

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California**



---

**Maestría en Ciencias  
en Ecología Marina**

---

**Variabilidad espacio-temporal de la concentración  
de clorofila a y de las tasas de productividad  
primaria en las regiones de Perdido, Tampico y  
Coatzacoalcos en el Golfo de México**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**Jazmín Rodríguez Gómez**

Ensenada, Baja California, México

2021

Tesis defendida por

**Jazmín Rodríguez Gómez**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. José Rubén Lara Lara**

Director de tesis

**Dr. David Alberto Rivas Camargo**

**Dra. Ma. Elena Solana Arellano**

**Dr. Modesto Ortiz Figueroa**



---

**Dr. Jorge Adrián Rosales Casián**

Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

---

**Dr. Pedro Negrete Regagnon**

Director de Estudios de Posgrado

*Jazmín Rodríguez Gómez © 2021*

*Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis*

Resumen de la tesis que presenta Jazmín Rodríguez Gómez como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

**Variabilidad espacio-temporal de la concentración de clorofila a y de las tasas de productividad primaria en las regiones de Perdido, Tampico y Coatzacoalcos en el Golfo de México**

Resumen aprobado por:

---

**Dr. José Rubén Lara Lara**

Director de tesis

El objetivo de este estudio es describir los patrones de la variabilidad espacio-temporal en aguas superficiales de la clorofila-a satelital ( $Chl_{a_{sat}}$ ) como proxy de la biomasa del fitoplancton, las tasas de productividad primaria (PP), la temperatura superficial del mar (SST) y el nivel del mar (SSH) en las regiones de Perdido, Tampico y Coatzacoalcos en el Golfo de México (GoM) de julio de 2002 a marzo del 2020, mediante composiciones mensuales de sensores remotos satelitales. Las tres áreas de estudio se dividieron en dos secciones: la sección costera y la oceánica delimitadas por la isóbata a los 200 m. Tanto los valores de  $Chl_{a_{sat}}$  como las tasas de PP de los transectos perpendiculares a la costa de cada región (diagramas Hovmöller) mostraron una separación clara entre la zona costera con masas de agua eutrofizadas con valores máximos de  $1.76 \text{ mg Chl}_a \text{ m}^{-3}$  y  $1.66 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  y la sección oceánica con aguas oligotróficas con valores máximos de  $0.25 \text{ mg Chl}_a \text{ m}^{-3}$  y  $0.53 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Asimismo, todas las variables mostraron una fuerte estacionalidad, con una variación anual dominante. En general, las tres regiones de estudio presentaron los valores máximos de  $Chl_{a_{sat}}$  ( $0.94 \text{ mg m}^{-3}$ ) y PP ( $0.99 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) de noviembre a marzo y los valores mínimos de mayo a septiembre de  $Chl_{a_{sat}}$  ( $0.32 \text{ mg m}^{-3}$ ) y PP ( $0.45 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ); la SST presentó los valores máximos ( $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) en los meses de agosto-septiembre y los mínimos ( $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ) durante el mes de febrero y; el SSH presentó los valores máximos ( $0.40 \text{ m}$ ) durante agosto-noviembre y mínimos ( $0.25 \text{ m}$ ) durante febrero-marzo. Las concentraciones altas de  $Chl_{a_{sat}}$  y las tasas altas de PP se relacionaron con la temporada de frentes fríos que provocaron una capa de mezcla profunda en la columna de agua inducida por los fuertes vientos que transportan hacia la zona eufótica nutrientes de por debajo de la termoclina. Además, los vientos estacionales y la descarga de ríos locales afectan la cantidad de la biomasa del fitoplancton específicamente en la zona costera que, mediante las corrientes inducidas por el esfuerzo del viento, pueden transportar esta biomasa hacia mar adentro. La disponibilidad de 18 años observaciones permitió una mejor descripción de la relación entre variables bióticas y abióticas en regiones de alta variabilidad ambiental.

**Palabras clave: Chl<sub>a</sub>, Productividad Primaria, Variabilidad**

Abstract of the thesis presented by Jazmín Rodríguez Gómez as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology.

**Spatial-temporal variability of chlorophyll a concentration and primary productivity rates in the region of Perdido, Tampico and Coatzacoalcos in the Gulf of Mexico**

Abstract approved by:

---

**Dr. José Rubén Lara Lara**

Thesis Director

The objective of this study is to describe the patterns of spatio-temporal variability in satellite chlorophyll-a ( $Chl a_{sat}$ ) surface water as a proxy for phytoplankton biomass, primary productivity (PP) rates, sea surface temperature (SST) and sea surface height (SSH) in the Perdido, Tampico and Coatzacoalcos regions of the Gulf of Mexico (GoM) from July 2002 to March 2020, using monthly satellite remote sensing compositions. The three study areas were divided into two sections: the coastal and oceanic sections delimited by the 200 m isobath. The  $Chl a_{sat}$  values and PP rates of the transects perpendicular to the coast of each region (Hovmöller diagrams) showed a clear separation between the coastal zone with eutrophicated water masses with maximum values of  $1.76 \text{ mg Chl } a \text{ m}^{-3}$  and  $1.66 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  and the oceanic section with oligotrophic waters with maximum values of  $0.25 \text{ mg Chl } a \text{ m}^{-3}$  and  $0.53 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Likewise, all variables showed strong seasonality, with dominant annual variation. In general, the three study regions presented the maximum values of  $Chl a_{sat}$  ( $0.94 \text{ mg m}^{-3}$ ) and PP ( $0.99 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) from November to March and the minimum values from May to September of  $Chl a_{sat}$  ( $0.32 \text{ mg m}^{-3}$ ) and PP ( $0.45 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ); SST presented maximum values ( $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) during August-September and minimum values ( $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ) during February and SSH presented maximum values ( $0.40 \text{ m}$ ) during August-November and minimum values ( $0.25 \text{ m}$ ) during February-March. The high  $Chl a_{sat}$  concentrations and high PP rates were related to the cold front season that caused a deep mixing layer in the water column induced by the strong winds transporting nutrients from below the thermocline into the euphotic zone. In addition, seasonal winds and local river discharge affect the amount of phytoplankton biomass specifically in the coastal zone which, through wind stress-induced currents, can transport this biomass offshore. The availability of 18-year observations allowed a better description of the relationship between biotic and abiotic variables in regions of high environmental variability.

**Keywords: Chl a, Primary Productivity, Variability**

## **Dedicatoria**

### ***Para Orlando***

*Olas gigantes que os rompéis bramando  
en las playas desiertas y remotas,  
envuelto entre la sábana de espumas,  
illevadme con vosotras!*

GAB

## Agradecimientos

Al Programa Nacional de Posgrado del CONACYT por el apoyo económico con el N° de beca 960400 para realizar mi posgrado y al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C., por darme la oportunidad de ser estudiante del Programa de Ecología Marina y contribuir a mi formación personal y académica.

A mi director de tesis, el Dr. José Rubén Lara Lara, por compartir su conocimiento, guiarme y aconsejarme en el proceso de esta investigación.

Al Dr. David Alberto Rivas Camargo por las clases y asesorías que hicieron que este trabajo me resultara menos complicado. Por la guía y datos proporcionados.

A la Dra. Ma. Elena Solana Arellano por su ayuda, comentarios y sugerencias sobre todo en la parte estadística. Además, quisiera agradecerle por la paciencia en clases y por la manera tan amena de educar.

Al Dr. Modesto Ortiz Figueroa por sus aportes y comentarios, y por responder mis dudas amable y jovialmente.

A María del Carmen Bazán Guzmán por el apoyo de los datos de los cruceros de Malla Fina.

Al personal administrativo y docente de CICESE gracias por su ayuda, especialmente a los profesores con los que tuve la fortuna de convivir. Gracias por su ayuda y conocimientos que me aportaron durante este tiempo.

A todos mis compañeros de posgrado.

A Edson por ayudarme y explicarme siempre con mucha paciencia.

A Claudia por ofrecerme su ayuda y compañía virtual.

A Abril por siempre estar para mí, por ser una excelente amiga y por las llamadas sin fin.

A mis padres y a toda mi familia.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español .....	ii
Resumen en inglés .....	iii
Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos .....	v
Lista de figuras .....	viii
Lista de tablas .....	xii
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	
1.1. Importancia del estudio del fitoplancton .....	1
1.1.1. Clorofila <i>a</i> y Productividad Primaria .....	1
1.1.2. Procesos que afectan la variabilidad de la Chl <i>a</i> y la PP .....	3
1.2. Antecedentes .....	4
1.2.1. Biomasa y PP del Golfo de México .....	4
1.2.2. Procesos oceanográficos del Golfo de México .....	7
1.3. Justificación .....	8
1.4. Hipótesis .....	9
1.5. Objetivos .....	10
<b>Capítulo 2. Metodología</b>	
2.1. Área de estudio .....	11
2.1.1. Diseño Experimental .....	11
2.2. Productos satelitales .....	13
2.2.1. Visualización de datos y generación de series temporales .....	15
2.3. Análisis estadístico .....	15
2.3.1. Diferencias entre zonas, años y meses de cada variable .....	16
2.3.2. Comparación de datos <i>in situ</i> contra datos satelitales .....	17
<b>Capítulo 3. Resultados</b>	
3.1. Variación espacial y temporal .....	18
3.1.1. Temperatura superficial del mar .....	18
3.1.2. Nivel del mar .....	24
3.1.3. Clorofila satelital y Productividad Primaria .....	31
3.2. Climatología mensual .....	43
3.3. Análisis espectral .....	55
3.4. Análisis estadísticos .....	57
3.4.1. Correlación cruzada .....	57
3.4.2. Comparación de datos <i>in situ</i> vs satelitales .....	62
<b>Capítulo 4. Discusión</b>	
4.1. Variabilidad estacional .....	66

## Tabla de contenido (continuación)

4.2. Variabilidad interanual . . . . .	71
4.3. Variabilidad espacial . . . . .	74
4.4. Comparación de datos satelitales e <i>in situ</i> . . . . .	75
<b>Capítulo 5. Conclusiones</b>	
<b>Literatura citada</b> . . . . .	79
<b>Anexos</b> . . . . .	87

## Lista de figuras

Figura	Página
1. Principales patrones de circulación superficial en el GoM en primavera-verano y otoño-invierno y la dirección predominante de las distintas corrientes costeras. . . . .	8
2. Posición geográfica de los seis polígonos de muestreo en el golfo de México.	12
3. Posición geográfica de los seis polígonos de muestreo y el transecto trazado para la realización de los diagramas Hovmöller. . . . .	15
4. a) Diagrama Hovmöller de la SST para el transecto de Coatzacoalcos, b) diagrama Hovmöller de la anomalía de la SST para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m. . . . .	19
5. a) Diagrama Hovmöller de la SST para el transecto de Tampico, b) diagrama Hovmöller de la anomalía de la SST para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200m. . . . .	20
6. a) Diagrama Hovmöller de la SST para el transecto de Perdido, b) diagrama Hovmöller de la anomalía de la SST para e mismol transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m. . . . .	21
7. a) Series de tiempo de la SST para los polígonos costeros (profundidad <200m), b) Anomalías de la SST para regiones costeras. . . . .	23
8. a) Series de tiempo de la SST para los polígonos oceánicos (profundidad >200 m), b) Anomalías de la SST para regiones oceánicas. . . . .	24
9. a) Diagrama Hovmöller del SSH para el transecto de Coatzacoalcos, b) diagrama Hovmöller de la anomalía del SSH para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m. . . . .	26
10. a) Diagrama Hovmöller del SSH para el transecto de Tampico, b) diagrama Hovmöller de la anomalía del SSH para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200m. . . . .	27
11. a) Diagrama Hovmöller del SSH para el transecto de Perdido, b) diagrama Hovmöller de la anomalía del SSH para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200m. . . . .	28
12. a) Series de tiempo del SSH para los polígonos costeros (profundidad < 200m), b) Anomalías del SSH para regiones costeras. . . . .	29
13. a) Series de tiempo del SSH para los polígonos oceánicos (profundidad > 200m), b) Anomalías del SSH para regiones oceánicas. . . . .	30
14. a) Diagrama Hovmöller de la $Chl\alpha_{sat}$ para el transecto de Coatzacoalcos, b) Diagrama Hovmöller de la anomalía de la $Chl\alpha_{sat}$ para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m. . . . .	32
15. a) Diagrama Hovmöller de la PP para el transecto de Coatzacoalcos, b) Diagrama Hovmöller de la anomalía de la PPt para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m. . . . .	33

## Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
16. a) Diagrama Hovmöller de la $Chl_{a_{sat}}$ para el transecto de Tampico, b) Diagrama Hovmöller de la anomalía de la $Chl_{a_{sat}}$ t para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m. . . . .	34
17. a) Diagrama Hovmöller de la PP para el transecto de Tampicos, b) Diagrama Hovmöller de la anomalía de la PPT para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m. . . . .	35
18. a) Diagrama Hovmöller de la $Chl_{a_{sat}}$ para el transecto de Perdido, b) Diagrama Hovmöller de la $Chl_{a_{sat}}$ para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m. . . . .	36
19. a) Diagrama Hovmöller de la PP para el transecto de Perdido, b) Diagrama Hovmöller de la PP para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m. . . . .	37
20. a) Series de tiempo de la $Chl_{a_{sat}}$ para los polígonos costeros (profundidad < 200m), b) Anomalías de la $Chl_{a_{sat}}$ para regiones costeras. . . . .	39
21. a) Series de tiempo de la PP para los polígonos costeros (profundidad < 200m), b) Anomalías de la PP para regiones costeras. . . . .	40
22. a) Series de tiempo de la $Chl_{a_{sat}}$ para los polígonos oceánicos (profundidad > 200m), b) Anomalías de la $Chl_{a_{sat}}$ para regiones oceánicas. . . . .	42
23. a) Series de tiempo de la PP para los polígonos oceánicos (profundidad > 200m), b) Anomalías de la PPT para regiones oceánicas. . . . .	43
24. Aproximación a la climatología para a) SST, b) SSH, c) $Chl_{a_{sat}}$ y d) PP para las regiones costeras. . . . .	44
25. Aproximación a la climatología para la) SST, b) SSH, c) $Chl_{a_{sat}}$ y d) PP para las regiones oceánicas. . . . .	45
26. Climatología de las medias mensuales de la SST (°C) en la región de Coatzacoalcos. Promediadas del Aqua-MODIS SST mensual (julio de 2002 a marzo de 2020). . . . .	47
27. Climatología de las medias mensuales de la SST (°C) en la región de Tampico. Promediadas del Aqua-MODIS SST mensual (julio de 2002 a marzo de 2020). . . . .	47
28. Climatología de las medias mensuales de la SST (°C) en la región de Perdido. Promediadas del Aqua-MODIS SST mensual (julio de 2002 a marzo de 2020). . . . .	48
29. Climatología de las medias mensuales del SSH (m) en la región de Coatzacoalcos. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020). . . . .	49

## Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
30. Climatología de las medias mensuales del SSH (m) en la región de Tampico. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020). . . . .	49
31. Climatología de las medias mensuales del SSH (m) en la región de Perdido. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020). . . . .	50
32. Climatología de las medias mensuales de la $Chl_{a_{sat}}$ ( $mg\ m^{-3}$ ) en la región de Coatzacoalcos. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020). . . . .	52
33. Climatología de las medias mensuales de la $Chl_{a_{sat}}$ ( $mg\ m^{-3}$ ) en la región de Tampico. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020). . . . .	53
34. Climatología de las medias mensuales de la $Chl_{a_{sat}}$ ( $mg\ m^{-3}$ ) en la región de Perdido. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020). . . . .	53
35. Climatología de las medias mensuales de la PP ( $gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) en la región de Coatzacoalcos. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020). . . . .	54
36. Climatología de las medias mensuales de la PP ( $gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) en la región de Tampico. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020). . . . .	54
37. Climatología de las medias mensuales de la PP ( $gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) en la región de Perdido. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020). . . . .	55
38. Densidad espectral de las series de tiempo de SST ( $^{\circ}C$ ), SSH (m), $Chl_{a_{sat}}$ ( $mg\ m^{-3}$ ) y PP ( $g\ C\ m^{-2}\ d^{-1}$ ). Nota: las escalas de densidad espectral de $Chl_{a_{sat}}$ y PP son diferentes. . . . .	56
39. Correlación cruzada de la variable SST y la $Chl_{a_{sat}}$ en las seis regiones de estudio. Las líneas punteadas de color azul indicar el intervalo de confianza al 95%. . . . .	59
40. Correlación cruzada de la variable SST y la PP en las seis regiones de estudio. Las líneas punteadas de color azul indicar el intervalo de confianza al 95%. . . . .	60
41. Correlación cruzada de la variable SSH y la $Chl_{a_{sat}}$ en las seis regiones de estudio. Las líneas punteadas de color azul indicar el intervalo de confianza al 95%. . . . .	61
42. Correlación cruzada de la variable SSH y la PP en las seis regiones de estudio. Las líneas punteadas de color azul indicar el intervalo de confianza al 95%. . . . .	62
43. Correlación de la clorofila en la región de a) Coatzacoalcos y b) Perdido. . . . .	63
44. Comparación de las concentraciones de clorofila de datos <i>in situ</i> y satelitales (MODIS-Aqua) en a) Coatzacoalcos y b) Perdido. . . . .	64

## Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
45. Comparación de las concentraciones de productividad primaria de datos <i>in situ</i> y satelitales (VGPM de datos MODIS-Aqua) en a) Coatzacoalcos y b) Perdido. . . . .	64
46. a) $Chl_{a_{sat}}$ de la bahía de Campeche en junio del 2010, b) $Chl_{a_{sat}}$ de la bahía de Campeche en octubre del 2008. . . . .	73
47. a) Mapa de $Chl_{a_{sat}}$ de marzo del 2019 del este del GoM, b) Mapa de corrientes y nivel del mar de marzo del 2019 y c) Mapa de la $Chl_{a_{sat}}$ de febrero del 2013, d) Mapa de corrientes y nivel del mar en febrero del 2013.	74

## Lista de tablas

Tabla	Página
1.	Área y coordenadas geográficas de los cuadrantes de estudio en GoM. 13
2.	Análisis de Kruskal- Wallis para diferencias entre años para cada región de estudio. . . . . 87
3.	Análisis post-hoc método Bonferroni para diferencias entre años de la región C2. . . . . 87
4.	Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre regiones de la $Chl_{sat}$ y PP . . . . . 93
5.	Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre regiones por año de $Chl_{sat}$ . . . . . 94
6.	Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre regiones por año de PP. . . . . 94
7.	Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre regiones por mes de $Chl_{sat}$ . . . . . 95
8.	Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre regiones por mes de PP. . . . . 95
9.	Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre meses por región de $Chl_{sat}$ . . . . . 96
10.	Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre meses por región de PP. . . . . 98
11.	Coefficientes de correlación y pvalue de las 6 regiones de las distintas variables. . . . . 101

# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1. Importancia del estudio del fitoplancton

El plancton autotrófico llamado fitoplancton (*phyton*=planta, *planktos*=errante) es el principal productor primario del océano. Estos organismos microscópicos ubicados en la superficie del océano son responsables de la mitad de la fotosíntesis en el planeta (Boyce *et al.*, 2010; Garrison y Ellis, 2012; Trujillo y Thurman, 1999), además de ser la base de redes alimenticias marinas, en donde muchas de las características biológicas dependerán en gran medida de la presencia y el éxito de estos individuos (Käse y Geuer, 2018).

El fitoplancton realiza la fotosíntesis como método de obtención de energía, fijando alrededor del 48 % del carbono global (Field *et al.*, 1998) al absorber e incorporar carbono proveniente del dióxido de carbono atmosférico que será transferido a niveles tróficos superiores o a partículas que se remineralizarán en la columna de agua y/o se hundirán en el fondo marino, influyendo fuertemente en los procesos climáticos y en los ciclos biogeoquímicos, particularmente el ciclo del carbono (Le Quéré *et al.*, 2016; Sabine *et al.*, 2004).

### 1.1.1. Clorofila *a* y Productividad Primaria

Debido a que el fitoplancton requiere luz para realizar la fotosíntesis, este se encuentra en las regiones más superficiales del océano, conocida como la zona eufótica (*eu*=bueno, *photos*=luz), donde la profundidad de esta región dependerá en gran medida de sustancias biológicas y no biológicas que absorben y dispersan la luz dentro de la columna de agua.

El fitoplancton absorbe la luz en relación con la composición y la cantidad de moléculas estructuradas que absorben fotones dentro del rango visible de 400–700 nm, conocidas como pigmentos fotosintéticos. La clorofila *a* (Chl*a*) es el principal pigmento fotosintético al encontrarse presente en casi todos los diferentes grupos algales (Baker, 2008; Lalli y Parsons, 1997) y que absorbe en longitudes de onda localizadas en la región de los 430-663 y 600-700 nm y refleja en las longitudes 440–550 nm (Dierssen

y Kaylan, 2012; Roesler *et al.*, 2017). Al considerarse un proxy de la biomasa del fitoplancton (cantidad de carbono orgánico encontrado en una muestra de fitoplancton expresado comúnmente en  $\text{mg m}^{-3}$ ) este pigmento se ha convertido también en un indicador del estado fisiológico del fitoplancton y del estado trófico de los sistemas acuáticos (Behrenfeld y Boss, 2006; Cullen, 1982; Luna Vera y Cardona Forero, 2004; Roesler *et al.*, 2017).

La biomasa se expresa como la cantidad de Chl $a$  por volumen de agua, la tasa de cambio de la biomasa o la velocidad a la que se produce el carbono, se le conoce como la productividad primaria y, en general, es de mayor interés ecológico que sólo las medidas instantáneas de biomasa (Lalli y Parsons, 1997). La productividad primaria (PP) es la velocidad a la que los organismos almacenan la energía a través de la formación de materia orgánica (compuestos a base de carbono) utilizando la energía derivada de la radiación solar durante la fotosíntesis y se expresa como carbono orgánico en unidades de masa, por unidad de volumen o área y tiempo (Falkowski y Raven, 2007).

Para estimar las concentraciones de Chl $a$  y las tasas de PP existen diferentes métodos, procedimientos y modelos desarrollados con el objeto de que estos sean reproducibles, comparables y con error mínimo (Vitta *et al.*, 2009). Entre los métodos más comúnmente utilizados para estimar la Chl $a$  se encuentra la fluorimetría, la espectrofotometría y la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) (Lorenzen, 1966; Strickland y Parsons, 1970; Wright, 1991). Por otra parte, las mediciones directas de la PP son muy limitantes en tiempo y espacio, además es difícil determinar la contribución de la respiración (Regaudie-de Gioux *et al.*, 2014). Existen distintas formas de estimar la PP entre las más utilizadas y referenciadas se encuentran: la producción de oxígeno disuelto (Gaarder y Gran, 1927) y la incorporación de carbono  $^{14}\text{C}$  ( $^{14}\text{C}$ ) (Steemann-Nielsen, 1952).

Con la llegada de los satélites de color del océano -en conjunto con el desarrollo de modelos- tanto la estimación de Chl $a$  y PP a escalas geográficas grandes puede derivarse de la radiometría espectral visible detectada a distancia (Capuzzo, 2011; Platt *et al.*, 2008). Sin embargo, la implementación de la teledetección requiere el desarrollo de algoritmos locales que relacionen la biomasa del pigmento con la producción

---

<sup>1</sup>La técnica de  $^{13}\text{C}$  elimina el riesgo para la salud asociado con la naturaleza radiactiva de  $^{14}\text{C}$ , pero requiere un mayor volumen de muestra debido a la menor sensibilidad.

primaria, y en general, la absorción de  $^{14}\text{C}$  se ha usado para validar estos algoritmos (Carr *et al.*, 2006; Marra, 2009). Todas estas técnicas de teledetección compensan sus limitaciones de precisión por el enorme aumento de información sobre patrones espaciales y temporales que se registran desde el espacio. Utilizadas cuidadosamente junto con mediciones de campo, estas herramientas pueden ayudar a mejorar la comprensión de la variabilidad de las tasas de productividad oceánica (Jeremy Werdell y McClain, 2019; Martin, 2019; Maul, 1985).

### **1.1.2. Procesos que afectan la variabilidad de la Chla y la PP**

Para comprender el acoplamiento biofísico que afecta la abundancia y distribución del fitoplancton, es necesario considerar cómo interactúan todos los factores en el medio marino. Existen numerosas variables que afectan a la biomasa fitoplanctónica: por ejemplo, disponibilidad de luz y nutrientes, temperatura, estratificación de la columna del agua, pastoreo, infecciones, advección, difusión, turbulencia e hundimiento (Lalli y Parsons, 1997; Merino y Monreal-Gómez, 2004).

La disponibilidad de luz y la concentración de nutrientes son dos de las variables de mayor importancia para el fitoplancton, nutrientes como el nitrógeno y fósforo (Käse y Geuer, 2018), además de ciertos elementos traza que son afectados por el transporte de aguas profundas en la zona eufótica debido a la mezcla vertical de la columna de agua, surgencias costeras, surgencias debidas al esfuerzo del viento y la advección de aguas ricas en nutrientes (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009) y/o a la entrada de nutrientes superficiales por la escorrentía de agua proveniente de los continentes. Para este estudio, utilizaremos el nivel del mar (SSH) y la temperatura superficial del mar (SST) como indicadores de los movimientos verticales de la termoclina y la estratificación de la columna de agua (Rebert *et al.*, 1985; Wilson y Adamec, 2001).

La SST es y ha sido una de las variables más medidas en el océano, y como tal ha recibido mucha atención científica. Es considerada un índice del equilibrio del flujo de calor turbulento y termodinámico de la superficie del océano (Dierssen y Kaylan, 2012; Robinson, 2010), es utilizada por la biota como una señal para el comportamiento migratorio, reproductivo y de alimentación (Muller-Karger *et al.*, 2015). Por otra parte, el SSH es la altura de la superficie del mar a la superficie de referencia (elipsoide)

y es una medición en tiempo real que integra los efectos de la topografía geoidal y dinámica, indicando cambios en la estructura térmica y de salinidad (Rigel, 2008; Sui *et al.*, 2017) así como la topografía del suelo oceánico debido a cambios en la gravedad.

La SST y el SSH han sido correlacionadas negativamente con la clorofila (Secretariat of the Pacific Community, 2011; Wilson y Adamec, 2001), donde valores altos de estos parámetros físicos implican una termoclina más profunda que reduce la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica (Cruz Gómez *et al.*, 2008; Merino y Monreal-Gómez, 2004; Sarangi y Devi, 2017), por el contrario, el decremento de la SST y SSH está relacionado al levantamiento de la termoclina que incrementa la concentración de nutrientes y por lo tanto los niveles de PP. Investigaciones recientes han demostrado que la biomasa global de fitoplancton ha disminuido desde el siglo pasado, relacionado al calentamiento superficial del mar, la estratificación es aumentada y los nutrientes se encuentran a mayores profundidades lo que conduce a valores de Chl $a$  y de PP menores (Boyce *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2019; Nurdin *et al.*, 2013).

## **1.2. Antecedentes**

### **1.2.1. Biomasa y PP del Golfo de México**

El Golfo de México (GoM) es un ecosistema de productividad moderadamente alta, donde las condiciones varían desde eutróficas en las aguas costeras hasta oligotróficas en las regiones profundas (Benway y Coble, 2014). En aguas profundas del GoM, las mediciones *in situ* desde la década de 1960 indican una baja productividad biológica de 150 a 300 mgC m $^{-2}$  d $^{-1}$  (Biggs y Ressler, 2001; Heileman y Rabalais, 2009) y una baja concentración de Chl $a$  en la superficie con valores que van desde 0.06 a 0.32 mgm $^{-3}$  (Biggs, 1992; El-Sayed, 1972; Pasqueron de Fommervault *et al.*, 2017; Signoret *et al.*, 1998).

En los último 30 años, con la ayuda de las mediciones satelitales se logró mostrar la variabilidad estacional en la concentración de Chl $a$  superficial, reportando las máximas concentraciones de diciembre a febrero y las mínimas de mayo a julio (Biggs y Ressler, 2001; Biggs y Müller-Karger, 1994; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Muller-Karger *et al.*, 1991, 2015).

Muller-Karger *et al.* (1991) examinaron la variabilidad espacio-temporal de la distribución superficial de fitoplancton en el GoM a partir de imágenes satelitales obtenidas del CZCS (Coastal Zone Color Scanner) de la NASA en un periodo de 7 años (1978-1985). Encontraron una variación estacional de fitoplancton hacia el mar desde la plataforma con los valores más altos ( $>0.18 \text{ mg m}^{-3}$ ) de diciembre a febrero y los valores más bajos ( $<0.06 \text{ mg m}^{-3}$ ) de mayo a julio.

Hidalgo-González *et al.* (2005) cuantificaron la variación espacio temporal de la producción total integrada ( $P_{T_{int}}$ ) y la nueva<sup>2</sup> ( $P_n$ ) para el GoM a partir de modelos semi-analíticos de la literatura, concentraciones de  $\text{Chl}a_{sat}$  y coeficientes de atenuación vertical de la luz (K490) de compuestos mensuales, utilizando estimaciones derivadas por la NASA mediante el SeaWiFS (Sea-viewing Wide-Field-of-view Sensor) en un periodo de 7 años (1997-2004). Los valores promedio de PP tuvieron una variación estacional significativa para la región de aguas profundas para los períodos de invierno y primavera ( $P_{T_{int}} = 0.37 - 0.44$ ,  $P_n = 0.023 - 0.026 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y para el resto del año ( $P_{T_{int}} = 0.22 - 0.24$ , y  $P_n = 0.013 - 0.014 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Para las regiones de Yucatán ( $P_{T_{int}} = 1.18 - 1.22$ ,  $P_n = 0.97 - 1.05 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y Mississippi ( $P_{T_{int}} = 1.60 - 1.68$ ,  $P_n = 1.38 - 1.44 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Adjudicado a datos limitados, no se mostró una variabilidad interanual significativa de  $P_{T_{int}}$  y  $P_n$  en ninguna región del golfo.

Manzano-Sarabia y Salinas-Zavala (2008) presentaron una descripción general del patrón estacional de  $\text{Chl}a_{sat}$  en la región occidental del GoM a partir de datos del SeaWiFS en un periodo de 9 años (1996-2007). Reportaron valores máximos promedio para las aguas frente a Veracruz en octubre ( $0.57 \text{ mgm}^{-3}$ ) y Tabasco ( $1.66 \text{ mgm}^{-3}$ ), mientras que frente a Tamaulipas se observaron los valores máximos en diciembre ( $0.17 \text{ mgm}^{-3}$ ).

Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009) estimaron la variabilidad estacional e interanual de la concentración de  $\text{Chl}a_{sat}$  a lo largo de la plataforma (isóbata de 200 m) y la región de aguas profundas (isóbata de 1000 m) en un periodo de 10 años (1997- 2007) con con datos del sensor SeaWiFS. Encontraron las variaciones mayores de  $\text{Chl}a_{sat}$  en la plataforma: reportando valores altos en mayo, para la región suroeste de la plataforma Texas-Louisiana (LATEX) y al sureste de la bahía de Campeche de

<sup>2</sup>La producción primaria total ( $P_T$ ) oceánica tiene dos componentes: producción nueva y regenerada ( $P_T = P_n + P_r$ ). La producción nueva ( $P_n$ ) es la fracción de la producción primaria total que se sustenta con aportes externos o "nuevos" de nutrientes (Dugdale y Goering, 1967).

mayo a octubre.

Salmerón-García *et al.* (2011) con base en el comportamiento estadístico de las medias mensuales de la concentración  $Chl_{a_{sat}}$  derivada del SeaWiFS en un periodo de 10 años (1998-2008), generaron una clasificación climatológica de las regiones biogeográficas del GoM. De manera similar (Callejas-Jimenez *et al.*, 2012) establecieron una regionalización dinámica tomando en cuenta no sólo a la  $Chl_{a_{sat}}$ , también la SST y las radiancias normalizadas en un periodo de 5 años (2002-2007) utilizando el Modis-Aqua (Moderate Resolution Imaging Spectrometer on the Aqua satellite).

Muller-Karger *et al.* (2015) caracterizaron la variabilidad temporal en aguas superficiales del centro del GoM (profundidad > 1000m) con base en la SST, la velocidad del viento, la anomalía del nivel del mar (SSHA), la  $Chl_{a_{sat}}$  y la producción primaria neta (NPP), junto con las predicciones del modelo de la profundidad de la capa de mezcla (MLD) en un periodo de 22 años (1980 y 2012). Los datos de  $Chl_{a_{sat}}$  se recopilaron de tres fuentes: CZCS, SeaWiFS y MODIS-Aqua. Se reportó que la  $Chl_{a_{sat}}$  y NPP mostraron anomalías positivas en respuesta a aumentos a corto plazo en la velocidad del viento y a eventos de temperaturas frías.

Mirabal-Gómez *et al.* (2017) generaron una serie de tiempo mensual en un periodo de 10 años (2006-2016) de la productividad primaria integrada (PPI) mediante dos modelos VGPM para las zonas de Perdido y Coatzacoalcos en el GoM. La variación anual de PPI tuvo componentes claros estacionales e inter-anales. En la región de Perdido la PPI vario de 174 a 881  $mgC\ m^{-2}\ d^{-1}$  con valores máximos de febrero a mayo y mínimos de julio a septiembre, mientras que en la región de Coatzacoalcos la PPI varió de 213 a 931  $mgC\ m^{-2}\ d^{-1}$ .

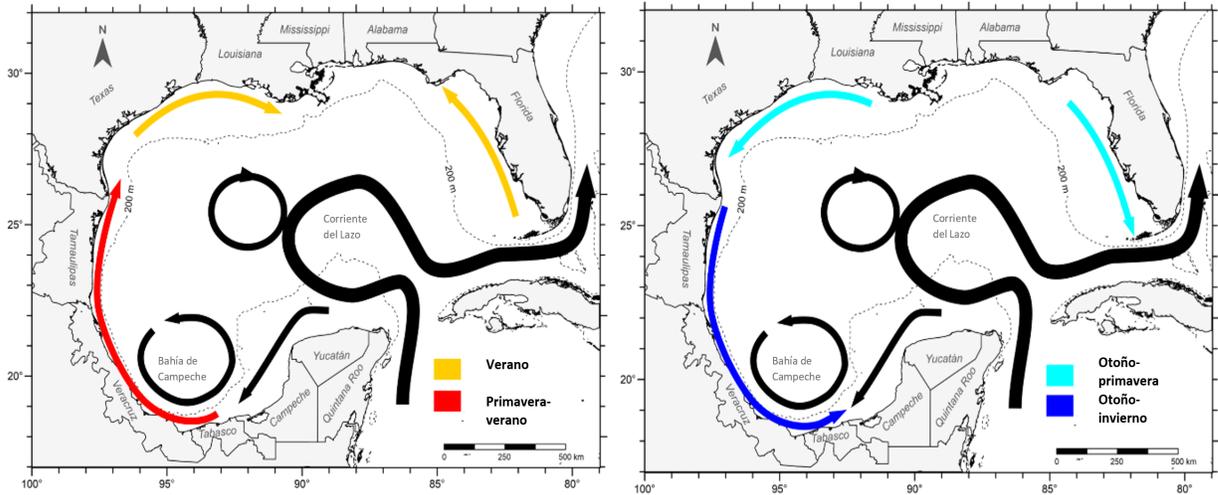
Damien *et al.* (2018) determinaron la variabilidad estacional e interanual de la  $Chl_a$  en aguas oceánicas del GoM mediante un modelo físico-biogeoquímico acoplado tri-dimensional, donde calcularon la climatología de  $Chl_{a_{sat}}$  en aguas abiertas con datos del MODIS-Aqua en un periodo de 12 años (2003-2015) y la compararon con la obtenida vía el modelo biogeoquímico PISCES (Pelagic Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies) configurado para el GoM (GOLFO12-PISCES). Las dos series de tiempo mostraron un comportamiento similar, las concentraciones más altas ocurrieron en invierno mientras que las concentraciones más bajas se observaron en verano,

siendo los meses de abril-mayo y octubre-noviembre temporadas de transición de estos dos extremos. En promedio durante las temporadas de invierno, las concentraciones de superficie modeladas fueron  $\sim 0.3 \text{ mg m}^{-3}$  en comparación con la  $\text{Chl}_{a_{sat}}$  que presentó un valor medio de  $\sim 0.2 \text{ mg m}^{-3}$ .

### 1.2.2. Procesos oceanográficos del Golfo de México

La circulación a gran escala en el GoM está dominada principalmente por la Corriente del Lazo y los remolinos que se desprenden de esta corriente (Oey, 2008). La Corriente de Lazo ingresa al golfo oriental a través del Estrecho de Yucatán y sale por el Estrecho de Florida (Behringer *et al.*, 1977; Hofmann y Worley, 1986) y durante su traslado desprende remolinos anticiclónicos a intervalos de 6 a 17 meses (Behringer *et al.*, 1977; Elliott, 1982; Vázquez de la Cerda, 2004) con diámetros de aproximadamente 200 a 300 km y velocidades de  $1.5 - 2 \text{ ms}^{-2}$  (Candela *et al.*, 2002; Hamilton *et al.*, 2002; Zeng *et al.*, 2015). Estos remolinos se rompen hacia el oeste en la parte profunda del GoM (Elliott, 1982) y durante su movimiento hacia el oeste del golfo los anillos anticiclónicos generan remolinos ciclónicos (Merrell y Vazquez, 1983). Asimismo, la circulación puede ser inducida por el viento, particularmente sobre las plataformas continentales, la cual presenta diferencias estacionales en los patrones de circulación, la cual se ve reflejada en la circulación a lo largo de las costas de Florida, Texas, Tamaulipas, Veracruz y Tabasco (**Figura 1**) (Sanvicente-Añorve *et al.*, 2018; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2014).

Un remolino anticiclónico -en el hemisferio norte- gira en sentido de las manecillas del reloj, mientras que un remolino ciclónico gira en sentido contrario de las manecillas del reloj. Los remolinos ciclónicos elevan aguas profundas a la superficie, estimulando las aportaciones de nutrientes y consecuentemente la PP (Merino y Monreal-Gómez, 2004). Por el contrario, los remolinos anticiclónicos producen un hundimiento de las aguas superficiales provocando la reducción de la PP. No obstante, los remolinos anticiclónicos también pueden mejorar la productividad en ciertas áreas mediante el transporte de agua y comunidades a regiones de nutrientes altos (Monreal-Gómez *et al.*, 2004).



**Figura 1.** Principales patrones de circulación superficial en el GoM en primavera-verano y otoño-invierno y la dirección predominante de las distintas corrientes costeras. La línea más gruesa representa la corriente del Lazo y los círculos indican un giro anticiclónico asociado a la corriente del Lazo y el giro ciclónico semi-permanente en la bahía de Campeche (Vazquez de la Cerda *et al.*, 2005). Adaptada de Sanvicente-Añorve *et al.* (2018).

### 1.3. Justificación

El fitoplancton sostiene a otros organismos presentes en el ecosistema oceánico, generando complejas redes tróficas (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010). Es por ello que entender los cambios en la biomasa y tasas de PP fitoplanctónica son de gran interés debido a que tienen repercusiones sobre los niveles tróficos superiores, incluyendo especies de importancia pesquera.

La pesca representa una de las principales actividades económicas que se desarrollan en México. En promedio, en el golfo y el Caribe mexicano la producción pesquera genera aproximadamente 319,771 toneladas por año representando un ingreso de \$8,000,331,459.00 de pesos (CONAPESCA, 2017). Las principales especies que se capturan son el camarón, ostión, atún, sardina y pulpo destacando los estados de Tamaulipas, Veracruz y Campeche como los principales productores (Jiménez-Badillo *et al.*, 2017).

En el caso específico de Tamaulipas, en el año 2017 esta entidad generó aproximadamente 52,013 toneladas de peso vivo (el 2.41 % de la producción nacional) que representó \$1,000,531,623.00 de pesos. Por otro lado, Veracruz reportó para el mismo año una producción pesquera de 111,852 toneladas de peso vivo (5.19% de la parti-

cipación porcentual en la producción nacional) que representan \$2,000,143,241.00 de pesos (CONAPESCA, 2017).

Dicho lo anterior, es necesario contar con información a grandes escalas de espacio y tiempo para entender los cambios en la biomasa y PP del fitoplancton y con ello el posible impacto en la trama trófica y en organismos pelágicos superiores de estas zonas.

Asimismo, estas regiones han sido seleccionadas por PEMEX como áreas potenciales para la explotación petrolera, es por esto importante conocer la variabilidad natural de la biomasa y productividad del fitoplancton y su vulnerabilidad ante eventuales derrames de petróleo. Aunque se han desarrollado trabajos que reportan esta variabilidad natural, se centran principalmente en la región de aguas profundas y son descripciones puntuales con escalas espacio-temporales localizadas. Las zonas costeras que han sido estudiadas se encuentran en el territorio noroccidental del GoM, fuera de la Zona Económica Exclusiva de México, exceptuando a la Bahía de Campeche. Además, son escasas las comparaciones estadísticas entre regiones que varían latitudinalmente y perpendiculares a la costa.

#### **1.4. Hipótesis**

Dado que la SST y el SSH han sido relacionados negativamente con la cantidad de nutrientes en la superficie del océano, en zonas con valores bajos de SST y SSH se esperan altas concentraciones de  $Chl_{a_{sat}}$  y altas tasas de PP.

Dado que el GoM es afectado por distintos procesos de circulación de mesoescala la variabilidad de la concentración de  $Chl_{a_{sat}}$  y las tasas de PP serán diferentes según el cambio latitudinal de las tres regiones de estudio.

Debido a que las zonas costeras tienen mayor entrada de nutrientes por el aporte de agua de origen continental éstas tendrán mayores concentraciones de  $Chl_{a_{sat}}$  y tasas de PP.

### **1.5. Objetivos**

Caracterizar la variabilidad espacial y temporal en escalas estacionales e interanuales durante 18 años (2002-2020) de la  $Chl_{a_{sat}}$  y la PP en tres áreas perpendiculares a la región de Perdido, Tampico y la cuenca de Coatzacoalcos.

Establecer la relación entre  $Chl_{a_{sat}}$  y la PP con la SST y el SSH en las tres áreas durante un periodo de 18 años

## Capítulo 2. Metodología

---

### 2.1. Área de estudio

El GoM está ubicado al este de México, entre los 18° – 32° latitud N y 80° – 98° longitud W, es un cuerpo de agua semi-cerrado que se conecta al Océano Atlántico por el estrecho de Yucatán y el estrecho de Florida. Tiene un área de  $\sim 1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$  y es una región afectada por tormentas tropicales que con frecuencia llegan a tener intensidad de huracán. La temporada de ciclones comienza en el mes junio y concluye a finales de noviembre (aunque pueden presentarse desde abril a diciembre, teniendo su máxima centralización en junio-octubre). Asimismo, la temporada de lluvias se presenta de mayo a octubre, presentando la mayor precipitación normal mensual en los meses de julio a septiembre (SMN, 2020).

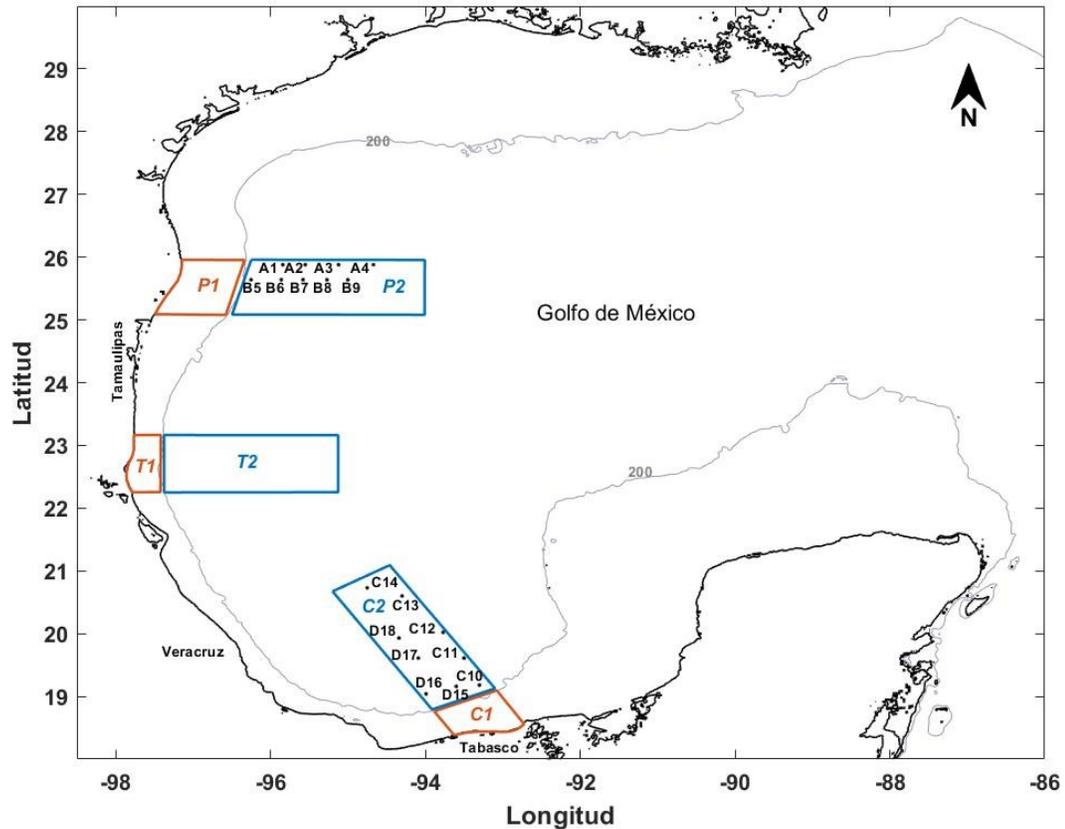
Por otro lado, la temporada de frentes fríos inicia en octubre y finaliza en mayo, de acuerdo con la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (CGSMN). El periodo más activo de la temporada de frentes fríos ocurre entre los meses de noviembre a marzo (el 68.2% de los eventos de acuerdo a la climatología 1981 - 2010)(SMN, 2019).

En su litoral de  $\sim 4000 \text{ km}$ , 16 ríos descargan directamente el GoM, con un escurrimiento natural medio superficial de  $248 \times 10^9 \text{ m}^{-3} \text{ año}^{-1}$  (CONAGUA, 2014). En las plataformas continentales de los estados mexicanos de Tamaulipas, Veracruz y Tabasco, los principales aportes al aporte de agua dulce provienen de los ríos Bravo (o Grande), Soto de la Marina, San Fernando, Pánuco, Papaloapan, Coatzacoalcos y Grijalva-Usumacinta, siendo este último el más importante en cuanto a su aporte (55%) a las descargas fluviales en la vertiente del Golfo, 10 veces más que el río Bravo (González-Ramírez y Parés-Sierra, 2019).

#### 2.1.1. Diseño Experimental

Con el fin de comparar datos de Chl<sub>a</sub> superficial y PP obtenidos en la zona de Perdido (P) y Coatzacoalcos (C) de los cruceros de Malla Fina del Consorcio de Investigación del golfo de México (CIGoM) se generaron dos polígonos que incluyeran estos puntos

de muestreo (**Tabla 1**), además, de un polígono entre estas dos regiones frente a la costa de Tampico (T) para incorporar información sobre los cambios latitudinales de las variables estudiadas. Adicionalmente, se agregaron polígonos adyacentes cercanos a la costa (< 200 de profundidad) (**Figura 2**).



**Figura 2.** Posición geográfica de los seis polígonos de muestreo en el golfo de México. El número 1 (color naranja) indica los polígonos adyacentes a la costa con una profundidad menor a los 200 m y el número 2 (color azul) indica los polígonos encontrados a profundidades mayores a los 200 m.

**Tabla 1.** Área y coordenadas geográficas de los cuadrantes de estudio en GoM.

Polígonos	Área	Coordenadas (vértices)	Estaciones Malla Fina
<200m Coatzacoalcos costero (C1)	5,818 km <sup>2</sup>	18.75° N, -93.88° W	
		19.19° N, -93.07° W	
		18.55° N, -92.72° W	
		18.38° N, -93.62° W	
>200m Coatzacoalcos oceánico (C2)	23,150 km <sup>2</sup>	20.66° N, -95.19° W	A1, A2, A3, A4
		21.08° N, -94.46° W	B5, B6, B7, B8, B9
		19.13° N, -93.10° W	
		18.79° N, -93.91° W	
<200m Tampico costero (T1)	4,060 km <sup>2</sup>	23.16° N, -97.76° W	
		23.16° N, -97.42° W	
		22.25° N, -97.42° W	
		22.25° N, -97.76° W	
>200m Tampico oceánico (T2)	23,369 km <sup>2</sup>	23.16° N, 97.37° W	
		23.16° N, -95.13° W	
		22.25° N, -95.13° W	
		22.25° N, 97.37° W	
<200m Perdido costero (P1)	8,365 km <sup>2</sup>	25.95° N, -97.15° W	
		25.95° N, -96.42° W	
		25.08° N, -96.42° W	
		25.08° N, -97.15° W	
>200m Perdido oceánico (P2)	23,103 km <sup>2</sup>	25.95° N, -96.37° W	C10, C11, C12, C13, C14
		25.95° N, -94.00° W	D15, D16, D17, D18
		25.08° N, -94.00° W	
		25.08° N, -96.37° W	

## 2.2. Productos satelitales

Los estándares para el procesamiento de datos referentes al océano implican principalmente: datos brutos medidos directamente desde el sensor (Nivel 0) convertidos a radiancia usando calibraciones y algoritmos especiales del sensor (Nivel 1) para luego ser corregidos atmosféricamente omitiendo la irradiancia que deja el agua y los productos derivados (*i.e.* nubes, sedimentos y partículas) (Nivel 2), los productos derivados se mapean en una cuadrícula bidimensional con una resolución espacial conocida y se pueden promediar en escalas de tiempo (semanal, mensual) (Nivel 3). Asimismo,

estos productos pueden ser fusionados con datos de otros sensores, observaciones *in situ* o salidas de modelos (Nivel 4) (Dierssen y Kaylan, 2012).

Para este estudio se utilizaron productos satelitales de SST y  $Chl_{a_{sat}}$  de datos del sensor Aqua-MODIS. Para ambas variables se utilizó el nivel 3 de procesamiento, con tamaño de pixel de  $4 \times 4 \text{ km}^2$  en formato Network Common Data Form (NetCDF). Se descargaron imágenes mensuales de julio de 2002 a marzo de 2020 de la página Ocean Color de la NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Los datos de la SST son mediciones realizadas de día con radiación de  $11 \mu\text{m}$  de longitud de onda.

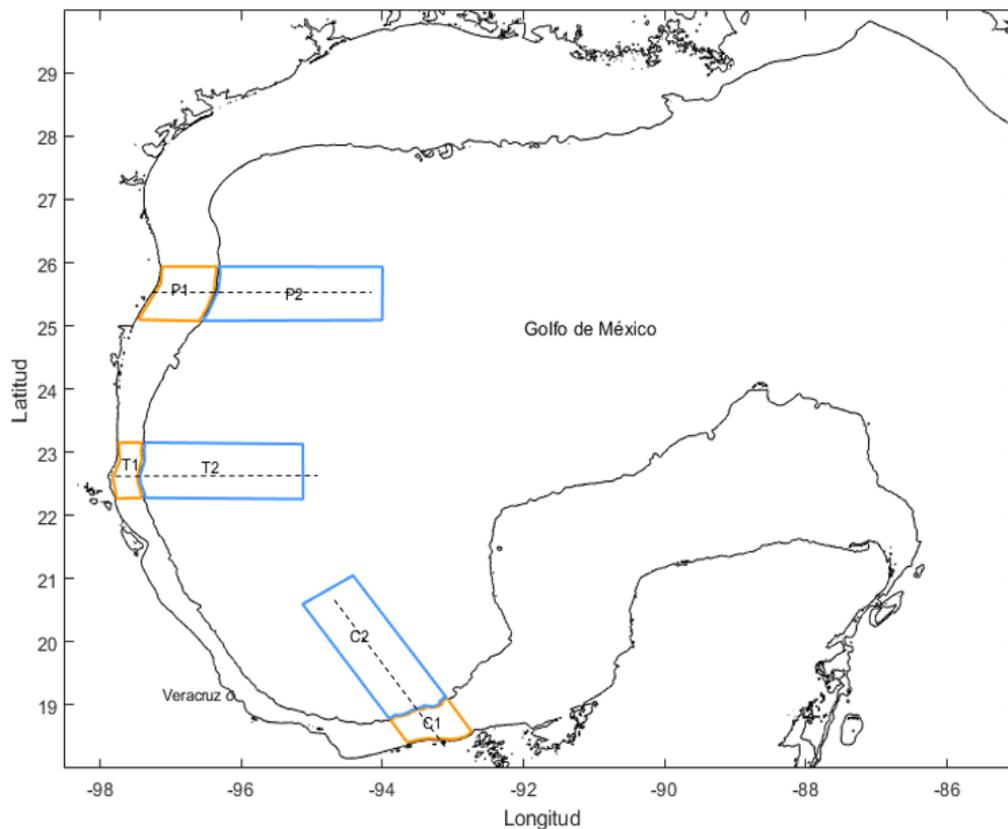
De la misma forma, para los datos del SSH se descargaron imágenes satelitales mensuales de julio de 2002 a marzo del 2020 con una resolución espacial de  $0.25 \times 0.25$  grados ( $\sim 27 \times \sim 27 \text{ km}^2$ ) de nivel 4. Las descargas se realizaron desde los productos "MULTIOBS\_GLO\_PHY\_NRT\_015\_001" y 002" del programa Copernicus de la European Space Agency (ESA) (<https://resources.marine.copernicus.eu/>) en formato NetCDF .

La PP fue calculada por el grupo de la Universidad Estatal de Oregón (OSU) (<https://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/>) a partir del modelo propuesto por Behrenfeld y Falkowski (1997) denominado "Modelo de Producción Vertical Generalizado" (VGPM) con una resolución de  $18 \times 18 \text{ km}^2$  en formato Hierarchical Data Format (hdr) en unidades expresadas en  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . El VGPM es un modelo no espectral con distribución vertical homogénea de biomasa y producción verticalmente integrada (Hidalgo-González *et al.*, 2005). La PP calculada mediante el VGPM (**Ecuación 1**) toma en cuenta las variables de: las horas luz del día solar ( $D_{irr}$ ),  $Chl_{a_{sat}}$ , la profundidad de la zona eufótica ( $Z_{eu}$ ), la luz fotosintéticamente activa (PAR), el parámetro fotosintético  $P_{opt}^b$  y el coeficiente de atenuación vertical de la luz difusa a 490 nm ( $K_{490}$ ) (Behrenfeld y Falkowski, 1997).

$$PP = 0.66125 P_{opt}^b \left[ \frac{E_{0(PAR)_{sat}}}{E_{0(PAR)_{sat}} + 4.1} \right] Z_{eu} Chl_{a_{sat}} D_{irr} \quad (1)$$

### 2.2.1. Visualización de datos y generación de series temporales

Se hicieron diagramas Hovmöller para cada variable, de un transecto que cruzará las caja costera y oceánica de cada zona de aproximadamente 300 km (**Figura 3**), con el fin de visualizar de manera general la variabilidad temporal y espacial de SST, SSH,  $Chl_{a_{sat}}$  y PP. Finalmente se generaron series de tiempo de las medias de cada variable. A partir de estas series temporales se observaron los comportamientos de las variables con respecto al tiempo en cada zona.



**Figura 3.** Posición geográfica de los seis polígonos de muestreo y el transecto trazado para la realización de los diagramas Hovmöller.

### 2.3. Análisis estadístico

Se realizó un análisis espectral para caracterizar los periodos y frecuencias más dominantes de las variables bajo estudio. Se utilizó la rutina "pmtm" que devuelve la densidad espectral de potencia (PSD) de la señal en el dominio del tiempo, estimada por el método multitaper de Thompson con el software MATLAB R2017b. Para conocer

cómo fue el comportamiento entre las variables abióticas (SST, SSH) y bióticas ( $Chla_{sat}$  y PP) con respecto al tiempo se realizó un análisis de correlación cruzada. Para llevar a cabo este análisis fue necesario que las dos series temporales no presentarán estacionalidad, es decir, que la media anual se mantenga relativamente constante durante todo el periodo de estudio.

Para cumplir este supuesto se aplicó a las series temporales una estandarización o normalización “Z” (**Ecuación 2**) del conjunto de datos con media 0 y desviación estándar 1, conservando las propiedades de forma del conjunto de datos original (misma asimetría y kurtosis), permitiendo comparar dos o más conjuntos de datos con unidades diferentes (en este caso los conjuntos son anuales).

$$Z = \frac{(x - \mu)}{\sigma} \quad (2)$$

donde  $x$  es el valor de cada dato del año respectivo,  $\mu$  la media anual respectiva y  $\sigma$  la desviación estándar correspondiente a ese año.

### **2.3.1. Diferencias entre zonas, años y meses de cada variable**

Los datos no cumplían con los supuestos necesarios para realizar pruebas paramétricas, por lo cual, se realizaron pruebas no paramétricas Kruskal-Wallis para probar diferencias de  $Chla_{sat}$  y PP entre meses y de cada polígono. Igualmente, se hicieron estas mismas pruebas para mostrar las diferencias significativas entre años, en cada área. Al encontrar diferencias significativas se realizaron pruebas post-hoc con el método o “corrección” de Bonferroni para encontrar cuales años tenían diferencias con otros (aunque se considera una prueba estadística conservadora, tiene como ventajas el reducir un caso falso positivo o error tipo I y se encuentra disponible en distintos paquetes estadísticos reportando el valor numérico del pvalue). Estos análisis se realizaron con el software R versión 4.1.0.

### **2.3.2. Comparación de datos *in situ* contra datos satelitales**

Se realizaron pruebas de correlación lineal y visuales entre datos *in situ* de Chla y PP obtenidos en las campañas de Malla Fina del proyecto CIGoM y se compararon con los datos satelitales correspondientes para cada fecha y espacio. Para ambas variables se utilizaron los datos más superficiales al 100% de profundidad óptica, profundidad de colecta entre los 0.5 a 5 m.

Para la comparación de datos *in situ* y los datos satelitales se optó por el índice de asociación lineal más común: el índice de correlación de Pearson, por lo que las bases de datos fueron transformadas con  $\log_{10}$  con el fin de mejorar la distribución de errores y satisfacer los supuestos del índice estadístico (Santamaría-del Ángel *et al.*, 2006). Asimismo, se realizaron las pruebas de hipótesis para determinar el nivel de significancia a un 95% de confianza. En caso de no cumplir los supuestos requeridos para la prueba de Pearson se optó por realizar la prueba no paramétrica de Spearman.

## Capítulo 3. Resultados

---

### 3.1. Variación espacial y temporal

#### 3.1.1. Temperatura superficial del mar

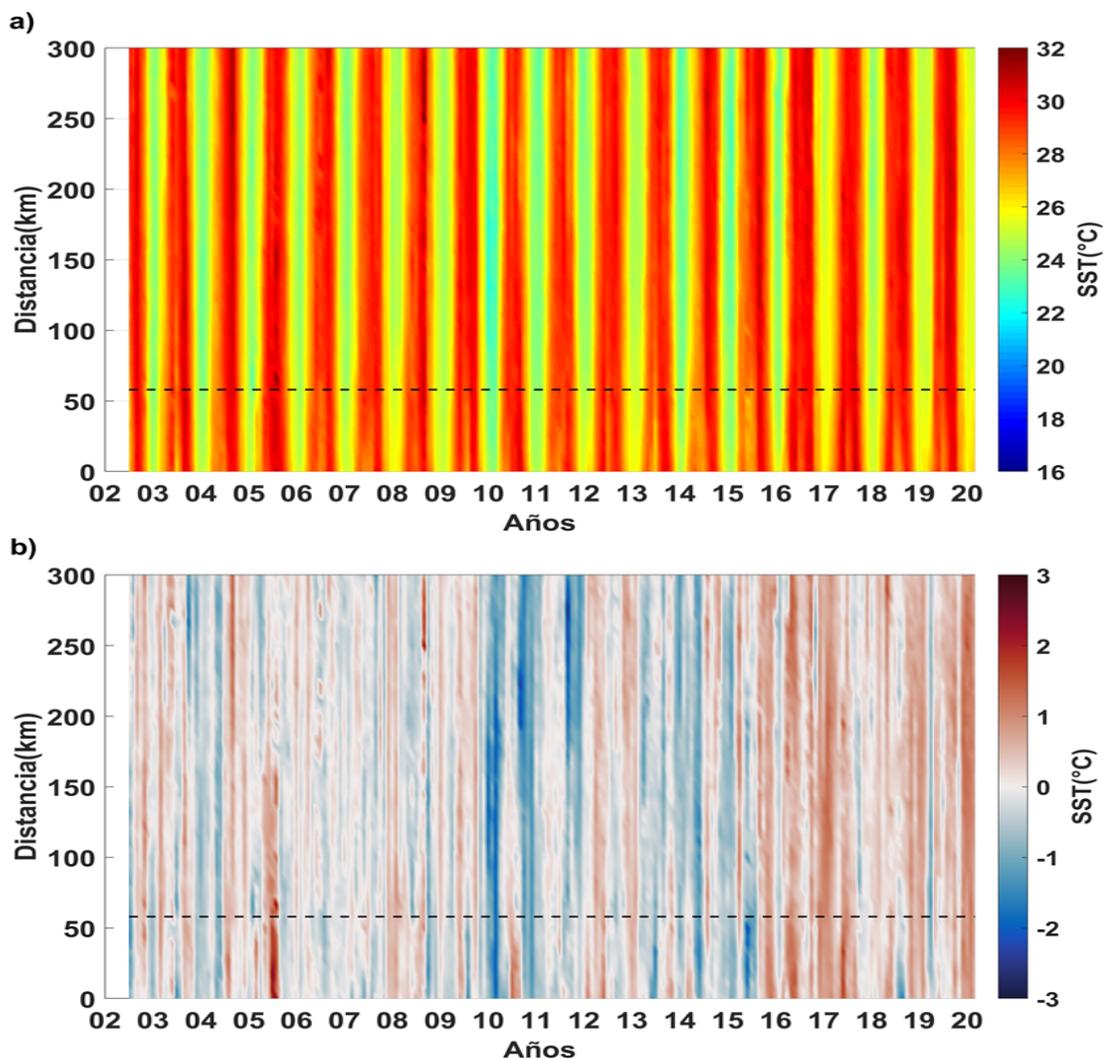
En los tres transectos de estudio se observó una estacionalidad muy marcada y sobre todo homogénea en las regiones de aguas profundas (> 200 m de profundidad). El intervalo de la SST para las zonas de estudio en todo el periodo de tiempo osciló de 17.4 a 32.6 °C.

Para Coatzacoalcos, la zona costera y la oceánica tuvieron intervalos de temperatura similares (entre los 22.2 - 32.6 °C) (**Figura 4a**). En la **Figura 4b** se muestra que en el año de 2010 y 2011 existieron dos anomalías negativas de la SST y que a partir del año 2016 hasta el fin del periodo de estudio las anomalías predominantes fueron positivas entre los 1 y 2 °C. En este transecto se registraron anomalías negativas de hasta -2.9 °C y anomalías positivas de 2.6 °C.

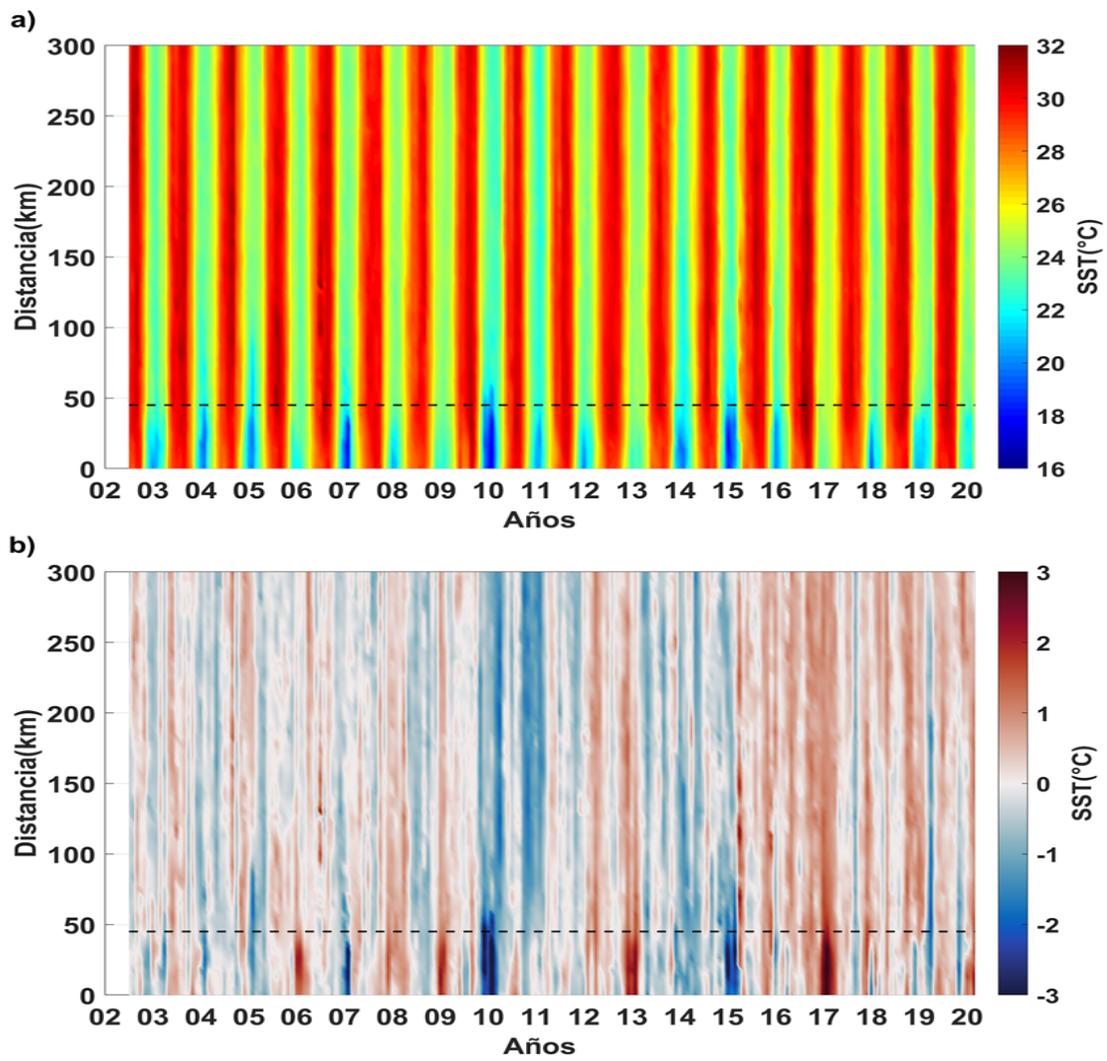
Para el transecto de Tampico, el diagrama Hovmöller muestra más heterogeneidad entre la región costera y oceánica en comparación con el transecto de Coatzacoalcos (**Figura 5a**). En general, la región costera presentó valores más bajos que la región oceánica, y aunque muestra estacionalidad, esta no es tan marcada como la región de aguas oceánicas. Específicamente en los años 2007, 2010 y 2015 se observó una pluma de agua entre los 17 y 20 °C. El valor mínimo reportado para esta sección fue de 17.4 °C y el máximo de 32.4 °C. En este mismo transecto se reportaron anomalías negativas marcadas en los años 2010 y 2015, principalmente en la región costera, y en el año 2010, esta anomalía negativa va perdiendo magnitud conforme se aleja de la costa (**Figura 5b**). Al igual que el transecto de Coatzacoalcos, se observó un periodo de calentamiento desde finales del año 2015 hasta el 2020. Específicamente en el año 2017 en la región de agua costeras se observó un evento anómalo superior a los 2 °C. En este transecto se registraron anomalías negativas de hasta -3.9 °C y anomalías positivas de 3.2 °C.

En el transecto de Perdido la SST presentó una estacionalidad más marcada en la región de aguas oceánicas respecto a la región de aguas costeras (**Figura 6a**). Se

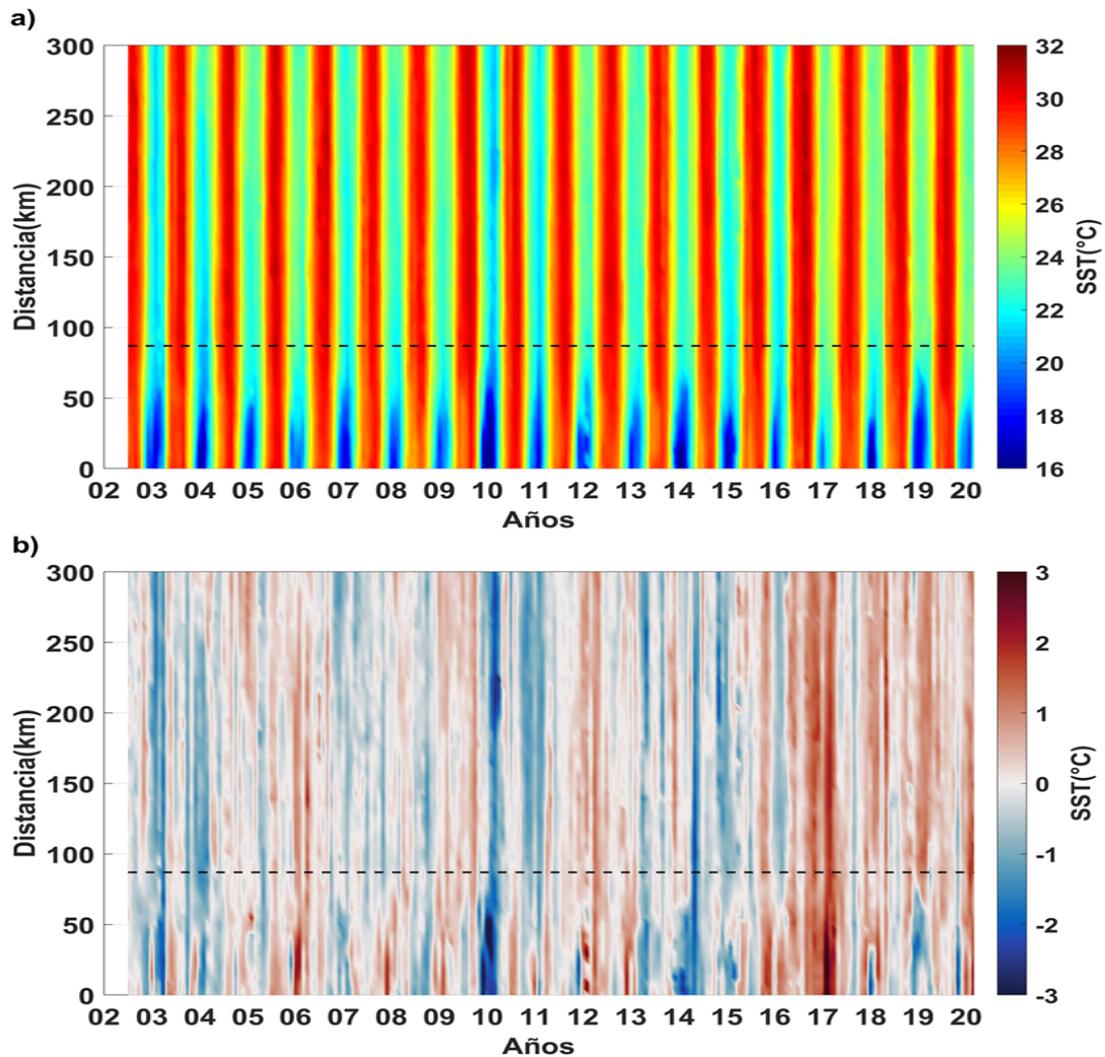
reportaron las temperaturas más bajas en el transecto que corresponde a la zona costera y conforme se aleja de la costa va aumentando la temperatura. El valor mínimo reportado para esta sección fue de  $15.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  y el máximo de  $31.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esta región reportó intervalos de anomalías positivas y negativas: a finales del 2009 e inicios del 2010 se presentó una anomalía negativa mayor a los  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la región costera, que continuó a lo largo del transecto (**Figura 6b**). De igual manera que en las regiones de Coahuila y Tampico, a partir del año 2016 se observó un aumento de la SST y en el año 2017 (alrededor de los 50 km fuera de la costa) se presentó una anomalía positiva mayor a los  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En este transecto se registraron anomalías negativas de hasta  $-3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  y anomalías positivas de  $3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 4.** a) Diagrama Hovmöller de la SST para el transecto de Coahuila, b) diagrama Hovmöller de la anomalía de la SST para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m.



**Figura 5.** a) Diagrama Hovmöller de la SST para el transecto de Tampico, b) diagrama Hovmöller de la anomalía de la SST para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200m.

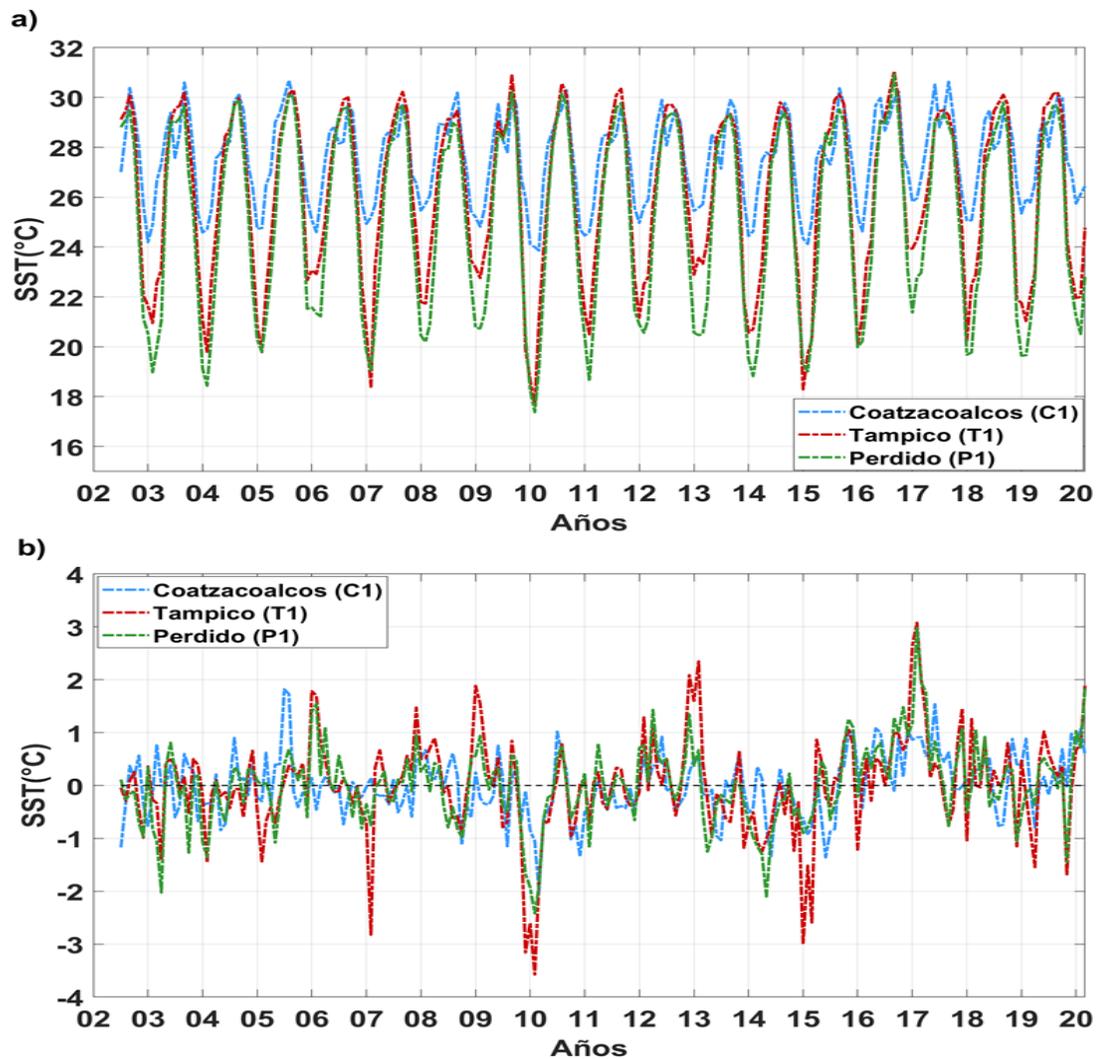


**Figura 6.** a) Diagrama Hovmöller de la SST para el transecto de Perdido, b) diagrama Hovmöller de la anomalía de la SST para e mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m.

Las series de tiempo de SST de las tres regiones de estudio mostraron una variación anual dominante, pero también con componentes intra e inter-anales (**Figura 7a**). Para las regiones costeras los valores mínimos de SST se reportaron en los meses de febrero y marzo y los máximos en agosto y septiembre. De manera similar, en las regiones oceánicas los mínimos se reportaron en los meses de enero a marzo y los valores máximos en el mes de septiembre.

El valor mínimo de SST ( $23.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) para la región costera de Coahuila (C1) se presentó en marzo del año 2010 y el máximo ( $30.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en el mes de agosto del año 2015, lo que representó un intervalo de temperatura de  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para Tampico el intervalo de temperatura para la región costera (T1) estuvo cerca de los  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que fue de los

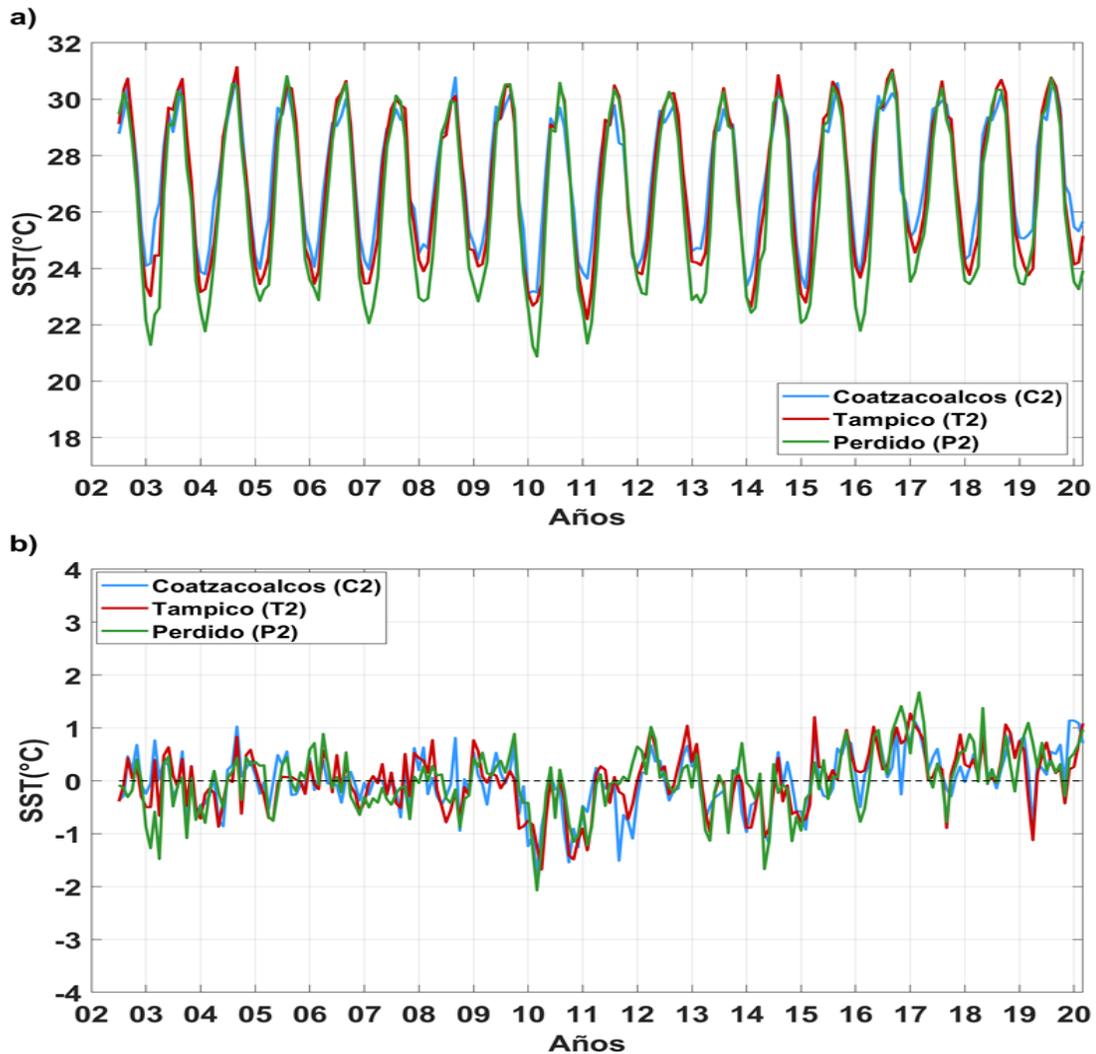
17.6 °C en febrero de 2010 a los 31.0 °C en septiembre de 2016. Para Perdido el intervalo de temperatura para la región costera (P1) fue de ~13.5 °C; el mínimo en febrero de 2010 (17.4 °C) y el máximo en septiembre de 2016 (-30.9 °C). Para las regiones costeras el intervalo de temperatura fue de ~13.6 °C (17.4 – 31 °C) (**Figura 7a**). Se observaron anomalías positivas y negativas en las regiones costeras (entre los – 3.6 y 3.1 °C). La zona de Tampico costero (T1) mostró las mayores anomalías, tanto positivas como negativas. A inicios del 2007, 2010 y 2015 se observaron las mayores anomalías negativas en la región T1 y, en el año 2010, las tres regiones tuvieron un decremento en la SST. Por otra parte, se observó una anomalía positiva en el año 2017, en las dos regiones más norteñas de estudio T1 y P1 (**Figura 7b**). Para C1 la SST la mayor anomalía negativa se mostró en marzo del 2010 (-2.01 °C) y la mayor anomalía positiva (1.82 °C) en julio del 2005. Para T1 la negativa se registró en febrero del 2010 (-3.57 °C) y la positiva en febrero del 2017 (3.1 °C). Para P1 negativo en febrero del 2010 (-2.42 °C) y el positivo en febrero del 2017 (3.0 °C) (**Figura 7b**).



**Figura 7.** a) Series de tiempo de la SST para los polígonos costeros (profundidad <200m), b) Anomalías de la SST para regiones costeras.

Para la región profunda de Coatzacoalcos (C2) el intervalo de temperatura fue de  $\sim 8$  °C (23.1 - 30.9 °C) en enero de 2010 y septiembre de 2004, respectivamente. Por otro lado, para la región de aguas oceánicas de Tampico (T2) el intervalo fue de  $\sim 9$  °C (22.2 - 31.1 °C) en febrero de 2011 y septiembre de 2014. La región de aguas oceánicas de Perdido (P2) el intervalo fue de  $\sim 10$  °C (20.9 - 30.9) en marzo de 2010 y septiembre de 2016 (**Figura 8a**). De la misma manera que las regiones costeras, las regiones oceánicas presentaron anomalías tanto negativas como positivas, pero de menor rango (-2.1 a 1.7 °C). Para C2, la mayor anomalía negativa se presentó en marzo de 2010 (-1.8 °C) y la positiva en diciembre 2009 (1.1 °C). Para T2, la anomalía negativa se observó en abril del 2010 (-1.7 °C) y la positiva en enero de 2017 (1.3 °C). Para P2, la negativa se registró en marzo del 2010 (-2.1 °C) y la positiva en marzo del 2017 (de 1.7 °C) (**Figura**

8b).



**Figura 8.** a) Series de tiempo de la SST para los polígonos oceánicos (profundidad >200 m), b) Anomalías de la SST para regiones oceánicas.

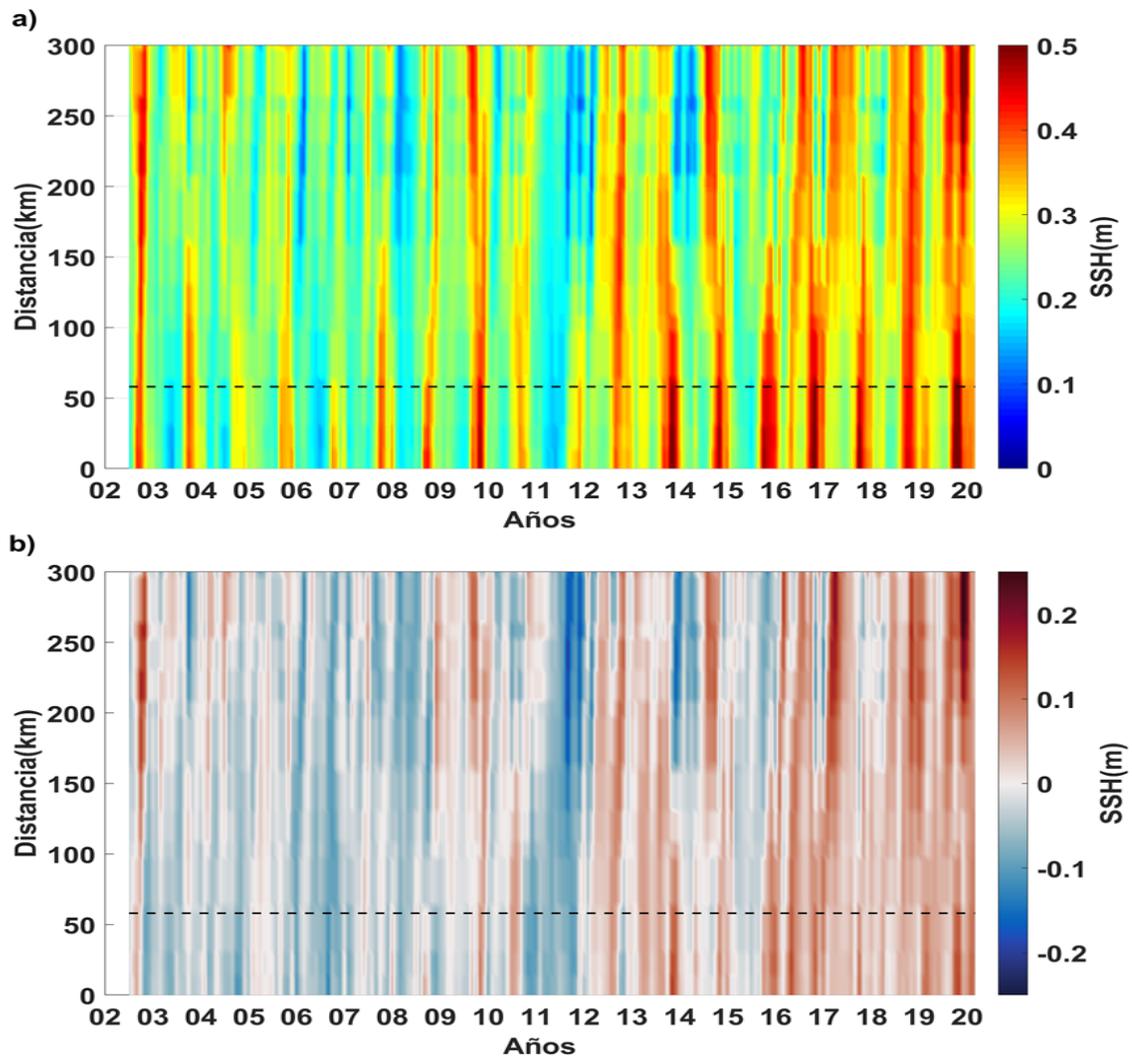
### 3.1.2. Nivel del mar

El SSH tuvo una estacionalidad menos marcada que la SST y se observó un comportamiento similar desde los 0 a los 300km en los tres transectos (Coatzacoalcos, Tampico y Perdido). Para Coatzacoalcos, se observaron picos del SSH más cerca de la costa en el año 2014 y finales del 2019, y se reportó un mínimo de 0.08 m y un máximo de 0.60. (**Figura 9a**). La anomalía del SSH de Coatzacoalcos mostró anomalías positivas y negativas menores en un rango de -0.21 a 0.28 m. Se observó que dominaron anomalías negativas del año 2002 a finales del 2011 y persistieron las anomalías

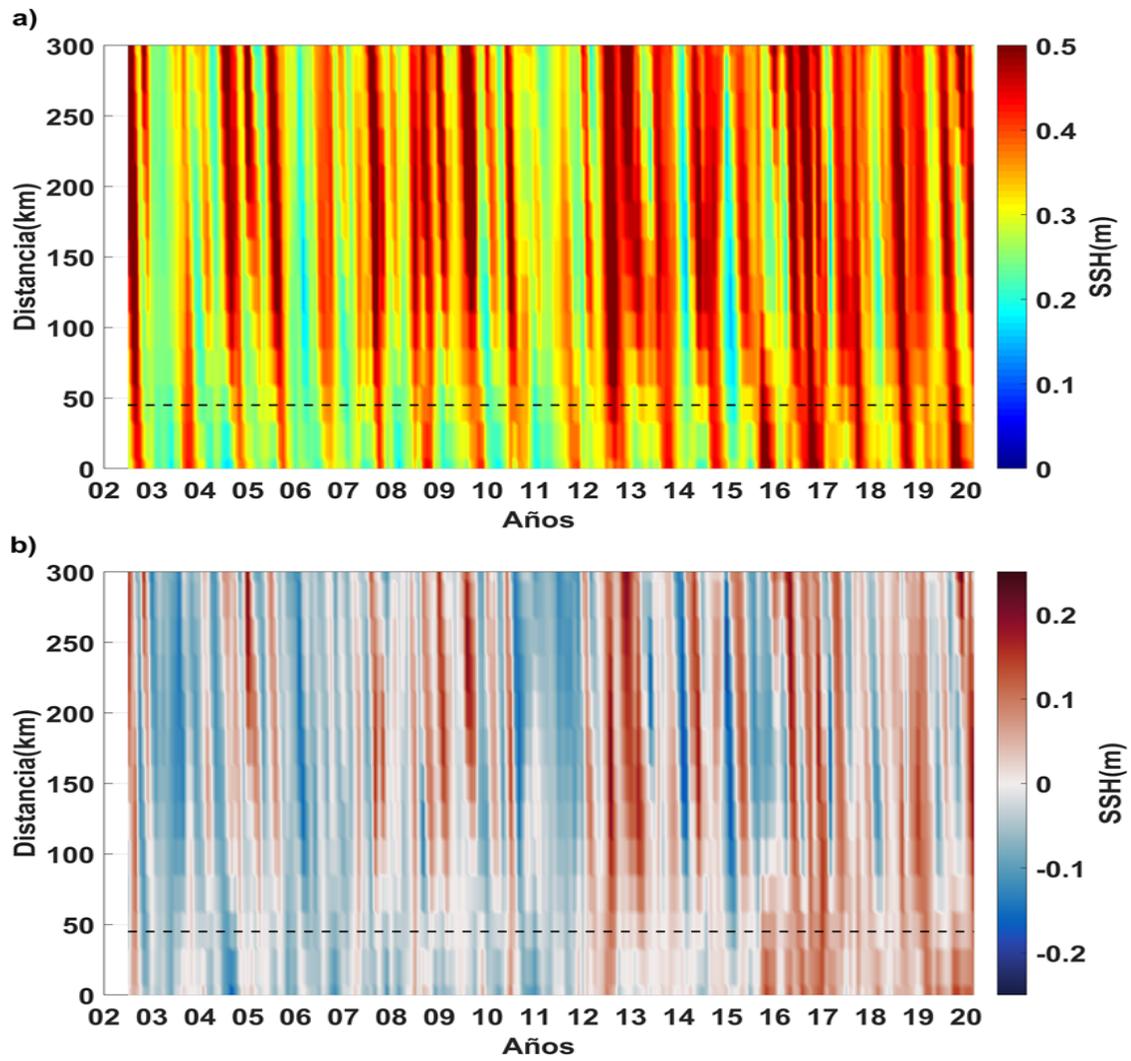
positivas del año 2012 al 2020 (en este último año, se reportó la mayor anomalía positiva cerca de los 250 km fuera de la costa) con una anomalía negativa en 2014 en regiones oceánicas y en 2015 en todo el transecto (**Figura 9b**).

El diagrama Hovmöller para el transecto de Tampico (**Figura 10a**) mostró valores superiores al transecto de Coatzacoalcos, predominando valores mayores a los 0.5 m en todo el periodo de estudio. El valor mínimo reportado para esta sección de 0.13 m y el máximo de 0.67 m. Se observó un periodo anómalo mayormente negativo en los primeros nueve años de estudio (2002 - 2011). A finales de 2016 se observaron principalmente anomalías positivas mayores a los 0.1 m. En este transecto se registraron anomalías negativas de hasta -0.21 m y anomalías positivas de 0.23 m (**Figura 10b**).

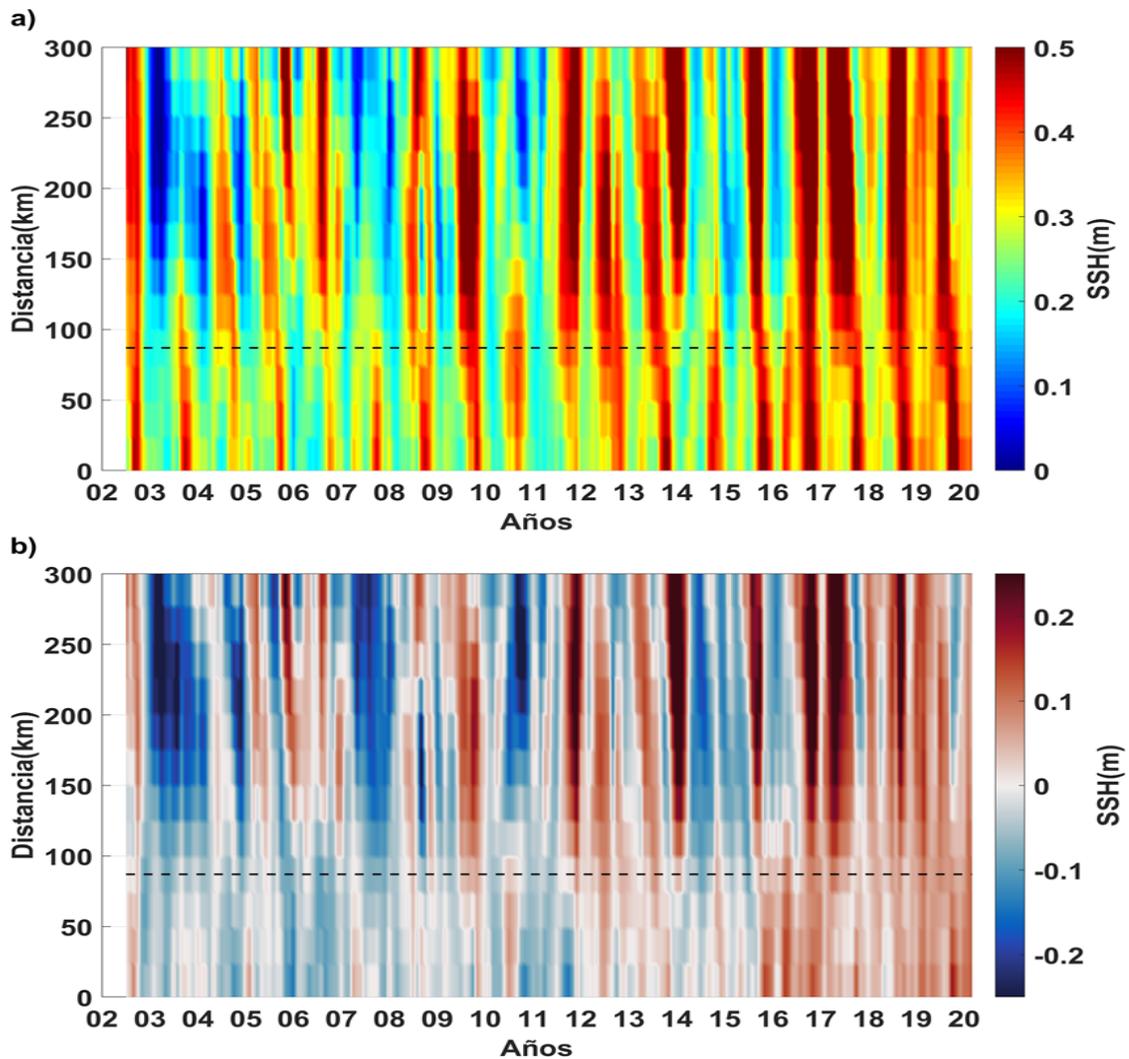
Para el transecto de Perdido el intervalo de SSH fue superior a los dos transectos más al sur del GoM, con un valor mínimo de -0.02 m y un máximo de 0.75 m (intervalo ~0.77 m). Igualmente que la SST, se reportó un incremento del SSH en los últimos años del periodo de estudio (2017 a 2020) (**Figura 11a**). Se presentaron anomalías negativas y positivas de mayor magnitud que en los otros dos transectos, con periodos anómalos marcados de 2003, a mediados del 2004, en 2007 - 2008 y otro a finales del 2010. Se presentaron periodos anómalos positivos a finales del 2011, 2014 y 2015, 2016 y 2017 (**Figura 11b**). La sección oceánica presentó anomalías positivas y negativas de mayor magnitud que la sección costera con un intervalo de -0.3 m a 0.4 m. Predominaron anomalías positivas desde inicios del 2016 en la zona costera para distribuirse a lo largo de todo el transecto hasta el año 2020.



**Figura 9.** a) Diagrama Hovmöller del SSH para el transecto de Coatzacoalcos, b) diagrama Hovmöller de la anomalía del SSH para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m.



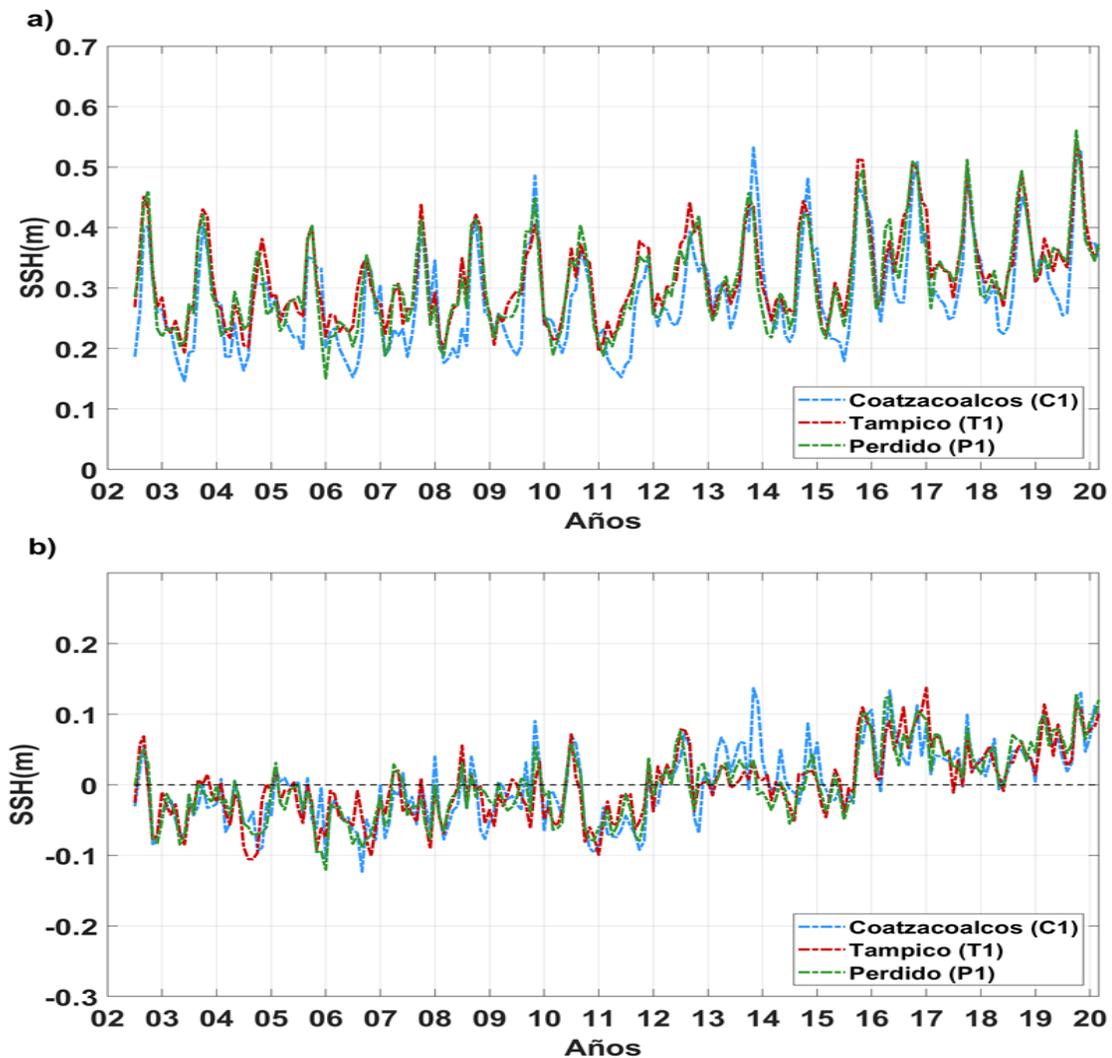
**Figura 10.** a) Diagrama Hovmöller del SSH para el transecto de Tampico, b) diagrama Hovmöller de la anomalía del SSH para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200m.



**Figura 11.** a) Diagrama Hovmöller del SSH para el transecto de Perdido, b) diagrama Hovmöller de la anomalía del SSH para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200m.

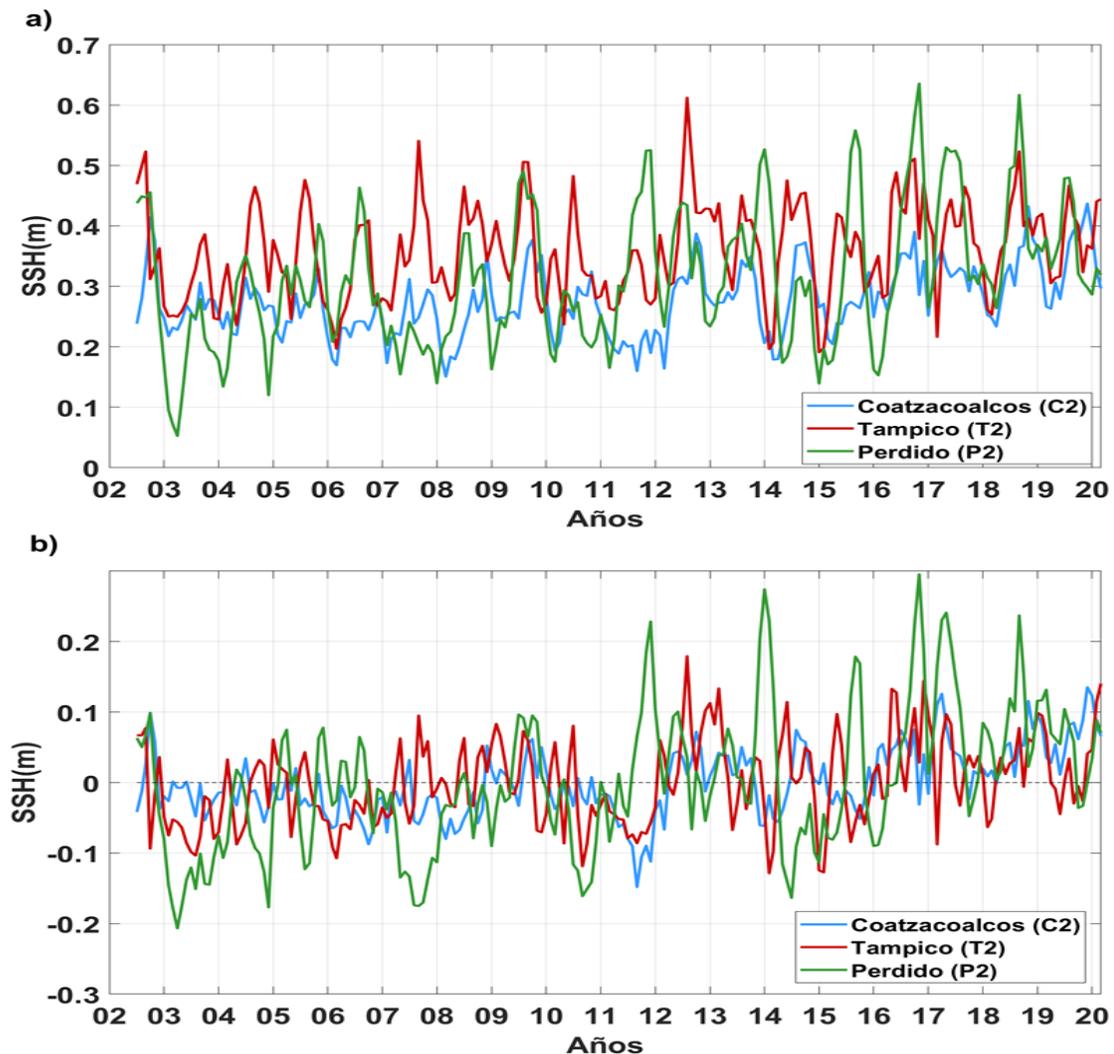
En las series de tiempo, se observó mayor variabilidad en la zona oceánica respecto a la zona costera, además de señalar nuevamente el incremento del SSH entre los años 2012 y 2014, volviéndose aún más notorio en el año 2016 (**Figura 12** y **Figura 13**). En C1, los valores mínimos ( $\sim 0.15$  m) se presentaron en junio de 2003 y 2011 y julio de 2006, y los valores máximos (0.53 m) se observaron en el mes de noviembre 2013 y 2019 y en octubre del 2019 (0.52 m). Para T1, el valor mínimo (0.19 m) se reportó en junio del 2003, enero del 2011 y marzo del 2008 (0.20 m) y los valores máximos se reportaron en octubre del 2019 (0.55 m). Para P1, el mínimo (0.15 m) se reportó en enero del 2006 y en febrero del 2011, mientras que el máximo en octubre del 2019 (0.56 m) (**Figura 12a**).

Se observaron anomalías positivas y negativas de mayor amplitud en las regiones oceánicas que en las regiones costeras: con intervalo de  $-0.12$  a  $0.14$  m para las zonas costeras y de  $-0.20$  a  $0.30$  m para las regiones oceánicas (**Figura 12b**). También, se observó que estas anomalías tienden a los valores positivos desde finales del 2012 para todas las regiones. Para C1, la anomalía negativa de mayor valor ( $-0.12$  m) se presentó en septiembre del 2006 y la anomalía positiva ( $0.14$  m) en noviembre del 2013. Para T1 la anomalía negativa de mayor magnitud ( $-0.11$  m) en septiembre y agosto del 2004 y la anomalía positiva ( $0.14$  m) en enero del 2017. Para P1, se presentó la mayor anomalía negativa en enero del 2006 ( $-0.12$  m) y la positiva en octubre del 2019 y mayo del 2016 ( $0.13$  m).



**Figura 12.** a) Series de tiempo del SSH para los polígonos costeros (profundidad  $< 200$ m), b) Anomalías del SSH para regiones costeras.

En las regiones profundas, en C2, los mínimos se presentaron en el mes de marzo del 2008 (0.15 m), septiembre del 2011 y el valor máximo se reportó en diciembre del 2019 (0.44 m). Para T2, mínimo (0.19 m) en enero del 2015 y el máximo en agosto del 2012 (0.61 m). Para P2, el mínimo (0.05 m) se reportó en abril del 2003 y el máximo (0.64 m) en noviembre del 2016 (**Figura 13a**).



**Figura 13.** a) Series de tiempo del SSH para los polígonos oceánicos (profundidad > 200m), b) Anomalías del SSH para regiones oceánicas.

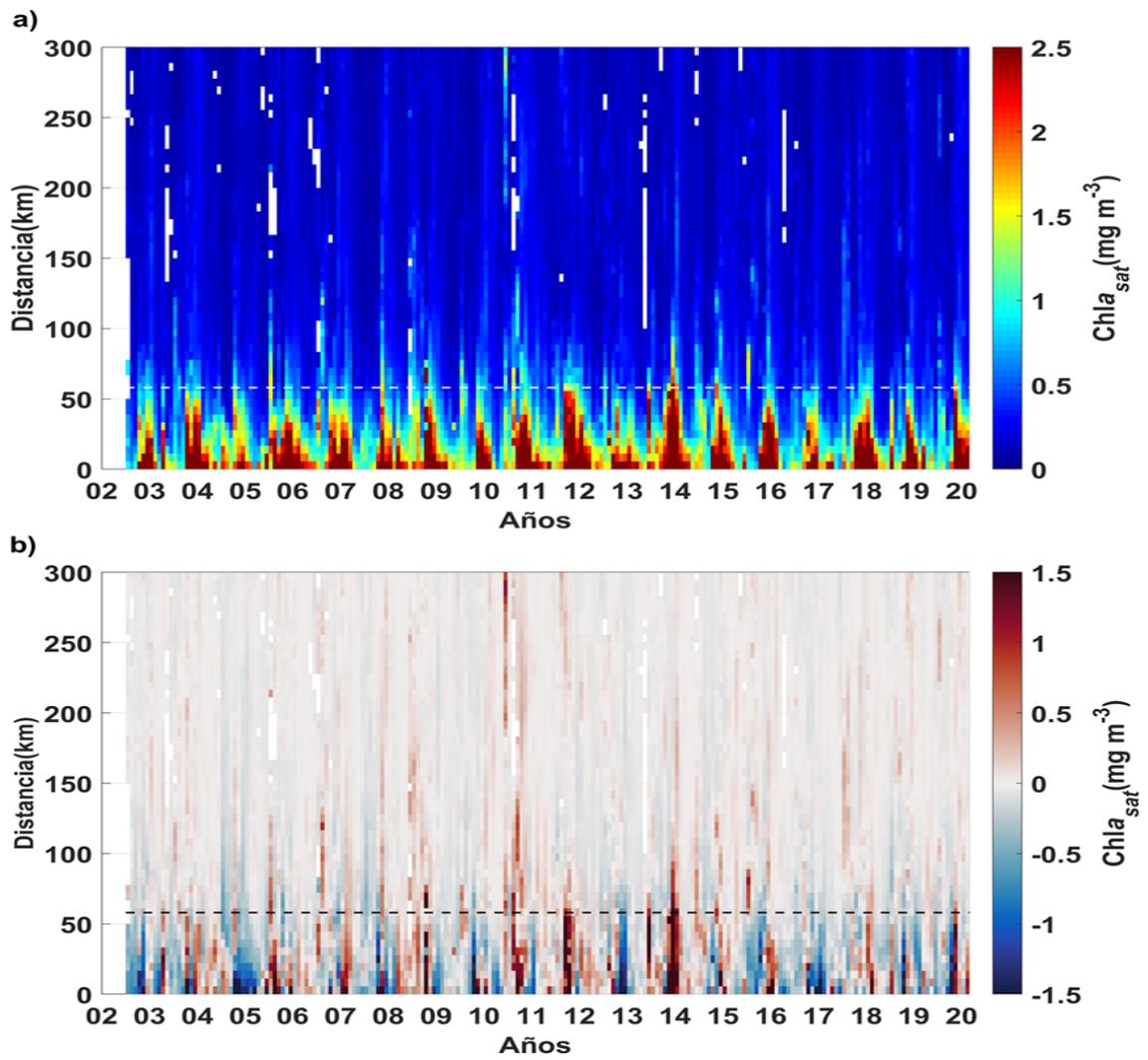
Para las anomalías oceánicas, en C2 se presentó una anomalía negativa (-0.15 m) en septiembre del 2011 (**Figura 13b**) y la mayor anomalía positiva (0.14 m) en diciembre del 2019. Para T2, la anomalía negativa superior se observó en febrero de 2014 y 2015 (-0.13 m) y la anomalía positiva (0.18 m), en agosto del 2012. Para P2, el mayor pico anómalo negativo (-0.21 m) se presentó en abril de 2003 y el positivo en

noviembre de 2016 (0.30 m).

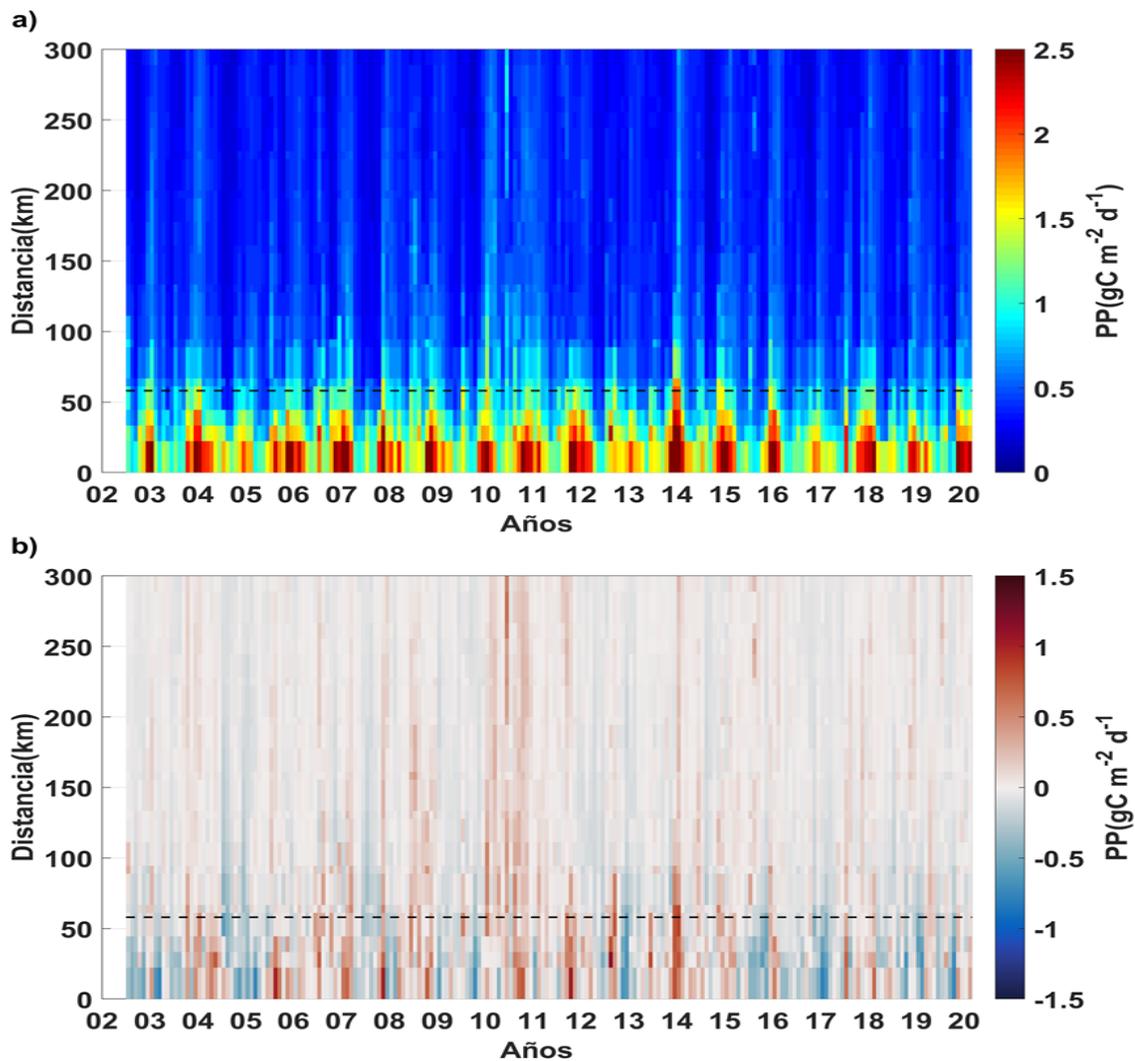
### 3.1.3. Clorofila satelital y Productividad Primaria

La  $Chl_{a_{sat}}$  y PP presentaron un comportamiento estacional muy marcado para todos los transectos e igualmente se encontraron diferencias espaciales estadísticas y visuales muy marcadas entre la región costera y oceánica dividida por la batimetría a los 200 m de profundidad (**Figuras 14a - 19a**). La  $Chl_{a_{sat}}$  no presentó diferencias estadísticas significativas entre los años para cada región, y para PP sólo la región oceánica de Coatzacoalcos (C2) ( $n = 213$ ,  $pvalue < 0.05$ ) mostró diferencias en los pares de años 2004 - 2010, 2009 - 2010 y 2010 - 2012 (**Anexo 1A**).

En el transecto de Coatzacoalcos se presentaron valores mínimos ( $0.06 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.16 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y máximos ( $2.50 \text{ mg m}^{-3}$  y  $3.22 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) de  $Chl_{a_{sat}}$  y PP, respectivamente (Figura 11a y 12a). Asimismo, la  $Chl_{a_{sat}}$  presentó anomalías negativas ( $-2.98 \text{ mg m}^{-3}$ ) a finales del 2002, 2005, 2013 y 2017 y positivas ( $3.00 \text{ mg m}^{-3}$ ) a finales del 2011 y 2013 y a inicios del 2014 (**Figura 14b**). Para la PP, las anomalías positivas y negativas fueron más débiles respecto a la  $Chl_{a_{sat}}$  en todo el transecto en un intervalo de  $-0.77$  a  $1.22 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , mostrando algunas lengüetas anómalas positivas de PP en la zona costera a mediados del 2005, finales del 2007 y 2011 e inicios del 2014 (**Figura 15b**).



**Figura 14.** a) Diagrama Hovmöller de la  $Chla_{sat}$  para el transecto de Coatzacoalcos, b) Diagrama Hovmöller de la anomalía de la  $Chla_{sat}$  para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m.

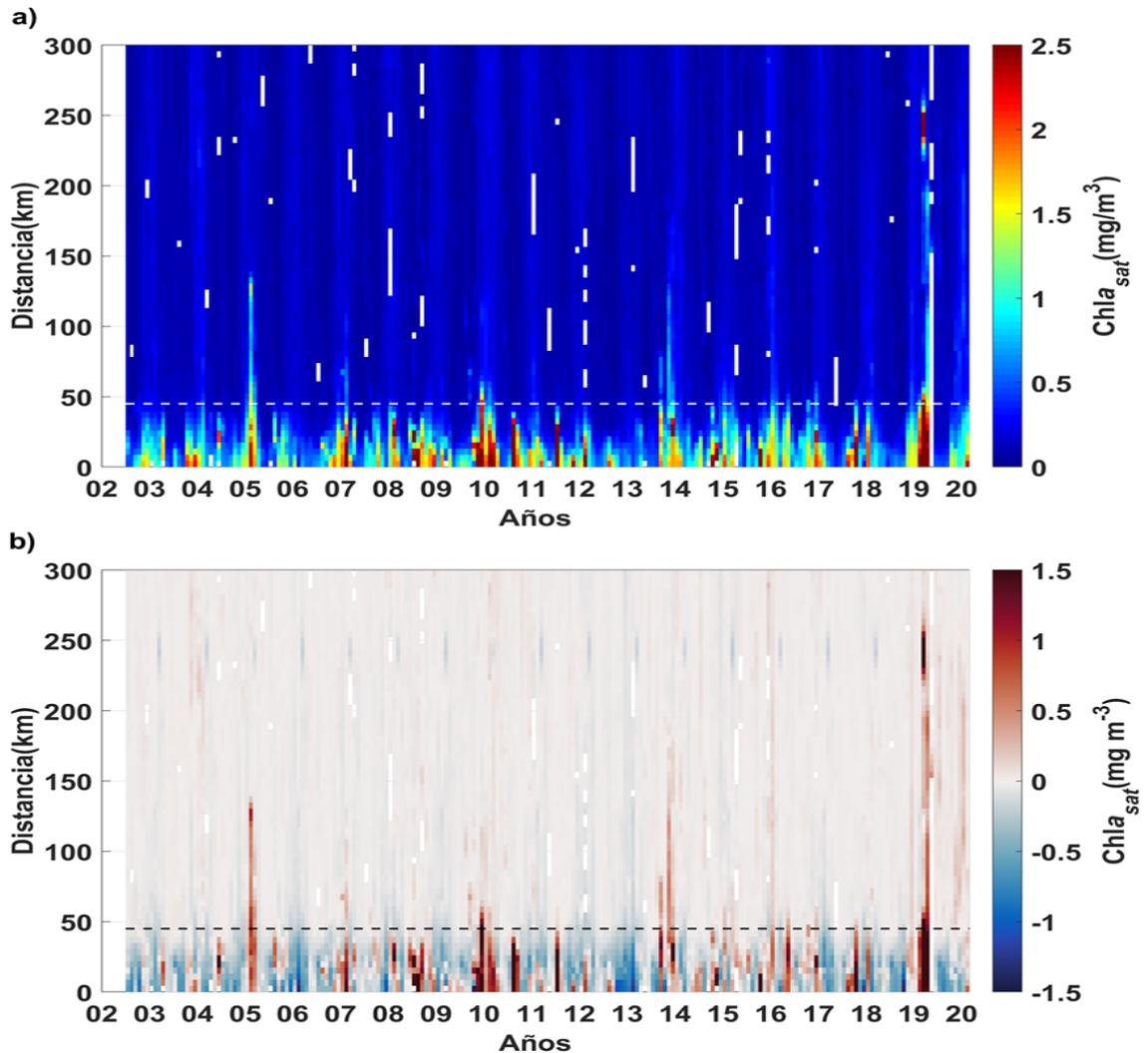


**Figura 15.** a) Diagrama Hovmöller de la PP para el transecto de Coatzacoalcos, b) Diagrama Hovmöller de la anomalía de la PPT para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m.

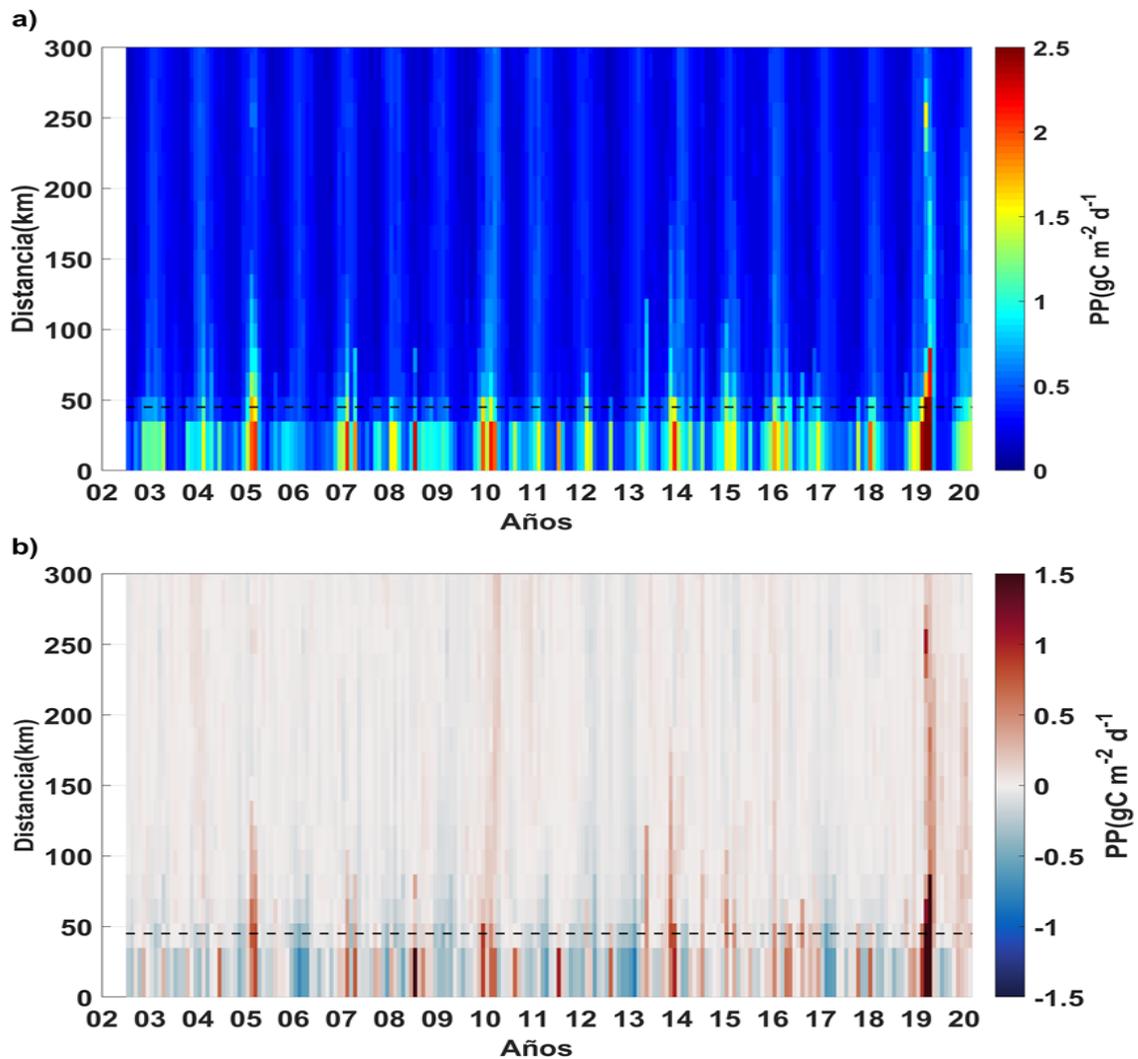
Para el transecto de Tampico se observó un patrón estacional con valores máximos a finales e inicios del año y mínimos en meses intermedios, y en la zona oceánica se presentaron concentraciones menores respecto a las secciones costeras. Asimismo, se observaron lengüetas de  $Chl_{a_{sat}}$  y PP en el año 2010 y finales de 2019 (para la PP se observaron, además, otros picos en 2005 y 2014), principalmente en la zona costera alrededor de los 50 km, lengüetas que avanzan hasta regiones oceánicas, desvaneciendo la concentración y la tasa de productividad (**Figuras 16a y 17a**).

En este transecto se presentaron valores mínimos que van de los  $0.03 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.12 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  y máximos de  $9.74 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $3.56 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de  $Chl_{a_{sat}}$  y PP, respectivamente (**Figuras 16a y 17a**). Se reportaron anomalías positivas y negativas entre

-1.42 a  $7.77 \text{ mg m}^{-3}$  para la  $\text{Chla}_{sat}$  y de  $-0.84$  a  $2.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para la PP, donde ambas variables tuvieron mayor magnitud en la sección que corresponde a la costa. Se observaron lengüetas de  $\text{Chla}_{sat}$  y PP que disminuyen de intensidad conforme se aleja de la costa, específicamente en el año 2005, 2008, finales del 2013, 2010 y a inicios 2019, donde esta anomalía se propagó hasta los 300 km fuera de la costa (**Figuras 16b y 17b**).

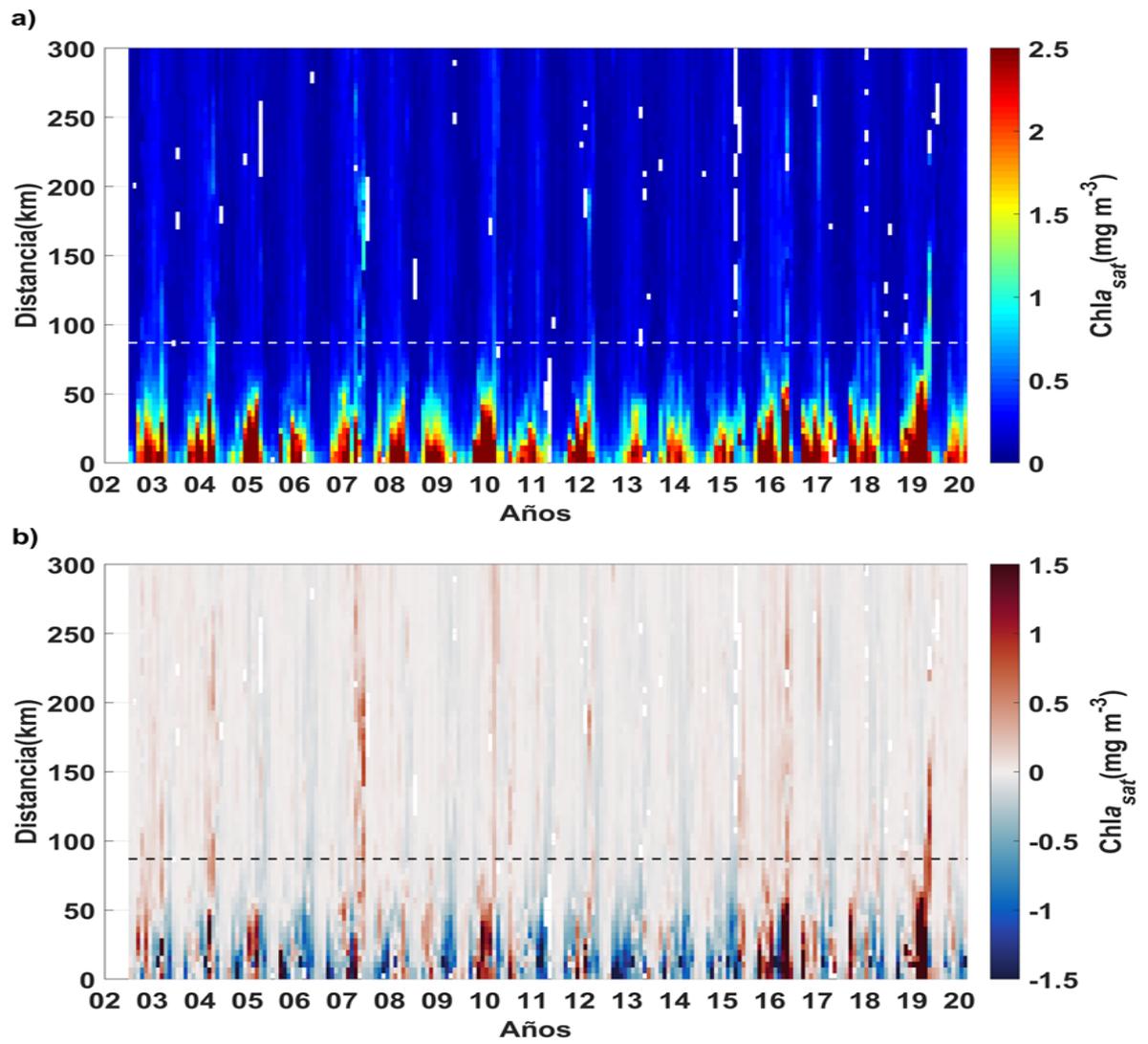


**Figura 16.** a) Diagrama Hovmöller de la  $\text{Chla}_{sat}$  para el transecto de Tampico, b) Diagrama Hovmöller de la anomalía de la  $\text{Chla}_{sat}$  t para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m.

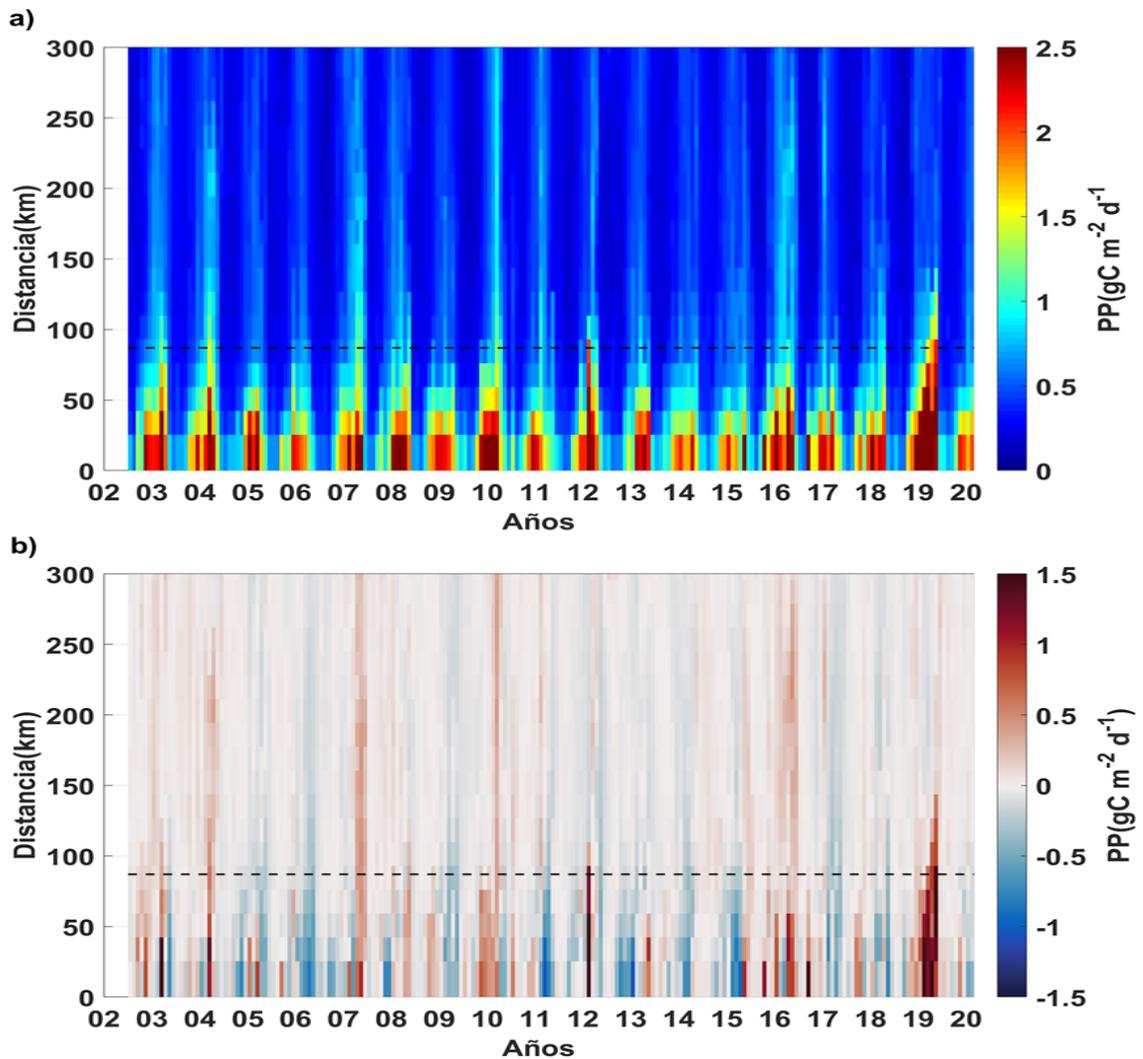


**Figura 17.** a) Diagrama Hovmöller de la PP para el transecto de Tampicos, b) Diagrama Hovmöller de la anomalía de la PPT para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m.

Para Perdido, esta estacionalidad prevaleció e igualmente reportó mayores concentraciones costeras que pierden magnitud alrededor de los 75 km fuera de la costa, reportando valores menores a los  $0.10 \text{ mg m}^{-3}$  de  $\text{Chl}a_{\text{sat}}$  y de  $0.13 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para la PP y mayores de  $10.00 \text{ mg m}^{-3}$  para la  $\text{Chl}a_{\text{sat}}$  y de  $5.00 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para la PP (**Figuras 18a y 19a**). Esta sección presentó las anomalías de mayor intensidad respecto a los otros dos transectos: anomalías negativas en el año de 2013 a 2015 y anomalías positivas en 2010, 2016 y 2019, siendo este último año el de la mayor anomalía entre  $-2.67 \text{ mg m}^{-3}$  a los  $5 \text{ mg m}^{-3}$  para la  $\text{Chl}a_{\text{sat}}$  y de  $-1.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  a  $2.51 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para la PP (**Figuras 18b y 19b**).



**Figura 18.** a) Diagrama Hovmöller de la  $Chla_{sat}$  para el transecto de Perdido, b) Diagrama Hovmöller de la  $Chla_{sat}$  para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m.



**Figura 19.** a) Diagrama Hovmöller de la PP para el transecto de Perdido, b) Diagrama Hovmöller de la PP para el mismo transecto. La línea punteada indica la isobata a los 200 m.

La  $Chl_{a_{sat}}$  presentó un comportamiento interanual marcado con la presencia de picos máximos de clorofila principalmente en la zona costera, con un intervalo de  $Chl_{a_{sat}}$  entre los  $0.17 - 8.00 \text{ mg m}^{-3}$  y  $0.30 - 3.00 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  y para la región oceánica superando apenas los  $0.5 \text{ mg m}^{-3}$  de  $Chl_{a_{sat}}$  y los  $0.95 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de PP (**Figuras 20a** y **22a**). La PP y  $Chl_{a_{sat}}$  presentaron diferencias estadísticas entre regiones. Al realizar la prueba posteriori, prueba Bonferroni para la PP, no presentaron diferencias los pares: C2 - P2; P1 - T1 y; P2 - T2. Para la  $Chl_{a_{sat}}$  en los pares P1 - T1 y T2 - P2 (**Anexo 1B**). Asimismo, se presentaron diferencias significativas entre regiones en cada año de la  $Chl_{a_{sat}}$  y PP, por lo que se realizó una prueba a posteriori, prueba Bonferroni, y se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ), excepto en la conjugación de cajas C1 - P1, C1 - T1, C2 - P2, C2 - T2, P1 - T1 y P2 - T2

para ambas variables (**Anexo 1C**).

Para C1 el valor mínimo de  $Chl\alpha_{sat}$  se presentó en septiembre de 2015 ( $0.56 \text{ mg m}^{-3}$ ) y el mayor pico en octubre de 2008 ( $7.65 \text{ mg m}^{-3}$ ) (siendo esta la mayor concentración de  $Chl\alpha_{sat}$  reportada para todas las regiones de estudio), además de otros picos altos de  $Chl\alpha_{sat}$  en diciembre del 2013 ( $4.65 \text{ mg m}^{-3}$ ) y en octubre del 2011 ( $4.35 \text{ mg m}^{-3}$ ) (**Figura 20a**). Para la PP el valor mínimo se observó en mayo 2009 ( $0.79 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y el máximo en diciembre del 2013 ( $2.67 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y otros picos importantes en noviembre del 2007 y enero del 2014 ( $\sim 2.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (**Figura 21a**).

Para T1 los valores mínimos de  $Chl\alpha_{sat}$  se observaron en junio de 2005 ( $0.19 \text{ mg m}^{-3}$ ) y los máximos se reportaron en marzo del 2019 ( $3.92 \text{ mg m}^{-3}$ ) y en julio del 2008 ( $3.67 \text{ mg m}^{-3}$ ). Para la PP los mínimos se observaron en agosto del 2002 y mayo del 2003 ( $0.39 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y los máximos en marzo y abril del 2019 ( $\sim 3.50 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (**Figuras 20a y 21a**).

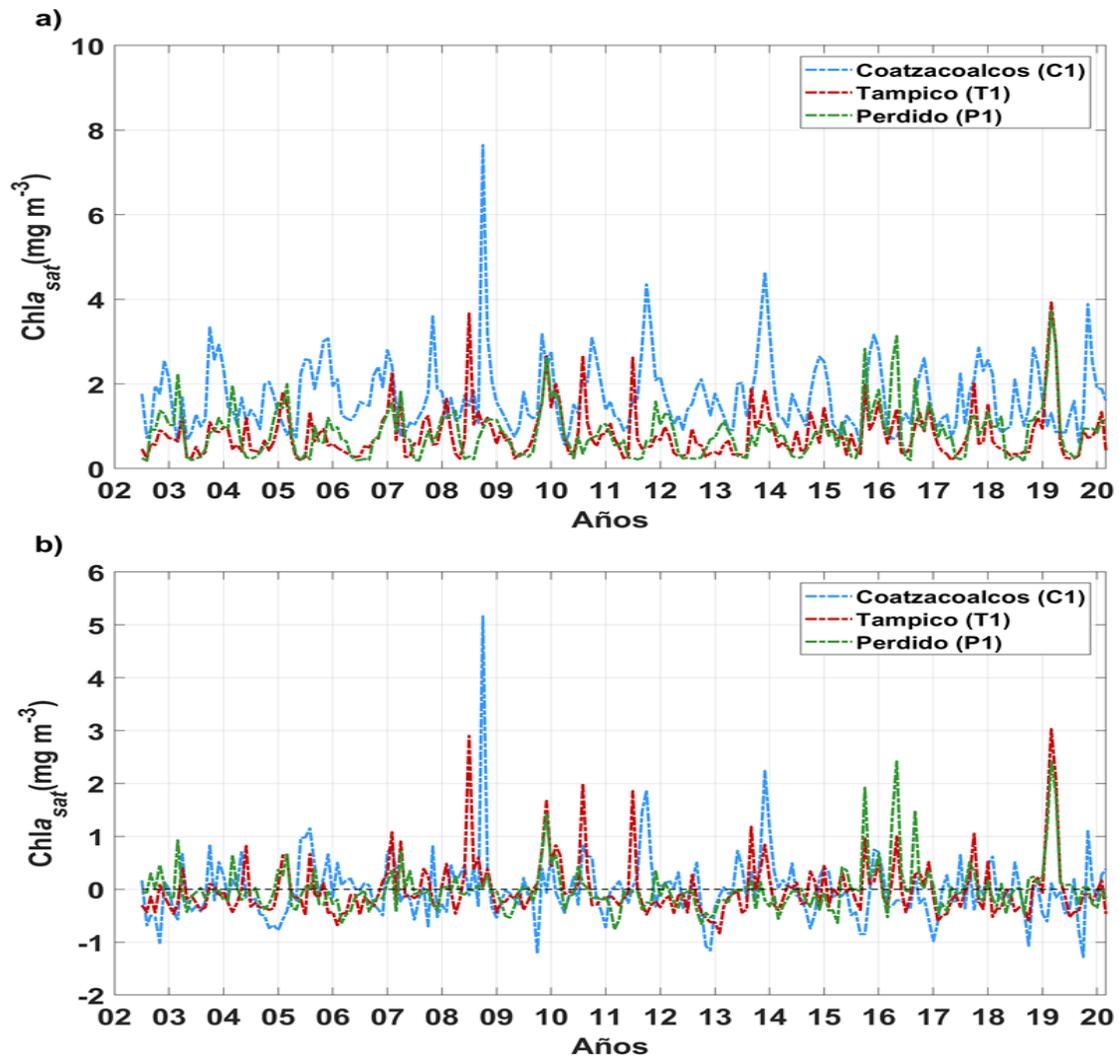
Para P1 el mínimo y máximo de la  $Chl\alpha_{sat}$  y la PP se observaron en los mismos meses: el mínimo se observó en septiembre de 2018 ( $0.17 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.32 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y el máximo de las dos variables, en marzo del 2019 ( $3.73 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $2.61 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (**Figuras 20a y 21a**).

Para las anomalías costeras, tuvieron mayor proporción y magnitud las anomalías positivas, con picos importantes a mediados y finales del 2008 e inicios del 2019. Para C1 la anomalía negativa de  $Chl\alpha_{sat}$  se presentó en octubre 2019 ( $-1.28 \text{ mg m}^{-3}$ ) (**Figura 20b**) y para la PP en diciembre del 2012 ( $-0.63 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (**Figura 21b**). La mayor anomalía positiva de  $Chl\alpha_{sat}$  se observó en octubre del 2008 ( $5.16 \text{ mg m}^{-3}$ ) seguida de una en diciembre del 2013 pero de menor magnitud ( $2.24 \text{ mg m}^{-3}$ ), para la PP en diciembre del 2013 y julio del 2017 ( $0.76 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ).

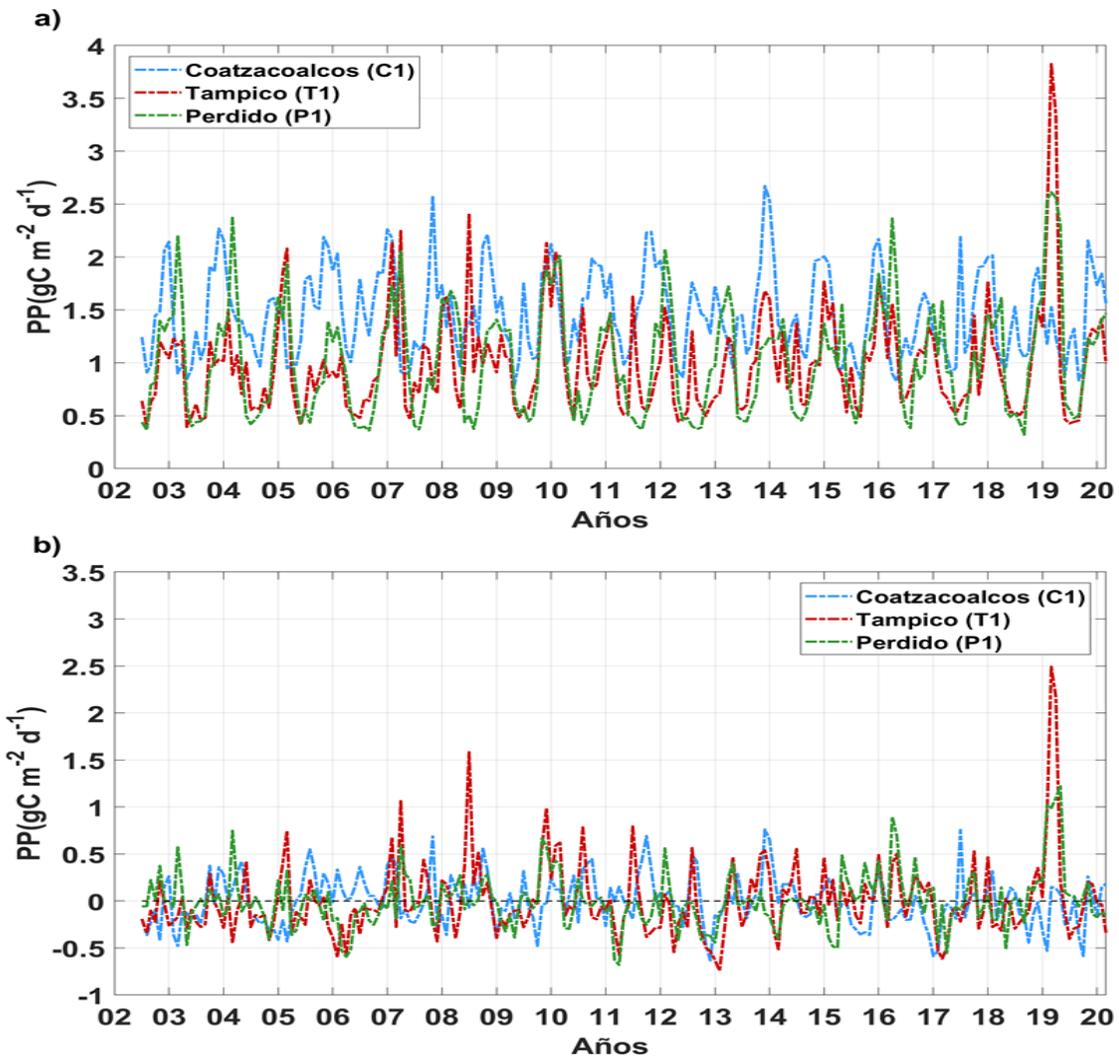
Para T1 se observaron para la  $Chl\alpha_{sat}$  y PP anomalías negativas en febrero 2013 ( $-0.83 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $-0.74 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), y anomalías positivas en marzo del 2019 ( $3.03 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $2.49 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (**Figuras 20b y 21b**).

Para P1 se registraron anomalías negativas de  $Chl\alpha_{sat}$  en marzo del 2011 ( $-0.76 \text{ mg m}^{-3}$ ) y positivas en mayo del 2016 y marzo del 2019 ( $2.42 \text{ mg m}^{-3}$ ). Para la PP, el mínimo se reportó en abril del 2011 ( $-0.68 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (con desfase de un mes

con el mínimo de  $Chla_{sat}$ ) y anomalías positivas en mayo del 2019 ( $1.23 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (Figuras 20b y 21b).



**Figura 20.** a) Series de tiempo de la  $Chla_{sat}$  para los polígonos costeros (profundidad < 200m), b) Anomalías de la  $Chla_{sat}$  para regiones costeras.



**Figura 21.** a) Series de tiempo de la PP para los polígonos costeros (profundidad < 200m), b) Anomalías de la PP para regiones costeras.

Para las regiones oceánicas, en C2 el mínimo de  $Chl a_{sat}$  y PP se observó en la misma fecha: agosto de 2004 ( $0.09 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.22 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Los máximos de  $Chl a_{sat}$  se observaron en junio del 2010 ( $0.48 \text{ mg m}^{-3}$ ) y enero del 2014, donde también se presentó el máximo de PP ( $0.42 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.75 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (**Figuras 22a y 23a**).

Para T2, los mínimos de  $Chl a_{sat}$  y PP se reportaron en la misma fecha: agosto del 2012 ( $0.05 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.16 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). A su vez, los máximos de  $Chl a_{sat}$  y PP se desfilaron por un mes: siendo el máximo de  $Chl a_{sat}$  en marzo del 2019 ( $0.51 \text{ mg m}^{-3}$ ) y el máximo de PP en abril del mismo año ( $0.96 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ).

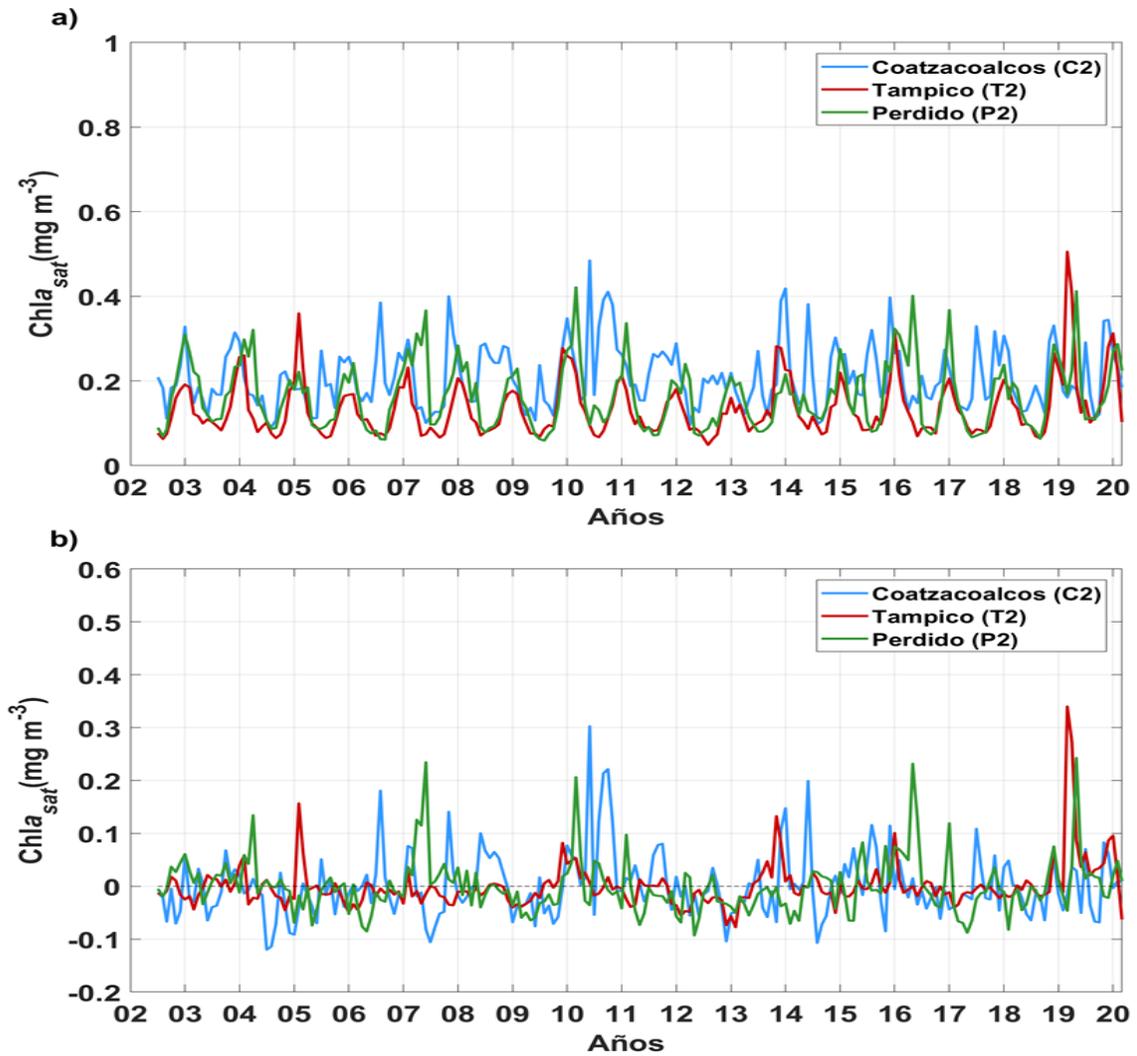
Para P2 los mínimos de  $Chl a_{sat}$  se registraron en agosto del 2009, septiembre y agosto del 2006, julio 2009, septiembre 2018 ( $\sim 0.06 \text{ mg m}^{-3}$ ) y para la PP los mínimos

se observaron en septiembre del 2016 y 2018, agosto del 2009 y agosto del 2006 ( $0.17 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). El máximo para esta región se reportó en la misma fecha: en marzo del 2010 ( $0.42 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.96 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (**Figuras 22a y 23a**).

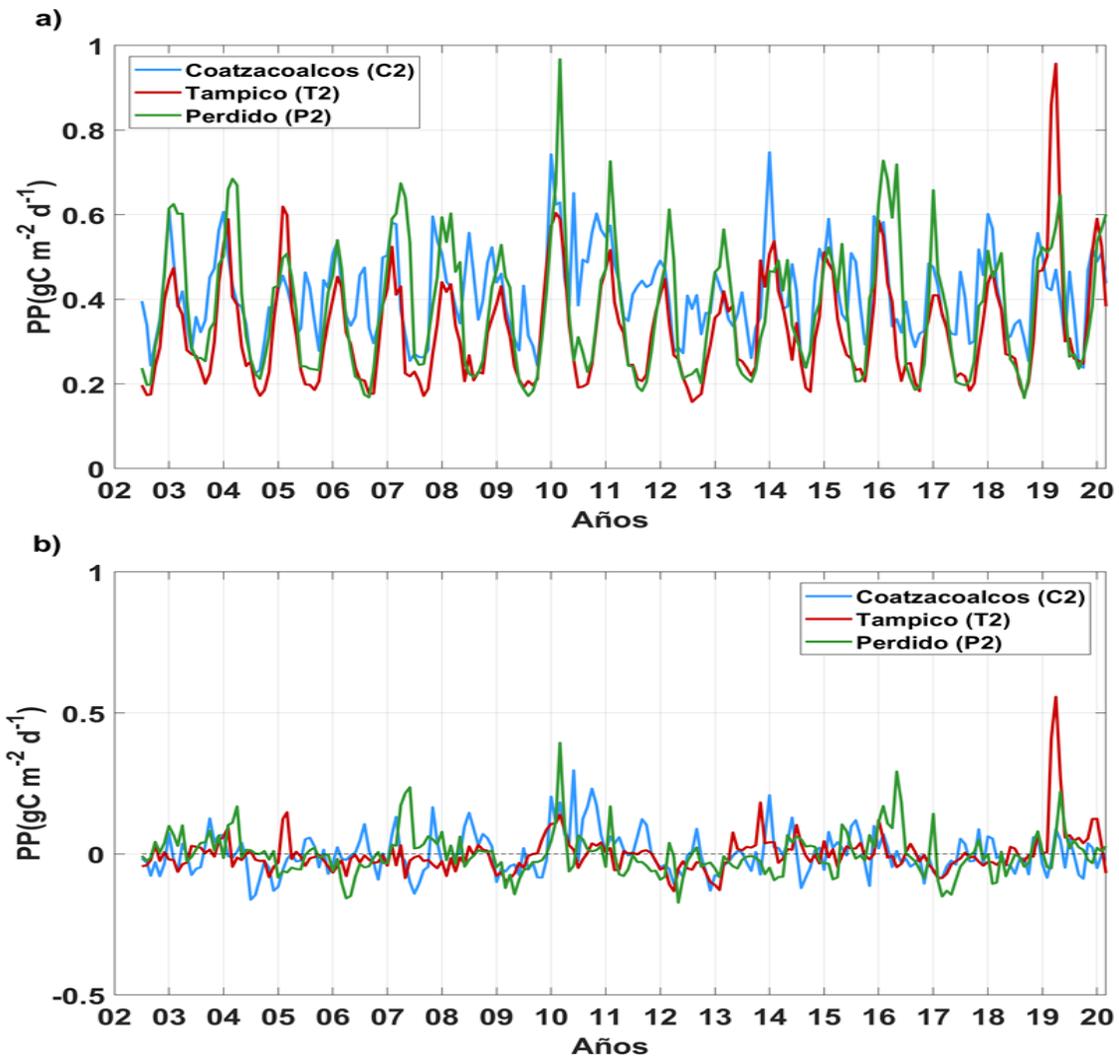
Para las regiones oceánicas, en C2 se registraron anomalías negativas de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  en julio del 2004 ( $-0.12 \text{ mg m}^{-3}$ ) y para la PP en agosto del 2004 ( $-0.16 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Las anomalías positivas de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  y PP se reportaron en el mismo periodo: junio del 2010 ( $0.30 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.30 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (**Figuras 22b y 23b**).

Para T2 se registraron anomalías negativas de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  y PP en febrero del 2013 ( $-0.08 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $-0.13 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y anomalías positivas de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  en marzo del 2019 ( $0.34 \text{ mg m}^{-3}$ ), seguido de abril del 2019 que presentó la anomalía máxima de PP ( $0.27 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.56 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ).

Para P2 las anomalías negativas de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  y PP se presentaron en mayo 2012 ( $-0.09 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $-0.17 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Asimismo, anomalías positivas de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  en mayo 2019 ( $0.24 \text{ mg m}^{-3}$ ) y para la PP en marzo del 2010 ( $0.39 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ).



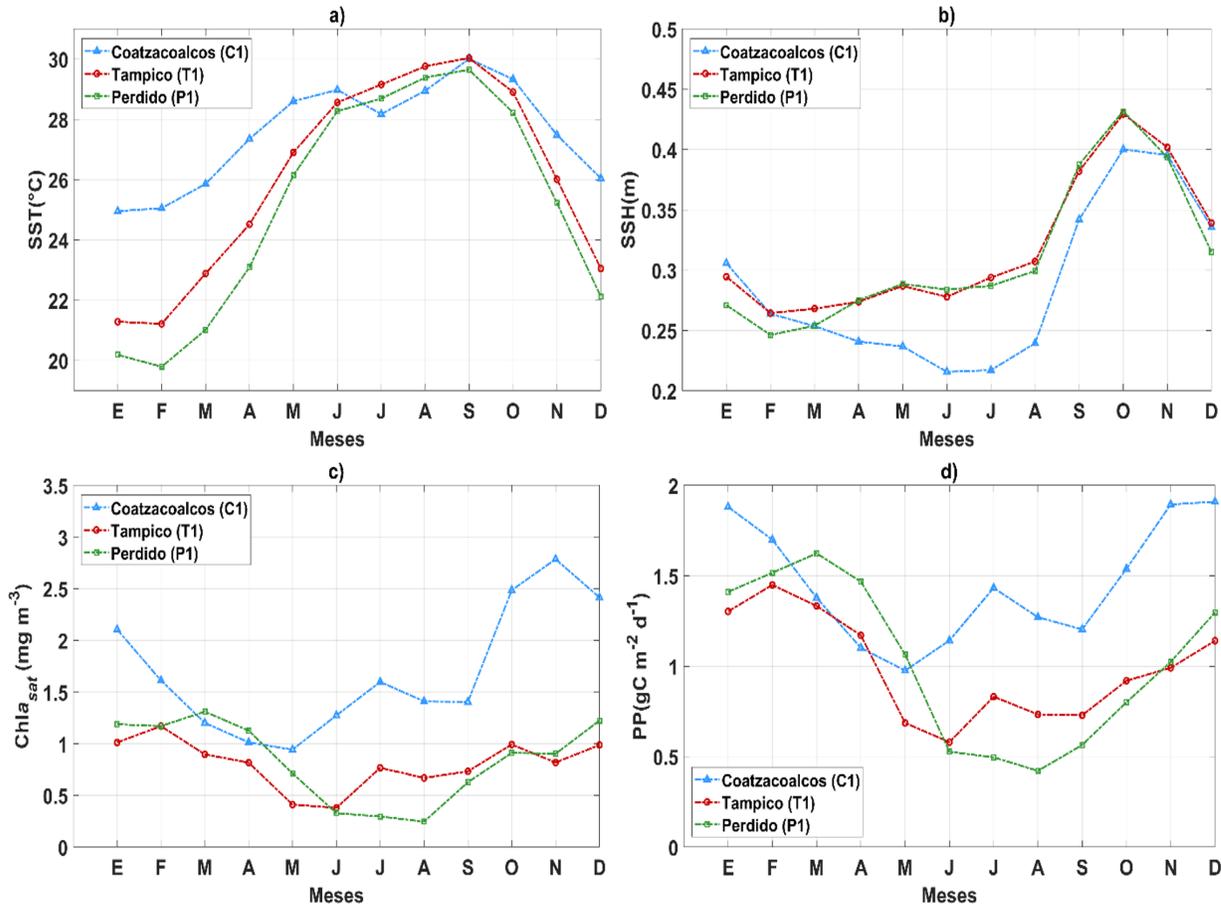
**Figura 22.** a) Series de tiempo de la  $Chla_{sat}$  para los polígonos oceánicos (profundidad > 200m), b) Anomalías de la  $Chla_{sat}$  para regiones oceánicas.



**Figura 23.** a) Series de tiempo de la PP para los polígonos oceánicos (profundidad > 200m), b) Anomalías de la PPT para regiones oceánicas.

### 3.2. Climatología mensual

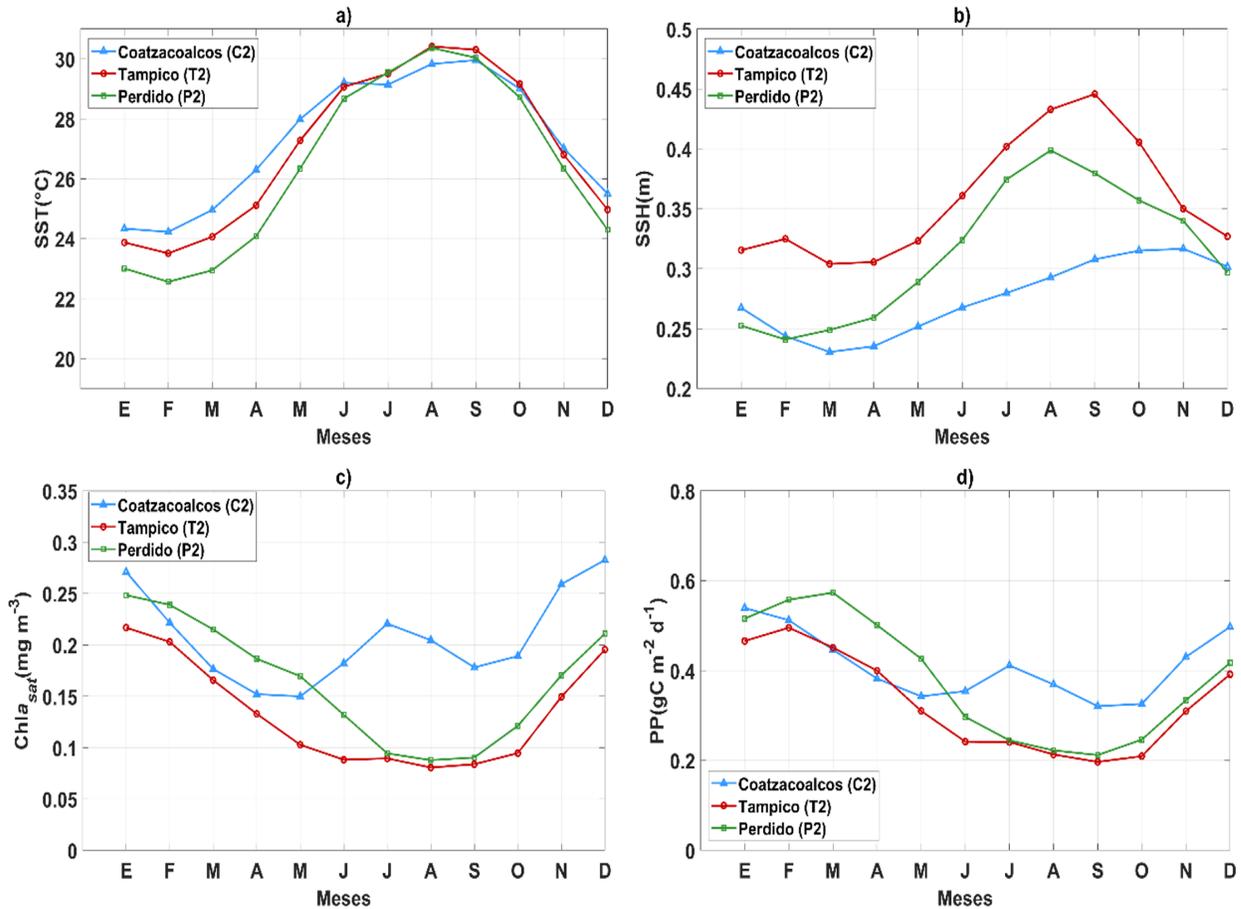
En promedio para la climatología, los valores mínimos de SST para las regiones costeras se presentaron en el mes de enero para C1 (24.9 °C) y en febrero para T1 (21.2 °C) y P1 (19.8 °C), y los valores máximos en el mes de septiembre para las tres regiones (C1 = 30.0 °C, T1 = 30.4 °C, P1 = 29.7 °C). En términos generales, Tampico y Perdido presentaron los valores mínimos de SST en febrero, pero los valores máximos tuvieron un desfase de un mes: la zona profunda reportó valores máximos en agosto y la zona costera en septiembre. Para Coatzacoalcos el desfase ocurrió diferente, el valor máximo se reportó en septiembre y para zona la costera el mínimo se presentó en el mes de enero y en la región profunda en febrero (**Figura 24a**).



**Figura 24.** Aproximación a la climatología para a) SST, b) SSH, c)  $Chl a_{sat}$  y d) PP para las regiones costeras.

Para el SSH, C1 presentó valores mínimos en junio y julio (0.22 m) y valores máximos en octubre y noviembre (0.40 m). Para T1 y P1, los mínimos se reportaron de febrero a marzo (entre los 0.25 m y 0.26 m) y el máximo promedio en octubre (0.43 m) (**Figura 24b**).

En promedio para la climatología de la  $Chl a_{sat}$  y PP, los valores mínimos para las regiones costeras se presentaron en los meses que van de mayo a agosto: para C1 el mínimo se observó en el mes de mayo ( $0.94 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.98 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), para T1 en junio ( $0.38 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.58 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y para P1 en agosto ( $0.25 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.42 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). A su vez, los máximos se registraron en los meses que van de noviembre a marzo: para C1 el máximo de  $Chl a_{sat}$  se presentó en noviembre ( $2.79 \text{ mg m}^{-3}$ ), y para la PP en diciembre ( $1.91 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) T1 en febrero ( $1.17 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $1.45 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y P1 en marzo ( $1.31 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $1.62 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (**Figura 24c, d**).



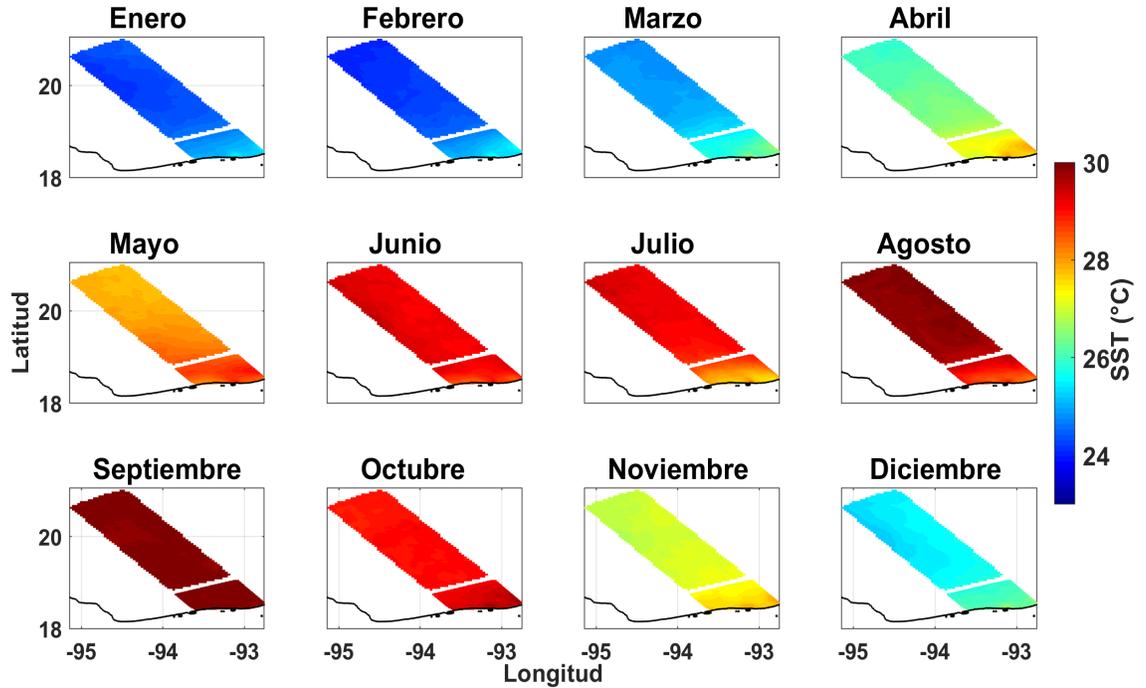
**Figura 25.** Aproximación a la climatología para la) SST, b) SSH, c) Chl<sub>a<sub>sat</sub></sub> y d) PP para las regiones oceánicas.

Para las regiones oceánicas, el valor de SST mínimo se presentó en el mes de febrero (C2 = 24.2 °C, T2 = 23.5 °C, P2 = 22.6 °C), y el valor máximo para T2 (30.4 °C) y P2 (30.3 °C) en el mes de agosto y C2 (29.9 °C) en el mes de septiembre (**Figura 25a**). En contraste, para el SSH en C2, el mínimo se presentó en marzo (0.23 m) y el máximo (igualmente que en C1) en noviembre y octubre (0.32 m). Para P2 y T2 el mínimo se reportó entre febrero y marzo (0.24 m y 0.30 m) y los máximos en agosto y septiembre (0.40 m y 0.45 m) (**Figura 25b**).

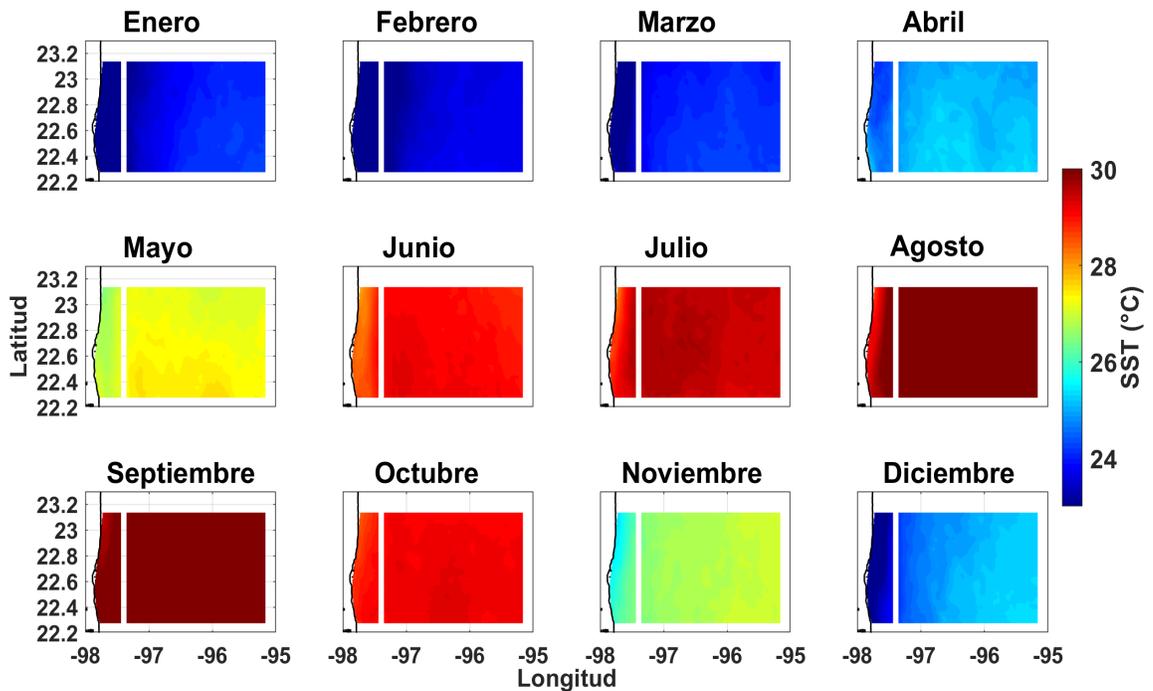
Por otro lado, los mínimos de Chl<sub>a<sub>sat</sub></sub> y PP se observaron de abril a septiembre: para C2 los mínimos de Chl<sub>a<sub>sat</sub></sub> se reportaron en abril y mayo (0.15 mg m<sup>-3</sup>) y para la PP en septiembre y octubre (0.32 gC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); para T2, la Chl<sub>a<sub>sat</sub></sub> y PP presentaron los mínimos en los mismos meses: agosto y septiembre (0.08 mg m<sup>-3</sup>, 0.20 gC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) y; para P2, los mínimos de Chl<sub>a<sub>sat</sub></sub> y PP se reportaron de julio a septiembre (0.09 mg

$\text{m}^{-3}$ ,  $0.21 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Por su parte, los máximos se observaron en el intervalo de diciembre a marzo: para C2 el máximo se reportó en enero y diciembre ( $0.28 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.54 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ); para T2 en enero y febrero ( $0.20 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.50 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y; para P2 el máximo de  $\text{Chl}a_{\text{sat}}$  en enero ( $0.25 \text{ mg m}^{-3}$ ) y el máximo de PP se observó en marzo ( $0.57 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (**Figura 25c, d**).

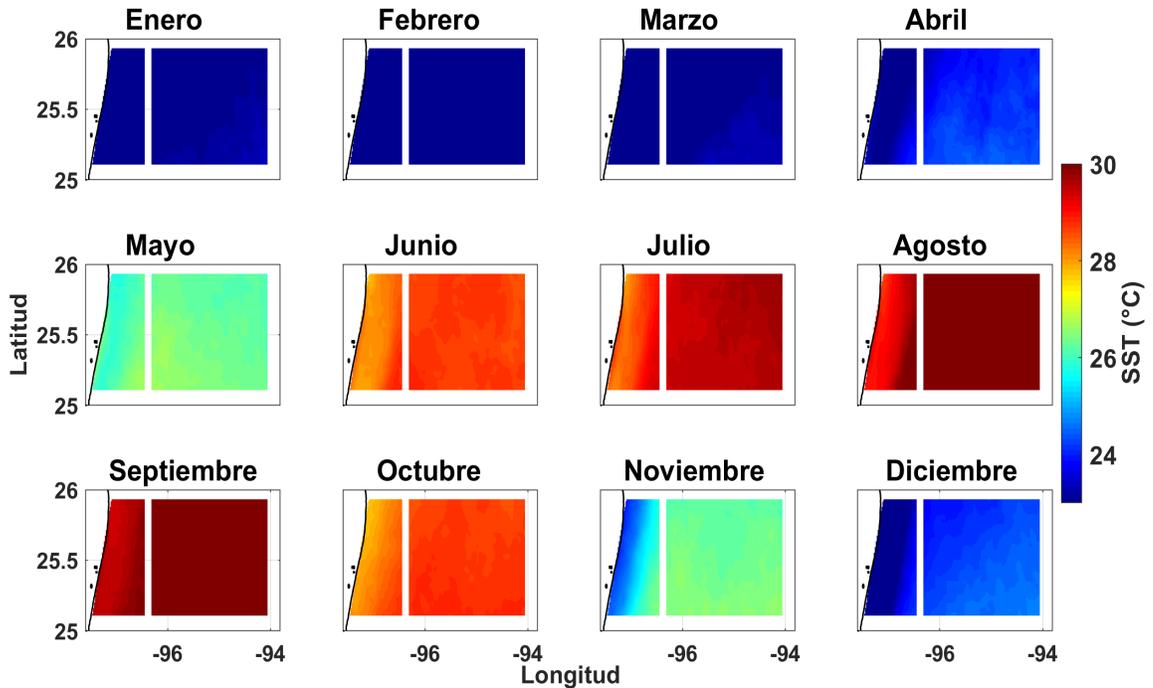
La climatología de la SST mostró un patrón estacional (**Figuras 26, 27 y 28**). En la región costera C1 el mínimo de  $24.6 \text{ }^\circ\text{C}$  se reportó en febrero y enero ( $\sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). En septiembre se observó la mayor temperatura de toda la región ( $30.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Para la zona de Tampico, en T1 en el valor mínimo se reportó en el mes de enero ( $19.87 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y el máximo se presentó en agosto ( $30.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Para la zona de Perdido en P1 el mínimo se reportó en enero ( $17.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y los valores máximos se reportaron en agosto ( $30.2^\circ\text{C}$ ) seguido de cerca septiembre ( $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Para las regiones oceánicas, en C2 el mínimo se reportó en febrero ( $23.9^\circ\text{C}$ ) consecuentemente de enero y marzo ( $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Por otro lado, el máximo ( $30.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) se observó en diciembre y agosto ( $30.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Para T2 el mínimo se observó en febrero ( $22.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ), enero y el máximo en agosto ( $30.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Para P2, los mínimos se reportaron en febrero y marzo ( $21.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y el máximo se registró en agosto ( $30.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



**Figura 26.** Climatología de las medias mensuales de la SST (°C) en la región de Coatzacoalcos. Promediadas del Aqua-MODIS SST mensual (julio de 2002 a marzo de 2020).



**Figura 27.** Climatología de las medias mensuales de la SST (°C) en la región de Tampico. Promediadas del Aqua-MODIS SST mensual (julio de 2002 a marzo de 2020).

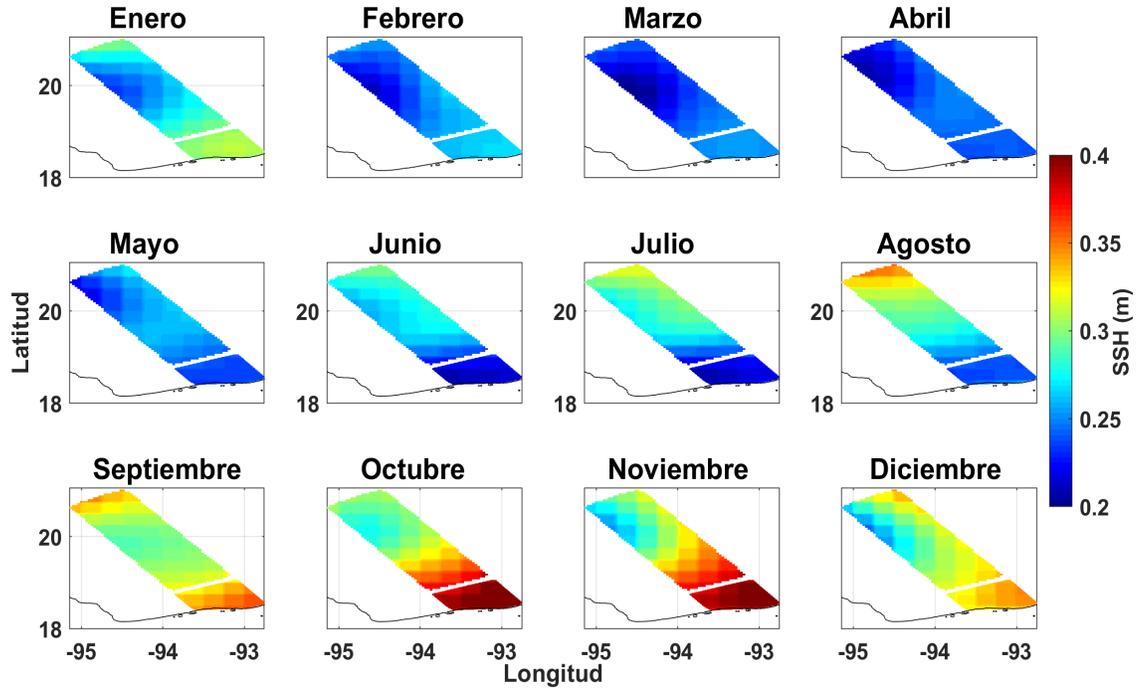


**Figura 28.** Climatología de las medias mensuales de la SST (°C) en la región de Perdido. Promediadas del Aqua-MODIS SST mensual (julio de 2002 a marzo de 2020).

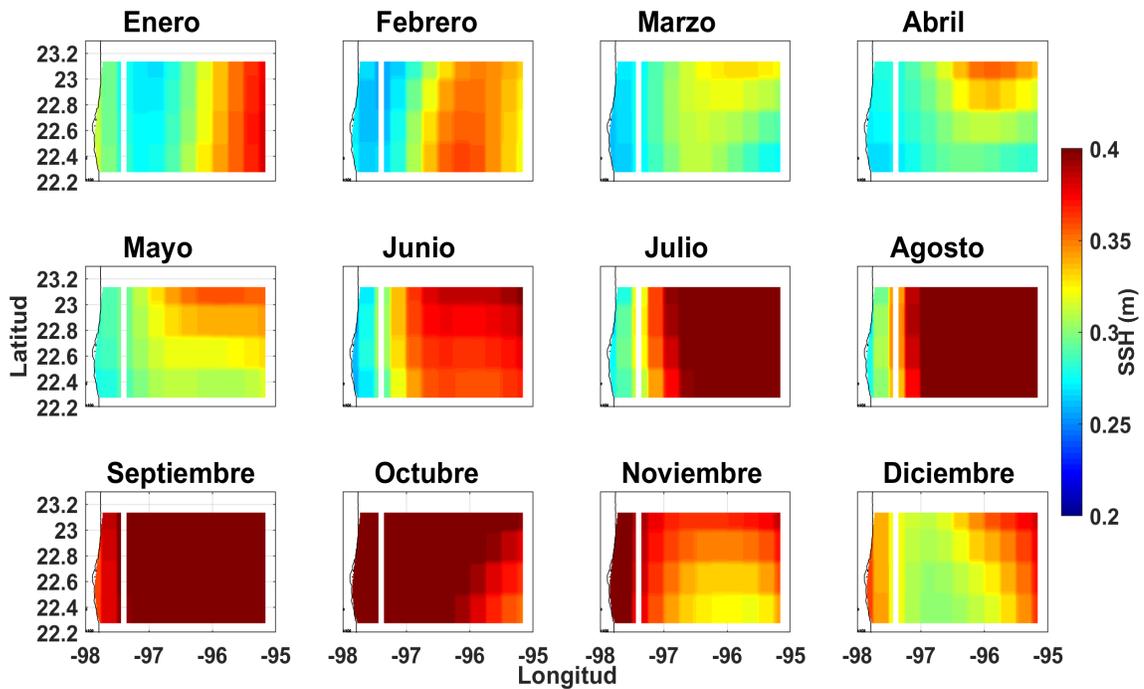
La climatología del SSH, en general, reportó un patrón estacional: los valores mínimos se presentaron en los meses de diciembre a junio y los máximos de julio a noviembre, con variaciones específicas en la sección cercana a la costa (**Figuras 29, 30 y 31**). En particular, para la zona costera C1 el mínimo (0.20 m) se reportó en julio y junio (0.21 m) y el máximo en octubre (0.43 m) y noviembre (0.41 m).

El valor mínimo para la región de T1 se observó en junio, febrero, marzo y julio (0.26 m) y el máximo en octubre (0.44 m). Para la región P1, el mínimo (0.22 m) se presentó en febrero y el máximo en octubre (0.46 m).

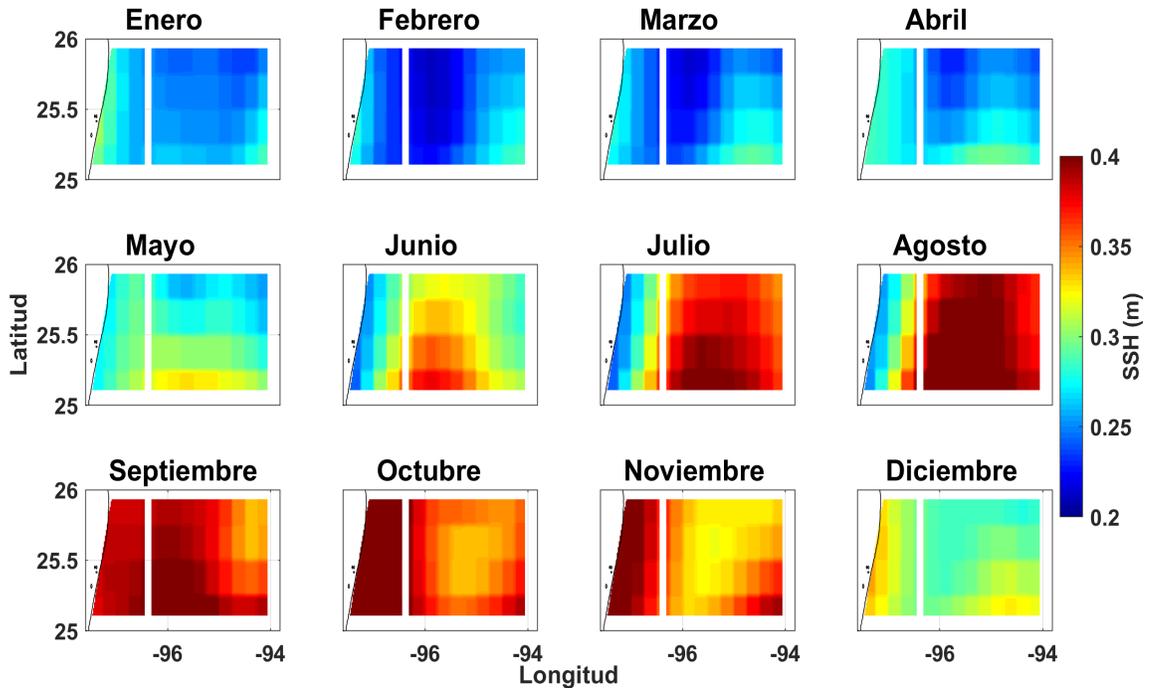
Por otra parte, para la región oceánica, en C2 el menor se observó en marzo (0.20 m). Para T2, el valor mínimo se presentó en febrero (0.26 m) y los máximos reportados se observaron en septiembre (0.48 m) y agosto (0.46 m). Para P2, los valores mínimos se reportaron en febrero y marzo (0.21 m) y el máximo en agosto (0.45 m).



**Figura 29.** Climatología de las medias mensuales del SSH (m) en la región de Coahuila de Zaragoza. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020).



**Figura 30.** Climatología de las medias mensuales del SSH (m) en la región de Tamaulipas. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020).



**Figura 31.** Climatología de las medias mensuales del SSH (m) en la región de Perdido. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020).

La  $Chl_{a_{sat}}$  y la PP presentaron diferencias estadísticas significativas entre las seis regiones de estudio en los doce meses del año, excepto para las combinaciones C1 - T1, C2 - P2, P1 - T1 y P2 - T2, donde las concentraciones y las tasas de PP fueron iguales estadísticamente en los doce meses del año (**Anexo 1D**). También, al obtener las diferencias entre meses para cada región de la  $Chl_{a_{sat}}$  y la PP, los pares de meses de agosto-diciembre, agosto-enero, junio-diciembre y junio-enero presentaron diferencias en las seis regiones de estudio. Por el contrario, el patrón de meses noviembre-diciembre, enero-diciembre, enero-febrero, febrero-marzo, abril marzo, junio-agosto y julio-agosto no presentaron diferencias en las seis regiones de estudio (**Anexo 1E**).

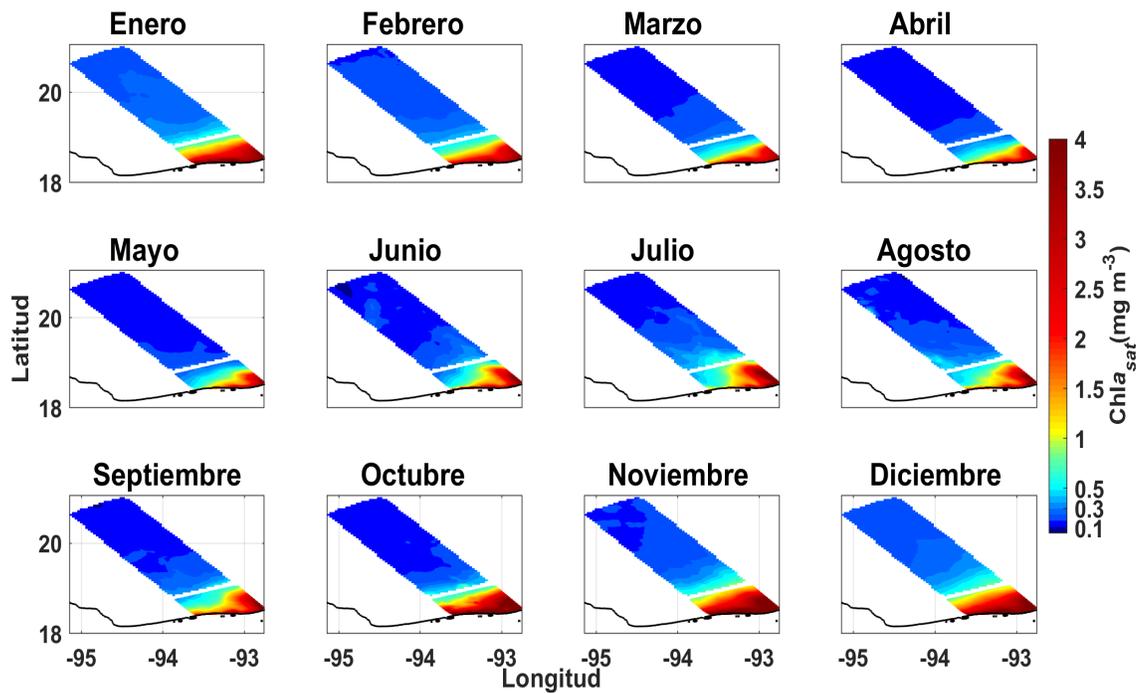
De manera general, en la zona costera de C1 se observó desprendimiento de lenguetas de altas concentraciones de  $Chl_{a_{sat}}$  de la parte oeste y que se va disipando a lo largo de la región de aguas oceánicas en dirección este, reportando valores mínimos entre los  $0.20$  y  $0.30 \text{ mg m}^{-3}$  de abril a junio y máximos en agosto y octubre de hasta  $\sim 8.10 \text{ mg m}^{-3}$ . Para C2, se presentaron valores promedio entre  $0.10$  y  $0.30 \text{ mg m}^{-3}$ , mínimos ( $0.10 \text{ mg m}^{-3}$ ) en los meses de junio, septiembre y agosto, y máximos de  $1 \text{ mg m}^{-3}$  en noviembre disminuyendo la concentración por debajo de  $0.90 \text{ mg m}^{-3}$

entre los meses que lo encapsulan (octubre y diciembre) (**Figura 32**). Para la PP, en la zona costera los valores mínimos fueron de los  $0.40 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  a los  $0.90 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , siendo mayo el mes de menor tasa de PP ( $0.44 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). También presentó concentraciones mayores al  $1.00 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en toda la región de estudio de noviembre a febrero con tasas entre los  $3.10 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Para C2, el mínimo presentó un intervalo menor de tasa de productividad respecto a región costera ( $0.20 - 0.40 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), el mínimo se presentó en el mes de septiembre ( $0.23 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y el máximo en diciembre ( $1.19 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (**Figura 35**).

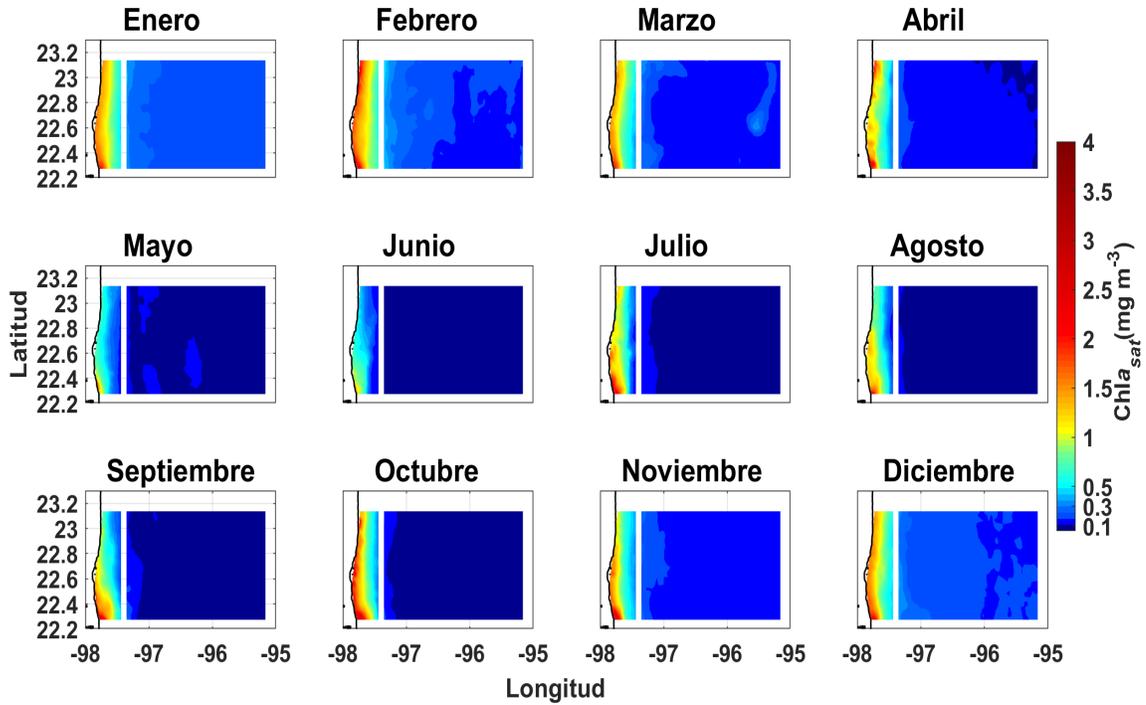
Para Tampico, T1 presentó valores de  $\text{Chl}a_{\text{sat}}$  esencialmente entre los  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$  hasta los  $3 \text{ mg m}^{-3}$ , observando los valores mínimos de mayo a agosto, específicamente en junio de  $0.11 \text{ mg m}^{-3}$ , mayo y agosto ( $0.13 \text{ mg m}^{-3}$ ) donde en el límite de los 200 m de profundidad llegaron a registrar valores menores a los  $0.2 \text{ mg m}^{-3}$ . Por el contrario, de septiembre a marzo las concentraciones fueron superiores a los  $0.5 \text{ mg m}^{-3}$  y menores a los  $3.5 \text{ mg m}^{-3}$ , en septiembre ( $3.32 \text{ mg m}^{-3}$ ), octubre y noviembre ( $3.20 \text{ mg m}^{-3}$ ). Para T2, se observaron valores de  $\text{Chl}a_{\text{sat}}$  principalmente entre los  $0.08$  y  $0.3 \text{ mg m}^{-3}$ , reportando las menores concentraciones de mayo a octubre, con mayor depresión de junio a septiembre de  $0.07 \text{ mg m}^{-3}$  y las más altas de noviembre a abril, específicamente en febrero ( $0.48 \text{ mg m}^{-3}$ ) y, de enero a diciembre ( $0.38 \text{ mg m}^{-3}$ ) (**Figura 33**). Para la PP, en T1 los valores mínimos se presentaron de junio a septiembre ( $0.29 - 0.39 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y los máximos entre octubre y abril ( $1.80 - 2.06 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Para T2, de manera casi idéntica, los mínimos se observaron en el periodo julio- octubre ( $0.18 - 0.20 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y los máximos en enero-abril ( $0.76 - 1.06 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (**Figura 36**).

Muy parecido a T1, en P1 se visualizó un decremento menor al  $1 \text{ mg m}^{-3}$  de junio a septiembre, específicamente en agosto y junio ( $0.10 \text{ mg m}^{-3}$ ), también en septiembre y julio ( $0.11 \text{ mg m}^{-3}$ ). En los meses de octubre, febrero y marzo se registraron valores superiores a los  $4.00 \text{ mg m}^{-3}$  muy cerca de la costa, y en general, en el periodo diciembre- abril es cuando la franja de  $\text{Chl}a_{\text{sat}}$  se ensancha, registrando valores superiores a los  $0.50 \text{ mg m}^{-3}$  hasta los  $4.00 \text{ mg m}^{-3}$  disminuyendo de grosor a partir del mes de mayo. Para P2, los mínimos se registraron a los  $0.10 \text{ mg m}^{-3}$ , desde pequeños manchones en mayo junio y octubre, hasta abarcar toda la caja de estudio de julio a septiembre, de  $0.07 \text{ mg m}^{-3}$  para septiembre y  $0.08 \text{ mg m}^{-3}$  en agosto, julio y junio.

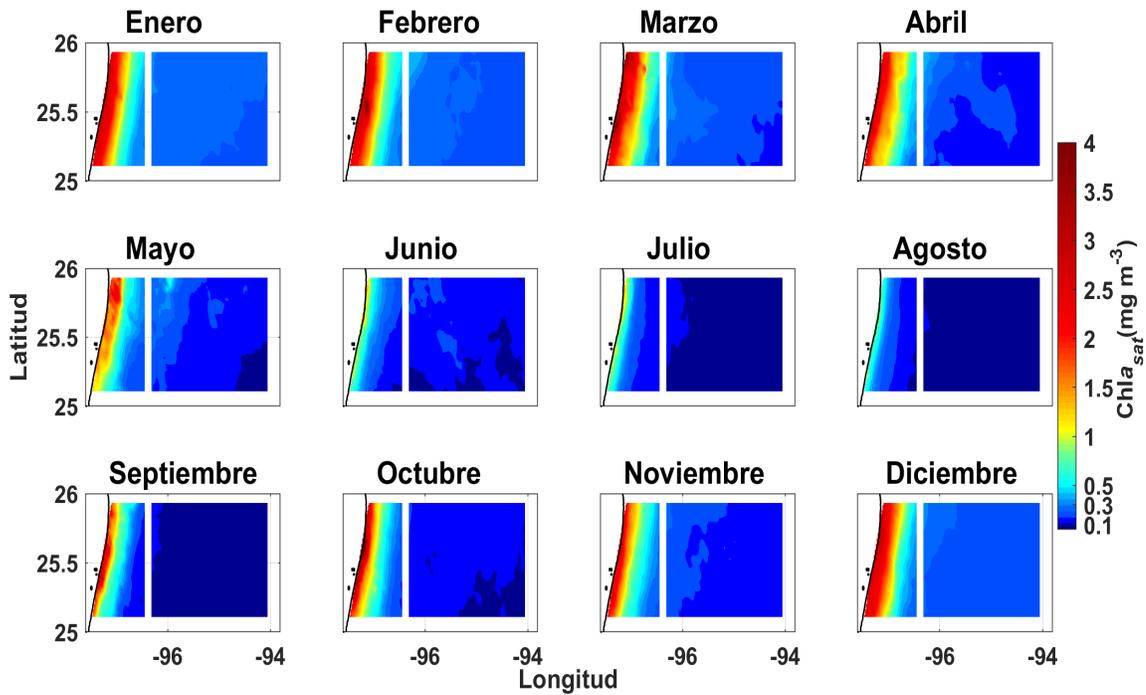
Los valores superiores a los  $0.30 \text{ mg m}^{-3}$  se registraron principalmente de diciembre a marzo, en este último mes de casi  $0.90 \text{ mg m}^{-3}$  (**Figura 34**). Para la PP, en P1 se observaron en el periodo julio-octubre ( $0.24\text{-}0.29 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y los máximos en diciembre - abril ( $2.16 - 2.98 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), específicamente en febrero ( $2.55 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y marzo ( $2.98 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Por otra parte, los mínimos en P2 se observaron en el periodo junio-octubre ( $0.19 - 0.22 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y los máximos de febrero mayo ( $0.83 - 1.06 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (**Figura 37**).



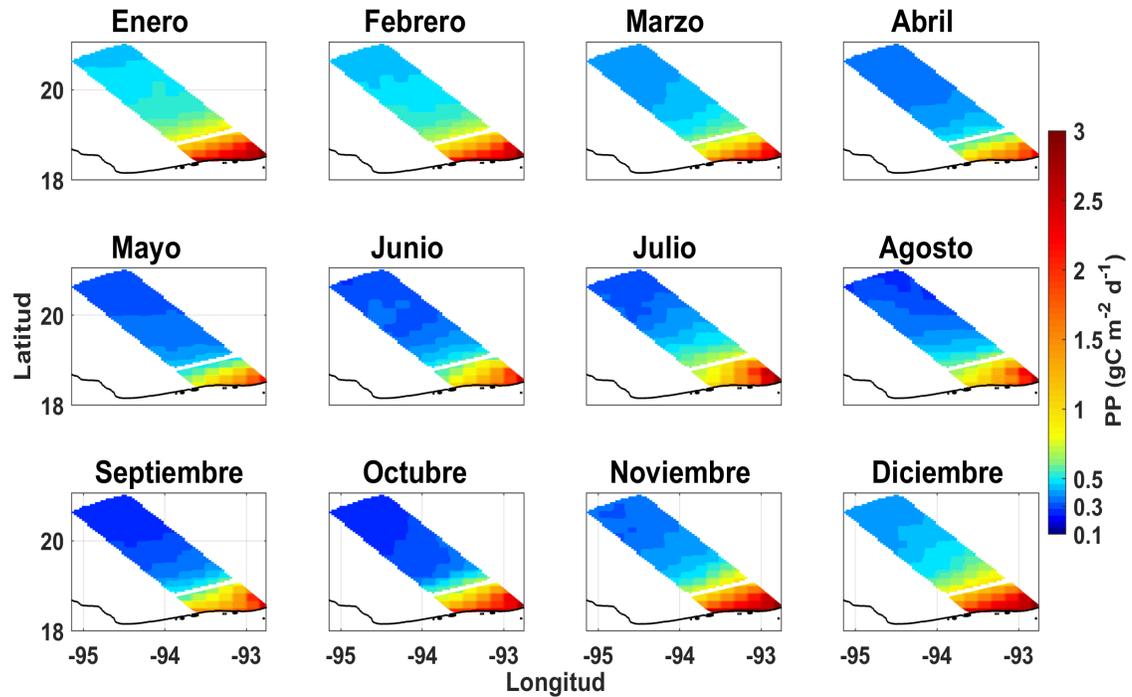
**Figura 32.** Climatología de las medias mensuales de la  $\text{Chla}_{\text{sat}}$  ( $\text{mg m}^{-3}$ ) en la región de Coatzacoalcos. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020).



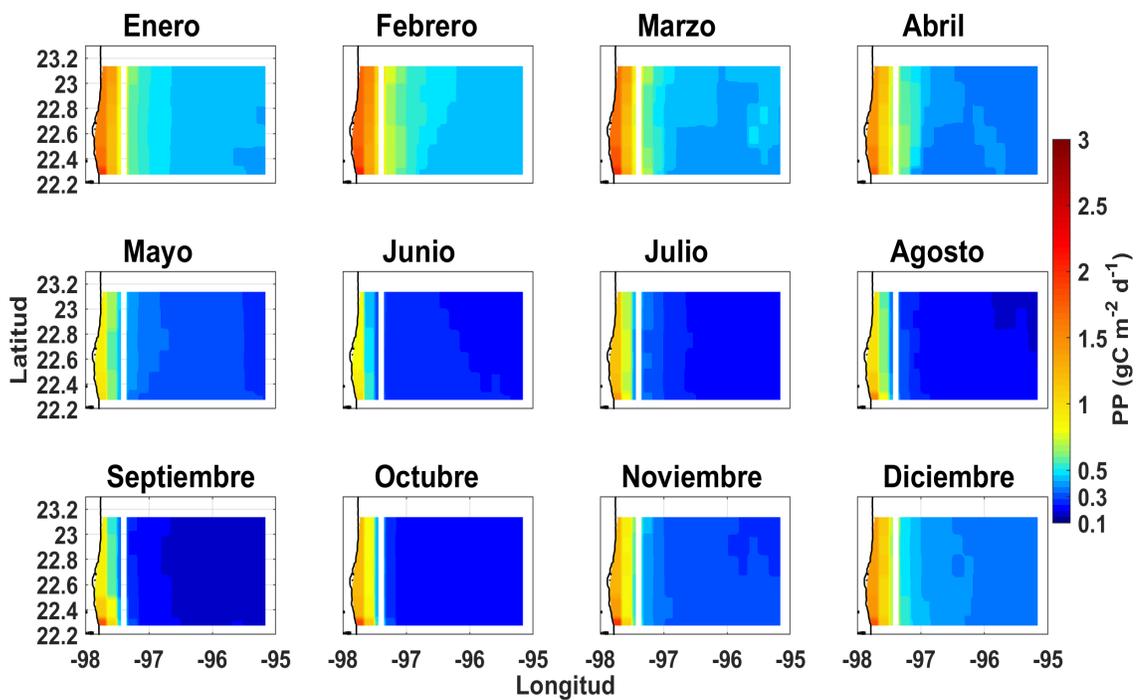
**Figura 33.** Climatología de las medias mensuales de la  $Chl a_{sat}$  ( $\text{mg m}^{-3}$ ) en la región de Tampico. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020).



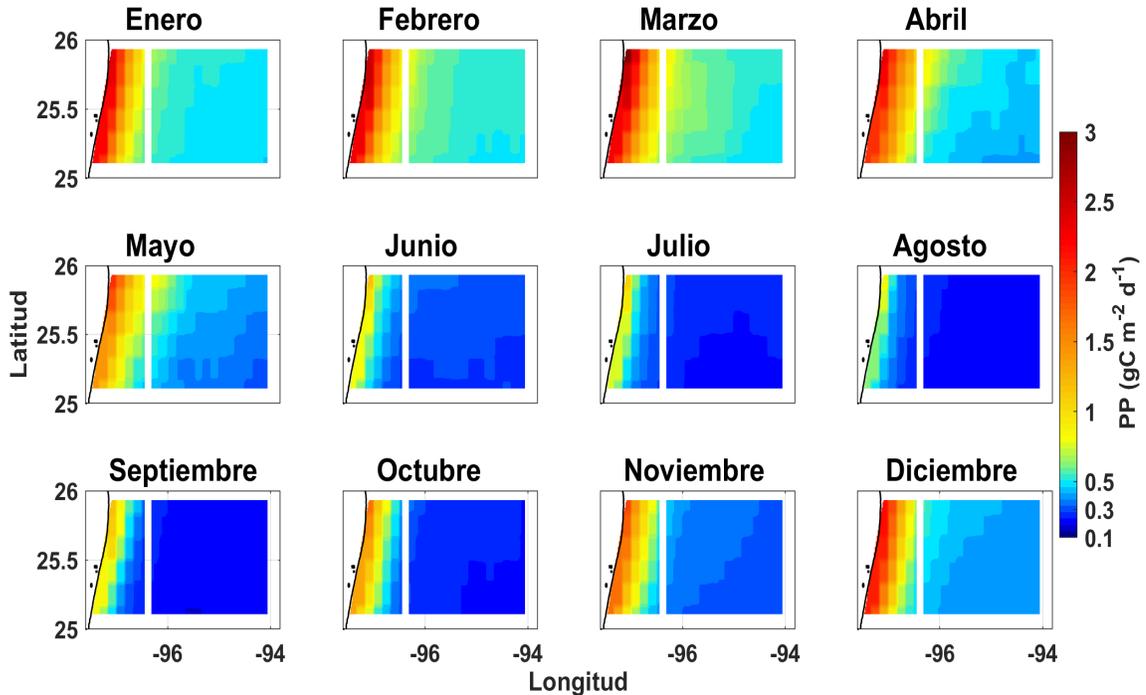
**Figura 34.** Climatología de las medias mensuales de la  $Chl a_{sat}$  ( $\text{mg m}^{-3}$ ) en la región de Perdido. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020).



**Figura 35.** Climatología de las medias mensuales de la PP ( $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) en la región de Coatzacoalcos. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020).



**Figura 36.** Climatología de las medias mensuales de la PP ( $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) en la región de Tampico. Promediadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020).

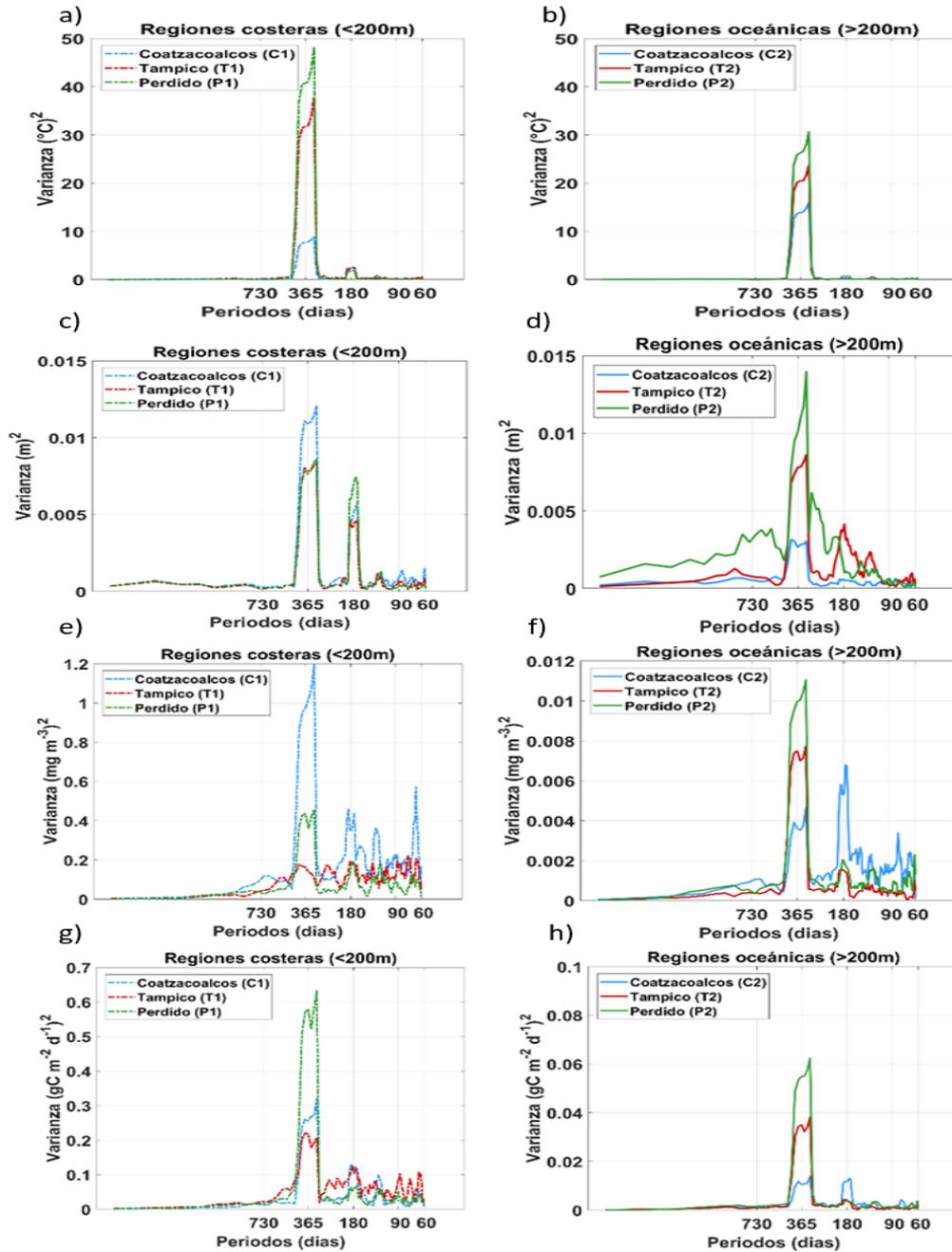


**Figura 37.** Climatología de las medias mensuales de la PP ( $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) en la región de Perdido. Prome-diadas mensuales (julio de 2002 a marzo de 2020).

### 3.3. Análisis espectral

El análisis espectral de las series temporales mostró resultados similares para la zona costera y oceánica (**Figura 38**). Los resultados mostraron una señal anual muy marcada, la cual contiene la mayor parte de la variabilidad. Asimismo, se detectaron señales intra-anales semestrales y en algunos casos señales menores a las bimestrales especialmente para la  $\text{Chl}_{\text{sat}}$ , el SSH oceánico, y la PP.

Las regiones costeras presentaron mayores magnitudes en las señales del espectro respecto a las regiones oceánicas de las 4 variables estudiadas. Particularmente en P1 se presentó el mayor contenido energético de las variables SST y PP y, en la región C1 los picos mayores de las variables del SSH y la  $\text{Chl}_{\text{sat}}$ . Para las regiones oceánicas, las 4 variables reportaron el espectro de varianza conservada más amplio en la región P2 seguido de T1 y por último de C1.



**Figura 38.** Densidad espectral de las series de tiempo de SST (°C), SSH (m), Chl<sub>a</sub><sub>sat</sub> (mg m<sup>-3</sup>) y PP (g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). Nota: las escalas de densidad espectral en las zonas costeras y oceánicas de la Chl<sub>a</sub><sub>sat</sub> y PP son diferentes.

### 3.4. Análisis estadísticos

#### 3.4.1. Correlación cruzada

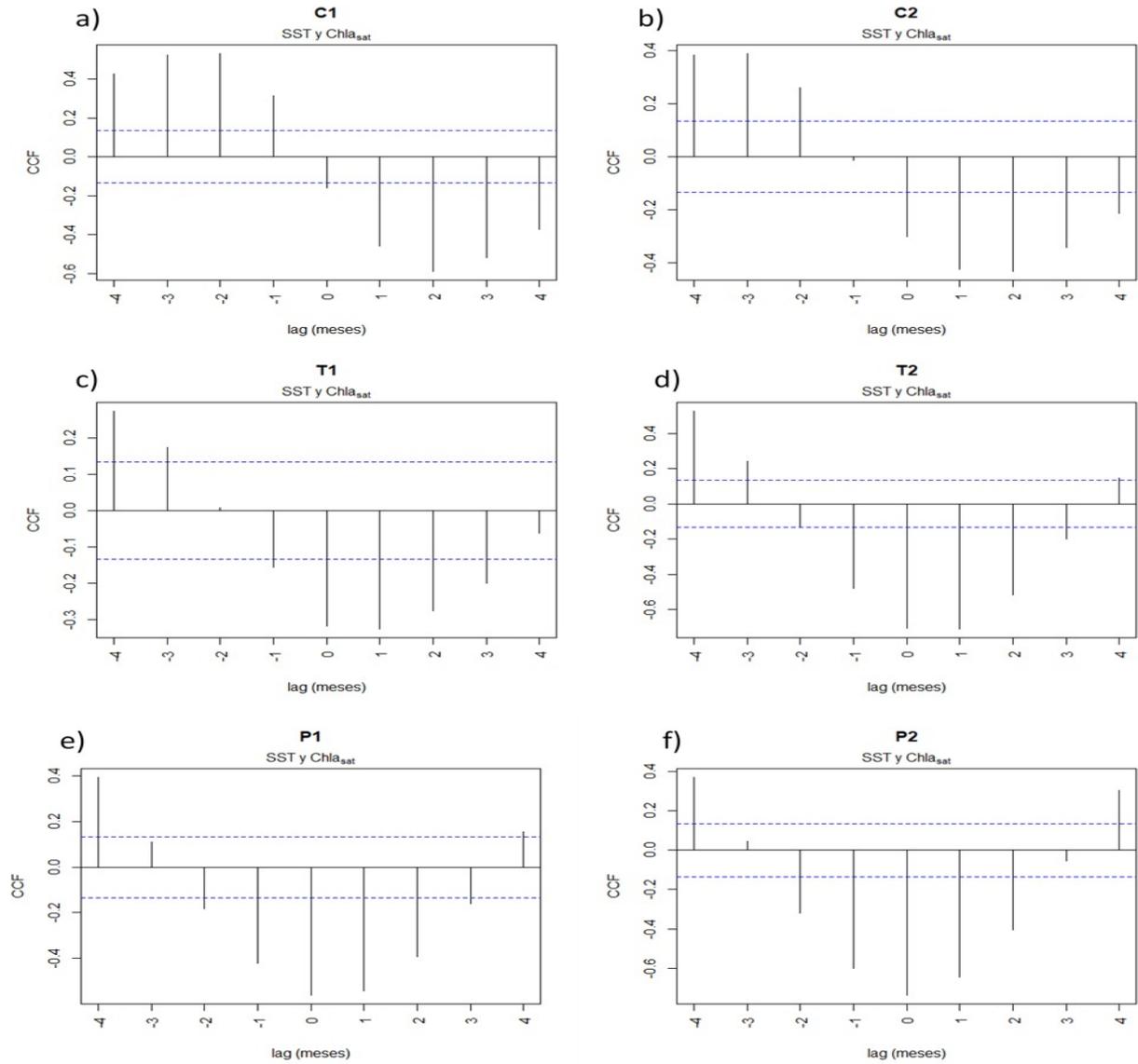
La correlación entre la  $Chl\alpha_{sat}$  y la SST en las seis regiones de estudio, de manera general, presentaron valores negativos con desfases positivos o sin desfase, indicando el aumento de  $Chl\alpha_{sat}$  después o al mismo tiempo que el decremento de la SST (**Figura 39**). Específicamente para cada región, en C1 se mostró la mayor correlación negativa (-0.6) con desfases positivos 2 y 3 meses, indicando un aumento de  $Chl\alpha_{sat}$  dos y tres meses después del decremento de la SST. Igualmente, para C2 se presentó el mismo patrón que en C1, pero en los desfases de 1 y 2 meses y una correlación menor (-0.4). Para T1 y T2 la mayor correlación negativa se presentó en el desfase de 1 y 0 meses de -0.7 y -0.6 respectivamente. Para P1 y P2 las correlaciones predominantes fueron negativas (0.6 y -0.7) sin desfase.

Las correlaciones entre la SST y la PP fueron negativas en todas las regiones (**Figura 40**). Para la caja C1 fue la única región en la que se observó un desfase positivo de un mes de -0.7, por lo que el aumento de la tasa de PP se presentó un mes después de la disminución de la SST. En las demás regiones, las correlaciones fueron negativas y sin desfase, esto es que, las señales fueron simultáneas y, por lo tanto, el incremento de la PP ocurrió al mismo tiempo que el decremento de la SST: para C2 la correlación fue de -0.7, para T1 de -0.6, para T2 de -0.8, para P1 de -0.8 y para P2 de -0.9.

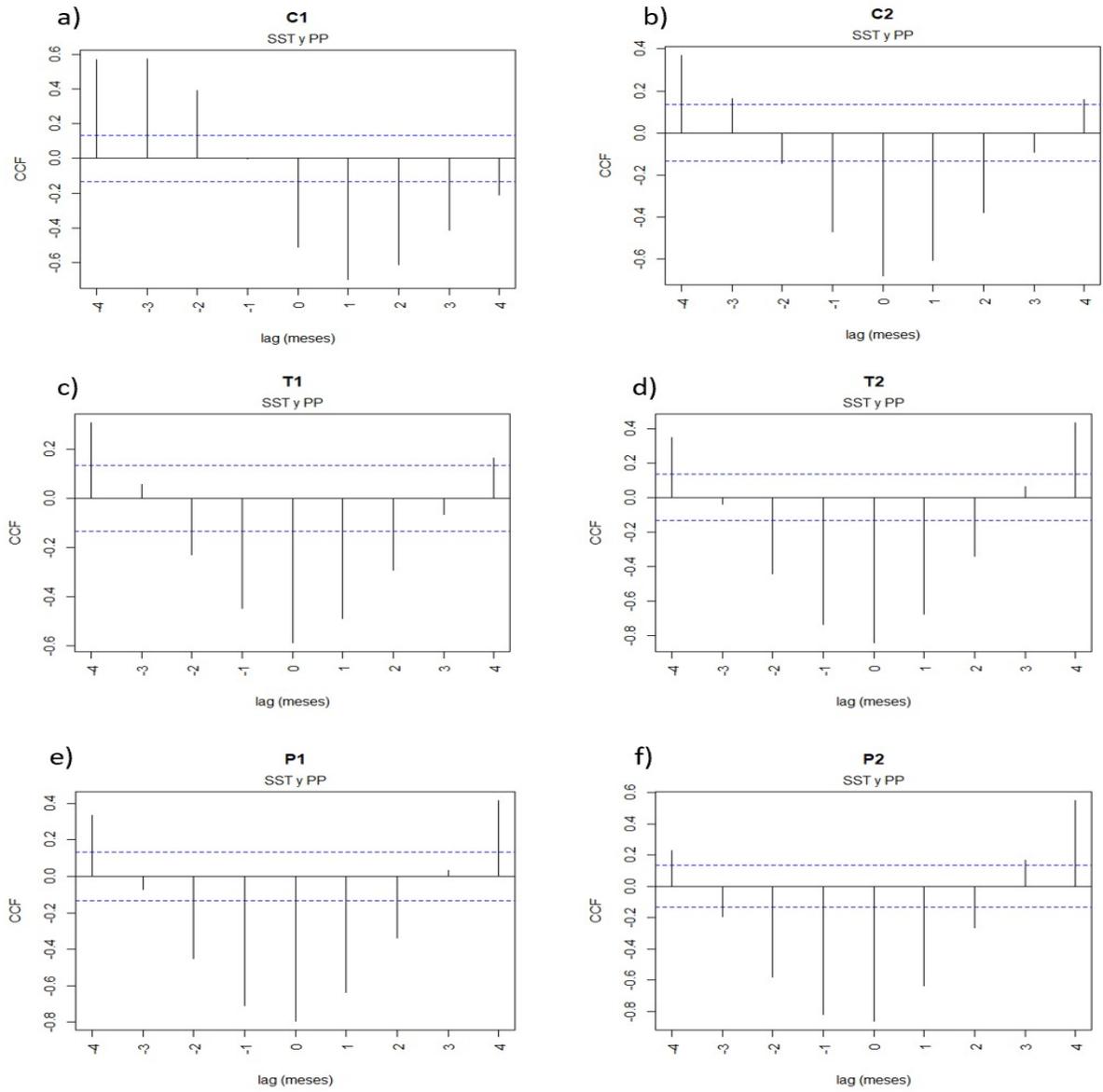
La relación SSH-  $Chl\alpha_{sat}$  presentó un comportamiento aleatorio (**Figura 41**). En la región C1, se presentó una correlación positiva (0.5) sin desfase (el aumento de SSH y  $Chl\alpha_{sat}$  sucedió simultáneamente), para C2 la mayor correlación fue negativa (-0.3) con un desfase de tres meses. Para T1 la correlación negativa de -0.2 con un desfase de cuatro meses. Para T2 la correlación fue positiva (0.5) con un desfase de -4 indicando un aumento de la concentración de  $Chl\alpha_{sat}$  cuatro meses antes del incremento del SSH, este patrón sucedió igualmente en P1, pero con una correlación menor (0.4). Por último, la región P2 presentó una correlación negativa (-0.5) sin desfase lo que implica que la concentración de  $Chl\alpha_{sat}$  aumentó al mismo tiempo que el descenso del SSH.

La relación entre el SSH y la PP de C1 indicó una correlación positiva (0.5) con un desfase de -1 mes (aumento de la tasa de PP un mes antes del incremento del SSH).

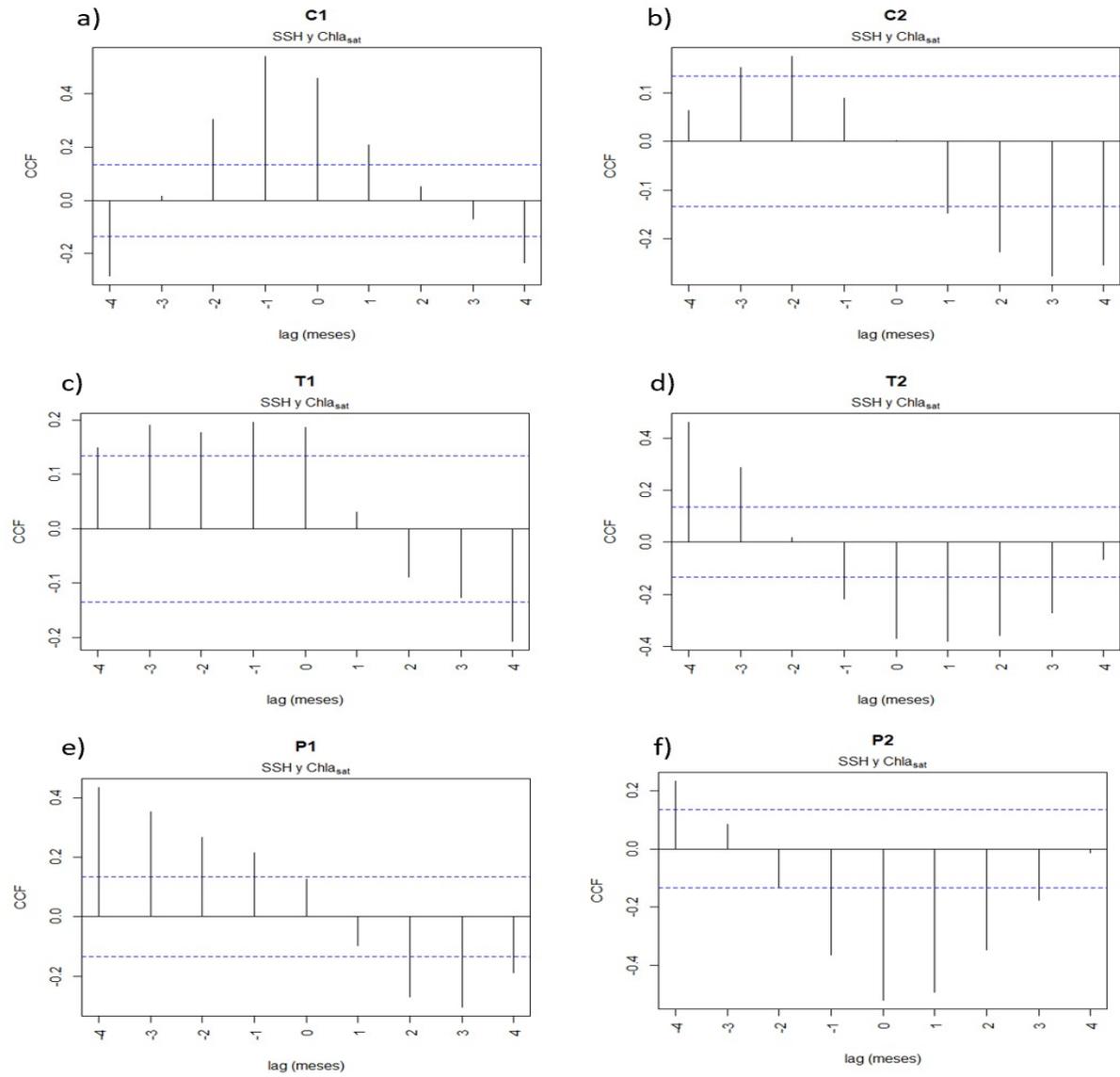
Para C2 la mayor correlación fue negativa (-0.4) con desfase de 2 meses, por lo que la tasa de PP aumento dos meses después del decremento del SSH. Para T1 la correlación fue positiva (0.4) con desfase de -3 meses, indicando un aumento de la tasa de PP tres meses antes del incremento del SSH. Para T2 la mayor correlación fue negativa (-0.5) sin desfase por que le aumento de la tasa de PP se presentó al mismo tiempo que el incremento del SSH. Para P1 la mayor correlación fue positiva (0.5) con desfase de -4 meses, y para esta región el incremento de la tasa de PP 4 meses antes del incremento del SSH. La región P2 presentó un patrón similar a T2, pero con una correlación mayor (-0.6) (**Figura 42**). En el **Anexo 2** se encuentran los coeficientes de correlación y su pvalue.



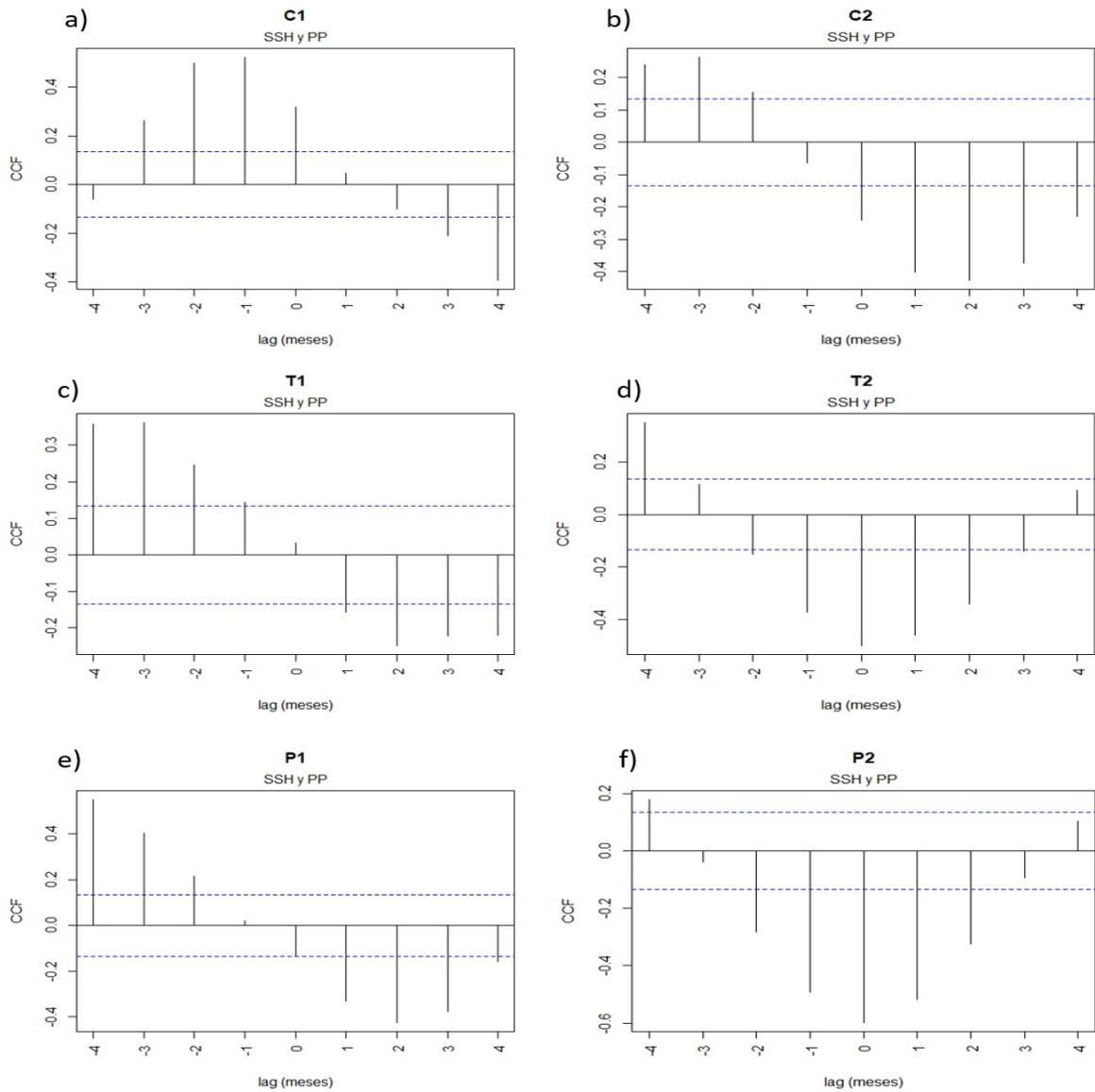
**Figura 39.** Correlación cruzada de la variable SST y la Chla<sub>sat</sub> en las seis regiones de estudio. Las líneas punteadas de color azul indicar el intervalo de confianza al 95%.



**Figura 40.** Correlación cruzada de la variable SST y la PP en las seis regiones de estudio. Las líneas punteadas de color azul indicar el intervalo de confianza al 95%.



**Figura 41.** Correlación cruzada de la variable SSH y la Chla<sub>sat</sub> en las seis regiones de estudio. Las líneas punteadas de color azul indicar el intervalo de confianza al 95%.



**Figura 42.** Correlación cruzada de la variable SSH y la PP en las seis regiones de estudio. Las líneas punteadas de color azul indicar el intervalo de confianza al 95%.

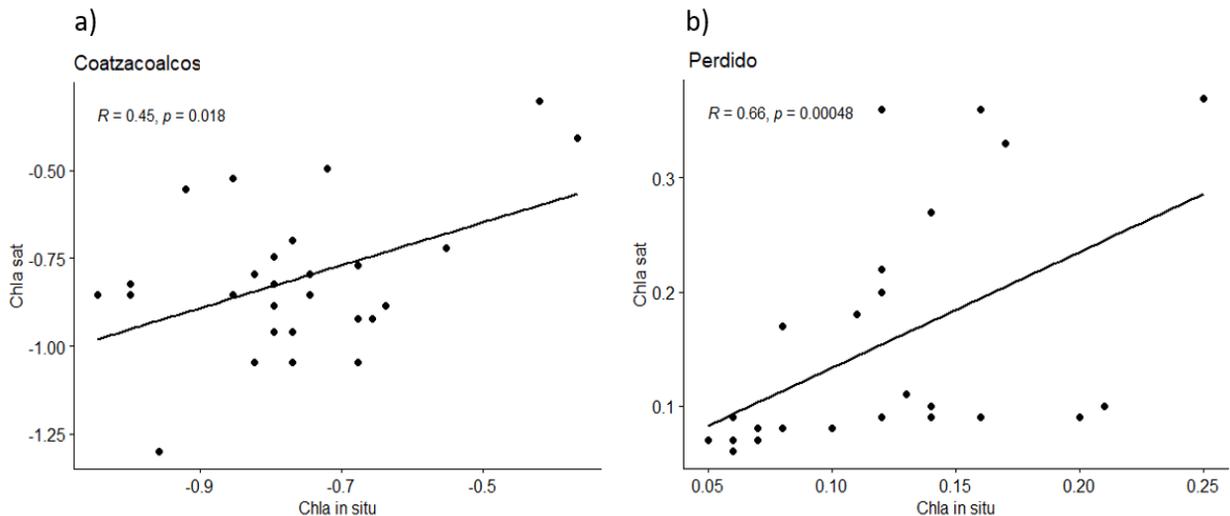
### 3.4.2. Comparación de datos *in situ* vs satelitales

Las correlaciones lineales de datos *in situ* y satelitales para la región de Coatzacoalcos y Perdido mostraron ser significativas para la clorofila y no significativas para la productividad primaria.

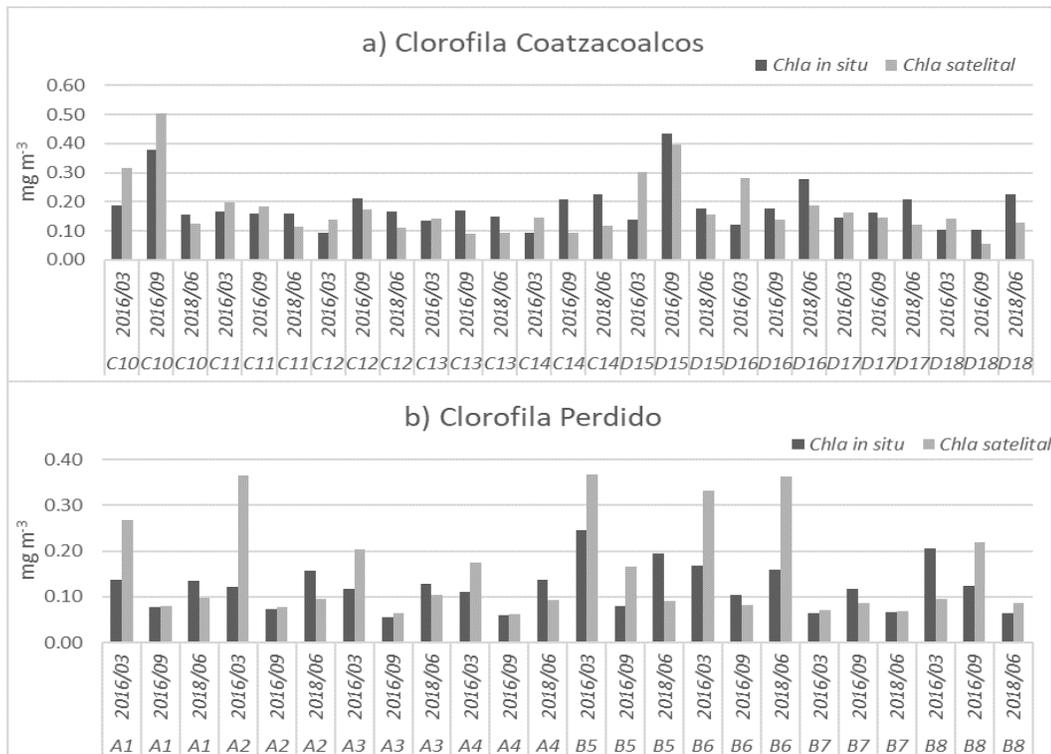
Para la región de Coatzacoalcos se observó una correlación de Pearson de 0.45 ( $p = 0.018$ ) para la clorofila (**Figura 43a**) aunque al comparar las concentraciones (obtenidas mediante los dos métodos por estación y fecha) no es claro la sobrestimación o

subestimación de la clorofila satelital (**Figura 44a**). Para esta misma región, la correlación de la tasa de productividad no mostro ser significativa ( $p = 0.082$ ) y, al comparar las tasas de productividad por estación y fecha (**Figura 45a**), los valores se agruparon por debajo de  $1.00 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  mediante ambos métodos, excepto en la medición *in situ* de la estación C10 en septiembre del 2016 ( $\sim 5.49 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ).

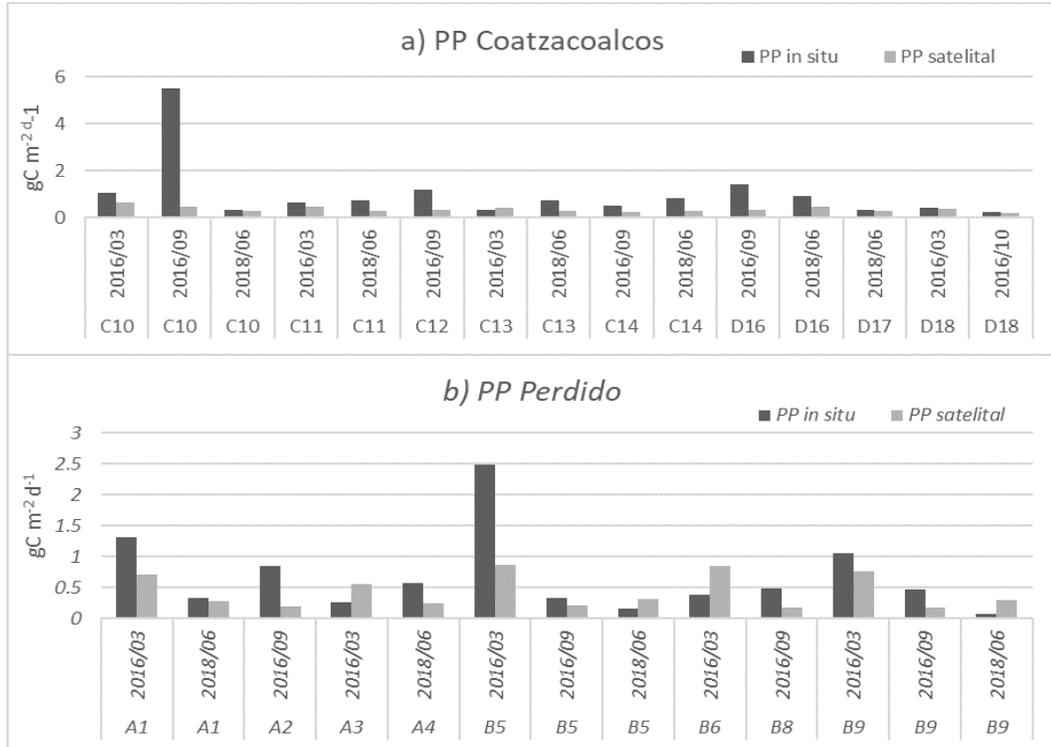
Para Perdido, la clorofila presentó una correlación de Spearman de 0.66 ( $p < 0.001$ ) (Figura 40b) y mediante las comparaciones por estación-fecha se observó que la concentración de clorofila derivada vía satelital en gran parte sobreestima el valor de la clorofila *in situ* (**Figura 44b**). Asimismo, la correlación de la tasa de productividad no fue significativa ( $p = 0.5$ ) y la comparación por estación y fecha, al contario de la clorofila, subestima los valores de la PP *in situ* (**Figura 45b**).



**Figura 43.** Correlación de la clorofila en la región de a) Coatzacoalcos y b) Perdido.



**Figura 44.** Comparación de las concentraciones de clorofila de datos *in situ* y satelitales (MODIS-Aqua) en a) Coatzacoalcos y b) Perdido.



**Figura 45.** Comparación de las concentraciones de productividad primaria de datos *in situ* y satelitales (VGPM de datos MODIS-Aqua) en a) Coatzacoalcos y b) Perdido.

## Capítulo 4. Discusión

---

En este capítulo se discutirán los resultados sobre la variabilidad espacio-temporal de la concentración de la  $Chl\alpha_{sat}$  y las tasas de PP y su relación con la SST y el SSH en regiones predeterminadas del GoM, obtenidas de observaciones a largo plazo, con el fin de desarrollar una línea base que ayude a entender la relación entre la biomasa y la productividad del fitoplancton y los procesos físicos que la afectan.

Se ha documentado que las zonas de surgencias y estratificación baja están relacionadas a valores bajos de SSH y SST que, a su vez, se relacionan con valores altos de biomasa fitoplanctónica (Muller-Karger *et al.*, 2015; Wilson y Adamec, 2001). Sin embargo, esta relación no es completamente estricta (Sangrà *et al.*, 2009). Para este estudio las áreas costeras mostraron una relación positiva entre el SSH y la  $Chl\alpha_{sat}$ , es decir, valores altos del SSH estuvieron asociados a altas concentraciones de  $Chl\alpha_{sat}$ . Por otra parte, la SST mostró una relación negativa con la  $Chl\alpha_{sat}$  y la PP en todas las regiones, pero en algunos casos con un desfase mayor a los 3 meses. Recordemos que un valor significativo en una correlación no implica necesariamente una relación de causa y efecto. Por ejemplo, un coeficiente de correlación negativo alto y significativo entre  $Chl\alpha$  y la SST no implica un aumento de  $Chl\alpha$  con el descenso de la temperatura, sino que la SST puede usarse como *indicador*, y que el agua fría rica en nutrientes puede causar un aumento en la biomasa de fitoplancton en la zona eufótica (Santamaría-del Ángel *et al.*, 2006). Como será explicado a continuación, este es un indicio de que existen otros fenómenos, además de la SST y el SSH que controlan el ascenso o descenso de la concentración de  $Chl\alpha_{sat}$  y las tasas de PP. Además, las variables físicas (SST y SSH) mostraron tendencias a valores positivos (fuertes anomalías positivas), pero no se observó ninguna tendencia ni a valores positivos o negativos de las aproximaciones de la biomasa del fitoplancton ( $Chl\alpha_{sat}$  y PP), por lo que las variables bióticas parecen no verse influenciadas a cambios de estas variables físicas a largo plazo, como también lo han mencionado Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009) y Muller-Karger *et al.* (2015).

#### 4.1. Variabilidad estacional

Los mínimos de SST (20 - 25 °C) ocurrieron principalmente en el mes de febrero y únicamente en enero en la región costera de Coatzacoalcos. Estos valores coinciden con la presencia de fuertes vientos de noviembre a febrero debido a la entrada de los “nortes”, frentes fríos (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Muller-Karger *et al.*, 1991, 2015) provenientes del noroeste de los Estados Unidos. Por el contrario, el máximo calentamiento de las regiones de estudio (30 °C), se presentó en los meses de agosto y septiembre (este último mes en las regiones profundas de Tampico y Perdido). Estos resultados coinciden con lo reportado con anterioridad para el GoM: valores de SST mínimos en febrero - marzo de aproximadamente 22 y 24 °C y máximos en julio - septiembre 29 - 30 °C (Callejas-Jimenez *et al.*, 2012; Damien *et al.*, 2018; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Muller-Karger *et al.*, 1991, 2015; Salmerón-García *et al.*, 2011).

El SSH medido vía satélite proporciona no sólo la medida del contenido de calor, también es un indicativo de la variabilidad de los remolinos de mesoescala y procesos que controlan las corrientes oceánicas geostróficas (Muller-Karger *et al.*, 2015; Oey, 2008). Por lo que el SSH se puede ver influenciado por muchos factores como: la temperatura del agua, el viento, la salinidad, la presión atmosférica y la entrada de agua dulce fluvial y pluvial (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003).

Los valores mínimos y máximos del SSH no coincidieron de manera exacta con los valores de la SST. Los valores máximos se observaron de agosto a noviembre en todas las regiones (0.40 - 0.45 m). Los valores máximos coinciden con lo reportado con anterioridad por Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009) y Muller-Karger *et al.* (2015) que reflejan los cambios estéricos (debidos al calentamiento estacional de la columna de agua) y la relación con la frecuencia de la separación de remolinos anticiclónicos de la corriente de Lazo. Tanto el desarrollo de la corriente de Lazo y la separación de remolinos anticiclónicos son el resultado de la interacción de procesos estacionales y estocásticos (Muller-Karger *et al.*, 2015; Oey, 2008; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2006). Aunque el desprendimiento de remolinos por la corriente de Lazo es un proceso que no se repite a intervalos regulares cuya dinámica precisa permanece desconocida (Sturges y Leben, 2000). Lindo-Atichati *et al.* (2013) reportaron en un intervalo de tiempo de 16 años que los remolinos anticiclónicos se desprenden con mayor frecuencia entre julio y

septiembre, siendo agosto y septiembre los meses que exhibieron la mayor separación de remolinos (7 y 4 respectivamente).

Por su parte, los valores mínimos de la SSH se reportaron en febrero y marzo (0.22 - 0.30 m), exceptuando la región costera de Coatzacoalcos que presentó los valores mínimos en junio - julio (~0.22 m). En febrero y marzo los valores mínimos del SSH parecen estar principalmente controlados por los cambios estéricos, ya que los valores mínimos del SSH coinciden con los mínimos de SST, coincidiendo con lo reportado con Muller-Karger *et al.* (2015). Por otro lado, los valores mínimos reportados para Coatzacoalcos probablemente tengan relación con la presencia de vientos paralelos a la costa de la Bahía de Campeche con dirección al oeste en estos meses (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2014) que inducen un fenómeno de surgencia debido al transporte de Ekman provocando que el nivel del mar disminuya considerablemente (Jung y Cho, 2020).

La región profunda del GoM está caracterizada por patrones espacio-temporales en la biomasa del fitoplancton que están asociados principalmente con cambios estacionales en la estratificación debido a la temperatura y los procesos oceánicos de mesoescala, donde sus aguas principalmente son oligotróficas (Damien *et al.*, 2018; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Pasqueron de Fommervault *et al.*, 2017; Salmerón-García *et al.*, 2011).

Para este estudio, las regiones oceánicas ubicadas a una profundidad mayor a los 200 m, registraron los valores mínimos de  $Chl_{a_{sat}}$  en abril - mayo (0.15 - 0.30 mg m<sup>-3</sup>) para la región de Coatzacoalcos, y en agosto - septiembre (0.08 - 0.20 mg m<sup>-3</sup>) en Tampico y Perdido, mientras que los máximos se reportaron en el periodo diciembre - enero (0.22 - 0.57 mg m<sup>-3</sup>) para todas las regiones.

La estacionalidad de la  $Chl_{a_{sat}}$  ha sido determinada con anterioridad en la región de aguas profundas en el GoM. En Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009) los valores mínimos de  $Chl_{a_{sat}}$  se reportaron en junio - agosto y los máximos en diciembre-enero, para Muller-Karger *et al.* (1991) los mínimos se reportan en mayo - julio y los máximos en diciembre - febrero. Damien *et al.* (2018), Muller-Karger *et al.* (2015) y Salmerón-García *et al.* (2011) reportaron las mínimas concentraciones en junio - septiembre y máximos en diciembre - enero. Las bajas concentraciones en verano podrían

estar influenciadas por la estratificación de la columna de agua (exportación baja de nutrientes de regiones oceánicas profundas a capas superficiales). Específicamente, los valores mínimos de junio a agosto se han asociado con la capa de mezcla poco profunda y a una estratificación mayor durante el verano producida por vientos más débiles y aumento de calor en la capa superior del océano (Salmerón-García *et al.*, 2011; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2014). Las concentraciones altas en invierno se deben a la fertilización de las capas superficiales mediante la mezcla vertical, provocada por el descenso en la temperatura en las capas superficiales y los fuertes vientos (Melo González *et al.*, 2000; Muller-Karger *et al.*, 1991, 2015). Por esto se ha inferido que la profundidad de la capa de mezcla, en gran parte, es el factor que controla los niveles de Chl $a$  en el GoM profundo.

También se ha visto que algunas lengüetas de biomasa fitoplanctónica pueden avanzar a regiones profundas en un periodo estacional debido a los transportes costeros (diagramas Hovmöller) a través de la plataforma de aguas ricas en clorofila, principalmente moduladas por el componente del campo del viento a lo largo de la costa (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009). El transporte de biomasa fitoplanctónica costa afuera es inducido por la convergencia estacional de las corrientes a lo largo de la plataforma impulsada principalmente por el esfuerzo del viento estacional a lo largo de la plataforma, favoreciendo las surgencias costeras (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003, 2014). Además del efecto del viento, los remolinos anticiclónicos y ciclónicos pueden contribuir a la variabilidad de Chl $a_{sat}$  pero de manera indirecta. Como se mencionó con anterioridad los remolinos no varían en una escala de tiempo estacional y no tienen una periodicidad anual en sí (Chang y Oey, 2011; Sturges y Leben, 2000). Pero los remolinos pueden transportar aguas costeras cuyo contenido de Chl $a$  sí tiene una estacionalidad que puede conceder una estacionalidad colateral al transporte de clorofila en aguas profundas (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).

Las tasas de PP para las regiones oceánicas presentaron los valores mínimos en el mes de septiembre (0.20 - 0.32 gC m $^{-2}$  d $^{-1}$ ) y los máximos en el periodo de enero a marzo (0.47 - 0.57 gC m $^{-2}$  d $^{-1}$ ). Relacionado con los aumentos de la Chl $a_{sat}$ , los aumentos de las tasas de PP en invierno se deben principalmente al aumento de la nueva producción fomentada por los nutrientes suministrados a superficie debido a la mezcla de la columna de agua. Estos resultados tienen un desfase con lo reportados

por Damien *et al.* (2018), Hidalgo-González *et al.* (2005) y Muller-Karger *et al.* (2015), sobre todo para los valores mínimos en octubre - noviembre y máximos en el mes de febrero. Específicamente, Mirabal-Gómez *et al.* (2017) reportaron las tasas de PP en las zonas de Perdido y Coatzacoalcos: para la primera zona los mínimos en julio - septiembre ( $0.23 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y máximos en febrero-mayo ( $0.25 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Tasas muy similares a las obtenidas en esta investigación: mínimas en septiembre ( $0.21 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y máximas en marzo ( $0.57 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Pero de manera contraria, para Coatzacoalcos no reportaron una estacionalidad clara, contrario a lo aquí reportado donde los mínimos se reportaron en septiembre ( $0.32 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y los máximos en enero ( $0.54 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). En general, las estimaciones de PP en este estudio para la región de aguas oceánicas fueron similares a las de Muller-Karger *et al.* (2015) ( $0.25\text{-}0.60 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) e Hidalgo-González *et al.* (2005) ( $0.22\text{-}0.44 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) pero se encuentran por encima de las reportadas por Damien *et al.* (2018) ( $0.11\text{-}0.17 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y por debajo de las Heileman y Rabalais (2009) ( $0.41\text{-}0.82 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ).

Las diferencias entre los valores reportados de las tasas de PP, pueden deberse claramente al método utilizado para calcular la PP, pero el tamaño de las áreas el periodo y las bases de datos ocupadas también son factores importantes en estas discrepancias. Por ejemplo, en este estudio se utilizó la media de regiones delimitadas de miles de km (media de varios pixeles) con el VGPM en un periodo de 18 años. Mirabal-Gómez *et al.* (2017) emplearon el mismo modelo utilizado en este estudio y la misma base de datos, pero analizando un sólo pixel ( $\sim 18 \times 18 \text{ km}^2$ ) en un periodo de 10 años, mientras que Damien *et al.* (2018) utilizaron un acoplamiento de modelos biogeoquímicos con datos del MODIS-Aqua en todo el GoM en un periodo de 12 años y Muller-Karger *et al.* (2015) aplicaron igualmente el VGPM pero con una combinación de bases de datos (CZCS, SeaWiFS y MODIS-Aqua) y dividieron a la región profunda del GoM en 4 subregiones, en un periodo de aproximadamente 30 años, por mencionar algunos casos.

Para las regiones costeras o menores a los 200 m de profundidad, la estacionalidad tiene variaciones específicas de factores locales como la descarga de ríos y el forzamiento local de los vientos (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2006) por lo que cada región costera según su entorno puede variar de manera sustancial. La zona de Coatzacoalcos presentó los valores mínimos de  $\text{Chl}_{a_{sat}}$  y PP en mayo ( $\sim 0.94 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $\sim 0.98 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ )

y máximos en noviembre-diciembre ( $\sim 2.79 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $\sim 1.91 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). El inicio de los florecimientos de fitoplancton en noviembre ha sido relacionado con la fuerza de la confluencia de corrientes costeras impulsada por la fuerte convergencia de vientos a lo largo de la costa en el sur de la Bahía de Campeche (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009), la corriente hacia el sur en noviembre - marzo llega a la parte sur del GoM, en la Bahía de Campeche, donde se encuentra con una corriente opuesta a lo largo de la plataforma, generando transportes estacionales mar adentro (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003, 2014). Adicionalmente, en esta zona hay una contribución de aguas ricas en nutrientes debido a la descarga de ríos, principalmente del sistema Grijalva - Usumacinta que tienen la mayor descarga desde agosto hasta noviembre y mínima de abril a mayo. En esta región varios estudios han reportado una relación positiva entre el aumento de la descarga de los ríos, el aporte de nutrientes y la biomasa de fitoplancton en las áreas costeras adyacentes a las desembocaduras de los ríos (Cuevas-Lara *et al.*, 2021; Masotti *et al.*, 2018; Uribe-Martínez *et al.*, 2019).

Las zonas costeras de Tampico y Perdido mostraron un patrón estacional similar: los mínimos de  $\text{Chl}_{a_{sat}}$  y PP en Tampico se reportaron en junio ( $\sim 0.38 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $\sim 0.58 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y los máximos en febrero ( $\sim 1.17 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $\sim 1.45 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), mientras que, en Perdido los mínimos se reportaron en agosto ( $\sim 0.25 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $\sim 0.42 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y los máximos en marzo ( $\sim 1.31 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $\sim 1.62 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Estos valores máximos corresponden al periodo de frentes fríos y a la intrusión de agua fría y rica en nutrientes que es producto de la corriente costera con flujo de norte a sur en esta región durante los meses de enero a marzo (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Muller-Karger *et al.*, 2015).

Los vientos y su efecto en las corrientes que afectan a la plataforma de Tamaulipas - Veracruz cambian de dirección según la época del año: con flujo hacia el sur en temporada de frentes fríos y flujos hacia el norte en verano (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2014). Zavala-Hidalgo *et al.* (2003) indicó que esta circulación, favorecida por el esfuerzo del viento durante los frentes fríos, genera condiciones de surgencia. Además, esta zona se ve afectada por remolinos de mesoescala provenientes del este del GoM que, al interactuar con el talud, transportan concentraciones altas de  $\text{Chl}_{a_{sat}}$  a lo largo de la costa interior (Elliott, 1982; Vidal *et al.*, 1994; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003).

Por otra parte, nuestros resultados indican que la biomasa fitoplanctonica no pa-

rece tener relación con el periodo de afluente máximo de los ríos locales, puesto que los meses de descarga máxima y concentración máxima de  $Chl\alpha_{sat}$  no coinciden, el río Panúco (que afecta a la zona de Tampico) y los ríos Bravo y Soto la Marina (para Perdido) presentan el mayor aporte de agua continental al GoM de agosto a octubre. Es importante mencionar que la alta turbidez debido a las altas concentraciones de sedimentos en temporada de descargas máximas podría limitar la entrada de luz inhibiendo la fotosíntesis, aunque la zona se encuentre rica en nutrientes, o también la biomasa del fitoplancton podría estar regulada por la presión del pastoreo por el zooplancton.

#### **4.2. Variabilidad interanual**

Los fenómenos climáticos y eventos extremos como tormentas tropicales y huracanes y su influencia con actividades en tierra, como los cambios en el uso de suelo, construcción de presas y puentes, afectan el aporte de agua dulce y sedimentos que pueden promover la variabilidad intra-anual (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2006). Como se pudo observar en los análisis espectrales de la  $Chl\alpha_{sat}$  y PP la señal anual es la dominante, seguida de señales más débiles intra-anales semestrales e incluso bimestrales. Pero estos fenómenos y eventos extremos también pueden afectar las variaciones interanuales del GoM.

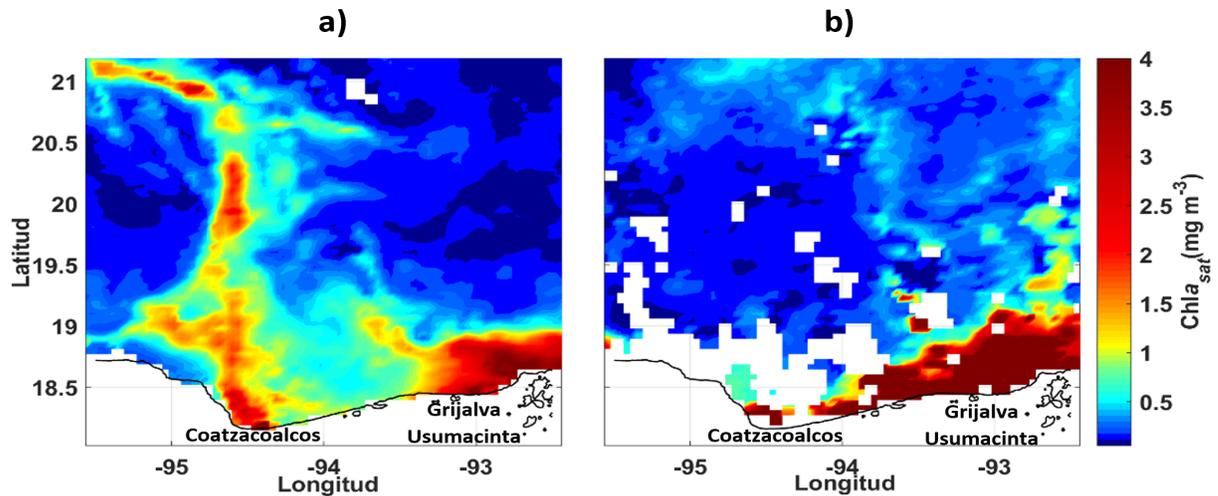
La  $Chl\alpha_{sat}$  presentó variaciones interanuales en Coatzacoalcos, presentando valores anómalos positivos en 2008 y 2010; mientras que Tampico presentó variaciones positivas en 2019 y negativas en 2013 y Perdido registró variaciones positivas en 2019 y negativas en 2011-2012. En cambio, para la SST las anomalías negativas se dieron en el periodo 2010 para las 6 regiones y las positivas en Tampico y Perdido 2017, mientras que Coatzacoalcos en 2005 y 2009. La variación negativa de la SST en el año 2010 coincide con lo reportado por Muller-Karger *et al.* (2015), quienes la relacionaron con la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO por sus siglas en inglés) y que además parece ser consistente con la tendencia a positiva a largo plazo de las anomalías de la SST y la fase de calentamiento de la AMO.

La falta de relación entre  $Chl\alpha_{sat}$  y SST sugiere que existen otros procesos que afectan la concentración de la  $Chl\alpha_{sat}$ . Por ejemplo, en la región de Coatzacoalcos se

ha propuesto que la alta producción fitoplanctónica sobre la plataforma continental es promovida por plumas de los ríos en el sur del GoM (Hernández-Becerril *et al.*, 2008; Machain-Castillo *et al.*, 2020).

En el año 2010 se observó una anomalía en la señal de  $Chl_{a_{sat}}$  en la región profunda de Coatzacoalcos, ubicada en la bahía de Campeche. Esta anomalía pudo estar relacionada con la descarga del río Coatzacoalcos, cuya descarga puede avanzar hasta regiones oceánicas (**Figura 46a**). La descarga de los ríos y con ello la exportación de nutrientes también se correlaciona en escalas de tiempo interanuales con el contenido de clorofila. Por ejemplo, se ha reportado que durante un periodo seco la exportación de nutrientes disminuye claramente hasta en un 50% en comparación con los valores históricos, lo que reduce el tamaño de la lengüeta de  $Chl_a$  (Lihan *et al.*, 2011; Morey *et al.*, 2003; Masotti *et al.*, 2018).

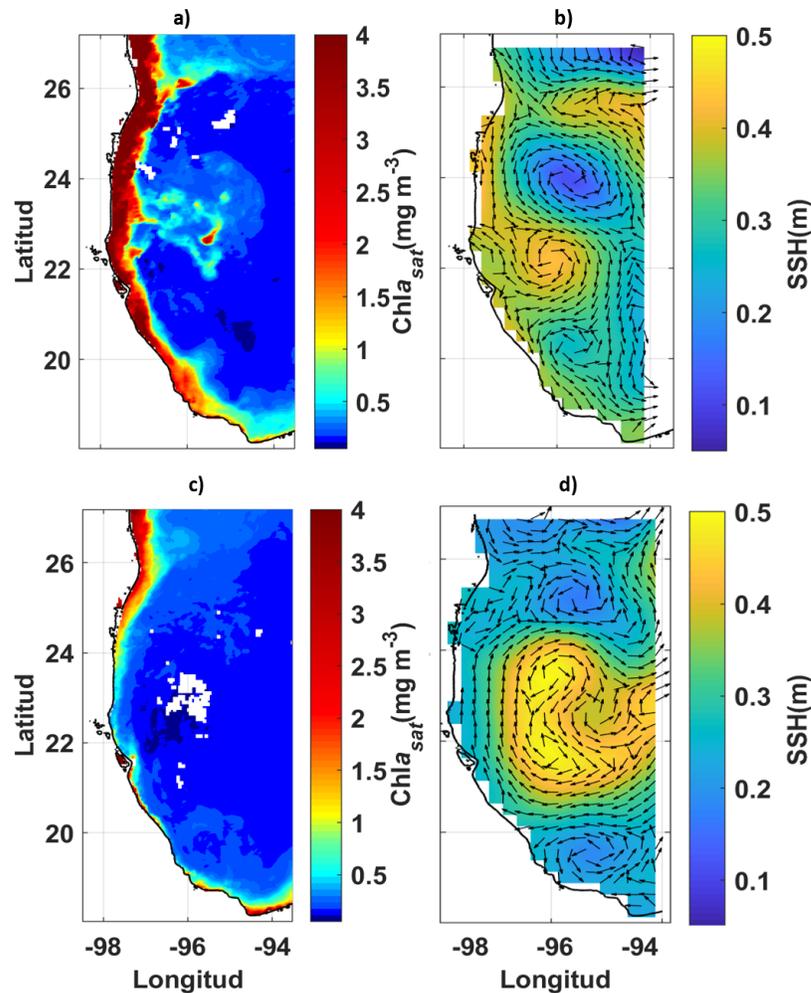
Por otro lado, en el año 2008 en la región de Coatzacoalcos costero, la  $Chl_{a_{sat}}$  presentó la mayor concentración y la mayor anomalía de esta región y de todas las regiones de estudio ( $\sim 5 \text{ mg m}^{-3}$ ). Esta anomalía pudo estar relacionada al flujo de la descarga del río Grijalva-Usumacinta (**Figura 46b**), aunado a los vientos provenientes del norte en la Bahía de Campeche, confinando la pluma de los ríos hacia la costa, dejando la lengüeta de  $Chl_{a_{sat}}$  “encarcelada” en la zona costera, dando como resultado un promedio de  $Chl_{a_{sat}}$  alto en toda la caja de estudio (Monreal-Gómez *et al.*, 2004). Conjuntamente la presencia y paso de la depresión tropical “Marco” en esta misma fecha pudo influir en las precipitaciones de la zona, aumentando el volumen de descarga del agua continental al mar.



**Figura 46.** a)  $Chl_{a_{sat}}$  de la bahía de Campeche en junio del 2010, b)  $Chl_{a_{sat}}$  de la bahía de Campeche en octubre del 2008.

Para la región de Tampico y Perdido se reportaron valores positivos de  $Chl_{a_{sat}}$  y PP en el año 2019. Como se mencionó anteriormente, los cambios en la variabilidad de los remolinos de mesoescala juegan un papel importante en el suministro de nutrientes para el crecimiento del fitoplancton (Mahadevan *et al.*, 2010; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; McGillicuddy *et al.*, 2007). Por ejemplo, un análisis de mapas del nivel del mar para la costa occidental del GoM para este año (2019) muestra un remolino ciclónico entre las latitudes de Tampico (22 - 23 °N) y Perdido (25 - 26 °N). Este remolino transporta el agua costera rica en  $Chl_a$  hacia el sureste y se encuentra con dos remolinos anticiclónicos al norte y sur (**Figura 47b**), formando una lengüeta de aguas ricas en  $Chl_a$  dirigida hacia la región oceánica del GoM (**Figura 47a**).

En contraste, en el año 2013 se observa que las aguas costeras tienen menor concentración de  $Chl_{a_{sat}}$  (**Figura 47c**), además de un giro anticiclónico en entre los 21 - 24 °N, que restringe el aporte de  $Chl_{a_{sat}}$  a aguas oceánicas (**Figura 47d**). En general, estos resultados muestran que la variabilidad de la convergencia de masas de agua inducida por la variabilidad interanual de las corrientes oceánicas a lo largo de la plataforma (impulsada por el esfuerzo del viento a lo largo de la costa) modula una gran fracción de la variabilidad observada de la concentración de  $Chl_{a_{sat}}$  (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).



**Figura 47.** a) Mapa de  $Chl a_{sat}$  de marzo del 2019 del este del GoM, b) Mapa de corrientes y nivel del mar de marzo del 2019 y c) Mapa de la  $Chl a_{sat}$  de febrero del 2013, d) Mapa de corrientes y nivel del mar en febrero del 2013.

### 4.3. Variabilidad espacial

El patrón espacial de la PP y  $Chl a_{sat}$  fue congruente con lo reportado en la literatura, que divide al GoM desde una perspectiva biológica en dos áreas principales: aguas costeras eutróficas y aguas profundas oligotróficas (delimitadas en este estudio por la isóbata de 200 m) (Damien *et al.*, 2018; Heileman y Rabalais, 2009). En general, las zonas costeras presentaron mayores concentraciones de  $Chl a_{sat}$  y tasas de PP que las regiones oceánicas: zonas costeras con valores promedio de  $Chl a_{sat}$  de 0.52 a  $1.76\ mg\ m^{-3}$  y PP de 0.66 a  $1.66\ gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ . En contraste, la sección oceánica con valores promedio de  $Chl a_{sat}$  de 0.11 a  $0.25\ mg\ m^{-3}$  y PP de 0.24 a  $0.53\ gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ . Esta variabilidad es controlada principalmente por descargas terrestres y fluviales que

fertilizan las aguas costeras, además de los procesos de surgencia impulsados por el viento (Callejas-Jimenez *et al.*, 2012; Damien *et al.*, 2018; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Muller-Karger *et al.*, 1991, 2015; Salmerón-García *et al.*, 2011).

Las diferencias más significativas se reportaron cuando se compararon las secciones costeras y oceánicas (pvalue <0.0001, **Anexo 1B,C,D**). Las diferencias de  $Chl_{a_{sat}}$  y la tasa de PP en estas regiones parecen estar controladas principalmente por los procesos físicos descritos anteriormente, la profundidad y la distancia fuera de la costa (gradiente costero) que por el cambio de latitud, excepto la región costera de Coahuila que presentó valores de biomasa y tasas de PP mayores a las de Tampico y Perdido. Esto es, de manera general, que la combinación de las regiones T1-P1 y T2-P2, es decir, la zona de Perdido y Tampico no presentaron diferencias estadísticas significativas en los valores de  $Chl_{a_{sat}}$  y PP. Por otro lado, en la región de Coahuila el río Grijalva-Usumacinta aporta el 33 % de la descarga total de agua dulce de México en el GoM (Carranza-Edwards *et al.*, 1993) y la convergencia de los vientos en la plataforma costera que impulsan la surgencia al sur de la Bahía de Campeche (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009), lo que hace esta región más fértil que las anteriores.

#### **4.4. Comparación de datos satelitales e *in situ***

Los datos de la  $Chl_a$  y PP obtenidos mediante muestreos de agua e incubaciones con  $^{13}C$  y  $^{14}C$  son escasos y los resultados de las comparaciones con datos derivados de satélites deben ser tomados a discreción. Estrictamente, la comparación entre los datos de  $Chl_a$  y PP derivados de satélite y las estimaciones de  $Chl_a$  mediante fluorescencia y las tasas de PP vía  $^{13}C$  no es apropiada porque los dos conjuntos de datos tienen escalas temporales y espaciales totalmente diferentes.

Sin embargo, comparando estos pocos datos se puede verificar que los datos de satélite no son muy diferentes a los de las muestras de agua. En este caso, se pudo comparar la  $Chl_{a_{sat}}$  y la  $Chl_a$  *in situ*, obteniendo una correlación significativa con un coeficiente de correlación lineal de 0.5 - 0.7. Además se mostró que las mediciones satelitales tienden a sobreestimar las concentraciones *in situ*, debido al promedio espacial del tamaño del pixel (Schowengerdt, 2012), donde la concentración de clorofila puede variar desde algunos centímetros hasta varios metros, dependiendo de la

concentración de los constituyentes que se encuentran en el agua (Kirk, 1994).

Para la PP, por el contrario, no se obtuvo una correlación significativa, pero se observó que los datos satelitales tienden a subestimar los datos obtenidos mediante  $^{13}\text{C}$ . Para que estas afirmaciones se vuelvan más sólidas, es necesario contar con una mayor cantidad de puntos de datos (Santamaría-del Ángel *et al.*, 2006).

Se han desarrollado investigaciones que reportan la variabilidad natural de la biomasa y productividad del fitoplancton del GoM a través de imágenes satelitales (Damien *et al.*, 2018; Mirabal-Gómez *et al.*, 2017), pero sólo Muller-Karger *et al.* (2015) han conseguido periodos de estudio mayores a los 15 años y se centran principalmente en la región de aguas profundas. Por otro lado, los estudios enfocados a las zonas costeras son principalmente del territorio estadounidense y los aplicados a la zona correspondiente a México sólo informan la  $\text{Chl}a_{sat}$  (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Salmerón-García *et al.*, 2011). En este trabajo se pudo obtener la variación de la concentración de  $\text{Chl}a_{sat}$  y de las tasas de PP a grandes escalas espacio-temporales registrando no sólo los cambios latitudinales, también los perpendiculares a la costa y su relación estadística con la SST y SSH.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

- Las series temporales, diagramas Hovmöller y los análisis espectrales de la  $Chl a_{sat}$ , PP, SST y SSH de Perdido, Tampico y Coatzacoalcos mostraron en el periodo 2002-2020 una variación anual dominante, pero también, con señales inter e intra- anuales de menor magnitud, como respuesta a diversos procesos locales.
- La SST mostró una correlación negativa con la  $Chl a_{sat}$  y la PP en todas las regiones, esto muestra la fuerte dependencia de estas variables bióticas a procesos físicos que enriquecen la zona eufótica. Por el contrario, el SSH no presentó un patrón específico de correlación con las variables bióticas.
- En general, las tres regiones de estudio presentaron los valores de  $Chl a_{sat}$  ( $0.94 \text{ mg m}^{-3}$ ) y tasas de PP ( $0.99 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) de noviembre a marzo. Dentro de estas fechas, principalmente en el mes de febrero se reportaron los valores mínimos de SST ( $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y los mínimos del SSH en febrero y marzo ( $0.25 \text{ m}$ ). Estos valores coinciden con la llegada de frentes fríos que fertilizan las capas superficiales mediante la mezcla vertical, provocada por el descenso en la temperatura en las capas superficiales y la presencia de vientos fuertes.
- El patrón espacial de la PP y  $Chl a_{sat}$  fue congruente con lo reportado en la literatura y corroborado con los análisis estadísticos y los diagramas Hovmöller, que dividió al GoM desde una perspectiva biológica en dos áreas principales: zonas costeras eutróficas con valores promedio de hasta  $1.76 \text{ mg m}^{-3}$  de  $Chl a_{sat}$  y  $1.66 \text{ ggC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de PP y regiones profundas oligotróficas de  $0.25 \text{ mg m}^{-3}$  de  $Chl a_{sat}$  y  $0.53 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de PP. Además, entre las zonas de Perdido y Tampico no se presentaron diferencias estadísticas de los valores de  $Chl a_{sat}$  y PP, mientras que la región costera de Coatzacoalcos registró diferencias con estas dos regiones ya que presentó valores de biomasa y tasas de PP mayores, posiblemente relacionado a la presencia de las descargas del río Grijalva-Usumacinta y la convergencia de las corrientes, eventos característicos que fertilizan la Bahía de Campeche.
- En general, se mostró que series de tiempo de largo periodo nos ayudan a entender mejor la relación entre variables bióticas y abióticas en regiones de alta

variabilidad ambiental. También es importante el desarrollo de líneas de base para vislumbrar la variabilidad estacional a largo plazo de la  $Chl_{a_{sat}}$  y la PP para demostrar y cuantificar los cambios debidos a eventos naturales y/o antropogénicos a largo plazo.

## Literatura citada

---

- Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annu. Rev. Plant Biol.*, **59**: 89–113.
- Behrenfeld, M. J. y Boss, E. (2006). Beam attenuation and chlorophyll concentration as alternative optical indices of phytoplankton biomass. *Journal of Marine Research*, **64**(3): 431–451.
- Behrenfeld, M. J. y Falkowski, P. G. (1997). Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, **42**(1): 1–20.
- Behringer, D. W., Molinari, R. L., y Festa, J. F. (1977). The variability of anticyclonic current patterns in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, **82**(34): 5469–5476.
- Benway, H. M. y Coble, P. G. (2014). Report of the U.S Gulf of Mexico Coastal Carbon Synthesis Workshop. Reporte técnico, Ocean Carbon and Biogeochemistry Program and North American Carbon Program.
- Biggs, D. (1992). Nutrients, plankton, and productivity in a warm-core ring in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **97**(C2), 2143–2154. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, **97**(C2): 2143–2154.
- Biggs, D. y Ressler, P. H. (2001). Distribution and abundance of phytoplankton, zooplankton, ichthyoplankton, and micronekton in deepwater Gulf of Mexico. *Gulf of Mexico Science*, **19**(1): 7–29.
- Biggs, D. C. y Müller-Karger, F. E. (1994). Ship and satellite observations of chlorophyll stocks in interacting cyclone-anticycloneddy pairs in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, **99**: 7371–7384.
- Boyce, D. G., Lewis, M. R., y Worm, B. (2010). Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*, **466**(7306): 591–596.
- Callejas-Jimenez, M., Santamaria-del Angel, E., Gonzalez-Silvera, A., Millan-Nuñez, R., y Cajal-Medrano, R. (2012). Dynamic Regionalization of the Gulf of Mexico based on normalized radiances (nLw) derived from MODIS-Aqua. *Continental Shelf Research*, **37**: 8–14.
- Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J., Badan, A., y Leben, R. (2002). The potential vorticity flux through the Yucatan Channel and the Loop Current in the Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*, **29**(22): 16–1–16–4.
- Capuzzo, E. (2011). *Measuring and modelling the primary production of a Sea Lough in Northern Ireland*. Tesis de doctorado, Edinburgh Napier University.
- Carr, M. E., Friedrichs, M. A., Schmeltz, M., Noguchi Aita, M., Antoine, D., Arrigo, K. R., Asanuma, I., Aumont, O., Barber, R., Behrenfeld, M., Bidigare, R., Buitenhuis, E. T., Campbell, J., Ciotti, A., Dierssen, H., Dowell, M., Dunne, J., Esaias, W., Gentili, B., Gregg, W., Groom, S., Hoepffner, N., Ishizaka, J., Kameda, T., Le Quéré, C., Lohrenz, S., Marra, J., Mélin, F., Moore, K., Morel, A., Reddy, T. E., Ryan, J., Scardi, M., Smyth, T., Turpie, K., Tilstone, G., Waters, K., y Yamanaka, Y. (2006). A comparison of global

- estimates of marine primary production from ocean color. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **53**(5-7): 741–770.
- Carranza-Edwards, A., Rosales-Hoz, L., y Monreal-Gómez, A. (1993). Suspended sediments in the southeastern gulf of Mexico. *Marine Geology*, **112**(1-4): 257–269.
- Chang, Y. L. y Oey, L. Y. (2011). Loop current cycle: Coupled response of the loop current with deep flows. *Journal of Physical Oceanography*, **41**(3): 458–471.
- CONAGUA (2014). Estadísticas del agua en México. Gerencia de aguas superficiales e ingeniería de ríos, comisión nacional del agua, México. Recuperado en <http://conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>.
- CONAPESCA (2017). Anuario Estadístico de Acuacultura y Pesca Publicación 2017. Reporte técnico. Recuperado en [www.conapesca.gob.mx](http://www.conapesca.gob.mx).
- Cruz Gómez, C., Monreal Gómez, M., y Nicolaevich Bulgakov, S. (2008). Efectos de los vórtices en sistemas acuáticos y su relación con la química, biología y geología. *Interciencia*, **33**(10): 741–746.
- Cuevas-Lara, D., Alcocer, J., Cortés-Guzmán, D., Soria-Reinoso, I. F., García-Oliva, F., Sánchez-Carrillo, S., y Oseguera, L. A. (2021). Particulate organic carbon in the tropical Usumacinta river, southeast Mexico: Concentration, flux, and sources. *Water*, **13**(11): 1561.
- Cullen, J. J. (1982). The Deep Chlorophyll Maximum: Comparing Vertical Profiles of Chlorophyll a. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **39**(5): 791–803.
- Damien, P., Pasqueron de Fommervault, O., Sheinbaum, J., Jouanno, J., Camacho-Ibar, V. F., y Duteil, O. (2018). Partitioning of the open waters of the Gulf of Mexico based on the seasonal and interannual variability of chlorophyll concentration. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **123**(4): 2592–2614.
- Dierssen, H. M. y Kaylan, R. (2012). Remote Sensing of Ocean Color. En: J. Orcutt (ed.), *Earth System Monitoring Selected. Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. capítulo 18, p. 517.
- Dugdale, R. C. y Goering, J. J. (1967). Uptake of New and Regenerated Forms of Nitrogen in Primary Productivity. *Limnology and Oceanography*, **12**(2): 196–206.
- El-Sayed, S. Z. (1972). Phytoplankton Standing Crop and Primary Productivity. En: *Chemistry, primary productivity, and benthic algae of the Gulf of Mexico*. American Geographical Society, New York, bushnell, v edición, pp. 8–13.
- Elliott, B. A. (1982). Anticyclonic Rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, **12**(11): 1292–1309.
- Falkowski, P. G. y Raven, J. A. (2007). *Aquatic Photosynthesis*, Vol. 53. Princeton University Press. Princeton, pp. 1689–1699.
- Fernández, F. A., Sevilla, J. F., Egorova-Zachernyuk, T., y Grima, E. M. (2005). Cost-effective production of <sup>13</sup>C, <sup>15</sup>N stable isotope-labelled biomass from phototrophic microalgae for various biotechnological applications. *Biomolecular Engineering*, **22**(5-6): 193–200.

- Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., y Falkowski, P. (1998). Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science*, **281**(5374): 237–240.
- Gaarder, T. y Gran, H. (1927). Investigations on the primary production of plankton in the oso fjord. *Rapp. Cons. Explor. Mar*, **144**: 56–60.
- Garrison, T. y Ellis, R. (2012). *Oceanography: An Invitation to Marine Science*. Cengage Learning, 9mo edición. p. 604.
- Gaxiola-Castro, G., Cepeda-Morales, J., Nájera-Martínez, S., Espinosa-Carreón, T. L., De la Cruz-Orozco, M. E., Sosa-Avalos, R., Aguirre-Hernández, E., y Cantú-Ontiveros, J. P. (2010). Biomasa y producción del fitoplancton. *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California , 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California*, pp. 59–86.
- González-Ramírez, J. y Parés-Sierra, A. (2019). Streamflow modeling of five major rivers that flow into the Gulf of Mexico using SWAT. *Atmosfera*, **32**(4): 261–272.
- Hama, T., Miyazaki, T., Ogawa, Y., Iwakuma, T., Takahashi, M., Otsuki, A., y Ichimura, S. (1983). Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable  $^{13}\text{C}$  isotope. *Marine Biology*, **73**(1): 31–36.
- Hamilton, P., Berger, T. J., y Johnson, W. (2002). On the structure and motions of cyclones in the northern Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **107**(12).
- Heileman, S. y Rabalais, N. (2009). Gulf of Mexico: LME #5. *The UNEP large marine ecosystem report: A perspective on changing conditions in LMEs of the world's regional seas*, **182**: 637–688.
- Hernández-Becerril, D. U., García-Reséndiz, J. A., Salas-de León, D. A., Monreal-Gómez, M. A., Signoret-Poillon, M., y Aldeco-Ramírez, J. (2008). Fracción de nanoplancton en la estructura del fitoplancton en el sur del Golfo de México (abril de 2000). *Ciencias Marinas*, **34**(1): 77–90.
- Hidalgo-González, R. M., Alvarez-Borrego, S., Fuentes-Yaco, C., y Platt, T. (2005). Satellite-derived total and new phytoplankton production in the Gulf of Mexico. *Indian Journal of Marine Sciences*, **34**(4): 408–417.
- Hofmann, E. E. y Worley, S. J. (1986). An investigation of the circulation of the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, **91**(C12): 14221.
- Jeremy Werdell, P. y McClain, C. R. (2019). *Satellite remote sensing: Ocean color*. Número August 2018. Elsevier Ltd. pp. 443–455.
- Jiménez-Badillo, L., Galindo-Cortes, G., y Meiners-Mandujano, C. (2017). Fisheries assessment within the Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem. *Environmental Development*, **22**(December 2016): 63–70.
- Jung, J. y Cho, Y.-K. (2020). Persistence of coastal upwelling after a plunge in upwelling-favourable wind. *Scientific reports*, **10**(1): 1–9.
- Käse, L. y Geuer, J. K. (2018). Phytoplankton Responses to Marine Climate Change – An Introduction. En: *YOUMARES 8 – Oceans Across Boundaries: Learning from each other*. Springer International Publishing, Cham, pp. 55–71.

- Kirk, J. T. (1994). Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems.*, (March): 3–6.
- Lalli, C. y Parsons, T. (1997). *Biological oceanography: An introduction*. Elsevier, segunda edición.
- Le Quéré, C., Andrew, R., Canadell, J. G., Sitch, S., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Manning, A. C., Boden, T. A., Tans, P. P., Houghton, R. A., *et al.* (2016). Global carbon budget 2016.
- Lihan, T., Mustapha, M. A., Rahim, S. A., Saitoh, S., y Iida, K. (2011). Influence of river plume on variability of chlorophyll a concentration using satellite images. *Journal of Applied Sciences*, **11**(3): 484–493.
- Lindo-Atichati, D., Bringas, F., y Goni, G. (2013). Loop Current excursions and ring detachments during 1993-2009. *International Journal of Remote Sensing*, **34**(14): 5042–5053.
- Liu, C., Sun, Q., Xing, Q., Wang, S., Tang, D., Zhu, D., y Xing, X. (2019). Variability in phytoplankton biomass and effects of sea surface temperature based on satellite data from the Yellow Sea, China. *PLoS ONE*, **14**(8): 1–11.
- Lorenzen, C. J. (1966). A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, **13**(2): 223–227.
- Luna Vera, F. y Cardona Forero, T. E. (2004). Uso de algas marinas para la cuantificación fluorométrica de clorofila-a y su aplicación en el diagnóstico ambiental en aguas estuarinas. *Boletín Científico CCCP*, **11**(11): 5–12.
- Machain-Castillo, M. L., Ruiz-Fernández, A. C., Alonso-Rodríguez, R., Sanchez-Cabeza, J. A., Gío-Argáez, F. R., Rodríguez-Ramírez, A., Villegas-Hernández, R., Mora-García, A. I., Fuentes-Sánchez, A. P., Cardoso-Mohedano, J. G., Hernández-Becerril, D. U., Esqueda-Lara, K., Santiago-Pérez, S., Gómez-Ponce, M. A., y Pérez-Bernal, L. H. (2020). Anthropogenic and natural impacts in the marine area of influence of the Grijalva – Usumacinta River (Southern Gulf of Mexico) during the last 45 years. *Marine Pollution Bulletin*, **156**(May): 111245.
- Mahadevan, A., Tandon, A., y Ferrari, R. (2010). Rapid changes in mixed layer stratification driven by submesoscale instabilities and winds. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **115**(C3).
- Manzano-Sarabia, M. M. y Salinas-Zavala, C. A. (2008). Variabilidad estacional e interanual de la concentración de clorofila a y temperatura superficial del mar en la región occidental del golfo de México. *Asociación Interciencia Venezuela*, **33**(9): 628–634.
- Marra, J. (2009). Net and gross productivity: Weighing in with <sup>14</sup>C. *Aquatic Microbial Ecology*, **56**(2-3): 123–131.
- Martin, S. (2019). Ocean color. En: *An Introduction to Ocean Remote Sensing*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 136–193.
- Martínez-López, B. y Zavala-Hidalgo, J. (2009). Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Systems*, **77**(1-2): 1–20.

- Masotti, I., Aparicio-Rizzo, P., Yevenes, M. A., Garreaud, R., Belmar, L., y Farías, L. (2018). The influence of river discharge on nutrient export and phytoplankton biomass off the central Chile coast (33–37°S): seasonal cycle and interannual variability. *Frontiers in Marine Science*, **5**: 423.
- Maul, G. A. (1985). *Introduction to satellite oceanography*, Vol. 3. Springer Science & Business Media.
- McGillicuddy, D. J., Anderson, L. A., Bates, N. R., Bibby, T., Buesseler, K. O., Carlson, C. A., Davis, C. S., Ewart, C., Falkowski, P. G., Goldthwait, S. A., et al. (2007). Eddy/wind interactions stimulate extraordinary mid-ocean plankton blooms. *Science*, **316**(5827): 1021–1026.
- Melo González, N., Müller-Karger, F. E., Cerdeira Estrada, S., Pérez de los Reyes, R., Victoria del Río, I., Cárdenas Pérez, P., y Mitrani Arenal, I. (2000). Near-surface phytoplankton distribution in the western intra-Americas sea: The influence of el Niño and weather events. *Journal of geophysical research*, **105**(C6): 14–029.
- Merino, M. y Monreal-Gómez, M. (2004). Ocean currents and their impact of marine life. *Marine ecology*, pp. 47–52.
- Merrell, W. J. y Vazquez, A. M. (1983). Observations of Changing Mesoscale Circulation Patterns in the Western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, **88**(C12): 7721–7723.
- Mirabal-Gómez, U., Mercado-Santana, A., Lara-Lara, R., y De La Cruz-Orozco, M. (2017). Variabilidad de la productividad primaria integrada en Perdido. (December).
- Monreal-Gómez, M. a., Salas-de León, D. a., y Gracia-Gasca, a. (2004). Golfo de México, circulación y productividad. *Ciencias*, **76**(May): 24–33.
- Morey, S. L., Schroeder, W. W., O'Brien, J. J., y Zavala-Hidalgo, J. (2003). The annual cycle of riverine influence in the eastern Gulf of Mexico basin. *Geophysical Research Letters*, **30**(16): 1–4.
- Muller-Karger, F. E., Walsh, J. J., Evans, R. H., y Meyers, M. B. (1991). On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites. *Journal of Geophysical Research*, **96**(C7).
- Muller-Karger, F. E., Smith, J. P., Werner, S., Chen, R., Roffer, M., Liu, Y., Muhling, B., Lindo-Atichati, D., Lamkin, J., Cerdeira-Estrada, S., y Enfield, D. B. (2015). Natural variability of surface oceanographic conditions in the offshore Gulf of Mexico. *Progress in Oceanography*, **134**: 54–76.
- Nurdin, S., Mustapha, M. A., y Lihan, T. (2013). The relationship between sea surface temperature and chlorophyll-a concentration in fisheries aggregation area in the archipelagic waters of Spermonde using satellite images. *AIP Conference Proceedings*, **1571**: 466–472.
- Oey, L. Y. (2008). Loop current and deep eddies. *Journal of Physical Oceanography*, **38**(7): 1426–1449.
- Pasqueron de Fommervault, O., Perez-Brunius, P., Damien, P., Camacho-Ibar, V. F., y Sheinbaum, J. (2017). Temporal variability of chlorophyll distribution in the Gulf of Mexico: bio-optical data from profiling floats. *Biogeosciences*, **14**(24): 5647–5662.

- Platt, T., Sathyendranath, S., Forget, M. H., White, G. N., Caverhill, C., Bouman, H., Devred, E., y Son, S. H. (2008). Operational estimation of primary production at large geographical scales. *Remote Sensing of Environment*, **112**(8): 3437–3448.
- Rebert, J. P., Donguy, J. R., Eldin, G., y Wyrтки, K. (1985). Relations between sea level, thermocline depth, heat content, and dynamic height in the tropical Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, **90**(C6).
- Regaudie-de Gioux, A., Lasternas, S., Agustí, S., y Duarte, C. M. (2014). Comparing marine primary production estimates through different methods and development of conversion equations. *Frontiers in Marine Science*, **1**(JUL): 1–14.
- Rigel, A. (2008). *Modeling sea surface heigth in the Gulf of Mexico*. Tesis de doctorado, Massachusetts Institute of Technology.
- Robinson, I. S. (2010). *Discovering the Ocean from Space: The unique applications of satellite oceanography*. p. 638.
- Roesler, C., Uitz, J., Claustre, H., Boss, E., Xing, X., Organelli, E., Briggs, N., Bricaud, A., Schmechtig, C., Poteau, A., D’Ortenzio, F., Ras, J., Drapeau, S., Haëntjens, N., y Barbieux, M. (2017). Recommendations for obtaining unbiased chlorophyll estimates from in situ chlorophyll fluorometers: A global analysis of WET Labs ECO sensors. *Limnology and Oceanography: Methods*, **15**(6): 572–585.
- Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee, K., Bullister, J. L., Wanninkhof, R., Wong, C. S., Wallace, D. W., Tilbrook, B., Millero, F. J., Peng, T. H., Kozyr, A., Ono, T., y Rios, A. F. (2004). The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Science*, **305**(5682): 367–371.
- Salmerón-García, O., Zavala-Hidalgo, J., Mateos-Jasso, A., y Romero-Centeno, R. (2011). Regionalization of the gulf of mexico from space-time chlorophyll-a concentration variability. *Ocean Dynamics*, **61**(4): 439–448.
- Sangrà, P., Pascual, A., Rodríguez-Santana, Á., Machín, F., Mason, E., McWilliams, J. C., Pelegrí, J. L., Dong, C., Rubio, A., Arístegui, J., Marrero-Díaz, Á., Hernández-Guerra, A., Martínez-Marrero, A., y Auladell, M. (2009). The Canary Eddy Corridor: A major pathway for long-lived eddies in the subtropical North Atlantic. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **56**(12): 2100–2114.
- Santamaría-del Ángel, E., Millán-Núñez, R., González-Silvera, A., y Cajal-Medrano, R. (2006). Comparison of In Situ and Remotely-Sensed Chl- a Concentrations : A Statistical Examination of the Match-up Approach. pp. 241–259.
- Sanvicente-Añorve, L., Zavala-Hidalgo, J., Allende-Arandía, E., y Hermoso-Salazar, M. (2018). Larval dispersal in three coral reef decapod species: Influence of larval duration on the metapopulation structure. *PloS one*, **13**(3): e0193457.
- Sarangi, R. K. y Devi, K. N. (2017). Space-based observation of chlorophyll, sea surface temperature, nitrate, and sea surface height anomaly over the Bay of Bengal and Arabian Sea. *Advances in Space Research*, **59**(1): 33–44.
- Schowengerdt, R. A. (2012). *Remote sensing: Models and methods for image processing: Second edition*. pp. 1–522.

- Secretariat of the Pacific Community (2011). A beginner's guide to using remote sensing for offshore tuna fishing. *Secretariat of the Pacific Community*, p. 22.
- Signoret, M., Bulit, C., &, y Pérez, R. (1998). Patrones de distribución de clorofila ay producción primaria en aguas del Golfo de México y del Mar Caribe. *Hidrobiológica*, **8**(2): 81–88.
- Slawyk, G., Collos, Y., y Auclair, J.-C. (1977). The use of the  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  isotopes for the simultaneous measurement of carbon and nitrogen turnover rates in marine phytoplankton 1. *Limnology and Oceanography*, **22**(5): 925–932.
- SMN (2020). Reporte del Clima en México. Reporte anual 2020. Reporte técnico.
- Steemann-Nielsen, E. (1952). The use of radio-active carbon ( $^{14}\text{C}$ ) for measuring organic production in the sea. *ICES Journal of Marine Science*, **18**(2): 117–140.
- Strickland, J. y Parsons, T. (1970). *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. Número 1. Fisheries Research Board of Canada, Bulletin. Ottawa.
- Sturges, W. y Leben, R. (2000). Frequency of ring separations from the Loop Current in the Gulf of Mexico: A revised estimate. *Journal of Physical Oceanography*, **30**(7): 1814–1819.
- Sui, X., Zhang, R., Wu, F., Li, Y., y Wan, X. (2017). Sea surface height measuring using InSAR altimeter. *Geodesy and Geodynamics*, **8**(4): 278–284.
- Trujillo, A. P. y Thurman, H. V. (1999). *Essentials Of Oceanography*. Prentice Hall, 11mo edición. p. 551.
- Uribe-Martínez, A., Aguirre-Gómez, R., Zavala-Hidalgo, J., Ressi, R., y Cuevas, E. (2019). Oceanographic units of Gulf of Mexico and adjacent areas: The monthly integration of surface biophysical features. *Geofísica Internacional*, **58**(4): 295–315.
- Vázquez de la Cerda, A. M. (2004). Descriptive analysis of masses of ocean water that arrive to the Gulf of Mexico. *Environmental Analysis of the Gulf of Mexico*, (1964): 17–40.
- Vazquez de la Cerda, A. M., Reid, R. O., F Dimarco, S., y Jochens, A. E. (2005). Bay of Campeche circulation: An update. *Geophysical Monograph Series*, **161**: 279–293.
- Vidal, V. M., Vidal, F. V., Hernández, A. F., Meza, E., y Zambrano, L. (1994). Winter water mass distributions in the western Gulf of Mexico affected by a colliding anticyclonic ring. *Journal of Oceanography*, **50**(5): 559–588.
- Vitta, Y., Fernández, A., y Falcó, P. C. (2009). Determinación selectiva de clorofila a por fluorescencia molecular. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, **7**(1): 1–11.
- Wilson, C. y Adamec, D. (2001). Correlations between surface chlorophyll and sea surface height in the tropical pacific during the 1997–1999 el niño-southern oscillation event. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **106**(C12): 31175–31188.
- Wright, S. W. (1991). Improved HPLC method for the analysis of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, **77**(2-3): 183–196.

- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L., y O'Brien, J. J. (2003). Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **108**(12): 1–19.
- Zavala-Hidalgo, J., Gallegos-García, A., Martínez-López, B., Morey, S. L., y O'Brien, J. J. (2006). Seasonal upwelling on the Western and Southern Shelves of the Gulf of Mexico. *Ocean Dynamics*, **56**(3-4): 333–338.
- Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Mateos-Jasso, A., y Morey Benjamín Martínez-López, S. L. (2014). The response of the Gulf of Mexico to wind and heat flux forcing: What has been learned in recent years? *Atmósfera*, **27**(3): 317–334.
- Zeng, X., Li, Y., y He, R. (2015). Predictability of the Loop Current variation and eddy shedding process in the Gulf of Mexico using an artificial neural network approach. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **32**(5): 1098–1111.

## Anexos

---

### Anexo 1

**A.** Análisis de Kruskal- Wallis para diferencias entre años para cada región de estudio.

Lo subrayado en gris son los valores significativos (pvalue <0.05)

H0: las concentraciones de  $Chl\alpha_{sat}$  y tasas de PP son iguales de 2002 a 2020.

Ha: las concentraciones de  $Chl\alpha_{sat}$  y tasas de PP son diferentes de 2002 a 2020.

$\alpha = 0.05$

**Tabla 2.** Análisis de Kruskal- Wallis para diferencias entre años para cada región de estudio.

Área de estudio	$Chl\alpha_{sat}$ (pvalue)	PP (pvalue)
C1	0.9669	0.8138
C2	0.0937	0.0112
T1	0.1760	0.2603
T2	0.2192	0.2399
P1	0.4887	0.7011
P2	0.0604	0.1685

Análisis post-hoc método Bonferroni

H0: las tasas de PP son iguales en año<sub>i</sub> y año<sub>j</sub> en la región oceánica de Coatzacoalcos (C2).

Ha: las tasas de PP son diferentes en año<sub>i</sub> y año<sub>j</sub> en la región oceánica de Coatzacoalcos (C2).

**Tabla 3.** Análisis post-hoc método Bonferroni para diferencias entre años de la región C2.

Año	PP (pvalue)
2002-2003	1
2002-2004	1
2002-2005	1
2002-2006	1
2002-2007	1
2002-2008	1

**Continuación**

<b>Año</b>	<b>PP (pvalue)</b>
2002-2009	1
2002-2010	0.085
2002-2011	1
2002-2012	1
2002-2013	1
2002-2014	1
2002-2015	1
2002-2016	1
2002-2017	1
2002-2018	1
2002-2019	1
2002-2020	1
2003-2004	1
2003-2005	1
2003-2006	1
2003-2007	1
2003-2008	1
2003-2009	1
2003-2010	1
2003-2011	1
2003-2012	1
2003-2013	1
2003-2014	1
2003-2015	1
2003-2016	1
2003-2017	1
2003-2018	1
2003-2019	1
2003-2020	1
2004-2005	1
2004-2006	1

**Continuación**

<b>Año</b>	<b>PP (pvalue)</b>
2004-2007	1
2004-2008	1
2004-2009	1
2004-2010	0.031
2004-2011	1
2004-2012	1
2004-2013	1
2004-2014	1
2004-2015	1
2004-2016	1
2004-2017	1
2004-2018	1
2004-2019	1
2004-2020	1
2005-2006	1
2005-2007	1
2005-2008	1
2005-2009	1
2005-2010	0.289
2005-2011	1
2005-2012	1
2005-2013	1
2005-2014	1
2005-2015	1
2005-2016	1
2005-2017	1
2005-2018	1
2005-2019	1
2005-2020	1
2006-2007	1
2006-2008	1

**Continuación**

<b>Año</b>	<b>PP (pvalue)</b>
2006-2009	1
2006-2010	1
2006-2011	1
2006-2012	1
2006-2013	1
2006-2014	1
2006-2015	1
2006-2016	1
2006-2017	1
2006-2018	1
2006-2019	1
2006-2020	1
2007-2008	1
2007-2009	1
2007-2010	0.299
2007-2011	1
2007-2012	1
2007-2013	1
2007-2014	1
2007-2015	1
2007-2016	1
2007-2017	1
2007-2018	1
2007-2019	1
2007-2020	1
2008-2009	1
2008-2010	1
2008-2011	1
2008-2012	1
2008-2013	1
2008-2014	1

**Continuación**

<b>Año</b>	<b>PP (pvalue)</b>
2008-2015	1
2008-2016	1
2008-2017	1
2008-2018	1
2008-2019	1
2008-2020	1
2009-2010	0.011
2009-2011	1
2009-2012	1
2009-2013	1
2009-2014	1
2009-2015	1
2009-2016	1
2009-2017	1
2009-2018	1
2009-2019	1
2009-2020	1
2010-2011	1
2010-2012	0.043
2010-2013	0.12
2010-2014	1
2010-2015	1
2010-2016	0.252
2010-2017	0.23
2010-2018	0.548
2010-2019	0.962
2010-2020	1
2011-2012	1
2011-2013	1
2011-2014	1
2011-2015	1

**Continuación**

<b>Año</b>	<b>PP (pvalue)</b>
2011-2016	1
2011-2017	1
2011-2018	1
2011-2019	1
2011-2020	1
2012-2013	1
2012-2014	1
2012-2015	1
2012-2016	1
2012-2017	1
2012-2018	1
2012-2019	1
2012-2020	1
2013-2014	1
2013-2015	1
2013-2016	1
2013-2017	1
2013-2018	1
2013-2019	1
2013-2020	1
2014-2015	1
2014-2016	1
2014-2017	1
2014-2018	1
2014-2019	1
2014-2020	1
2015-2016	1
2015-2017	1
2015-2018	1
2015-2019	1
2015-2020	1

**Continuación**

Año	PP (pvalue)
2016-2017	1
2016-2018	1
2016-2019	1
2016-2020	1
2017-2018	1
2017-2019	1
2017-2020	1
2018-2019	1
2018-2020	1
2019-2020	1

**B.** Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre regiones.

H<sub>0</sub>: las concentraciones de Chl<sub>a<sub>sat</sub></sub> y tasas de PP son iguales en la región<sub>*i*</sub> y la región<sub>*j*</sub>.

H<sub>a</sub>: las concentraciones de Chl<sub>a<sub>sat</sub></sub> y tasas de PP son diferentes en la región<sub>*i*</sub> y la región<sub>*j*</sub>.

**Tabla 4.** Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre regiones de la Chl<sub>a<sub>sat</sub></sub> y PP

Áreas de estudio	Chl <sub>a<sub>sat</sub></sub> (pvalue)	PP (pvalue)
C1-C2	0.0000	0.0000
C1-P1	0.0000	0.0000
C1-P2	0.0000	0.0000
C1-T1	0.0000	0.0000
C1-T2	0.0000	0.0000
C2-P1	0.0000	0.0000
C2-P2	0.0088	1.0000
C2-T1	0.0000	0.0000
C2-T2	0.0000	0.0004
P1-P2	0.0000	0.0000
P1-T1	1.0000	1.0000
P1-T2	0.0000	0.0000
P2-T1	0.0000	0.0000
P2-T2	0.2171	0.2651
T1-T2	0.0000	0.0000

**C. Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre regiones por año de  $Chla_{sat}$  y PP.**

H0: las concentraciones de  $Chla_{sat}$  son iguales en la región<sub>i</sub> y la región<sub>j</sub> en el año n.

Ha: las concentraciones de  $Chla_{sat}$  son diferentes en la región<sub>i</sub> y la región<sub>j</sub> en el año n.

**Tabla 5.** Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre regiones por año de  $Chla_{sat}$ .

Año	C1-C2	C1-P1	C2-P1	C1-P2	C2-P2	P1-P2	C1-T1	C2-T1	P1-T1	P2-T1	C1-T2	C2-T2	P1-T2	P2-T2	T1-T2
2002	0.0506	1.0000	0.8267	0.0045	1.0000	0.1386	1.0000	1.0000	1.0000	0.3698	0.0004	1.0000	0.0202	1.0000	0.0657
2003	0.0004	1.0000	0.0866	0.0000	1.0000	0.0123	1.0000	0.1381	1.0000	0.0214	0.0000	1.0000	0.0001	1.0000	0.0002
2004	0.0000	0.9791	0.0200	0.0000	1.0000	0.0221	0.8967	0.0229	1.0000	0.0253	0.0000	1.0000	0.0004	1.0000	0.0005
2005	0.0002	1.0000	0.0702	0.0000	1.0000	0.0024	1.0000	0.0640	1.0000	0.0021	0.0000	1.0000	0.0015	1.0000	0.0013
2006	0.0002	0.2886	0.6994	0.0000	1.0000	0.0048	0.4336	0.4784	1.0000	0.0026	0.0000	0.7840	0.0013	1.0000	0.0007
2007	0.0001	1.0000	0.0413	0.0002	1.0000	0.0792	1.0000	0.0253	1.0000	0.0499	0.0000	1.0000	0.0002	1.0000	0.0001
2008	0.0010	1.0000	0.4444	0.0000	1.0000	0.0067	1.0000	0.1828	1.0000	0.0018	0.0000	0.6677	0.0004	1.0000	0.0001
2009	0.0001	1.0000	0.0270	0.0000	1.0000	0.0007	1.0000	0.0329	1.0000	0.0009	0.0000	1.0000	0.0006	1.0000	0.0008
2010	0.0018	1.0000	0.3458	0.0000	1.0000	0.0043	1.0000	0.1421	1.0000	0.0012	0.0000	0.7322	0.0003	1.0000	0.0001
2011	0.0007	0.3924	0.9371	0.0000	1.0000	0.0052	1.0000	0.3371	1.0000	0.0010	0.0000	0.6677	0.0016	1.0000	0.0003
2012	0.0001	0.5939	0.2213	0.0000	1.0000	0.0064	0.8202	0.1504	1.0000	0.0038	0.0000	0.9167	0.0002	1.0000	0.0001
2013	0.0001	1.0000	0.0947	0.0000	1.0000	0.0017	1.0000	0.0792	1.0000	0.0013	0.0000	1.0000	0.0015	1.0000	0.0012
2014	0.0000	0.3638	0.1985	0.0000	1.0000	0.0163	1.0000	0.0515	1.0000	0.0030	0.0000	1.0000	0.0013	1.0000	0.0002
2015	0.0016	1.0000	0.0680	0.0000	1.0000	0.0012	1.0000	0.0792	1.0000	0.0014	0.0000	1.0000	0.0001	1.0000	0.0001
2016	0.0003	1.0000	0.0052	0.0002	1.0000	0.0041	1.0000	0.0180	1.0000	0.0147	0.0000	1.0000	0.0001	1.0000	0.0003
2017	0.0003	1.0000	0.0702	0.0000	1.0000	0.0007	0.6225	0.3638	1.0000	0.0069	0.0000	1.0000	0.0002	1.0000	0.0025
2018	0.0002	1.0000	0.1232	0.0000	1.0000	0.0060	1.0000	0.0893	1.0000	0.0040	0.0000	1.0000	0.0010	1.0000	0.0007
2019	0.0001	1.0000	0.0025	0.0000	1.0000	0.0007	1.0000	0.0174	1.0000	0.0056	0.0002	1.0000	0.0032	1.0000	0.0214
2020	0.0549	1.0000	0.8385	0.2160	1.0000	1.0000	1.0000	0.9969	1.0000	1.0000	0.0549	1.0000	0.8385	1.0000	0.9969

H0: las tasas de PP son iguales en la región<sub>i</sub> y la región<sub>j</sub> en el año n.

Ha: las tasas de PP son diferentes en la región<sub>i</sub> y la región<sub>j</sub> en el año n.

**Tabla 6.** Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre regiones por año de PP.

Año	C1-C2	C1-P1	C2-P1	C1-P2	C2-P2	P1-P2	C1-T1	C2-T1	P1-T1	P2-T1	C1-T2	C2-T2	P1-T2	P2-T2	T1-T2
2002	0.0463	1.0000	0.9958	0.0040	1.0000	0.1756	1.0000	1.0000	1.0000	0.2768	0.0005	1.0000	0.0387	1.0000	0.0657
2003	0.0008	1.0000	0.0680	0.0005	1.0000	0.0484	1.0000	0.1462	1.0000	0.1066	0.0000	1.0000	0.0006	1.0000	0.0018
2004	0.0000	1.0000	0.0180	0.0001	1.0000	0.0680	1.0000	0.0237	1.0000	0.0866	0.0000	1.0000	0.0021	1.0000	0.0029
2005	0.0001	1.0000	0.0454	0.0000	1.0000	0.0080	1.0000	0.0340	1.0000	0.0058	0.0000	1.0000	0.0019	1.0000	0.0013
2006	0.0001	0.2335	0.6677	0.0000	1.0000	0.0221	0.6524	0.2399	1.0000	0.0052	0.0000	1.0000	0.0093	1.0000	0.0020
2007	0.0001	1.0000	0.0340	0.0007	1.0000	0.1268	1.0000	0.0132	1.0000	0.0548	0.0000	1.0000	0.0006	1.0000	0.0002
2008	0.0011	1.0000	0.1197	0.0001	1.0000	0.0132	1.0000	0.0531	1.0000	0.0050	0.0000	1.0000	0.0003	1.0000	0.0001
2009	0.0002	1.0000	0.0064	0.0000	1.0000	0.0007	1.0000	0.0123	1.0000	0.0016	0.0000	1.0000	0.0004	1.0000	0.0008
2010	0.0021	1.0000	0.5800	0.0000	1.0000	0.0261	1.0000	0.1547	1.0000	0.0043	0.0000	1.0000	0.0040	1.0000	0.0005
2011	0.0004	0.3732	0.7840	0.0000	1.0000	0.0193	1.0000	0.1985	1.0000	0.0026	0.0000	1.0000	0.0077	1.0000	0.0009
2012	0.0003	1.0000	0.1636	0.0000	1.0000	0.0340	1.0000	0.0893	1.0000	0.0169	0.0000	1.0000	0.0011	1.0000	0.0004
2013	0.0000	1.0000	0.0147	0.0000	1.0000	0.0026	1.0000	0.0111	1.0000	0.0019	0.0000	1.0000	0.0025	1.0000	0.0018
2014	0.0000	0.8577	0.0768	0.0000	1.0000	0.0147	1.0000	0.0187	1.0000	0.0029	0.0000	1.0000	0.0029	1.0000	0.0005
2015	0.0008	1.0000	0.0187	0.0000	1.0000	0.0018	1.0000	0.0261	1.0000	0.0027	0.0000	1.0000	0.0002	1.0000	0.0003
2016	0.0003	1.0000	0.0064	0.0005	1.0000	0.0103	1.0000	0.0048	1.0000	0.0077	0.0000	1.0000	0.0004	1.0000	0.0003
2017	0.0002	1.0000	0.0454	0.0000	1.0000	0.0021	1.0000	0.1035	1.0000	0.0058	0.0000	1.0000	0.0003	1.0000	0.0009
2018	0.0005	1.0000	0.1097	0.0000	1.0000	0.0119	1.0000	0.0566	1.0000	0.0054	0.0000	1.0000	0.0020	1.0000	0.0008
2019	0.0004	1.0000	0.0018	0.0010	1.0000	0.0046	1.0000	0.0200	1.0000	0.0440	0.0022	1.0000	0.0096	1.0000	0.0816
2020	0.0198	1.0000	0.3267	0.3986	1.0000	1.0000	1.0000	0.5842	1.0000	1.0000	0.0699	1.0000	0.8385	1.0000	1.0000

**D.** Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre regiones por mes de  $Chla_{sat}$  y PP.

H0: las concentraciones de  $Chla_{sat}$  son iguales en la región<sub>i</sub> y la región<sub>j</sub> en el mes n.

Ha: las concentraciones de  $Chla_{sat}$  son diferentes en la región<sub>i</sub> y la región<sub>j</sub> en el mes n.

**Tabla 7.** Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre regiones por mes de  $Chla_{sat}$ .

Mes	C1-C2	C1-P1	C2-P1	C1-P2	C2-P2	P1-P2	C1-T1	C2-T1	P1-T1	P2-T1	C1-T2	C2-T2	P1-T2	P2-T2	T1-T2
enero	0.0000	0.6900	0.0010	0.0000	1.0000	0.0001	0.1600	0.0088	1.0000	0.0010	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
febrero	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0003	1.0000	0.0001	1.0000	0.0007	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
marzo	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0001	1.0000	0.0011	1.0000	0.0250	0.0000	1.0000	0.0000	0.6500	0.0000
abril	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0001	1.0000	0.0019	1.0000	0.0094	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
mayo	0.0000	1.0000	0.0012	0.0000	1.0000	0.0003	0.1300	0.0660	1.0000	0.0230	0.0000	0.7400	0.0000	1.0000	0.0000
junio	0.0000	0.0250	0.9300	0.0000	1.0000	0.0100	0.2700	0.1300	1.0000	0.0005	0.0000	0.1000	0.0001	1.0000	0.0000
julio	0.0001	0.0077	1.0000	0.0000	0.0700	0.0017	1.0000	0.0710	1.0000	0.0000	0.0000	0.0190	0.0003	1.0000	0.0000
agosto	0.0001	0.0041	1.0000	0.0000	0.0590	0.0026	1.0000	0.0560	0.6300	0.0000	0.0000	0.0220	0.0008	1.0000	0.0000
septiembre	0.0000	0.4300	0.1900	0.0000	0.3100	0.0000	1.0000	0.0340	1.0000	0.0000	0.0000	0.1100	0.0000	1.0000	0.0000
octubre	0.0000	0.2100	0.0890	0.0000	1.0000	0.0002	0.4400	0.0370	1.0000	0.0001	0.0000	0.0580	0.0000	1.0000	0.0000
noviembre	0.0000	0.2100	0.0580	0.0000	1.0000	0.0000	0.0890	0.1400	1.0000	0.0002	0.0000	0.0770	0.0000	1.0000	0.0000
diciembre	0.0000	0.8400	0.0065	0.0000	1.0000	0.0000	0.1000	0.0950	1.0000	0.0003	0.0000	0.3700	0.0000	1.0000	0.0000

H0: las tasas de PP son iguales en la región<sub>i</sub> y la región<sub>j</sub> en el mes n.

Ha: las tasas de PP son diferentes en la región<sub>i</sub> y la región<sub>j</sub> en el mes n.

**Tabla 8.** Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre regiones por mes de PP.

PP	C1-C2	C1-P1	C2-P1	C1-P2	C2-P2	P1-P2	C1-T1	C2-T1	P1-T1	P2-T1	C1-T2	C2-T2	P1-T2	P2-T2	T1-T2
enero	0.0000	1.0000	0.0005	0.0000	1.0000	0.0001	0.4489	0.0024	1.0000	0.0006	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
febrero	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0003	1.0000	0.0000	1.0000	0.0004	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
marzo	0.0000	1.0000	0.0000	0.0012	1.0000	0.0001	1.0000	0.0000	1.0000	0.0344	0.0000	1.0000	0.0000	0.5334	0.0000
abril	0.0000	1.0000	0.0000	0.0057	1.0000	0.0001	1.0000	0.0000	1.0000	0.0268	0.0000	1.0000	0.0000	0.9422	0.0000
mayo	0.0000	1.0000	0.0000	0.0001	1.0000	0.0003	0.5779	0.0074	1.0000	0.1485	0.0000	1.0000	0.0000	0.7021	0.0001
junio	0.0000	0.0523	0.3258	0.0000	1.0000	0.0037	0.2462	0.0727	1.0000	0.0004	0.0000	0.2202	0.0000	1.0000	0.0000
julio	0.0001	0.0127	1.0000	0.0000	0.0619	0.0006	1.0000	0.0523	1.0000	0.0000	0.0000	0.0456	0.0004	1.0000	0.0000
agosto	0.0001	0.0033	1.0000	0.0000	0.0630	0.0031	1.0000	0.0550	0.5919	0.0000	0.0000	0.0232	0.0009	1.0000	0.0000
septiembre	0.0000	0.0599	0.5476	0.0000	0.3413	0.0002	0.8517	0.0326	1.0000	0.0000	0.0000	0.0619	0.0000	1.0000	0.0000
octubre	0.0000	0.1098	0.1501	0.0000	1.0000	0.0005	0.6074	0.0200	1.0000	0.0000	0.0000	0.0720	0.0000	1.0000	0.0000
noviembre	0.0000	0.2124	0.0299	0.0000	1.0000	0.0001	0.1456	0.0464	1.0000	0.0001	0.0000	0.2532	0.0000	1.0000	0.0000
diciembre	0.0000	0.8110	0.0068	0.0000	1.0000	0.0000	0.1246	0.0782	1.0000	0.0002	0.0000	0.4429	0.0000	1.0000	0.0000

**E.** Análisis Post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre meses por región de  $Chla_{sat}$  y PP.

H0: las concentraciones de  $Chla_{sat}$  son iguales en la mes<sub>i</sub> y el mes<sub>j</sub> en la región x.

Ha: las concentraciones de  $Chla_{sat}$  son diferentes en la mes<sub>i</sub> y el mes<sub>j</sub> en la región x.

**Tabla 9.** Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre meses por región de Chla<sub>sat</sub>.

<b>Mes vs mes</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>
abril-agosto	1.0000	1.0000	0.0000	0.0003	1.0000	0.0424
abril-diciembre	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.2160
agosto-diciembre	0.0102	0.0844	0.0000	0.0000	0.6575	0.0000
abril-enero	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0256
agosto-enero	0.2095	0.2306	0.0000	0.0000	0.0962	0.0000
diciembre-enero	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
abril-febrero	0.0696	0.0139	1.0000	1.0000	1.0000	0.1143
agosto-febrero	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0990	0.0000
diciembre-febrero	0.4482	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
enero-febrero	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
abril-julio	0.0616	0.0422	0.0002	0.0019	1.0000	0.4272
agosto-julio	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
diciembre-julio	0.4980	1.0000	0.0000	0.0000	0.2958	0.0000
enero-julio	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0373	0.0000
febrero-julio	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0384	0.0000
abril-junio	1.0000	1.0000	0.0004	0.3746	0.0747	0.4113
agosto-junio	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
diciembre-junio	0.0004	0.0001	0.0000	0.0055	0.0002	0.0000
enero-junio	0.0145	0.0003	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
febrero-junio	1.0000	0.1412	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000
julio-junio	1.0000	0.3592	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
abril-marzo	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
agosto-marzo	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
diciembre-marzo	0.0001	0.0019	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
enero-marzo	0.0057	0.0070	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
febrero-marzo	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
julio-marzo	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0014
junio-marzo	1.0000	1.0000	0.0000	0.0101	0.0219	0.0014
abril-mayo	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.1850	1.0000
agosto-mayo	0.4577	0.7156	0.2362	0.0953	1.0000	1.0000



## Continuación

Mes vs mes	C1	C2	P1	P2	T1	T2
junio-septiembre	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.1012	1.0000
marzo-septiembre	1.0000	1.0000	0.0287	0.0000	1.0000	0.0001
mayo-septiembre	0.7041	1.0000	1.0000	0.1916	0.2483	1.0000
noviembre-septiembre	0.0001	0.0114	1.0000	0.0037	1.0000	0.0001
octubre-septiembre	0.0634	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

H0: las concentraciones de la PP son iguales en la mes<sub>i</sub> y el mes<sub>j</sub> en la región x.

Ha: las concentraciones de la PP son diferentes en la mes<sub>i</sub> y el mes<sub>j</sub> en la región x.

**Tabla 10.** Análisis post-hoc método Bonferroni, para diferencias entre meses por región de PP.

Mes vs mes	C1	C2	P1	P2	T1	T2
abril-agosto	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.5225	0.0001
abril-diciembre	0.0000	0.0288	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
agosto-diciembre	0.0004	0.0057	0.0000	0.0003	0.0517	0.0000
abril-enero	0.0000	0.0019	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
agosto-enero	0.0011	0.0003	0.0000	0.0000	0.0006	0.0000
diciembre-enero	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
abril-febrero	0.0003	0.0089	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
agosto-febrero	0.0775	0.0015	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000
diciembre-febrero	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
enero-febrero	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
abril-julio	0.4464	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0099
agosto-julio	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
diciembre-julio	0.0962	0.6627	0.0000	0.0109	0.1468	0.0015
enero-julio	0.2041	0.0760	0.0000	0.0000	0.0022	0.0000
febrero-julio	1.0000	0.2625	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000
abril-junio	1.0000	1.0000	0.0000	0.0058	0.0021	0.0243
agosto-junio	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
diciembre-junio	0.0000	0.0002	0.0001	0.5974	0.0001	0.0042

## Continuación

<b>Mes vs mes</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>
enero-junio	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008	0.0000	0.0000
febrero-junio	0.0015	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
julio-junio	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
abril-marzo	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
agosto-marzo	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0081	0.0000
diciembre-marzo	0.0281	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
enero-marzo	0.0640	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
febrero-marzo	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
julio-marzo	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0264	0.0000
junio-marzo	1.0000	0.1232	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
abril-mayo	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.2100	1.0000
agosto-mayo	0.7484	1.0000	0.0002	0.0004	1.0000	0.1284
diciembre-mayo	0.0000	0.0001	1.0000	1.0000	0.0176	1.0000
enero-mayo	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	0.0002	0.0388
febrero-mayo	0.0000	0.0000	0.9953	1.0000	0.0000	0.0076
julio-mayo	0.0077	1.0000	0.0165	0.0118	1.0000	1.0000
junio-mayo	1.0000	1.0000	0.0453	0.6023	1.0000	1.0000
marzo-mayo	0.0287	0.0549	0.4581	1.0000	0.0025	0.2647
abril-noviembre	0.0000	1.0000	1.0000	0.2450	1.0000	1.0000
agosto-noviembre	0.0007	1.0000	0.0003	0.1635	1.0000	0.0685
diciembre-noviembre	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
enero-noviembre	1.0000	0.3649	1.0000	0.0532	1.0000	0.0532
febrero-noviembre	1.0000	1.0000	0.6127	0.0065	0.8546	0.0106
julio-noviembre	0.1455	1.0000	0.0226	1.0000	1.0000	1.0000
junio-noviembre	0.0000	0.6616	0.0617	1.0000	0.0060	1.0000
marzo-noviembre	0.0442	1.0000	0.2670	0.0055	1.0000	0.3559
mayo-noviembre	0.0000	0.3306	1.0000	1.0000	0.4764	1.0000
abril-octubre	0.0364	1.0000	0.0410	0.0000	1.0000	0.0000
agosto-octubre	1.0000	1.0000	0.0860	1.0000	1.0000	1.0000
diciembre-octubre	1.0000	0.0000	0.2227	0.0098	1.0000	0.0000
enero-octubre	1.0000	0.0000	0.0171	0.0000	0.6473	0.0000

## Continuación

<b>Mes vs mes</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>
febrero-octubre	1.0000	0.0000	0.0051	0.0000	0.1756	0.0000
julio-octubre	1.0000	0.2326	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
junio-octubre	0.1282	1.0000	1.0000	1.0000	0.0441	1.0000
marzo-octubre	1.0000	0.0054	0.0016	0.0000	1.0000	0.0000
mayo-octubre	0.0003	1.0000	1.0000	0.0106	1.0000	0.0562
noviembre-octubre	1.0000	0.0455	1.0000	1.0000	1.0000	0.0284
abril-septiembre	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.6863	0.0000
agosto-septiembre	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
diciembre-septiembre	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000	0.0725	0.0000
enero-septiembre	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009	0.0000
febrero-septiembre	0.0124	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000
julio-septiembre	1.0000	0.2387	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
junio-septiembre	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
marzo-septiembre	1.0000	0.0056	0.0000	0.0000	0.0119	0.0000
mayo-septiembre	1.0000	1.0000	0.1156	0.0001	1.0000	0.0062
noviembre-septiembre	0.0001	0.0469	0.1564	0.0416	1.0000	0.0027
octubre-septiembre	0.6372	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

## Anexo 2

Coefficientes de correlación y pvalue de las 6 regiones de las distintas variables. Remarcado en negro se encuentra el valor de mayor correlación y en azul las correlaciones NO significativas (pvalue > 0.05) con un  $\alpha = 0.05$ .

**Tabla 11.** Coeficientes de correlación y pvalue de las 6 regiones de las distintas variables.

		Lag	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
SST y Chl <sub>a</sub> <sup>sat</sup>	C1	Corr	0.429	0.523	0.531	0.315	-0.158	-0.458	<b>-0.588</b>	-0.518	-0.372
		pvalue	0	0	0	0	0.021	0	0	0	0
	C2	Corr	0.386	0.39	0.263	<b>-0.012</b>	-0.3	-0.424	<b>-0.432</b>	-0.342	-0.214
		pvalue	0	0	0	<b>0.861</b>	0	0	0	0	0.002
	T1	Corr	0.273	0.174	<b>0.007</b>	-0.157	<b>-0.318</b>	-0.326	-0.276	-0.2	<b>-0.063</b>
		pvalue	0	0.011	<b>0.914</b>	0.022	0	0	0	0.004	<b>0.359</b>
	T2	Corr	0.527	0.242	<b>-0.133</b>	-0.479	-0.706	<b>-0.71</b>	-0.518	-0.199	0.149
		pvalue	0	0	<b>0.053</b>	0	0	0	0	0.004	0.03
	P1	Corr	0.395	<b>0.111</b>	-0.182	-0.423	<b>-0.561</b>	-0.542	-0.395	-0.16	0.157
		pvalue	0	<b>0.105</b>	0.008	0	0	0	0	0.02	0.022
	P2	Corr	0.37	<b>0.045</b>	-0.32	-0.601	<b>-0.737</b>	-0.647	-0.404	<b>-0.055</b>	0.305
		pvalue	0	<b>0.507</b>	0	0	0	0	0	<b>0.418</b>	0
SSH y Chl <sub>a</sub> <sup>sat</sup>	C1	Corr	-0.283	<b>0.017</b>	0.303	0.54	<b>0.458</b>	0.209	<b>0.052</b>	<b>-0.07</b>	-0.234
		pvalue	0	<b>0.809</b>	0	0	0	0.002	<b>0.448</b>	<b>0.306</b>	0.001
	C2	Corr	<b>0.065</b>	0.152	0.175	<b>0.089</b>	<b>0.002</b>	-0.148	-0.227	<b>-0.276</b>	-0.254
		pvalue	<b>0.346</b>	0.026	0.011	<b>0.192</b>	<b>0.973</b>	0.031	0.001	0	0
	T1	Corr	0.148	0.19	0.176	0.195	0.186	<b>0.03</b>	<b>-0.089</b>	-0.126	<b>-0.206</b>
		pvalue	0.03	0.006	0.01	0.004	0.006	<b>0.659</b>	<b>0.194</b>	0.065	0.003
	T2	Corr	<b>0.46</b>	0.287	<b>0.018</b>	-0.217	-0.37	-0.379	-0.357	-0.272	<b>-0.068</b>
		pvalue	0	0	<b>0.792</b>	0.002	0	0	0	0	<b>0.322</b>
	P1	Corr	<b>0.433</b>	0.352	0.266	0.215	<b>0.127</b>	<b>-0.098</b>	-0.27	-0.303	-0.188
		pvalue	0	0	0	0.002	<b>0.064</b>	<b>0.153</b>	0	0	0.006
	P2	Corr	0.232	<b>0.083</b>	-0.135	-0.367	<b>-0.521</b>	-0.493	-0.349	-0.178	<b>-0.015</b>
		pvalue	0.001	<b>0.224</b>	0.05	0	0	0	0	0.01	<b>0.832</b>
SST y PP	C1	Corr	0.569	0.572	0.391	<b>-0.004</b>	-0.509	<b>-0.695</b>	-0.612	-0.412	-0.211
		pvalue	0	0	0	<b>0.948</b>	0	0	0	0	0.002
	C2	Corr	0.369	0.162	-0.144	-0.469	<b>-0.679</b>	-0.605	-0.379	<b>-0.093</b>	0.161
		pvalue	0	0.018	0.036	0	0	0	0	<b>0.174</b>	0.019
	T1	Corr	0.308	<b>0.058</b>	-0.23	-0.448	<b>-0.588</b>	-0.49	-0.293	<b>-0.067</b>	0.166
		pvalue	0	<b>0.394</b>	0.001	0	0	0	0	<b>0.331</b>	0.015
	T2	Corr	0.349	<b>-0.039</b>	-0.444	-0.738	<b>-0.84</b>	-0.676	-0.342	<b>0.064</b>	0.431
		pvalue	0	<b>0.568</b>	0	0	0	0	0	<b>0.349</b>	0
	P1	Corr	0.335	<b>-0.074</b>	-0.453	-0.711	<b>-0.792</b>	-0.638	-0.339	<b>0.031</b>	0.413
		pvalue	0	<b>0.28</b>	0	0	0	0	0	<b>0.65</b>	0
	P2	Corr	0.228	-0.192	-0.581	-0.823	<b>-0.861</b>	-0.637	-0.264	0.17	0.549
		pvalue	0.001	0.005	0	0	0	0	0	0.013	0
SSH y PP	C1	Corr	<b>-0.06</b>	0.264	0.498	<b>0.522</b>	0.318	<b>0.045</b>	<b>-0.1</b>	-0.211	-0.393
		pvalue	<b>0.38</b>	0	0	0	0	<b>0.512</b>	<b>0.145</b>	0.002	0
	C2	Corr	0.24	0.261	0.155	<b>-0.064</b>	-0.241	-0.401	<b>-0.426</b>	-0.374	-0.23
		pvalue	0	0	0.024	<b>0.349</b>	0	0	0	0	0.001
	T1	Corr	0.358	<b>0.361</b>	0.246	0.143	<b>0.033</b>	-0.157	-0.247	-0.222	-0.22
		pvalue	0	0	0	0.037	<b>0.628</b>	0.022	0	0.001	0.001
	T2	Corr	0.351	<b>0.117</b>	-0.151	-0.373	<b>-0.498</b>	-0.46	-0.339	-0.14	<b>0.092</b>
		pvalue	0	<b>0.089</b>	0.028	0	0	0	0	0.041	<b>0.178</b>
	P1	Corr	<b>0.55</b>	0.406	0.215	<b>0.021</b>	-0.132	-0.331	-0.424	-0.375	-0.157
		pvalue	0	0	0.002	<b>0.759</b>	0.053	0	0	0	0.022
	P2	Corr	0.178	<b>-0.04</b>	-0.283	-0.491	<b>-0.597</b>	-0.519	-0.324	-0.094	<b>0.103</b>
		pvalue	0.009	<b>0.56</b>	0	0	0	0	0	0.17	<b>0.133</b>