CINVESTAV-IPN
Unidad Mérida

PROGRESO
COORDINACIÓN GENERAL DE PUERTOS Y MARINA MERCANTE

"MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE ECOSISTEMAS COSTEROS DE PROGRESO Y ACCIONES DE RESTAURACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LA RECUPERACIÓN DEL ECOSISTEMA MANGLAR EN YUCATAN, 2019"

INFORME FINAL: PUERTO DE ALTURA DE PROGRESO 2019

Participantes:

Dr. Jorge A. Herrera Silveira (Coordinador)
Biól. Javier Ramírez Ramírez
Dr. Israel Medina Gómez
Biól. Oscar J. Pérez Martínez
M. en C. Iliana Osorio M.

Este documento debe citarse:

Herrera-Silveira, J.A., Ramírez-Ramírez J., Medina-Gómez, I., Pérez-Martínez, O. J. y Osorio, M.I. 2019. **"**MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE ECOSISTEMAS COSTEROS DE PROGRESO Y ACCIONES DE RESTAURACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LA RECUPERACIÓN DEL ECOSISTEMA MANGLAR EN YUCATAN, 2019". Informe Final: Puerto de Altura de Progreso. Diciembre 2019. CINVESTAV-API: CONTRATO: API-GAF-GOI-003-19. 55 pp.

Diciembre 2019

CONTENIDO

1. INTRODUCCION **3**

2. OBJETIVOS **6**

3. IMPORTANCIA DEL PROYECTO **6**

4. COMPONENTE CALIDAD DE AGUA: PUERTO DE ALTURA DE PROGRESO **7**

4.1 ESTRATEGIA: Materiales y Métodos **7**

4.1.1 Área de estudio **7**

4.1.2. Trabajo de campo y obtención de muestras **7**

4.1.3. Análisis de Laboratorio **8**

4.1.4. Análisis de datos **10**

5. RESULTADOS **11**

5.1. Calidad de agua "Zona Adyacente al Puerto de Altura" **11**

6. CONSIDERACIONES FINALES **52**

7. REFERENCIAS **54**

1. INTRODUCCION

Los sistemas costeros de la península de Yucatán cuentan con gran riqueza tanto biológica como escénica, lo cual se relaciona con la dinámica hidrológica existente en ellos, así como a la diversidad ecológica. Sin embargo, actualmente estos ambientes están sufriendo los efectos de la mala planeación y falta de seguimiento de desarrollo urbano, industrial, portuario, turístico y acuacultural, a través de la modificación y/o destrucción de hábitats, cambios en la dinámica natural costera, aporte de aguas residuales entre otros.

De entre las principales características que reflejan los impactos ambientales que sufre la zona marina destacan la calidad de las aguas. Sin embargo, el hombre sólo se percata de ello cuando hay una consecuencia en su salud o el efecto es severo en algún componente del ecosistema, como las intoxicaciones, infecciones de piel, perdida de cobertura de ecosistemas críticos (manglares, pastos marinos), reducción de las pesquerías y aumento en la frecuencia de las mareas rojas, entre otros (Herrera-Silveira, et al. 2000).

En relación a la calidad del agua, esta se determina al identificar una serie de cualidades en forma de parámetros, que están asociados con los contaminantes o con procesos que sirvan como indicadores para poder calificarla, todo ello para determinar los valores máximos permisibles que no pongan en presión (stress) a la vida acuática y que permita al ser humano utilizar el agua para su uso y consumo, cualquiera que éste sea (uso recreativo, agrícola, industrial, consumo directo, y otros) (Herrera-Silveira et al. 2002).

En las aguas costeras los nutrientes fosforados y nitrogenados controlan la abundancia y composición de productores primarios; por ello, las descargas residuales domésticas, municipales e industriales que llegan a la costa pueden causar un deterioro del ecosistema costero con la consiguiente pérdida del valor estético, ecológico y económico.

Es reconocido que los desarrollos portuarios provocan cambios en la circulación de agua y drenaje, con implicaciones en distribución de los parámetros hidrológicos y en los cuales también se favorece la recirculación de los nutrientes en el medio, y por consiguiente estimula una alta productividad primaria del sistema, modificando su estado trófico y llevándolo hasta condiciones de eutrofización, teniendo efectos negativos en la calidad del agua y todo lo asociado con ella con efectos nocivos a la salud humana y de los ecosistemas.

Existe creciente preocupación sobre los efectos en la calidad del agua en los puertos y dársenas, de ahí que ahora se trabajan en diferentes diseños de estructuras portuarias los cuales puedan estar en armonía con el medio ambiente en el que se encuentran inmersos (Hernández-Trujillo et al, 1997).

Estos estudios sobre la calidad del agua de puertos y dársenas son poco conocidos en costas tropicales y mucho menos estudios realizados sobre los impactos que tienen construcciones portuarias, las cuales presentan diferente diseño seccional y estructural para un mismo puerto.

La zona del puerto de Progreso (Yucatán) se caracteriza por su riqueza en productos naturales relacionados con los ecosistemas costeros que incluyen el mar, la ciénaga, los manglares y manantiales, los cuales tienen un gran valor desde el punto de vista económico, pesquero, turístico y ecológico, así como social. (Herrera-Silveira, 1999). Considerando que de ellos depende la supervivencia de una gran parte de los habitantes de la zona y que contribuyen de alguna manera a los ingresos de las poblaciones rurales asociadas, su aprovechamiento armónico debe ser una prioridad para garantizar su uso sustentable y lo que lleva implícito, su conservación y aprovechamiento para las generaciones futura (Herrera-Silveira, 1999).

Adicionalmente, es evidente el crecimiento que ha tenido el puerto de Progreso desde la construcción de la terminal remota en el ámbito turístico y pesquero, la cual además del desarrollo que pudiera traer consigo, también es probable que tenga efectos en la erosión de la costa y cambios en la circulación del agua de mar, y por consiguiente alterando su calidad natural causando modificaciones al entorno. Esto conlleva a la urgencia de contar con información de base y de uso inmediato por las instituciones responsables de poner en operación programas de saneamiento, contingencia, aprovechamiento, conservación y restauración.

Para abordar los temas de diagnóstico y monitoreo que guardan los ecosistemas costeros, y proponer las acciones de manejo que favorezcan la conservación, rehabilitación o uso sustentable, se requiere un marco conceptual que oriente las prioridades y defina los criterios de acción.

Dentro de este contexto, se han seguido tres conceptos que pudieran ser de utilidad para dar inicio al estudio y manejo de las lagunas costeras. El primero de ellos, se refiere al de conectividad (Séller y Causey 2005), el cual considera que existe interacción entre ecosistemas a través de procesos biogeoquímicos y biológicos, los cuales están regulados por procesos hidrológicos que actúan a diferentes escalas espaciales y temporales. Esta conectividad ecohidrológica se relaciona con otro concepto, el de controles tierra-mar/mar-tierra (Twilley 1995), en el que los flujos tierra-mar (aportes de cuencas hidrológicas) y los de mar-tierra (mareas, corrientes, huracanes), ejercen papeles clave en regular el funcionamiento ecológico de cada ecosistema. Dicho funcionamiento se relaciona con el tercer concepto, el de estabilidad ecológica (Dayton et al. 1984), el cual considera el regreso (resiliencia) de los ecosistemas a su estado de equilibrio después de una perturbación (Herrera Silveira, 2006).

Por otra parte, puerto Progreso representa para Yucatán la principal localidad para el desarrollo portuario: manejo de contenedores para importación y exportación de productos varios, puerto de atraque para cruceros turísticos y para vacacionistas locales y regional. Históricamente el Puerto de Progreso cuenta con un desarrollo económico significativo desde que se concluyó la construcción de su muelle en 1941. Durante el año 2007 se registró un movimiento de 115 cruceros y 239,520 pasajeros, lo cual registró una derrama económica de 17.5 millones de dólares, un incremento del 49 % en pasajeros y 43.8 % en el arribo de cruceros, comparado con el año 2006 donde se recibieron 87 cruceros y 160,842 pasajeros y cuya derrama económica fue de 11.8 millones de dólares, es importante que cada pasajero en puerto Progreso gasta en promedio $ 53.09 dólares y el tripulante 40.24 dólares por arribo, por lo que cada arribo de crucero representa una derrama económica a la población de $ 183,025 dólares, sin considerar ingresos de tarifas y servicios portuarios. Por todo lo anterior, se coloca al Puerto de Progreso como el Puerto con más alto crecimiento en el arribo de cruceros y pasajeros en el Golfo de México (Administración Portuaria Integral de Progreso S.A de C.V., 2008). Actualmente se encuentra en desarrollo un proyecto Turístico Integral de Progreso, donde se pretende ofrecer atención a los pasajeros de cruceros a través de la construcción de zonas peatonales, naturales, comerciales y áreas recreativas turístico-culturales.

El desarrollo portuario en Puerto progreso además de su derrama económica, ha traído graves consecuencias ambientales desde los años 40 cuando inicio su desarrollo. La construcción de carreteras, rellenos para construcción, desecación, aperturas de bocas y dragados, contaminación orgánica, entre otros se refleja en la perdida de sus humedales de manglar poco más del 60 % del original (Batllori et al. 1999). El deterioro ambiental de sus ecosistemas de manglar y otros humedales se refleja principalmente en la pérdida de calidad de agua y hábitat para especies de importancia ecológica y para pesquerías.

Por lo anterior, el presente tiene como propósito "Dar continuidad al programa de monitoreo de la calidad de agua del Puerto de Altura de Progreso, basado en la caracterización y seguimiento de variables importantes para la vida acuática y la salud del hombre por el contacto directo con el agua y con enfoque de largo-plazo".

2. OBJETIVOS

Objetivo general: Dar continuidad al programa de monitoreo de la calidad de agua del Puerto de Altura de Progreso, además de la restauración ecológica de manglares en cuatro localidades del estado de Yucatán con un enfoque experimental, de participación comunitaria y de coordinación multi-institucional, basado en el diagnóstico ambiental, indicadores de éxito, capacitación y con enfoque de largo-plazo.

Objetivos particulares

1) Determinar la condición de la calidad del agua en la zona marina adyacente al Puerto de Altura en Progreso de Castro, a través del monitoreo de diferentes variables del agua relacionadas con la contaminación inorgánica y estado trófico.
2) Determinar la variabilidad temporal de la calidad del agua (épocas nortes, secas y lluvias) en el periodo 2018 en la zona marina adyacente al Puerto de Altura en Progreso de Castro.

3. IMPORTANCIA DEL PROYECTO

No se omite mencionar que el proyecto que nos ocupa también se utilizará para establecer las bases y lineamientos mediante los cuales se dará cumplimiento a las medidas, términos y condicionantes números 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58 y 59 de la autorización contenida en el oficio número D. O. O. DGOEIA - 002188 de fecha 19 de abril de 1999.

En este informe parcial de calidad de agua, se aborda el monitoreo de la calidad de agua de este proyecto, este se estará realizando en quince estaciones a escala de kilómetros en la zona adyacente al puerto de altura de progreso (Fig. 1) y donde se concentra la mayor actividad económica y de recreo en la costa de Yucatán. La frecuencia de muestreo consistirá en las épocas climáticas entre febrero y octubre (nortes, secas y lluvias, respectivamente

4. COMPONENTE CALIDAD DE AGUA: PUERTO DE ALTURA DE PROGRESO

4.1. ESTRATEGIA: Material y Métodos

4.1.1. Área de estudio

La zona adyacente al puerto de altura se encuentra ubicada en Progreso, que es el puerto principal de la región litoral del norte del Estado de Yucatán. Estando comprendido entre los paralelos 21° 10' y 21° 19' longitud norte y los meridianos 88° 34' y 88° 57' longitud oeste. La ubicación de las quince estaciones distribuidas a escala de kilómetros en la zona adyacente al puerto de altura de Progreso se puede observar en la figura 1. Para un mejor análisis de las condiciones del puerto de altura, se han clasificado en zonas: la zona de las estaciones 1, 2, 3 y 13 están incluidas en la zona Marina de Chelem (MCh), las estaciones 9, 10 y 12 en la zona Costera de Chelem (CCh), las estaciones 4, 5, 6, 7 y 14 en la zona Marina de Progreso (MPr) y las estaciones 8, 11 y 15 en la zona Costera de Progreso (CPr). **Este informe incluye los tres muestreos realizados durante un año y fueron agrupados en Febrero (Nortes), Mayo (Secas) y Septiembre (Lluvias) de 2019**.

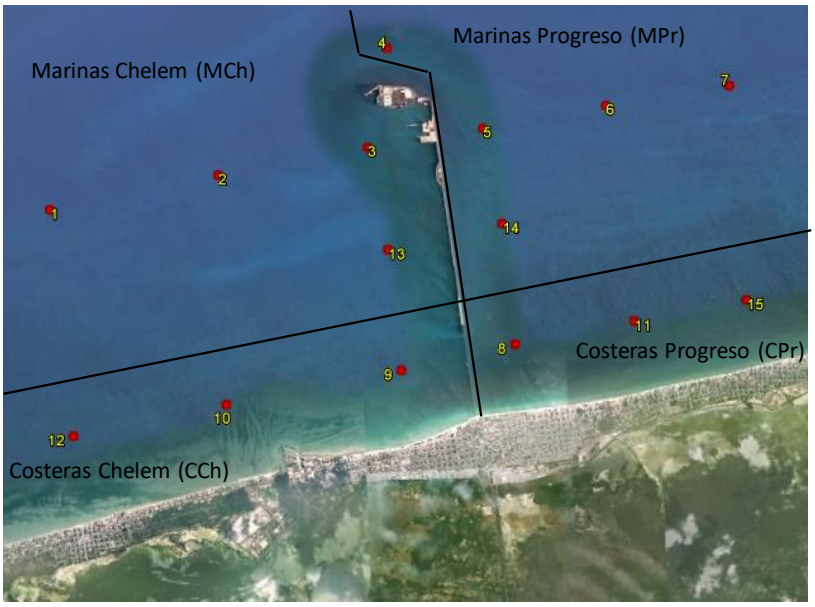

Figura 1. Ubicación de las estaciones en la zona adyacente del puerto de altura.

4.1.2. Trabajo de campo y obtención de muestras

Se realizaron tres muestreos a lo largo del año: Febrero (Nortes), Mayo (Secas) y Septiembre (Lluvias) del 2019. Las muestras colectadas fueron a nivel superficial del agua, y analizadas en el laboratorio, las cuales fueron previamente filtradas con membrana Millipore de 0.45 µm de tamaño

de poro. Se mantuvo el agua filtrada a -4°C hasta su análisis. Para las variables físicas y químicas se realizaron mediciones *in situ* de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto con una sonda multiparámetros YSI 3020 (Fig. 2).

Figura 2. Sonda multiparamétrica YSI 2030.

4.1.3. Análisis de Laboratorio

En el laboratorio se procedió a filtrar 1 litro de agua en membranas Millipore de 0.45µm de tamaño de poro para la determinación de clorofila-a. El volumen filtrado se utilizó para los análisis de nutrimentos que fueron todos de tipo colorimétrico utilizando un espectrofotómetro Spectronic Genesys II de ancho de banda de 2 nm. Los análisis incluyeron El fósforo reactivo soluble (SRP) se determinó de acuerdo al método de Murphy y Riley con las modificaciones de Strickland y Parsons (1972). El amonio (NH_4^+) con el método del fenol-hipoclorito (Solórzano, 1972). El nitrógeno como NO_2^- por el método de la sulfanilamida en medio ácido, los NO_3^- como NO_2^- y después de pasar la muestra a través de una columna de Cd-Cu (Fig. 3) (Parsons et al., 1984).

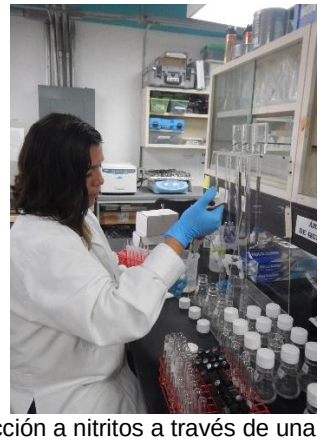

Figura 3. Método de reducción a nitritos a través de una columna de cadmio-cobre.

Para la determinación de clorofila-a, la membrana (filtro) fue expuesta a acetona al 90% para la extracción del pigmento (Fig. 4), se centrifugaron los tubos con los filtros (Fig. 5) y se analizó el extracto espectrofotométricamente y se realizó el cálculo de acuerdo a la fórmula de Jeffrey y Humphrey referida en Parsons et al. (1984).

Figura 4. Colocación de filtros de ester celulosa con acetona al 90% para la extracción de la clorofila-a.

Figura 5. Colocación de tubos con muestras de clorofila-a en la centrifuga.

Se tomaron muestras adicionales de agua, para realizar los siguientes parámetros analizados por técnicas normalizadas: Coliformes Fecales y Coliformes Totales (NMX-AA-42-1987), Sólidos Suspendidos Totales (NMX-AA-034-SCFI-2001) y Sólidos Disueltos (NMX-AA-034-SCFI-2001).

4.1.4. Análisis de datos

Con ayuda del software Excel se realizaron gráficos de barras, en los cuales se pudo apreciar la distribución de los valores de las distintas variables para cada estación. Se realizó un análisis para observar las condiciones hidrográficas de las zonas mediante el análisis de varianzas no paramétricas (ANOVA) con una significancia de $p < 0.05$ y se visualizó mediante diagramas de cajas y bigotes (Box and Whiskers plots). En estos gráficos se evaluó la existencia de diferencias entre grupos de medianas de una variable dependiente con base en un factor, las zonas. Los diagramas de cajas y bigotes muestran la mediana de los datos con la línea central horizontal de cada caja y próxima a ésta la media -simbolizada por una cruz-. El tamaño de las cajas representa la variabilidad de los datos (en este caso de la zona para esa variable), y la porción superior e inferior de cada caja representan el 25° y 75° percentiles (cuartiles) respectivamente, mientras que los extremos de las barras son el 5° y 95° percentiles. La muesca lateral en las cajas corresponde al 95% del intervalo de confianza de la mediana (Figura 3), por ello, cuando las muescas entre dos cajas no se sobrelapan, se asume que las medianas son estadísticamente diferentes (Boyer *et. al.,* 1997; Burke *et. al.,* 2002). Para los análisis propuestos se hizo uso del paquete estadístico Statgraphics Centurión 10.

5. RESULTADOS

5.1. Calidad de agua: Zona Adyacente al Puerto de Altura de Progreso de Castro

Temperatura

El análisis estadístico realizado (Anova no paramétrico) mostró diferencias entre las zonas (Fig. 2b, Tabla 3). La mayor variabilidad se registró en la zona CPrS y los mayores valores en la zona CChLl (Tablas 1 y 2). La estación 8 presento el mayor valor espacial en Lluvias (30.5°C) y el menor valor en las estación 8 (25.8°C) en Nortes (Fig. 2a). Los valores de temperatura fueron bajos en comparación con otros sitios costeros de Yucatán, pero en ningún sitio se sobrepasaron los 40°C que marca como valor máximo la norma mexicana NOM-001-ECOL-1996 (Tabla 4).

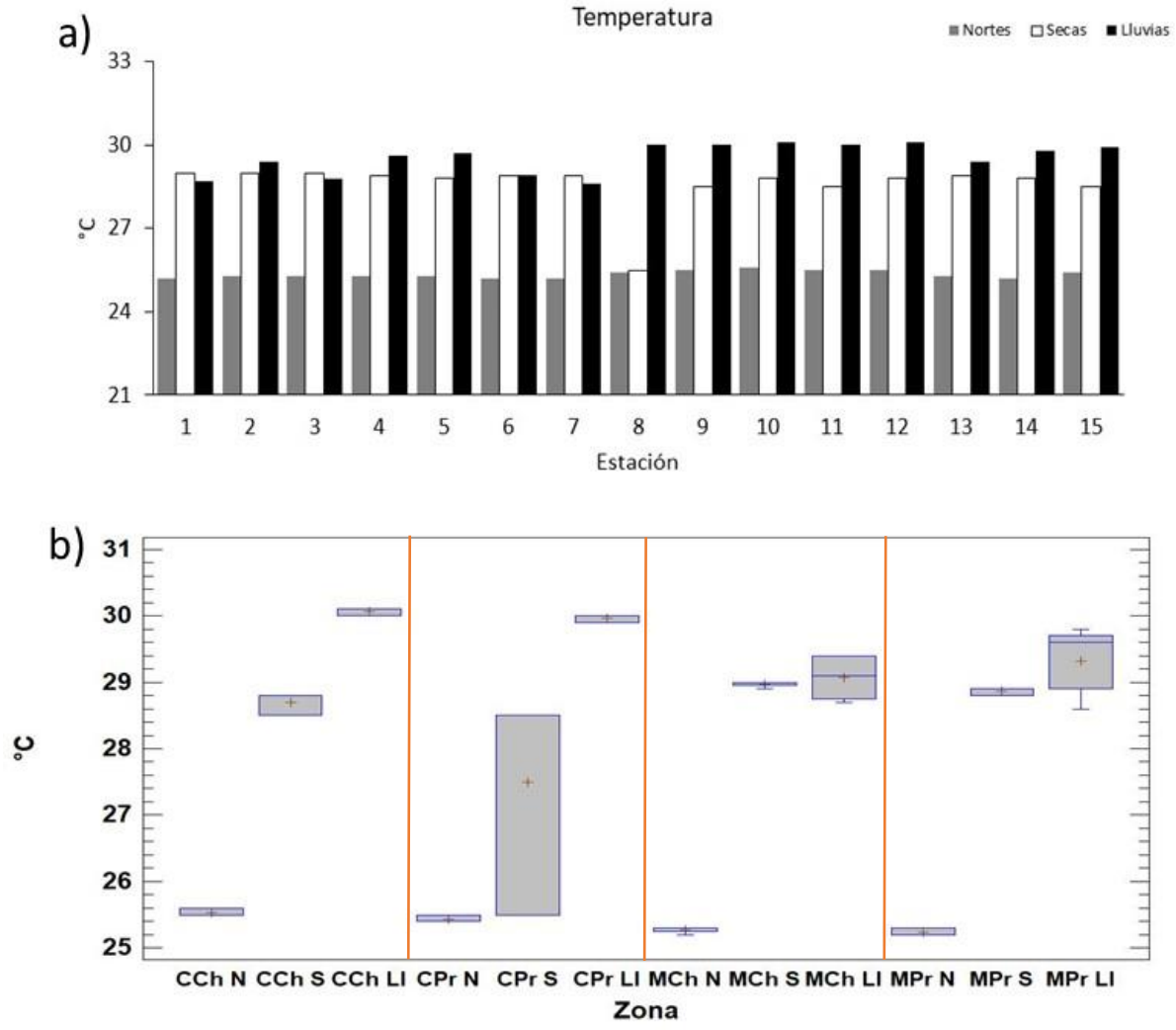

Figura 2. a) Distribución espacial de Temperatura en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) en 2019.

Salinidad

Se presentaron diferencias significativas entre épocas para esta variable (Tabla 3). En la zona Costera de Chelem en Nortes (CChN) se observaron los menores valores (< 35.42) (Tabla 1) y la mayor variabilidad en la zona Costera de Chelem en Lluvias (CChLl) (Fig. 3b). El menor valor de salinidad se registró en la estación 9 de Nortes (35.22 ups) y el mayor en las estación 15 en el muestreo de Secas (36.7 ups) (Fig. 3a). La salinidad de la costa varía según los procesos que se lleven a cabo tales como la evaporación, la precipitación y los aportes de tierra adentro. Cerca del área costera es frecuente la mezcla de aguas de diferentes salinidades especialmente por la difusión de una masa de agua dentro de otra, por lo que es utilizada como indicador de los aportes de agua dulce en la zona marina.

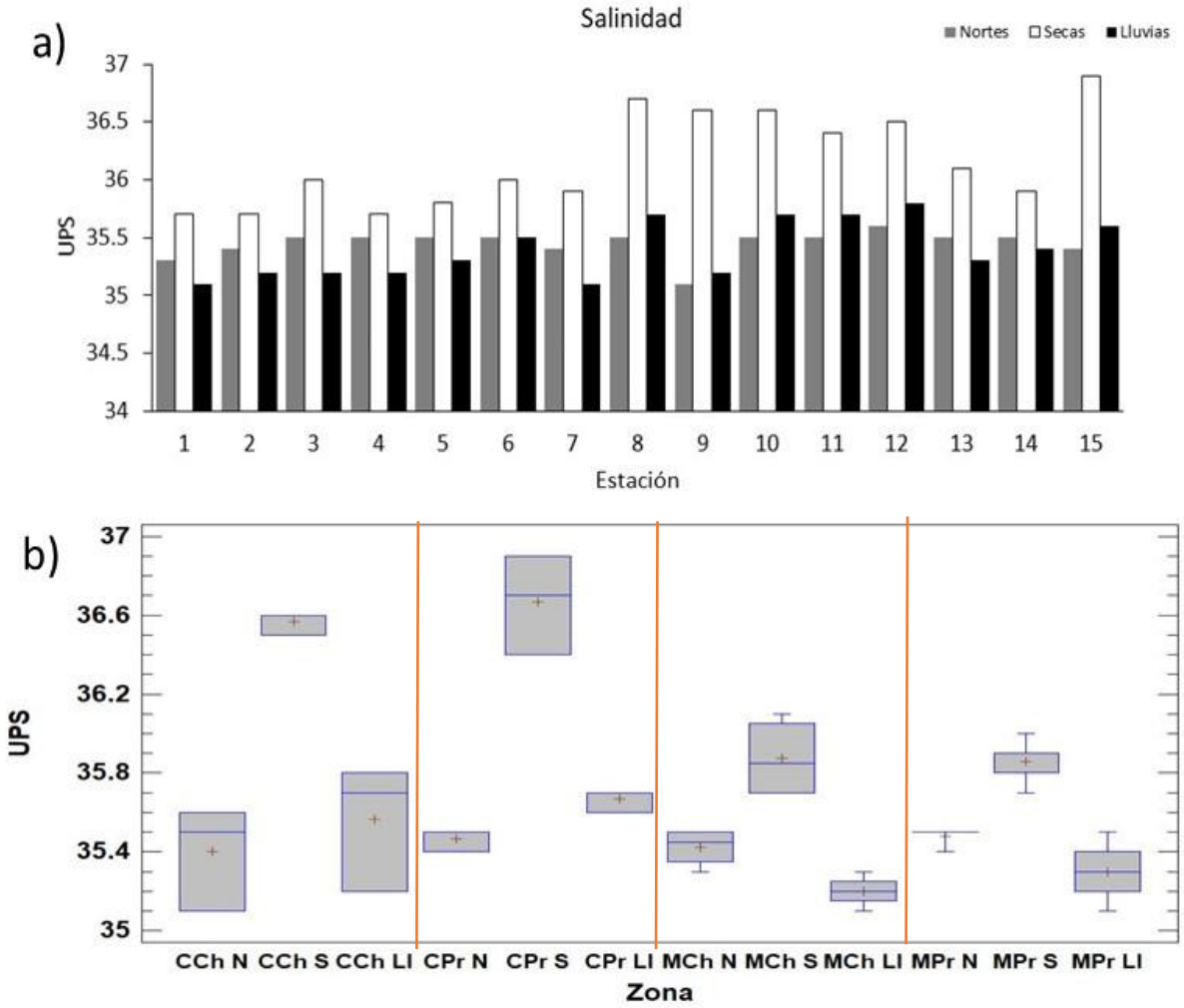

Figura 3. a) Distribución espacial de Salinidad en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019.

Oxígeno Disuelto

La estación 11 de Lluvias exhibió el menor valor con 5.8 mg/l y la estación 5 en secas el mayor valor (6.9 mg/l) (Fig. 4a). En el análisis estadístico (Anova) entre temporadas se observaron diferencias significativas (Tabla 3), mostrando en la zona Costera de Progreso en Secas (CPrS) la mayor variabilidad (Fig. 4b) y los mayores valores en la zona Costera de Chelem en Secas (Tabla 2). La norma mexicana establece valores de 5 mg/l (Tabla 5) para esta variable. El oxígeno disuelto en el agua es un indicador del balance de los procesos de producción y descomposición de la materia orgánica, por lo tanto, al registrarse valores comprendidos entre 5 y 6 mg/l estos son adecuados para la vida acuática y la relación producción/descomposición está balanceada.

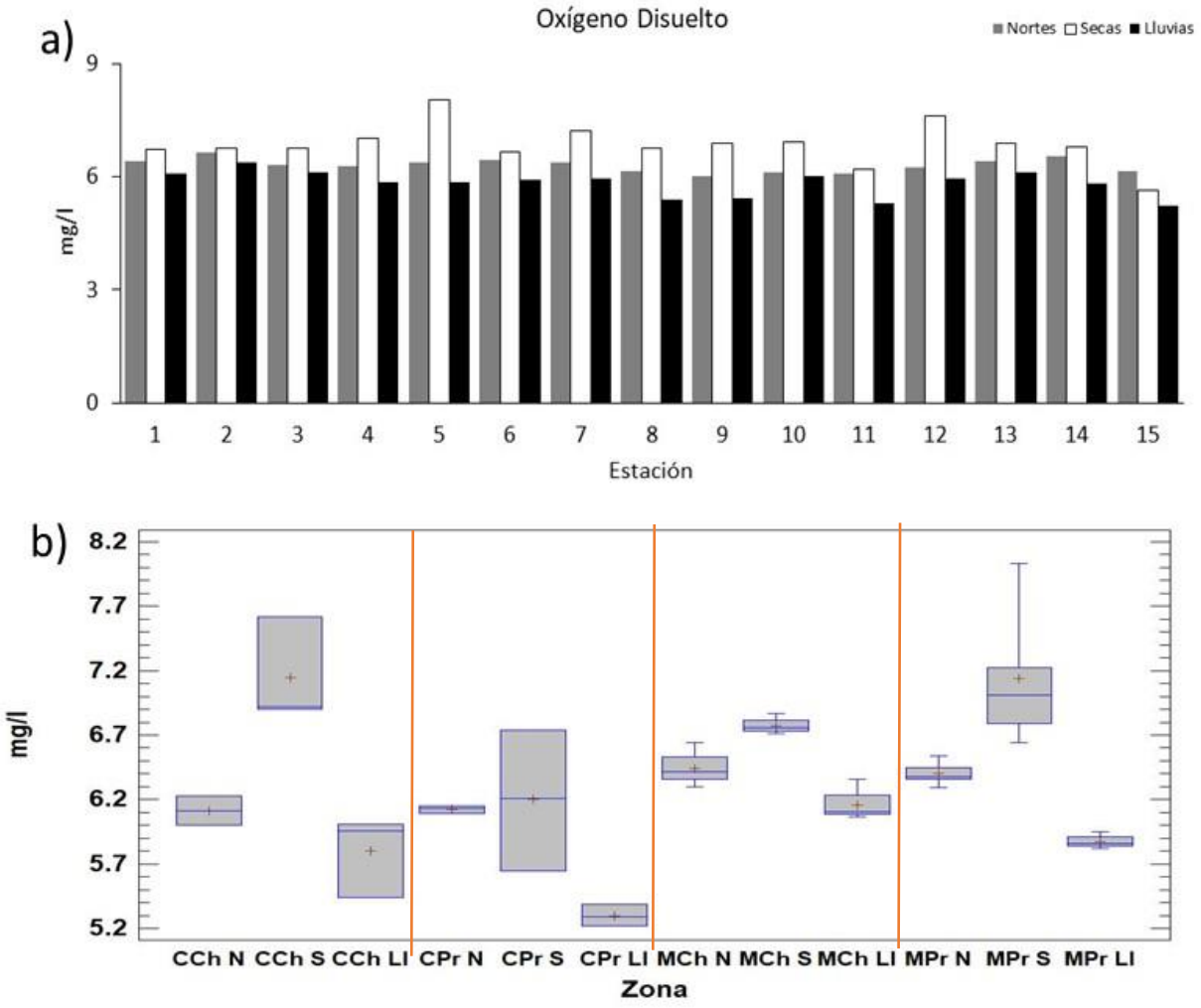

Figura 4. a) Distribución espacial de Oxígeno Disuelto en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019.

Sólidos Suspendidos Totales

En la estación 15 en Lluvias se observó el valor mayor con 58 mg/l (Fig. 5a). El análisis estadístico de Anova registró que existieron diferencias significativas entre todas las épocas (Tabla 3). La zona Costera de Chelem en Secas (CChS) presentó la mayor variabilidad (Fig. 5b). Las condiciones anaeróbicas y la turbidez del agua están dadas por las concentraciones de Sólidos Suspendidos Totales, estas provienen de las aguas residuales domésticas y la erosión del suelo depositándose en el agua. Las concentraciones de este sitio se encuentran por debajo del valor de 200 mg/l que establece la norma mexicana (Tabla 4).

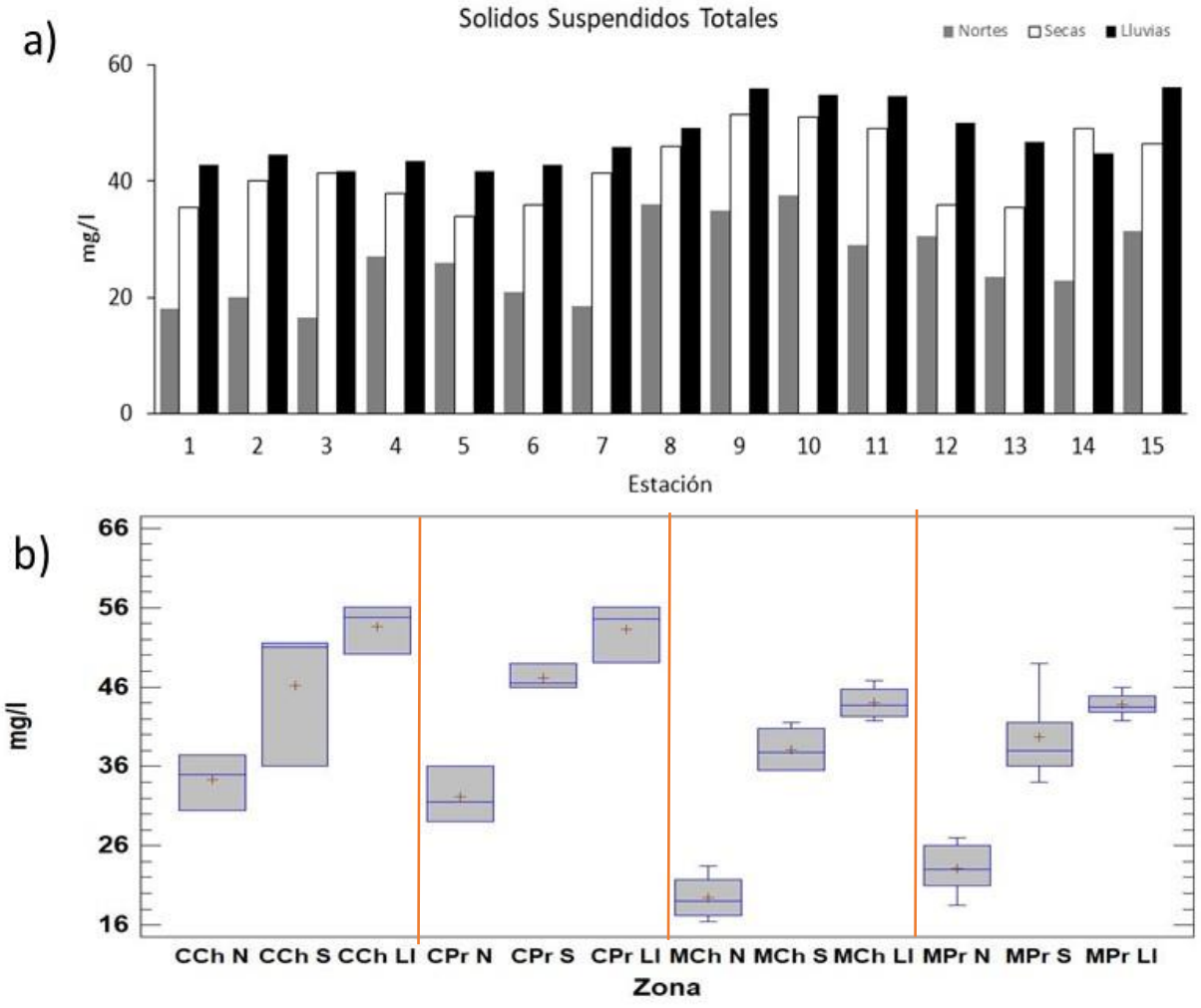

Figura 5. a) Distribución espacial de Sólidos Suspendidos Totales en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019.

Coliformes Totales

Se presentaron diferencias significativas entre las épocas (Tabla 3), la zona Costera de Chelem en Lluvias (CChLl) reveló la mayor variabilidad (Fig. 6b), así como los mayores valores para esta variable (Tabla 1). En la distribución espacial de los coliformes totales, la estación 5 en Nortes registró el menor valor (0.04 UFC/100 ml) (Fig. 6a). Las concentraciones de esta variable se atribuyen a las descargas residuales y antropogénicas de las actividades realizadas tierra adentro. Las concentraciones registradas son altas, por lo que este sitio presenta contaminación. Actualmente no se cuenta con una norma que contemple concentraciones mínimas y máximas para esta variable. Sin embargo, estas concentraciones no so atribuibles a las actividades de API-Progreso.

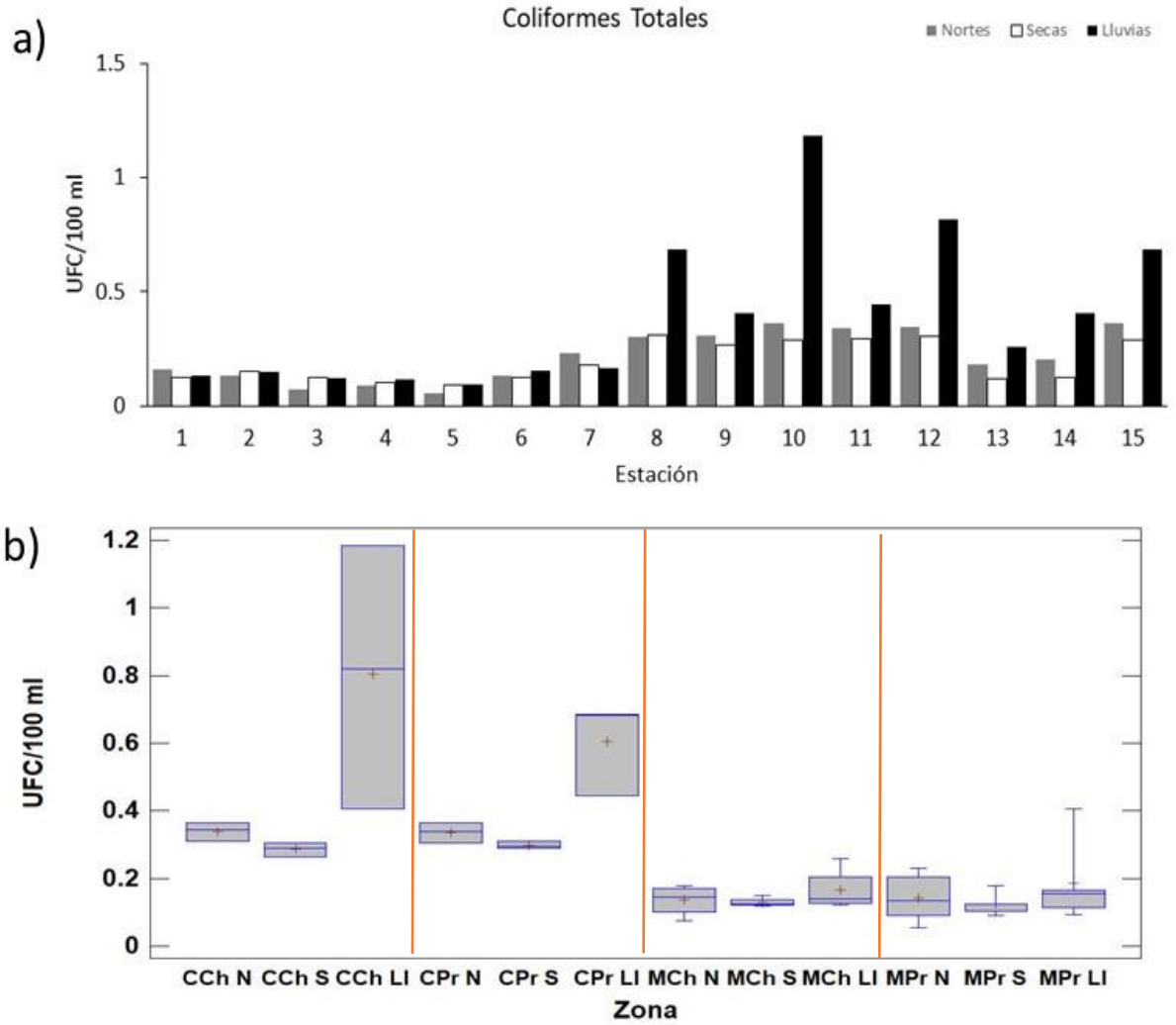

Figura 6. a) Distribución espacial de Coliformes Totales en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019.

Coliformes Fecales

El mayor valor espacialmente lo ostentó la estación 10 del muestreo de Lluvias con un valor de 1.2 UFC/100 ml y el menor valor en la estación 1 en Nortes con 0.04 UFC/100 ml (Fig. 7a), el muestreo de la zona Costera de Chelem en Lluvias (CChLl) exhibió la mayor variabilidad y los mayores valores (Tabla 1) de coliformes fecales (Fig. 7b) Se presentaron diferencias significativas entre épocas (Tabla 3). Las concentraciones de coliformes fecales se deben probablemente a los residuos de las fosas sépticas que descargan a la zona costera, propiciando un proceso de contaminación, reflejándose en la composición, diversidad y riqueza de la comunidad bacteriana de esa zona. No existe una norma que regule las descargas de esta variable a la zona costera. Sin embargo, estas concentraciones no so atribuibles a las actividades de API-Progreso.

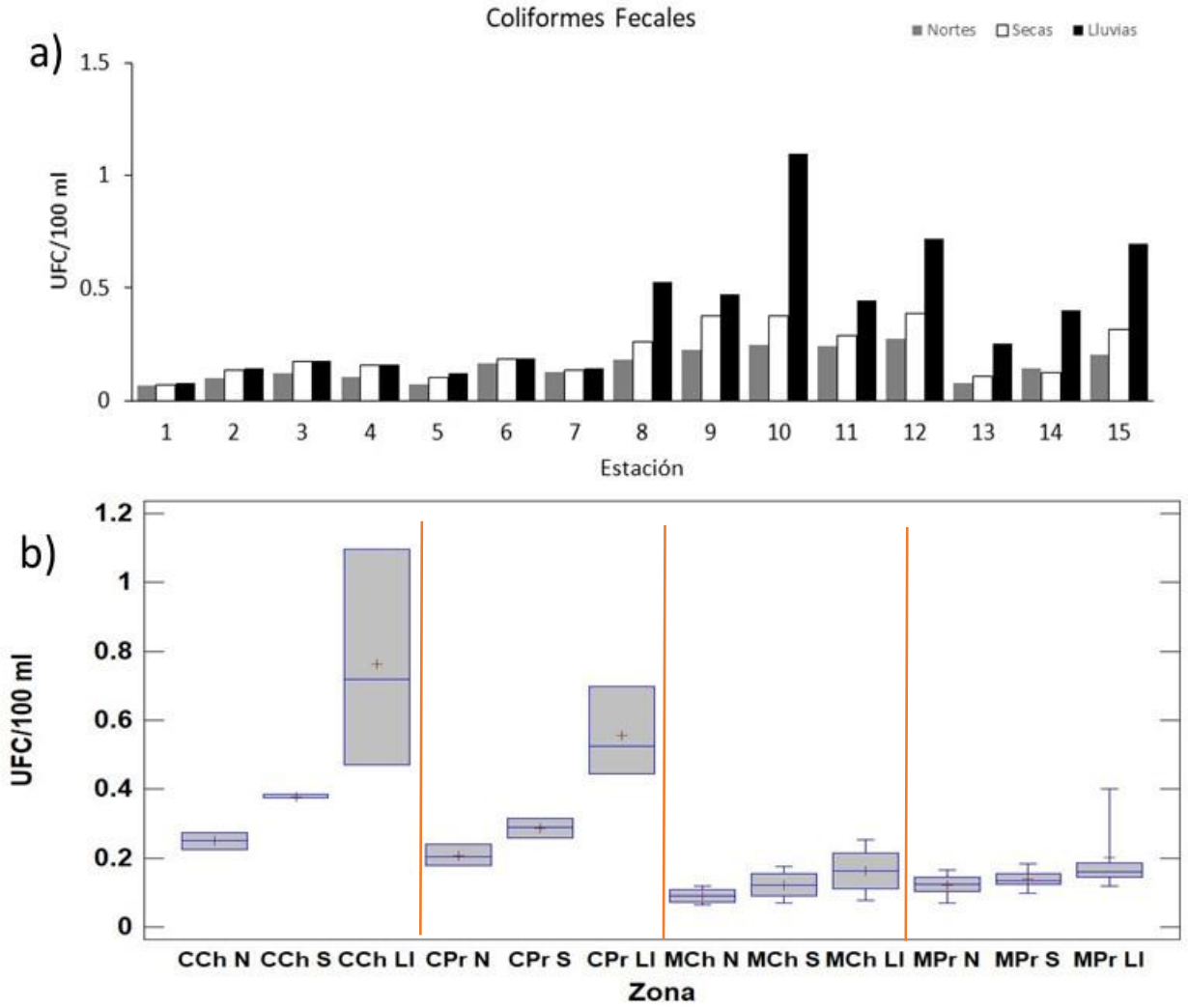

Figura 7. a) Distribución espacial de Coliformes Fecales en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019.

Nitratos+Nitritos

La figura 8a explica la distribución espacial de Nitratos+Nitritos, donde se aprecia que el menor valor se registró en la estación 6 en Lluvias (0.13 mg/l) y el mayor en la estación 4 (4.55 mg/l) en Nortes. Existen diferencias significativas entre las épocas (Tabla 3). En la zona Marina de Chelem en Secas (MChS) se registró la menor variabilidad (Fig. 8b) y las concentraciones más altas de esta variable en la zona Marina de Chelem en Lluvias (Tabla 1). Las descargas de aguas subterráneas, residuales y de las fosas sépticas son las que aportan las mayores concentraciones de esta suma de nutrimentos, sobre todo se depositan en las zonas costeras provocando síntomas de contaminación. Actualmente no existen valores en ninguna norma que regulen los valores máximos y mínimos permisibles para esta variable en agua de mar (Tabla 4).

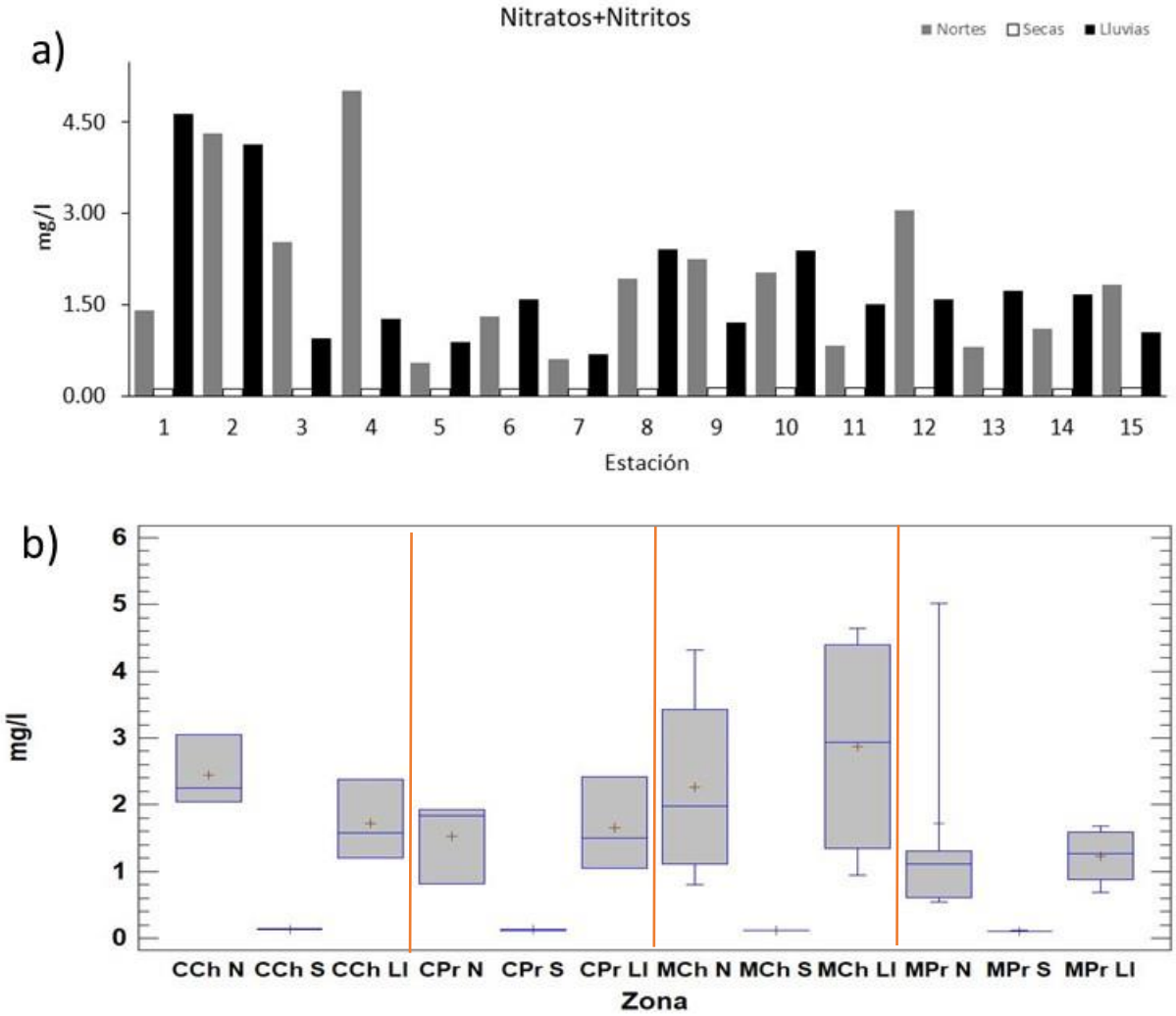

Figura 8. a) Distribución espacial de Nitratos+Nitritos en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019.

Amonio

Las mayores concentraciones entre zonas se registraron en la zona Costera de Chelem (Tabla 1) en Nortes (CChN), la mayor variabilidad se presentó en la zona costera de Progreso en Nortes (CPrN). Se mostraron diferencias significativas entre las épocas (Tabla 3). El valor más alto se registró en la estación 11 de la época de Nortes (1.8 mg/l) y el menor en la estación 7 en Lluvias con un valor de 0.09 mg/l (Fig. 9a). Estas concentraciones no son altas, pero podría considerarse como un sitio de riesgo, ya que este nutrimento se encuentra asociado a fuentes de agua de origen antropogénico relativamente recientes (estas podrían ser las descargas de la población urbana), además de la contribución por parte de la dársena y laguna de Chelem que tiene síntomas de contaminación (Tabla 4).

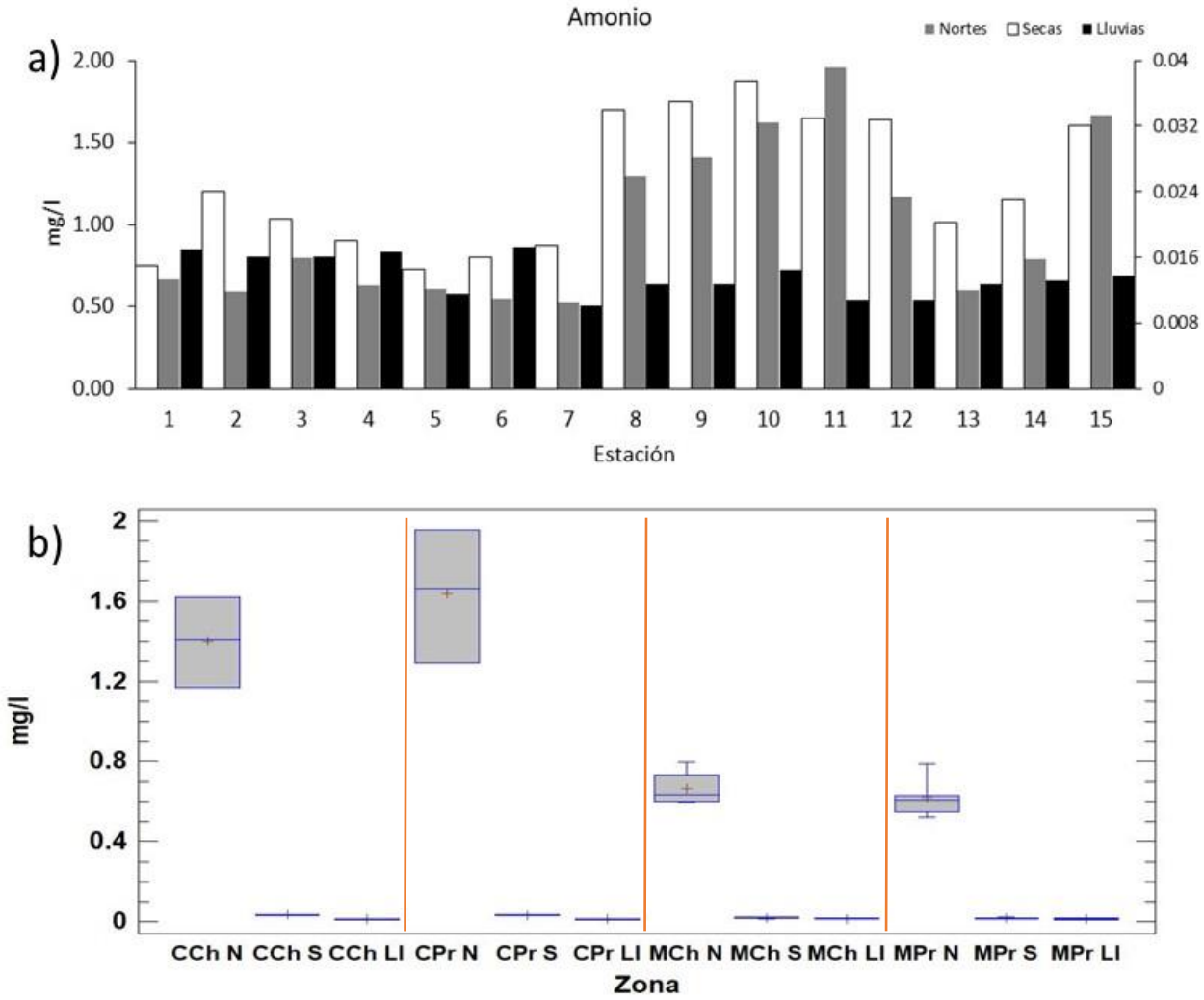

Figura 9. a) Distribución espacial de Amonio en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (LI) de 2019.

Fosfatos

El Fósforo Reactivo Soluble (Fosfatos) muestra los valores espacialmente mayores en la estación 11 en la época de Nortes (0.6 mg/l) como se puede observar en la figura 10a. Entre zonas se obtuvieron diferencias significativas (Tabla 3), la mayor variabilidad se presentó en la zona Costera de Chelem en Lluvias (CChLl) y los menores valores (Tabla 1) se ubicaron en la zona Marina de Progreso en Secas (Fig. 10b). Las concentraciones de Fosfatos indican precipitación por procesos geoquímicos de adsorción con sedimentos y de los aportes de aguas residuales domésticas propiciadas por la naturaleza cárstica de la región, los cuales podrían estar contaminando. No se cuenta actualmente con concentraciones de esta variable en alguna norma que regule valores máximos o mínimos.

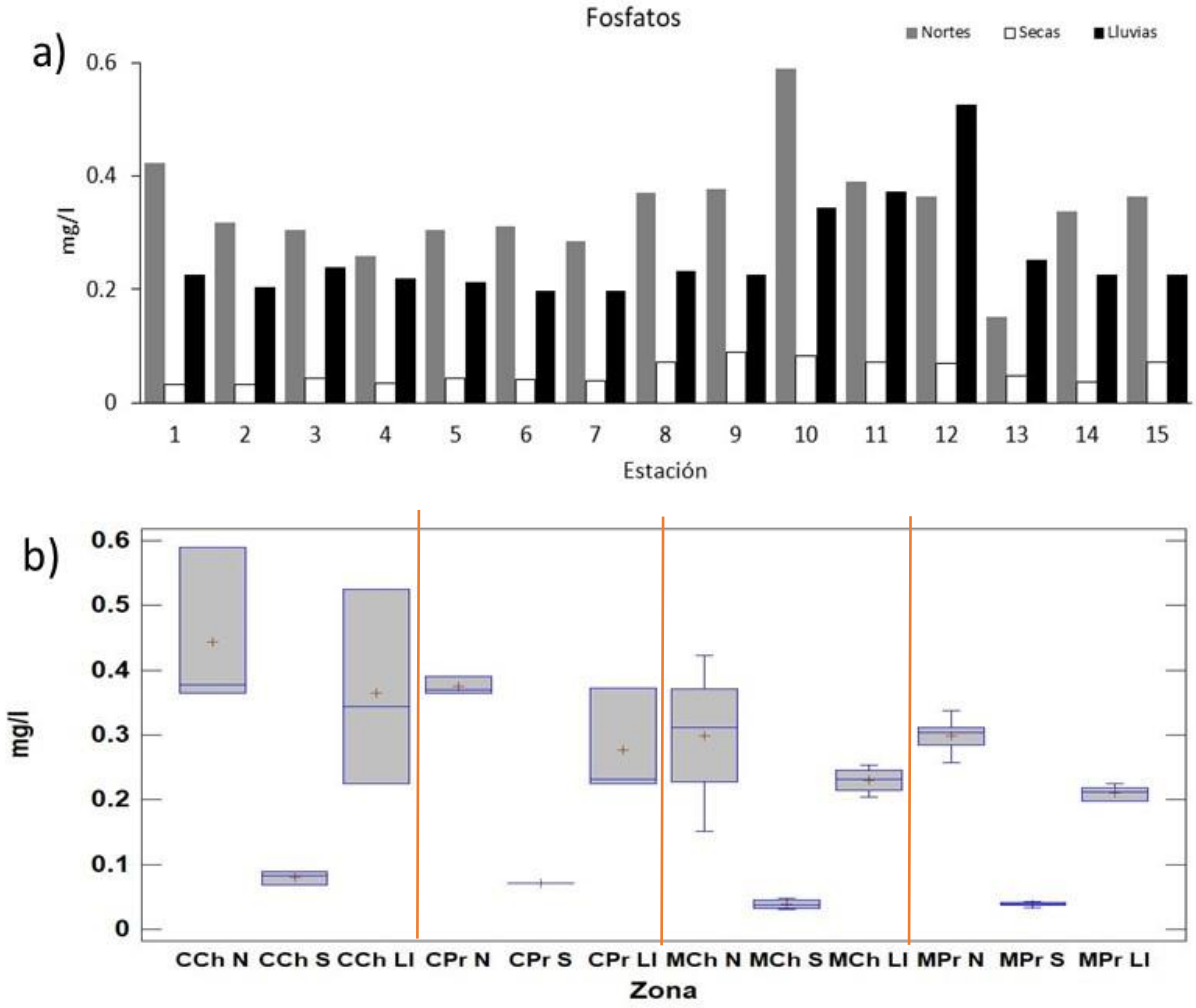

Figura 10. a) Distribución espacial de Fosfatos en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019.

Silicatos

La menor concentración de silicatos se registró en la estación 2 en Nortes y la mayor en la estación 11 en la época de Nortes con valores de 0.019 mg/l y 7.89 mg/l respectivamente (Fig. 11a). Existieron diferencias estadísticas entre épocas (Tabla 2), y en la zona Costera de Chelem en Secas (CChS) se determinó la mayor variabilidad (Fig. 11b) y los mayores valores en la zona Costera de Progreso en Nortes (Tabla 1). Este sitio está siendo influenciado por los aportes de agua subterránea, por lo que podría ser susceptible al proceso de enriquecimiento de nutrimentos por fuentes terrestres, sufriendo afectaciones y comenzar a contaminarse. Sin embargo, las concentraciones son bajas comparadas con otros sitios de Yucatán (Tabla 4). No existe una norma mexicana que incluya valores máximos para esta variable.

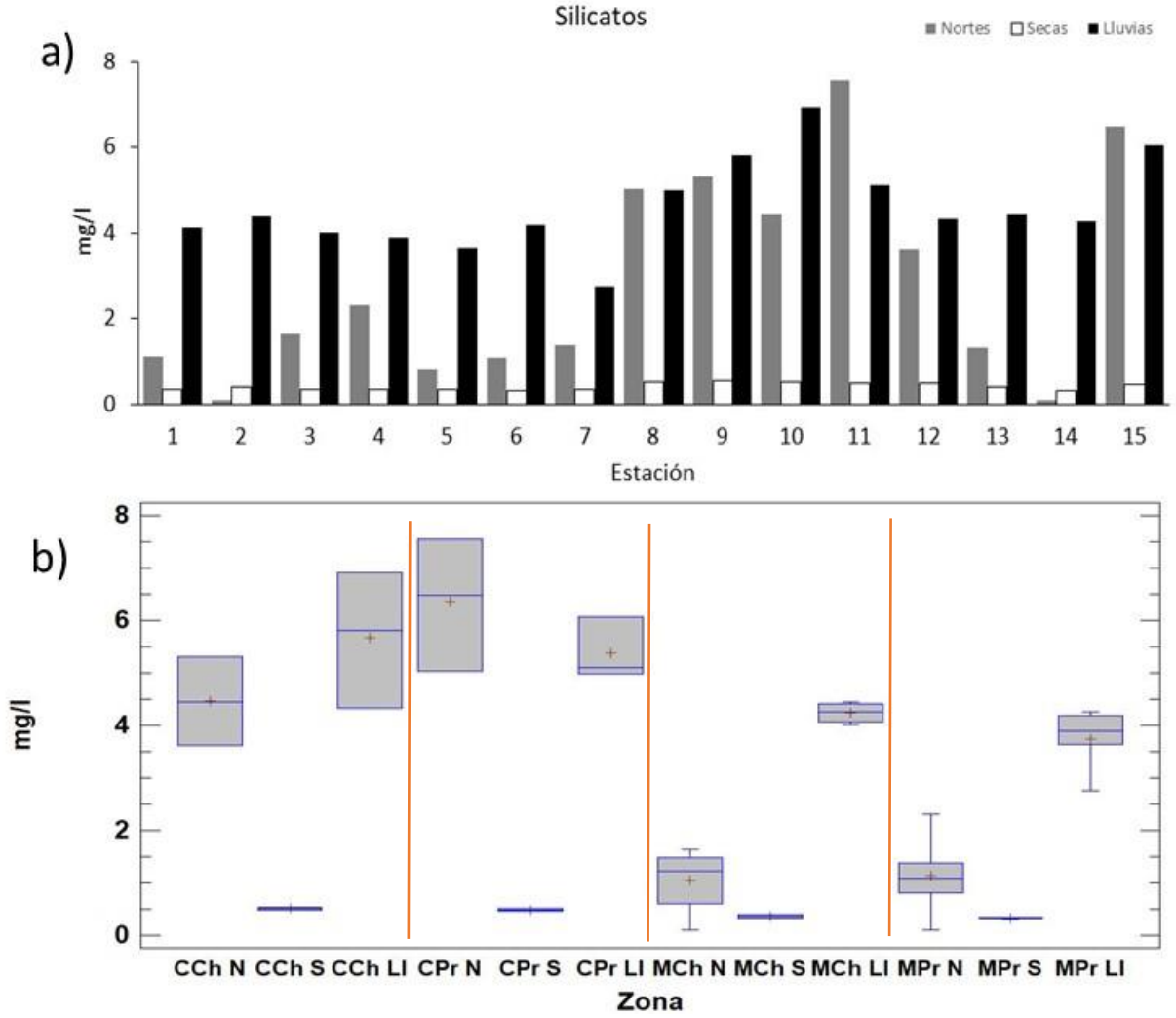

Figura 11. a) Distribución espacial de Silicatos en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019.

Clorofila-a

En el análisis estadístico realizado (Anova) se registraron diferencias significativas entre épocas (Tabla 3). La zona Costera de Chelem en Nortes (CChN) presentó la mayor variabilidad y los mayores valores de esta variable en la zona Costera de Progreso en Nortes (Tabla 1) (Fig. 12b). Espacialmente, la mayor concentración se ubicó en la estación 15 en Nortes (2.8 mg/m^3) y la menor en la estación 6 en Lluvias (0.18 mg/m^3) (Fig. 12a). Una manera de obtener la biomasa de fitoplancton como medida de calidad del agua es mediante la concentración de clorofila-a, y con los valores registrados en este sitio, al no contar a la fecha con una norma que incluya valores permisibles, esto podría derivar en presencia de síntomas de contaminación.

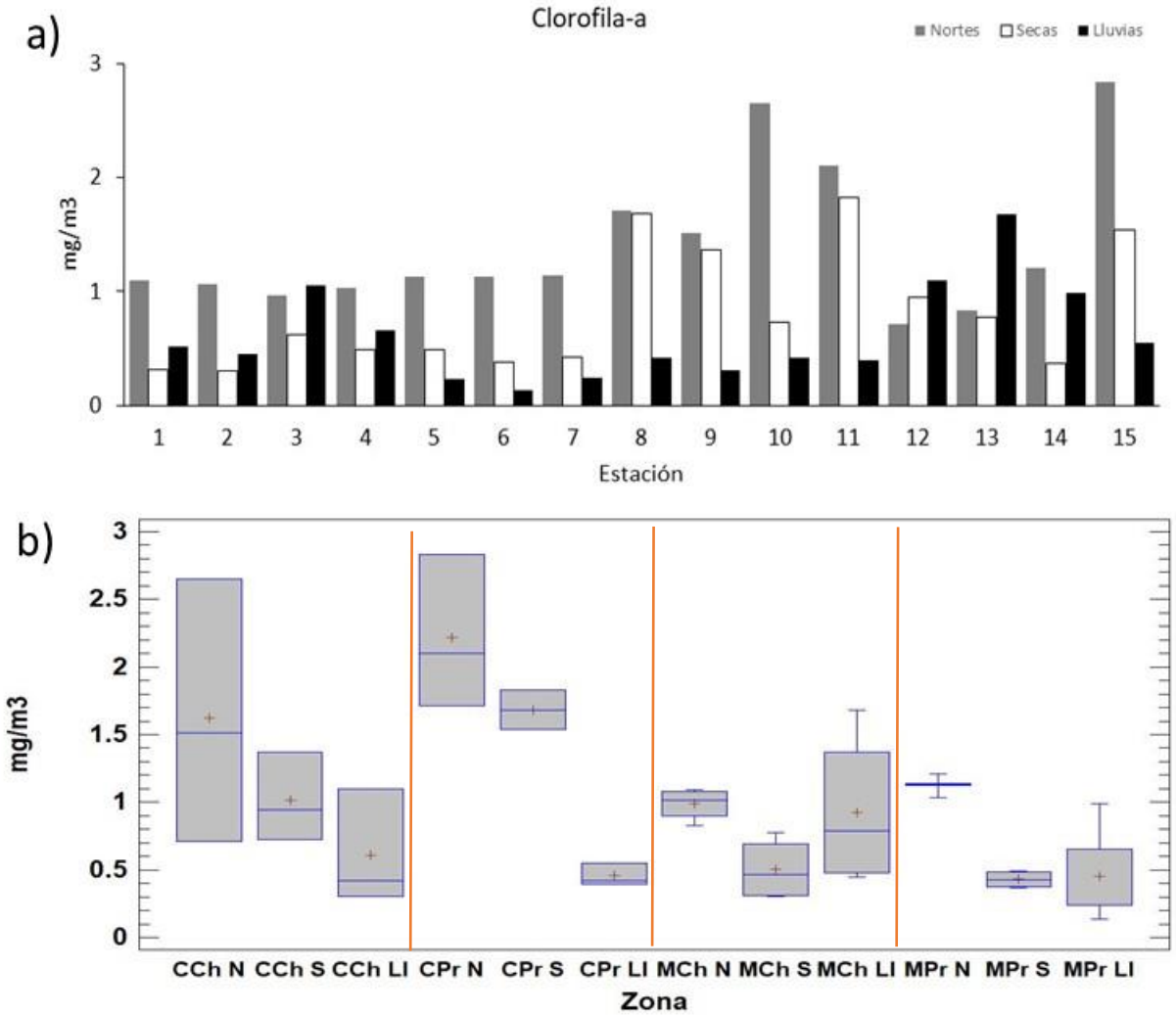

Figura 12. a) Distribución espacial de Clorofila-a en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (LI) de 2019.

Sólidos Disueltos

Las mayores concentraciones (Tablas 1 y 2) (Fig. 13b) entre zonas se registraron en la zona Costera de Chelem en lluvias (CChLl). Se presentaron diferencias significativas entre las épocas (Tabla 3). El valor más alto se registró en la estación 6 de la época de Secas (4200 mg/l) y el menor en la estación 4 de Lluvias con un valor de 3800 mg/l (Fig. 13a). Aunque los Sólidos Disueltos totales no tiene la consideración de contaminante grave, es un indicador de las características del agua, ya que pueden afectar considerablemente la calidad de un cuerpo de agua. Actualmente no existe una norma que regule las cantidades máximas permisibles de los sólidos disueltos (medida de los residuos sólidos filtrables (sales y residuos orgánicos) que contenidos en el agua).

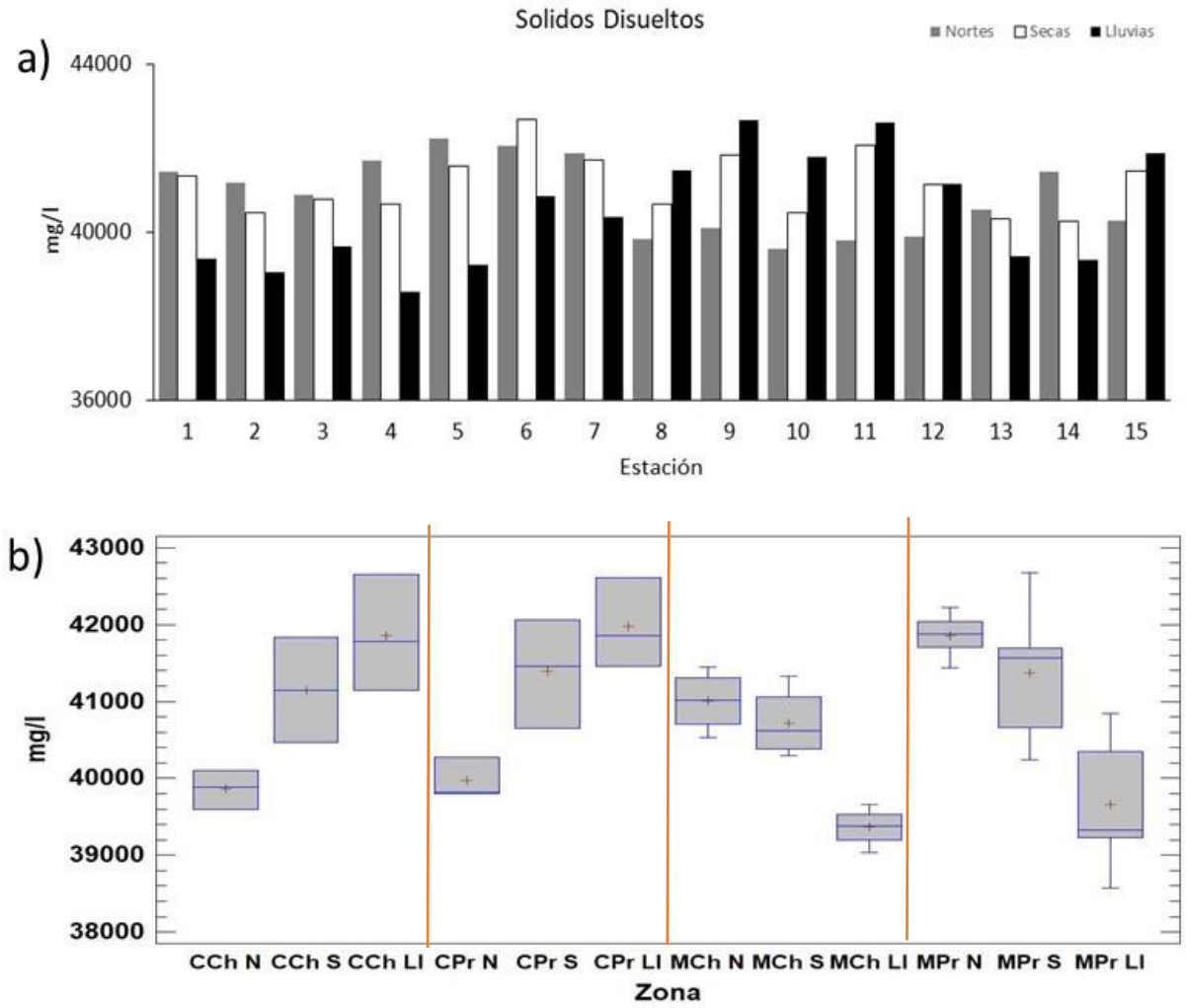

Figura 13. a) Distribución espacial de Sólidos Disueltos en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019.

Índice de TRIX

En la figura 13a se puede apreciar que las estaciones que se encuentran en estado cercano a la mesotrofía son la 1 (Nortes), 4 (Nortes), 8 (Nortes) y 13 (Nortes) que serían puntos donde requerirían de atención especial en el futuro. Existieron diferencias estadísticas entre épocas (Tabla 3). Las zonas que tienden a la mesotrofía son Costera Progreso en Nortes (CPrN), Marina Chelem en Nortes (MChN) (Tabla 1) (Fig. 13b). El índice de TRIX es un indicador de la calidad del agua, ya que para su cálculo involucra varios parámetros es una característica integradora. Es una forma fácil de poder determinar que estaciones y zonas se encuentran en riesgo de eutroficación o la tendencia hacia este estado.

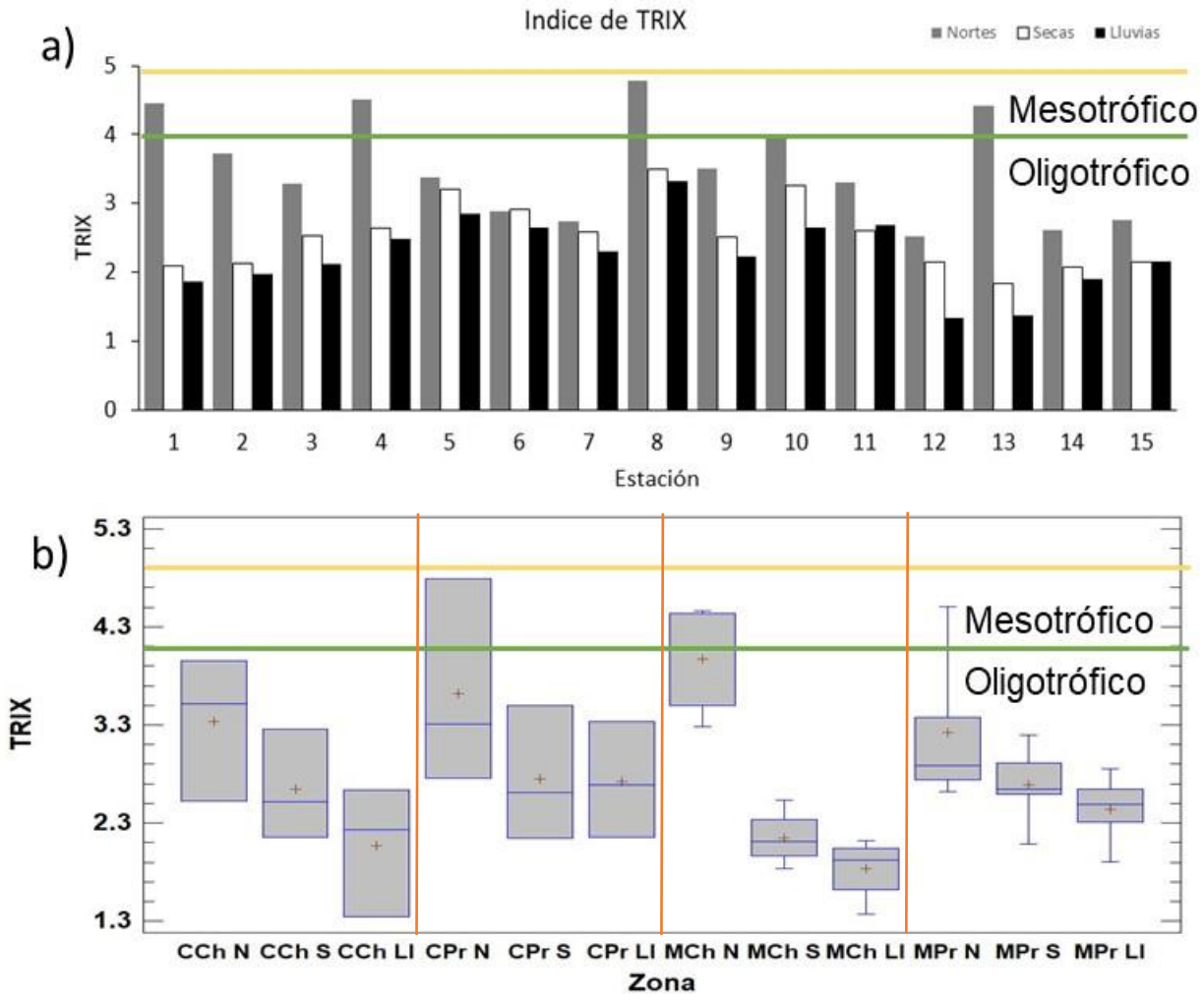

Figura 14. a) Distribución espacial del Índice de TRIX en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019

.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Las mayores concentraciones (Tablas 1 y 2) (Fig. 13b) entre zonas se registraron en la zona Costera de Chelem en lluvias (CChLl). Se presentaron diferencias significativas entre las épocas (Tabla 3). El valor más alto se registró en la estación 9 de la época de Lluvias (4.5 mg/l) y el menor en la estación 5 de nortes con un valor de 2 mg/l (Fig. 13a). Por medio de la demanda bioquímica de oxígeno se pueden determinar los requerimientos de oxígeno para la degradación de la materia orgánica en las aguas. Considerando la información de diferentes trabajos este sitio se encuentra en buen estado, ya que no se sobrepasan valores de 200 mg/l de DBO que establece la norma mexicana.

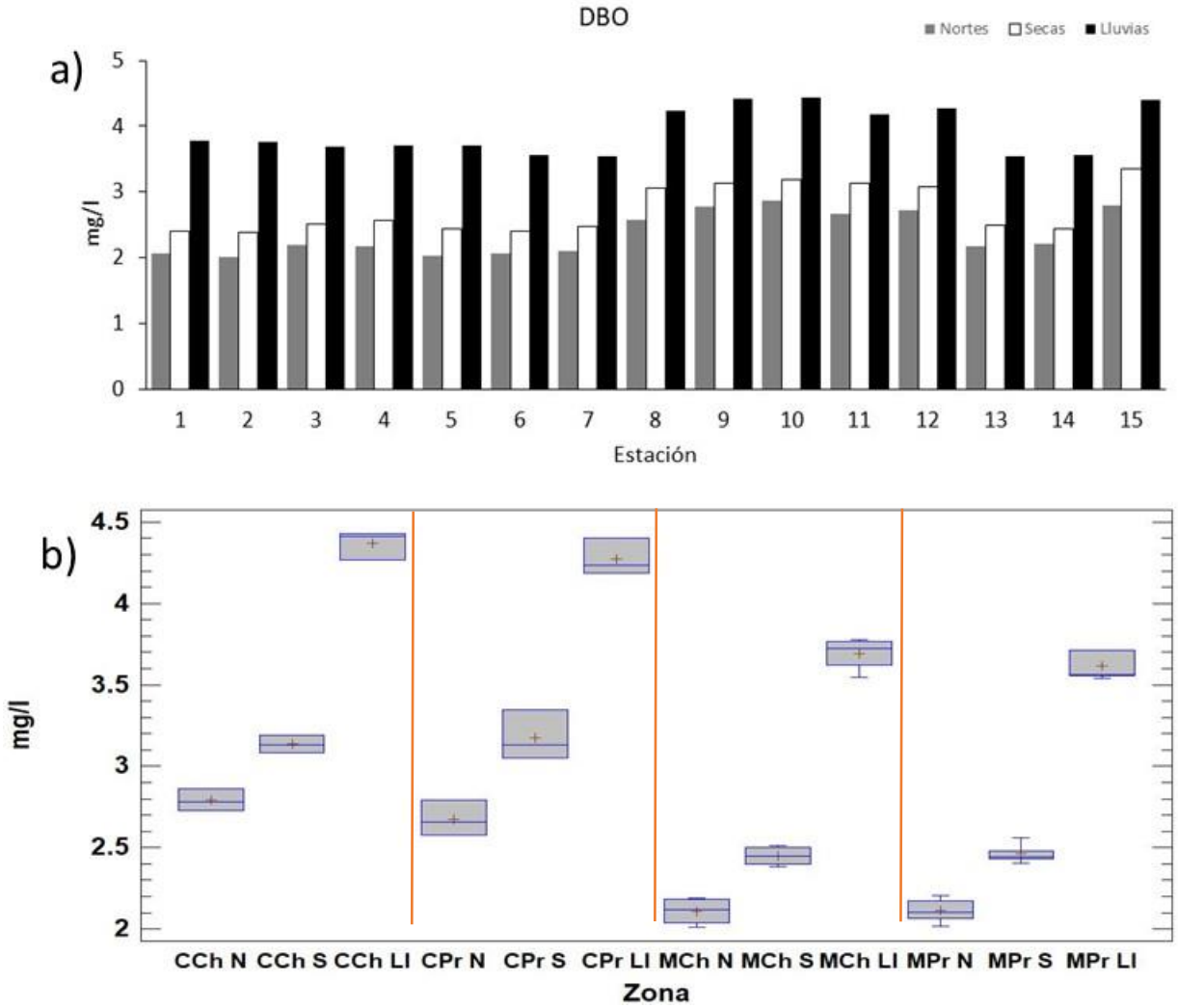

Figura 15. a) Distribución espacial de la demanda bioquímica de oxígeno en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019

Potencial de Hidrogeno (pH)

Espacialmente el valor más alto se presentó en la estación 5 (7.53) en la zona Marina de Progreso Lluvias (MPrLl) y el menor en la estación 9 (7.01) en la zona Costera de Chelem Secas (CChS) (Fig. 16 a y Tabla 1). Se presentaron diferencias significativas entre épocas (Tabla 3). La figura 16b muestra que el mayor intervalo de variación se registró en la zona costera de Chelem Secas (CChS). El pH (potencial de hidrógeno) es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. Por lo tanto, el pH de este sitio al registrar valores mayores a 7 se considera básico.

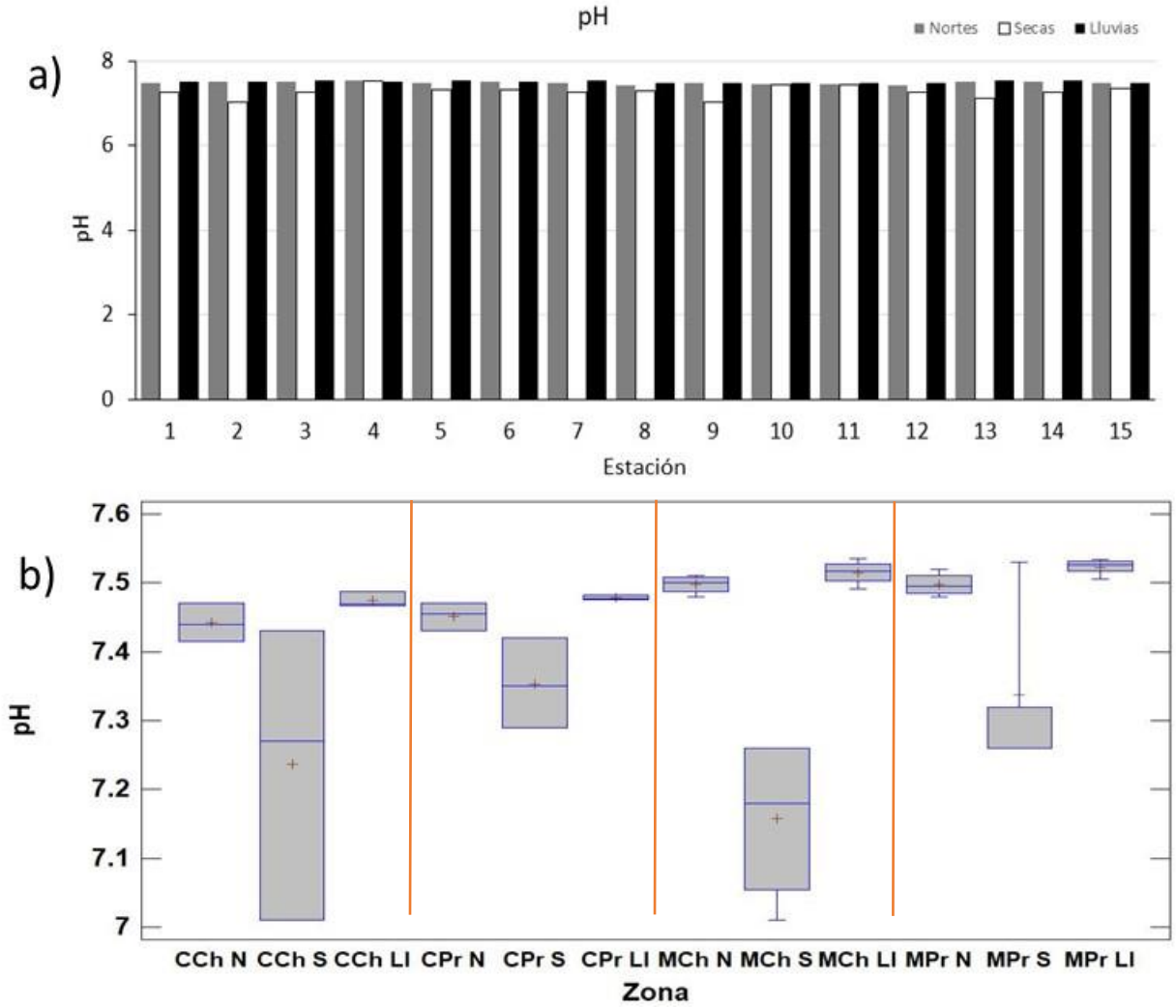

Figura 16. a) Distribución espacial del pH en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019

Hidrocarburos Antropogénicos Totales

Espacialmente el mayor valor de se presentó en la estación 10 en lluvias (0.38 mg/l) y el menor en la 4 (0.12 mg/l) en secas (Fig. 17a y Tabla 1). Se registraron diferencias significativas entre épocas (Tabla 3). Los mayores registros se presentaron en la zona Costera de Chelem Lluvias (CChLl) (Fig. 17b). Los hidrocarburos antropogénicos totales son aquellos compuestos que son liberados al ambiente por las actividades del ser humano. La detección de estos compuestos es probablemente atribuida a los residuos de aceites lubricantes y combustibles ligeros y pesados producto de las embarcaciones.

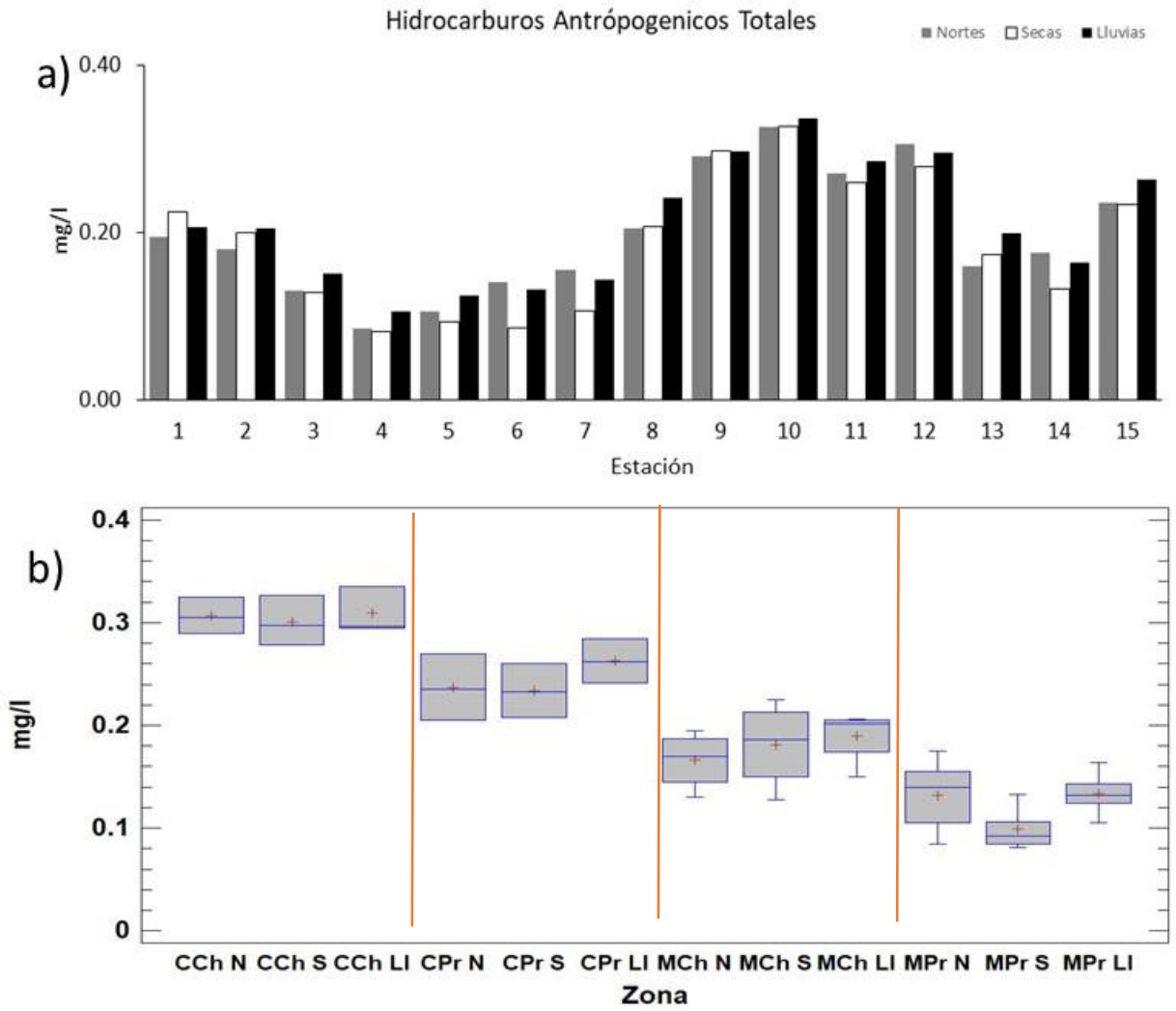

Figura 17. a) Distribución espacial de los hidrocarburos antropogénicos totales en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019

Plomo

Se presentaron diferencias significativas entre épocas (Tabla 3). El mayor intervalo de variación se registró en la zona Costera de Progreso en Secas (CPrS) (Fig. 18b). Espacialmente el valor mayor se obtuvo en la estación 8 (0.065 mg/l) en secas y el menor en la 5 (0.03 mg/l) en lluvias (Fig. 18a). El agua de mar contiene concentraciones trazas de plomo. El Plomo ocurre de forma natural en el ambiente, pero las actividades humanas son las que generan las mayores concentraciones de este metal en el agua. En el caso de las estaciones de la zona adyacente al muelle de altura las concentraciones son inferiores a 0. 065 mg/l por lo que se consideran trazas, ya que la norma mexicana considera como límite máximo permisible 0.4 mg/l.

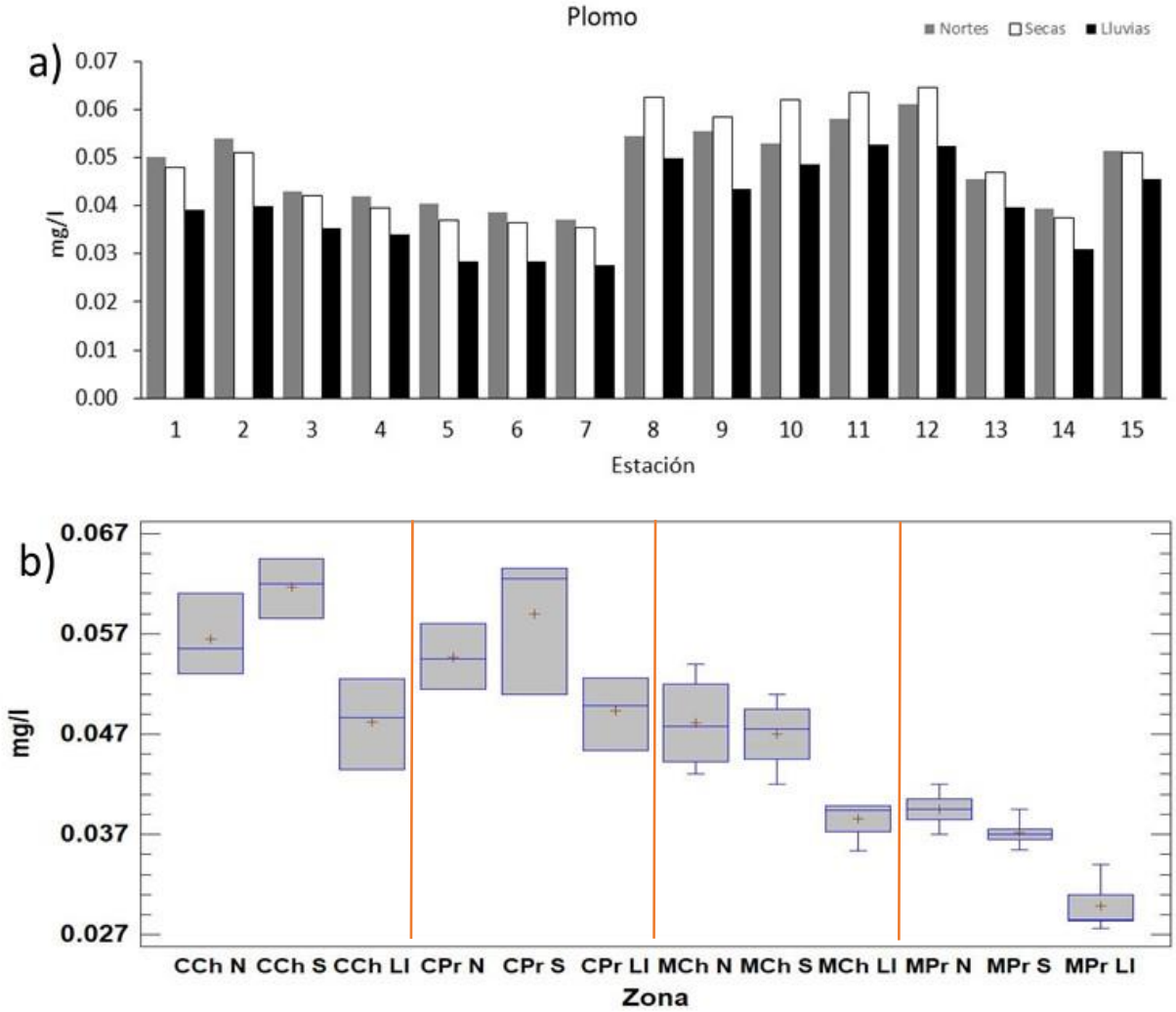

Figura 18. a) Distribución espacial del plomo en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019

Sulfatos

La menor concentración de sulfatos se registró en la estación 1 en nortes y la mayor en la estación 12 en secas, con valores de 2712 y 3226 mg/l respectivamente (Fig. 19a). Se presentaron diferencias significativas entre épocas (Tabla 3). El mayor intervalo de variación se registro en la zona Costera de Chelem Secas (CChS) (Fig. 19b). Los sulfatos son los principales aniones presentes en el agua; los cuales pueden presentarse de manera natural o como consecuencia de descargas de aguas industriales. Los sulfatos se liberan al agua procedentes de residuos industriales y mediante precipitación desde la atmósfera; no obstante, las concentraciones más altas suelen reportarse en aguas subterráneas y provienen de fuentes naturales. No existe norma que regule las concentraciones de esta variable.

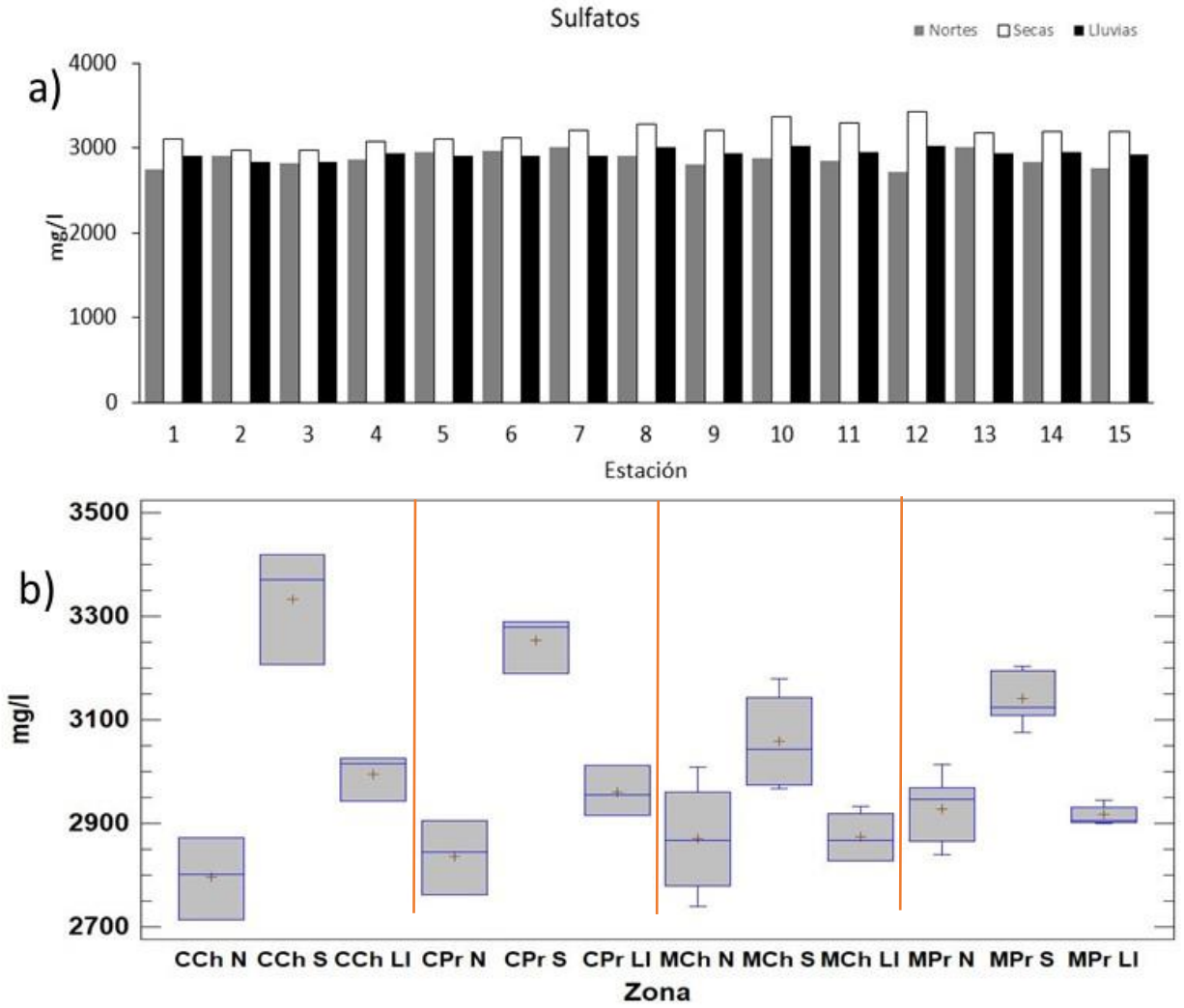

Figura 19. a) Distribución espacial de sulfatos en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019

Turbidez

El mayor valor (5.05 URT) de turbidez se registró en la estación 11 en nortes y el menor (2.33 URT) en la 6 en secas (Tabla 1 y Fig. 20a). Se presentaron diferencias significativas entre épocas (Tabla 3). El mayor intervalo de variación se presentó en la zona Costera de Chelem en Nortes (CChN) (Fig. 20b). La turbidez es la reducción de la transparencia del agua ocasionada por material particulado en suspensión. Este material puede consistir de arcillas, plancton o material orgánico finamente dividido, el cual se mantiene en suspensión por su naturaleza coloidal o por la turbulencia que genera el movimiento. Por esta misma razón, la turbidez debe medirse directamente en campo. No existe norma para esta variable.

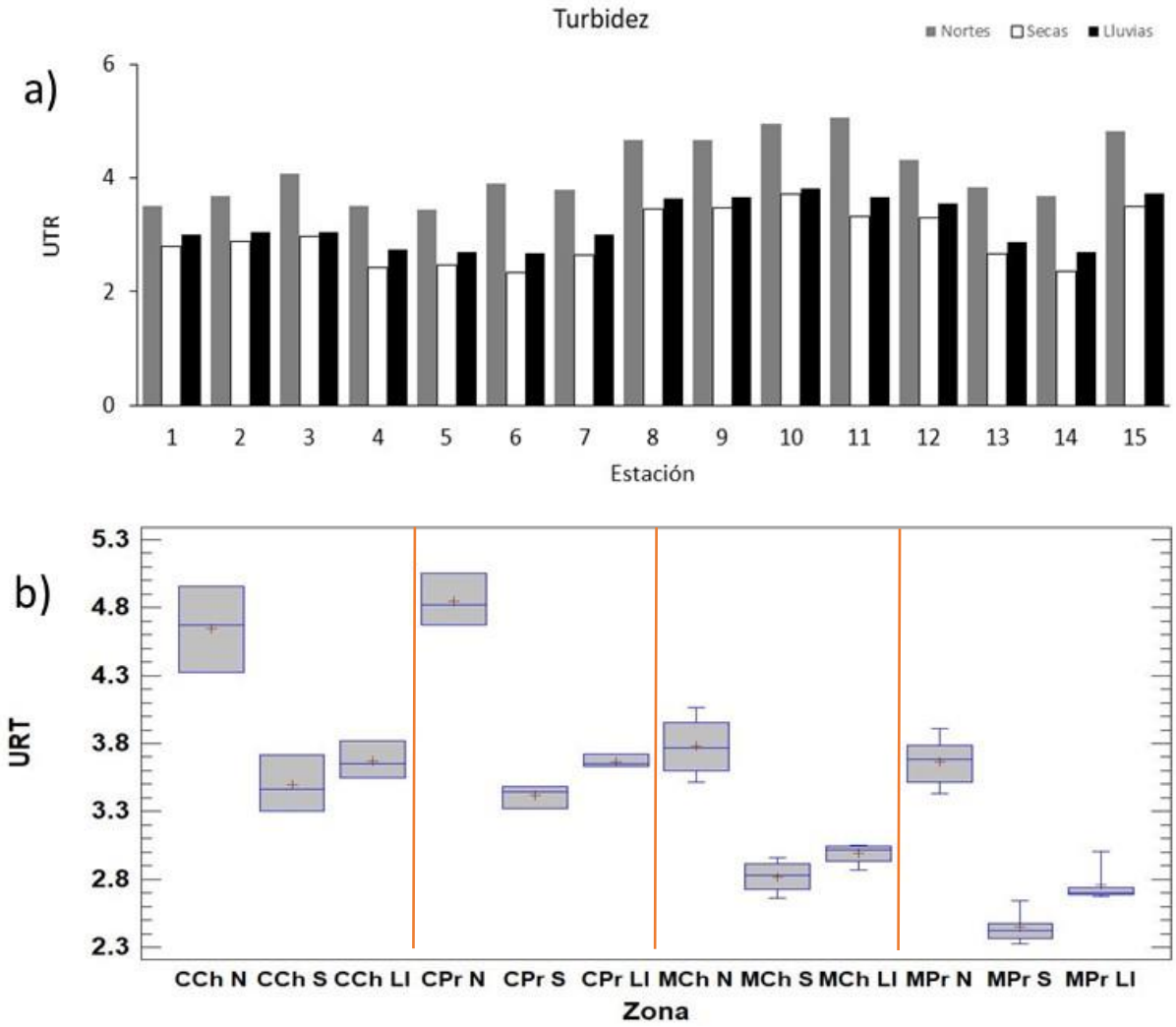

Figura 20. a) Distribución espacial de la turbidez en estaciones y b) variación por zonas en la Zona adyacente al puerto de altura: Costera de Chelem (CCh), Marina de Chelem (MCh), Costera de Progreso (CPr), Marina de Progreso (MPr) en Nortes (N), Secas (S) y Lluvias (Ll) de 2019

Tabla 1. Valores promedio de las variables analizadas en la zona adyacente del puerto de altura (Chelem por zonas y épocas climáticas) en 2019.

Variable	Costeras Nortes	Costeras Secas	Costeras Lluvias	Marinas Nortes	Marinas Secas	Marinas Lluvias
Temperatura (°C)	25.52	28.65	30.5	25.35	28.57	29.48
Salinidad	35.42	36.52	35.6	35.44	36.13	35.38
Oxígeno Disuelto (mg/l)	6.10	6.91	5.67	6.29	6.95	5.86
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	33	46.87	53.86	26.04	41.19	47.27
Coliformes Totales (UFC/100 ml)	0.34	0.28	0.71	0.21	0.19	0.36
Coliformes Fecales (UFC /100 ml)	0.24	0.35	0.68	0.15	0.21	0.34
Nitratos+Nitritos (mg/l)	2.03	0.134	1.66	2.06	0.12	1.92
Amonio (mg/l)	1.54	0.035	0.40	0.95	0.024	0.014
Fosfatos (mg/l)	0.43	0.078	0.012	0.34	0.054	0.26
Silicatos (mg/l)	5.23	0.51	5.53	2.75	0.41	4.50
Clorofila-a (mg/m^3)	1.74	1.21	0.55	1.31	0.79	0.58
Sólidos Disueltos (mg/l)	39847	41376	42047	40851	41201	40470
Índice de TRIX	3.32	2.63	2.22	3.65	2.61	2.29
DBO (mg/l)	2.75	3.13	4.32	2.34	2.71	3.91
Hidrocarburos Antropogénicos Totales (mg/l)	0.29	0.29	0.30	0.196	0.18	0.21
pH	7.44	7.28	7.47	7.47	7.26	7.50
Plomo (mg/l)	0.057	0.062	0.049	0.049	0.05	0.040
Sulfatos (mg/l)	2808	3321	2985	2878	3177	2929
Turbidez (URT)	4.74	3.45	3.66	4.11	2.95	3.18

Tabla 2. Valores promedio de las variables analizadas en la zona adyacente del puerto de altura (Progreso por zonas y épocas climáticas) en 2019.

Variable	Costeras Nortes	Costeras Secas	Costeras Lluvias	Marinas Nortes	Marinas Secas	Marinas Lluvias
Temperatura (°C)	25.42	28.88	29.91	25.36	28.48	29.65
Salinidad	35.42	36.46	35.55	35.46	36.20	35.44
Oxigeno Disuelto (mg/l)	6.20	6.71	5.65	6.27	6.99	5.78
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	30.75	45.56	51.54	27.90	42.50	48.20
Coliformes Totales (UFC /100 ml)	0.30	0.25	0.61	0.23	0.20	0.43
Coliformes Fecales (UFC /100 ml)	0.20	0.28	0.57	0.169	0.22	0.41
Nitratos+Nitratos (mg/l)	1.72	0.128	1.69	1.77	0.12	1.54
Amonio (mg/l)	1.31	0.031	0.013	1.01	0.026	0.013
Fosfatos (mg/l)	0.36	0.068	0.30	0.34	0.057	0.27
Silicatos (mg/l)	4.23	0.46	5.23	3.00	0.42	4.57
Clorofila-a (mg/m^3)	1.69	1.15	0.73	3.51	0.86	0.60
Sólidos Disueltos (mg/l)	40181	41019	41279	40819	41208	40670
Índice de TRIX	3.48	2.51	2.20	3.51	2.66	2.34
DBO (mg/l)	2.59	2.98	4.13	2.31	2.76	3.92
Hidrocarburos Antropogénicos Totales (mg/l)	0.24	0.23	0.26	0.20	0.18	0.21
pH	7.46	7.26	7.49	7.47	7.29	7.50
Plomo (mg/l)	0.052	0.056	0.045	0.048	0.049	0.04
Sulfatos (mg/l)	2843	3266	2968	2889	3222	2951
Turbidez (URT)	4.50	3.22	3.44	4.16	2.92	3.18

Tabla 3. Valores de ANOVAS en los diferentes parámetros en las tres épocas climáticas de 2019, los asteriscos en la variable indican diferencias significativas.

Variable	Valor P	Razón F
Salinidad *	0	29.35
Temperatura *	0	59.16
Oxígeno Disuelto *	0	13.72
Demanda Bioquímica de Oxígeno *	0	283.22
Sulfatos *	0	17.39
Plomo *	0	28.82
pH *	0	8.85
Hidrocarburos antropogénicos totales (mg/l)*	0	25.49
Solidos Disueltos *	0	8.44
Sólidos Suspendidos Totales *	0	27.37
Coliformes Totales *	0	10.74
Coliformes Fecales *	0	13.78
Turbidez *	0	66.89
Nitritos+Nitratos *	0.0026	3.49
Amonio*l	0	93.2
Silicatos *	0	44.99
Fosfatos*	0	17.13
Clorofila-a*	0	7.59
Índice de TRIX*	0.004	4.44

Al realizar una comparación entre sitios y la Norma Mexicana, se observó que las concentraciones de Oxígeno Disuelto, nitritos+nitratos, amonio y fosfatos fueron más altas en el puerto de Progreso. Las concentraciones medias mayores de los fosfatos se registraron en la zona adyacente al puerto de altura y en Progreso, estos valores se relacionan principalmente con la geología, uso del suelo, grado de urbanización, los aportes de aguas residuales de las actividades que se realizan tierra dentro, los aportes de la dársena de Yucalpetén y a factores antrópicos debidos al turismo. De acuerdo a lo anterior, el puerto de Progreso de Castro tiene tendencia a ser un sitio de riesgo, ya que está considerado como la zona más afectada por las actividades humanas de la costa de Yucatán (Herrera-Silveira et. al., 2004; Aranda Cirerol et. al., 2006.).

Esta comparación entre la zona adyacente al Puerto de Altura con los puertos ubicados en el Estado de Yucatán, se realizó con la finalidad de evaluar las características de la calidad del agua en zona adyacente al Puerto de Altura. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 3.

Tabla 4. Promedios y error estándar de diferentes variables físico-químicas de diferentes puertos del estado de Yucatán.

	T (°C)	Sal	OD (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	NH_4^+ (mg/l)	FRS (mg/l)	SiRS (mg/l)	Chl-a (mg/m^3)	Referencia
Norma Oficial	40									1
ZA Puerto de Altura	27.31 (±0.04)	38.15 (±0.05)	4.89 (±0.03)	0.13 (± 0.03)	0.06 (± 0.02)	1.25 (±0.04)	0.04 (±0.03)	2.07 (± 0.08)	0.47 (± 0.07)	2
Progreso	28.5 (± 0.72)	36.9 (± 0.45)	7.3 (±0.62)	0.06 (±0.77)	0.03 (± 0.11)	0.10 (± 1.37)	0.04 (± 0.07)	0.52 (± 2.1)	5.75 (± 0.78)	3
Celestún	28.7 (± 0.78)	36.7 (± 0.22)	6.3 (± 0.37)	0.10 (± 0.37)	0.01 (± 0.08)	0.02 (± 0.83)	0.02 (± 0.05)	0.71 (± 1.33)	5.39 (± 0.59)	3
Sisal	28.6 (± 0.8)	36.4 (± 0.24)	5.6 (± 0.53)	0.19 (± 0.34)	0.01 (± 0.07)	0.01 (± 0.61)	0.01 (± 0.12)	1.20 (± 1.36)	2.78 (± 0.66)	3
Dzilam	30.7 (± 0.1)	35.7 (± 0.27)	4.1 (± 0.33)	0.06 (± 0.08)	0.01 (± 0.04)	0.01 (± 0.3)	0.01 (±0.02)	1.45 (± 0.58)	2.07 (± 0.37)	3
Xixim	28.7 (± 0.75)	36.5 (± 0.47)	6.1 (± 0.48)	0.06 (± 0.25)	0.01 (± 0.08)	0.01 (± 1.01)	0.02 (± 0.03)	0.93 (± 0.03)	4.62 (± 1.23)	3
Palmar	28.7 (± 0.8)	36.5 (± 0.25)	6.4 (± 0.38)	0.08 (± 0.2)	0.01 (± 0.06)	0.01 (± 0.62)	0.03 (± 0.08)	0.63 (± 1.15)	3.48 (± 0.51)	3
Punta baz	28.6 (± 0.78)	36.2 (± 0.22)	6.1 (± 0.47)	0.12 (± 0.22)	0.01 (± 0.07)	0.01 (± 0.25)	0.03 (± 0.05)	0.92 (± 1.58)	5.72 (± 0.75)	3
Chuburná	28.4 (± 0.81)	36.8 (± 0.18)	6.2 (± 0.57)	0.08 (± 0.19)	0.01 (± 0.07)	0.01 (± 0.72)	0.02 (± 0.05)	0.64 (± 0.87)	4.07 (± 1.1)	3
Telchac	27.9 (± 0.84)	36.2 (± 0.26)	4.4 (± 0.59)	0.12 (± 0.31)	0.02 (± 0.12)	0.01 (± 0.22)	0.02 (± 0.04)	0.89 (± 2.03)	2.77 (± 1.56)	3
Chabihau	27.6 (± 0.82)	35.8 (± 0.4)	4.5 (± 0.53)	0.08 (± 0.35)	0.02 (± 0.1)	0.02 (± 0.59)	0.03 (± 0.04)	1.41 (± 1.48)	1.84 (± 0.65)	3
Punta Yalkubul	29.1 (± 0.87)	36.5 (± 0.87)	6.1 (± 0.49)	0.11 (± 0.33)	0.01 (± 0.1)	0.04 (± 1.09)	0.03 (± 0.04)	0.86 (± 2.8)	7.75 (± 1.71)	3
Punta Bachul	28.8 (± 1.01)	36.6 (± 0.68)	5.0 (± 0.64)	0.05 (± 0.19)	0.01 (± 0.07)	0.02 (± 1.07)	0.02 (± 0.04)	0.90 (± 2.66)	1.90 (± 0.88)	3
Ria lagartos	28.2 (± 1.05)	36.9 (± 0.18)	5.2 (± 0.52)	0.05 (± 0.21)	0.01 (± 0.07)	0.04 (± 1.01)	0.04 (± 0.07)	0.58 (± 1.46)	2.64 (± 0.76)	3
Coloradas	28.2 (± 0.96)	37.1 (± 0.22)	4.5 (± 0.45)	0.05 (± 0.23)	0.01 (± 0.06)	0.03 (± 1)	0.03 (± 0.04)	0.91 (± 2.51)	1.56 (± 0.95)	3
El cuyo	28.2 (± 0.92)	36.8 (± 0.59)	6.2 (± 0.61)	0.06 (± 0.13)	0.01 (± 0.07)	0.03 (± 0.68)	0.03 (± 0.05)	1.22 (± 2.06)	2.30 (± 1.14)	3

Donde: Temperatura (T), Salinidad (Sal), Oxígeno Disuelto (OD), Nitratos (NO3), Nitritos (NO2), Amonio (NH4), Fosfatos (FRS), Silicatos (SiRS) y Clorofila-a (Chl-a). 1: NOM-001-ECOL-1996, 2: Este estudio y 3: Herrera-Silveira y Morales-Ojeda, 2009

Los límites máximos permisibles para contaminantes básicos contenidos en la norma mexicana NOM-ECOL-001-1996 se observan en la tabla 4 y para metales pesados en la tabla 5.

Tabla 5. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos contenidos en la NOM-ECOL-001-1996.

Límites máximos permisibles para contaminantes básicos			
	Aguas Costeras		
Parámetros	Explotación pesquera, navegación y otros usos	Recreación	Estuarios
Temperatura (°C)	40	40	40
Grasas y aceites (mg/l)	25	25	25
Materia Flotante (mg/l)	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos Sedimentables (ml/l)	2	2	2
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	200	125	125
Demanda Bioquímica De Oxigeno$_5$ (mg/l)	200	150	150
Nitrógeno Total (mg/l)	No Aplica	No Aplica	25
Fosforo Total (mg/l)	No Aplica	No Aplica	10

Variación Espacio Temporal

Temperatura

La variación de la temperatura durante las tres épocas climáticas se presenta en la figura 21 donde se aprecia que en nortes (Fig. 21a) es cuando el agua es más fría en la mayoría de las estaciones, principalmente en la zona marina (<25.18°C), para secas se tienen temperaturas elevadas en la mayoría de la zona de estudio (>28.4°C) (Fig. 21b) y para lluvias las mayores se registran principalmente en la zona costera (<28.5°C) (Fig. 21 c).

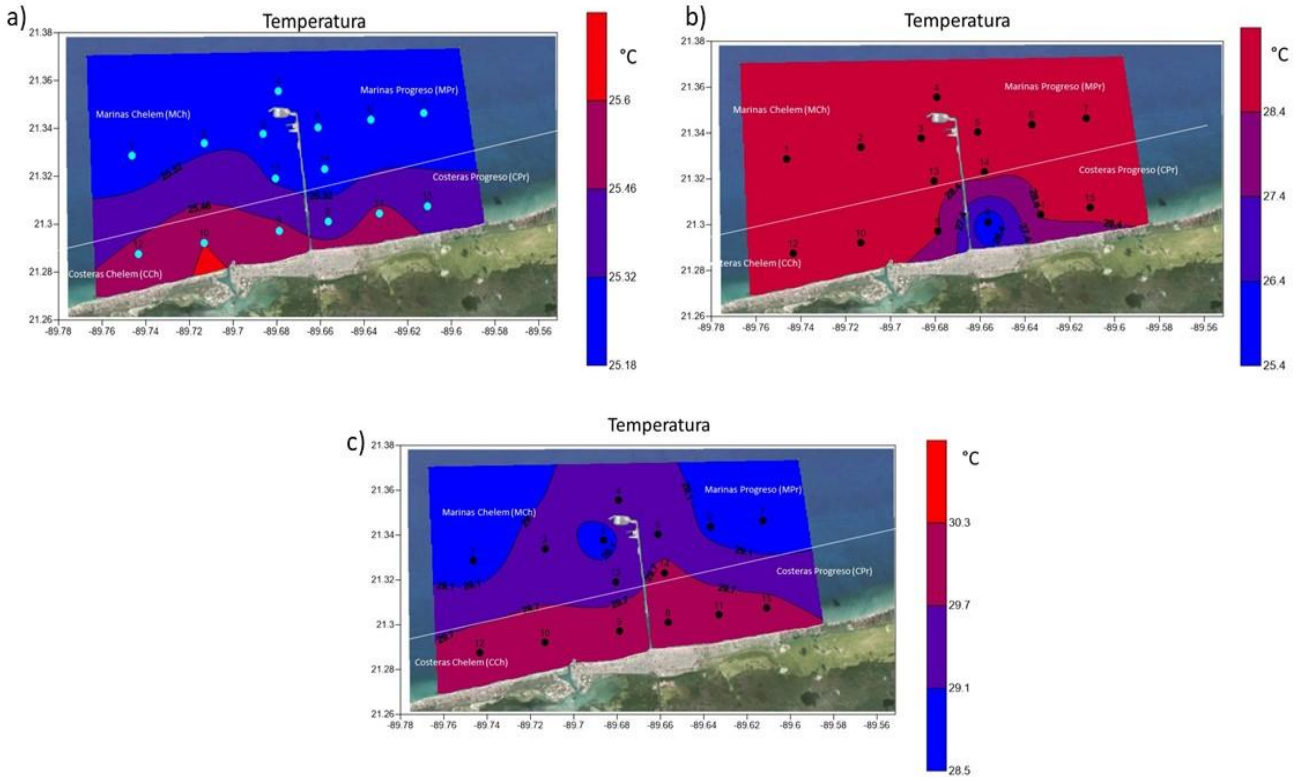

Figura 21. Variación espacio temporal de la temperatura en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Salinidad

Para la época de nortes la distribución de las salinidad fue casi homogénea en el área de estudio con valores que rondaron los 35.38 UPS, en secas se registró mayor variación donde los mayores valores se presentaron en la zona costera (>36.67 UPS) y los menores en las zonas marinas (35.5 UPS). En lluvias los valores de salinidad pasaron a ser moderados (>35.66 UPS) en toda la zona por la probable mezcla con el agua dulce (Fig. 22)

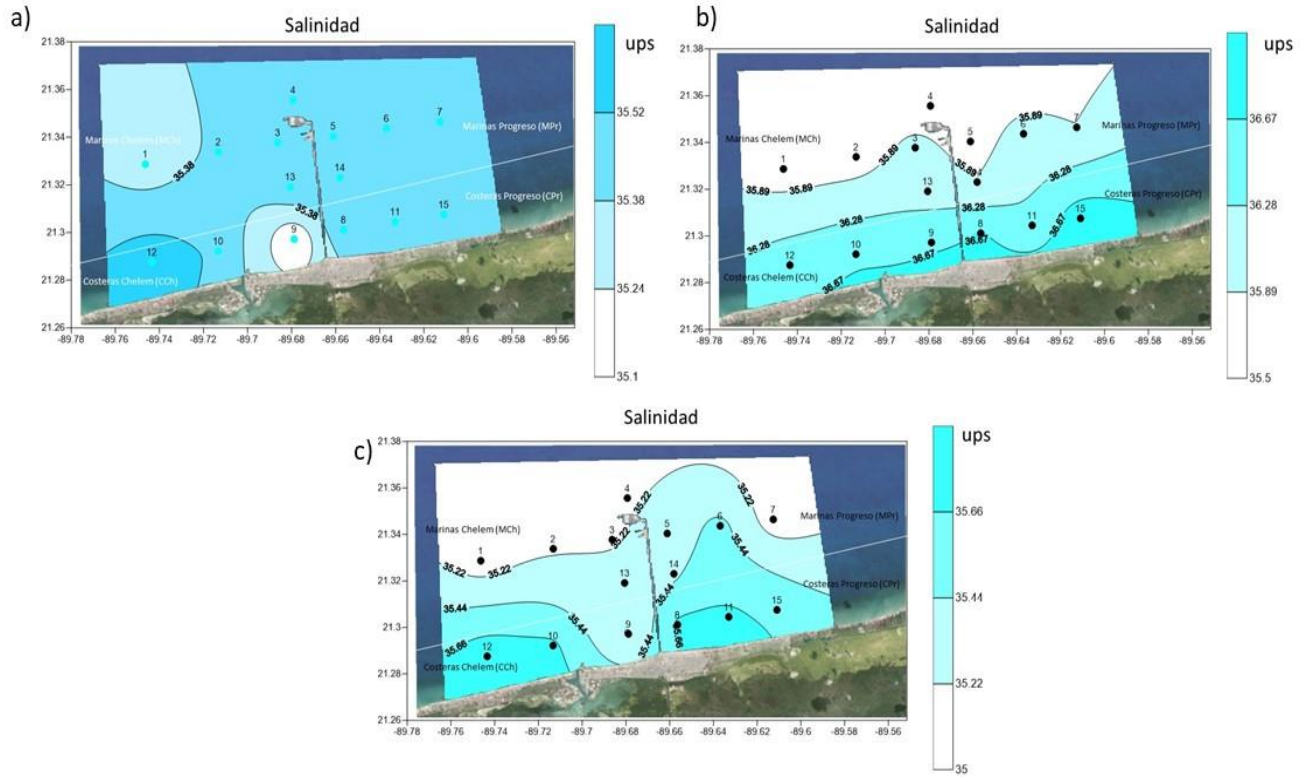

Figura 22. Variación espacio temporal de la salinidad en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Oxígeno Disuelto

La distribución del oxígeno en nortes se aprecia en la figura 23 a, donde se ve que los valores bajos (<5.95 mg/l) se encuentran a lo largo de la zona costera para aumentar hacia la zona marina (>6.52 mg/l), para secas se presentó una distribución más homogénea con valores moderados en la mayoría de las estaciones (6.4 mg/l) y los bajos (<5.6 mg/l) hacia el final de la zona costera de Progreso, estación 15. En lluvias se presentó un parche de alta concentración de oxígeno (6.14 mg/l) hacia la zona marina de Chelem y las bajas concentraciones (5.15 mg/l) se localizan en la zona costera de Progreso (Fig. 23 c).

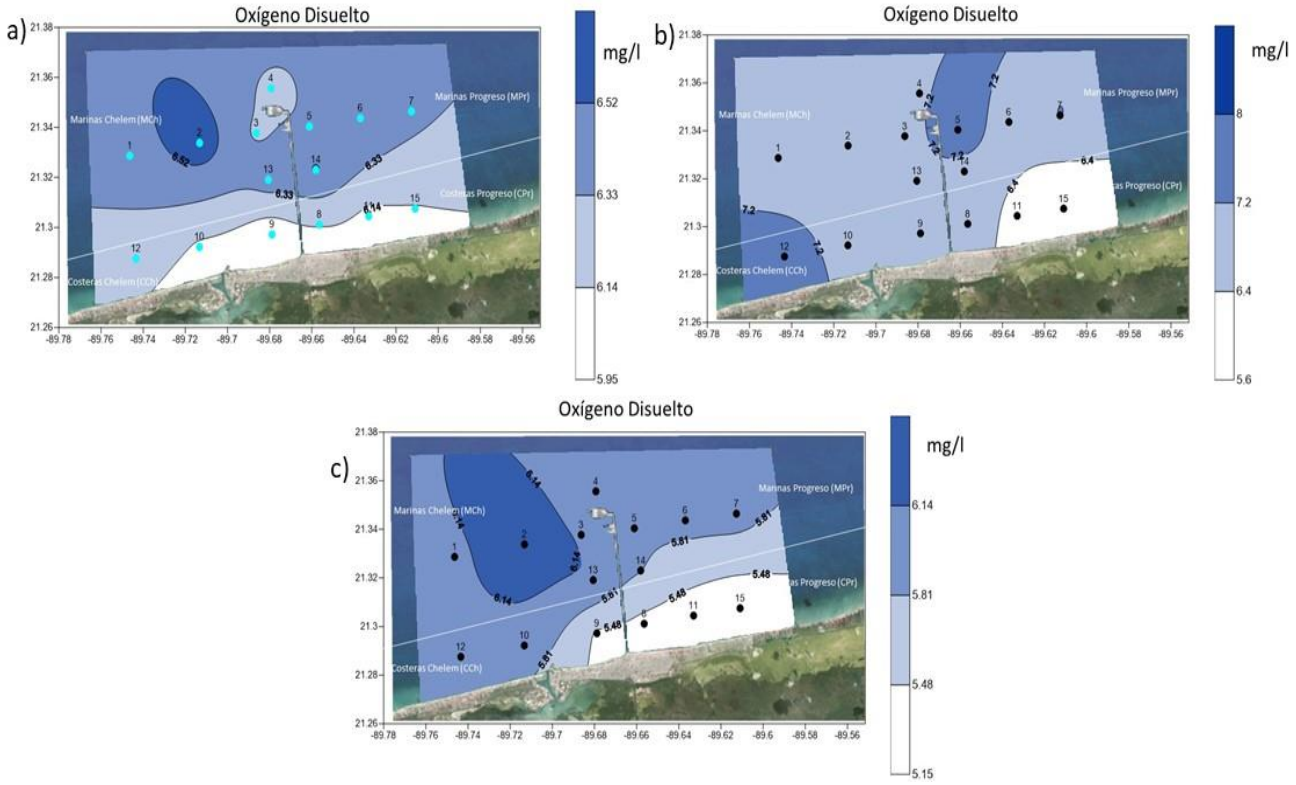

Figura 23. Variación espacio temporal del oxígeno disuelto en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Sólidos Suspendidos Totales

Para nortes, las concentraciones de sólidos suspendidos totales, los mayores valores (>34 mg/l) se registraron en la zona costera de Chelem para ir disminuyendo hacia la zona marina (<16 mg/l), en secas el área de las concentraciones altas (>51 mg/l) disminuye en la zona de Chelem, para decrecer hacia la zona marina (<33 mg/l). En lluvias se registraron 2 zonas de alta concentración una en Progreso y otra en Chelem (>56 mg/l) para presentar el mismo patrón de disminución como en las épocas anteriores, cabe mencionar que las mayores concentraciones se registraron en la época de lluvias (Fig. 24).

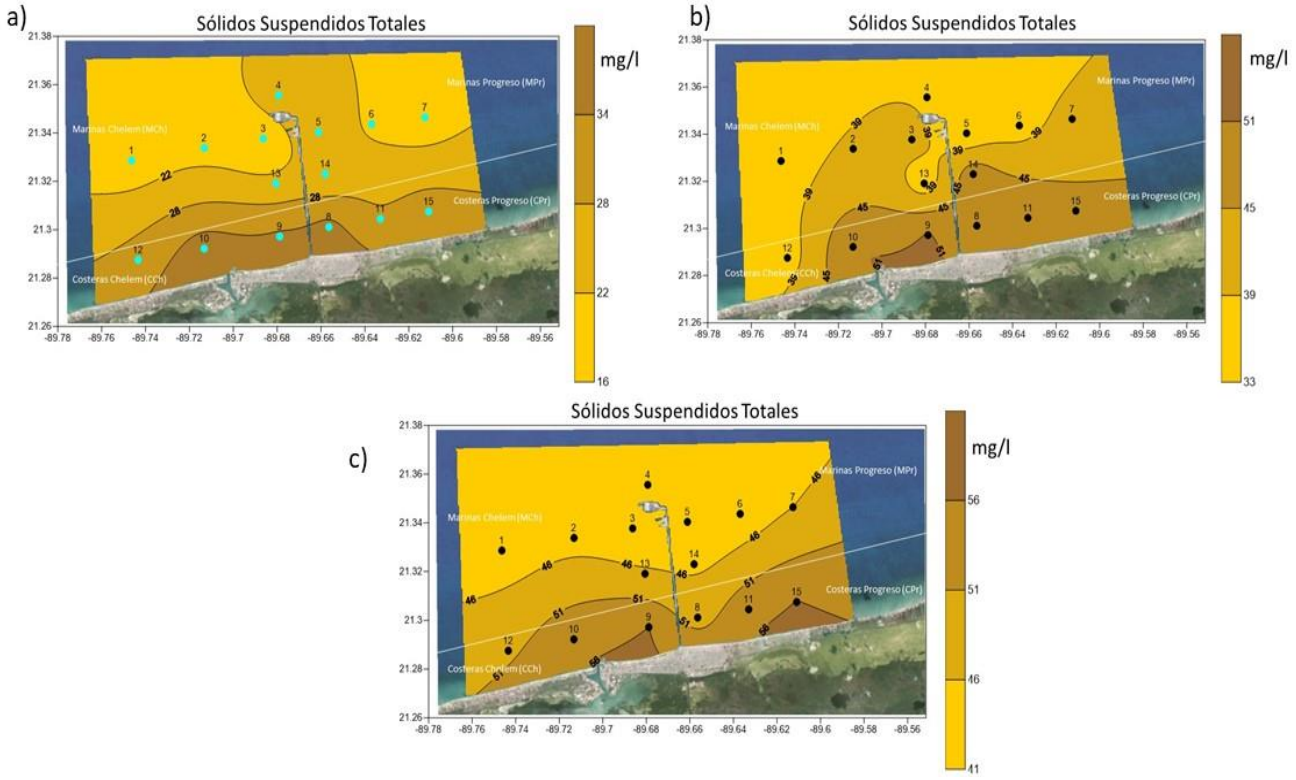

Figura 24. Variación espacio temporal de los sólidos suspendidos totales en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Coliformes Fecales

En nortes la mayor concentración de coliformes se registró en las inmediaciones de la estación 12 (0.26 UFC/100 ml) cercana a la salida del puerto de abrigo de Chelem, para disminuir hacia la zona marina, para secas las mayores concentraciones se presentaron en las zonas costeras de Chelem y Progreso (0.42 UFC/100 ml). Para lluvias la mayor concentración se encontró en las cercanías de la estación 10 (0.82 UFC/ 100 ml) en Chelem (Fig. 24).

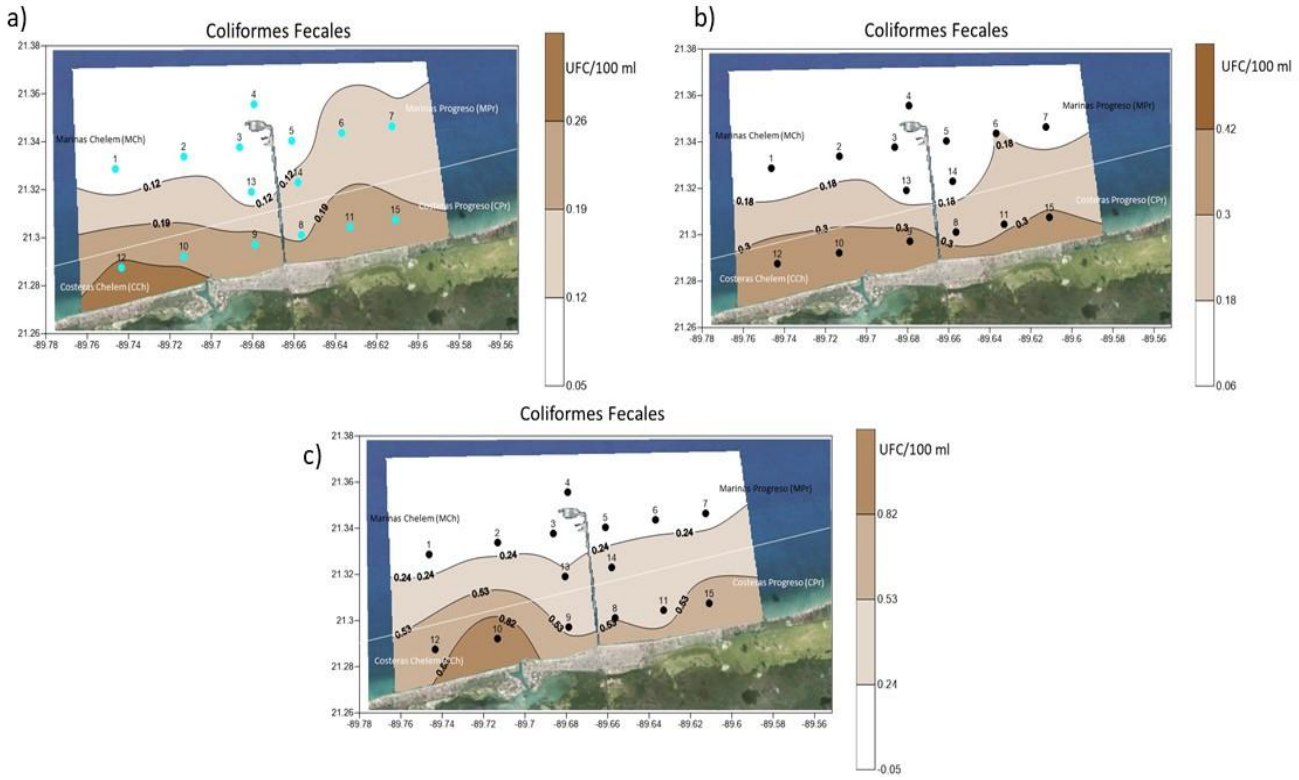

Figura 24. Variación espacio temporal de los sólidos suspendidos totales en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Nitritos+Nitratos

Para este parámetro en nortes, las mayores concentraciones se distribuyeron hacia la zona marina (>5.9 mg/l) (estaciones 1 y 2) de Chelem (Fig. 25 a). En secas se redujo la zona de altas concentraciones (5.8 mg/l) en la zona marina, registrándose hacia la estación 1 (Fig. 25 b). Para lluvias las mayores concentraciones se localizaron hacia la zona costera de Chelem y Progreso (>0.18 mg/l) (estaciones 12 y 15) para disminuir hacia la zona marina (Fig. 25 c), en esta época los valores fueron los más bajos de las tres épocas.

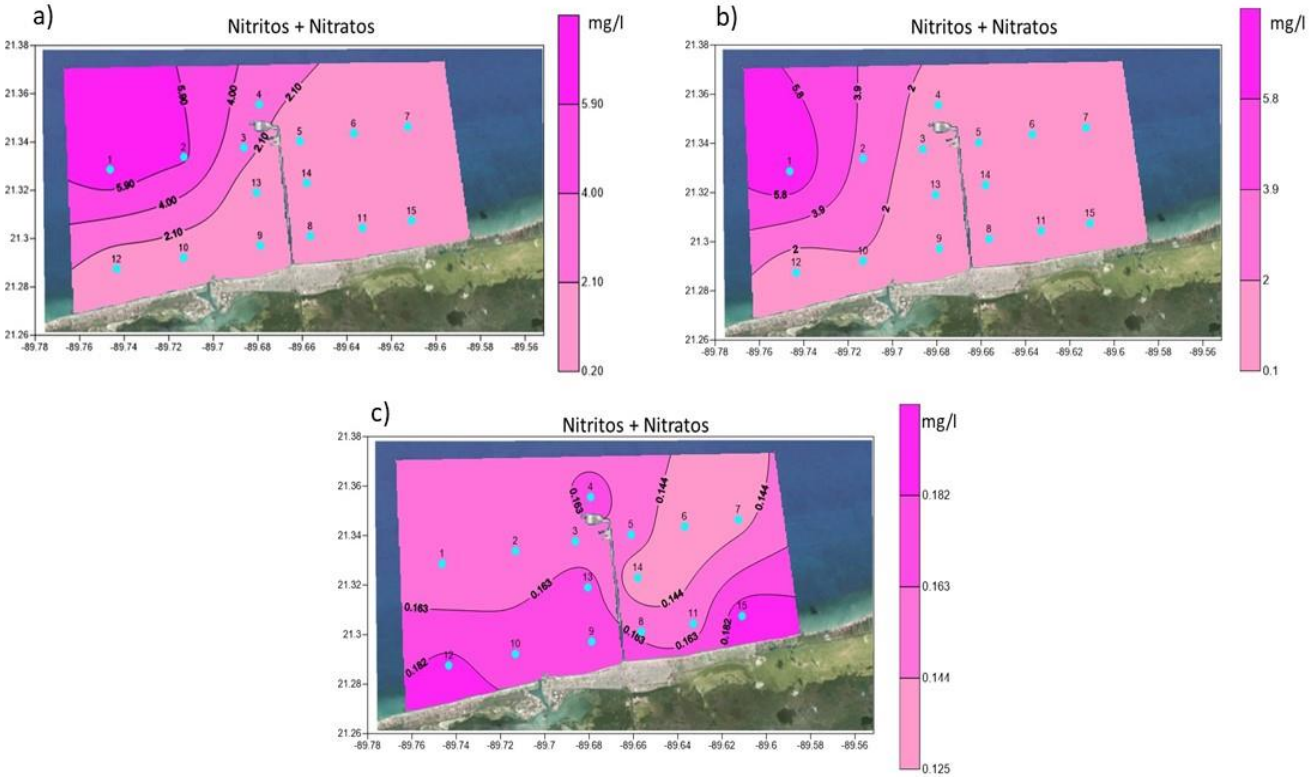

Figura 25. Variación espacio temporal de Nitritos+Nitratos en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Amonio

El amonio en la época de nortes registro sus mayores valores (1.8 mg/l) en las cercanías de la estación 11 (costera Progreso) para posteriormente disminuir hacia la zona marina de ambas localidades. En secas las mayores concentraciones (>0.037 mg/l) se registraron en la estación 10 (costera Chelem) para reducir hacia las zonas marinas de ambas localidades. Para lluvias los mayores valores (>0.0157 mg/l) se localizaron hacia la zona marina de Chelem (estaciones 1, 2, 3 y 4) y reduciéndose hacia la zona costera de ambas zonas (Chelem y Progreso) (Fig. 26).

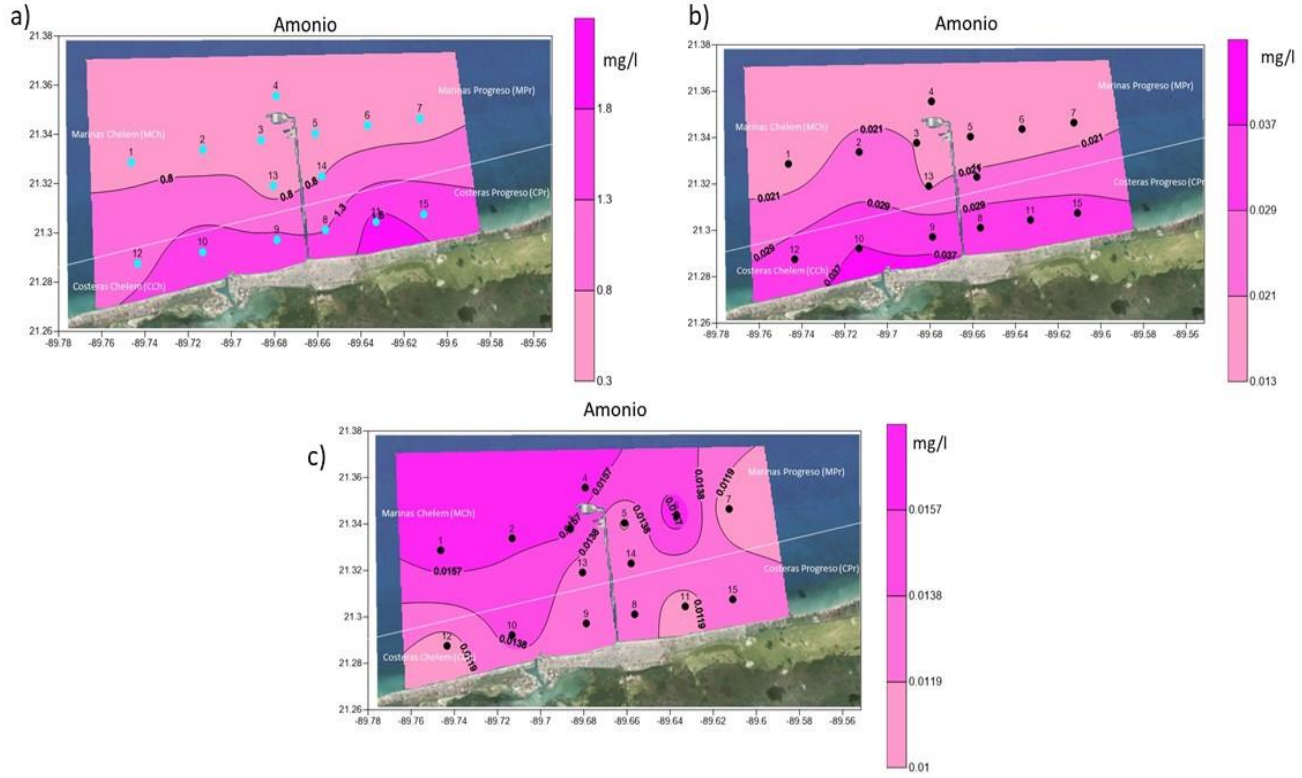

Figura 26. Variación espacio temporal de amonio en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Fosfatos

Para nortes los fosfatos presentaron un parche de altas concentraciones a la altura de la estación 10 (>0.5 mg/l) (zona costera de Chelem), mientras que el resto del área de estudio obtuvo bajas concentraciones (<0.14 mg/l). En secas las altas concentraciones se registraron en la zona costera de Chelem (>0.077 mg/l) para disminuir hacia las zonas marinas (0.02 mg/l). Para lluvias las concentraciones fueron de moderadas en la zona costera a bajas en la zona marina (Fig. 26).

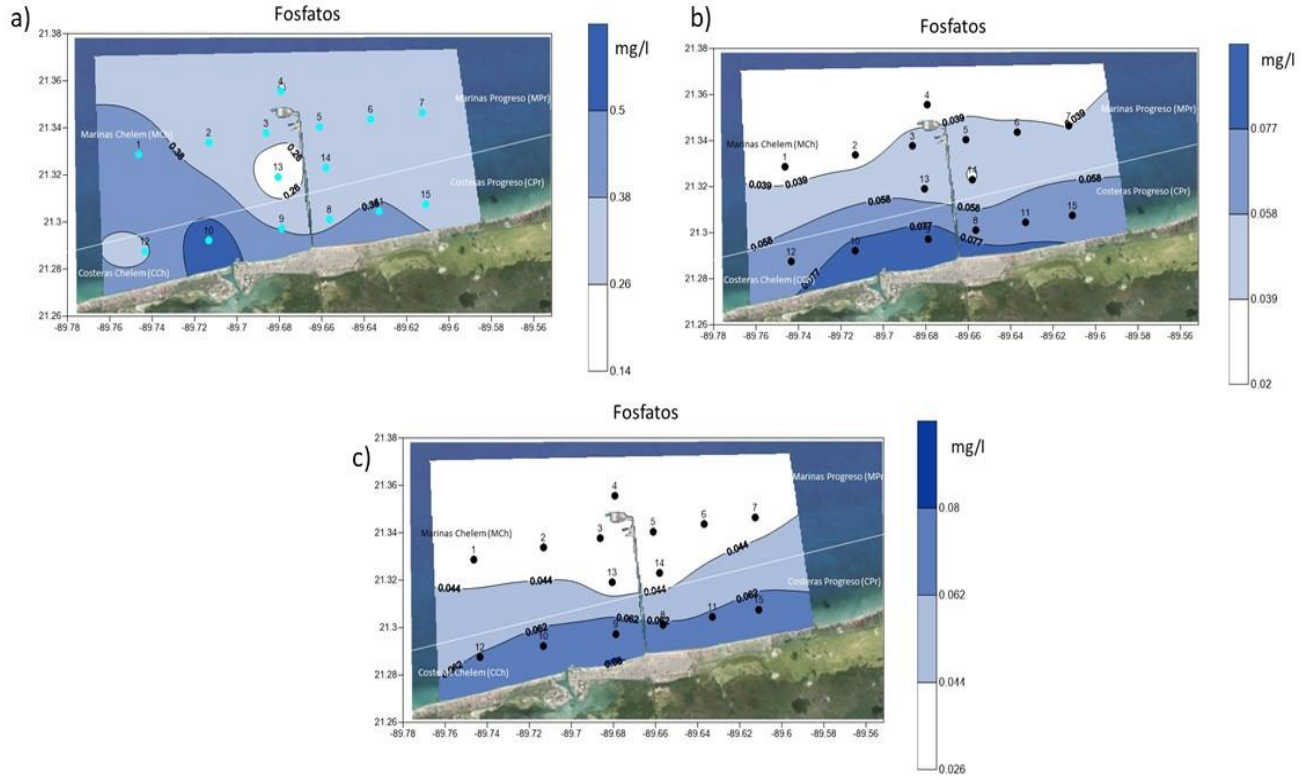

Figura 26. Variación espacio temporal de fosfatos en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Silicatos

Para nortes los silicatos las mayores concentraciones se registraron en la zona costera de Progreso (>6.6 mg/l) (estación 11) y las menores en la zonas marinas (<2.2 mg/l). En secas las mayores concentraciones se presentaron en la zona costera de Chelem (> 0.55 mg/l), frente a la estación 9, para disminuir hacia las zonas marinas (<0.31 mg/l), las concentraciones en esta época en general fueron menores a las otras dos épocas. Para lluvias las mayores se registraron en la estación 10 (zona costera de Chelem) (>6.2 mg/l) para disminuir hacia la zona marina (Fig. 27).

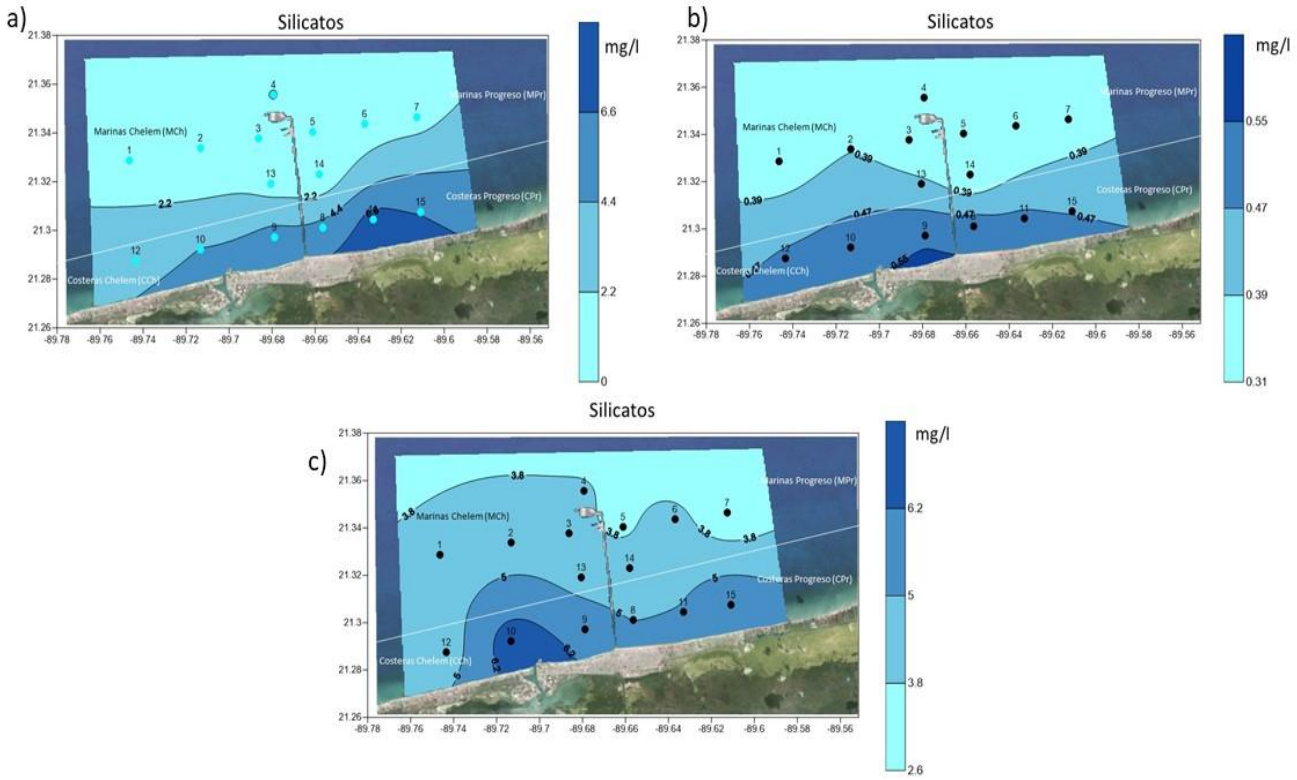

Figura 27. Variación espacio temporal de silicatos en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Clorofila-a

En nortes las mayores concentraciones se registraron en la zona costera de Progreso (estación 10) (>2.5 mg/m^3), las menores concentraciones se presentaron en las zonas marinas (<0.7 mg/m^3). Para secas también las mayores concentraciones se localizaron en la zona costera de Progreso (>1.9 mg/m^3), para disminuir hacia la zona marina, en esta época las concentraciones son menores que en la otras dos. Para lluvias las mayores concentraciones se localizan alrededor de la estación 13 (>1.6 mg/m^3) (zona marina de Chelem) cercana al muelle de Progreso, para disminuir en dirección de Progreso (Fig. 28).

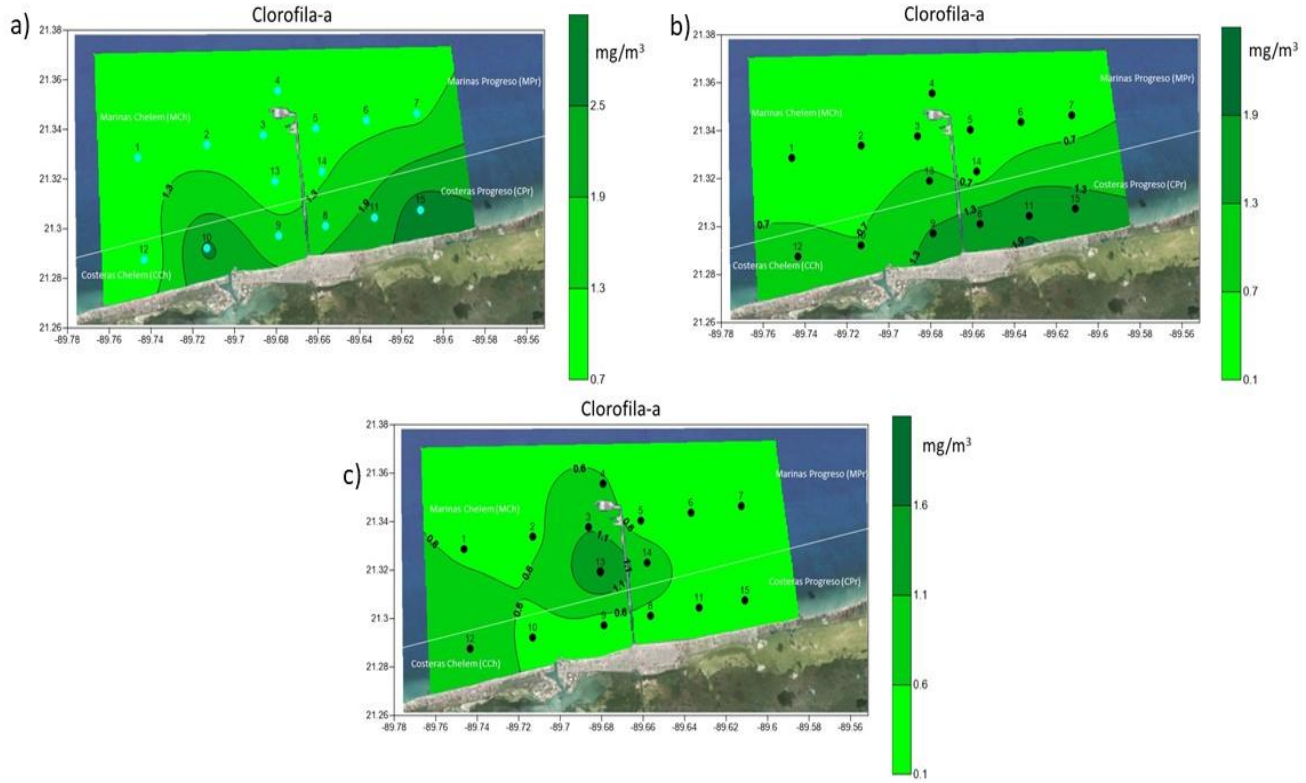

Figura 28. Variación espacio temporal de clorofila-a en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Sólidos Disueltos

Para nortes las menores concentraciones (<39100 m/l) se distribuyen en la zona costera de Chelem y Progreso (Fig. 29 a) y las mayores se localizan en la zona marina de Progreso (>41800 mg/l). En secas las mayores concentraciones se presentaron de la zona costera hacia la zona marina de Progreso formando un parche de la estación 1 a la 6 (<42000 mg/l) y las menores de la zona costera a la marina de Chelem (<40200 mg/l) (Fig. 29 b). Para lluvias las mayores concentraciones se registraron en la zona costera de Chelem y Progreso (>42000 mg/l) y las menores están hacia lo zona marina (Fig. 29 c).

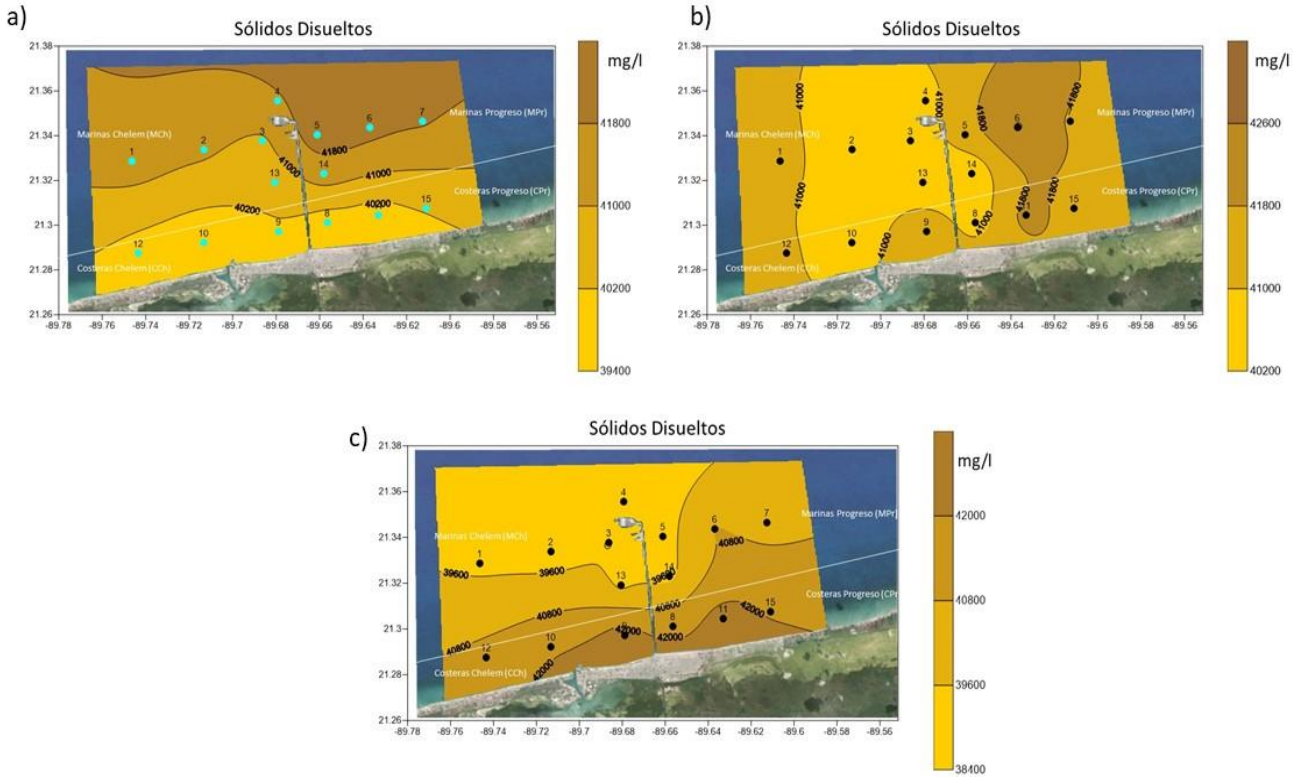

Figura 29. Variación espacio temporal de solidos disueltos en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Índice de TRIX

En nortes se localiza una zona con tendencia a la mesotrófia localizada frente a Progreso (estación 6) y otra que se presentó en las estaciones marinas de Chelem (Fig. 30 a). Para secas se localizó el parche con tendencia a la mesotrófia en la estación 6, pero con menor tamaño (Fig. 30 b). en lluvias también se registró el parche e de mesotrófia en la estación 6 con diferentes dimensiones que, en las épocas anteriores, mientras que el resto del área de estudio es oligotrófico (Fig. 30 c).

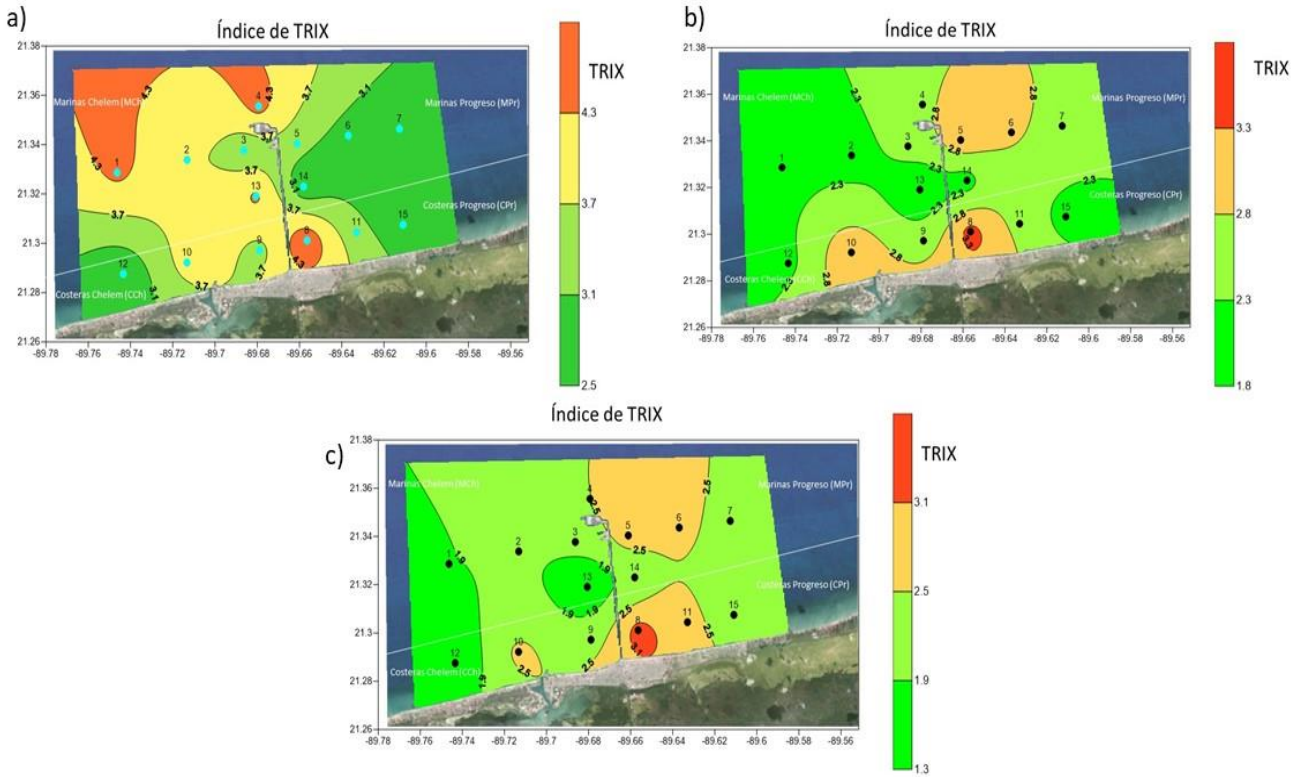

Figura 30. Variación espacio temporal del índice de TRIX en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Demanda Bioquímica de Oxígeno

Para nortes las mayores concentraciones se presentaron en la zona costera de Chelem y Progreso (>2.77 mg/l) y las menores en las zonas marinas (<1.9 mg/l) (Fig. 31 a). En secas las zonas costeras de Chelem y Progreso registraron las mayores concentraciones (>3.17 mg/l) y las menores en la zona marina (<2.3 mg/l) (Fig. 31 b). En lluvias las mayores concentraciones se registaron en las zonas costeras de Chelem y Progreso (>4.32 mg/l) y las menores en la zona marina (<3.45 mg/l) (Fig. 31 c).

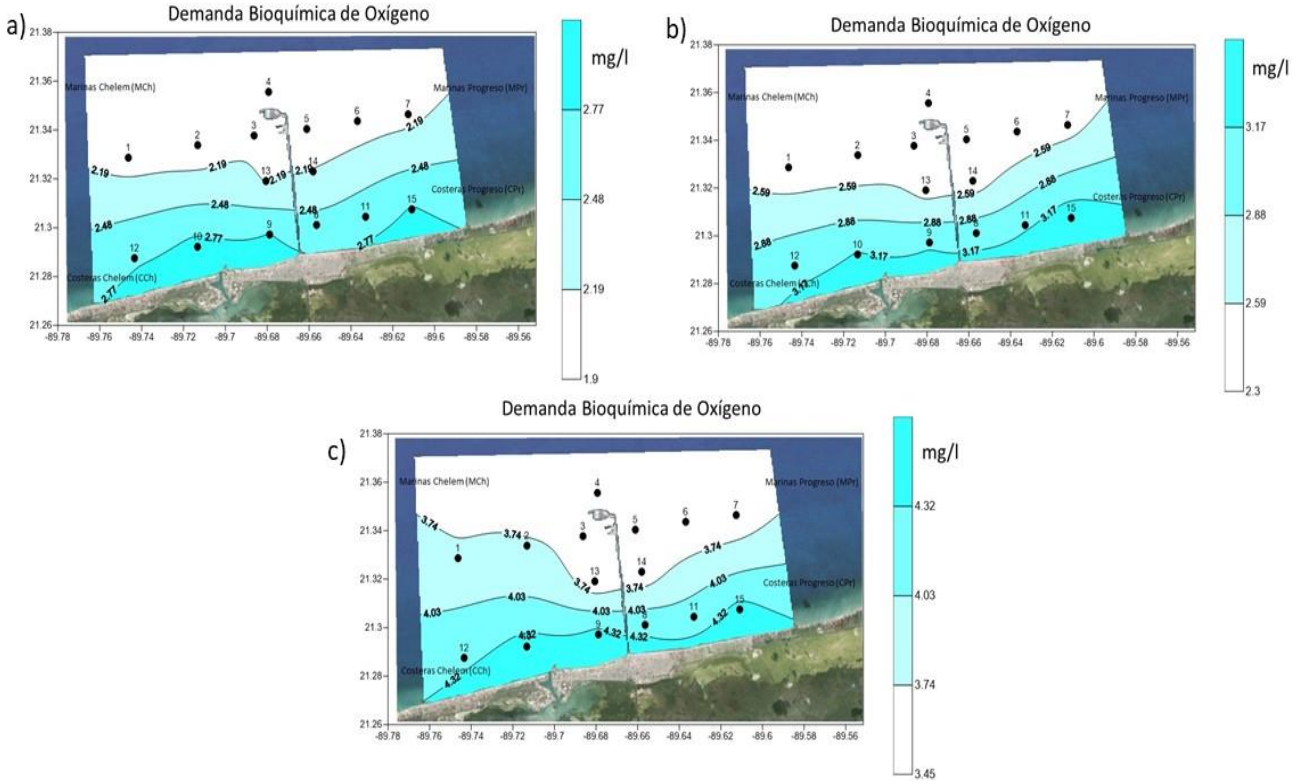

Figura 31. Variación espacio temporal de la demanda bioquímica de oxígeno en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Hidrocarburos antropogénicos Totales

Para nortes la mayor concentración se registró en la zona costera de Chelem (>0.32 mg/l) cercana a la boca de la dársena de Chelem, para disminuir hacia las zona marina (Fig. 32 a). En secas el núcleo de altas concentraciones es menor, en dimensión, a la entrada de la dársena (>0.33 mg/l) (Fig. 32 b). En lluvias se hace más extenso el núcleo de altas concentraciones (>0.3 mg/l) en la entrada de la dársena (Fig. 32 c)

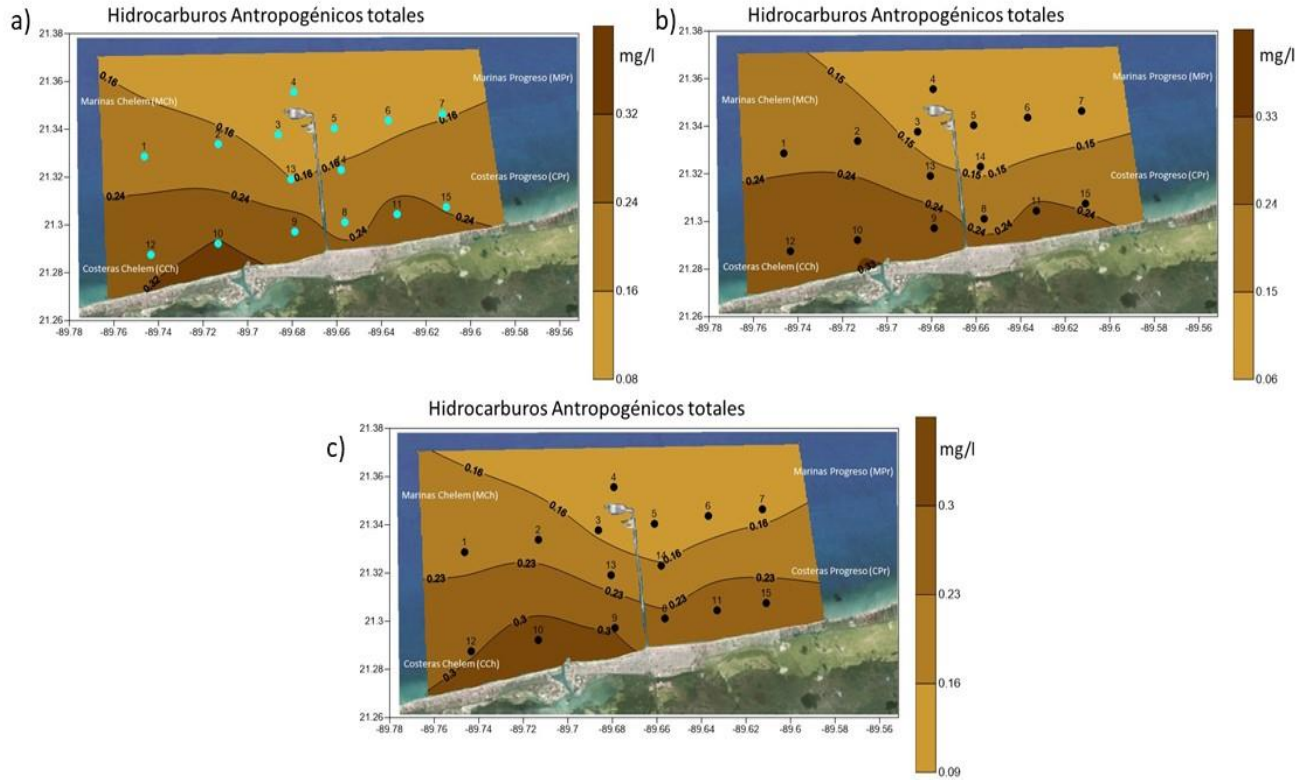

Figura 32. Variación espacio temporal de hidrocarburos antropogénicos toles en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

pH

Para nortes los valores mayores se registraron en la zona marina de Chelem y Progreso (>7.5) mientras que los menores están localizados en la zona costera de ambas localidades (Fig. 33 a). En secas los mayores valores se presentaron en la zona marina de Progreso (4.42) y los menores en la zona costera-marina de Chelem (7) (Fig. 33 b). En lluvias los mayores valores se localizaron en la zona marina de Chelem y Progreso (7.52) y los menores valores se registraron en la zona costera de Chelem (7.46) (Fig. 33 a).

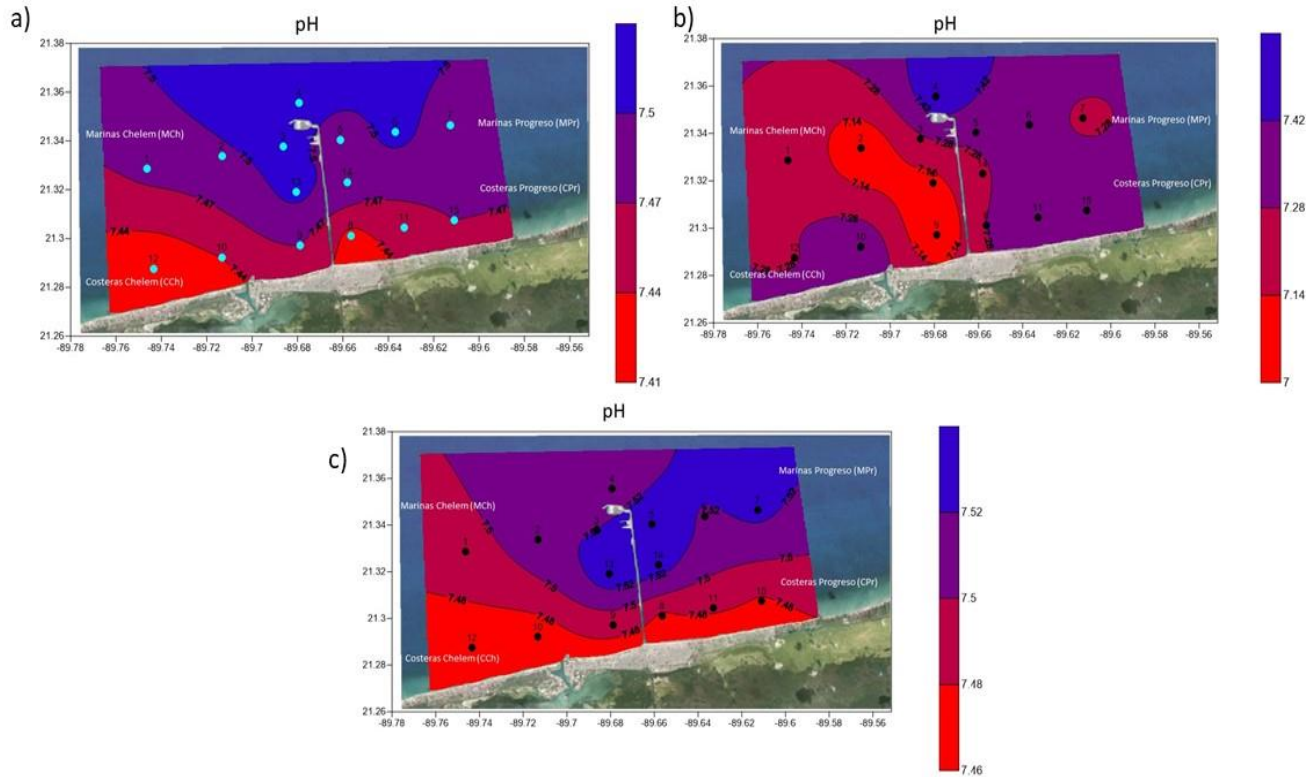

Figura 33. Variación espacio temporal del pH en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Plomo

En nortes las mayores concentraciones se registraron alrededor de la estación 12 (zona costera de Chelem) (>0.06 mg/l) para disminuir hacia la zona marina de Progreso (Fig. 34 a). Para secas las altas concentraciones (>0.062 mg/l) se localizaron en la zona costera de Chelem y Progreso (Fig. 34 b) para disminuir hacia la zona marina de Progreso. En lluvias se registraron 2 zonas de alta concentración una en la zona costera de Chelem y la otra en la zona costera de Progreso (0.052 mg/l) (Fig. 34 c) y las menores se presentaron en la zona marina de Progreso.

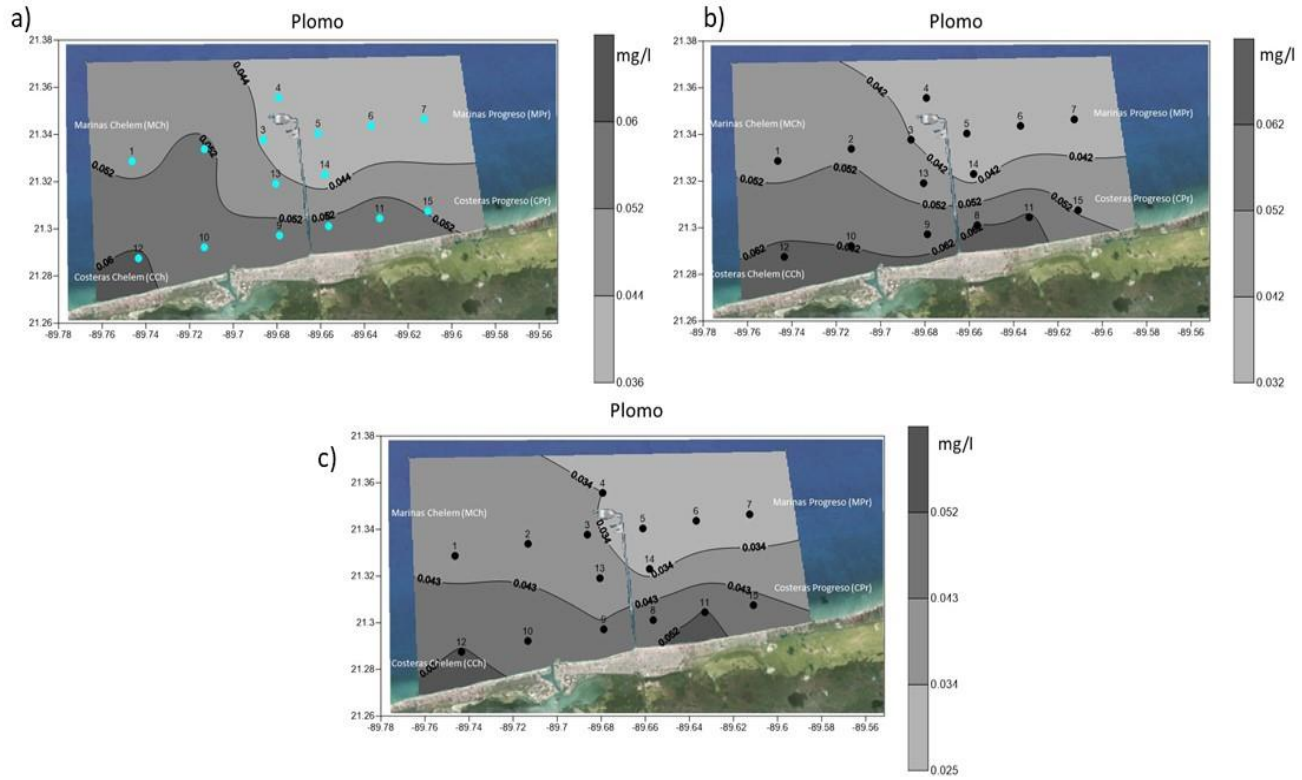

Figura 34. Variación espacio temporal del plomo en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Sulfatos

En nortes las mayores concentraciones se localizaron en la zona marina de Progreso cercanas a la estación 7 (>2980) y las menores en la zona costera y marina de Chelem (Fig. 35 a). Para secas las mayores se registraron en la zona costera de Chelem (estación 12) (>3380 mg/l) y las menores en la zona marina de Chelem (Fig. 35 b). En lluvias las mayores concentraciones se localizaron en la zona costera de Chelem (>3030 mg/l) y las menores hacia la zona marina de Chelem (Fig. 35 c).

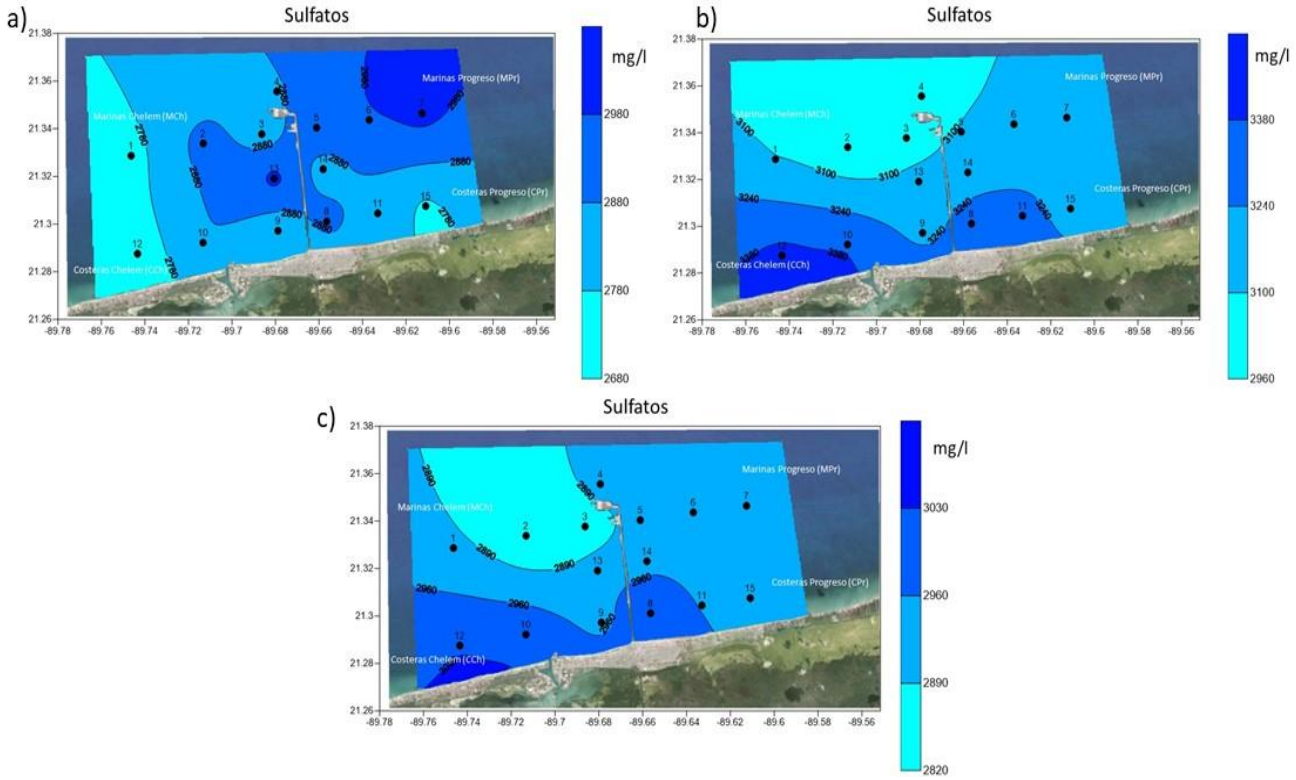

Figura 35. Variación espacio temporal de sulfatos en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

Turbidez

En nortes los valores más bajos se registraron en las zonas marinas e Chelem y Progreso (<3.2 UTR) y el más alto en la estación 11 (costera Progreso) (>5 UTR) (Fig. 36 a). Para secas los valores mayores se localizan en la zona costera de Chelem y Progreso (>3.42 UTR) y los menores (<2.25) en las zonas marinas de ambas localidades (Fig. 36 b). En lluvias los menores valores se registraron en la zona costera e Chelem y Progreso (3.8 UTR), muy cercanas a la costa, los menores registros se localizaron en la zona marina de las dos localidades (<2.6 UTR) (Fig. 36 c).

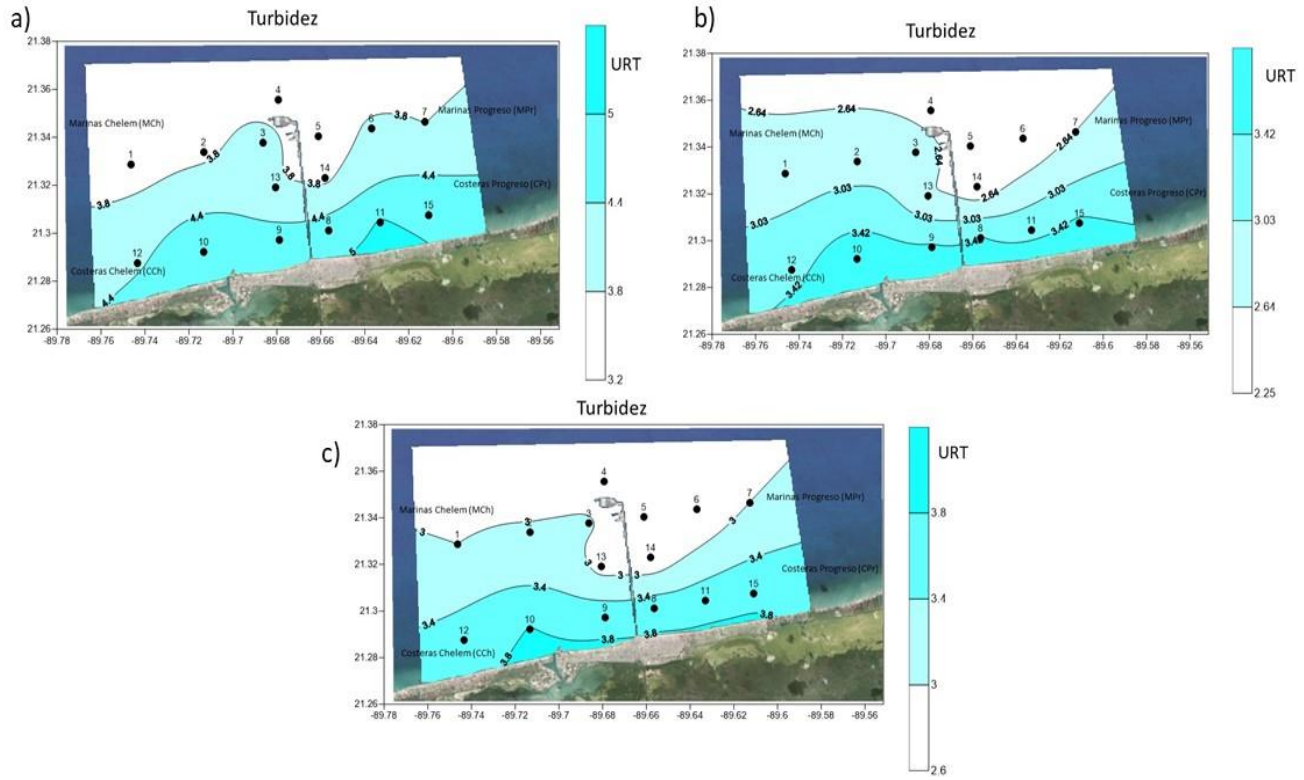

Figura 36. Variación espacio temporal de la turbidez en las tres épocas climáticas de 2019. a) Nortes, b) Secas y c) Lluvias.

6) CONSIDERACIONES FINALES

En la zona adyacente al puerto de altura de Progreso de Castro, existieron diferencias significativas entre las épocas en todas las variables. Las estaciones 4, 8, 10, 12 y 15 presentaron los mayores valores en la mayoría de las variables analizadas. Los niveles de las concentraciones y valores de estos parámetros son altos (las cuales se consideran malas) en relación a otros sitios costeros y a los valores permitidos en los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua requerida para uso o aprovechamiento de aguas marinas costeras de la NOM-001-ECOL-1996. Esto probablemente se deba a que son las estaciones costeras las que reciben los efectos de las actividades que se realizan tierra adentro y que están teniendo como destino final la zona costera. Por lo anterior, se mantiene la recomendación de realizar un análisis temporal con la información del programa de monitoreo que la Administración Portuaria Integral de Progreso (API-P) ha realizado desde hace varios años, así como con otros estudios llevados a cabo por el laboratorio o por instituciones de la región.

Al realizar la comparación entre sitios y la Norma Mexicana, se observó que las concentraciones de los nitritos+nitratos, fosfatos, amonio y silicatos del puerto de Progreso son altas como en algunos sitios con síntomas de eutrofización. Las concentraciones medias mayores de los fosfatos se registraron en la zona adyacente al puerto de altura y en Progreso, relacionándose principalmente con la geología, grado de urbanización, los aportes de aguas residuales de las actividades que se realizan tierra dentro, los aportes de la dársena de Yucalpetén y a factores antropogénicos debidos al turismo.

El índice de TRIX indico que las zonas que tienen alto riesgo de eutroficación son las Costera Chelem (CCh), Marina Chelem (MCh) y la Costera de Progreso (CPr).

De acuerdo con lo anterior el puerto de Progreso tiene tendencia a ser un sitio vulnerable a la contaminación orgánica, ya que está considerado como la zona más afectada por **"las actividades humanas"** de la costa de Yucatán

- La presencia de Coliformes Totales y Coliformes Fecales, así como sus altas concentraciones indican contaminación en la zona costera.
- Las concentraciones de nitratos+nitritos y fosfatos son mayores a los de los otros puertos de Yucatán indicando contaminación.

- Las concentraciones de clorofila-a indica que la zona más cercana a la playa presenta síntomas primarios de eutrofización.
- Las altas concentraciones de las diferentes variables son producto de las actividades y descargas de la población urbana de los puertos de Chelem y Progreso.
-No se identifican impactos derivados de la actividad de API-Progreso.

7. REFERENCIAS

Andrew D. Eaton. Leonore s. Clesceri, Arnold E. Greenberg 1995. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 19 th Edition.

Aranda-Cirerol, N., Herrera-Silveira, J.A., Comin, F.A., 2006. Nutrient water quality in a tropical coastal zone with groundwater discharge, northwest Yucatan, Mexico. Estuarine, Coastal and Shelf Science 68, 445–454.

Batllori, E., J. Febles and J. Díaz. 1999. Landscape change in Yucatan northwest coastal wetlands (1948-1991). *Human Ecology Review* **6** (1):8-20.

Back, W. & Lesser, J.M. 1981. Chemical constraints of groundwater management in the Yucatan Peninsula, Mexico. Journal of Hydrology 10, 330-368.

Boyer, Joseph N., Fourqurean, James W. and Jones, R. D., 1997. Spatial Characterization of Water Quality in Florida Bay and Whitewater Bay by Multivariate Analyses: Zones of Similar Influence. Estuaries, 20: 4, 743-758.

Bricker, S. B., Ferreira, J.G. & Simas, T. 2003. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status Ecological modelling 169, 39-69.

Burkholder, J., Libra, B., Weyer, P., Heathcote, S., Koplin, D.& Thorne, P.(2007) Impacts of waste from concentrated animal feeding operations on water quality. Environmental Health Perspective 115, 308–312.

Burke, P. M., Hill, S., Iricanin, N., Douglas, C., Essex, P. and Tharin, D. 2002. Evaluation of preservation methods for nutrient species collected by automatic samplers. Environmental Monitoring and Assessment, 80: 149-173.

Cochrane, J.D. 1969. Water and circulation on Campeche Bank in May. Bulletin Jpn. Society. Fishery. Oceanographics. Spec. (Prof. Uda's Commemorative Papers), 123-128.

Coelho, J.P., Flindt, M.R., Jensen, H.S., Lillebø, A.I. & Pardal, M.A. 2004. Phosphorus speciation and availability in intertidal sediments of a temperate estuary: relation to eutrophication and annual P-fluxes. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 61, 583–590.

Dayton, P.K., V. Currie., T. Gerrodette, B.D. Keller., R. Rosenthal y D. V. Tresca. 1984. Patch dynamics and stability of some California kelp communities. Ecological Monographs, 54(3):253-289.

Jeffrey, S. W. y Humphrey, G.F., 1975. New spectrophotometric equation for determining chorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. Biochemical Physiology.

Hanshaw, B.B. & Back, W. 1980. Chemical mass-wasting of the northern Yucatan Peninsula by groundwater dissolution. Geology 8, 222-224.

Herrera-Silveira, J.A., Comin, F.A., Aranda-Cirerol, N., Troccoli, L., Capurro, L., 2004. Coastal waters quality assessment in the Yucatan Peninsula, management implications. Ocean and Coastal Management 47, 625–639.

Herrera-Silveira., J.A. & Comin, J.F. 2000. An introductory account of the types of aquatic ecosystems of Yucatan Peninsula (SE Mexico). In Aquatic Ecosystems of Mexico. Status and Scope. Ed Munavar, M., S. Lawrence, I. Munavar and D. Malley. Backhuys Publishers, Liden.

Herrera-Silveira, J.; Ramirez, J.; Zaldivar, A.1998. Overview and characterization of the hydrology and primary producer communities of selected coastal lagoons of Yucatan, Mexico. Aquat. Ecosystem, Health and Management 1, 353-372.

Herrera-Silveira, J. 1999. Las Mareas Rojas. BIODIVERSITAS, CONABIO, México. 5: 7-11.

Herrera-Silveira, J.A. Zaldívar, J. y Teutli, C. y Alonso, D. 2002. Restauración hidrológica del manglar de cuenca de isla arena: construcción de alcantarillas en la carretera el remate-punta arena, Campeche: indicadores de éxito de la obra. CINVESTAV-DUMAC. 25 p.

Herrera-Silveira, J. 2006. Lagunas Costeras De Yuctan (SE, MÉXICO): Investigación, Diagnóstico y Manejo. Ecotrópicos 19 (2): 94-108. Sociedad Venezolana de Ecología

Herrera-Silveira, JA., Comin, F.A., & Capurro-Filograsso., L.In press. Landscape, Land-Use, and Management in The Coastal Zone of Yucatan Peninsula. In: J. W. Day., A. Yañez-Arancibia (eds.), The Gulf of Mexico: Ecosystem-Based Management. The Gulf of Mexico: Its Origin, Waters, Biota, Economics and Human Impacts (Series). Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Texas A&M University – Corpus Christi. @ Texas A&M University Press.

Hernández-Hernández-Trujillo, S., R. Cervantes-Duarte & S. Aguíñiga-García. 1997. Variación espacial y temporal de algunas variables físicas, químicas y biológicas en Bahía Magdalena, B.C.S. (Julio-Agosto, 1988) Rev. Invest. Cient., 8(1-2): 1-13

Logan, B.W. 1969. Carbonate Sediments and Reefs, Yucatan Shelf, Mexico. American Association of Petroleum Geologists (AAPG). 250 pp.

Mangialajo, L., Ruggieri, N.., Asnaghi,V., Chiantore, M., Povero, P. & Cattaneo-Vietti, R. 2007. Ecological status in the Ligurian Sea: The effect of coastline urbanisation and the importance of proper reference sites, Marine Pollution Bulletin 55, p 2007.

Medina-Chan, I.D. 2004. Effects of a maritime port terminal on trhophic status of the adjacent marine zone: Progreso Port, Yucatan (Spanish). Center of Research and advanced studies from National Polytechnic Institute. Merida, Mexico (Spanish). M.Sc. Thesis. p 69.

Monreal-Gómez, M. A.& . Salas-de-León, D. A. 1990. Simmulation of circulation pattern of Campeche Bay.(Spanish) Geofísica Internacional 29,101-111.

Newton, A.,& Mudge, S.M. 2005. Lagoon-sea exchanges, nutrient dynamics and water quality management of the Ria Formosa (Portugal). Estuarine, Coastal and Shelf Science 62, 405–414.

Norma Oficial Mexicana **NOM-001-ECOL-1996**. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las descargas de aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales, 31 pp.

Pacheco Martinez, J.I.& Alonzo Salomon L.A. 2003. Characterization of karst material of Carrillo Puerto formation in Yucatan. Academic magazine of Engineering. Autonomous University of Yucatan (Spanish). Merida, Mexico. 7, 7-19.

Pare, L. & Fraga, J. 1994. The Yucatan coast: Development and environmental vulnerability. Mexico, D.F. National Autonomus University from Mexico

Parson T. R., Maita Y. y Lalli C. M., 1984. A Manual of Chemical and Biologal Methods for Seawaters Analysis, Second Edition, Pergamon Press, Oxford, England, 173 pp.

Perry, E.1990. Aspects of the hydrogeology of the northwest region, Yucatan Peninsula, Mexico: its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chuxchulub impact crater. Geology, 23 (1), 17–20.

Riley, J. P. & Chester, R. 1989. Introduction the marine Chemistry, 6ª ED. Academia Press, Inc, Unites Sates of America. 465 pp.

Ruiz, F.1979. Upwelling north of the Yucatan Peninsula. M. Sc. Thesis. Department of Oceanography, Texas A&M, 85 pp.

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

Slomp, C. P. & Van Cappellen, P. 2004. Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: controls and potential impact. Journal of Hydrology 295, 64-86.

Smith, S.V., Camacho-Ibar, V., Herrera-Silveira, J.A., Valdes, D., Merino, D. M & Buddemeier, R.W. 1999. Quantifying Groundwater Flow Using Water Budgets and Multiple Conservative Tracers, 96-105. In: Smith, S.V., J.I.Marshall Crossland and C.J. Crossland. Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Fluxes (Regional Workshop II), LOICZ Reports & Studies No. 13, Texel, The Netherlands.

Solórzano, L. 1972. Determination of ammonia in natural water by phenolhypochlorite method. Limnology and Oceanography 14: 799-801

Strickland J. D. H. and Parsons T. R., 1972. Practical Handbook of Sea Water Analysis, Second Edition, Fisheries Research Board Canadian Bulletin, Ottawa, Canada, 311 pp.

Twilley, R. R. 1995. Properties of mangrove ecosystems related to the energy signature of coastal environments. Maximum power (eds C. Hall), 43-62 pp. University of Colorado Press, Boulder, Colorado

United States Environmental Protection Agency (US EPA). 1992. An Updated Summary of Status and Trends in Indicators of Nutrient Enrichment in the Gulf of México. Office of Water,Gulf of México Program, United States of America, 272 pp.

Vollenweider, R.A., Giovanardi, F., Montanari, G. & 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. Environ. 9, 329-357.