

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



**FITOGEOGRAFIA ASOCIADA A LOS PIGMENTOS Y LA FORMA
ESPECTRAL DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE LUZ POR
FITOPLANCTON EN TEMPORADA DE INVIERNO EN EL GOLFO
DE MÉXICO**

T E S I S

**QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA
PRESENTA**

ALEJANDRA DE JESÚS CASTILLO RAMÍREZ

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO. JULIO DE 2016



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS**



**FITOGEOGRAFIA ASOCIADA A LOS PIGMENTOS Y LA FORMA
ESPECTRAL DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE LUZ POR
FITOPLANCTON EN TEMPORADA DE INVIERNO EN EL GOLFO DE
MÉXICO**

T E S I S

**QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA

PRESENTA

ALEJANDRA DE JESÚS CASTILLO RAMÍREZ

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO. JULIO DE 2016

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA

FITOGEOGRAFIA ASOCIADA A LOS PIGMENTOS Y LA FORMA
ESPECTRAL DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE LUZ POR
FITOPLANCTON EN TEMPORADA DE INVIERNO EN EL GOLFO DE
MÉXICO

T E S I S

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS
EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

ALEJANDRA DE JESÚS CASTILLO RAMÍREZ

APROBADA POR:



DR. ROBERTO MILLÁN NÚÑEZ
DIRECTOR DE TESIS



DR. EDUARDO MILLÁN NÚÑEZ
SINODAL



DRA. ADRIANA GONZÁLEZ SILVERA
SINODAL

Resumen

Durante la campaña oceanográfica XIXIMI-3 llevada a cabo entre el 19 de febrero al 10 de marzo del 2013, se determinaron provincias fitogeográficas asociadas a la forma espectral del fitoplancton, asimismo, determinó su composición taxonómica a través de la razón pigmentaria. Los resultados mostraron que las condiciones oceanográficas estuvieron fuertemente dominadas por las estructuras ciclónicas y anticiclónicas. A 10 m de profundidad se encontraron dos provincias fitogeográficas las cuales estuvieron dominadas por la forma del espectro de absorción de la Chla con un pico máximo a los 440nm y otro a los 675 nm, sin embargo la F1 presentó un hombro de pequeña magnitud alrededor de los 480 nm, lo que nos indicó la presencia de pigmentos como Fuco, Peri, 19Hex y But, los cuales están asociados a organismos como diatomeas, Primnesiofitas, crisofitas y dinoflagelados. En la F2 se observó un hombro a los 460 nm aproximadamente, debido a la presencia de pigmentos como Zea, Dva, Allo, Chlb y Diad, estos se asocian a las cianobacterias, criptofitas, prochlorococcus, clorofitas. A 50 m se observaron cuatro provincias fitogeográficas. Únicamente dos de estas fueron diferentes que las presentadas a 10 m. La F3 presentó un máximo a los 440 nm seguido por uno de la misma magnitud a los 480 nm, lo que nos mostró la presencia de pigmentos como Fuco, Peri, 19Hex y But, los cuales están asociados a organismos como diatomeas, Primnesiofitas, crisofitas y dinoflagelados, en la F4 se observó un hombro bien marcado a los 460 nm característico de pigmentos como Zea, Dva, Allo, Chlb y Diad, estos se asocian a las cianobacterias, criptofitas, diatomeas, dinoflagelados y prochlorococcus.

Palabras Clave: Fitogeografía, Coeficiente de absorción y pigmentos.

Dedicatoria.

A mis padres por su amor, trabajo y sacrificios en todos estos años. Gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Es y será siempre un privilegio ser su hija. Son los mejores, los amo.

A mi padre por ser mi motivación e inspiración desde pequeña para lograr una carrera profesional exitosa.

A mi madre por ser mi mejor amiga y el ejemplo de mujer que quiero ser.

A mi hermano que siempre ha estado junto a mí, brindándome su apoyo incondicional.

A mi tía Magui por haber sido una segunda madre y ayudarme a sobre llevar el estar lejos de casa. Yo sé que siempre estás guiándome y cuidándome desde el cielo.

A mi amiga y colega favorita Cristina, no me alcanzan las palabras para agradecerte el estar conmigo TODOS los días en este camino para terminar la tesis, por tu paciencia, ayuda y por las largas discusiones que tuvimos a cerca de nuestros trabajos.

Agradecimientos

A mi comité de tesis el Dr. Roberto Millán Núñez, el Dr. Eduardo Millán Núñez y la Dra. Adriana González Silvera por haber inculcado en mí un sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico sin los cuales no podría tener una formación académica excelente. Sus conocimientos, orientaciones, manera de trabajar, paciencia y motivación han sido fundamentales en todo este trayecto.

Un agradecimiento singular debo al Dr. Roberto Millán Núñez, que como director de esta tesis me ha orientado, apoyado y corregido en mi labor científica con un interés y una entrega que han sobrepasado, por mucho, todas las expectativas que como alumna deposité en su persona.

A CONACYT por el apoyo brindado mediante la beca otorgada (no. de becario 329232) para la realización de mis estudios de Maestría en Oceanografía Costera en la Facultad de Ciencias Marinas y en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la UABC.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por permitirme trabajar con su base de datos de la campaña oceanográfica XIXIMI-3 llevada a cabo entre el 19 de febrero al 10 de marzo del 2013, así como permitirme utilizar sus instalaciones, como el laboratorio de Lagunas Costeras del departamento de Ecología Marina para el análisis de las muestras.

Índice

1 Introducción	6
1.1 Antecedentes.	14
2 Hipótesis	16
3 Objetivo general	16
3.1 Objetivos particulares.	16
4 Métodos	17
4.1 Área de estudio.....	17
4.2 Colecta de muestras.....	20
4.3 Análisis de fitoplancton.....	21
4.4 Análisis del coeficiente de absorción de luz.....	22
4.5 Análisis de Clorofila a.	23
4.6 Coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton.....	23
4.7 Forma espectral de absorción de luz por fitoplancton.....	23
4.8 Razón azul/rojo.....	24
4.9 Análisis de pigmentos.....	25
4.10 Proporción de tamaños.....	26
4.11 Proporción de pigmentos fotosintéticos y fotoprotectores.....	26
4.12 CHEMTAX.....	27
5 Resultados	27
5.1 Altimetría de la superficie del mar.	27
5.2 Temperatura.....	29
5.3 Salinidad.	31
5.4 Clorofila a.....	32
5.5 Coeficiente de absorción de luz por fitoplancton.....	34
5.6 Coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton.....	39
5.7 Forma espectral del coeficiente de absorción normalizada (A).	46
5.8 Razón Azul/ Rojo.....	51
5.9 Concentración de pigmentos.....	53
5.10 Pigmentos Fotosintéticos y Fotoprotectores.....	57
5.11 Fracción de tamaño.	59

5.12 CHEMTAX.....	61
5.13 Abundancia de fitoplancton.	67
6 Discusiones.	71
7 Conclusiones.	79
8 Bibliografía.	81

Índice de figuras

Figura 1. Espectros característicos de diferentes pigmentos en $\text{m}^2 \text{mg}^{-1}$, derivados de su absorción individual en solventes (fuente: Bricaud et al., 2004). Las curvas punteadas corresponden a pigmentos fotoprotectores y las continuas a pigmentos fotosintéticos.	10
Figura 2. Estaciones de muestreo y profundidad del área de muestreo.....	17
Figura 3. Altimetría de la superficie del mar en el Golfo de México. Los tonos azules indican hundimiento de la superficie, mientras que los colores del verde al rojo indican levantamiento. Cada una de las imágenes es representativa de una fecha: a) 20 de febrero de 2013, b) 27 de febrero de 2013, c) 5 de marzo de 2013 y d) 10 de marzo de 2013.	28
Figura 4. Distribución de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en la parte central sur del Golfo de México a finales del invierno. a) 10 m, b) 50 m y c) estaciones de muestreo.....	30
Figura 5. Distribución de salinidad en la parte central sur del Golfo de México a finales del invierno. a) Salinidad a 10 m de profundidad y b) salinidad 50 m.	31
Figura 6. Distribución de clorofila a (mg m^3) en la parte central sur del Golfo de México a finales del invierno, a) 10 m, b) 50 m y c) estaciones de muestreo.	33
Figura 7. Curvas espectrales del coeficiente de absorción de luz por fitoplancton (a_{ph}) por transecto a 10 m. a) transecto 25, b) transecto 24, c) transecto 23, d) transecto 22, e) transecto 21 y f) transecto 20.	36
Figura 8. Curvas espectrales del coeficiente de absorción de luz por fitoplancton (a_{ph}) por transecto a 50 m. a) transecto 25, b) transecto 24, c) transecto 23, d) transecto 22, e) transecto 21 y f) transecto 20.	38
Figura 9. a) Distribución espacial del coeficiente de absorción específico por fitoplancton (a^*_{ph}) a 440nm a 10 m y b) estaciones de muestreo.	39
Figura 10. Curvas espectrales del coeficiente de absorción específico por fitoplancton (a^*_{ph}) por transecto a 10 m. a) transecto 25, b) transecto 24, c) transecto 23, d) transecto 22, e) transecto 21 y f) transecto 20.	42
Figura 11. a) Distribución espacial del coeficiente de absorción específico por fitoplancton (a^*_{ph}) a 440nm a 50 m y b) estaciones de muestreo.....	43

Figura 12. Curvas espectrales del coeficiente de absorción específico por fitoplancton (a^*_{ph}) por transecto a 50 m. a) transecto 25, b) transecto 24, c) transecto 23, d) transecto 22, e) transecto 21 y f) transecto 20. 45

Figura 13. Forma espectrales de absorción de luz por fitoplancton (A) a 10 y 50 m para el crucero XIXIMI-3. 47

Figura 14. Espectros promedio de absorción normalizada a los 440 nm A (adimensional) a la profundidad de 10 m. Cada uno de los espectros representa una forma. 48

Figura 15. Distribución espacial y localización de provincias fitogeográficas a partir de la forma espectral normalizada (A) a 10 m de profundidad. 48

Figura 16. Espectros promedio de absorción normalizada a los 440 nm A (adimensional) a la profundidad de 50 m. Cada uno de los espectros representa una forma. 49

Figura 17. Distribución espacial y localización de provincias fitogeográficas a partir de la forma espectral normalizada (A) a 50 m de profundidad. 50

Figura 18. Distribución espacial de la razón azul/rojo. a) 10 m, b) 50 m y c) estaciones de muestreo. 52

Figura 19. Concentración de pigmentos a los 10 metros de profundidad (mg/m^3), las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21. 56

Figura 20. Concentración de pigmentos a los 50 metros de profundidad (mg/m^3), las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21 y T20: transecto 20. 56

Figura 21. Concentración de pigmentos fotosintéticos (PSP) y fotoprotectores (PPC) a 10 m. Las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21 y T20: transecto 20. 57

Figura 22. Concentración de pigmentos fotosintéticos (PSP) y fotoprotectores (PPC) a 50 m. Las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21 y T20: transecto 20. 58

Figura 23. Porcentaje de presencia de los diferentes tamaños de fitoplancton a 10 m. Las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21 y T20: transecto 20. 59

Figura 24. Porcentaje de presencia de los diferentes tamaños de fitoplancton a 50 m. Las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21 y T20: transecto 20. 60

Figura 25. Porcentaje de abundancia de los grupos fitoplanctónicos a 10 m. Las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21 y T20: transecto 20. 63

Figura 26. Porcentaje de abundancia de los grupos fitoplanctónicos a 50 m. Las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21. 66

Figura 27. Distribución espacial de fitoplancton total. a) 10 m, b) 50 m y c) estaciones de muestreo. 68

Figura 28. Distribución espacial de diatomeas. a) 10 m, b) 50 m y c) estaciones de muestreo. 69

Figura 29. Distribución espacial de dinoflagelados. a) 10 m, b) 50 m y c) estaciones de muestreo. 70

1 Introducción

La biomasa del fitoplancton y su producción primaria son elementos fundamentales en el conocimiento del ecosistema pelágico, ya que estos representan la base de la cadena alimenticia y soporte de la producción secundaria, asimismo se le considera al fitoplancton como el mayor secuestrador del CO₂ atmosférico y un buen indicador en relación al cambio climático global; por lo que es de suma importancia generar datos a través del tiempo y entender su variabilidad oceanográfica, y el acoplamiento del forzamiento físico-biogequímico de los ecosistemas pelágicos, tanto a nivel regional como a nivel de mesoescala (Gaxiola *et al.*, 2010) (Kahru y Mitchell, 2000).

Es de gran importancia clasificar el océano en provincias biogeográficas porque nos permite conocer las diferentes características de una zona. Debido a su rápida adaptación las poblaciones de fitoplancton pueden aumentar o disminuir según cambios en el ambiente, por tal motivo estos pequeños organismos son de gran ayuda en la clasificación áreas biogeográficas ya que nos brindan información que indica las condiciones del área que se desea estudiar. (<http://cremc.ponce.inter.edu/fitoplancton/importancia.htm>).

Para clasificar áreas fitogeográficas (división en provincias según sus formaciones vegetales) se analiza el coeficiente de absorción de luz, el cual es una propiedad inherente que nos permite evaluar la condición fisiológica de las células y como está varía con la disponibilidad de luz y composición pigmentaria

(Bricaud *et al.*, 2004) (Kirk, 2011). Para poder analizarlo es importante considerar la absorción total [$a(\lambda)$] en término de sus componentes (Sosik y Mitchell, 1995):

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_p(\lambda) + a_s(\lambda) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

λ = Longitud de onda.

$a_w(\lambda)$ = Absorción del agua.

$a_p(\lambda)$ = Absorción del material particulado.

$a_s(\lambda)$ = Absorción por material disuelto.

La absorción por el material particulado se descompone en:

$$a_p(\lambda) = a_{ph}(\lambda) + a_d(\lambda) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$a_{ph}(\lambda)$ = Absorción del fitoplancton.

$a_d(\lambda)$ = Absorción por detritus.

El fitoplancton absorbe la luz disponible en el agua con ayuda de sus pigmentos, y la concentración de estos es la fuente dominante en la variabilidad de la absorción particulada, es conveniente normalizar la absorción a coeficientes de absorción específicos para describir su variabilidad; lo cual se lleva a cabo dividiendo entre el valor de la concentración de clorofila a (Chla) la

cual es el principal pigmento que se encuentra en el fitoplancton excepto en las proclorofitas (Jeffrey *et. al.*, 1997 ;Barocio-León, 2006).

$$a^*_{ph}(\lambda) = a_{ph}(\lambda)/(Chla) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

a^*_{ph} = Coeficiente de absorción específico ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$).

Chla= Concentración de clorofila a.

El coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton ($a^*_{ph}(\lambda)$) es fundamental para entender el comportamiento fisiológico de la célula, y por lo tanto mejorar los modelos analíticos bio-ópticos en la interpretación del color del océano (IOCCG 2000.) El a^*_{ph} varía debido a los cambios en la composición de pigmentos de los diferentes grupos de fitoplancton y por el efecto de paquete debido al tamaño de las células (Sosa-Ávalos *et. al.*, 2015).

El efecto paquete se representa como un aplanamiento de la curva espectral del coeficiente de absorción específico, debido a que los pigmentos se encuentran apilados dentro de los cloroplastos y ocasionan dicho efecto; esto trae como consecuencia la disminución en la eficiencia para absorber la luz, principalmente en células grandes denominadas microfitoplancton. En general se conoce que el efecto paquete se produce en células grandes y con una alta concentración de pigmentos; por lo tanto, se esperaría un efecto de paquete

mayor en aguas con una alta concentración de organismos pertenecientes al grupo denominado microfitoplancton ($>20 \mu\text{m}$) (Macías-Carballo, 2011). Este efecto depende en parte de las contribuciones individuales de los diferentes pigmentos en la absorción total de luz, por lo que es importante considerar sus efectos al estudiar la absorción (Barocio, 2006)

Los pigmentos en el fitoplancton se dividen en tres grupos: Clorofilas (a, b y c), carotenoides (carotenos y sus derivados oxigenados conocidos como xantofilas), y biliproteínas (aloficocianina, ficocianina y ficoeritrina). Estos también se pueden separar de acuerdo con su función en las células de fitoplancton, como fotosintéticos y fotoprotectores (Bidigare *et al.*, 1990). Los pigmentos fotosintéticos tienen como función absorber la energía luminosa en diferentes longitudes de onda para después transferirla a los centros de reacción donde esta es utilizada para procesos fotoquímicos (Masojidek *et al.*, 2004) Los fotoprotectores son principalmente carotenoides y absorben en los 400 y 500 nm, estos son encargados de disipar la energía para proteger a la células de las altas intensidades de luz o radiación UV y tienden disminuir al aumentar la profundidad, ya que en aguas profundas los niveles de radiación de onda corta son bajos; por el contrario, las concentraciones de pigmentos fotosintéticos aumentan con la profundidad ya que los niveles de luz disminuyen en aguas profundas (Pérez *et al.*, 2007)

Cada pigmento en el agua tiene un espectro característico (fig. 1); su diversidad cualitativa y cuantitativa depende de la interacción de numerosos

factores ambientales, pero principalmente de la composición de especies de fitoplancton que se encuentran en la zona a estudiar (Stón y Kosakowska, 2000). La determinación de pigmentos en el fitoplancton se lleva a cabo por el método cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), el cual es una técnica precisa y rápida para la separación e identificación de pigmentos (Llewellyn *et al.*, 2005). Las cantidades y proporciones de pigmentos en una especie en particular son altamente específicos. Por esta razón, la composición de pigmentos en las células vegetales se considera como una característica taxonómica (Stoń y Kosakowska, 2002).

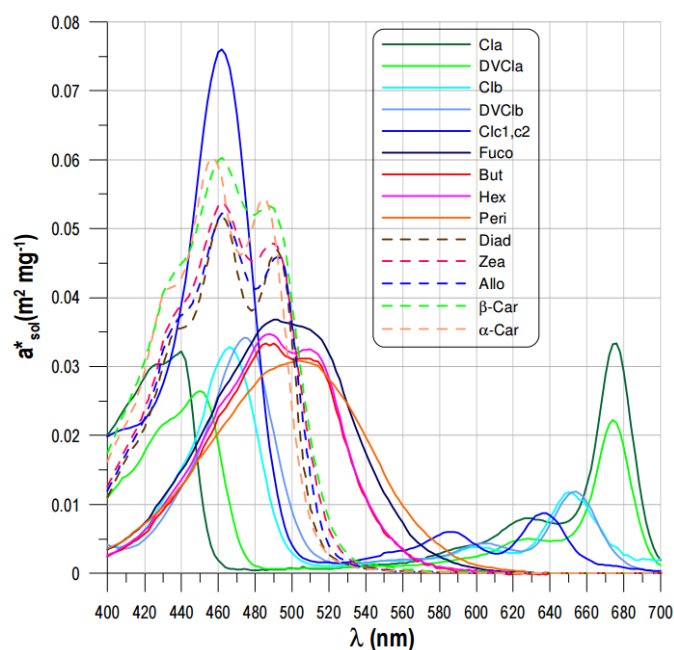


Figura 1. Espectros característicos de diferentes pigmentos en $\text{m}^2 \text{mg}^{-1}$, derivados de su absorción individual en solventes (fuente: Bricaud *et al.*, 2004). Las curvas punteadas corresponden a pigmentos fotoprotectores y las continuas a pigmentos fotosintéticos.

Algunos pigmentos son característicos de grupos de fitoplancton, y otros específicos pueden utilizarse como marcadores de diagnóstico para clasificar conjuntos de fitoplancton (Tabla 1). Este enfoque se ha denominado quimiotaxonomía (CHEMTAX), y ha contribuido en los últimos quince años a una mejor comprensión de la distribución y composición de las poblaciones de fitoplancton oceánicas (Gibb *et al.*, 2001). CHEMTAX es un software que calcula el porcentaje de cada clase algal presente en el área de estudio a partir de las concentraciones de los pigmentos del fitoplancton determinado por HPLC (Mackey *et al.* 1996).

Tabla 1. Pigmentos bio- marcadores diagnósticos (Fuente: Barocio, 2006), abreviatura usada en el texto y clasificación de acuerdo a su principal función, clorofila a (Chla), fotosintéticos (PSP) y fotoprotectores (PPC)

PIGMENTO	ABREVIATURA	CLASIFICACION	GRUPO ALGAL
Monovinil clorofila <i>a</i>	Chla	Chla	Todos los grupos excepto <i>Prochlorofitas</i>
Divinil clorofila <i>a</i>	DVa	Chla	Cianobacterias <i>Prochlorococcus</i>
Clorofila <i>b</i>	Chlb	PSP	Clorofitas, Prasinofitas
Clorofila c2	Chlc2	PSP	Diatomeas, Dinoflagelados, Primnesiofitas, Rafidofitas y
Clorofila c3	Chlc3	PSP	Primnesiofitas, Diatomeas, Crisofitas, Dinoflagelados
19'-Butanoiloxifucoxantina	But	PSP	Crisofitas, Primnesiofitas
Fucoxantina	Fuco	PSP	Diatomeas, Primnesiofitas, Crisofitas,
19'-Hexanoiloxifucoxantina	Hex	PSP	Primnesiofitas
Peridinina	Peri	PSP	Dinoflagelados
Prasinoxantina	Pras	PSP	Prasinofitas
Alloxantina	Allo	PPC	Criptofitas
Diatoxantina	Diat	PPC	Diatomeas, Primnesiofitas
Diadinoxantina	Diad	PPC	Diatomeas, Dinoflagelados, Primnesiofitas, Crisofitas, Rafidofitas,
Violaxantina	Viol	PPC	Clorofitas, Rafidofitas
Luteína	Lut	PPC	Clorofitas, Rodofitas
Zeaxantina	Zea	PPC	Cianobacterias (incluyendo <i>Prochlorococcus</i>) Rodófitas, Prochlorofitas,

Basado en lo antes mencionado, en este estudio la estructura de la comunidad del fitoplancton se caracterizará a partir de la forma espectral de absorción de luz, lo cual nos indica un reflejo de la estructura del fitoplancton, que al denotar un cambio en la forma espectral lo consideraremos como un cambio en la comunidad del fitoplancton, de igual manera utilizaremos la determinación de los pigmentos biomarcadores, así como la taxonomía de fitoplancton por microscopio. A través de esta idea, detectaremos áreas o asociaciones fitogeográficas.

1.1 Antecedentes.

Son pocos los estudios acerca de áreas o provincias del fitoplancton (fitogeografía) relacionados con el coeficiente de absorción de luz por material particulado en columna oceánica. Los primeros estudios realizados en México se llevaron a cabo por Millán-Núñez *et al.* (1997, 2004) y Aguirre-Hernández *et al.* (2004), donde estos autores mencionaron que la variabilidad del coeficiente de absorción se debió principalmente al tamaño y abundancia de las células del fitoplancton, así como a los diferentes pigmentos fotosintéticos. Barocio *et al.* (2006) relacionaron el coeficiente específico de absorción por fitoplancton y la concentración de pigmentos fotosintéticos, concluyendo que la variabilidad de estos parámetros se debió principalmente a la composición pigmentaria de la comunidad del fitoplancton.

Los estudios de distribución, abundancia y caracterización de fitoplancton basados en análisis de pigmentos en la zona profunda del Golfo de México son pocos, la mayoría se ha llevado a cabo en la bahía de Campeche y en la zona costera del golfo, tal es el caso de Signoret *et al.*, (2006) que observaron la variabilidad de la clorofila *a* del oeste al centro del Golfo de México (GM) y encontraron concentraciones de clorofila *a* entre 0.02 y 0.45 mg/m⁻³, también indican que el mayor aporte de biomasa fue nanofitoplanctónica y concluyen que la circulación oceánica determina zonas de alta concentración de clorofila *a* las que difícilmente se pueden detectar por imágenes satelitales.

Quian, *et al.*, 2003 encontraron que primnesiofíceas, procariotas, cianobacterias, diatomeas, y pelagophyceae fueron los principales taxones de fitoplancton en el margen continental del noreste del Golfo de México, lo anterior basado en el análisis de la composición de pigmentos. Asimismo encontraron cambios con la profundidad en la comunidad del fitoplancton, identificando las mayores concentraciones de dinoflagelados en aguas cercanas a la superficie.

Los trabajos recientes sobre variabilidad bio-óptica del fitoplancton en el Golfo de México son los realizados durante las campañas oceanográficas XIXIMI-1 Y XIXIMI-2, 2012 y 2013 respectivamente, donde reporta un intervalo de valores entre 0.001 a 0.053 m^{-1} para el $a_{\text{ph}440 \text{ nm}}$ y valores de 0.019 a 1.019 $\text{m}^2 (\text{mg Chl-a})^{-1}$ para el coeficiente específico (Millán-Núñez, 2012, 2013). (Millán-Núñez, (2012, 2013) reportó la concentración de los pigmentos fotosintéticos más relevantes para esta zona, Chla (0.006-1.22 mg m^{-3}), Zea (0.0002 y 0.269 mg m^{-3}), Dva (0.0008-0.182 mg m^{-3}) y Hex (0.002-0.603 mg m^{-3}). Lara-Lara y colaboradores (2012, 2013), caracterizaron la composición específica de los grupos fitoplanctónicos de las aguas profundas del Golfo de México. Ellos reportaron máximos de abundancias de diatomeas y dinoflagelados de 3,240 y 2080 cél/L respectivamente. Además reportaron las mayores abundancias de fitoplancton en la región suroeste, en la bahía de Campeche, lo cual asociaron con el giro ciclónico de dicha zona (Sidón, 2015).

2 Hipótesis.

Si la forma del espectro de absorción de luz del fitoplancton es diferente en las estaciones de muestreo, podremos suponer cambios en la comunidad de fitoplancton y a su vez poder asociar estaciones con igual forma espectral, lo que nos ayudaría a determinar provincias del fitoplancton denominándola como fitogeografía.

3 Objetivo general.

Determinar provincias fitogeográficas asociadas a la forma espectral del fitoplancton, asimismo, determinar su composición taxonómica mediante microscopio y a través de la razón pigmentaria por HPLC, en la temporada de invierno en el Golfo de México.

3.1 Objetivos particulares.

- Determinar el coeficiente de absorción de luz del fitoplancton.
- Determinar el coeficiente de absorción específico del fitoplancton.
- Determinar la forma espectral del coeficiente de absorción de luz.
- Identificar la composición taxonómica de la comunidad del fitoplancton a nivel género.
- Determinar la concentración de pigmentos e inferir la comunidad del fitoplancton mediante el uso de CHEMTAX.

4 Métodos.

4.1 Área de estudio.

El Golfo de México está localizado en una zona de transición entre clima tropical y subtropical, entre los 18° y 30° N, 82° y 98° W. Es una cuenca semicerrada que se comunica con el Océano Atlántico y con el Mar Caribe, por el estrecho de Florida y por el canal de Yucatán, respectivamente (Monreal Gómez y Salas de León 1997). Su batimetría varía considerablemente, alcanzando profundidades cercanas a los 4000 m en su región central y presenta una profundidad promedio de 1615m (Lara-Lara *et al.*, 2008) (Figura 2).

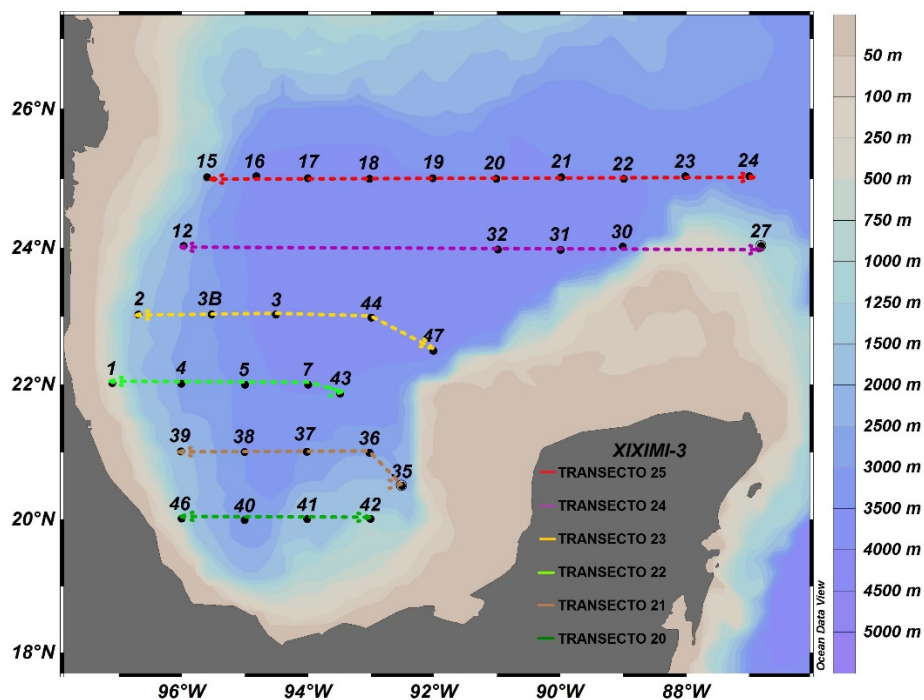


Figura 2. Estaciones de muestreo y profundidad del área de muestreo.

La estacionalidad climática-meteorológica se caracteriza por un periodo de secas de febrero a mayo, uno de lluvias de verano de junio a octubre con presencia de depresiones tropicales, y uno de frentes fríos anticiclónicos (nortes) de octubre a febrero, estos tres periodos son constantes pero se traslapan de manera relativa (Wiseman y Sturges 1999; Buenfil, 2009).

El GM es un área que presenta una gran variabilidad de procesos oceanográficos como surgencias, meandros, giros de agua fría y caliente, descargas de ríos, vientos y huracanes, los cuales actúan sobre la plataforma continental y aguas costeras forzando la variabilidad de los procesos biogeoquímicos. (Lohrenz *et al.* 1990; McPherson *et al.* 1990).

El elemento central de su circulación es la corriente de lazo (CL), la cual entra al Golfo por el Estrecho de Yucatán y sale hacia el Atlántico Norte por el Estrecho de la Florida (Vukovich, 1988; Vidal *et al.* 1994 en Lara-Lara *et al.*, 2008), esta se caracteriza por su variación en intensidad a lo largo del año, lo cual hace que la CL tenga una mayor o menor penetración dentro de la cuenca del Golfo. El flujo principal llega hasta los 27° N. Ocasionalmente la parte norte de la corriente que entra en el GM se separa del flujo principal que sale por el Estrecho de la Florida, manteniendo un flujo fijo en los 25° N. El giro aislado de la corriente tiene como característica un flujo anticiclónico y en consecuencia un amplio núcleo central cálido (Wiseman y Sturges 1999 en Lara-Lara *et al.*, 2008). El análisis de las masas de agua y su comportamiento, permite fundamentar la importancia de los giros, destacando los ciclónicos por el enriquecimiento de nutrientes que propician en aguas superficiales y subsuperficiales (según la

intensidad del giro), y el encajecimiento de nutrientes en los anticiclónicos (Biggs y Müller-Karger 1994).

Desde el punto de vista de la estructura, funcionalidad y mantenimiento de la biodiversidad de los ecosistemas pelágicos en el Golfo, sobresalen cuatro elementos que han sido determinantes de la condición de interconectividad de los ecosistemas regionales: 1) los giros anticiclónicos y ciclónicos procedentes de la Corriente del Lazo, cuyas propiedades bióticas son conservativas sobre todo en los primeros y determinan la productividad pelágica mediante afloramientos y corrientes de plataforma particularmente en los segundos; 2) la variable pero permanente presencia de un amplio giro ciclónico en la Bahía de Campeche que determina los reclutamientos de las comunidades locales; 3) la variación en intensidad en el abundante flujo de agua continental y 4) la cada vez mayor presencia de estructuras artificiales dedicadas a la extracción del petróleo que constituyen una nueva red de interconectividad para comunidades bénticas y pelágicas (Arenas y Salas (2005) en Lara-Lara *et al.* 2008).

La distribución y concentración de Chla sugiere que el Golfo sea considerado como un sistema oligotrófico, no solo por su concentración de nutrientes, sino por el contenido de este pigmento; sin embargo, datos de satélite y observaciones in situ (Gilbert *et al.* 1996; Muller-Karger 2000; Morey *et al.* 2003; Quian *et al.* 2003) han mostrado que experimenta intermedia y alta concentración de fitoplancton tanto en la zona costera como en regiones alejadas de la costa, mas no en la zona profunda.

Las imágenes del Costal Zone Color Scanner (czcs) mostraron que la variación estacional de la Chla es sincrónica en todo el Golfo, con los valores más altos de diciembre a febrero y los valores más bajos de mayo a julio (Müller-Karger *et al.* 1991).

4.2 Colecta de muestras

Se tomaron muestras de agua de mar en 34 estaciones en la región central sur del Golfo de México (CSGM) a dos niveles de profundidad (10 y 50 m), durante la campaña oceanográfica XIXIMI-3 realizada del 19 de febrero al 10 de marzo del 2013 a bordo del B/O Justo Sierra. Las muestras de superficie se tomaron con botella Van Dorn de 5L, mientras que las de 50 m se tomaron con botella Niskin de 10L. Para análisis de fitoplancton, las muestras se colectaron en botellas oscuras Nalgene de 250mL, que se llenaron hasta el hombro, cada muestra fue fijada con 1 ml de Lugol-básico con un pH neutro para evitar daño en células frágiles (Thronsdén, 1978). Las muestras se etiquetaron con fecha, profundidad a la que se colectaron y estación, estas se almacenaron en la oscuridad hasta su análisis en el laboratorio de Ecología de Lagunas Costeras de CICESE. Para la muestras del coeficiente de absorción de luz, pigmentos y Chla se filtraron de dos a tres litros de agua dependiendo de la profundidad y estación, esto utilizando filtros Whatman GF/F 25mm de diámetro que se colocaron en portafiltros para almacenarse de inmediato en nitrógeno líquido hasta su posterior análisis en laboratorio.

4.3 Análisis de fitoplancton.

Para la cuantificación del fitoplancton se sedimentaron 50 ml de agua de mar durante 24 horas siguiendo la técnica de Utermöhl (1958), y se utilizó un microscopio invertido Carl Zeiss (160X, 400X) en donde se contaron 100 campos en cada muestra y se identificaron los organismos a nivel de género, y en algunos casos a nivel de especie. El análisis de las muestras del fitoplancton se realizaron con la guía técnica propuesta por Hasle (1978) y su identificación taxonómica se basó principalmente en Cupp (1943), Hasle y Syvertsen (1997), Moreno *et al.* (1996), y Tomas (1997). A partir de los conteos de fitoplancton se calculó la abundancia de células de la siguiente manera (ecuación 5).

$$N = \frac{N_c * NCO * 1000}{V * NCC} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

N es el número de células por litro, N_c es el número de células contadas, NCO es el número de campos del objetivo, V es el volumen de la muestra sedimentada (50 mL), finalmente NCC, es el número de campos contados.

4.4 Análisis del coeficiente de absorción de luz.

En el laboratorio se extrajeron del nitrógeno líquido las muestras de agua de mar filtradas a bordo del B/O Justo Sierra, posteriormente los filtros con material particulado, así como los de referencia, fueron saturados con una gota de agua de mar filtrada para poder obtener las curvas espectrales en un espectrofotómetro Shimadzu UV-2401 PC siguiendo la guía de laboratorio descrita por Cleveland y Weideman (1993). El espectro de absorción se midió entre los 400 a 750 nm a 2 nm de resolución y una velocidad intermedia de 300 nm min⁻¹. Para obtener la curva espectral del detritus se introdujo cada filtro en 10 ml de acetona al 90% durante 24hrs, al pasar el tiempo de espera se retiró el filtro de la acetona y se llevó a cabo un segundo barrido espectral. El coeficiente de absorción de luz por fitoplancton se obtuvo de la diferencia entre el material particulado y el detritus (ecuación 2).

Los coeficientes de absorción se corrigieron por un factor (β) que ajusta la densidad óptica de las muestra en filtros ($OD_f(\lambda)$) y lo relaciona con la densidad óptica en muestras en suspensión ($OD_s(\lambda)$) (ecuación 6).

$$OD_s = 0.3269 OD_f + 0.4773 (OD_f)^2 \quad \text{(Ecuación 6)}$$

4.5 Análisis de Clorofila a.

El análisis se llevó a cabo utilizando el protocolo de Joint Global Ocean Flux Study. Los filtros se introdujeron en 10 ml de acetona al 100% y se almacenaron por 24 hrs. a 4 °C para la extracción de pigmentos, posteriormente se retiraron los filtros y se utilizó la solución líquida con los pigmentos disueltos los cuales se analizaron en un fluorímetro modelo Trilogy para determinar la concentración de Chla en mg/m^3 .

4.6 Coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton.

El coeficiente específico de absorción por fitoplancton (a^*_{ph}) ($\text{m}^2(\text{mg Chla})^{-1}$) se obtuvo normalizando el coeficiente de absorción de luz por fitoplancton (a_{ph}) por la concentración de Chla (ecuación 3).

4.7 Forma espectral de absorción de luz por fitoplancton.

La forma espectral de absorción de luz por fitoplancton se debe a la composición de pigmentos fotosintéticos que están contenidos en las células del fitoplancton para cada estación de muestreo. Al analizar los espectros de absorción y comparar su variabilidad en su forma espectral (A) entre estaciones del GM, podemos inferir la composición por grupos del fitoplancton.

Para obtener la forma espectral es necesario dividir los coeficientes a_{ph} (A) entre la absorción máxima de a_{ph} que en este caso se presenta a los 440 nm,

esto dará como resultado un espectro adimensional el cual será comparable entre estaciones (ecuación 7) (Santamaría-del-Ángel et. al 2015).

$$A = \frac{a_{ph}(\lambda)}{a_{ph}(440nm)} \quad (\text{Ecuación 7})$$

4.8 Razón azul/rojo.

La razón azul/rojo (B/R, por sus siglas en inglés) se ha utilizado como un índice tamaño de la población de fitoplancton (Moree *et al.*, 1995). Para calcularlo se divide la absorción a los 440 nm entre la absorción de los 674 nm (ecuación 8).

$$B/R = \frac{a_{ph}(440nm)}{a_{ph}(674nm)} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Si el B/R es >3.0, domina picofitoplancton (células <2 µm). Si la razón es <2.5, encontramos dominancia de microfitoplancton (células >20 µm) por lo tanto podemos inferir que si encontramos valores entre 3 y 2.5 corresponde al nanoplancton. (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2015.)

4.9 Análisis de pigmentos.

La extracción de los pigmentos se realizó con acetona al 100%. Los extractos de los pigmentos se filtraron con filtros acrodiscos de 0.2 μm y se inyectaron al HPLC marca Agilent 1260, estos fueron separados mediante una columna Zorbax Eclipse XDB C8 a una temperatura de 60°C, utilizando un sistema de dos solventes, el solvente A: Metanol al 70% y 0.028 M acetato de tetrabutil de amonio (pH 6.5) al 30% y el solvente B: Metanol al 100% a un flujo de 1.1 ml/min, esto basado en el método propuesto por Van Heukelem y Thomas (2001). Las concentraciones de los pigmentos se calcularon utilizando la ecuación 9

$$C_{pi} = \frac{V_x \tilde{C}_{pi}}{V_f V_c} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

C_{pi} = concentración del pigmento

\tilde{C}_{pi} = cantidad de pigmento

V_x = volumen de extracción

V_f = volumen de filtración

V_c = volumen de muestra inyectada en el HPLC

4.10 Proporción de tamaños

A partir del análisis de pigmentos se cuantificó la proporción relativa de las tres clases de tamaños (picoplancton, nanoplancton y microplancton), esto utilizando las razones propuestas por Claustre (1994) y Vidussi *et al.* (2001).

$$([\text{Hex}] + [\text{But}] + [\text{Allo}]) / [\text{PD}] \quad \text{para nano-plancton} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$([\text{C1bT}] + [\text{Zea}]) / [\text{PD}] \quad \text{para pico-plancton} \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$([\text{Fuco} + \text{Peri}]) / [\text{PD}] \quad \text{para micro-plancton} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Dónde

PD son los pigmentos diagnóstico (PSP+ allo+ zea+ TChlb)

4.11 Proporción de pigmentos fotosintéticos y fotoprotectores.

Para obtener los pigmentos fotosintéticos y fotoprotectores se utilizaron las siguientes razones:

$$[\text{But} + \text{Fuco} + \text{Hex} + \text{Peri}] \quad \text{Para fotosintéticos} \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$[\text{Allo} + \text{Diad} + \text{Diato} + \text{Zea} + \text{Caro}] \quad \text{Para fotoprotectores} \quad (\text{Ecuación 14})$$

4.12 CHEMTAX

La estimación de la contribución de los diferentes grupos fitoplanctónicos a la clorofila a total (ChlaT) se realizó utilizando el programa CHEMTAX (Mackey *et al.*, 1996). La ChlaT es el resultado de la suma de las concentraciones de Chla (Chlidea + Dva+ Chla) que fueron determinadas por el HPLC.

Este programa que utiliza un análisis factorial y descensos algorítmicos para determinar el mejor ajuste a los datos, esto proporcionando una matriz de entrada con la concentración de pigmentos. El software optimiza las proporciones de pigmentos para cada grupo, con el fin de estimar la contribución de los diferentes grupos de fitoplancton a la ChlaT. Para este estudio se utilizó la versión CHEMTAX para Microsoft Excel 1.95

5 Resultados.

5.1 Altimetría de la superficie del mar.

La dinámica del Golfo de México está dominada por la corriente de Lazo, de la cual se desprenden una serie de remolinos ciclónicos y anticiclónicos (Zavala-Hidalgo *et. al.*, 2006). Esto se pudo observar durante la campaña de muestreo con la ayuda de imágenes de altimetría por satélite obtenidas de: http://eddy.colorado.edu/ccar/ssh/hist_gom_grid_viewer (Figura 3).

En la región NE se observa un levantamiento de la superficie del mar que muestra la entrada de la corriente de lazo, entre los 24 y 22°N se observa un gran giro anticiclónico que se desprendieron de esta. A los 25°N

aproximadamente se pueden observar dos giros ciclónicos bien definidos, por último en la zona suroeste se observa un giro ciclónico (figura 3 a, b, c, d).

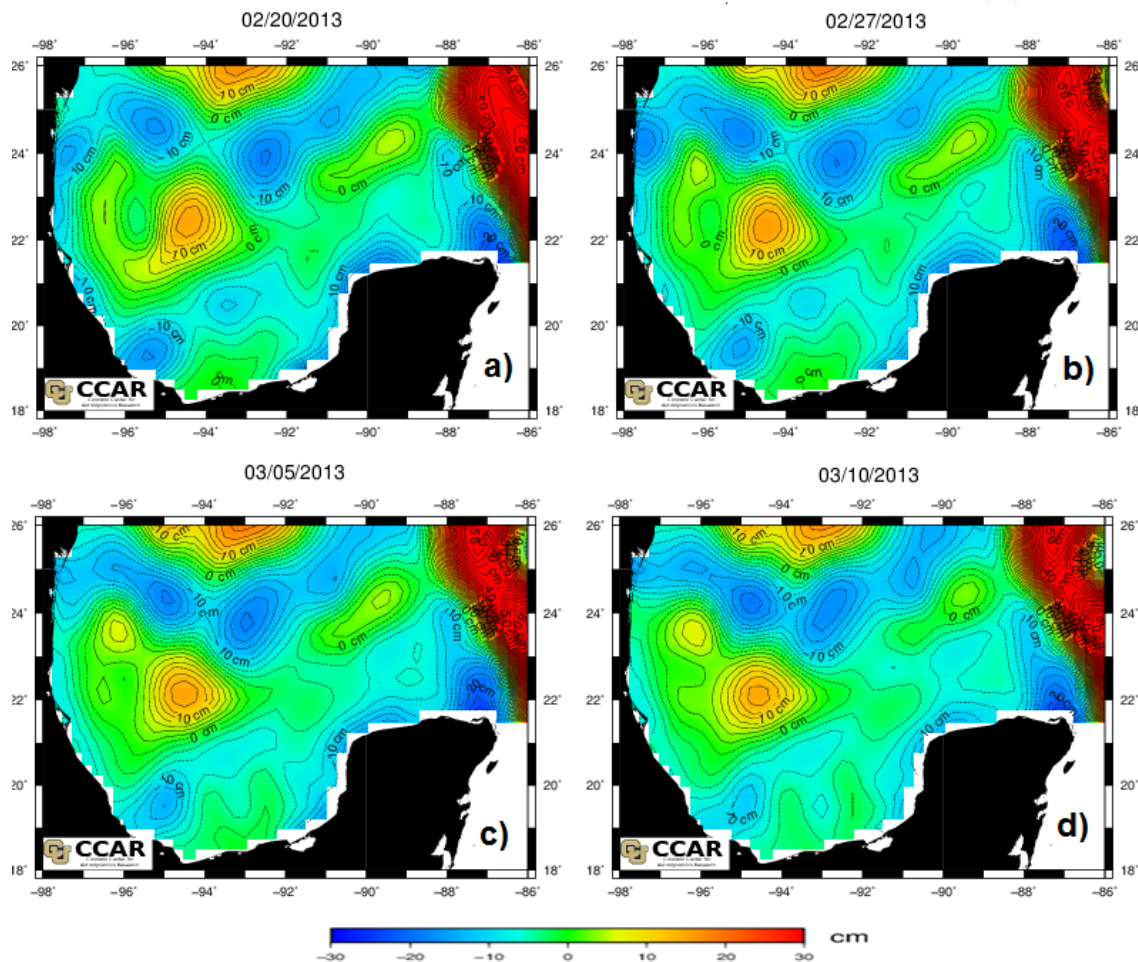


Figura 3. Altimetría de la superficie del mar en el Golfo de México. Los tonos azules indican hundimiento de la superficie, mientras que los colores del verde al rojo indican levantamiento. Cada una de las imágenes es representativa de una fecha: a) 20 de febrero de 2013, b) 27 de febrero de 2013, c) 5 de marzo de 2013 y d) 10 de marzo de 2013.

5.2 Temperatura.

La temperatura a 10 m de profundidad en el GM en su mayoría se encontró entre los 23 y 24 °C. En la estación 15 del transecto 25 (T25) se localizó un punto mínimo de la temperatura con un valor de 22.54 °C, en la zona Este del mismo transecto y del transecto 24 (T24) se observó un aumento de la temperatura que llegó a los 27 °C, lo cual es resultado de la entrada de aguas más cálidas pertenecientes a la corriente de lazo. En el transecto 20 (T20) y 21 (T21) en la región Este observamos otro punto cálido de 25 °C (fig. 4a).

A los 50 m la temperatura osciló entre los 22 y 23 °C. Se localizaron tres zonas con temperaturas mínimas, la estación 15 del T25, la región central de este mismo transecto y al sur en la estación 40 del T20. La CL entró con menor intensidad a esta profundidad, pero al igual que a los 10 m, esta se manifestó con un aumento de la temperatura en la zona Este del T25 Y T24, el cual llegó a 27 °C (fig. 4b).

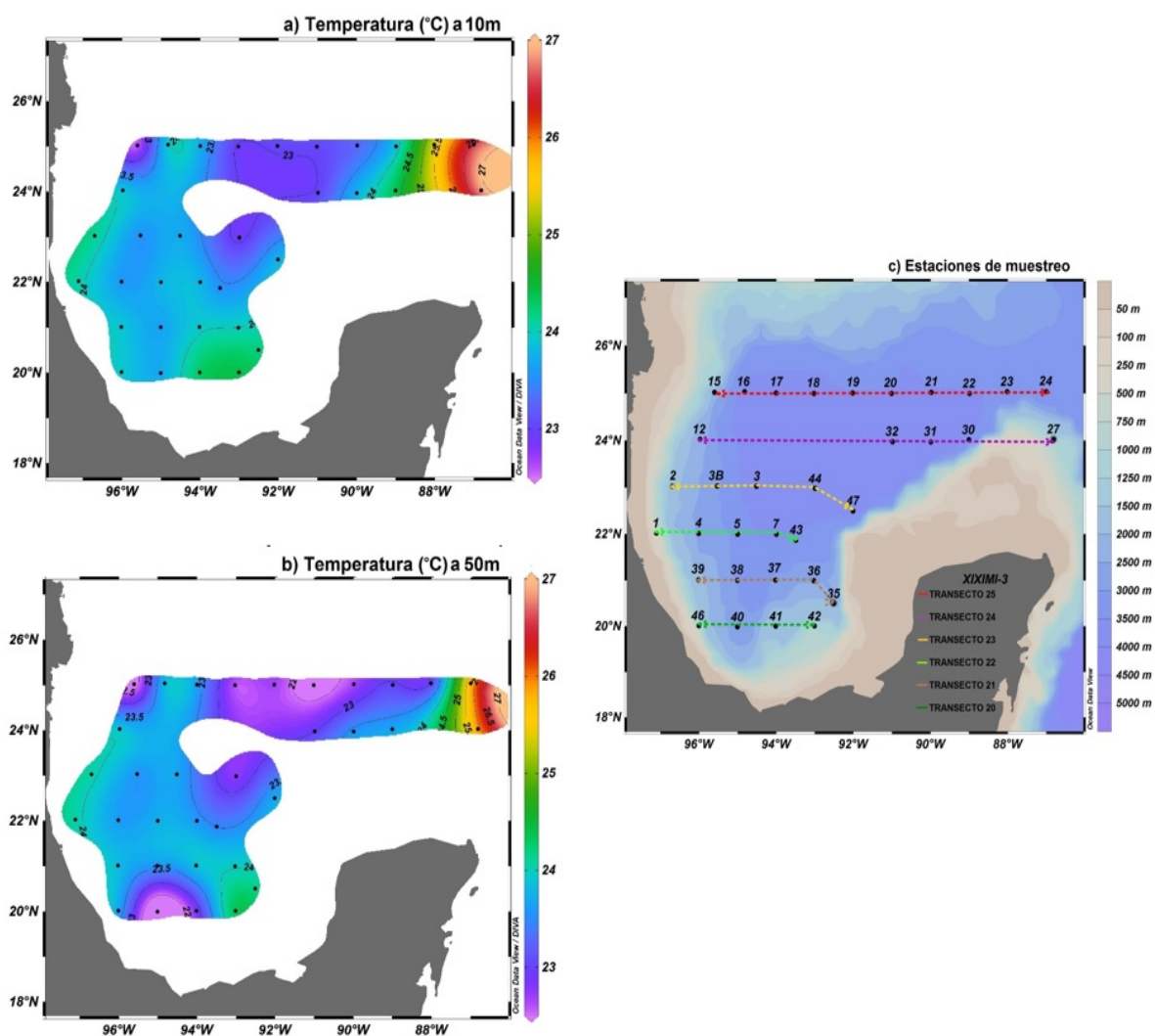


Figura 4. Distribución de temperatura (°C) en la parte central sur del Golfo de México a finales del invierno. a) 10 m, b) 50 m y c) estaciones de muestreo.

5.3 Salinidad.

La distribución espacial de salinidad a los 10 m y 50 m se observó en su mayoría entre los 36.4 y 36 ups, sin embargo, en la zona NE en los transecto 24 y 25 se puede observar claramente un descenso que llega a los 35.8 ups, esto influenciado por la entrada de la corriente de lazo. En la zona sur en la bahía de Campeche en ambas profundidades se observa otra disminución de la salinidad con valores que llegan 36.4 ups, siendo esto más marcado a los 10 m (fig. 5).

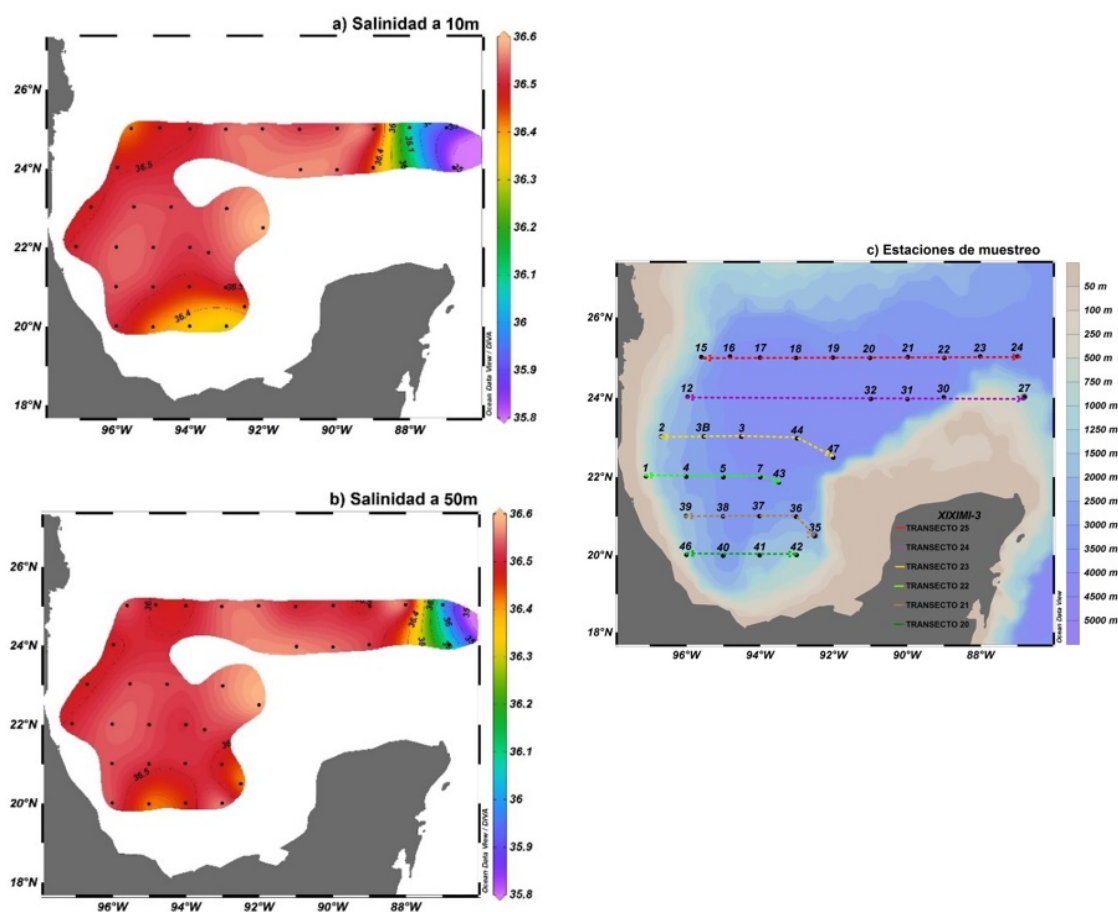


Figura 5. Distribución de salinidad en la parte central sur del Golfo de México a finales del invierno. a) Salinidad a 10 m de profundidad y b) salinidad 50 m.

5.4 Clorofila a.

El análisis de clorofila *a* a 10 m de profundidad mostró valores que oscilan entre los 0.1 y 0.3 mg/m³. Se observó un valor máximo de 0.6 mg/m³ para la estación 15 en la latitud 25, las concentraciones más bajas se presentaron en el NE del T25 Y T24 y al sur en el T20 con valores menores a 0.1 mg/m³ (fig. 6a).

A los 50 m encontramos concentraciones de clorofila con valores más altos en comparación a los de superficie, estos oscilaron entre los 0.3 y 0.5 mg/m³, asimismo pudimos observar tres puntos máximos en la estaciones 3B, 23 y 40 con un valor de 0.6 mg/m³. Los valores menores a 0.1 mg/m³ se localizaron en al NE del T25 Y 24, en la estación 5 del transecto 22 (T22) y en la estación 35 del transecto 21 (T21) (fig. 6b).

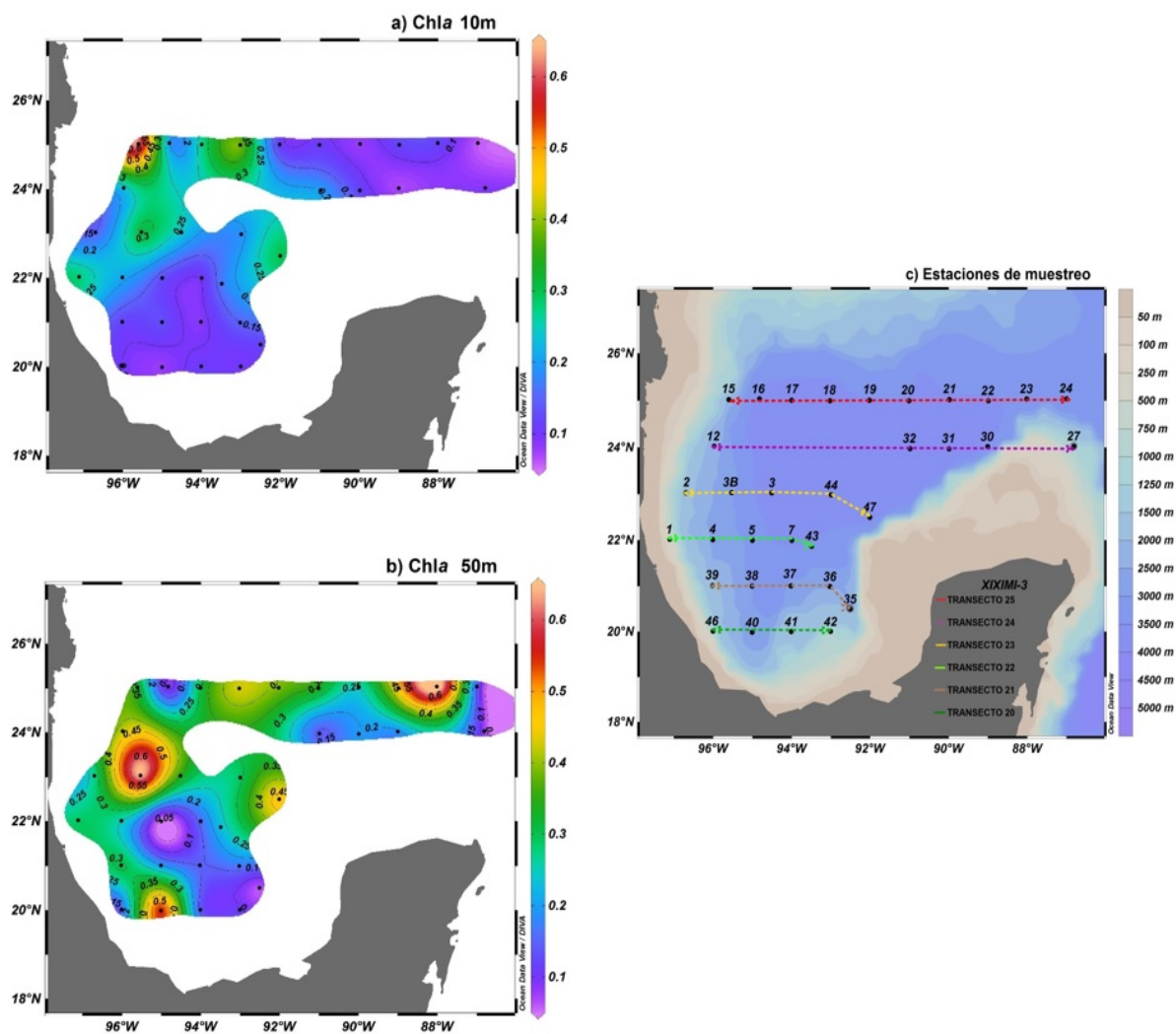


Figura 6. Distribución de clorofila a (mg m^{-3}) en la parte central sur del Golfo de México a finales del invierno, a) 10 m, b) 50 m y c) estaciones de muestreo.

5.5 Coeficiente de absorción de luz por fitoplancton.

Las curvas espectrales del coeficiente de absorción de luz por fitoplancton a 10 m de profundidad en general mostraron valores del coeficiente de absorción pequeños. El T25, ubicado al norte del Golfo de México, mostró un coeficiente de absorción a 440 nm de 0.057 m^{-1} , en la estación 15, localizado cerca de la costa, para el resto de las estaciones se estimaron coeficientes de absorción entre 0.022 y 0.008 m^{-1} , a los 675nm las curvas espectrales se observaron menores a 0.01 m^{-1} , esto a excepción de la estación 15 la cual mostró un valor 0.02 m^{-1} (fig. 7a). Para el transecto 24 el coeficiente de absorción a 440 nm, fue de 0.01 m^{-1} en la estación 12, cercana a la costa, en las demás estaciones se observan valores igual o menores a 0.01 m^{-1} , al analizar los 675 nm se observó que la estación 12 presentó un valor de 0.007 m^{-1} aproximadamente, mientras que el resto mostraron valores menores a 0.005 m^{-1} (fig. 7b). En el transecto 23, se observó un coeficiente de absorción mayor a 0.02 m^{-1} en las estaciones 3B y 47, mientras que el en resto se encontraron valores menores a 0.02 m^{-1} , las curvas espectrales a los 675 nm se mostraron entre 0.01 m^{-1} y 0.005 m^{-1} (fig. 7c). En el T22, la estación 43 presentó el coeficiente de absorción más alto con un valor de 0.03 m^{-1} , las otras estaciones mostraron un coeficiente entre 0.01 y 0.02 m^{-1} , a los 675 nm los valores se observaron entre 0.01 m^{-1} y 0.005 m^{-1} en todas las estaciones (fig. 7d). El transecto 21 mostro un coeficiente de absorción mayor a 0.015 m^{-1} en la estación 37, el resto de las estaciones mostraron valores entre 0.01 y 0.015 m^{-1} a 675 nm los valores se encontraron iguales o menores a 0.005 m^{-1} , esto a excepción de la estación 37 que mostro un valor de 0.006 m^{-1}

(fig. 7e). El transecto 20 al sur del Golfo de México, presentó un coeficiente de absorción mayor a 0.01 m^{-1} en las estaciones 35, 40, 41 y 46, la estación 46 mostró un valor menor a 0.01 m^{-1} , las curvas a los 675 se observaron menores o iguales a 0.005 m^{-1} (fig. 7f).

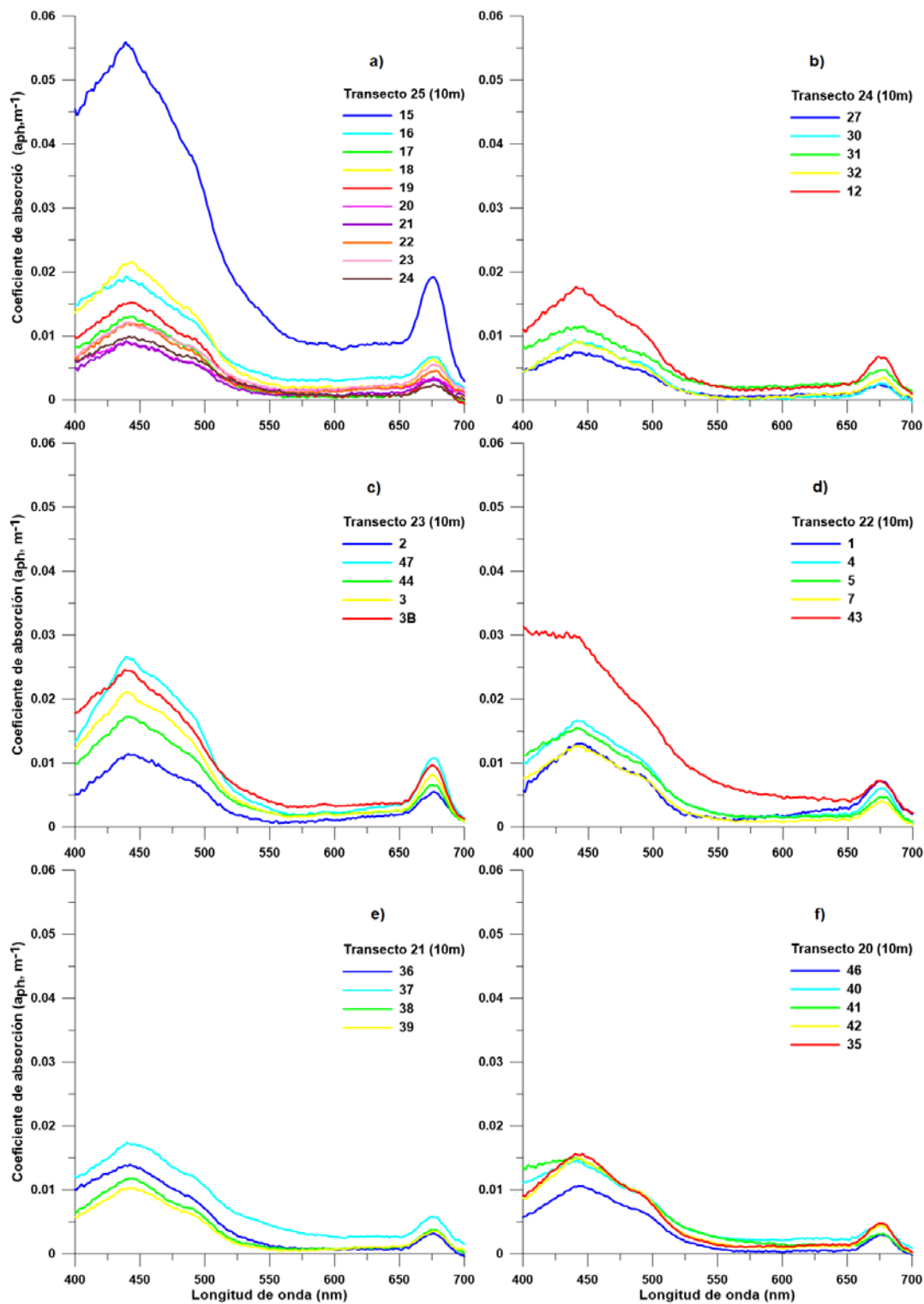


Figura 7. Curvas espectrales del coeficiente de absorción de luz por fitoplancton (a_{ph}) por transecto a 10 m. a) transecto 25, b) transecto 24, c) transecto 23, d) transecto 22, e) transecto 21 y f) transecto 20.

A los 50 m se observaron valores del coeficiente de absorción a los 440 nm y 675 nm pequeños. En el transecto 25, ubicado en la zona norte del muestreo se presentó un valor mayor a 0.03 m^{-1} a los 440nm perteneciente a la estación 23, la cual se encuentra más alejada de la costa; el resto de las estaciones mostró valores entre los 0.005 y 0.025 m^{-1} para esta misma longitud de onda, a los 675 nm los valores oscilaron entre los 0.01 y 0.005 m^{-1} a excepción de la estación 23 la cual mostró un valor de 0.015 m^{-1} (fig. 8a). El transecto 24 presentó el valor más alto de 0.015 m^{-1} a los 440 nm en la estación 12, las demás estaciones presentaron valores menores a 0.011 m^{-1} , a la longitud de onda de 675nm las curvas espectrales se observaron iguales o menores a 0.006 m^{-1} (fig. 8b). En el T23 a los 440 nm, las estaciones 3, 3B y 47 mostraron valores más altos de 0.025 m^{-1} , el resto se observan entre los 0.016 m^{-1} y 0.01 m^{-1} , a 675 nm se encontraron valores entre de 0.012 m^{-1} y 0.005 m^{-1} (fig. 8c). El T22 a 440 nm presentó para las estaciones 1, 4 y 43 un valor aproximado de 0.015 m^{-1} , mientras que en la estación 7 se observó un valor menor a 0.01 m^{-1} , a 675 nm las curvas espectrales se observaron entre 0.01 m^{-1} y 0.005 m^{-1} (fig. 8d). En el T21 a 440nm la mayoría de la estaciones se encontraron en rango entre 0.01 m^{-1} y 0.017 m^{-1} , esto a excepción de la estación 37 que mostraron un valor menor a 0.01 m^{-1} , los valores a 675 nm se observaron iguales o menores a 0.006 m^{-1} (fig. 8e). Por último en el transecto 20, el cual se localiza al sur del GM, se presentó un valor máximo de 0.03 m^{-1} a 440 nm y 0.01 m^{-1} a 675 nm en la estación 40, mientras que las estaciones 46 y 41 mostraron un valor de 0.01 m^{-1} y 0.005 m^{-1} a 440 nm y 675 nm respectivamente (fig. 8f).

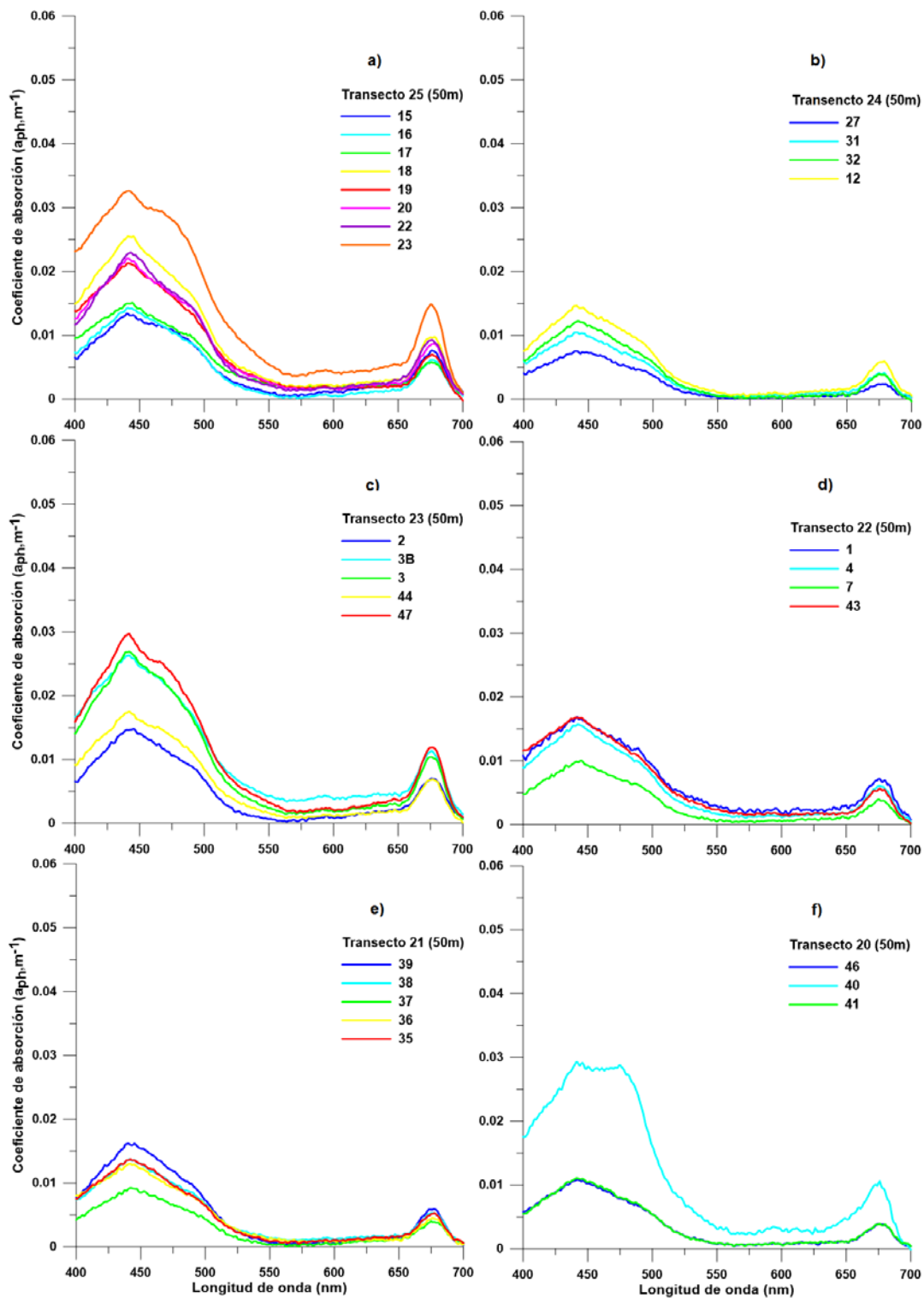


Figura 8. Curvas espectrales del coeficiente de absorción de luz por fitoplancton (a_{ph}) por transecto a 50 m. a) transecto 25, b) transecto 24, c) transecto 23, d) transecto 22, e) transecto 21 y f) transecto 20.

5.6 Coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton.

Las resultados del $a_{ph(440)}^*$ a 10 m en el GM mostraron valores hasta de $0.17 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chla)}^{-1})$ en las estaciones 24, 37, 40 y 43. Asimismo, se observan tres puntos mínimos de aproximadamente $0.04 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chla)}^{-1})$, los cuales se localizaron en las estaciones 17, 18, 32 y 1. En el resto de las estaciones se observaron valores entre 0.075 y $0.1 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chla)}^{-1})$ (fig. 9a).

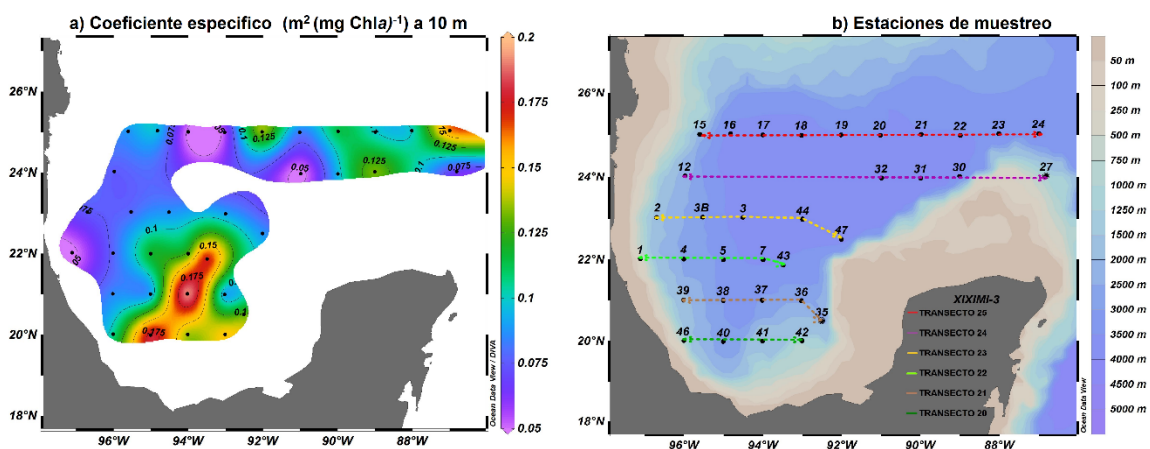


Figura 9. a) Distribución espacial del coeficiente de absorción específico por fitoplancton (a_{ph}^*) a 440nm a 10 m y b) estaciones de muestreo.

En el transecto 25 en la estación 24 ubicado al norte del Golfo de México, se presentó un a_{ph}^* a 440nm de $0.16 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$, localizada lejana a la costa, el resto de las estaciones se observaron en un rango de 0.045 y $0.14 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$, esto a excepción de la 17 y 18 la cuales presentaron valores menores a $0.06 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$, a los 675 nm los valores se encontraron entre 0.02 y $0.05 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$, de igual manera a esta longitud de onda las estaciones 17 y 18 presentaron las curvas más bajas con valores menores $0.02 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$ (fig. 10a). El T24 mostró a los 440 nm el valor máximo de $0.13 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$ en la estación 30, mientras que las estaciones 31, 12 y 27 presentaron valores de 0.09 , 0.07 y $0.06 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$ respectivamente, donde el valor mínimo fue de $0.04 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$ en la estación 32. A 675 nm se observaron valores entre 0.02 y $0.04 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$ (fig. 10b). En el T23, las estaciones 3, 44 y 47 presentaron valores de $0.08 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$, mientras que las estaciones 2 y 3B sus valores fueron entre 0.07 y $0.08 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$, a los 675 nm los valores oscilaron entre 0.03 y $0.04 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$ (fig. 10c). En T22 se encontró un valor máximo de $0.19 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$ en la estación 43, la cual es la más alejada de la costa, las estaciones 7 y 5 presentaron un valor de $0.12 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$, los valores mínimos se encuentran entre 0.04 y $0.08 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$ pertenecientes a las estaciones 1 y 4, esto a los 440 nm, mientras que a los 675 nm los valores se observaron entre 0.02 y $0.05 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$ (fig. 10d). En la estación 37 del T21 se presentó la curva espectral más alta a los 10 m con un valor mayor a $0.19 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$ a los 440 nm y un valor de $0.07 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chl}a)^{-1} \text{)}$ a 675 nm, el resto de la estaciones presentaron valores entre 0.08 y 0.09 m^{-1} , esto a la longitud

de onda de 440nm, mientras que a los 675 nm se encontraron entre 0.03 y 0.02 ($\text{m}^2(\text{mg Chla})^{-1}$) (fig. 10e). Por último en el T20 al sur del GM se observó en la estación 40 un valor máximo de 0.18 ($\text{m}^2(\text{mg Chla})^{-1}$), en las demás estaciones se encontraron entre 0.1 y 0.14 ($\text{m}^2(\text{mg Chla})^{-1}$) a 440 nm, las curvas espectrales a los 675 nm se observaron entre 0.06 y 0.03 ($\text{m}^2(\text{mg Chla})^{-1}$) (fig. 10f).

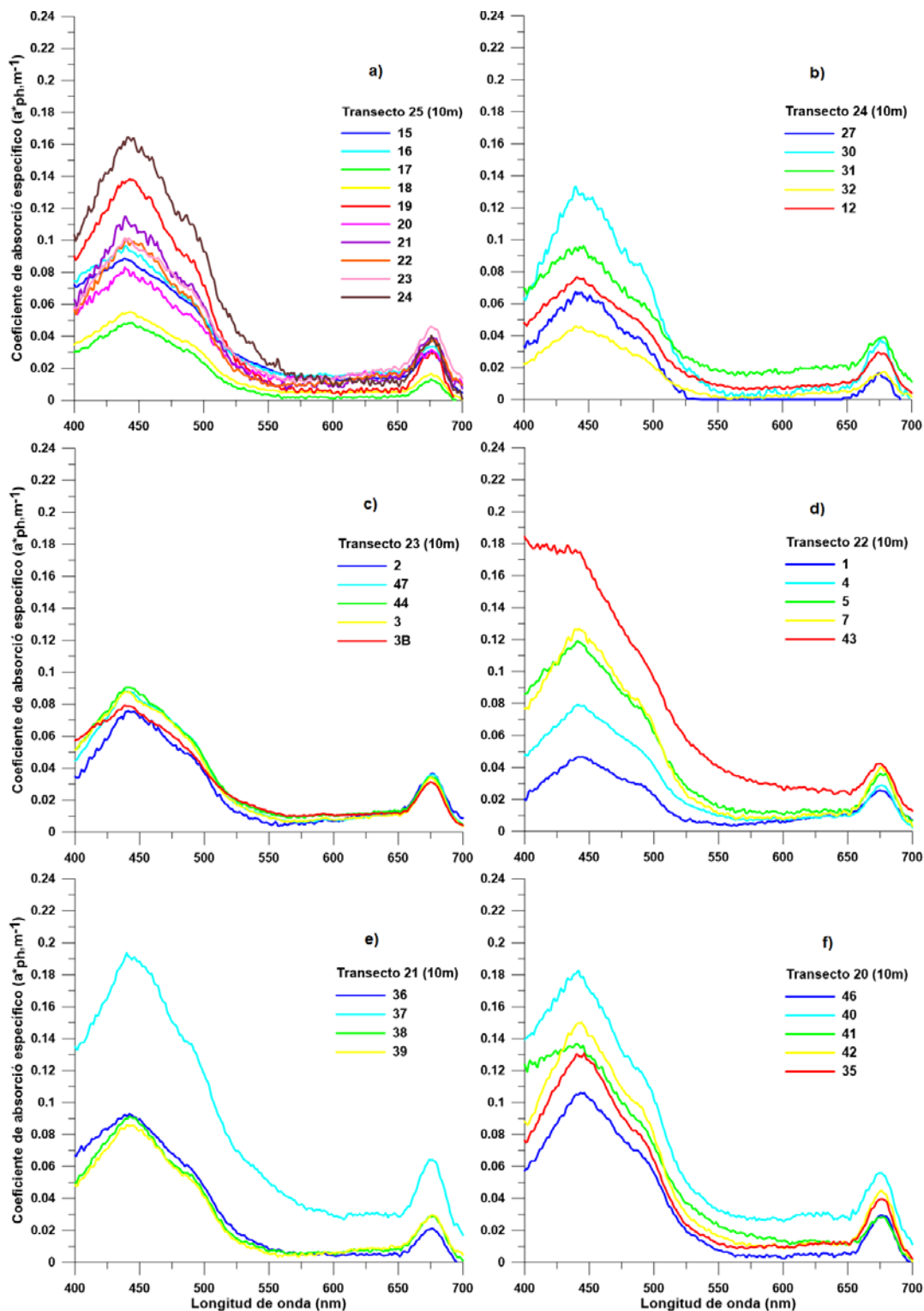


Figura 10. Curvas espectrales del coeficiente de absorción específico por fitoplancton (a^*_{ph}) por transecto a 10 m. a) transecto 25, b) transecto 24, c) transecto 23, d) transecto 22, e) transecto 21 y f) transecto 20.

Los $a^*_{ph(440)}$ a 50 m de profundidad se estimaron valores entre los 0.04 m^{-1} y $0.08 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chla)}^{-1})$. Asimismo se mostraron dos puntos máximos localizados en las latitudes 25 y 21 con valor de 0.18 m^{-1} y 0.23 m^{-1} respectivamente. Los valores menores a $0.05 \text{ (m}^2 \text{ (mg Chla)}^{-1})$ se observaron en la zona Este del transecto 24 y 25, en el área Oeste de los transectos 24 y 23, por último al Oeste en el T21 Y T20 (fig. 11a).

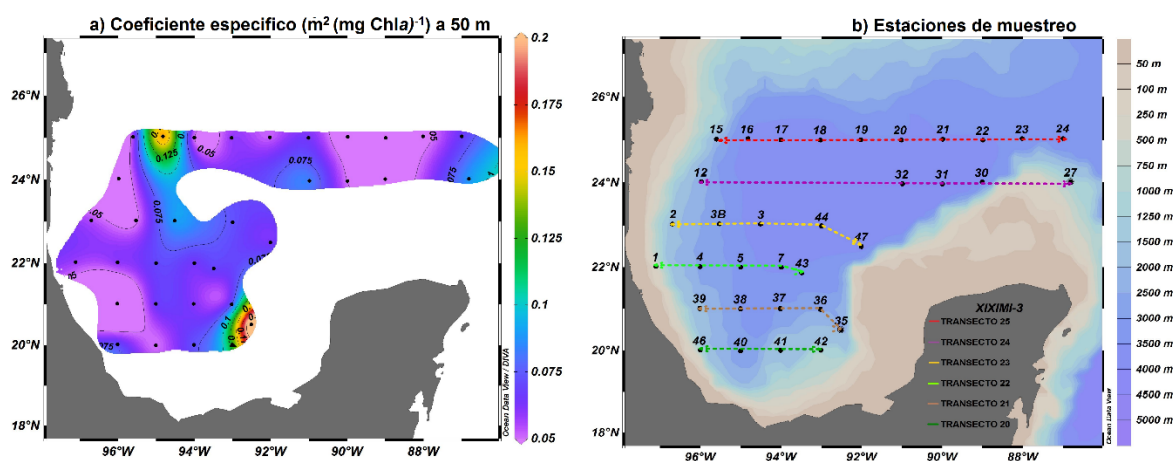


Figura 11. a) Distribución espacial del coeficiente de absorción específico por fitoplancton (a^*_{ph}) a 440nm a 50 m y b) estaciones de muestreo.

En el transecto 25 a los 50 m de profundidad de la estación 16, se observó el valor máximo de $a_{ph(440)}^*$ de 0.18 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$) y el máximo de 0.08 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$) a los 675 nm el resto de las estaciones se mantuvo entre 0.03 a 0.07 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$) (fig 12a). En el transecto 24 para las estaciones 27 y 32 el $a_{ph(440)}^*$ presentó valores entre los 0.08 y 0.1 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$), las curvas más bajas que oscilan entre los 0.03 y 0.05 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$) pertenecen a las estaciones 12 y 31, los valores a los 675 nm se observaron entre 0.02 y 0.04 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$) (fig. 12b). En el T23 los valores de $a_{ph(440)}^*$ se observó un máximo de 0.08 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$) y un mínimo de 0.03 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$) para las estaciones 3 y 3B respectivamente, mientras que los valores de $a_{ph(440)}^*$ para las estaciones 2, 44 y 47 fueron entre los 0.05 y 0.06 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$). A los 675 nm las curvas espectrales se mostraron entre los 0.02 y 0.03 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$) (fig. 12c). Los valores de $a_{ph(440)}^*$ en el T22 (fig. 12d) presentaron en la estación 43 un valor de 0.07 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$), mientras que las estaciones 1, 4 y 7 se observaron entre los 0.05 y 0.06 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$), los valores a 675 nm fueron de 0.03 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$). En el T21 en la estación 35 se observó la curva con mayor magnitud a los 50m con valores de $a_{ph(440)}^*$ y $a_{ph(675)}^*$ fueron de 0.23 y 0.095 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$) respectivamente, la demás estaciones a los 440 se encontraron entre 0.05 y 0.08 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$), mientras que a los 675 nm se observaron menores o iguales a 0.03 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$) (fig. 12e). En el T20 en las estaciones 41 y 46 se observó para $a_{ph(440)}^*$ valores de 0.08 m^{-1} y 0.07 m^{-1} , y a 675 nm los valores fueron entre 0.02 y 0.03 ($m^2(mg\ Chla)^{-1}$) (fig. 12f).

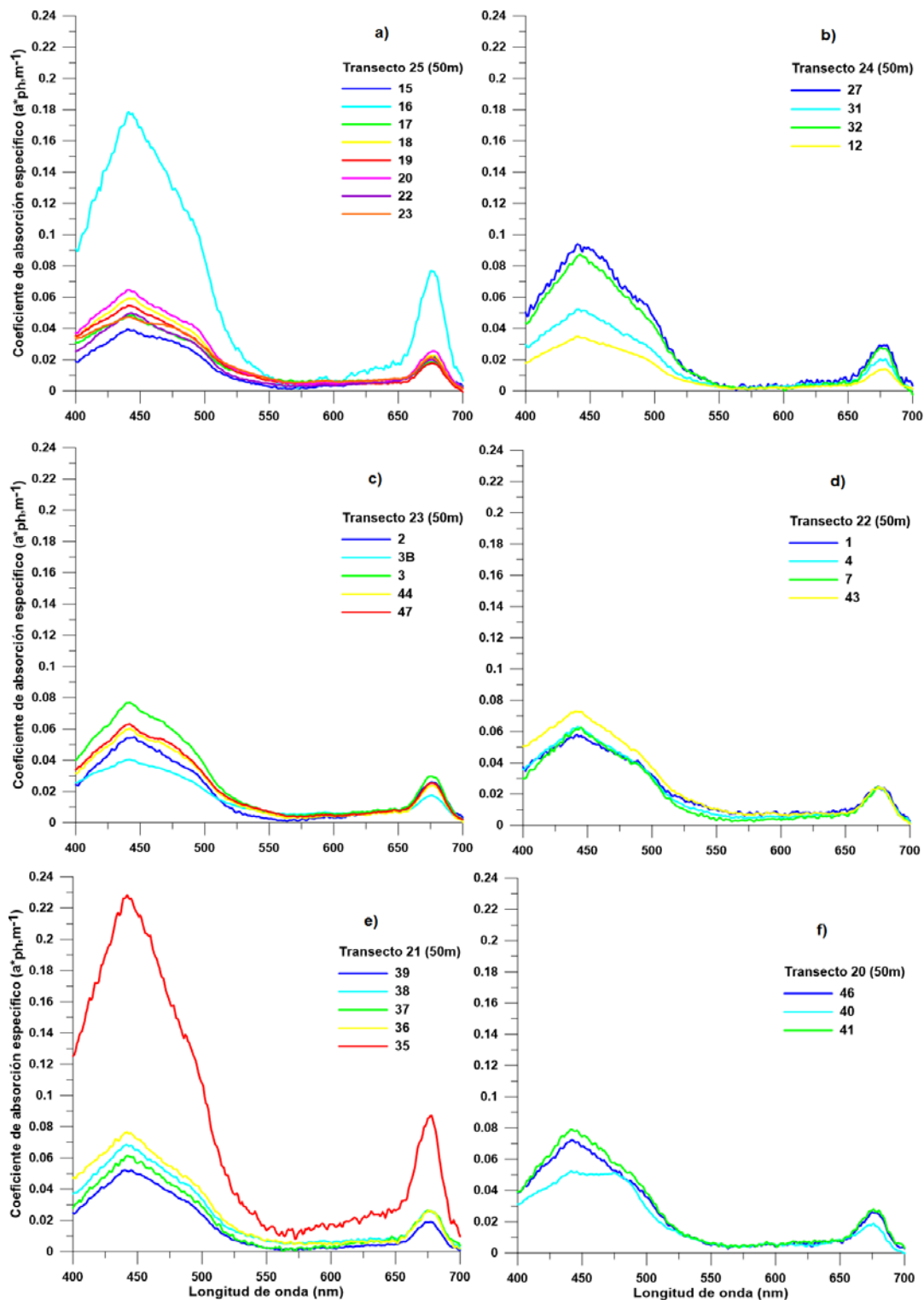


Figura 12. Curvas espectrales del coeficiente de absorción específico por fitoplancton (a^*_{ph}) por transecto a 50 m. a) transecto 25, b) transecto 24, c) transecto 23, d) transecto 22, e) transecto 21 y f) transecto 20.

5.7 Forma espectral del coeficiente de absorción normalizada (A).

En este estudio, se obtuvieron 34 curvas espectrales normalizadas (fig. 13). La mayoría de las formas de los espectros de absorción a 10 y 50 m estuvieron dominadas por la forma de absorción de la Chla con un máximo a 440 nm y otro a 675 nm, esto a excepción de la estación 40 a 50 m de profundidad.

Después de analizar y comparar las diferentes formas de las curvas de absorción, los resultados indicaron que a 10 m de profundidad se detectaron dos diferentes formas espectrales o curvas patrón (f1 y f2), las cuales estuvieron dominadas por la forma del espectro de absorción de la clorofila, sin embargo la f1 presentó absorción a los 480 nm y la f2 a los 460 nm (fig. 14); esto representa cambios en la comunidad del fitoplancton, lo que implicaría tener dos zonas fitogeográficas (fig. 15). A los 50 m se observaron cuatro formas patrón (f1, f2, f3 y f4) (fig. 16) la f1 y f2 presentaron la misma forma que a 10 m, la f3 presentó dos máximos, uno a los 440nm y otro a los 490nm, por último la forma f4 presentó un hombro muy marcado a los 460nm aproximadamente, por lo que tendríamos cuatro zonas fitogeográficas (fig.17).

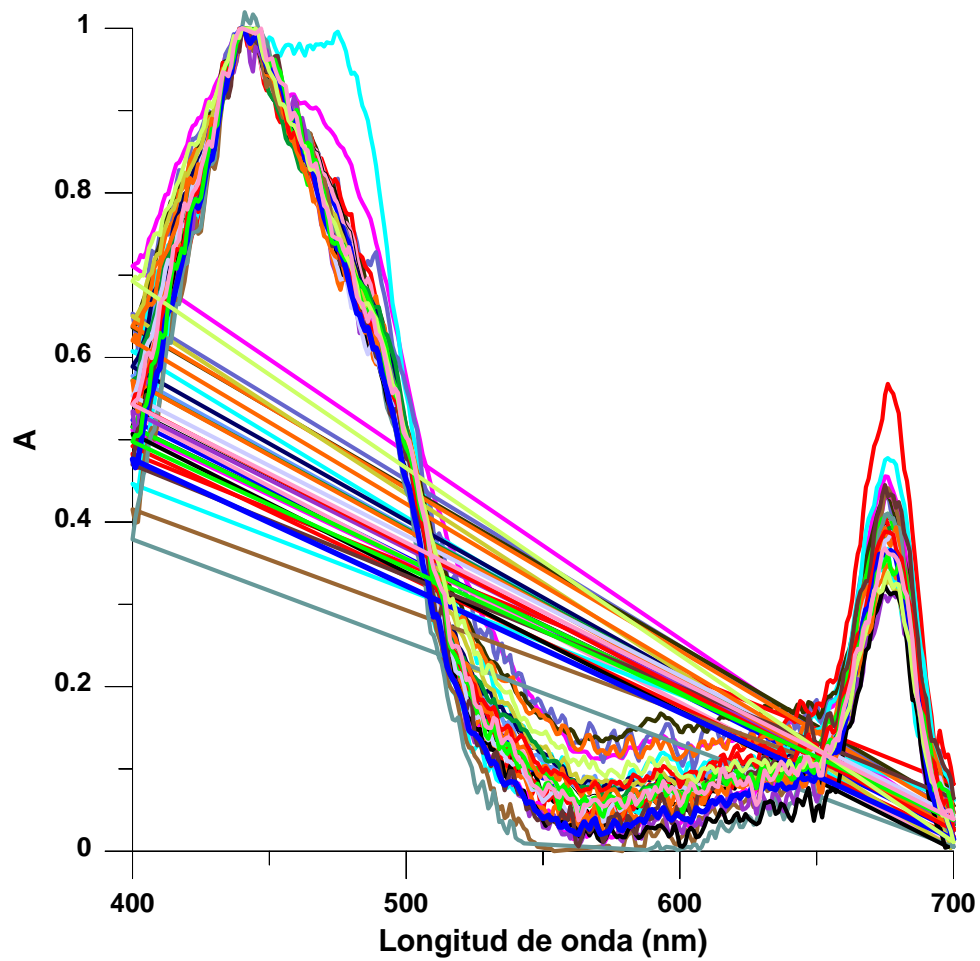


Figura 13. Forma espectrales de absorción de luz por fitoplancton (A) a 10 y 50 m para el crucero XIXIMI-3.

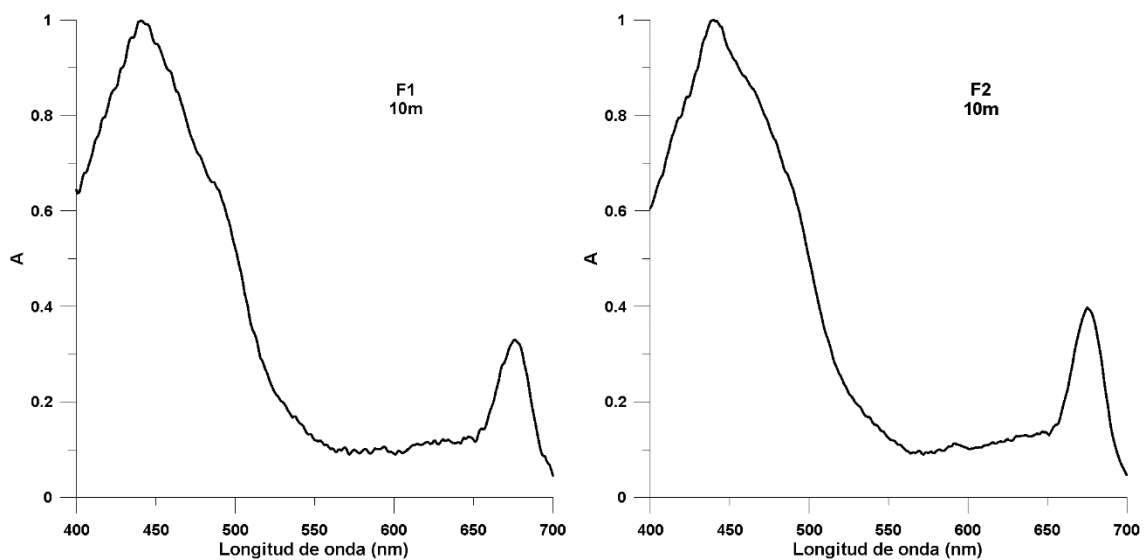


Figura 14. Espectros promedio de absorción normalizada a los 440 nm A (adimensional) a la profundidad de 10 m. Cada uno de los espectros representa una forma.

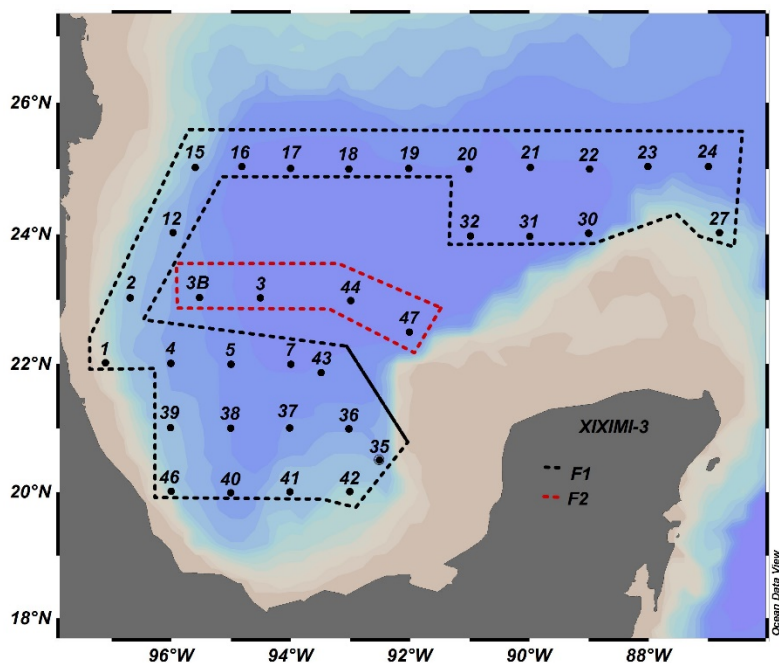


Figura 15. Distribución espacial y localización de provincias fitogeográficas a partir de la forma espectral normalizada (A) a 10 m de profundidad.

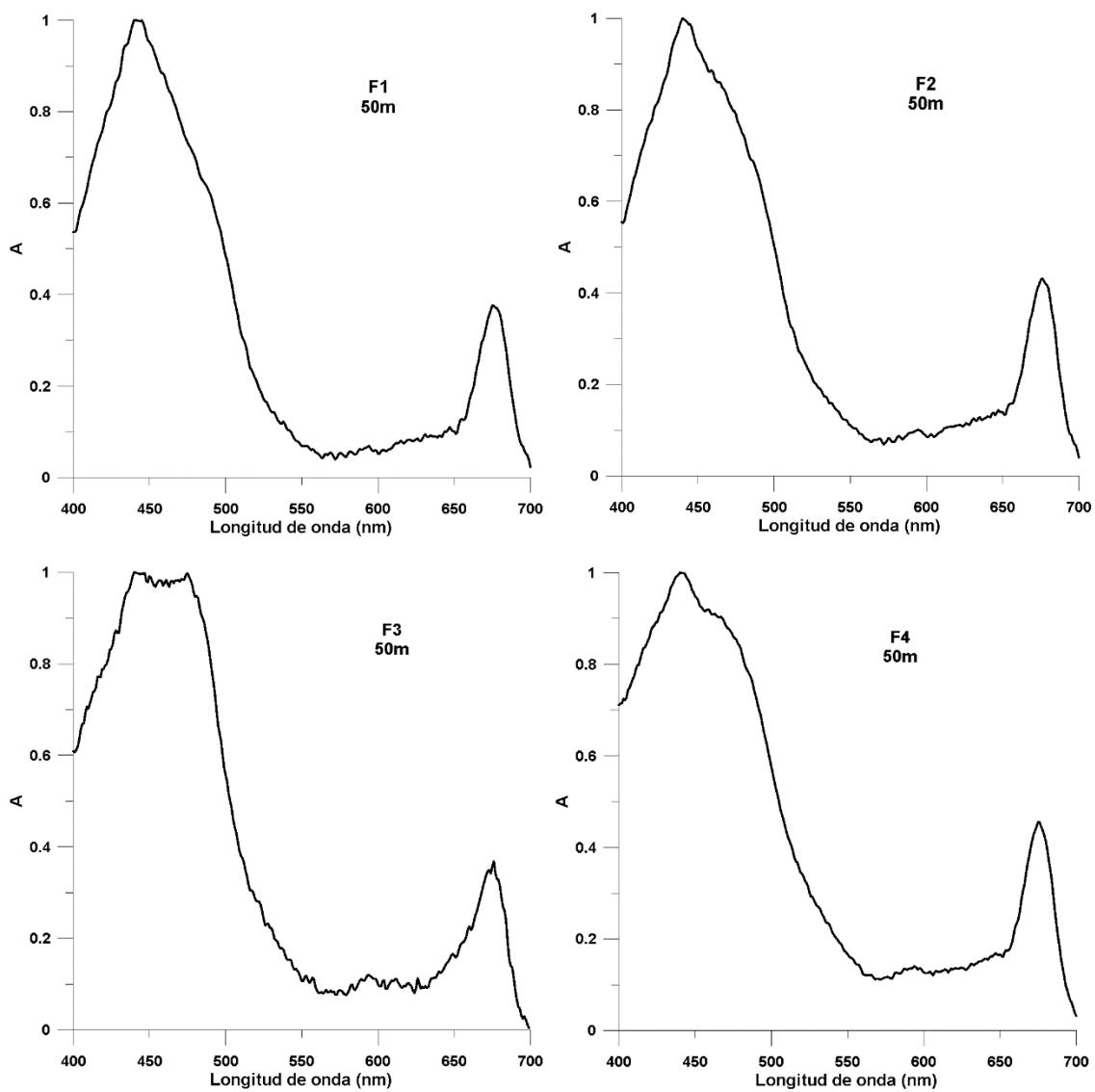


Figura 16. Espectros promedio de absorción normalizada a los 440 nm A (adimensional) a la profundidad de 50 m. Cada uno de los espectros representa una forma.

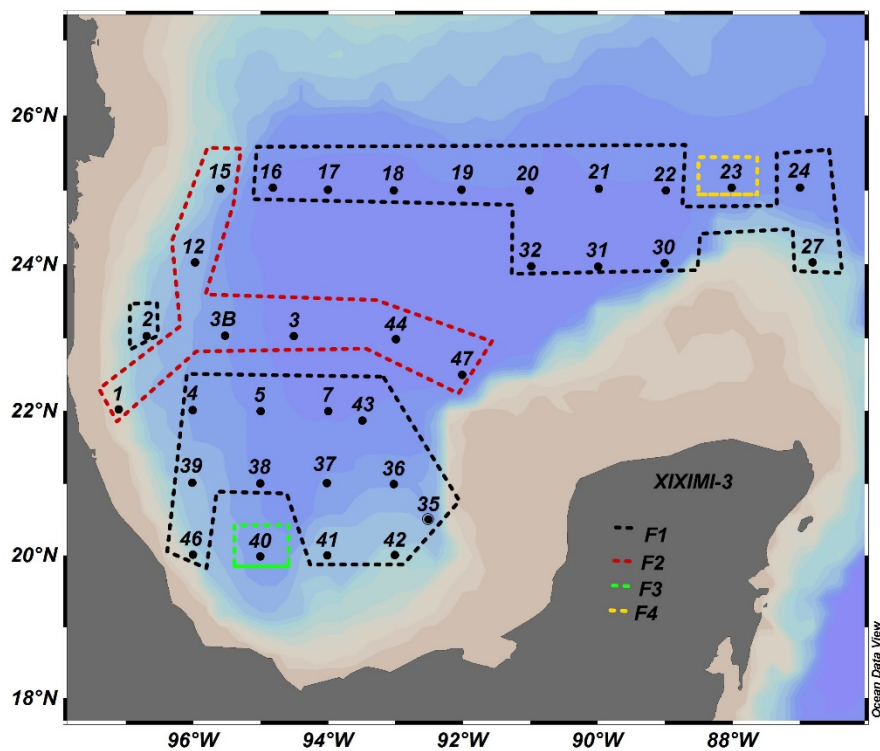


Figura 17. Distribución espacial y localización de provincias fitogeográficas a partir de la forma espectral normalizada (A) a 50 m de profundidad.

5.8 Razón Azul/ Rojo

Para evaluar el tamaño dominante de la población de fitoplancton se calculó la razón B/R la cual ya ha sido propuesta por otros autores (Mitchell y Kiefer, 1988; Stramski y Morel, 1990; Sosik y Mitchell, 1991; Stuart *et al.*, 1998; Lohrenz *et al.*, 2003; Wu *et al.*, 2007; Millán-Nuñez y Millán-Nuñez, 2010).

A 10m de profundidad la razón B/R (fig. 18a) mostró valores mayores a tres en la parte norte y noreste del GM, los cuales corresponden a las estaciones 17, 18, 19, 24, 27 y 30 lo que indica que estas están dominadas por picoplancton, al igual que la región sur. La estación 1 del T22 presentó un valor menor a 2, lo que muestra que esta está dominada por microfitoplancton. Para el resto de las la estaciones observamos valores entre 2.5 y 3, lo cual se puede inferir que se tiene una población predominada por nanoplancton. A los 50 m en la región norte se observa que en las estaciones 19, 27 y 32 hay una fuerte dominancia de picoplancton al igual que en la latitud 20. Las estación 1, 2 ,5 y 15 con un valores menores a 2.5 mostraron una población dominada por microplancton. En el resto de las estaciones se observó un predominio de células nanoplanctónicas (fig. 18b).

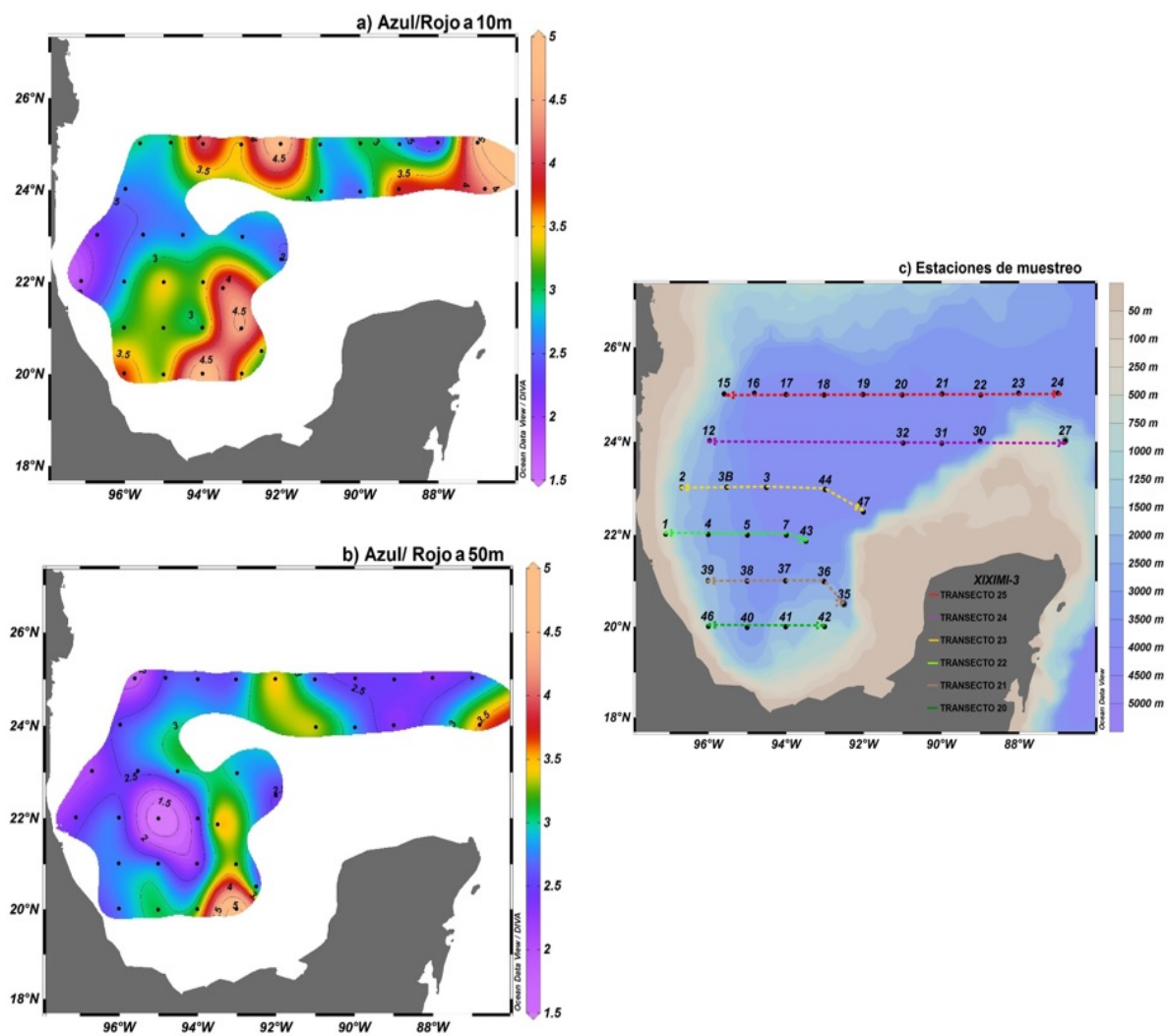


Figura 18. Distribución espacial de la razón azul/rojo. a) 10 m, b) 50 m y c) estaciones de muestreo.

5.9 Concentración de pigmentos.

A los 10 m y 50 de profundidad se identificaron en total 15 pigmentos (figura 19 y 20): Clorofila c3 (Chlc3), Clorofila c2 (Chlc2), 19'-Butanoiloxifucoxantina (But), Fucoxantina (Fuco), Neo, Prasinofitas (Pras), 19'-Hexanoiloxifucoxantina (Hex), Diadinoxantina (Diadi), Diatoxantina (Diato), Aloxantina (Alo), Zeaxantina (Zea), Clorofila b (Chl b) y Divinil Clorofila a (Dva)

La Chlc3 a 10 m se observó únicamente en la estación 7 con un valor de 1.19 mg/m³ (fig. 19), a 50 m se mostró en mayor abundancia con valores en las estaciones 3B (2.53 mg/m³), 23 (1.88 mg/m³), 40 (1.98 mg/m³) y 47 (1.36 mg/m³) aquellas con concentraciones mayores (fig. 20).

La Chlc2 a 10 m presentó un máximo de 3.76 mg/m³ en la estación 7 y un mínimo 0.90 mg/m³ para la estación 1, el resto de las estaciones los valores fueron entre 0.99 y 1.30 mg/m³ (fig. 19). A 50 m se observó mayor abundancia de este pigmento, siendo las estaciones 3B y 23 las que presentaron las concentraciones más altas con valor de 6.91 y 7.23 mg/m³, las demás se encontraron en un rango de 0.61 a 2.64 mg/m³ (fig. 20).

La But pigmento característico de las crisofitas y primnesiofitas, se encontró a los 10 m en concentraciones muy pequeñas que van desde los 0.002 a 0.041 mg/m³, para las estaciones 39 y 7 respectivamente (fig. 19). De igual manera las concentraciones a 50 m fueron bajas, con valores que oscilaron entre 0.008 y 0.068 mg/m³ para la estación 35 y 23 con respectivamente (fig. 20).

Fuco pigmento característico de las diatomeas se encontró entre 0.003 y 0.02 mg/m³, a 10m de profundidad (fig. 19). A 50 m los valores en casi todas las estaciones a excepción de la 5 y 32, estuvieron entre 0.005 mg/m³ a 0.10 mg/m³, este último valor pertenece a la estación 23 (fig. 20).

Neo se encontró únicamente a 50 m en las estaciones 23 y 47 con concentraciones de 0.009 y 0.005 mg/m³ respectivamente (fig. 20).

Pras pigmento específico de las prasinofitas, se encontró a los 10 m en la estación 3B con un valor de 0.003 mg/m³ (fig. 19), mientras que a los 50 m se encontró en la estación 3B (0.005 mg/m³), 12 (0.004 mg/m³), 23 (0.15 mg/m³), 47 (0.010 mg/m³) (fig. 20).

Hex pigmento específico de las primnesiofitas se encontró a los 10 m en casi todas las estaciones a excepción de las estaciones 37 y 44, con un rango de 0.008 a 0.076 mg/m³ con los valores menores para las estaciones 19 y 20, y los mayores para la estación 3B (fig. 19). A 50 m este pigmento se observó en la mayoría de las estaciones a excepción de la estación 23, con valores entre 0.01 y 0.16 mg/m³ (fig. 20).

La Diadinoxantina a 10 m presentó concentraciones entre 0.004 y 0.01 mg/m³ (fig. 19). A los 50 m las estaciones mostraron concentraciones que van desde los 0.003 a 0.019 mg/m³, esto a excepción de las estaciones 5, 23 y 32 que no se encontró este pigmento (fig. 20).

Alloxantina pigmento específico de las criptofitas a 10m, solo se encontró en la estación 44 con una concentración de 0.002 mg/m³ (fig. 19). A los 50 m se observó en tres estaciones, las concentraciones fueron de 0.003 mg/m³ en la

estación 3B, de 0.013 mg/m^3 en la estación 23 y de 0.006 mg/m^3 en la estación 47 (fig. 20).

Diatoxantina se encontró únicamente a 10 m en las estaciones 3B y 27 con concentraciones de 0.010 y 0.005 mg/m^3 respectivamente (fig. 19).

La Zeaxantina pigmento característico de las cianobacterias presentó concentraciones entre 0.03 y 0.15 mg/m^3 a 10 m (fig. 19), mientras que a 50 m se encontró en casi todas las estaciones con valores desde 0.005 a 0.08 mg/m^3 , esto a excepción de la 47 y 23, el valor máximo corresponde a la estación 39 (fig. 20).

La Chlb característica de las clorofitas a 10m se observó entre 0.04 y 0.76 mg/m^3 , el máximo se localiza en la estación 7 y el mínimo en la 35 (fig. 19). A 50 m las concentraciones son un poco más altas que a 10 metros, estas se encontraron en un rango de 0.07 a 0.47 mg/m^3 (fig. 20).

El Dva pigmento específico de prochlorococcus a 10m se presentó en todas las en concentración que oscilaron entre 0.06 y 0.60 mg/m^3 , el valor más alto corresponde a la estación 37 (fig. 19). Al observar los resultados a 50m podemos ver que la estación 32 no presentó este pigmento y que en general en el resto de las estaciones se encontró entre 0.03 y 0.5 mg/m^3 (fig.20).

El Beta-caroteno presentó concentraciones pequeñas que van de 0.004 a 0.03 mg/m^3 a 10 m. A 50 m se mantuvo casi en la misma concentración que a los 10 m, con un intervalo de 0.004 a 0.04 mg/m^3 .

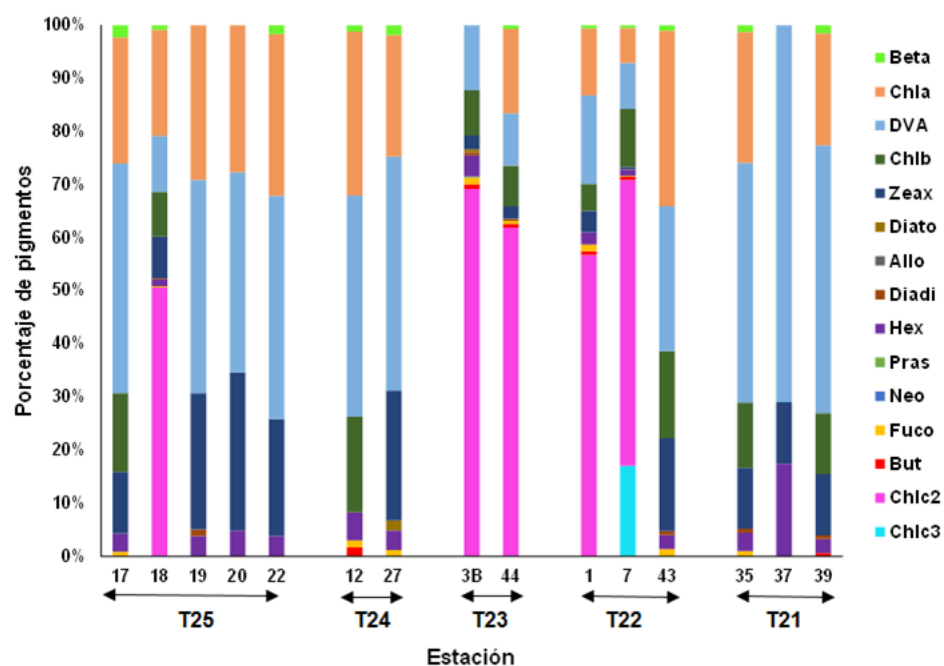


Figura 19. Concentración de pigmentos a los 10 metros de profundidad (mg/m^3), las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21.

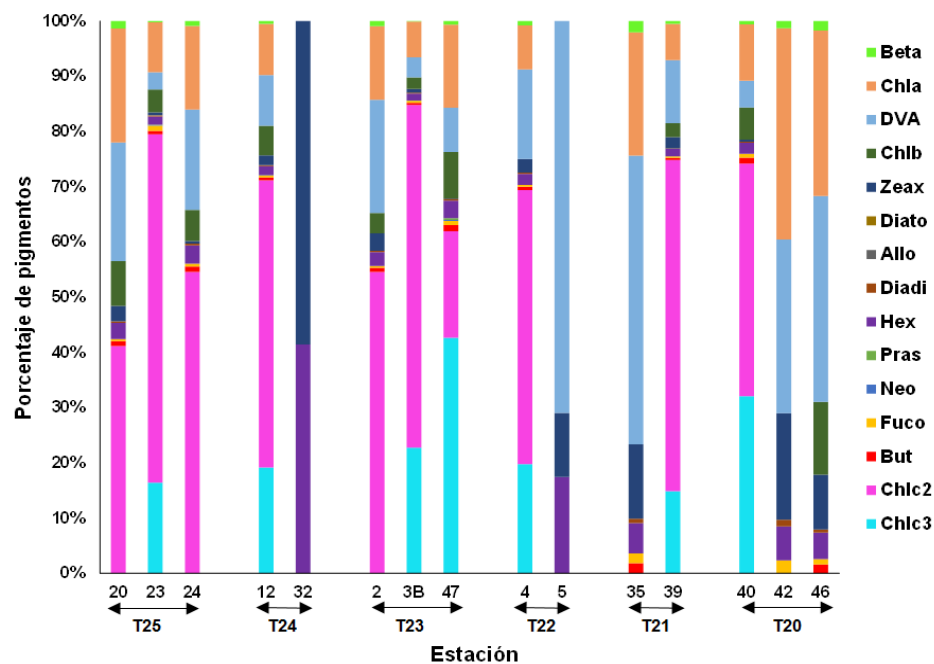


Figura 20. Concentración de pigmentos a los 50 metros de profundidad (mg/m^3), las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21 y T20: transecto 20.

5.10 Pigmentos Fotosintéticos y Fotoprotectores.

Los pigmentos fotoprotectores (PPC) a 10 m presentaron un máximo de 0.17 mg/m^3 en la estación 18 del T25 y un mínimo de 0.005 mg/m^3 en las estación 12 y 37 en el T24 y T21 respectivamente, el resto de las estaciones se observó entre 0.05 y 0.1 mg/m^3 (fig. 21). Los pigmentos fotosintéticos (PSC) se observaron en general entre los 0.008 y 0.06 mg/m^3 , las estaciones 3B y 7 muestran la mayor concentración de estos pigmentos, con valores de 0.11 y 0.013 mg/m^3 respectivamente. Los PPC dominan en casi todas las estaciones como era de esperarse, esto a excepción de la 3B, 7 y 12 (figura 21).

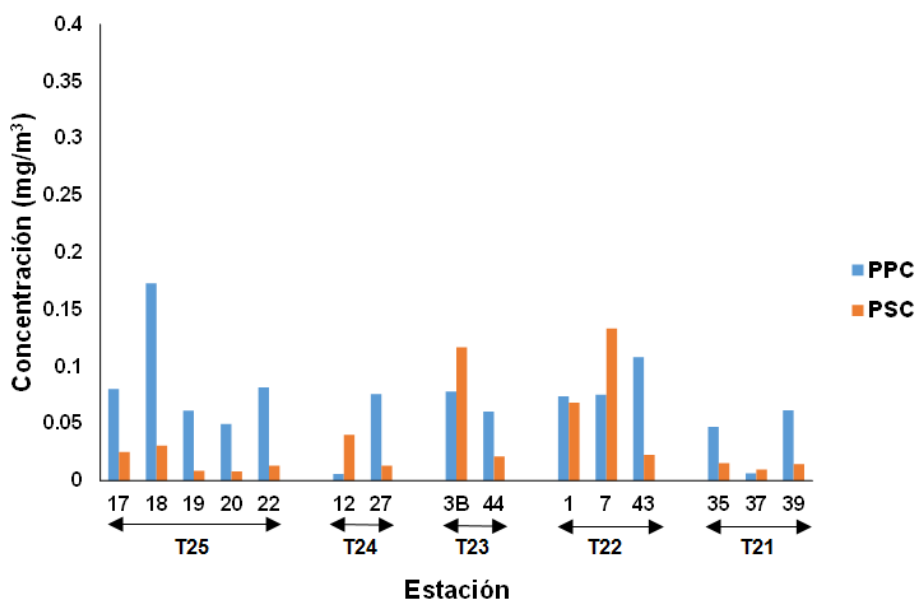


Figura 21. Concentración de pigmentos fotosintéticos (PSP) y fotoprotectores (PPC) a 10 m. Las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21 y T20: transecto 20.

Al agrupar los pigmentos fotoprotectores presentes a los 50 m se observó que las concentraciones se encontraron en un rango de 0.05 a 0.01 mg/m³, esto excluyendo las estaciones 24, 32, 47 y 5 las cuales presentaron concentraciones menores a 0.05 mg/m³. Los pigmentos fotosintéticos fueron mayores a los PPC en la estación 23 con un valor de 0.34 mg/m³, así como en las estaciones 3B con 0.22, en la 40 con 0.23 y 47 con un valor de 0.15 mg/m³ (fig. 22).

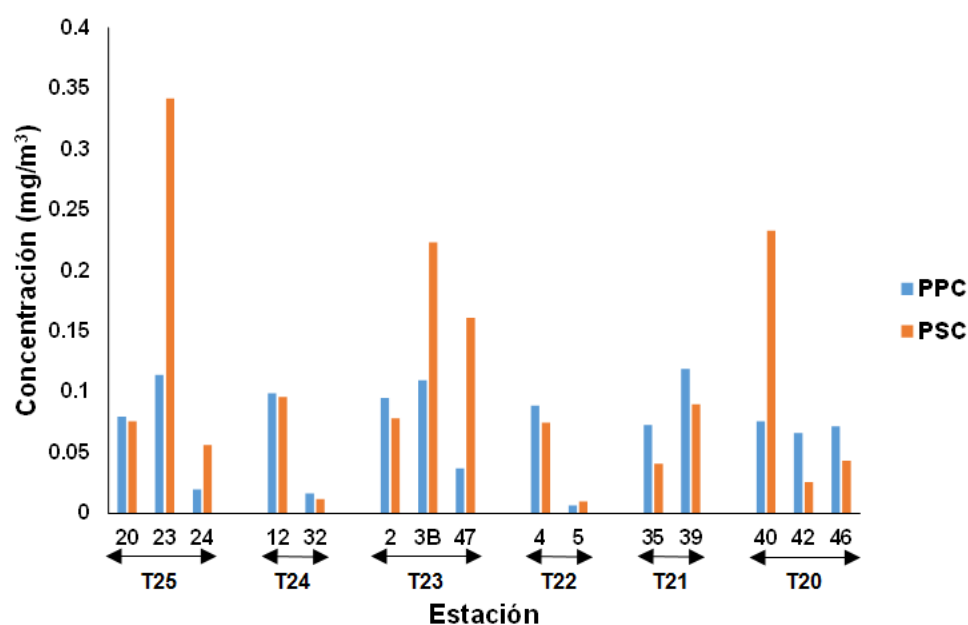


Figura 22. Concentración de pigmentos fotosintéticos (PSP) y fotoprotectores (PPC) a 50 m. Las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21 y T20: transecto 20.

5.11 Fracción de tamaño.

Las fracciones de tamaño del fitoplancton con mayor contribución durante el crucero fueron el picofitoplancton y el nanofitoplancton tanto a 10 y 50 m. A los 10 m el picofitoplancton se observó con una dominancia entre 60 y 80% aproximadamente en todas las estaciones. El nanofitoplancton dominó entre un 10 y 30 % cada estación. El microfitoplancton con menos del 10%, fue la fracción con menor porcentaje (fig. 23).

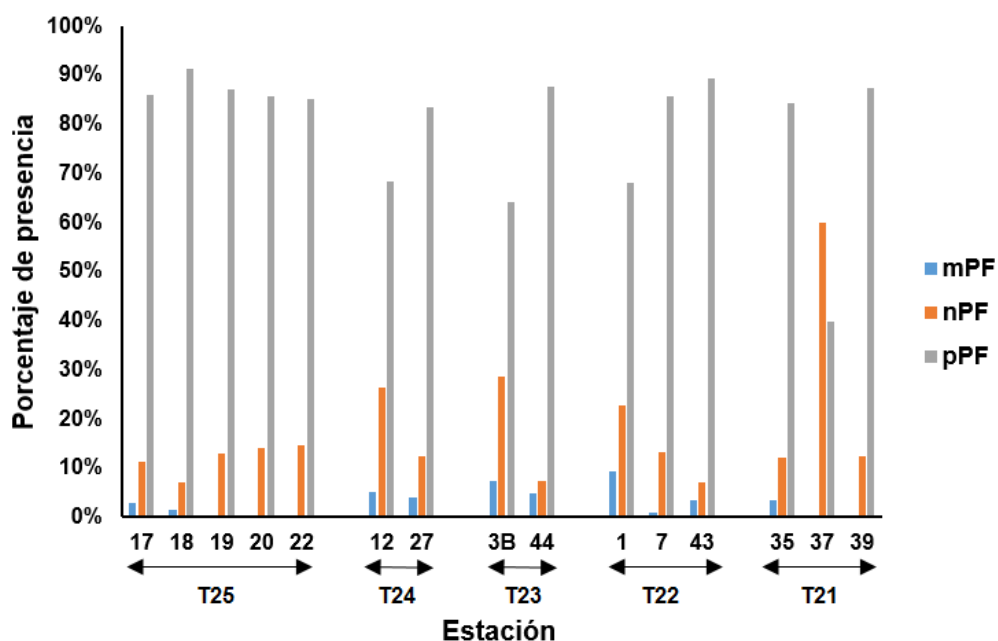


Figura 23. Porcentaje de presencia de los diferentes tamaños de fitoplancton a 10 m. Las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21 y T20: transecto 20.

El picofitoplancton a 50 m mostró una presencia del 60 % aproximadamente en cada estación. El nanofitoplancton presentó una abundancia del 20 al 50 %, con un valor máximo de 60% en la estación 5 del T22. El microfitoplancton se observó en porcentajes menores al 10% (fig. 24).

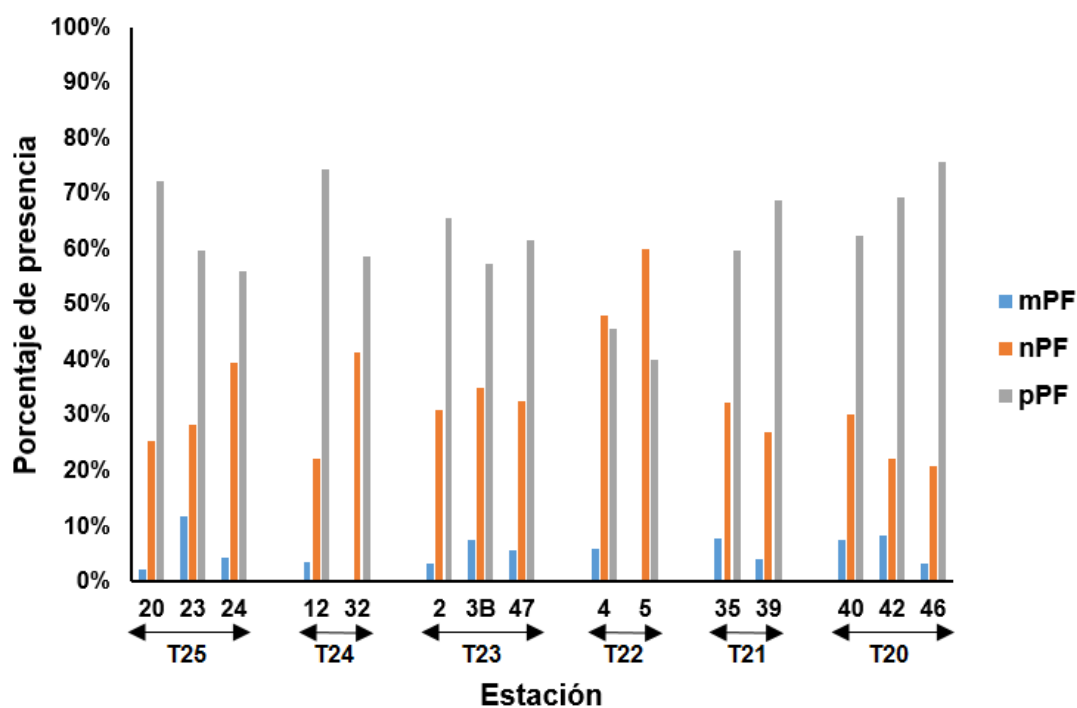


Figura 24. Porcentaje de presencia de los diferentes tamaños de fitoplancton a 50 m. Las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21 y T20: transecto 20.

5.12 CHEMTAX.

La contribución de los grupos fitoplanctónicos al total de la clorofila a, se determinó mediante el programa CHEMTAX. Los resultados se muestran en las figura 25 y 26.

Las diatomeas en el T25 a 10 m se observaron con un porcentaje de presencia menor al 10 %, en el T24 se encontraron con un valor del 12 y 18% en las estaciones 12 y 27 respectivamente, para el T23 los valores se encontraron en la misma proporción que en el transecto 24, en el T22 la estación 7 no presentó este tipo de organismos, mientras que la estación 43 mostró una abundancia del 14% y la 1 resultó ser la estación con mayor presencia de diatomeas con un 25%, el T21 solo presentó este género en la estación 35 con un 12% (fig. 25).

Las crisofitas en el T25 contribuyeron con un porcentaje menor al 2% en cada una de las estaciones, excluyendo a la estación 7, la cual no tuvo presencia de este género. En el transecto 24 se presentó un valor mínimo de 0.7 % en la estación 27 y un máximo de 12% para la estación 12. El porcentaje de estos organismos en el T23 se mostró en un 10 % para las estaciones 3B y 44. En el T22 las estaciones 1, 7 y 43 presentaron valores de 11%, 4% y 0.5% respectivamente. En el transecto 21 la estación 37 no presentó este tipo de organismo, mientras que en las estaciones 35 y 39 se observaron porcentajes menores al 5% (fig. 25).

Las Primnesiofitas en los transectos analizados se observaron con porcentajes de 2 a 7%, esto a excepción de la estación 37 del T21, la cual presentó un valor máximo de 35% (fig. 25).

Las Clorofitas en el T25 se observaron únicamente en las estaciones 17 y 18 con valores de 48 y 38 % cada una. Para el T24 el 47% se observó en la estación 12, mientras que en la estación 27 se presentó un valor de 0.05%. El transecto 23 mostró valores de 32 y 42% en las estaciones 3B y 44. El T22 presentó el porcentaje de abundancia máximo de este género a 10 m con un valor de 78% en la estación 7, el resto de las estaciones se observó entre 30 y 40 %. En la estación 37 del transecto 21 no hubo presencia de estos organismos, las estaciones 35 y 39 del mismo transecto presentaron un valor de 41% cada una.

Las Criptofitas se observaron en casi todas las estaciones con valores menores o igual a 5%. (fig. 25)

Las Prasinofitas en el T25 presentaron un porcentaje de abundancia entre el 30 a 40%, siendo este el transecto con mayor abundancia de estas, excepto en la estación 7. En el T24 solo se presentaron en la estación 27 con 20%. En el T23 se encontraron con una abundancia del 17% en cada una de las estaciones muestreadas. En el transecto 22 las prasinofitas solo la estación 43 tuvieron un porcentaje con un 15%. En el T21 presentó una abundancia en la estación 35 con un valor menor al 2% (fig. 25).

Las Cianofitas se observaron en el T25 con un mínimo de 6% en la estación 18 y un máximo de 17% en la estación 20, el resto de las estaciones se mantuvieron

entre 7 y 13%. En el T24 solo la estación 27 con un 16% presentó este tipo de fitoplancton. El transecto 23 mostró valores menores al 3%. En el T22 las estaciones 1, 7 y 43 presentaron una abundancia del 4, 0.5 y 7.8 % respectivamente. El T21 mostró abundancias de 7 a 8% en cada una de las estaciones (fig. 25).

Prochlorococcus se observó en todas las estaciones de los transectos, presentando un máximo de 55% en la estación 37 del T21 y un mínimo de 10% en las estaciones 18 y 3B de los transectos 25 y 22 respectivamente, en el resto de las estaciones se observaron abundancias del 15 al 30 %.

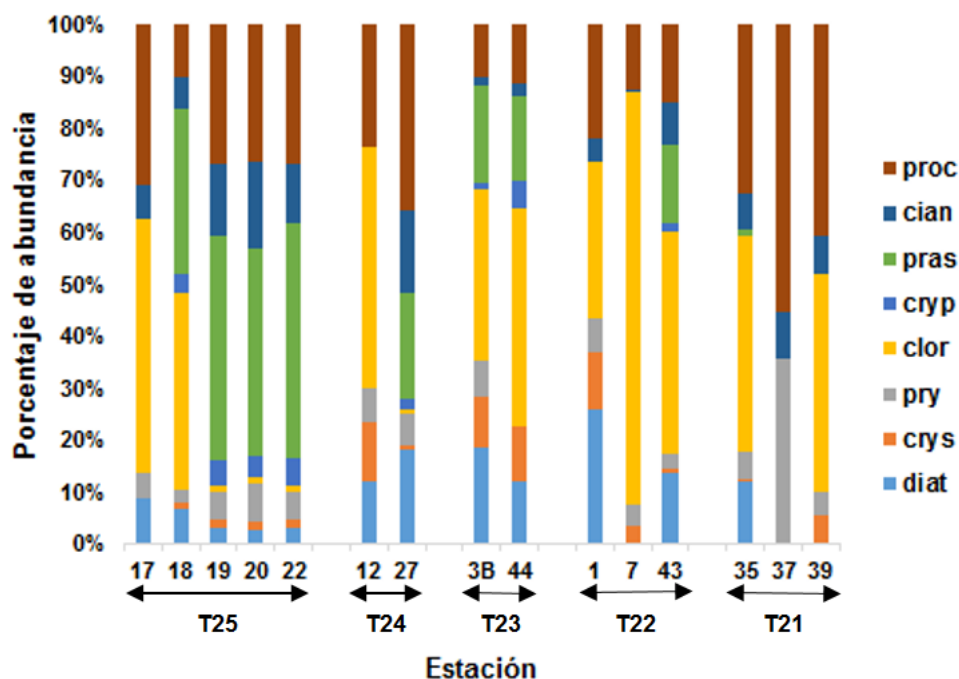


Figura 25. Porcentaje de abundancia de los grupos fitoplanctónicos a 10 m. Las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21 y T20: transecto 20.

Los porcentajes de abundancia de los grupos fitoplanctónicos a 50 m de profundidad. El grupo de las diatomeas en el T25 presentó un promedio de 15%, la estación 20 mostró un 7%, la 24 un 11% y la 23 mostró el valor más alto del transecto con 28 % (fig. 26). El T24 solo mostró abundancia de este grupo en la estación 12 con un valor de 10%. En el transecto 23 se presentó un máximo en la estación 3B con valor de 18 %, en las estaciones 4 y 47 se observaron valores de 9 y 14% respectivamente. En el T22 únicamente la estación 4 tuvo presencia de diatomeas con valor de 14%. El transecto 21 mostró valores de 23 y 12% para las estaciones 35 y 39. En el T20 se observaron valores de 19, 22 y 10% en las estaciones 40, 42 y 46 respectivamente.

El porcentaje de contribución de las Crisofitas se observó en todos los transectos con un promedio de 17%, con un máximo de 21% en la estación 43 y un mínimo de 1.5% en la estación 42, únicamente las estaciones 32 y 5 no presentaron este género (fig. 26).

Las Primnesiofitas se observaron en todas las estaciones muestreadas, con porcentajes hasta el 35% en la estaciones 32 del T24 y 5 del T22, en el resto de las estaciones los valores se observan entre 6 y 9%.

Las clorofitas se observaron en general con contribuciones mayores a 20 % en casi todos los transecto, esto a excepción del T22 el cual presentó un mínimo de 0.4 % en la estación 4. Las estaciones 32 del T24, la 5 del T22 y la 35 del T35 no presentaron abundancia de este género (fig. 26).

Las Criptofitas se observaron en los transectos 25, 23, 22 y 21 con valores hasta 5%, los T24 y T20 no tuvieron presencia de este género.

Las Prasinofitas en el T25 mostraron un promedio de 11 % con un mínimo de 4% en la estación 23, y un máximo de 18% en la estación 20. En el T24 únicamente la estación 12 presentó este género con una abundancia del 5%. El T23 presentó valores de 7, 13 y 17% para las estaciones 2, 3B y 47 respectivamente. En el T22 solamente la estación 4 tuvo presencia de Prasinofitas con un porcentaje de 13%. El T21 no presentó este tipo de género. Por último en el transecto 20 la estación 42 presentó la abundancia máxima de Prasinofitas a los 50 m con un valor de 39%.

Las Cianofitas se observaron en todos los transectos y en todas las estaciones, en general las estaciones presentaron valores iguales o menores al 10%, esto a excepción de la estación 5 del T24 la cual presentó el 37% de abundancia, este es el valor máximo de este grupo a 50 m (fig. 26).

Prochlorococcus se observó en todos los transectos, en el T25 con valores de 19, 5 y 21% para las estaciones 20, 23 y 24 respectivamente. El T24 mostró presencia de estos solo en la estación 12 con un 17%. El T23 presentó en la estación 2 un valor de 28%, en la 3B 10% y en la 47 el 9%. En el transecto 22 se observó la abundancia más alta a 50 m de este género con un valor de 55 % en la estación 5. El T21 mostró porcentajes de 41 y 30% para las estaciones 35 y 39. El T20 presentó valores de 7, 16 y 22 % en las estaciones 40, 42 y 46 (fig. 26).

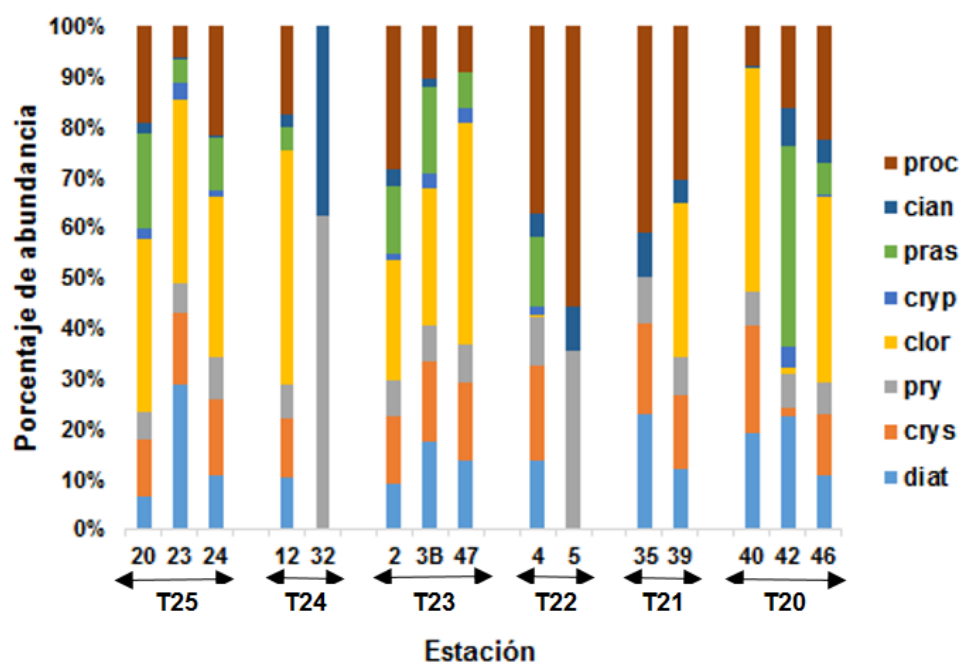


Figura 26. Porcentaje de abundancia de los grupos fitoplanctónicos a 50 m. Las flechas en el eje x indican el transecto en el que se encuentra cada una de las estaciones. T25: transecto 25, T24: transecto 24, T23: transecto 23, T22: transecto 22, T21: transecto 21.

5.13 Abundancia de fitoplancton.

La abundancia del fitoplancton a 10 m de profundidad presentó un promedio de 2250 cél/L, con un máximo de 6328 cél/L y un mínimo de 414 cél/L (fig. 27a). A los 50 m se presentaron un promedio de 2800 cél/L, con un máximo de 5500 cél/L y un mínimo de 1516 cél/L (fig. 27b).

La abundancia de diatomeas a los 10 m se observó entre las 500 y 1000 cél/L. Se mostró un incremento de abundancia mayor o igual 2000 cél/L en las estaciones 3B (2500 cél/L), 40 (2000 cél/L) y 47(2000 cél/L). En la zona NE en el T25 pudimos observar un máximo de 5000 cél/L aproximadamente, el cual se localiza en la estación 23. Las estaciones con valores menores a 500 cél/L se situaron en las estaciones 1, 20, 32 y 31. (Figura 28a). A los 50 metros de profundidad se observó una abundancia de 1000 a 1500 cél/L, exceptuando a las estaciones 7, 30 y 38 las cuales se mostraron valores entre 2500 y 3000 cél/L (fig. 28b).

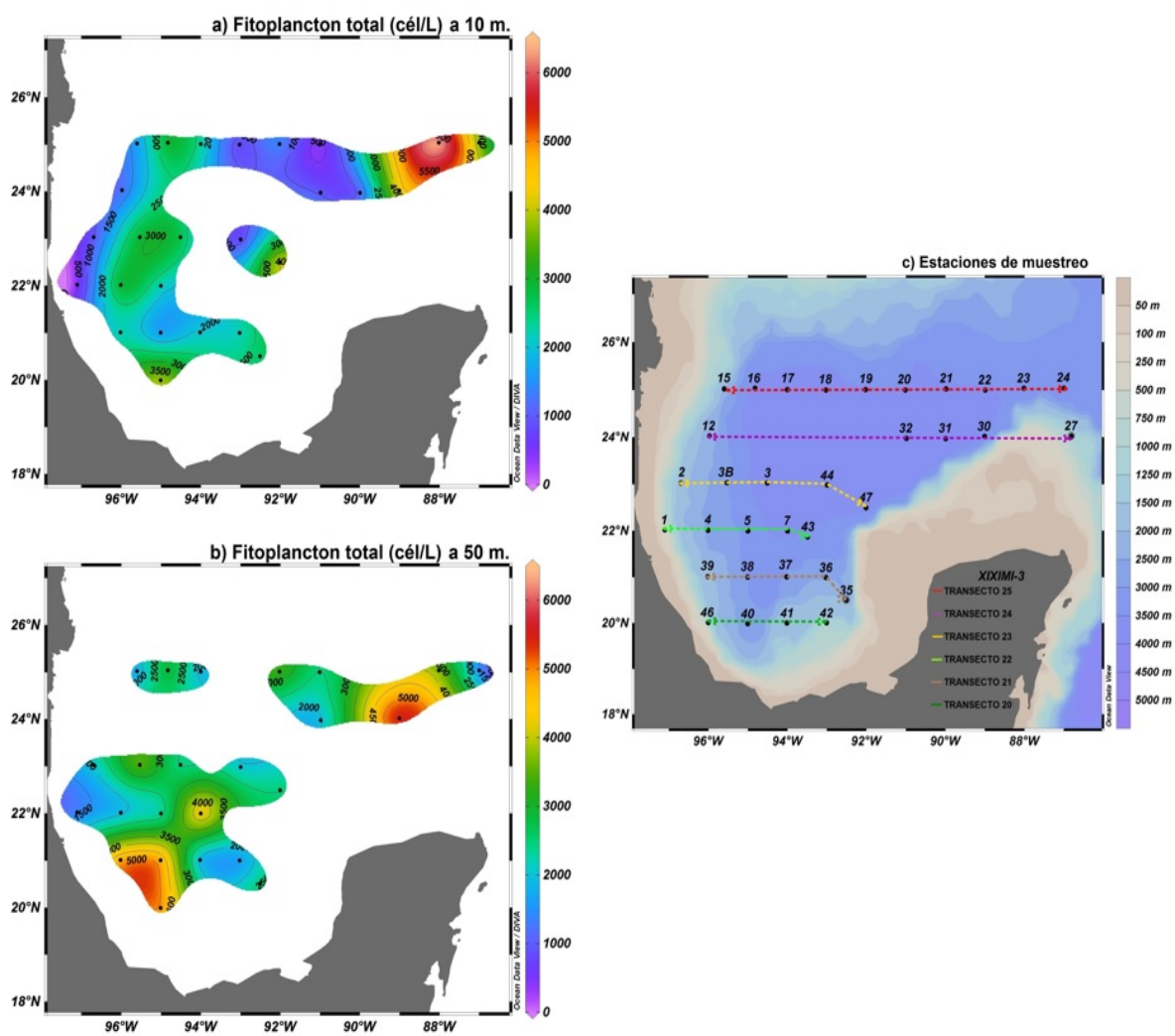


Figura 27. Distribución espacial de fitoplancton total. a) 10 m, b) 50 m y c) estaciones de muestreo.

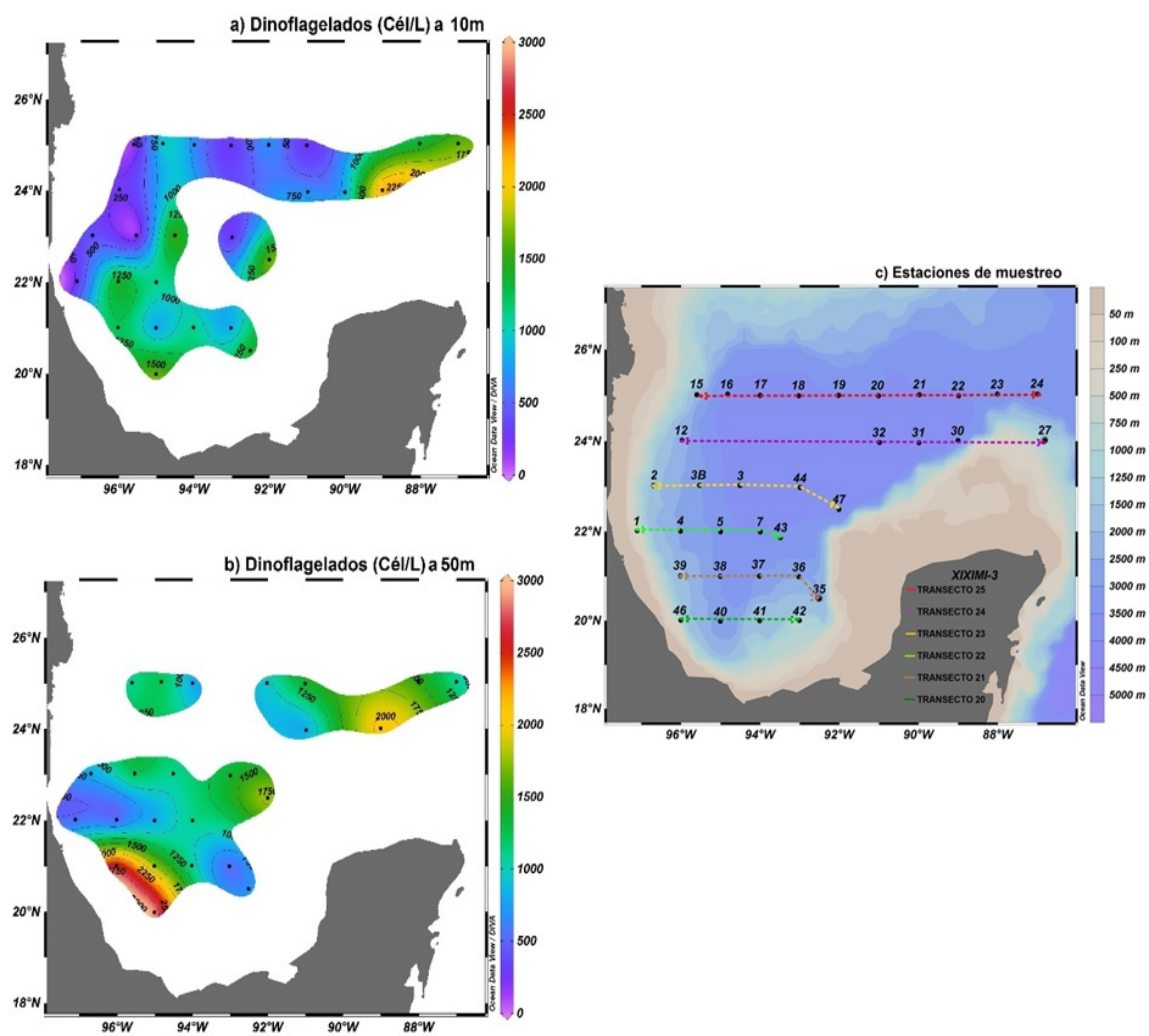


Figura 28. Distribución espacial de diatomeas. a) 10 m, b) 50 m y c) estaciones de muestreo.

La abundancia de los dinoflagelados a los 10m presentó valores < 500 cél/L en la zona oeste de los transecto 25, 24, 23 y 22, en la parte central sur se mantuvo entre 750 y 1500 cél/L, mientras que en la zona Este del T24 se observó un incremento el cual llegó a 2250 cél /L en la estación 30 (figura 29a). A los 50 m se observó de manera general una variación entre 1000 y 1500 cél/L, a excepción de la zona Este del T24 y Oeste de los transectos 20 y 21 las cuales presentaron un incremento que llegó a las 2000 y 3000 cél/L respectivamente (fig. 29b).

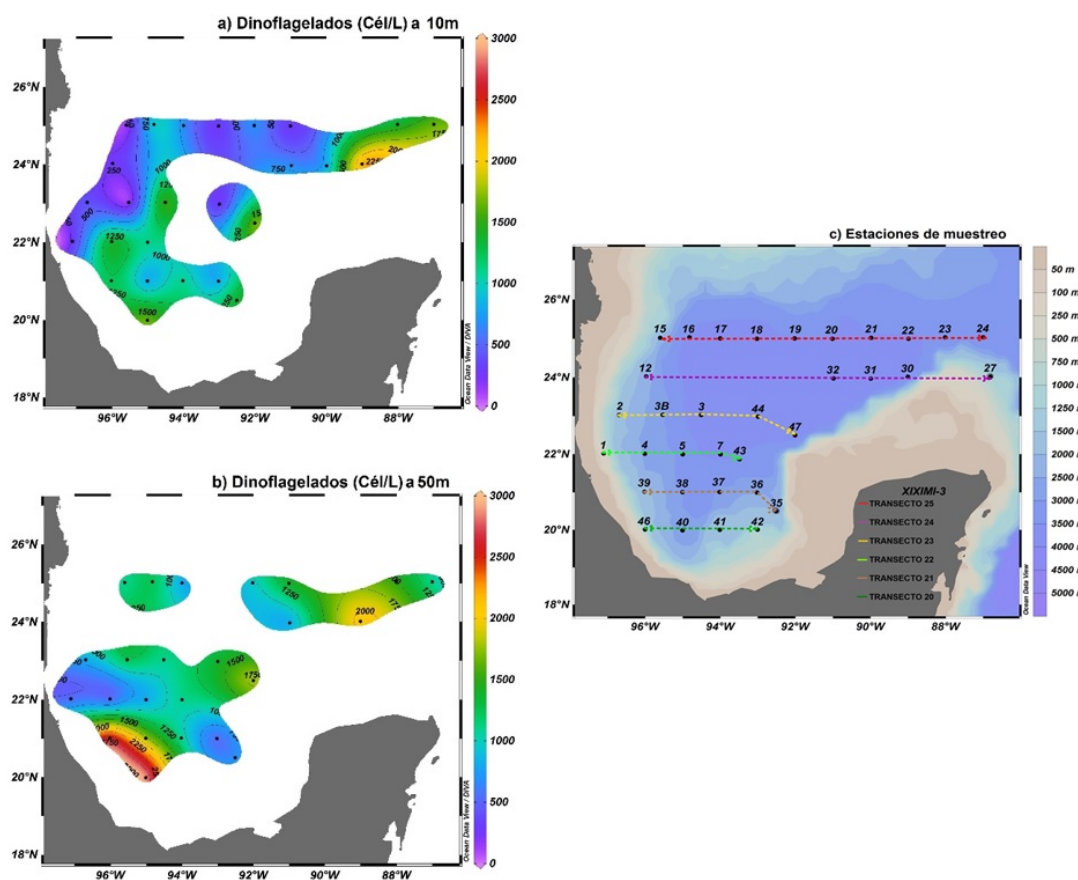


Figura 29. Distribución espacial de dinoflagelados. a) 10 m, b) 50 m y c) estaciones de muestreo.

6 Discusiones.

Al analizar la Chla a 10 m se observó un promedio de 0.2 mg/m^3 , mientras que a 50 m el promedio fue de 0.4 mg/m^3 , las concentraciones de Chla fueron mayores a 50 m, ya que cercano a esta profundidad se encuentra generalmente el máximo profundo de clorofila (DCM), la posición del DCM es el resultado de un equilibrio entre la concentración de nutrientes y la irradiancia disponible (Totti et al., 2000; Sabatés et al. 2007), este suele estar asociado a la nutriclina (Lohrenz et al., 1988) y a la termoclina, donde el fitoplancton tiende a concentrarse al reducirse en ellas su velocidad de sedimentación (Jansá, 2008). Además de la acumulación de biomasa, en el DCM hay un aumento de la cantidad de pigmentos por célula debido a la baja irradiancia, lo que contribuye a incrementar los valores de concentración clorofila en esa profundidad (Estrada, 1985b; Totti et al., 2000). Sidón (2015) reportó para esta misma época del año los máximos de fluorescencia entre 50 y 100 m de profundidad con valores >0.3 (unidades relativas). De manera general en ambas profundidades, los valores en la zona central oscilaron entre 0.05 y 0.2 mg/m^3 , esta zona está asociada a giros anticiclónicos (GA) que se desprende de la CL, estos presentaron temperaturas de 23.9°C , salinidades de 36.6 ups y estuvieron asociados a las concentraciones de Chla más bajas. Esta región en la época de invierno ha sido caracterizada con anterioridad por Aguirre-Gómez (2005) como una zona oligotrófica con concentraciones iguales o menores a 0.1 mg/m^3 . Las concentraciones más altas de 0.6 mg/m^3 aproximadamente, se encontraron asociadas giros ciclónicos en

los cuales se observaron temperaturas de 22.5°C, salinidades de 36.4 ups aproximadamente. Estas concentraciones se presentaron en el T25, en la zona sur en la Bahía de Campeche y en las estaciones más cercanas a la costa frente a Tamaulipas y Veracruz. Según lo reportado por Aguirre-Gómez (2005) para esta misma época del año, las concentraciones altas frente a la costa de Tamaulipas y Veracruz fueron respuesta al choque del gran giro anticiclónico con el talud continental, lo cual generó la formación de estructuras ciclónicas al norte y sur del giro anticiclónico, asimismo reportó que las concentraciones en la zona sur en Bahía Campeche fueron resultado del giro ciclónico cuasipermanente de esta zona. Las variaciones de la Chla están relacionadas con cambios en la estructura de tamaño de la comunidad, lo que influye las variaciones en el a_{ph} (Gonzalez-Silvera *et. al.*, 2006)

Durante el periodo de muestreo tanto a 10 y 50 m el coeficiente de absorción del fitoplancton a los 440 nm mostró valores con un rango entre 0.005 y 0.058 m^{-1} , Por otra parte la magnitud de la región roja de las curvas espectrales mostró en general valores entre 0.005 y 0.01 m^{-1} . Las curvas del a_{ph} con magnitudes más altas se observaron en las estaciones 15 a 10 m, 23 a 50 m y 40 a 50 m, a su vez estas presentaron concentraciones altas de Chla por lo que presentaron una mayor capacidad de absorción de luz. La estación 15 presentó una magnitud de 0.056 m^{-1} a los 440 nm y 0.02 m^{-1} a 675 nm, dicha estación es la más cercana a la costa del transecto 25 y se encuentra en el centro de uno de los giros ciclónicos, localizados en la latitud 25. La estación 23 localizada en el mismo transecto pero en la zona este mostró valores de 0.033 m^{-1} a 440 nm y

0.015 m^{-1} a 675 nm, esta estación se encontró ubicada al borde del giro anticiclónico generado por la entrada de la CL, la periferia de los GA ha sido reportada por Cullen, *et al.*, 2002 como favorable para la inyección de nutrientes en la capa de mezcla superficial, así como para la productividad biológica. En la estación 40 del T20 se observó un valor de 0.03 m^{-1} a 440nm y 0.011 m^{-1} a 675 nm, está se encontró ubicada al sur en Bahía Campeche y su alta absorción se asocia al giro ciclónico de esta zona. Las curvas espectrales con magnitudes más bajas se presentaron en la estación 27 a 10 y 50 m, en ambas profundidades las magnitudes a 440 y 675 nm fueron iguales con valor de 0.0056 m^{-1} y 0.002 m^{-1} respectivamente, esta estación está localizada al este del transecto 25 dentro del giro anticiclónico generado por la entrada de la corriente de lazo, la cual lleva de las aguas superficiales más oligotróficas en los océanos, según lo reportado por Continental Shelf Associates, Inc., en el 2000.

El coeficiente de absorción específico a 440 nm a 10 y a 50 m de profundidad a finales del invierno se observó en un intervalo de 0.05 a 0.2 ($\text{m}^2(\text{mgChla})^{-1}$), mientras que las magnitudes a los 675 nm se encontraron entre 0.02 y 0.05 ($\text{m}^2(\text{mgChla})^{-1}$). Los valores de a^*_{ph} presentaron mayor variación a los 440 nm en comparación con los 675 nm, ya que los carotenos accesorios tienen sus máximos de absorción más cercanos a la banda de los 440 nm que a los 675 nm, lo que evidencia que la composición de los pigmentos es un factor importante para explicar el a^*_{ph} (Gonzalez-Silvera *et al.*, 2006). Estos resultados fueron más bajos comparados por los reportados por Millán Núñez (2012, 2013) para la época de primavera y verano. A los 10 m las estaciones con a^*_{ph440nm}

mayor a $0.175 \text{ (m}^2\text{(mgChla)}^{-1}\text{)}$ fueron la 24 de T25, 37 de T21, 40 T20 y 43 de T22; el valor mínimo fue de $0.05 \text{ (m}^2\text{(mgChla)}^{-1}\text{)}$ y se localizó en las estaciones 17 y 18 del T25, 32 del T24 y 1 del 22. A los 50 m las estaciones con a^*_{ph440nm} mayor a $0.178 \text{ (m}^2\text{(mgChla)}^{-1}\text{)}$ fueron la 16 del T25 y la 35 del transecto 21. Los valores mínimos se localizaron en las zona oeste de los transectos 24, 23, 21 y 20, así como en la zona este del T24 y T25. En ambas profundidades las estaciones con los valores más bajos, se encontraron en zonas de giros ciclónicos y los valores más altos en giro anticiclónicos. El a^*_{ph} es inversamente proporcional a la Chla, por lo que mayores concentraciones de este pigmento están relacionadas con valores menores de a^*_{ph} (Barocio-León *et al.*, 2007). Las variaciones en el coeficiente específico se deben a la composición de pigmentos de los diferentes grupos del fitoplancton y por el efecto de empaquetamiento (Sosa-Ávalos *et. al.*, 2015).

Al analizar los pigmentos mediante HPLC a los 10 y 50 m de profundidad se identificaron en total 15 pigmentos. Los más relevantes para esta zona fueron Chla ($0.04\text{-}1.03 \text{ mg/m}^3$), zeaxantina ($0.0005\text{-}0.15 \text{ mg/m}^3$), Dva ($0.03\text{-}0.60 \text{ mg/m}^3$) y Hex ($0.008\text{-}0.076 \text{ mg/m}^3$). Al compararlos con los reportados por Millán-Núñez (2012, 2013) en general son concentraciones más bajas, esto debido a que el muestreo se llevó a cabo en época de invierno, mientras que los antes reportados corresponde a primavera-verano.

Los pigmentos fotoprotectores a 10 m de profundidad mostraron concentraciones que van desde 0.005 a 0.17 mg/m^3 , mientras que a 50 m estos

se observaron 0.001 a 0.01 mg/m³, como era de esperarse de forma general los fotoprotectores mostraron mayores concentraciones a 10 m, debido a que a esta profundidad el aparato fotosintético de las células necesita más protección para evitar la fotoinhibición (Majchrowski y Ostrowska, 2000).

Los pigmentos fotosintéticos a 10 m presentaron concentraciones en promedio menores a 0.05 mg/m³, a los 50 m las concentraciones tuvieron un promedio de 0.15 mg/m³. Estos pigmentos fueron mayores a medida que aumentó la profundidad, ya que a mayor profundidad la penetración de la luz es menor por lo que la célula necesita de estos pigmentos que tienen la función de ampliar el espectro y la capacidad de absorción, dando como resultado un incremento en la eficiencia (Majchrowski y Ostrowska 2000; Kirk 2011).

Con el análisis del porcentaje de tamaño pudimos observar que las fracciones de tamaño del fitoplancton con mayor contribución durante el crucero fueron el picofitoplancton y el nanofitoplancton tanto a 10 y 50 m. Sin embargo en general la abundancia de células de picoplancton fue mayor, estas células se encuentran en lo general en zonas con bajas concentraciones de nutrientes. Sidón (2015) reportó para finales del invierno valores bajos de nutrientes los cuales oscilaban entre de 0.5 y 2.0 µM, mientras que Signoret *et. al.*, (2006) reportaron para el GM en primavera-verano que el mayor aporte de biomasa fitoplanctónicas pertenece al nanoplancton.

La estructura de tamaño de la comunidad determina en gran parte la magnitud de a^*_{ph} , que a su vez está relacionada con la concentración de Chla, la

cual en el GM según Signoret *et. al.*, (2006) está dominada por la circulación oceánica inducida por la CL. Mayores concentraciones de Chla están relacionadas con células de mayor tamaño y con menores valores de a^*_{ph} (Barocio-León *et al.* 2006).

El efecto paquete se basó en la razón B/R. A los 10 m mostró valores mayores a tres en zona norte en la estaciones 17, 18, 19 y 24 del T25 y 27 y 30 del T24, de igual manera se observó este valor en la zona de Bahía Campeche. A los 50 m profundidad en la zona sur en el transecto 20 y en la región norte en las estaciones 19 del T25, así como la 27 y 32 del T24 también se observaron valores iguales o mayores a tres. Estos valores indican una fuerte dominancia de picofitoplancton como cianobacterias. Este tamaño de organismos presentan una mayor relación superficie: volumen por lo que tiene ventaja en la utilización y aprovechamiento de la luz y nutrientes respecto a células más grandes (Moore *et al.*, 1995; Millán-Núñez *et al.*, 2004). Los valores menores 2.5 se encontraron a 10 m únicamente en la estación 1 del T22. A los 50 m en las estación 1, 2 ,5 y 15, en ambas profundidades estas estaciones son las más cercanas a la costa. Este valor indica un predominio de células de microfitoplancton, las cuales presentan una disminución en la eficiencia para absorber luz (Macías-Carballo, 2011). El efecto paquete para este tamaño de células es más importante en comparación a la células del picoplancton (Gonzalez-Silvera *et. al.*, 2006)

Basándonos en el análisis de pigmentos, los principales taxones de fitoplancton en la región central sur del Golfo de México fueron *Prochlorococcus*, Primnesiofitas, Criptofitas, Crisofitas y diatomeas. Presentando condiciones oceanográficas similares Quian *et. al.*, 2003 reportaron estos mismos taxones en el GM.

Las mayores abundancias de diatomeas en ambas profundidades se encontraron en la zona sur en Bahía Campeche la cual estuvo influenciada por la presencia de un giro ciclónico y en la zona este de los transecto 24 y 25, esta región se encuentra en el borde del giro anticiclónico generado por la entrada de la CL. Sidón (2015) observó que los nitritos + nitratos presentaron un máximo en la zona de Bahía Campeche con una concentración de 3 μM , el cual fue producto del ascenso de agua profunda que generó un bombeo de nutrientes, esto provocado por la estructura ciclónica, asimismo observó que la somerización de la capa de mezcla en el borde del giro anticiclónico está asociada a al aumento de diatomeas, aun considerando que la concentración de nutrientes fue relativamente baja. Los dinoflagelados presentaron mayor abundancia al igual que las diatomeas en la zona de bahía Campeche y en el este del T24 Y T25, sin embargo estos también presentaron abundancia en el centro del área de estudio en la latitud 23. Sidón (2015) reportó un aumento en la concentración de silicatos entre 2 y 3 μM en la latitud 20 y 23. Por lo que podemos decir que la abundancia de las células aumenta en paralelo con la concentración de nutrientes.

Se compararon las dos formas patrón a los 10 m de profundidad con los espectros de absorción de los diferentes pigmentos. Las formas F1 y F2, las cuales delimitan dos regiones fitoplactónicas, estuvieron dominadas por la forma del espectro de absorción de la Chla con un pico máximo a los 440nm y otro a los 675 nm. La F1 presentó un hombro de pequeña magnitud alrededor de los 480 nm, lo que nos indicó la presencia de pigmentos como Fuco, Peri, 19Hex y But, los cuales están asociados a organismos como diatomeas, Primnesiofitas, crisofitas y dinoflagelados (Barocio *et al.*, 2006). En la F2 se observó un hombro a los 460 nm aproximadamente, debido a la presencia de pigmentos como Zea, Dva, Allo, Chlb y Diad, estos se asocian a las cianobacterias, criptofitas, prochlorococcus, clorofitas (Bidigare *et al.*, 1989; Millie *et al.*, 1997, Gonzalo-Pérez *et al.* 2007).

A los 50 m se observaron cuatro formas patrón que delimitan las cuatro diferentes regiones fitogeográficas. La F1 y F2 presentan la misma forma que las antes mencionadas a 10 m, La F3 presentó un máximo a los 440 nm seguido por uno de la misma magnitud a los 480 nm, lo que nos mostró la presencia de pigmentos como Fuco, Peri, 19Hex y But, estos están asociados a organismos como diatomeas, Primnesiofitas, crisofitas y dinoflagelados (Barocio *et al.*, 2006) en la F4 se observó un hombro bien marcado a los 460 nm característico de pigmentos como Zea, Dva, Allo, Chlb y Diad, los cuales se asocian a las cianobacterias, criptofitas, diatomeas, dinoflagelados y prochlorococcus (Bidigare *et al.*, 1989; Millie *et al.*, 1997, Gonzalo-Pérez *et al.* 2007).

7 Conclusiones.

- Las condiciones oceanográficas estuvieron fuertemente dominadas por las estructuras ciclónicas y anticiclónicas.
- El coeficiente de absorción de luz presentó una tendencia a aumentar cuando la Chla aumentaba, esto en las zonas dominadas por estructura ciclónicas.
- El coeficiente de absorción específico presentó una relación inversa con la clorofila *a*. Asimismo cuando este presentaba valores altos encontramos que los organismos del picoplancton dominaban.
- La estructura de tamaño dominante fueron los organismos de pico y nanofitoplancton.
- Los pigmentos más relevantes para esta zona de estudio fueron la Chla, zeaxantina, Dva y Hex.
- Los taxones que se infirieron mediante la concentración de pigmentos fueron: *Prochlorococcus*, Primnesiofitas, Criptofitas, Crisofitas y diatomeas.
- A 10 m de profundidad se encontraron dos provincias fitogeográficas las cuales estuvieron dominadas por la forma del espectro de absorción de la Chla con un pico máximo a los 440nm y otro a los 675 nm, sin embargo la F1 presentó un hombro de pequeña magnitud alrededor de los 480 nm, lo que nos indicó la presencia de pigmentos como Fuco, Peri, 19Hex y But, los cuales están asociados a organismos como diatomeas, Primnesiofitas,

crisofitas y dinoflagelados. En la F2 se observó un hombro a los 460 nm aproximadamente, debido a la presencia de pigmentos como Zea, Dva, Allo, Chlb y Diad, estos se asocian a las cianobacterias, criptofitas, prochlorococcus, clorofitas.

- A 50 m se observaron cuatro provincias fitogeográficas. Únicamente dos de estas fueron diferentes que las presentadas a 10 m. La F3 presentó un máximo a los 440 nm seguido por uno de la misma magnitud a los 480 nm, lo que nos mostró la presencia de pigmentos como Fuco, Peri, 19Hex y But, los cuales están asociados a organismos como diatomeas, Primnesiofitas, crisofitas y dinoflagelados, en la F4 se observó un hombro bien marcado a los 460 nm característico de pigmentos como Zea, Dva, Allo, Chlb y Diad, estos se asocian a las cianobacterias, criptofitas, diatomeas, dinoflagelados y prochlorococcus.

8 Bibliografía.

- Aguirre-Hernández, E., Gaxiola-Castro, G., Nájera-Martínez, S., Baumgartner, T., Kahru, M., Mitchell, B. G. (2004). Phytoplankton absorption, photosynthetic parameters, and primary production off Baja California: summer and autumn 1998. *Deep-Sea Res. II* 51: 799–816.
- Barocio-León, O. (2006). Variabilidad espacial y temporal del coeficiente de absorción y pigmentos del fitoplancton en la Corriente de California. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. pp. 174.
- Barocio-Leon, O. A., Millan-Nunez, R., Santamaria-del-Angel, E., Gonzalez-Silvera, A., Trees, C. C., & Orellana-Cepeda, E. (2007). Bio-optical characteristics of a phytoplankton bloom event off Baja California Peninsula (30–31° N), *Continental Shelf Res.* 28, 672–681.
- Barocio-León, O., Millán-Núñez, R., Santamaría-del-Ángel, E., Gonzalez-Silvera, A., & Trees, C. (2006). Spatial variability of phytoplankton absorption coefficients and pigments off Baja California during November 2002. *J. Oceanogr.* 62: 873–885.
- Bidigare, R. R., Ondrusek, M. E., Marrow, J. H., & Kiefer, D. A. (1990). In vivo absorption of algal pigment. *SPIE*, 1302: 290–302.
- Bidigare, R. R., Schofield, O., & Prizelin, B. B. (1989). Influence of zeaxanthin on the quantum yield of photosynthesis of *Synechococcus* clone W87803 (OC2). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 56: 177- 188.
- Biggs, D.C., Müller-Karger, F.E. (1994). Ship and satellite observations of chlorophyll stocks in interacting cyclone-anticyclone eddy pairs in the western Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.* 99: 7371-7384.
- Bricaud, A., Claustre, H., Ras, J., & Oubelkheir, K. (2004). Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: influence of the size structure of algal populations. *J. Geophys. Res.* 109 C11010.

- Claustre, H. (1994). The trophic status of various oceanic provinces as revealed by phytoplankton pigment signatures. *Limnol. Oceanogr.* 39, 1207-1211.
- Cleveland, J.S. & Weidemann, A.D. (1993). Quantifying absorption by aquatic particles: A multiple scattering correction for glass-fiber filters. *Limnol. Oceanogr.*,38, 1321–1327.
- Continental Shelf Associates, Inc. (2000). Deepwater Gulf of Mexico Environmental and socioeconomic Data Search and Literature synthesis. Volume I: Narrative Report. U.S. Department of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico Ocs Region New Orleans, L.A. osc study MMS 2000-049. 340.
- Cullen, H. M., Kaplan, A. P., Arkin, A., & deMenocal, P. B. (2002). Impact of the North Atlantic Oscillation on Middle Eastern climate and streamflow, *Clim. Change*, 55, 315 – 338, 2002.
- Cupp, E. E. (1943). Marine Plankton Diatoms of the West Coast of North America. *Bulletin of the Scripps of Oceanogr. University of California.* 5(1):1-237.
- Estrada, M. (1985b). Deep phytoplankton and chlorophyll maxima in the Western Mediterranean. En Moraitou-Apostolopoulou, M y Kiortis, V. (Eds.). *Mediterranean Marine Ecosystems*. Plenum Press. New York. pp: 247-277.
- 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., & Cantú-Ontiveros, J. P. (2010). Biomasa y producción del fitoplancton. En: Gaxiola-Castro G, Durazo R (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1977–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. Pp. 59– 85
- Gibb, S. W., Cummings, D. G., Irigoien, X. R., Barlow, G., Fauzi, R., & Mantoura, C. (2001). Phytoplankton pigments chemotaxonomy of the northeastern Atlantic Deep-Sea Res. II, 48. pp. 795–823

- Gilbert, C. D., Das, A., Ito, M., Kapadia, M., & Westheimer, G. (1996). Spatial integration and cortical dynamics. *Proc Natl Acad Sci U S A*; 93:615–622.
- González-Silvera, A. G., Santamaría-del-Ángel, E., & Millán-Núñez, R. (2006). Spatial and temporal variability of the Brazil-Malvinas Confluence and the La Plata Plume as seen by SeaWiFS and AVHRR imagery. *J Geophys Res* 111: C06010.
- Gonzalo, P., Claudia, Q., Esteban, B., & Beatriz, M. (2007). Phytoplankton absorption spectra along the water column in deep North Patagonian Andean lakes (Argentina). *Limnologica*, 37, 3–16.
- Hasle, G.R. (1978). The inverted-microscope method. *Phytoplankton Manual*. A. Sournia, ed. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Paris. Capítulo 5.2.1 337 pp.
- Hasle, G.R., & Syvertsen, E. E. (1997). Marine diatoms in Tomas CR ed, *Identifying Marine Phytoplankton*, academic Press, San Diego: 5-385.
- IOCCG. (2000). Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex Waters. Reports of the International Ocean Colour Coordinating Group, Sathyendranath, S. (ed.), No. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- Jansá, J. (2008). ¿Es el mar Balear un mar oligotròfic?. Síntesi sobre les dades de clorofil-la fitoplànctonica obtinguda des de 1974 al Centre Oceanogràfic de Balears (IEO). *Estudis Baleàrics (IEB)* 88/89.
- Jeffrey, S. W., Mantoura, R. F. C., & Wright, S. W. (1997). *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines and modern methods*. UNESCO Publishing. París. 661 pp.
- Kahru, M., Mitchell, B. G. (2000). Influence of the 1997-98 El Niño on the surface chlorophyll in the California Current. *Geophys. Res. Lett.* 27: 2937–2940.

- Kirk, J. T. O. (2011). Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3er edition. Cambridge University Press, Cambridge.649p.
- Lara-Lara, J. R., Arenas, F. V., Bazán, G. C., Díaz, C. V., Escobar, B. E., García, A.M. de la C., Gaxiola, C. G., Robles, J. G., Sosa, A. R., Soto, G. L. A., Tapia, G. M., & Valdez-Holguín, J. E. (2008). Los ecosistemas marinos. In: CONABIO (eds.), Capital Natural de México. Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. México, pp. 135–159.
- Lara-Lara, J. R., Bazán-Guzmán, C., Cabrales-Talavera, G., Sánchez-Robles, C. & Moreles-Torres, E. (2012). Fitoplancton, Taxonomía. En: Herzka S, Herguera JC, Licea A, Sheinbaum J y Ferreira V. Establecimiento de la línea base en aguas profundas del Golfo de México en respuesta al derrame petrolero asociado a la plataforma DeepwaterHorizon. Informe final. (pp. 225-245).
- Llewellyn, C. A., Fishwick, J. R., & Blackford, J. C. (2005). Phytoplankton community assemblage in the English Channel: a comparison using chlorophyll *a* derived from HPLC–CHEMTAX and carbon derived from microscopy cell counts. *Journal of Plankton Research* 27 (1): 103–119.
- Lohrenz, S. E., Weidemann, A. D., Tuel, M. (2003). Relationships between phytoplankton spectral absorption and pigment composition in coastal waters, *Journal of Plankton Research*, 22: 639-657.
- Lohrenz, S. E., Wiesenburg, D. A., DePalma, I. P., Johnson, K. S. & Gustafson, D. E. (1988). Interrelationships among primary production, chlorophyll, and environmental conditions in frontal regions of the Western Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research Part A*. 35(5): 793-810.
- Lohrenz, S.E., Dagg, M.J., & Whitedge, T.E. (1990). Enhanced primary production at the plume/oceanic interface of the Mississippi River. *Cont Shelf Res* 10:639-664

- Macías-Carballo, M.,(2011). Variabilidad de la forma espectral del fitoplancton y su relación taxonómica durante las primaveras del 2005-2008 en la región Occidental de Baja California. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. CICESE.
- Mackey, D. M., Mcakey, D. J., Higgins, H. W., & Wright, S. W. (1996). CHEMTAX a program for estimating class abundance from chemical markers: application to HPLC measurements of phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series* 144: 265–283.
- Majchrowski R., & Ostrowska M. (2000). Influence of photo- and chromatic acclimation on pigment composition in the sea, *Oceanologia*, 42 (2), 157-175.
- Masojidek, J., Kopecky, J., Koblizek, M. (2004). The xanthophyll cycle in green algae (Chlorophyta): its role in the photosynthetic apparatus. *Plant Biol.*, 6, 342– 349.
- McPherson, B.F., Montgomery, R.T., & Emmons, E.E. (1990). Phytoplankton productivity and biomass in the Charlotte Harbor estuarine system, Florida. *Water Res. Bull.* pp. 26:787–800.
- McPherson, J. E., Packauskas, R. J., Taylor, S.J., & O'Brien, M. F. (1990). Eastern range extension of *Leptoglossus occidentalis* with a key to *Leptoglossus* species of America North of Mexico (Heteroptera: Coreidae). *Great Lakes Entomologist*, 23(2): 99–104
- Millán-Núñez, E., & Millán-Núñez, R. (2010). Specific Absorption Coefficient and Phytoplankton Community Structure in the Southern Region of the California Current during January 2002. *Journal of Oceanography*, 66: 719-730.
- Millán-Núñez, E., Sieracki, M. E., Millán-Núñez, R., Lara-Lara, J.R., Gaxiola-Castro, G., & Trees, C. C. (2004). Specific absorption coefficient and phytoplankton biomass in the southern region of the California Current. *Deep-Sea Res. II* 51: 817–826.

- Millán-Núñez, E., Sieracki, M. E., Millán-Núñez, R., Lara-Lara, J. R., Gaxiola-Castro, G., & Trees, C. C. (2004). Specific absorption coefficient and phytoplankton biomass in the southern region of the California Current. *Deep-Sea Res. II* 51: 817–826.
- Millán-Núñez, R., Álvarez-Borrego, S., & Trees, C. C. (1997). Modeling the vertical distribution of chlorophyll in the California Current System. *J. Geophys. Res.* 102: 8587–8595.
- Millie, D. F., Schofield, O. M., Kirkpatrick G. J., Johnsen, G., Tester, P. A., & Vinyard, B. T. (1997). Detection of harmful algal blooms using photopigments and absorption signatures: A case study of the Florida red tide, *Gymnodinium breve*. *Limnol. Oceanogr.* 42: 1240–1251.
- Mitchell, B. G., & Kiefer, D. A. (1988b). Variability in pigment specific particulate fluorescence and absorption spectra in the north eastern Pacific Ocean. *DeepSea Res.* 35: in press.
- Monreal-Gómez, M. A., Salas-de León, D. A. (1997). Circulación y estructura termohalina del Golfo de México. In: Lavín-Peregrina MF (ed.), *Oceanografía Física en México*. Monografía No. 3 de la Unión Geofísica Mexicana, pp. 183–199.
- Moore, G., Devos, K., Wang, Z., & Gale, M. (1995). Cereal genome evolution: Grasses, Line up and form a circle. *Curr. Biol.* 5: 737-739.
- Moore, L. R., Goericke, R. E., & Chisholm, S. W. (1995). Comparative physiology of *Synechococcus* and *Prochlorococcus*: influence of light and temperature on growth, pigments, fluorescence and absorptive properties. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 116:259–275.
- Moreno, J. L., Licea, S., & Santoyo, H. (1996). Diatomeas del Golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California sur. Páginas 272.

- Morey, S. L., Schroeder, W., O'Brien, J. J., & Zavala-Hidalgo, J. (1867). The annual riverine influence in the eastern Gulf of Mexico, *Geophys. Res. Lett.*, 30(16).
- Muller-Karger, F. E. (2000). The spring 1998 NEGOM cold water event: remote sensing evidence for upwelling and for eastward advection of Mississippi Water (or: How an Errant LC Anticyclone Took the NEGOM for a Spin) *Gulf of Mexico Science*, 1. pp. 55–67.
- Muller-Karger, F.E., Walsh, J.J., Evans, R.H., & 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) pp. 12645–12665.
- Pérez, G., Queimaliños, C., Balseiro, E., & Modenutti, B. (2007). Phytoplankton absorption spectra along the water column in deep North Patagonian Andean lakes (Argentina). *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters*, 37(1), 3–16. <http://doi.org/10.1016/j.limno.2006.08.005>
- Qian, Y., Jochens, A. E., Kennicutt II, M. C., & Biggs, D.C. (2003). Spatial and temporal variability of phytoplankton biomass and community structure over the continental margin of the northeast Gulf of Mexico based on pigment analysis. *Continental Shelf Research* 23 (1), 1-17.
- Sabatés, A., Olivar, M. P., Salat, J., Palomera, I. & Alemany, F. (2007). Physical and biological processes controlling the distribution of fish larvae in the NW Mediterranean. *Progress in Oceanography*. 74: 355-376.
- Sidón-Ceseña, K. (2015). Distribución espacial de la abundancia y biomasa del nano y microfitoplancton en respuesta a las condiciones oceanográficas registradas en la capa de mezcla bajo condiciones de invierno en el Golfo de México. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, (CICESE). 74 pp.

- Signoret, M., Javier, A., & Barreiro, M. T. (2006). Variabilidad de perfiles de clorofila *a* obtenidos por fluorescencia natural en el oeste y centro del Golfo de México en junio de 1999. *Hidrobiológica* 16: 221-232.
- Sosa-Ávalos, R., Millán-Núñez, E., Quijano-Scheggia, S. I., Lara-Lara, J. R., & Silva-Iñiguez, L. (2015). Variabilidad del coeficiente de absorción por fitoplancton con influencia de marea roja en las bahías de Manzanillo y Santiago, México. *Revista de Biología Marina Y Oceanografía*, 50(3), 427–438. <http://doi.org/10.4067/S0718-19572015000400003>
- Sosik, H. M., & Mitchell, B. G. (1991). Absorption, fluorescence and quantum yield for growth in nitrogen limited *Dunaliella tertiolecta*. *Limnology and Oceanography*, 36. 910-921.
- Sosik, H., & Mitchell, B.G. (1995). Light absorption by phytoplankton, photosynthetic pigments and detritus in the California Current System. *Deep-Sea Res.*, 42: 1717–1748.
- Stón, J. & Kosakowska, A. (2000). Qualitative and quantitative analysis of Baltic phytoplankton pigments. *Oceanología* 42 (4): 449–471.
- Stón, J. & Kosakowska, A. (2002). Pigment composition in relation to phytoplankton community structure and nutrient content in the Baltic Sea. *Oceanologia* 44 (4): 419–437.
- Stoń, J., Kosakowska, A., Łotocka, M., & Łysiak-Pastuszak, E. (2002). Pigment composition in relation to phytoplankton community structure and nutrient content in the Baltic Sea* Pigments Phytoplankton HPLC Southern Baltic. *OCEANOLOGIA*, 44(4), 419–437.
- Stramski, D. & Morel, A. (1990). Optical properties of photosynthetic picoplankton in different physiological states as affected by growth irradiance. *Deep-Sea Res.* 37: 245–266.

- Stuart, V., Sathyendranath, S., Platt, T., Maass, H., & Irwin, B. D. (1998). Pigments and species composition of natural phytoplankton populations: effect on the absorption spectra. *Journal of Plankton Research* 20: 187-217.
- Thronsen, J. (1978). Preservation and storage. En: Sournia, A. (Ed.), *Phytoplankton Manual. Monographs on Oceanographic Methodology, UNESCO, Vol. 6. Paris, 69 – 74 pp.*
- Tomas, C. S., (1997). *Identifying marine phytoplankton. Academic Press, Inc.*
- Totti, C., Civitarese, G., Acri, F., Barletta, D., Candelari, G., Paschini, E. & Solazzi, A. (2000). Seasonal variability of phytoplankton populations in the middle Adriatic sub-basin. *Journal of Plankton Research*. 22 (9): 1735-1756.
- Utermöhl, H. (1958). Zur Vervollkommnung der quantitativen phytoplanktonmethodik. *Mitt.Internat. Verein. Limnol.* 9: 1-38.
- Van Heukelem, L., & Thomas, C. (2001). Computer assisted high-performance liquid chromatography method development with applications to the isolation and analysis of phytoplankton pigments. *J.Chromatogr. A.* 910: 31-49.
- Vidussi, F., Claustre, H., Manca, B. B., Luchetta, A., & Marty, J. C. (2001). Phytoplankton pigment distribution in relation to upper thermocline circulation in the eastern Mediterranean Sea during winter. *J Geophys Res* 106(C9):919,939-919,956.
- Wiseman, W.J. Jr., & Sturges, W. (1999). Physical oceanography of the Gulf of Mexico: Processes that regulate its biology, p. 77-92. *In* H. Kumpf, K. Steindenger & K. Sherman. *The Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem: Assessment, Sustainability, and Management. Blackwell,Massachusetts, EEUU.*
- Wu, J., Hong, H., Shang, S., Dai, M., & Lee, Z. (2007). Variation of phytoplankton absorption coefficients in the northern South China Sea during spring and autumn. *Biogeosciences Discussions* 4(3): 1555 -1584.

Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L., O'Brien, J. J., & Zamudio, L. (2006). On the Loop Current eddy shedding variability. *Atmósfera*, 19(1), 41–48.