- Edwards R. R. 1978. Ecology of a costal lagoon complex en Mexico. *Estuarine Coastal Marine Science*, 6:75-92.
- Escobedo-Urías D. C. (2010). Diagnóstico y descripción del proceso de eutrofización en lagunas costeras del norte de Sinaloa (tesis doctoral). Instituto politécnico nacional. La Paz, Baja California Sur.
- Ferreira J. G., Bricker S. and Simas T. 2007. Application and sensitivity testing o fan eutrophication assessment method on coastal systems in the United States and European Union. *J. Environ. Manage.* 82:433-445.
- Garay-Morán R. (2002). Presupuesto global de la carga de nutrientes que reciben los sistemas lagunares costeros de Sinaloa, como herramienta para la gestión ambiental costera (tesis de Maestría). Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. Mazatlán, Sinaloa.
- García M., Goretti F. y Rosales V. 2018: Eutrofización, una amenaza para el recurso hídrico. Impacto socio-ambiental, territorios sostenibles y desarrollo regional desde el turismo. Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C, México.
- Giuliano-Girão E. M., Morsyleide-de Freitas R., Pereira-de Araújo L. F. y Maia-Meireles A. C. 2007. Seleção dos indicadores da qualidade de água no Río Jaibaras pelo emprego da análise da componente principal. *Revista Ciência Agrônômica*. 38 (1): 17-24.
- Glibert P. M. and Burkholder J. M. 2006. The complex relationships between Increases in fertilization of the earth, Coastal Eutrophication and proliferation of Harmful Algal Blooms. Granéli E. & J. T. Turner (Eds.). *Ecology of Harmful Algae. Ecological Studies*. 189: 341-354.
- González-Hernández A. D. y López-Monroy F. 2020. Modelaje de la interacción entre el humedal RAMSAR laguna de La Restinga (Isla de Margarita, Venezuela) y el Mar Caribe. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas. Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela*. 54 (2).

- Guerrero-Casas F. M. y Ramírez-Hurtado J. M. 2012. El análisis de escalamiento multidimensional: una alternativa y un complemento a otras técnicas multivariantes. *La sociología en sus escenarios*. 25.
- Gurrola-López G.H., Castañeda Lomás N., Rivera Rodríguez L. B., Partida Ruvalcaba R. and Heredia Pineda F. J. 2016. Diversity and Abundance of Birds in Agricultural Zone Associated to the Bay Santa María La Reforma, Sinaloa, Mexico. 3.
- Herrera-Silveira J. 2006. Lagunas costeras de Yucatán (SE, México): investigación, diagnóstico y manejo. *Ecotropicos*. 19(2): 94-108. doi: 94-108 2006.
- Hutchinson G. E. 1973. Eutrophication. *American Scientist*. 61: 269-279.
- INEGI. (2010). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Humedales potenciales. Escala 1:250 000. Recuperada de <http://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825006728>
- Lankford R. R. 1977. Coastal Lagoons of Mexico, Their Origin and Classification. In: Wiley M. (Ed.). *Estuarine Process. Vol. II: Circulation, Sediments and Transfer of Material in the Estuary*. Academic Press, New York. 183-215 pp.
- Lara-Lara J. R., Arreola-Lizárraga J. A., Calderón-Aguilera L. E., Camacho-Ibar V. F., De La Lanza-Espino G., Escofet A., Espejel-Carvajal M. I., Guzmán-Arroyo M., Ladah L. B., López-Hernández M., Meling-López A. E., Moreno-Casasola-Barceló P., Reyes-Bonilla H., Ríos-Jara E., y Zertuche-González J. A. 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. *Capital Natural de México. Conocimiento actual de la biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 1:109-134
- Ledesma C., Bonansea M., Rodríguez C. y Sánchez A. 2013. Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina), *Ciencia Agronómica*. Argentina. 44: 419-425
- Lithgow-Serrano A. D., Moreno-Casasola P., Martínez-Vázquez M. L., Martínez-Martínez R. E., Silva-Casarín R., Vázquez-Hurtado G., López-Portillo J. A., Mendoza-Baldwin E., Monroy-Ibarra R. C., Ramírez-Hernández A., Boy-Tamborrell M. y Cáceres-Puig J. I. 2017. La zona costera del municipio Gutiérrez Zamora. Instituto de Ecología, A. C. Primera edición. México. 36 pp.
- López-Aguilar L. K. (2006). Distribución espacial y estacional de las principales especies químicas del nitrógeno en aguas de las lagunas costeras de Sinaloa (tesis de maestría). Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Mazatlán, Sinaloa.
- LQyPA-PM-001. Muestreos de aguas. 12-09-2000. Edición 1. Laboratorio de Química y Productividad Acuática. CIAD Unidad Mazatlán.
- Margalef R., Planas A., Armengol J., Vidal A., Prat N., Guiset A., Tija J. y Estrada M. 1976. *Limnología de los embalses españoles*. Ministerio de obras Públicas. España. 422 pp.
- Marinone S. G., Parés-Sierra A., Castro R. and Máscarenhas A. 2004. Correction to Temporal and Spatial variation of the surface winds in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters* 31.
- Martínez-López A., Escobedo-Urías D. C., Chiquete-Ozono A. Y. y Bañuelos-Valles J. L. 2013. *Estudio Ambiental – Estudio de capacidad de carga de la actividad acuícola en el Sistema*

lagunar Santa María. Comisión nacional de áreas naturales protegidas

- Medina-Galván J. (2010). Características hidrológicas de los sistemas lagunares El Rancho-Empalme y balance biogeoquímico del sistema El Rancho, Sonora, México (tesis de maestría). Instituto tecnológico de Guaymas, Sonora.
- Medina-Galván, J., C.C. Osuna-Martínez, G. Padilla-Arredondo, M.G. Frías-Espericueta, H.R. Barraza-Guardado, J.A. León-Cañedo y J.A. Arreola-Lizárraga. 2022. Estado trófico, dinámica de nutrientes y metabolismo neto de una laguna costera receptora de aguas residuales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. En prensa.
- Merrifield M. A. and Winant C. D. 1989. Shelf circulation in the Gulf of California: a description of the variability. *Journal of Geophysical Research* 94:8133-18160.
- Molina-Pacheco L. B. (2018). Tiempo de residencia, condición limnológica y calidad de agua del embalse La Chapa Santana – Boyacá (tesis de grado) Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia facultad de ingeniería ambiental.
- Morales-Soto J. C., Valdez-Holguín J. E. y Cervantes-Duarte R. 2000. Cambio diurno estacional de la clorofila a y algunas variables fisicoquímicas en la laguna de La Cruz, Sonora, México. *Oceánides*, 15(1): 25-33.
- Moreta J. C. (2008). La eutrofización de los lagos y sus consecuencias (tesis pregrado). Universidad técnica del norte. Ibarra, Ecuador.
- Muciño R., Aguirre A. y Figueroa 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.
- Nebel B. J. y Wright R. T. 1999. *Ciencias Ambientales: Ecología y Desarrollo Sostenible*. 6th ed. México: Pearson-Prentice Hall. 698 pp.
- NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.
- NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo
- Páez-Osuna F., Ramírez-Reséndiz G., Ruiz-Fernández A. y Soto-Jiménez M. 2007. La contaminación por nitrógeno y fósforo en Sinaloa: Flujos, fuentes, efectos y opciones de manejo. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Lagunas costeras de Sinaloa: 121-128.
- Parsons T., Maita C. and Lally C. (1984). *A manual of chemical and biological methods of seawater analysis*. Pergamon Press. 1st Edition. Oxford. 184 pp.
- Penna N., Cappellacci S. and Ricci F. 2004. The influence of the Po River discharge on phytoplankton bloom dynamics along the coastline of Pesaro (Italy) in the Adriatic Sea. *Marine Pollution Bulletin* 48: 321-326. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2003.08.007
- Pereira, Kraemer y Yarish. 2008. Absorción de nitrógeno por gametofitos de *Porphyra dioica* (*Bangiiales, Rhodophyta*) en condiciones de cultivo controlado. Egipto. *J. Phycol.* 43: 107-118.
- Pronatura Noroeste A. C. (2022). Aplicación de encuestas de uso de agroquímicos en el Módulo

- de Riego V-1. Localidades: Zapotillo, Chinitos, Gato de Lara, La Reforma. Ana Graciela Carvajal Peraza, encuestadora [Conjunto de datos].
- U. S. Environmental Protection Agency. 1975. Process Design Manual: Nitrogen Control. Office of technology transfer. Washington DC. 27 pp.
- Ruiz-Ruiz T. M. (2017). Análisis comparativo de índices de eutrofización en lagunas costeras del estado de Sonora, México (tesis doctoral). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California Sur.
- Romero-Beltrán E., Aldana-Flores G., Muñoz-Mejía E. M., Medina-Osuna P. M., Valdez-Ledón P., Bect-Valdez J. A., Gaspar-Dillanes M. T., Huidobro-Campos L., Romero-Correa A., Tirado-Figueroa E., Saucedo-Barrón C. J., Osuna-Bernal D. A. y Romero-Mendoza N. 2014. Informe de Investigación: Estudio de la calidad del agua y sedimento en las lagunas costeras del estado de Sinaloa, México. Instituto Nacional de Pesca, Instituto Sinaloense de Acuacultura y Pesca. 191 pp.
- Salas F., Teixeira H., Marcos C., Marqués J. C. and Pérez-Ruzafa A. 2008. Applicability of the trophic index TRIX in two transitional ecosystems: the Mar Menor lagoon (Spain) and the Mondego estuary (Portugal). ICES Journal of Marine Science 65: 1442-1448. DOI: 10.1093/i7cesjms/fsn123.
- Silva R., Martínez M. L., Moreno-Casasola P., Mendoza E., López-Portillo J., Lithgow D., Vázquez G., Martínez-Martínez R. E., Monroy-Ibarra R., Cáceres-Puig J. I., Ramírez-Hernández A., Boy-Tamborell M. 2017. Aspectos generales de la zona costera. UNAM; INECOL. 54 pp.
- Smayda T. J. 2005. Eutrophication and phytoplankton. In: Wassmann. P. & K. Olli (Eds.). Drainage Basin Nutrient Inputs and Eutrophication: An Integrated Approach. Norway: 89-98.
- Smith V. H. 2003. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem. Environmental Science and Pollution Research. 10:126-139.
- Smith V. H., Tilman G.D. and Nekola J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. Environmental Pollution. 100 : 179-196.
- Turner B. L., Matson P. A., McCarthy J. J., Corell R. W., Christensen L., Eckley N., Hovelsrud-Broda G. K., Kasperson J. X., Kasperson R. E., Luers A., Martello M. L., Mathiesen S., Naylor R., Polsky C., Pulsipher A., Schiller A., Selin H. and Tyler N. 2003. Illustrating the coupled human-environment system for vulnerability análisis: three case studies. PNAS. 100:8080-8085.
- Vollenweider R. 1970. Les bases scientifiques de l'eutrophisation des lacs et des eaux courantes sous. 217 pp.
- Vollenweider R., Giovanardi F., Montanari G. and Rinaldi A. 1998. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the new adriatic sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. Environmetrics: 329-357.