

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS

**TEMPERATURA Y CLOROFILA DERIVADAS DE DATOS DE SÁTELITE FRENTE
A LA REGIÓN DE PUNTA EUGENIA A PUNTA ABREOJOS, BAJA CALIFORNIA,
SUR**



TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN BIOLOGÍA
CON ESPECIALIDAD EN:
ECOLOGÍA MARINA**

PRESENTA:

MARIO RAFAEL RAMÍREZ LEÓN

Hermosillo, Sonora

Junio de 2012

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

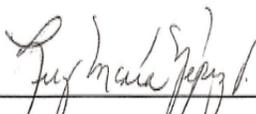
FORMATO DE APROBACIÓN

Los miembros del Comité de Tesis designado para revisar la Tesis de Mario Rafael Ramírez León, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito para obtener el Título de Licenciado en Biología con Opción en Ecología Marina.



Dr. José Eduardo Valdez Holguín

Director de Tesis



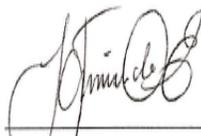
M.C. Luz María Yépiz Velázquez

Sinodal Secretario



Dr. Miguel Ángel Cisneros Mata

Sinodal



M.C. Luis Fernando Enríquez Ocana

Suplente

DEDICATORIA

A mis padres, Jesús y Sandra que con su amor y apoyo han formado la persona que soy

A mi hermana, Alessandra que ha dado alegría a mi vida.

A mi novia y mejor amiga, Paola que con su amor y amistad me apoyado en todo momento.

A mis abuelos Aurora, Victoria y Rafael por regalarme valiosos recuerdos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sonora, gracias por ser mi alma mater.

Al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas y a su cuerpo docente por la preparación académica recibida.

A mi director de tesis, maestro y amigo, Dr. Eduardo Valdez, muchas gracias por el apoyo y los consejos durante todo el proceso de tesis. Gracias por haberme dado la confianza de este trabajo.

A mis sinodales M.C. Luz María Yépiz, Dr. Miguel Cisneros y M.C. Fernando Enríquez, gracias por sus consejos y asesorías para el desarrollo de este trabajo de tesis.

A Oc. Adolfo Bustamante, por su asesoría y apoyo en la parte estadística de este trabajo.

A mi abuelo Mario León, por su amor y cariño.

A mis tías Ana María, Nidia y Nora, por su amor y cariño. Por ser parte importante en mi vida, muchas gracias por haber sido parte de mi desarrollo como persona.

A mis primos Daniel, Gabriela, Anya y Ana Gabriela, por su apoyo y cariño. Gracias por ser mis hermanos.

A mi tío, Benjamín Ramírez, por la ayuda y asesoría brindadas en el análisis estadístico de este trabajo de tesis.

A mis mejores amigos, Oscar Hernández y Gerardo Fernández, porque sin su ayuda gran parte de este trabajo no se hubiera realizado. Gracias por darme siempre ese apoyo de hermanos.

A mis mejores amigos, Carolina Moreno, Sergio Macías, Gioberti Catalán, muchas gracias por su apoyo y amistad. Gracias por esas palabras de aliento para terminar este trabajo.

A esas personas que directa o indirectamente ayudaron en el desarrollo de este trabajo de tesis. Muchas gracias a mis maestros, familiares y amigos que me brindaron su apoyo.

CONTENIDO

FORMA DE APROBACIÓN.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
CONTENIDO.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	4
III. JUSTIFICACIÓN.....	7
IV. HIPÓTESIS.....	8
V. OBJETIVOS.....	9
V.1. Objetivo general.....	9
V.2. Objetivos específicos.....	9
VI. METODOLOGÍA.....	10
VI.1. Área de estudio.....	10
VI.2. Métodos.....	11
VII. RESULTADOS.....	14
VII.1. Temperatura.....	14
VII.1.1. Variación interanual.....	14
VII.1.2 Variación anual.....	15
VII.1.3 Variación espacial.....	19

VII.1.4 Variación espacial anual.....	21
VII.2. Clorofila.....	25
VII.2.1 Variación interanual.....	25
VII.2.2 Variación anual.....	26
VII.2.3 Variación espacial.....	30
VII.2.4 Variación espacial anual.....	32
VIII. DISCUSIÓN.....	36
IX. CONCLUSIONES.....	42
X. LITERATURA CITADA.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Zona de Estudio.	10
Figura 2	Cuadrante de Estudio.	12
Figura 3	Serie de tiempo para temperatura superficial para toda el área de estudio.	14
Figura 4	Temperatura superficial promedio interanual.	15
Figura 5	Variación anual de la temperatura superficial para el año de 2005 para toda el área de estudio.	16
Figura 6	Variación anual de la temperatura superficial para el año de 2006 para toda el área de estudio.	16
Figura 7	Variación anual de la temperatura superficial para el año de 2007 para toda el área de estudio.	17
Figura 8	Variación anual de la temperatura superficial para el año de 2008 para toda el área de estudio.	17
Figura 9	Variación anual de la temperatura superficial para el año de 2009 para toda el área de estudio.	18
Figura 10	Variación anual de la temperatura superficial para el año de 2010 para toda el área de estudio.	18
Figura 11	Serie de tiempo de la temperatura superficial para la zona costera.	19
Figura 12	Serie de tiempo de la temperatura superficial para la zona de transición.	20
Figura 13	Serie de tiempo de la temperatura superficial para la zona oceánica.	20
Figura 14	Variación espacial de la temperatura superficial para el año de 2005.	21
Figura 15	Variación espacial de la temperatura superficial para el año de 2006.	22
Figura 16	Variación espacial de la temperatura superficial para el año de 2007.	23
Figura 17	Variación espacial de la temperatura superficial para el año de 2008.	23

Figura 18	Variación espacial de la temperatura superficial para el año de 2009.	24
Figura 19	Variación espacial de la temperatura superficial para el año de 2010.	24
Figura 20	Serie de tiempo para la concentración de clorofila a para toda el área de estudio.	25
Figura 21	Concentración promedio de clorofila a interanual.	26
Figura 22	Variación anual de la concentración de clorofila a para el año de 2005 para toda el área de estudio.	27
Figura 23	Variación anual de la concentración de clorofila a para el año de 2006 para toda el área de estudio.	27
Figura 24	Variación anual de la concentración de clorofila a para el año de 2007 para toda el área de estudio.	28
Figura 25	Variación anual de la concentración de clorofila a para el año de 2008 para toda el área de estudio.	28
Figura 26	Variación anual de la concentración de clorofila a para el año de 2009 para toda el área de estudio.	29
Figura 27	Variación anual de la concentración de clorofila a para el año de 2010 para toda el área de estudio.	29
Figura 28	Serie de tiempo para la concentración de clorofila a de la zona costera.	30
Figura 29	Serie de tiempo para la concentración de clorofila a de la zona de transición.	31
Figura 30	Serie de tiempo para la concentración de clorofila a de la zona oceánica.	31
Figura 31	Variación espacial de la concentración de la clorofila a para el año de 2005.	32
Figura 32	Variación espacial de la concentración de la clorofila a para el año de 2006.	33
Figura 33	Variación espacial de la concentración de la clorofila a para el año de 2007.	34

Figura 34	Variación espacial de la concentración de la clorofila a para el año de 2008.	34
Figura 35	Variación espacial de la concentración de la clorofila a para el año de 2009.	35
Figura 36	Variación espacial de la concentración de la clorofila a para el año de 2010.	35

RESUMEN

Se compararon y analizaron los datos derivados de sensores remotos, para establecer la variación interanual, estacional y espacial de la clorofila a y temperatura superficial en la región de Punta Eugenia ($27^{\circ}49'60''\text{N}$, $115^{\circ}4'60''\text{O}$) a Punta Abreojos ($26^{\circ}43'40''\text{N}$, $113^{\circ}33'36''\text{O}$), Baja California Sur. Para establecer estas variaciones de clorofila a y temperatura superficial, se analizó una serie de 6 años de las composiciones mensuales de las matrices de datos de los satélites obtenidas de los satélites Modis on Aqua, para la clorofila a y el AVHRR para la temperatura superficial. La región de estudio se dividió en tres zonas: zona costera, zona de transición y zona oceánica. La temperatura superficial no varió interanualmente, siendo el año 2009 el más cálido con una temperatura promedio de 19.82°C y el año 2010 el más frío con 18.17°C . Estacionalmente se presentó una variación estacional bien marcada, observándose una temporada fría durante los meses de primavera y una temporada cálida en los meses de otoño. La concentración de clorofila a no presentó diferencias interanuales significativas, siendo el año 2008 el más productivo con 2.62 mg/m^3 y el año 2010 el menos productivo con 1.69 mg/m^3 . Se observó una variación estacional muy marcada, presentándose altas concentraciones durante los meses de primavera y principios de verano y bajas concentraciones el resto del año. La distribución espacial de los niveles de clorofila estuvo muy marcada, registrándose niveles altos en la zona costera (aguas eutróficas, $\text{Cla} > 1\text{ mg/m}^3$), valores intermedios en la zona de transición (aguas mesotróficas, $0.2 < \text{Cla} < 1\text{ mg/m}^3$) y niveles bajos en la zona oceánica (aguas oligotróficas, $\text{Cla} < 0.2\text{ mg/m}^3$). Las temperaturas más bajas y las altas concentraciones de la clorofila a, coinciden con la época de surgencias costeras (periodo primavera-verano).

I. INTRODUCCIÓN

En los ecosistemas marinos, los principales productores primarios son los organismos fotosintéticos que se encargan de transformar la energía luminosa a energía química. El fitoplancton es el principal productor primario en el océano, formando así la base de las cadenas tróficas; por lo cual estos organismos tienen una gran importancia biológica y ecológica para los ecosistemas.

El proceso de fotosíntesis es elemental para la producción de compuestos orgánicos ricos en energía química, mismos que son esenciales para el sustento de las demás especies que habitan en océano. Asimismo, estos compuestos, pasan a formar parte del ciclo del carbono a nivel global. Los estudios sobre la estimación de la concentración de pigmentos fotosintéticos en el océano nos dan una idea de la biomasa de fitoplancton, como productor primario, y de los flujos de energía en los ecosistemas marinos. Pero ¿qué tan importante es este flujo de energía para los ecosistemas marinos? Se estima que la productividad primaria global del fitoplancton marino es de 45-50 Gt al año en promedio (Carr et al., 2006; Boracio-León et al., 2007). No obstante, esta actividad del fitoplancton es afectada por procesos físicos, químicos y biológicos, y la concentración de estos organismos está ligada a variables como la temperatura, concentración de nutrientes, y régimen de vientos.

Los ecosistemas de frontera oriental o sistemas de corriente de frontera oriental, se encuentran en las costas occidentales de los continentes. Las principales características de estos sistemas son: la presencia de una frontera meridional (continente); un flujo de agua de altas latitudes hacia el ecuador; y un sistema de vientos que determina el afloramiento de aguas subsuperficiales (Parés-Sierra et al., 1997). Ejemplos de estos ecosistemas son, en el Océano Pacífico la Corriente de California y la Corriente de Humboldt, y en el Océano Atlántico la Corriente de Benguela y la Corriente de Las Canarias. Aunque estos ecosistemas de frontera oriental poseen una cobertura espacial pequeña en relación con la superficie total de los océanos, en comparación a otros ecosistemas marinos son las regiones más productivas del todo el planeta.

La alta productividad de estos ecosistemas se debe a los eventos de surgencias o afloramiento de aguas profundas hacia la superficie del océano (Durazo y Gaxiola-Castro, 2010). Este proceso de surgencia es producido por el efecto de los vientos sobre la superficie del mar,

generando un transporte de agua en dirección a la del viento. Debido al efecto de Coriolis, en el hemisferio Norte este transporte tiene una desviación de 90° hacia la derecha, siendo remplazada esta agua por aguas frías mas profundas, con bajo contenido de oxígeno y alto contenido de nutrientes inorgánicos que fertilizan la zona eufótica. Esta fertilización permite el desarrollo del fitoplancton que es el sustento de un gran número de especies comercialmente importante. Por lo tanto no es de extrañar que en estas zonas de surgencias, se llevan a cabo las pesquerías más importantes a nivel global como: la de pelágicos menores (anchoveta y sardina) (Hernández et al., 2004), abulón y langosta (Morales Zárate et al., 2011).

La Corriente de California forma parte de los ecosistemas de frontera oriental. Es una corriente oceánica que fluye en dirección sur paralela a la costa occidental de Norteamérica, abarcando desde la parte sur de la costa de Columbia Británica hasta la Península de Baja California.

La Corriente de California es uno de los ecosistemas marinos con una gran productividad biológica del planeta, teniendo una producción de 0.04 Gt C/año (Hernández et al., 2004). Esta productividad se debe a la combinación de factores abióticos (luminosidad, temperatura y régimen de vientos) y factores biológicos (producción del fitoplancton) que se efectúan en esta corriente.

El sistema de la Corriente de California está conformado por la subcorriente de California, la contra corriente de California y el giro o remolino (Eddy) del sur de California (Aquad et al., 2011). Este sistema está delimitado por la Corriente Subártica en la parte norte y por la Corriente Nor-Ecuatorial en la parte sur. Asimismo, la corriente de California se puede subdividir en tres regiones dependiendo de la composición de las masas de agua: una zona de dominio de aguas subárticas (frente a San Francisco hasta Cabo Mendocino), una zona de transición (frente a la parte norte de Baja California y parte sur de California) y una zona de dominio de aguas ecuatoriales (frente a Baja California Sur desde Punta Eugenia hasta Cabo San Lucas) (Parés-Sierra et al., 1997).

La región de la costa oeste de Baja California Sur está dentro del dominio de aguas ecuatoriales según la descripción de Parés-Sierra et al. (1997). Esta zona está poblada por asentamientos pesqueros pequeños, que dependen de la actividad pesquera de especies como abulón y langosta principalmente. En los últimos años, estas comunidades han expresado su preocupación por eventos catastróficos (mortandades masivas) de sus recursos; a pesar de ello,

no se ha generado la información oceanográfica para determinar sus causas potenciales. Por ello, en este trabajo bajo el auspicio del INAPESCA (SAGARPA), se analiza la variación temporal y espacial de la temperatura superficial y la concentración de clorofila a, a través de datos derivados de sensores remotos.

II. ANTECEDENTES

El régimen de vientos juega un papel importante en la dinámica de la Corriente de California. Este régimen está dado por la variación en intensidad y posición de los cuatro centros de presión atmosférica que tienen influencia sobre la Corriente de California. Estos centros son: los centros de alta presión del Pacífico Norte y Sur y los centros de baja presión Aleutiano y de Indonesia (Parés-Sierra et al., 1997).

La intensidad de los vientos tiene rol significativo en la variación espacio-temporal que hay en esta región. Durante los meses de primavera y verano se intensifican los vientos noroestes, dando como secuencia eventos de surgencias. Estos eventos traen consigo aguas de capas más profundas del océano, que se caracterizan por tener temperaturas más frías, una alta densidad, ricas en nutrientes (fosfatos, nitratos y silicatos) y una baja concentración de oxígeno disuelto (Aquad et al., 2011; Durazo et al., 2010; Parés-Sierra et al., 1997). La región oceánica del área de estudio, se ha caracterizado por bajas temperaturas durante primavera y principios de verano, y altas temperaturas durante el otoño (Durazo et al., 2010).

La costa oeste de Norte América se caracteriza por la presencia de eventos de surgencia, que generan una alta productividad primaria; la costa oeste de la Península de Baja California es una de las más productivas a nivel mundial (Zaytsev et al., 2003). Las surgencias ocurren a lo largo de todo el año en la costa occidental de Baja California, aunque su intensidad varía, con surgencias de baja intensidad durante los meses de noviembre a febrero y surgencias de máxima intensidad a finales de primavera y a principios de verano (Zuria-Jordan et al., 1995). Dando como resultado un ciclo anual bien marcado por las comunidades fitoplanctónicas. Asimismo, el fitoplancton en estas regiones sustenta una abundante red trófica, sirviendo como alimento a muchas especies de invertebrados y peces de interés comercial (Durazo y Gaxiola-Castro, 2010). Por lo que el área de estudio es de gran interés biológico debido a que existen grandes pesquerías de importancia comercial, las cuales son sustentos para las poblaciones locales.

Medir la abundancia de fitoplancton, como número de células en una muestra, es tedioso y tardado. No obstante, la clorofila *a* es un pigmento presente en todos los organismos fotosintéticos, por lo que la concentración de clorofila se puede utilizar como indicador de la abundancia del fitoplancton en la columna de agua (Lalli y Parson, 1997; Barocio-León et al., 2007; Castro y Huber, 2007). Convencionalmente, las muestras para estimar las concentraciones

de clorofila son a través de campañas de cruceros oceanográficos los cuales tienen una baja cobertura espacial, por lo que abarcar regiones más amplias hace necesario una mayor logística y mayores recursos. Lo anterior hace que este tipo de muestreos, actualmente sean adecuados para estudios de largo plazo: como meses, años, décadas, etc. (Boracio-León et al., 2007).

El método más utilizado para estimar la concentración de clorofila *a* es el fluorimétrico debido a su practicidad y disponibilidad. Éste consiste en extraer la clorofila de las células por medio de acetona y medir la fluorescencia natural emitida por este pigmento. Una nueva alternativa es el uso de sensores remotos a bordo de satélites, que miden el color del océano y con ello se estima la cantidad de clorofila *a* superficial (Lalli y Parson, 1997; Castro y Huber, 2007). En la actualidad, este pigmento es el único que puede ser medido a través de sensoría remota (Gaxiola-Castro et al., 2010).

El uso de la sensoría remota para el cálculo de la producción primaria (abundancia fitoplanctónica) ha resultado ser el mejor método para la obtención de resultados a grandes escalas de tiempo y espacio (Zuria-Jordan et al., 1995; Barocio-León et al., 2007; López-Sandoval et al., 2009; Gaxiola-Castro et al., 2010). Estas nuevas herramientas han traído consigo una revolución en el estudio de la oceanografía biológica (Gaxiola-Castro et al., 2010). Los sensores remotos miden la radiancia promedio ascendente de la fluorescencia del fitoplancton (clorofila *a*) de la primera profundidad óptica del océano. Si se considera que los límites de la zona eufótica están justo por debajo de la superficie y hasta donde llega el 1 % de esa irradiancia, de acuerdo a la ley de Beer-Lambert, la zona eufótica tiene 4.6 profundidades ópticas (Álvarez-Borrego, 1995; Kirk, 2003). Por lo tanto el satélite mide aproximadamente una quinta parte de la zona eufótica (22 % de la columna de agua).

El primer satélite equipado para recibir imágenes del color del océano, fue el Nimbus 7 (1978-1986), equipado con el sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS), el cual fue fabricado específicamente para la obtención de imágenes que generaran información sobre los pigmentos fotosintéticos marinos (Lluch-Cota et al., 1995; Zuria-Jordan et al., 1995; Barocio-León et al., 2007).

Los satélites modernos están equipados con nuevos sensores remotos, para las mediciones del color del océano como el Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS), el cual tiene como objetivo el estudio de los procesos biológicos que ocurren en el océano. Uno de los grandes retos de estos nuevos sensores, es la calibración y validación de los datos que derivan

de los satélites. El estudio de los fenómenos biológicos a través de sensores remotos tiene como metas entender mejor el ciclo del carbono a una escala global, observar los efectos que tiene la absorción de la luz sobre el calentamiento de la capa superficial del océano, conocer cómo el producto de los florecimientos algales afecta el intercambio de gases entre océano-atmósfera, y analizar las relaciones entre la productividad del fitoplancton con los demás componentes del ecosistema (Abbot, 1994).

Para la costa occidental de Baja California Sur, Zuria-Jordan et al. (1995) reportaron mayores concentraciones de clorofila a cerca de la costa con una marcada variación estacional, siendo los meses de febrero a agosto cuando se presentaron altos valores de concentración (3-8 mg/m³). Un resultado semejante obtuvieron, Barocio-León et al. (2007) para las aguas de la Corriente de California, quienes observaron valores más altos para la clorofila en las regiones más cercanas a la costa y en la temporada de los meses de la temporada fría; además de estimar la media anual de productividad primaria en 0.32 Gt C para el área de estudio.

La variabilidad temporal de los pigmentos fotosintéticos se puede dividir en dos: variaciones de corta duración, las cuales ocurren en escala de tiempo menor a un año, y variaciones de larga duración o interanuales las cuales ocurren a escala de más de un año. Para la región sur de la Corriente de California frente a la Península de Baja California se dan grandes cambios a ambas escalas en la producción primaria del fitoplancton (Gaxiola-Castro et al., 2010). Las variaciones de corta duración se deben a fenómenos locales como surgencias, remolinos, frentes oceánicos, régimen estacional de vientos. (Gaxiola-Castro et al., 2010). La variación interanual es el resultado de fenómenos de gran escala como los fenómenos climatológicos El Niño/La Niña. Los ecosistemas marinos presentes frente a la costa oeste de la Península de Baja California se ven fuertemente influenciados por estos dos fenómenos de oscilación austral (Gaxiola-Castro et al., 2008).

III. JUSTIFICACIÓN

Las regiones de Punta Eugenia y Punta Abrejos mantienen pesquerías de especies de gran valor comercial, como la langosta roja (*Panulirus interruptus*), el abulón azul (*Haliotis fulgens*), el abulón amarillo (*H. corrugata*) y el erizo morado (*Strongylocentrotus purpuratus*), las cuales se sustentan fundamentalmente por la alta productividad de la zona. Este trabajo pretende generar datos acerca de la variabilidad oceanográfica en la región (temperatura y concentración de clorofila a superficial). Los resultados servirían para establecer una base teórica que permita entender la dinámica del ecosistema pelágico del lugar.

IV. HIPÓTESIS

La concentración de la clorofila a en la columna de agua está determinada por factores físicos, químicos y biológicos. La temperatura del agua tiene un importante papel sobre la variabilidad del pigmento. Además la concentración de la clorofila a presentará una variación espacial con mayores concentraciones en la zona costera y una variación temporal, con mayores concentraciones en los meses de surgencias.

V. OBJETIVOS

V.1. Objetivo Principal

Determinar la variación de temperatura y clorofila a, en la región de Punta Eugenia a Punta Abreojos, derivada de datos de sensores remotos.

V.2. Objetivos Particulares

Establecer la variación interanual de temperatura y clorofila a.

Establecer la variación anual de temperatura y clorofila a.

Establecer la variación espacial de temperatura y clorofila a.

VI. METEOROLOGÍA

VI.1. Área de Estudio

El presente estudio se centró en la costa central occidental de la península de Baja California (28°N), la cuál se caracteriza por masas de agua que tienen origen tropical y subtropical y tienen una influencia en la temperatura superficial durante los meses de verano y otoño.

Así mismo, cabe recalcar que la región está escasamente poblada, siendo pequeños asentamientos pesqueros (Bahía Tortugas, Punta Eugenia, Punta Abreojos, etc.) las comunidades más sobresalientes, donde la pesca es la principal actividad productiva. Las pesquerías llevadas a cabo en esta región son importantes económicamente hablando, siendo la pesca de abulón y la langosta las más importantes.

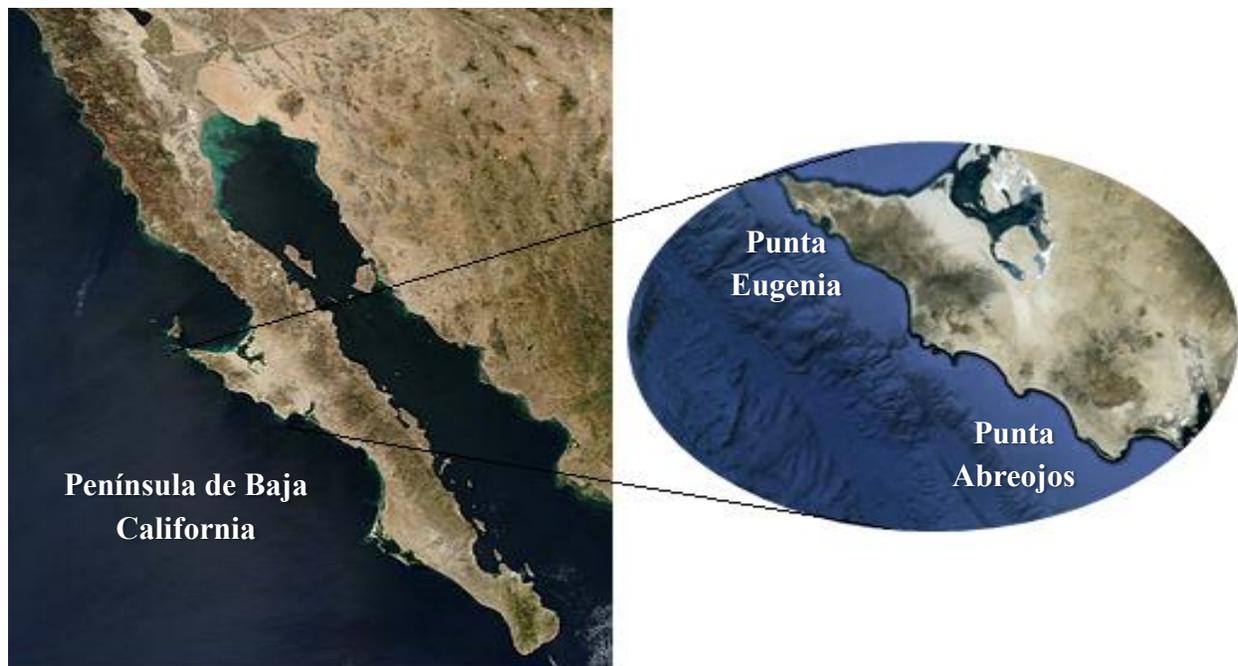


Figura 1. A. Península de Baja California. B. Zona de estudio: Punta Eugenia (27°49'60''N, 115°4'60''O) a Punta Abreojos (26°43'40''N, 113°33'36''O).

Estas comunidades pesqueras están organizadas en cooperativas, y a través de la federación de cooperativas manejan estos recursos pesqueros. A pesar de esto, esta zona carece

de información científica sobre la variabilidad de esta región, por lo que el presente trabajo se enfocó en la parte costera de las comunidades pesqueras de Punta Eugenia y Punta Abreojos.

Punta Eugenia (Fig. 1) se localiza en la costa occidental de la Península de Baja California ($27^{\circ}49'60''\text{N}$, $115^{\circ}4'60''\text{O}$). Se considera como una región orográfica debido a su fisiografía (zona estrecha de tierra que entra en el mar). Punta Abreojos ($26^{\circ}43'40''\text{N}$, $113^{\circ}33'36''\text{O}$) se localiza al sur de Punta Eugenia (fig. 1), al igual que la otra localidad se caracteriza por ser una región orográfica.

VII.2. Métodos

Los datos de la temperatura superficial del agua y datos de la concentración de clorofila del área de estudio, se obtuvieron a partir de matrices de datos derivados de sensores remotos de los servidores de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) de la página web de Ocean Project (<http://las.pfeg.noaa.gov/oceanWatch/oceanwatch.php>).

Para los datos de la temperatura superficial se utilizó el satélite AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), el cual tiene una resolución de 1.25 km por pixel. Para los datos de la concentración de la clorofila a se uso el satélite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) on Aqua, con una resolución de 1.25 km. por pixel. Para ambas variables se utilizó el algoritmo estándar del sensor remoto.

Los productos de la concentración de los pigmentos fotosintéticos y de la temperatura superficial obtenidos de estos sensores remotos, son procesados y distribuidos por el OBGP (Ocean Biology Processing Group). Estos datos se descargan en formato HDF-EOS (Hierarchical Data Format) en formato de cobertura global nivel L-3, el cual tiene información en bytes-formato valor, posición geográfica en proyección cilíndrica equidistante, y filtros para remover la información no útil.

Las imágenes de la temperatura superficial corresponden a 11 μ en periodo nocturno, y las de la concentración de la clorofila a la radiancia promedio ascendente de la fluorescencia del fitoplancton de la primera profundidad óptica del océano, expresada como mg Cl a/ m^3 .

Para establecer las variaciones interanuales y anuales (estacionales) de la temperatura superficial y la clorofila a se realizaron composiciones mensuales, a partir de enero de 2005 a diciembre de 2010; estas composiciones fueron recortadas a la zona de estudio, obteniéndose así

una matriz de 90 líneas y 144 columnas. La información adquirida de ambas variables fue utilizada en el programa EXCEL para su procesado de figuras y estadísticas (medias mensuales y anuales, máximos y mínimos).

En el caso de la variación espacial se trazó un cuadrante (26.36°N, 115.16°O y 27.48°N, 113.38°O) para dividir la región de estudio en tres zonas: zona costera, zona de transición y zona oceánica, con el fin de facilitar el manejo de los datos; las cuales se eligieron para establecer la variación espacial de la temperatura superficial y la concentración de clorofila. Esta división se realizó mediante el programa Google Earth, en base a la topografía de la región. Se observa una amplia plataforma continental (zona costera), seguida de una zona de cañones (zona de transición) y por último una zona profunda (zona oceánica) (Fig. 2).



Figura 2. Cuadrante de Estudio (26.36°N, 115.16°O y 27.48°N, 113.38°O)

Para establecer la variación espacial se hicieron composiciones mensuales de los datos de temperatura y clorofila a, desde enero de 2005 hasta diciembre de 2010. Las composiciones fueron recortadas para el área de estudio, las cuales representan a una matriz de 90 líneas x 144 columnas. La información obtenida de la temperatura y de la clorofila fue utilizada en el

programa EXCEL para su procesado de figuras y estadísticas (medias mensuales y anuales, máximos y mínimos).

De los resultados obtenidos se realizaron pruebas de ANOVA de una vía ($\alpha = 0.05$) para establecer diferencias significativas en la variación interanual y estacional (anual) de la temperatura superficial y de la concentración de clorofila. Se utilizó este tipo de análisis estadístico debido a que en este caso sólo se analizó la variable del tiempo. Mientras que para determinar la variación espacial de la temperatura y la clorofila se hizo una prueba de ANOVA de dos vías ($\alpha = 0.05$). En este caso se usó este tipo de análisis, ya que para este caso se analizaron tanto el tiempo como la distribución geográfica. Para esto se utilizó el paquete estadístico MINITAB 15.

VII.1.2. Variación anual

En 2005 la temperatura mensual más baja (16.17 °C) se presentó en el mes de abril, mientras que en septiembre se observó la temperatura más alta con 23.35 °C (Fig. 5).

Para el año de 2006 la temperatura mínima se registro durante el mes de marzo con 15.32 °C, mientras que en el mes de septiembre se presentó la temperatura máxima con 23.92 °C (Fig. 6).

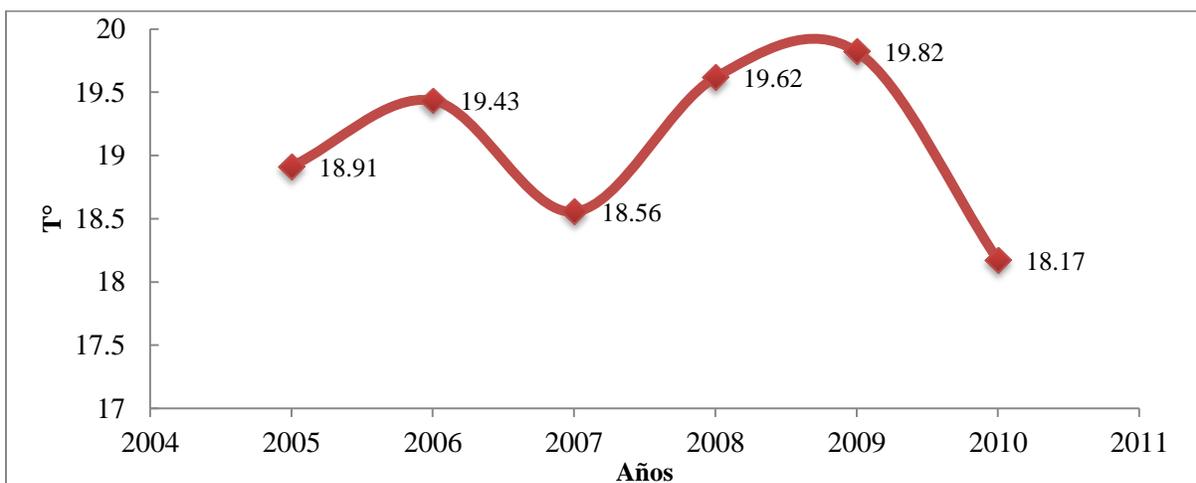


Figura 4. Temperatura superficial promedio interanual (note el cambio de escala con respecto a la Figura 3.).

Durante el año de 2007 se tuvo que el mes de agosto con 21.61 °C fue el más cálido del año y el mes de abril con 15.53 °C como el mes más frío de este año (Fig. 7).

El año de 2008 el mes de septiembre presentó la temperatura mensual más alta con 25.13 °C, mientras que el mes de marzo con 16.07 °C fue el que mostró la temperatura más baja de este año (Fig. 8).

Para el año de 2009 se tiene que el mes de septiembre fue el más cálido con 25.16 °C y el mes de abril el más frío con 15.96 °C (Fig. 9).

Para el año de 2010, el mes más cálido fue agosto con 20.47 °C, mientras que el mes más frío fue abril con 16.58 °C (Fig. 10).

Hubo diferencias significativas (ANOVA, $\alpha = 0.05$; $p = 0.000$ en la variación temporal (meses) de la temperatura.

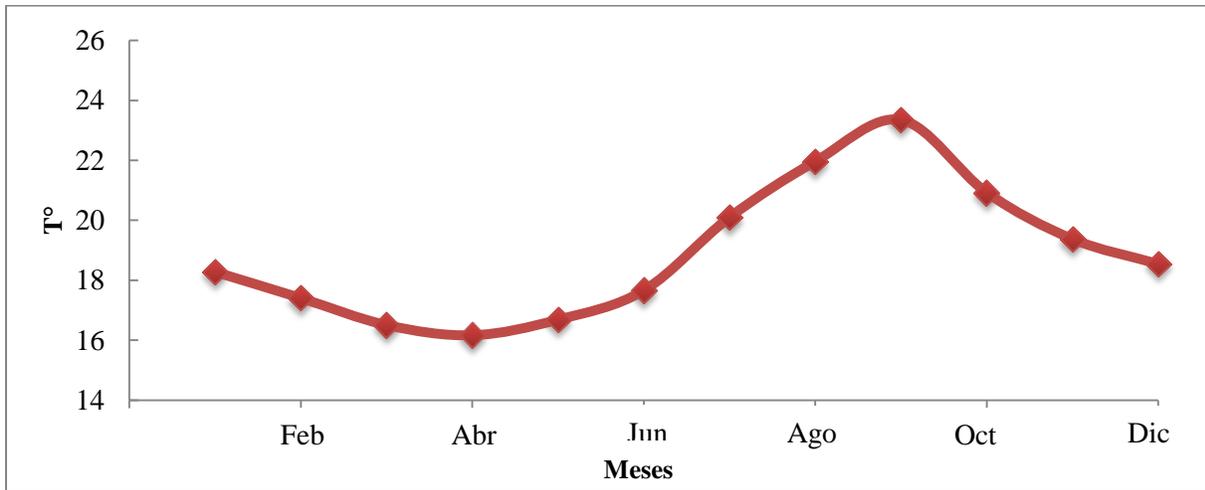


Figura 5. Variación anual de la temperatura superficial para el año 2005 de toda el área de estudio.

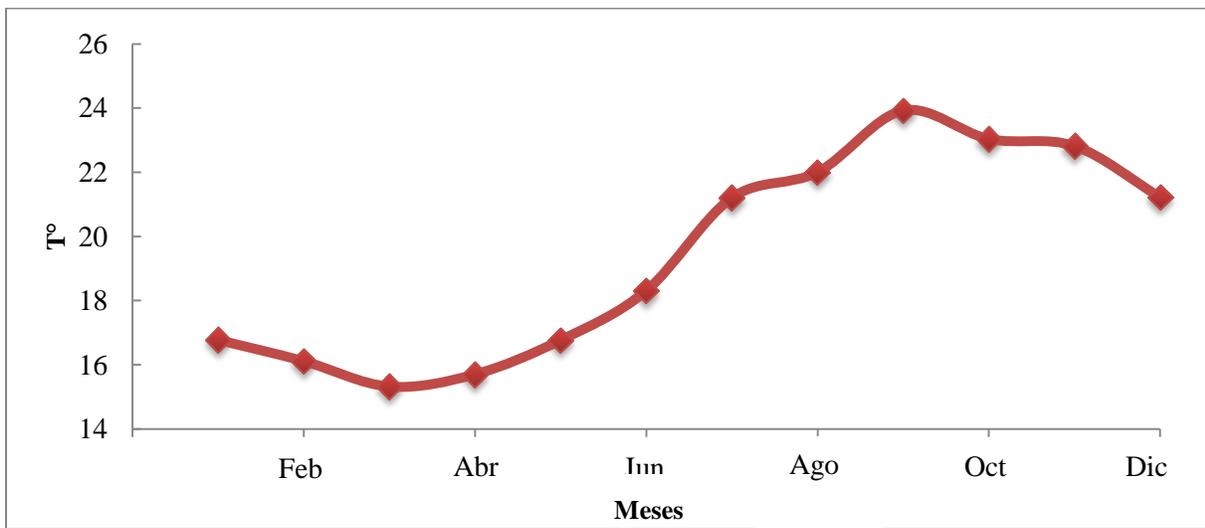


Figura 6. Variación anual de la temperatura superficial para el año 2006 de toda el área de estudio.

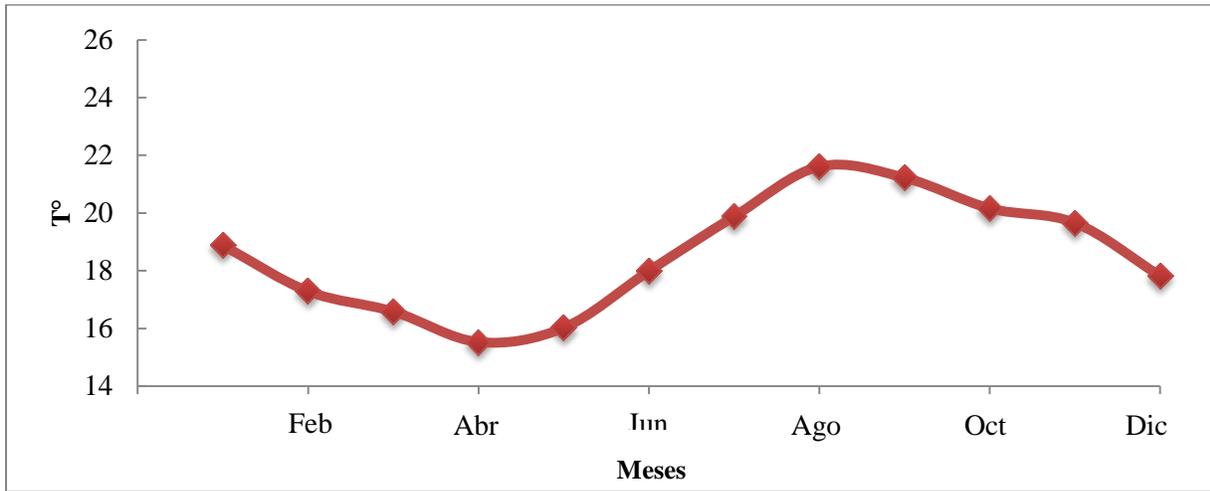


Figura 7. Variación anual de la temperatura superficial para el año 2007 de toda el área de estudio.

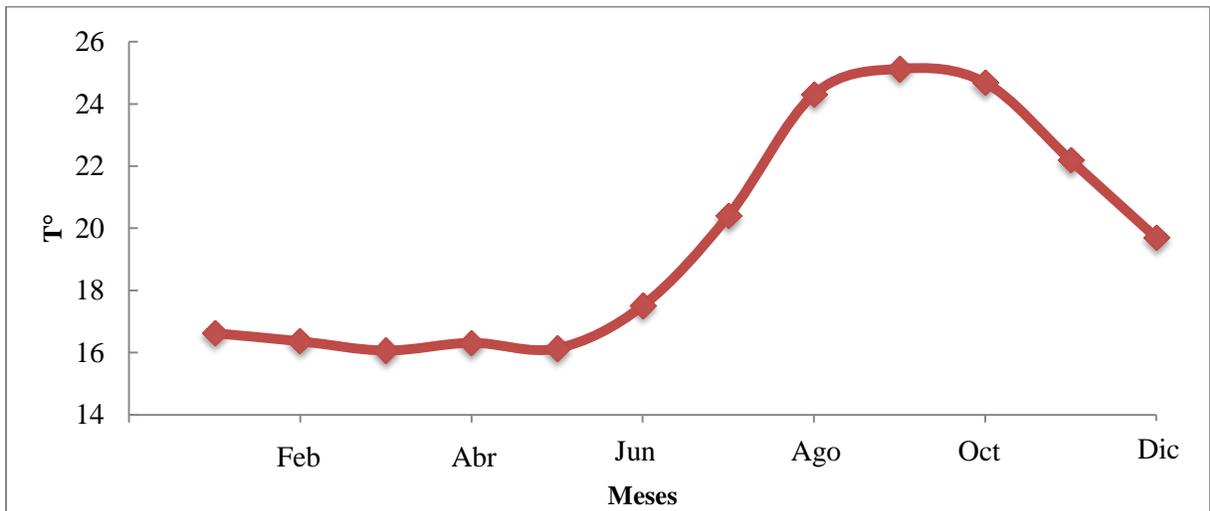


Figura 8. Variación anual de la temperatura superficial para el año 2008 de toda el área de estudio.

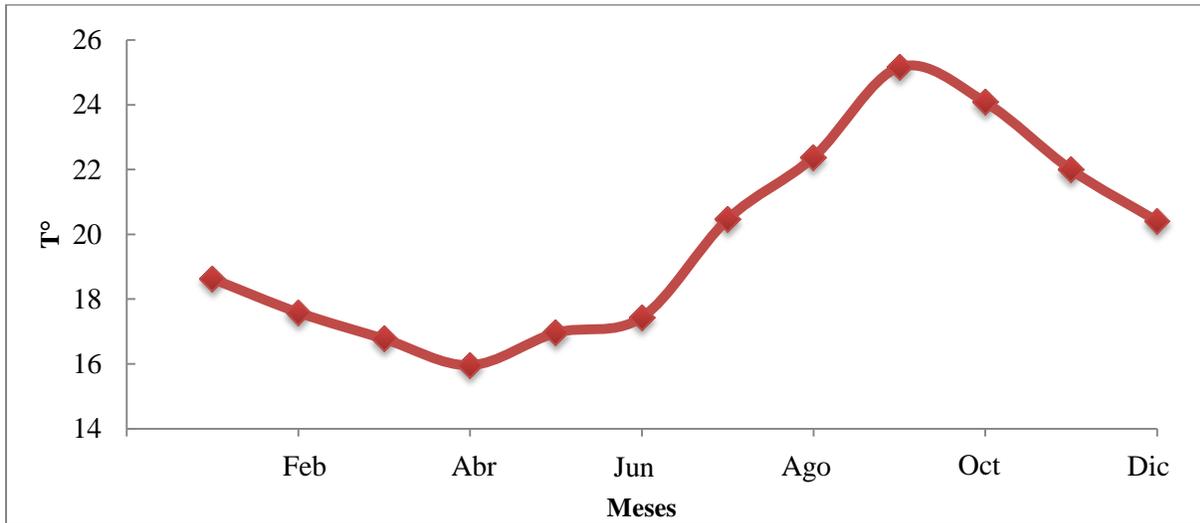


Figura 9. Variación anual de la temperatura superficial para el año 2009 de toda el área de estudio.

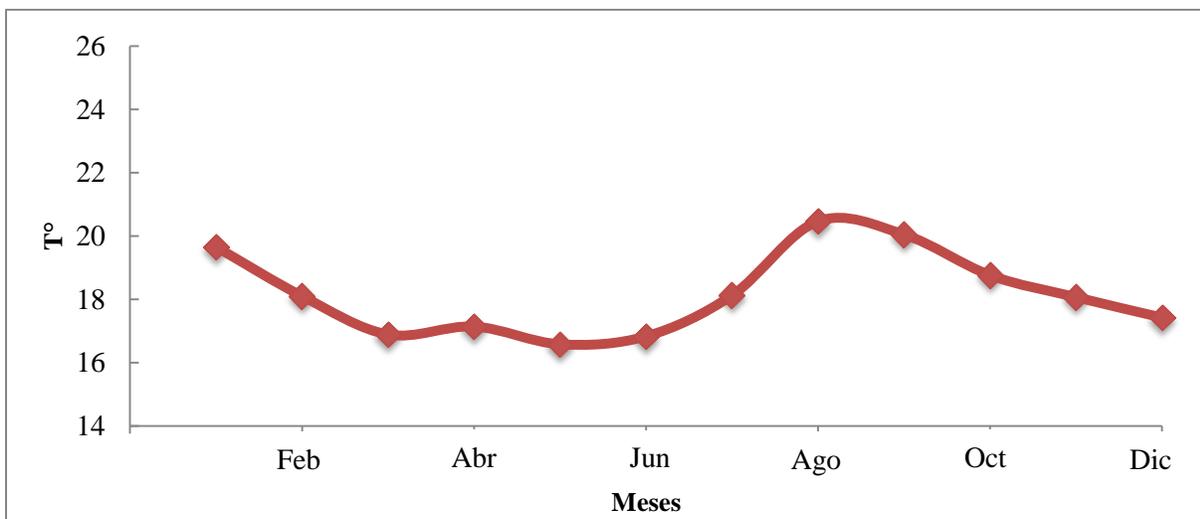


Figura 10. Variación anual de la temperatura superficial para el año 2010 de toda el área de estudio.

VII.1.3. Variación espacial

Durante el periodo de estudio se observó una variación anual en cada una de las zonas en las que se dividió el área de estudio (Figuras 11, 12 y 13). Se registraron valores bajos durante los meses de primavera y altos los meses de verano y otoño. En general, tanto la zona costera, la zona de transición y la zona oceánica, muestran valores de temperatura similares, sin embargo, las temperaturas más bajas y altas se registraron para la zona costera, además de que en esta zona se observó un intervalo de valores más amplio.

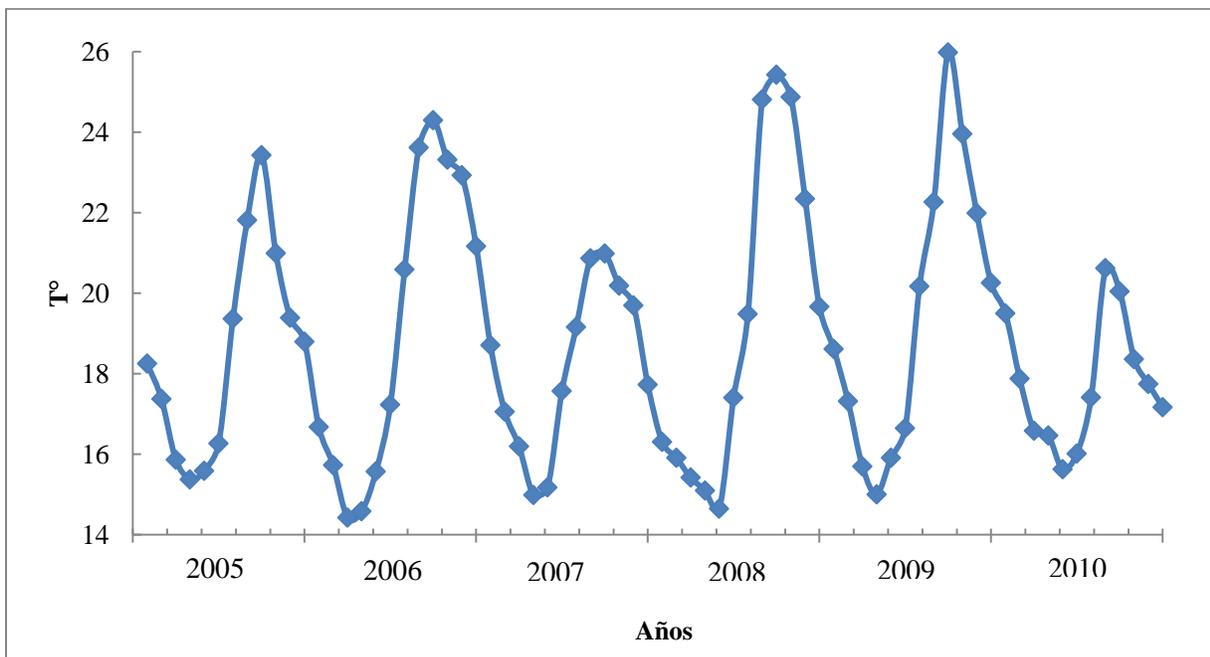


Figura 11. Serie de tiempo de la temperatura superficial de la zona costera.

Para la zona costera la temperatura más alta que se registró fue de 25.98 °C durante el mes de septiembre de 2009, mientras que la temperatura más baja fue de 14.42 °C para el mes de marzo de 2006. En la zona de transición el valor más alto fue de 25.34 °C en septiembre de 2008. La temperatura más baja se presentó para el mes de abril de 2007 con 15.45 °C. Por último, para la zona oceánica el valor más alto se registró durante el mes de septiembre de 2010 con 24.71 °C, mientras que la temperatura menor se presentó en el mes de abril de 2007 con 15.94 °C. El intervalo de valores en la zona costera fue más amplio (8.28 °C), seguido de la zona de transición (6.33 °C) y la zona oceánica (5.91 °C).

Estadísticamente no hubo diferencias significativas entre años (ANOVA, $\alpha = 0.05$; $p = 0.76$), ni entre las zonas ($\alpha = 0.05$; $p = 0.428$).

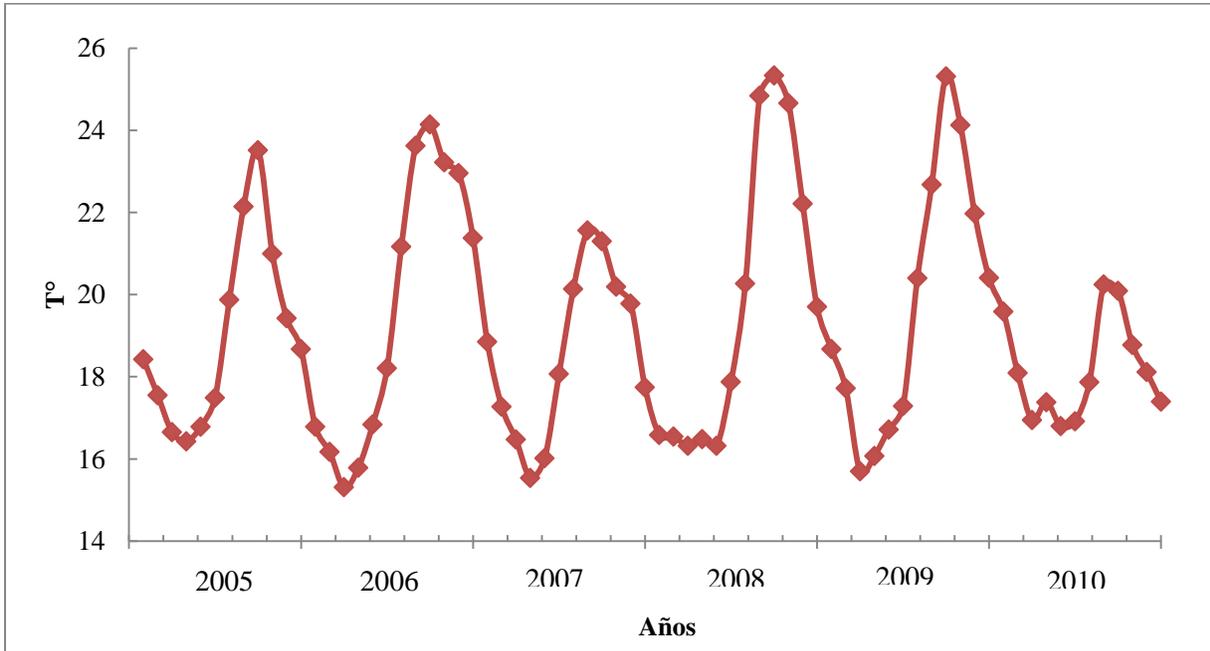


Figura 12. Serie de tiempo para la temperatura superficial de la zona de transición.

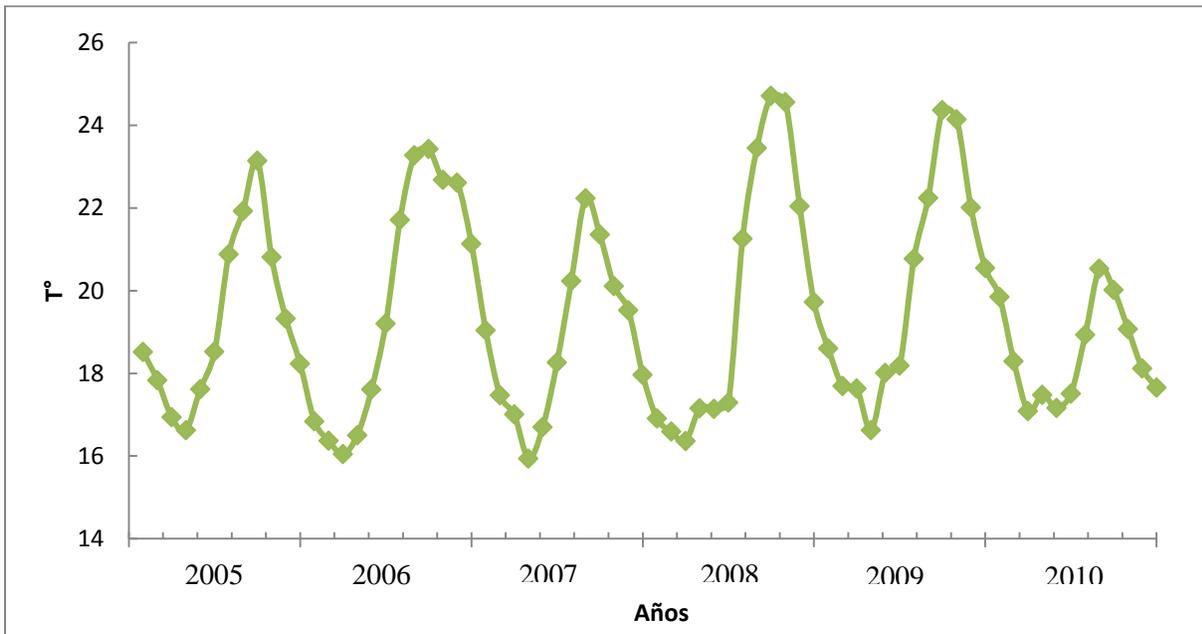


Figura 13. Serie de tiempo para la temperatura superficial de la zona oceánica.

VII.1.4. Variación espacial anual

En general, durante la mayor parte del año en la zona costera se registraron las temperaturas más frías, mientras que en la zona oceánica se observaron las temperaturas más cálidas. En septiembre del año de 2005 se presentaron las temperaturas más altas para las tres zonas, con 23.42 °C para la zona costera, 23.52 °C para la zona de transición y 23.14 °C para la zona oceánica. Mientras que los valores más bajos se observaron durante el mes de abril, 15.37 °C.

Durante el año de 2006 se tuvo que las temperaturas más altas se presentaron en septiembre con 24.3 °C en la zona costera, 24.14 °C en la zona de transición y 23.43 °C en la zona oceánica, mientras que las temperaturas mínimas se observaron durante marzo con 14.42 °C para la zona costera, 15.31 °C para la zona de transición y 16.05 °C para la zona oceánica (Fig. 15).

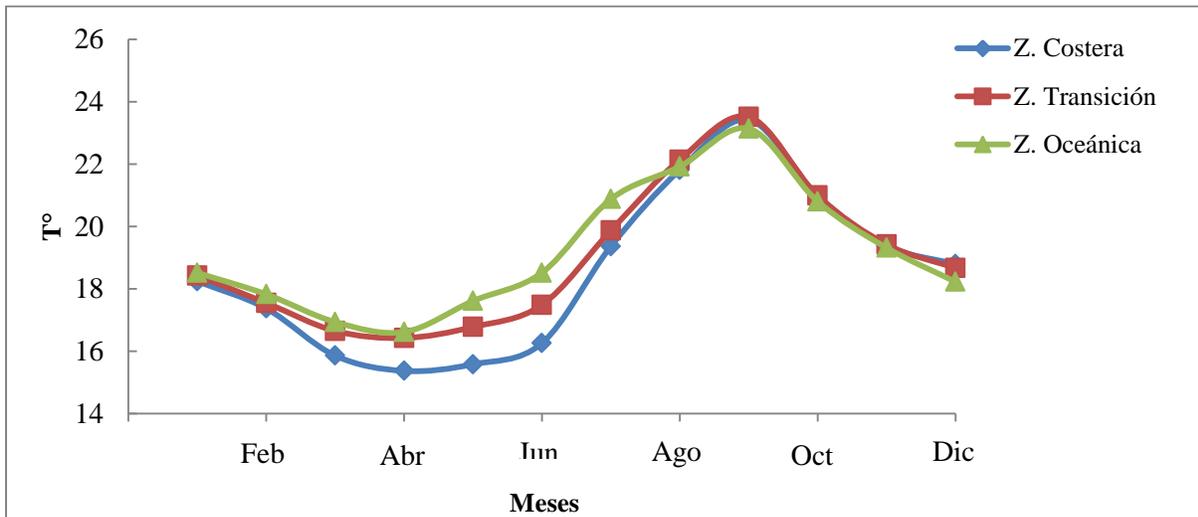


Figura 14. Variación espacial de la temperatura superficial para el año 2005.

Para el año de 2007, los meses de agosto y septiembre fueron donde se registraron las temperaturas más altas, siendo el mes de septiembre para la zona costera (20.98 °C) y el mes de agosto para la zona de transición (21.56 °C) y la zona oceánica (22.23 °C). Mientras que las temperaturas más bajas se observaron durante el mes de abril, para la zona costera fue de 14.98 °C, para la zona de transición fue de 15.53 °C y para la zona oceánica fue de 15.94 °C (Fig.16).

En el año de 2008 las temperaturas más cálidas se presentaron durante el mes de septiembre con 25.42°C para la zona costera, 25.34 °C para la zona de transición y 24.71 °C para la zona oceánica. Las temperaturas más bajas se registraron durante abril para la zona costera (15.09 °C) y en marzo para la zona de transición (16.32 °C) y la zona oceánica (16.36 °C) (Fig. 17).

En el año de 2009 las temperaturas más altas se registraron en el mes de septiembre con 25.98°C para la zona costera, con 25.31 °C para la zona de transición y con 24.36 °C para la zona oceánica. Por otro lado se tiene que el mes de abril para la zona costera con 15 °C y la zona oceánica con 16.62 °C y el mes marzo para la zona de transición con 15.70 °C, como los meses con las temperaturas más bajas (Fig. 18).

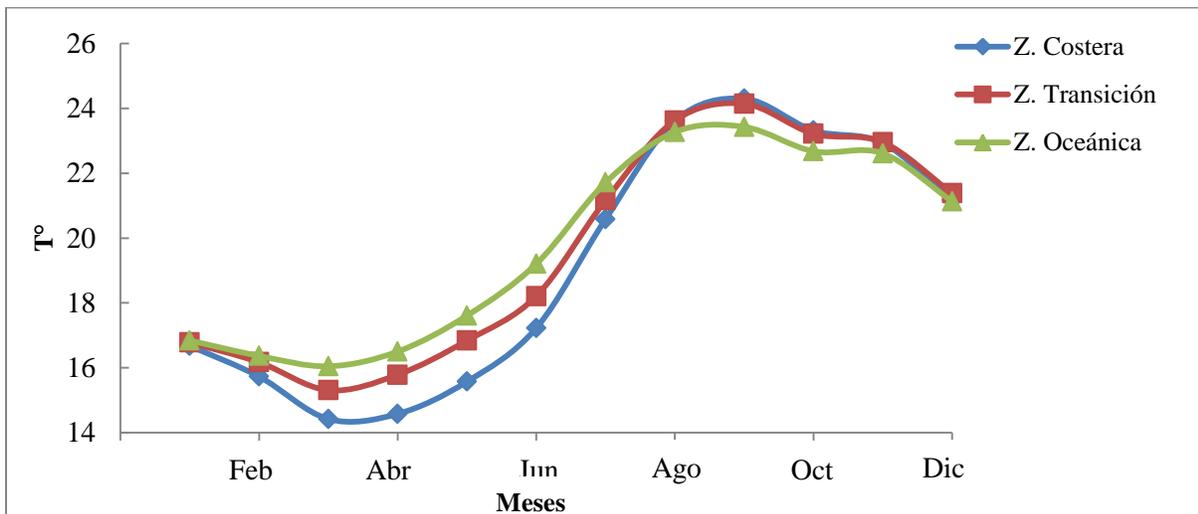


Figura 15. Variación espacial de la temperatura superficial para el año 2006.

Por último, para el año de 2010 se tiene que las temperaturas más cálidas se observaron para el mes de agosto, para las tres zonas; 20.61 °C para la zona costera, 20.25 °C para la zona de transición y 20.53 °C para la zona oceánica. Mientras que las temperaturas más frías se registraron para la zona costera y la zona de transición durante el mes de mayo con 15.62 °C y 16.8 °C, respectivamente, y en la zona oceánica la temperatura más baja se presentó durante el mes de marzo con 17.09 °C (Fig. 19).

Hubo diferencias significativas (ANOVA, $\alpha = 0.05$; $p = 0.000$) entre los meses y entre las zonas ($\alpha = 0.05$; $p = 0.028$) en la temperatura.

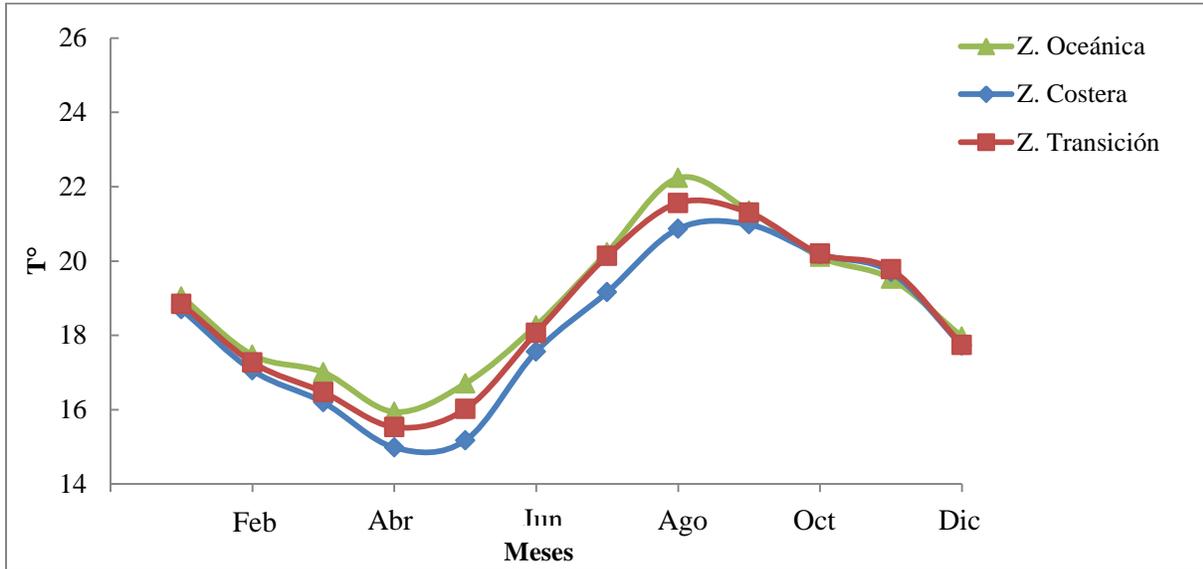


Figura 16. Variación espacial de la temperatura superficial para el año 2007.

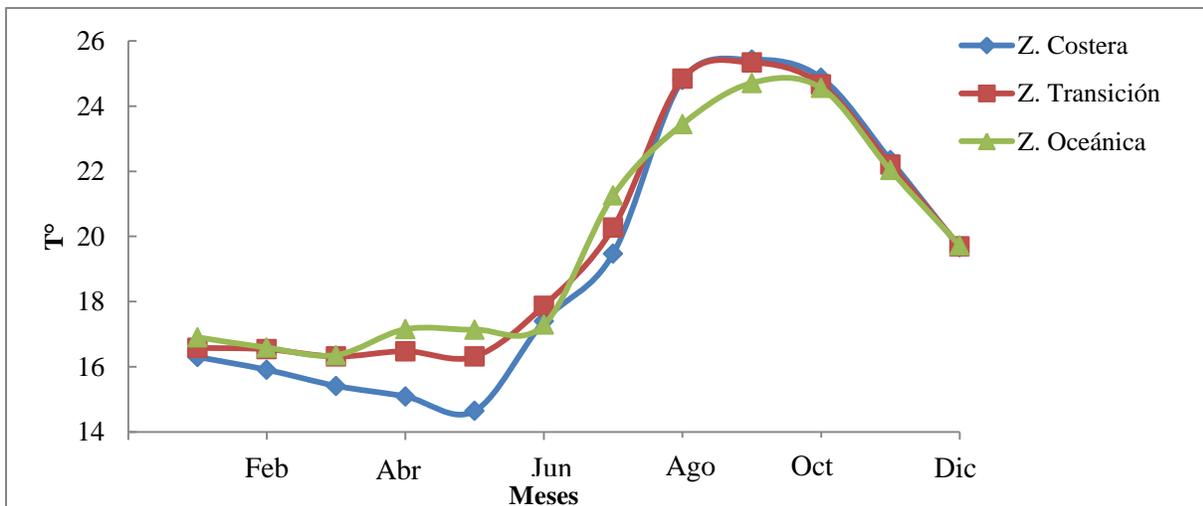


Figura 17. Variación espacial de la temperatura superficial para el año 2008.

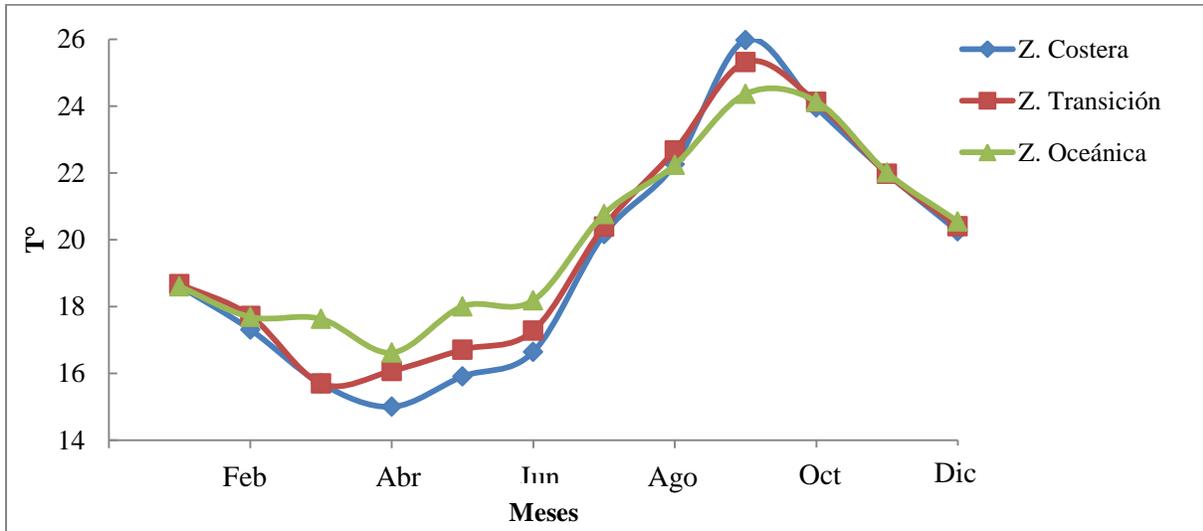


Figura 18. Variación espacial de la temperatura superficial para el año 2009.

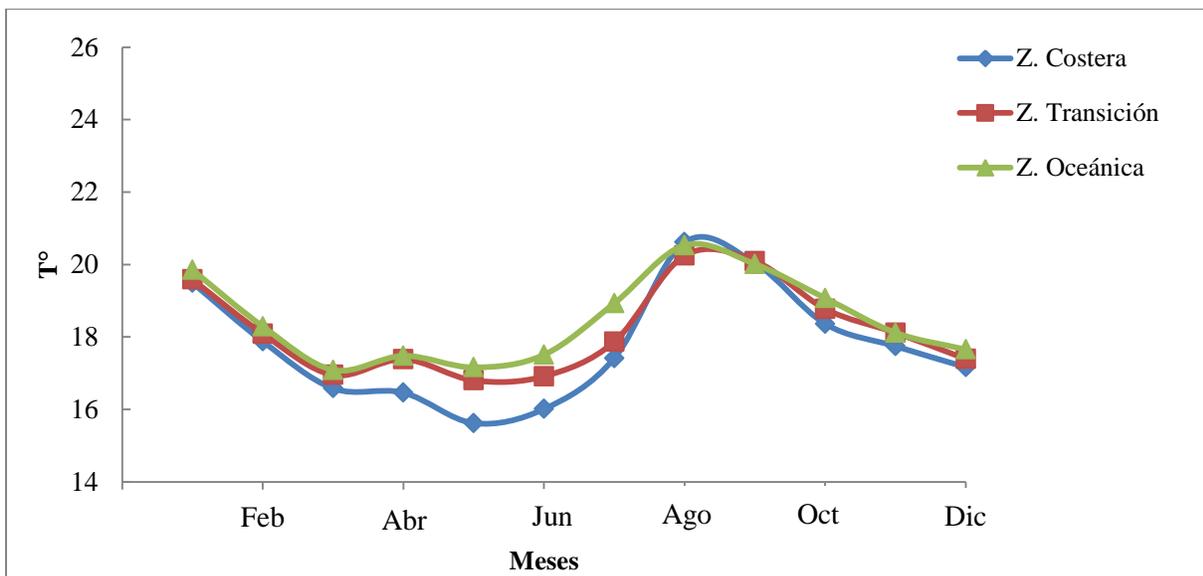


Figura 19. Variación espacial de la temperatura superficial par el año 2010.

VII.2. Clorofila

Los resultados de clorofila mostraron una variación estacional bien marcada como se observa en la Figura 20, con concentraciones de clorofila más altas durante los meses de primavera y verano; las concentraciones más bajas se registraron en los meses de otoño e invierno.

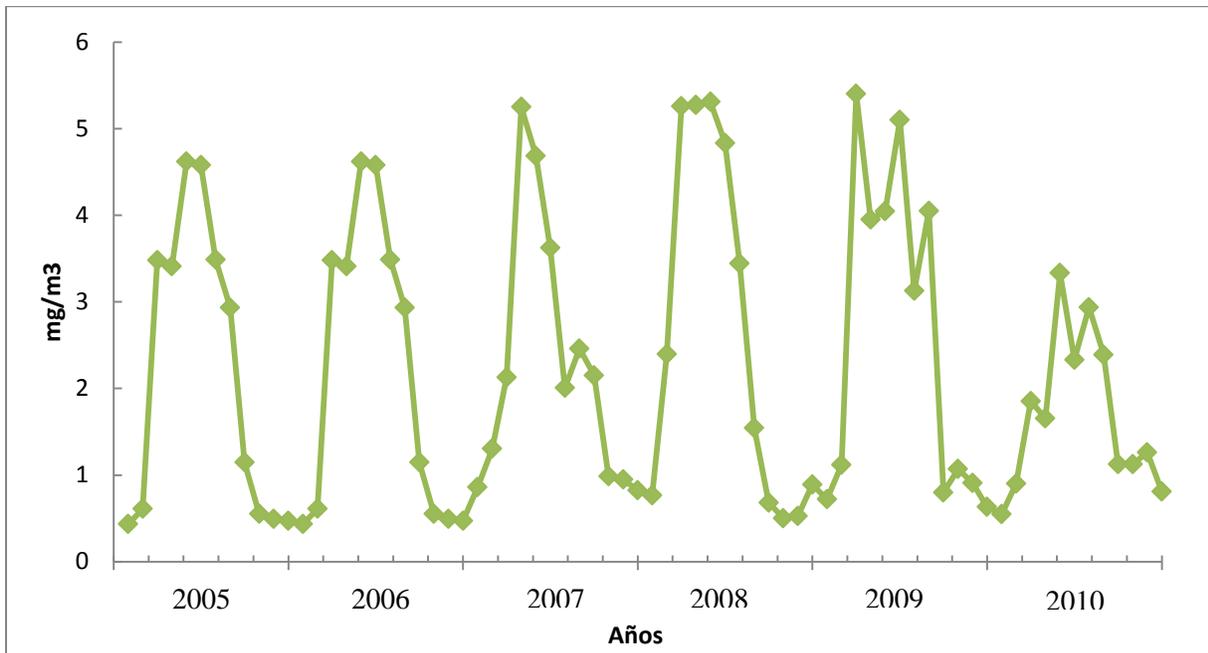


Figura 20. Serie de tiempo para la concentración de Clorofila a de toda el área de estudio.

VII.2.1. Variación interanual

La concentración de clorofila a media anual fluctuó entre 1.6 - 2.6 mg/m³; donde los meses de primavera y verano fueron los que presentaron los niveles más altos, mientras que los valores más bajos se mostraron durante los meses de otoño e invierno. En general no hubo una variación muy marcada entre cada uno de los años de muestreo, sin embargo se ve una disminución en la concentración de clorofila de 1.68 mg/m³ del año del 2010, en comparación a la concentración del año anterior que fue de 2.57 mg/m³. El año con la concentración promedio más alta fue el 2008 con 2.62 mg/m³, mientras que el año con el nivel promedio más bajo fue el de 2010, con 1.68 mg/m³ como se observa en la Figura 21.

El análisis de varianza arrojó, que no hay evidencia estadística que demostrará que hay diferencias significativas (ANOVA, $\alpha = 0.05$; $p = 0.769$), para afirmar que la variación temporal (años) tenga influencia sobre la temperatura.

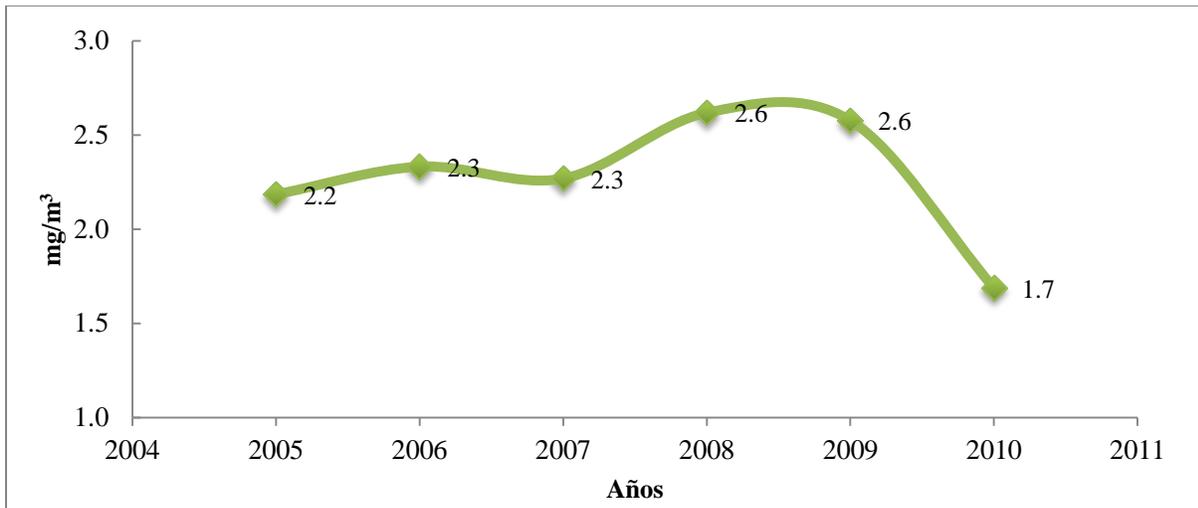


Figura 21. Concentración de Clorofila a promedio interanual (note el cambio de escala con respecto a la Figura 20).

VII.2.2. Variación Anual

En el año 2005 la concentración más alta (4.6 mg/m^3) se observó durante el mes de mayo, mientras que el mes de enero se presentó el valor mas bajo (0.43 mg/m^3) (Fig. 22).

La concentración máxima de clorofila a para el año de 2006 se registró para el mes de julio con 4.72 mg/m^3 ; la concentración del mes de noviembre fue la más baja (0.49 mg/m^3) para este año (Fig.23).

Para el año de 2007, el mes de abril fue el que presentó la concentración más alta (5.25 mg/m^3), mientras que el mes de diciembre con 0.82 mg/m^3 fue el que tuvo la concentración promedio más baja de todo el año (Fig. 24).

Durante el año de 2008 los niveles más altos de clorofila a se registraron para el mes de mayo con 5.31 mg/m^3 y el mes de octubre con 0.50 mg/m^3 el mes con la concentración de clorofila más baja de este año (Fig. 25).

La concentración de clorofila a más alta (5.40 mg/m^3) para el año de 2009 se observó en el mes de marzo, y el nivel de clorofila más bajo (0.63 mg/m^3) se presentó el mes de diciembre (Fig. 26).

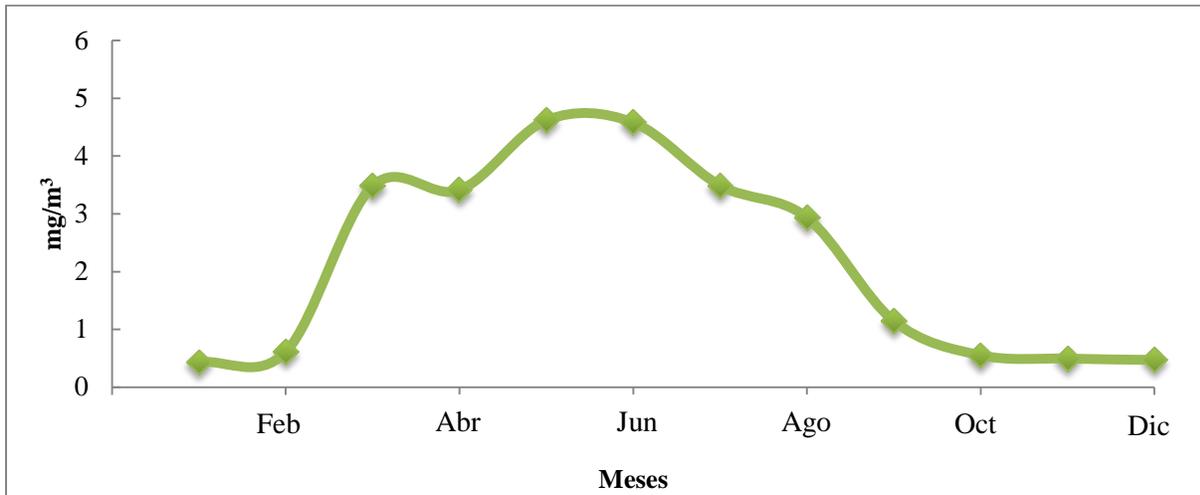


Figura 22. Variación anual de la concentración de Clorofila a para el año de 2005 para toda el área de estudio.

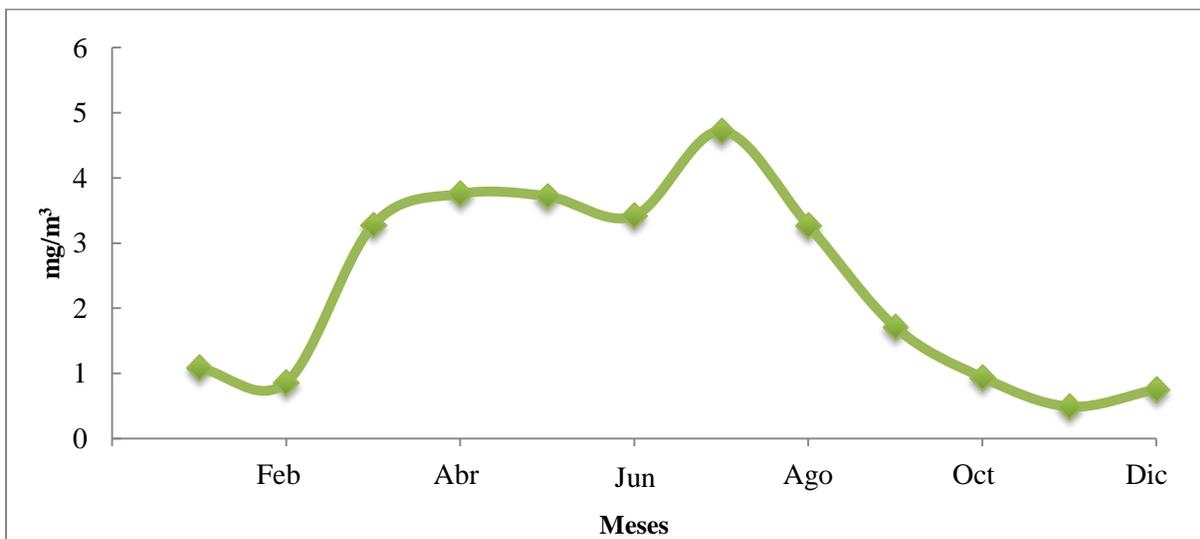


Figura 23. Variación anual de la concentración de Clorofila a para el año de 2006 para toda el área de estudio.

Para el año de 2010 el nivel de clorofila a más alto lo presentó el mes de marzo con 3.33 mg/m³, mientras que enero fue el mes menos productivo de este año con 0.55 mg/m³ (Fig. 27).

La prueba de ANOVA estableció que hay evidencia significativa ($\alpha = 0.05$; $p = 0.000$) que afirma que la variación temporal (meses) tuvo influencia sobre la concentración de clorofila a.

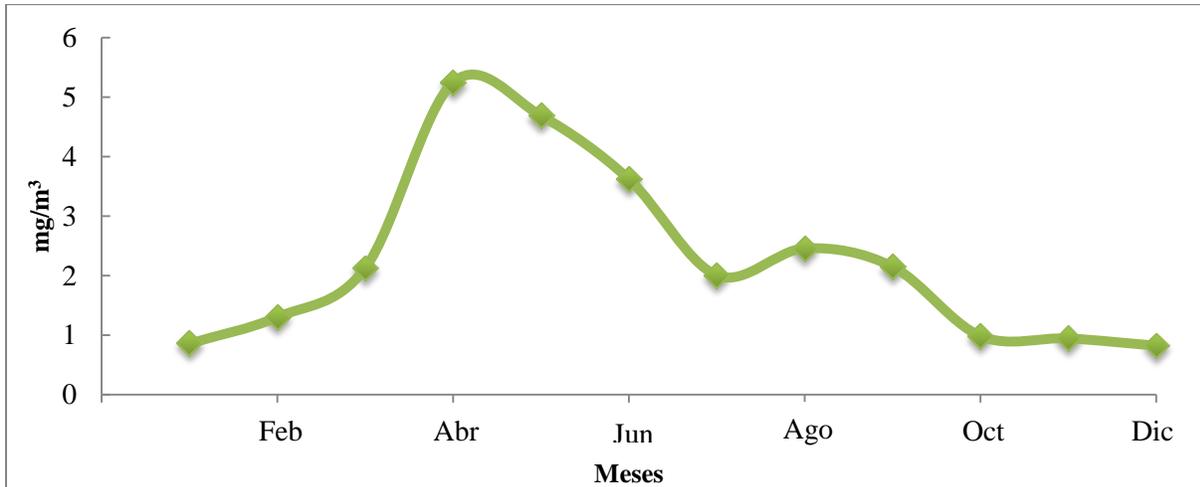


Figura 24. Variación anual de la concentración de Clorofila a para el año de 2007 para toda el área de estudio.

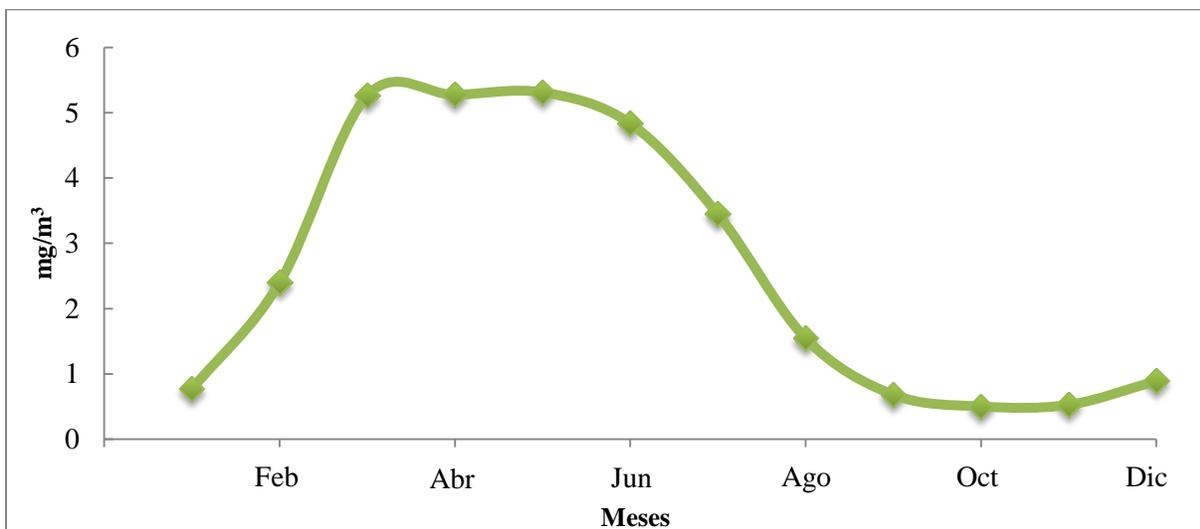


Figura 25. Variación anual de la concentración de Clorofila a para el año de 2008 para toda el área de estudio.

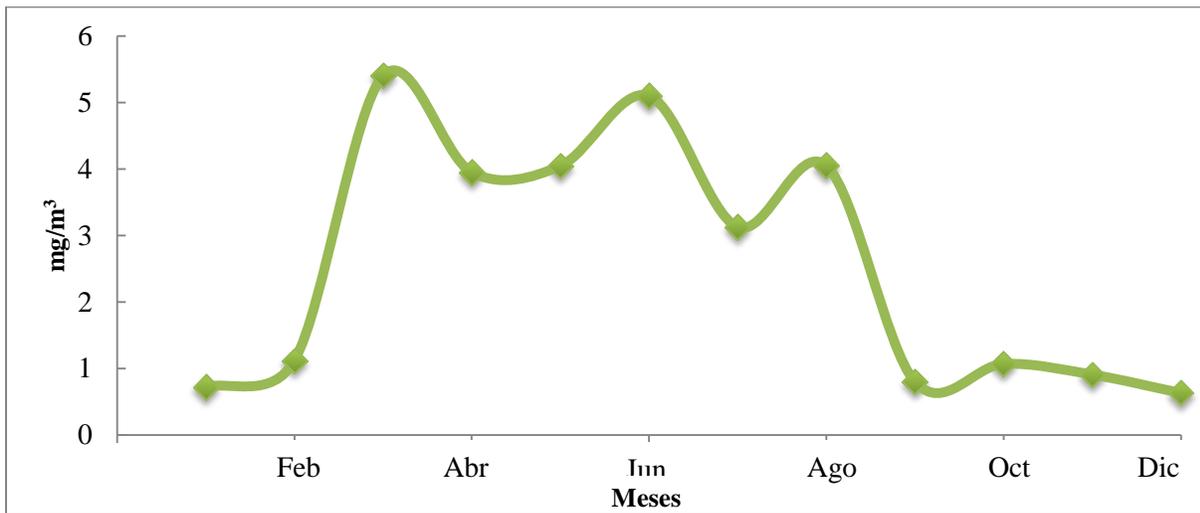


Figura 26. Variación anual de la concentración de Clorofila a para el año de 2009 para toda el área de estudio.

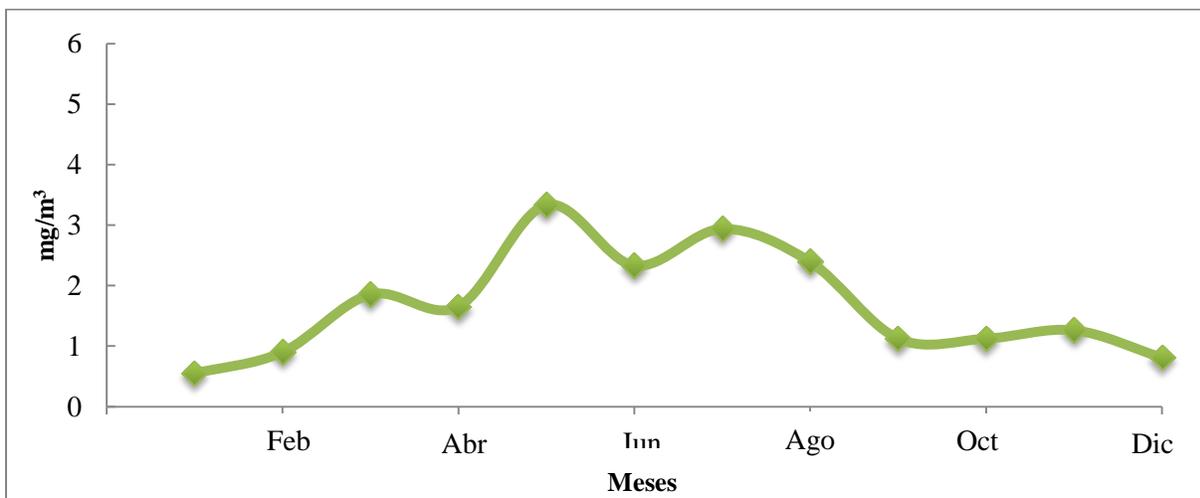


Figura 27. Variación anual de la concentración de Clorofila a para el año de 2010 para toda el área de estudio.

VII.2.3. Variación espacial

Se observó una variación estacional bien definida para las 3 zonas del área de estudio (Figs. 28, 29 y 30). Además de esta variación temporal es notoria una variación espacial entre las zonas costera, de transición y oceánica; la zona costera mostró una mayor variabilidad en las concentraciones de clorofila a con un intervalo más amplio de valores.

En la zona costera en el mes de abril de 2008 con 14.24 mg/m^3 se presentó la concentración más alta, mientras que en enero de 2005 se observó la concentración más baja con 0.82 mg/m^3 . En la zona de transición, también se observó una alta variación, pero los valores de clorofila fueron más bajos que la zona costera. Siendo el mes de marzo de 2008, donde se registró el valor máximo (3.87 mg/m^3), mientras que septiembre de 2008 se obtuvo la concentración más baja con 0.18 mg/m^3 . Por último, en la zona oceánica se observa una mayor uniformidad dentro los niveles de clorofila a, siendo esta zona donde se observaron los valores más bajos en la concentración de clorofila, durante todo el año. Se presentó el más alto de clorofila en marzo 2008 con 2.45 mg/m^3 , la concentración menor para la zona oceánica se presentó el mes de octubre de 2006 con 0.16 mg/m^3 .

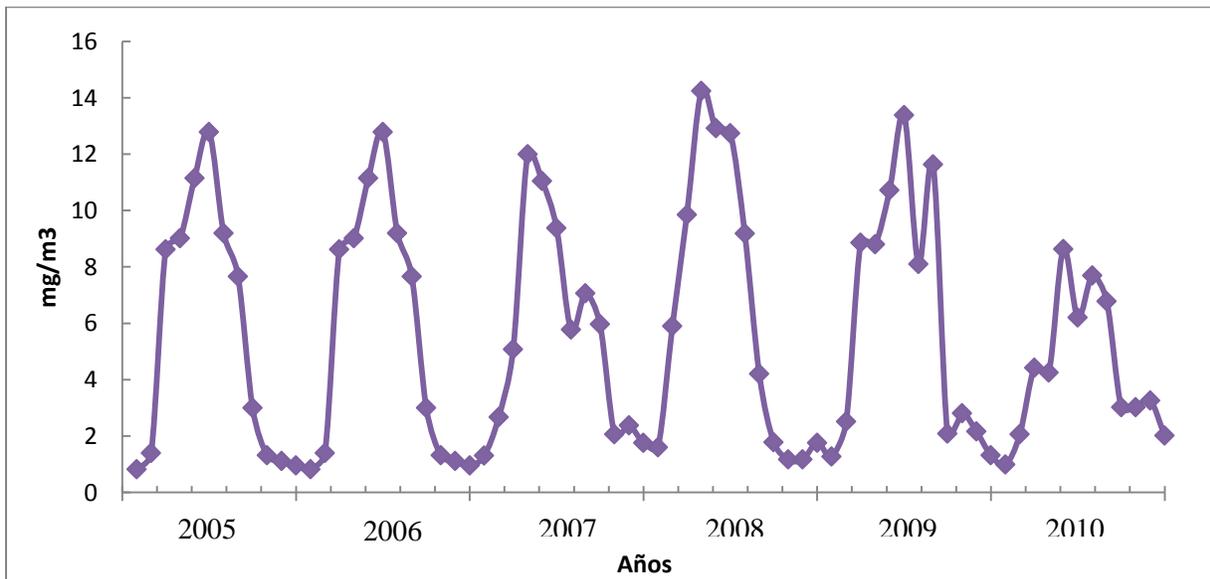


Figura 28. Serie de tiempo para la concentración de clorofila a de la zona costera.

VII.2.4. Variación espacial anual

La zona costera fue la más productiva, teniendo los niveles más altos de clorofila durante los meses de primavera y otoño, mientras que la zona oceánica fue donde se presentaron los niveles más bajos de clorofila a. Para el año de 2005 se obtuvieron las concentraciones de clorofila más altas durante los meses de junio para la zona costera (12.78 mg/m^3), mayo para la zona de transición (3.10 mg/m^3) y abril para la zona oceánica (0.63 mg/m^3). Por otro lado, las concentraciones más bajas se registraron, para la zona costera el mes de enero con 0.82 mg/m^3 , para la zona de transición y la zona oceánica durante el mes de octubre con 0.21 mg/m^3 y 0.17 mg/m^3 respectivamente (Fig. 31).

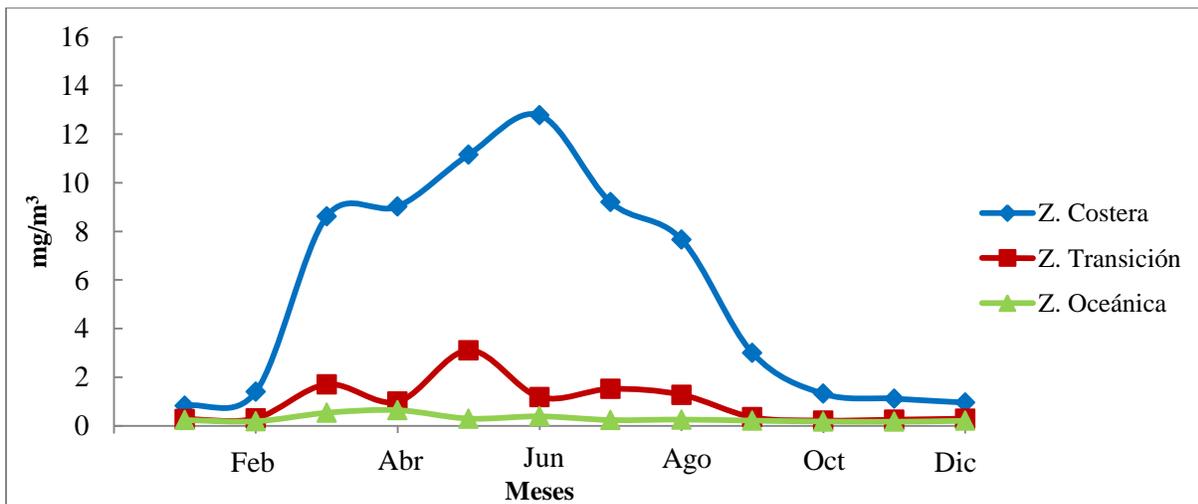


Figura 31. Variación espacial de la concentración de clorofila a para el año de 2005.

Para el año de 2006, se estimaron los valores más altos en el mes de mayo con 10.17 mg/m^3 en la zona costera, para la zona de transición en el mes de abril (1.91 mg/m^3), y para la zona oceánica durante el mes de marzo (0.6 mg/m^3). Los niveles más bajos de clorofila a (Fig. 32) se observaron en noviembre (0.98 mg/m^3 y 0.29 mg/m^3) para la zona costera y de transición, respectivamente, y en octubre con 0.16 mg/m^3 para la zona oceánica.

Durante el año de 2007, los niveles más altos de clorofila a se presentaron en los meses de abril para la zona costera (11.99 mg/m^3) y la zona de transición (3.43 mg/m^3) y de mayo para la zona oceánica (1.1 mg/m^3). Por otra parte las concentraciones más bajas para la zona costera (1.3

mg/m³) se registraron en enero, julio para la zona de transición (0.34 mg/m³) y agosto para la zona oceánica (0.17 mg/m³), fueron los que presentaron (Fig. 33).

Las concentraciones más altas de clorofila a para el año de 2008 fueron de 14.24 mg/m³ para la zona costera en el mes de abril, 2.92 mg/m³ para la zona de transición durante el mes de mayo y 2.45 mg/m³ para la zona oceánica en el mes de marzo. Mientras que los meses menos productivos fueron: para la zona costera el mes de octubre con 1.16 mg/m³; y para las zonas de transición y oceánica el mes de septiembre con 0.18 mg/m³ y 0.15 mg/m³, respectivamente (Fig. 34).

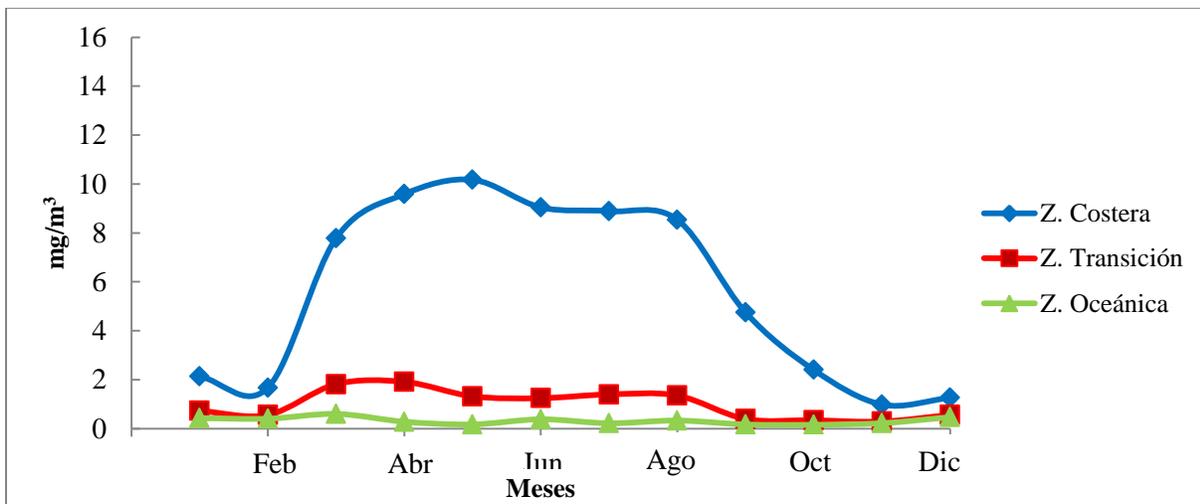


Figura 32. Variación espacial de la concentración de clorofila a para el año de 2006.

Durante el año de 2009, los niveles de clorofila a más altos se registraron durante junio para la zona costera (13.38 mg/m³), marzo para la zona de transición (3.16 mg/m³) y abril para la zona oceánica (0.89 mg/m³). Mientras que los niveles más bajos de clorofila a fueron los meses de enero para la zona costera (1.27 mg/m³) y de septiembre para las zonas de transición (0.28 mg/m³) y oceánica (0.17 mg/m³), como se puede observar en la Fig. 35.

Durante el año de 2010 los meses más productivos fueron, el mes de mayo para la zona costera (8.63 mg/m³) y la zona oceánica (0.52 mg/m³) y el mes de julio para la zona de transición (1.33 mg/m³). Por otro lado, los meses menos productivos fueron el mes de enero con 0.98 mg/m³ para la zona costera, y los meses de septiembre y octubre con 0.27 mg/m³ para la zona de transición y el mes de agosto con 0.17 mg/m³ para la zona oceánica (Fig. 36).

Estadísticamente hubo diferencias significativas en la variación temporal (ANOVA, $\alpha = 0.05$; $p = 0.000$) (meses) y espacial (ANOVA, $\alpha = 0.05$; $p = 0.000$) (zonas) de los niveles de clorofila a.

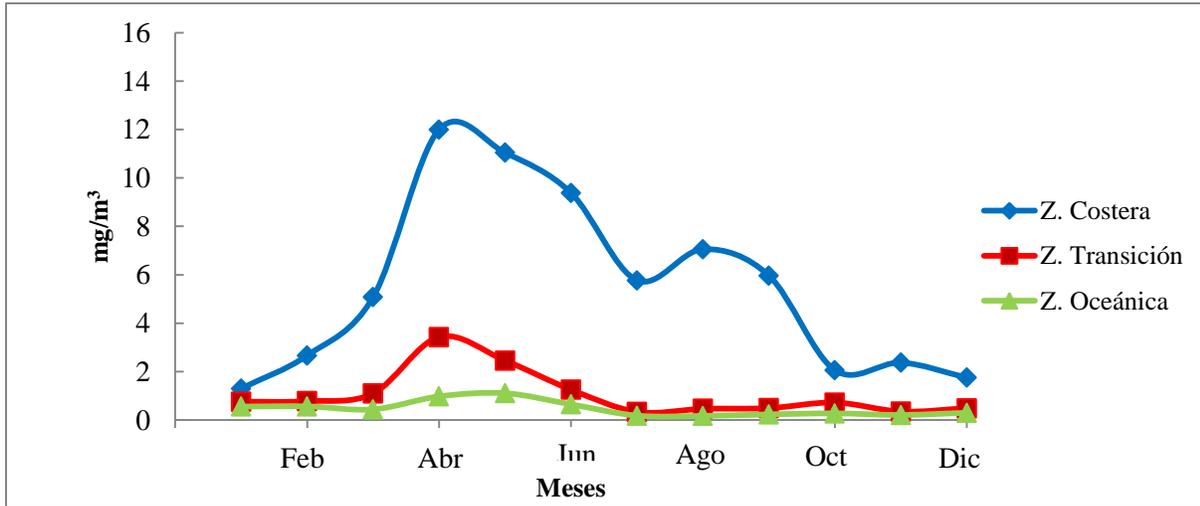


Figura 33. Variación espacial de la concentración de clorofila a para el año de 2007.

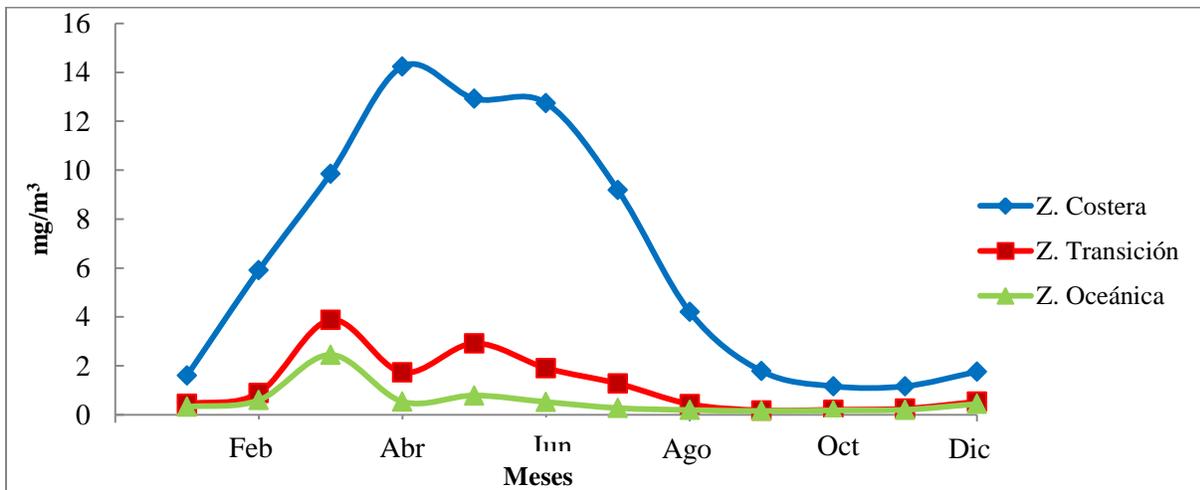


Figura 34. Variación espacial de la concentración de clorofila a para el año de 2008.

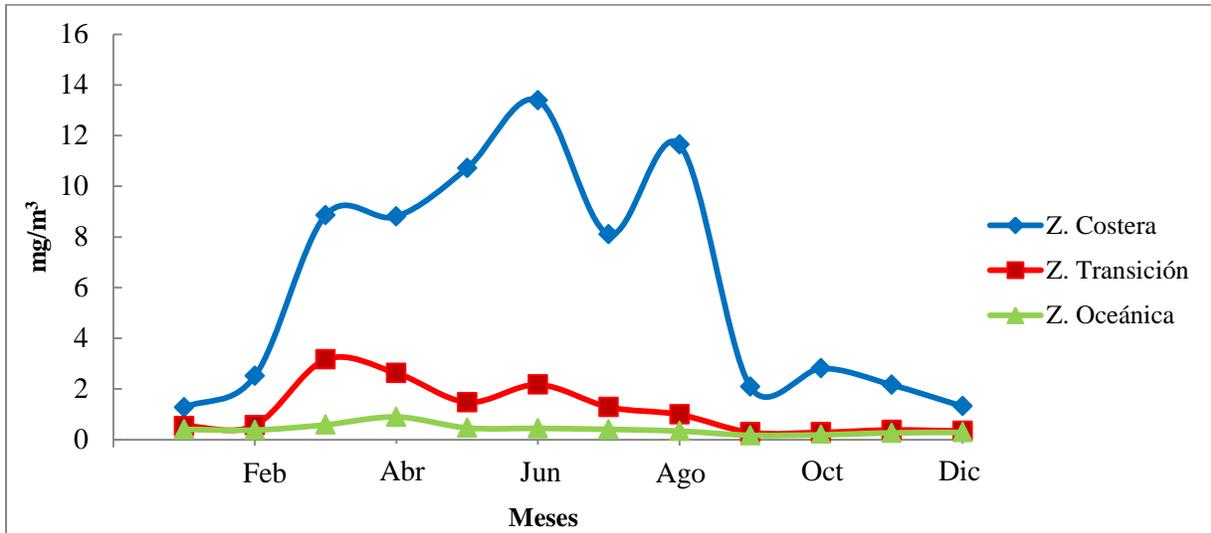


Figura 35. Variación espacial de la concentración de clorofila a para el año de 2009.

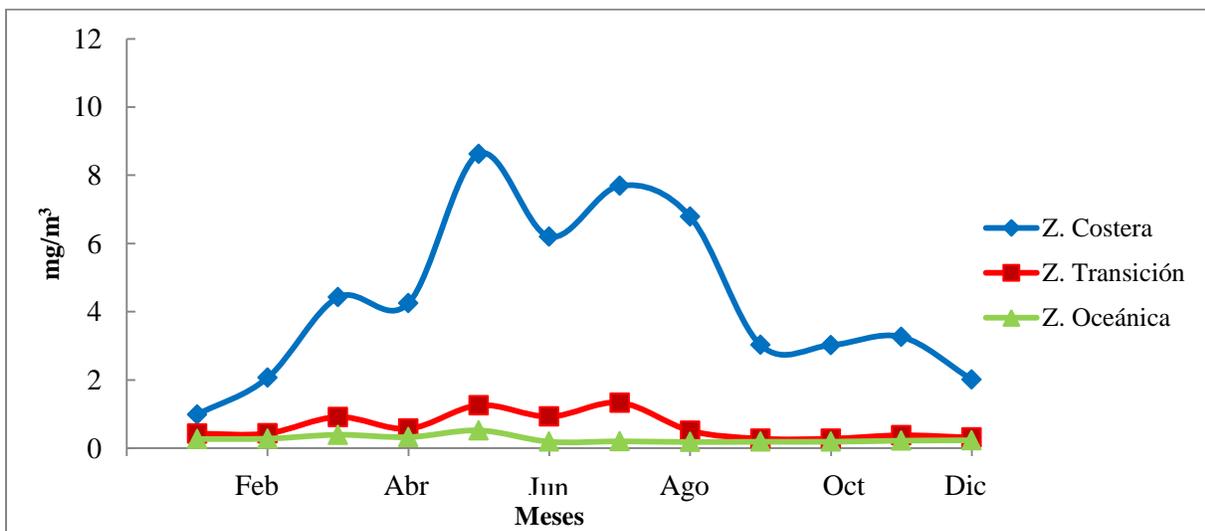


Figura 36. Variación espacial de la concentración de clorofila a para el año de 2010 (note el cambio de escala con respecto a la Figura 35).

VIII. DISCUSIÓN

La temperatura superficial del área de estudio mostró una tendencia interanual muy marcada, con dos años de temperaturas cálidas (2008 y 2009) seguidos de un año con temperaturas frías (2010). Estas variaciones generales (a gran escala) pueden estar relacionadas a la presencia de eventos El Niño/La Niña durante el periodo de estudio. Los datos oceanográficos registrados por el Programa IMECOCAL evidenciaron que durante los años de 2005 a 2006 estuvo presente El Niño (Durazo et al., 2010; Gaxiola-Castro et al., 2010). Auad et al. (2011) reportaron la presencia de El Niño durante el año de 2009 y un evento de La Niña durante el año de 2010. El niño trae consigo el hundimiento de la termoclina, elevando así el nivel del mar en la zona costera. Al ocurrir esto la temperatura superficial del agua aumenta y los eventos de surgencias transportan consigo aguas cálidas pobres en nutrientes por lo que la productividad primaria es casi nula (Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín, 2007). Este empobrecimiento de las aguas costeras desata un decaimiento en la trama trófica; al no haber fitoplancton el zooplancton no dispone de alimento, lo que a su vez hace que los peces desaparezcan por la falta de alimento. Esto trae el colapso de las grandes pesquerías repercutiendo así en el ámbito económico que implica la producción pesquera.

Las temperaturas observadas fueron mayores durante los eventos de El Niño (2006 y 2008) y menores durante La Niña (2010). Sin embargo la concentración de la clorofila tuvo un comportamiento contrario a lo esperado (altas concentraciones durante años cálidos y bajas concentraciones en años fríos). La concentración de clorofila superficial promedio de toda el área, no tuvo una tendencia en el periodo de estudio, ni se observó una diferencia muy marcada entre los años estudiados, la diferencia entre el valor más alto (2008) y el más bajo (2010) fue 0.93 mg/m^3 de clorofila aunque la presencia de eventos El Niño/La Niña no parecen tener un gran impacto en la cantidad de la clorofila a global de la región. De acuerdo con Lavaniegos et al. (2003), la biomasa del fitoplancton no fue afectada negativamente con el evento de El Niño de 1997/98 en el sistema de la corriente de California. Así mismo, Demarcq (2009) registró un incremento en la biomasa de fitoplancton asociada a un calentamiento de la superficie del agua; sugiriendo de esta manera, que la variación interanual en la concentración de pigmentos fotosintéticos esta estrechamente ligada con los factores físicos que afectan a los procesos de surgencias que ocurren en esta región (Boracio-León et al., 2007; Demarcq, 2009).

La temperatura superficial promedio derivada de sensores remotos para el periodo de estudio fue de 19.08 °C, dentro del rango normal reportado para esta zona. Espinoza-Carreón et al. (2004) reportaron una temperatura superficial de 21 °C para la parte sur de la Península de Baja California (se obtuvieron valores altos debido a la presencia de El Niño de 97-98, durante el periodo de estudio); mientras que Juárez-Colunga et al. (2010) obtuvieron una temperatura de 18-20 °C para la región sur de la Península. Por su parte Gaxiola-Castro et al. (2010) registraron una temperatura superficial de 18.5 °C para el sur de Punta Eugenia. Así mismo las medias anuales obtenidas se compararon con las mediciones tomadas por la Cooperativa Leyes de Reforma de Bahía Asunción; donde se registró una temperatura superficial promedio de 18.4 °C (2005-2010). Cabe recalcar que estos datos siguen la misma tendencia en la temperatura superficial teniendo años cálidos (2008-09) con temperaturas promedios de 19.62-19.82 °C, seguido de un año frío (2010) con una temperatura promedio de 18.17 °C a partir de los sensores remotos de este trabajo.

La variación estacional para la temperatura superficial fue muy marcada, teniendo las mínimas temperaturas durante los meses de primavera; y las máximas se registraron en los meses de otoño. Estas variaciones estacionales también fueron observadas por Espinoza-Carreón et al. (2004), quienes registraron las máximas temperaturas durante los meses de agosto y septiembre y las mínimas durante los meses de marzo y abril, para la región de Baja California. Estos cambios marcan el final del invierno y el principio de primavera, y el final de verano y principio de otoño. En el presente estudio también se obtuvieron resultados similares a los de Auad et al. (2011), quienes reportaron aguas más frías durante la época de primavera-verano y aguas más cálidas en otoño-invierno. Durazo et al. (2010) registraron para el sur de Punta Eugenia, altas temperaturas durante los meses de otoño y bajas temperaturas en los meses de abril (primavera). Esta variación estacional está asociada a la presencia de eventos de surgencias, asociadas a los regímenes de vientos en la zona; vientos nulos o ligeramente hacia el sur durante otoño-invierno, asociados a un nivel del mar alto en la costa y temperaturas cálidas, y; vientos persistentes hacia el sur durante primavera-verano y un nivel del mar bajo y temperaturas superficiales frías (Parés-Sierra et al., 1997).

Durante primavera-verano hay una intensificación de los vientos que provienen del noroeste, generando condiciones favorables para surgencias costeras (Parés-Sierra et al., 1997). Por lo que la época de surgencias para esta zona inicia los meses de marzo y abril (Parés-Sierra

et al., 1997; Espinoza-Carreón et al., 2004; Durazo et al., 2010). Bajo estas condiciones la concentración de clorofila a presentó una variación estacional muy marcada, teniendo altas concentraciones durante la época fría en primavera y verano y bajas concentraciones el resto del año (otoño-invierno). La clorofila a registró niveles altos, para los meses de marzo (2009), abril (2007), mayo (2005, 2008 y 2010) y julio (2006), mientras que los niveles bajos se observaron durante los meses de enero (2005 y 2010), octubre (2008), noviembre (2006) y diciembre (2007 y 2009). Estos altos niveles de este pigmento coinciden con la época de surgencias que comienza en marzo y abril, ligando así estos eventos de movimientos de agua con una alta biomasa fitoplanctónica (Demarcq, 2009). Esta variabilidad estacional es mayor que la interanual, lo que sugiere que los procesos interanuales tienen un menor impacto que los procesos estacionales en toda el área.

Resultados de sensores remotos similares ha este trabajo, han reportado para la región costera frente a la Península de Baja Californian (sur), altas concentraciones de clorofila durante los meses de mayo y junio, época de surgencias intensas (Zuria-Jordan et al., 1995). Espinosa-Carreón et al. (2004) reportaron para la región oceánica frente a Baja California altos valores durante los meses de abril a julio, y bajos de octubre a febrero. Mientras que Boracio-León et al. (2007) obtuvo los promedios más bajos de clorofila a durante la época cálida. Resultados similares fueron reportados por Gaxiola-Castro et al. (2010), en los meses de marzo, abril y mayo se presentaron las concentraciones más altas y durante invierno y otoño se registraron las menores concentraciones.

Cabe enfatizar que la principal causa de la variación estacional de la concentración de la clorofila a, radica en los eventos de surgencias. Teniendo niveles altos durante la época de máximas surgencias y niveles bajos cuando estos eventos son de baja magnitud o nulos (Zuria-Jordan et al., 1995; Demarcq, 2009).

En general, para la variación espacial se obtuvo que la zona costera fuera donde se presentaron las temperaturas más frías y la zona oceánica las temperaturas más cálidas. Esto se debe a que durante la época de surgencias la zona costera recibe aguas frías de capas más profundas del océano (Parés-Sierra et al., 1997; Espinoza-Carreón et al., 2004), sin embargo al acabar este periodo la zona costera se va calentando a finales de verano (agosto-septiembre) y normalmente tiene temperaturas similares a la zona de transición y a la zona oceánica. La distribución espacial de los niveles de clorofila estuvo muy marcada, registrándose niveles altos

en la zona costera, valores intermedios en la zona de transición y niveles bajos en la zona oceánica. Además la zona costera, presentó una dinámica mayor que en las demás zonas con promedios anuales y mensuales muy variados. Un patrón espacial similar fue registrado por Zuria-Jordan et al. (1995), quienes encontraron concentraciones altas en las zonas cercanas a la costa; Espinoza-Carreón et al. (2004) obtuvieron las mayores concentraciones de pigmentos fotosintéticos en banda, junto a la costa; así mismo Boracio-León et al. (2007) reportaron que los valores mayores de clorofila a se encontraron en las subregiones costeras. Los valores reportados por estos últimos autores son de 0.42 a 3.06 mg/m³ con valores menores (0.08 a 0.42 mg/m³) en las subregiones más oceánicas; valores similares fueron obtenidos por Gaxiola-Castro et al. (2010) registraron concentraciones mayores a 1.0 mg/m³ cerca de la línea de costa y concentraciones menores a 0.25 mg/m³ en aguas oceánicas. Sin embargo, los valores de la zona costera observados en este estudio fueron más altos que los reportados por estos autores. Mientras que los valores de la zona de transición y la zona oceánica fueron similares.

Estadísticamente no hubo evidencia de que la variación interanual tuvo una relación positiva en la temperatura. Pero si, hubo evidencia estadística que indica que la variabilidad de la temperatura superficial fue influenciada positivamente por los cambios estacionales (mensualmente) y espaciales (zonas). Parés-Sierra et al. (1997), propusieron que la variación estacional es más notoria que la variación interanual. Además, la variación estacional y espacial que se encontró, puede ser explicada por la presencia de las surgencias costeras que ocurrieron a lo largo de la costa en la zona de estudio; Durazo et al. (2010) y Auad et al. (2011) establecieron que las variaciones estacionales en la Corriente de California están estrechamente ligadas, por las variaciones estacionales en el régimen de vientos. Al igual que en la variación presentada en la temperatura, los niveles de clorofila no tuvieron diferencias significativas en la variación interanual. Mientras que las concentraciones de clorofila a, presentaron evidencia estadística positiva, que demostrara una variación tanto temporal (entre meses) como espacial (entre zonas).

En general, para este estudio se tuvieron aguas eutróficas ($Cl_a > 1 \text{ mg/m}^3$) para la zona costera, aguas eutróficas y mesotróficas ($0.2 < Cl_a < 1 \text{ mg/m}^3$) para la zona de transición y aguas oligotróficas ($Cl_a < 0.2 \text{ mg/m}^3$) para la zona oceánica. Espinoza-Carreón et al., 2004 proponen esta clasificación de las aguas dependiendo de la concentración de pigmentos. Boracio-León et al., 2007 y Gaxiola-Castro et al., 2010, reportaron sus resultados bajo una clasificación similar. Esta marcada variación espacial, se debe principalmente a la presencia de surgencias en las zonas

más cercanas a la costa, las cuales traen consigo aguas más frías ricas en nutrientes, que son esenciales para el crecimiento de los organismos fotosintéticos, dando como resultado altas concentraciones de clorofila a en estas zonas (Gaxiola-Castro et al., 2010). Además Gaxiola-Castro et al. (2010) registraron que esta distribución espacial de la clorofila respondió a la dirección predominante del flujo de la Corriente de California con dirección hacia el sur. Dejando así a la zona de transición y zona oceánica con valores menores, sin embargo la presencia de remolinos de mesoescala provocan una alta concentración de clorofila para estas regiones (Boracio-León et al., 2007). La productividad primaria de la Corriente de California es menor en comparación a la de otros ecosistemas de frontera oriental (Corriente de Benguela, Corriente de las Canarias y Corriente de Humboldt). No obstante, Demarcq (2009) reportó en la parte norte y central de la Corriente de California, un aumento en la producción primaria en la última década. Mientras que la región sur de la Corriente de California se ha mantenido estable en el mismo lapso de tiempo.

La comunidad fitoplanctónica presente en la columna de agua de la Corriente de California esta representada por un 46 % por especies de nano-microfitoplancton y un 56 por especies de picofitoplancton (Millán-Núñez y Millán-Núñez, 2010). Sin embargo, se ha observado un incremento en la biomasa del picofitoplancton; compuesto principalmente por especies de *Prochlorococcus sp.*, *Synechococcus sp.* y Picoeucariontes (Gaxiola-Castro et al., 2008; Millán-Núñez y Millán-Núñez, 2010).

La alta concentración de pigmentos fotosintéticos reportados en este trabajo, durante los años más cálidos, puede ser explicada por la presencia de especies de nanofitoplancton (células <20µm) y de picofitoplancton (células <5µm). Estos organismos fitoplanctónicos son los responsables del 80-90 % de la producción primaria en aguas templadas y tropicales (Lara-Lara et al., 1993). Pero, debido a su pequeño tamaño, estas especies no aportan una gran cantidad de biomasa al ecosistema; dando como resultado un pobre aprovechamiento por parte del zooplancton (pastoreo) y un aumento en la tasa de sedimentación. Este desacoplamiento entre la biomasa del fitoplancton y la del zooplancton ha sido reportado para el Golfo de California (Valdez-Holguín y Lara-Lara, 1987). Este desacoplamiento, da como resultado un decremento en el flujo de carbono en el sistema pelágico, afectando negativamente a las pesquerías de este ambiente, debido al incremento en la tasa de sedimentación, hay un efecto positivo en las comunidades bentónicas (Valdez-Holguín y Lara-Lara, 1987). Las principales pesquerías en el

área de estudio son organismos bentónicos (las distintas especies de abulón, langosta y erizos de mar), al incrementarse la tasa de sedimentación aumenta la cantidad de detritus a este sistema bentónico. Morales-Zarate et al. (2010) establecieron en su modelo, que la especie de langosta roja es uno de los principales componentes del ecosistema rocoso en la región y se alimenta principalmente de detritus.

IX. CONCLUSIONES

La variación interanual no presentó diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) entre la temperatura superficial y los años en este estudio, ni entre los niveles de clorofila a y los años. Por lo tanto la presencia de los eventos de El Niño/La Niña no tuvieron repercusión positiva ni negativa en los niveles de clorofila.

El año de 2009 fue el año más cálido con una temperatura anual promedio de 19.82 °C, mientras que el año de 2010 fue el año más frío, presentando una media anual de 18.17 °C. La concentración de clorofila a, en el año de 2008 tuvo el registro más alto con 2.62 mg/m³, mientras que en el año 2010 fue el menos productivo, con una concentración del pigmento de 1.69 mg/m³.

La temperatura presentó una variación estacional bien marcada, teniendo temperaturas frías durante los meses de primavera y temperaturas cálidas durante los meses de otoño. La variación espacial, mostró un patrón general de aguas frías cerca de la costa y aguas más cálidas en mar abierto. Su efecto en la clorofila a, también tuvo una tendencia estacional muy marcada, observándose altas concentraciones durante los meses de primavera y principios de verano y bajas concentraciones el resto del año (otoño-invierno). La variación espacial en los niveles de clorofila, registró aguas ricas en clorofila cerca de la costa y aguas con bajas concentraciones en mar abierto. La clorofila presentó diferencias significativas ($\alpha = 0.05$), tanto en la variación estacional, como en la espacial.

Se encontraron dos temporadas estacionales, una fría caracterizada por bajas temperaturas y altas concentraciones de clorofila a, que comienza en los meses de marzo y abril y se extiende hasta junio (periodo primavera-verano), coincidiendo con la época de los eventos de surgencias costeras. Y otra cálida, identificada por altas temperaturas y bajos niveles de pigmentos, que comienza durante los meses de agosto y septiembre y se extiende hasta enero (otoño-invierno).

En general se presentaron, aguas eutróficas para la zona costera, aguas mesotróficas en la zona de transición y aguas oligotróficas en la zona oceánica.

X. LITERATURA CITADA

- Abbot, M.R., O.B. Brown, R.H. Evans, H.R. Gordon, K.L. Carder, F. Müller-Karger y W.E. Esaias. 1994. Ocean Color in the 21st Century: A Strategy for a 20-year time series. 1-20 p. En: Hooker S.B. y Firestone E.R. (eds.). SeaWiFS Technical Report Series, NASA Technical Memorandum 104566, Vol. 17.
- Álvarez-Borrego, S. 1995. Luz y productividad del fitoplancton. 9-27 p. En: “Temas de oceanografía biológica en México”. Vol. II González Farías F. y De la Rosa Vélez J. (eds). Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C.
- Auad, G., D. Roemmich y J. Gilson. 2011. The California Current System in relation to the Northeast Pacific Ocean circulation. *Progress in Oceanography* 91: 576-592.
- Barocio-León, O.A., R. Millán-Núñez, E. Santamaría-del Ángel y A. González-Silvera. 2007. Productividad primaria del fitoplancton en la zona eufótica del sistema de la Corriente de California estimada mediante imágenes del CZCS. *Ciencias Marinas* 33(1): 59-72.
- Carr, M.E., A.M. Friedrichs, M. Schmeltz, M.N. Aita, D. Antoine, K.R. Arrigo, I. Asanuma, O. Aumont, R. Barber, M. Behrenfiel, R. Bidigare, E.T. Buitenhuis, J. Cambell, A. Ciotti, H. Dierssen, M. Dowell, J. Dunne, W. Esaias, B. Gentili, W. Gregg, S. Groom, N. Hoepffner, J. Ishizaka, T. Kameda, C. Le Quéré, S. Lohrenz, J. Marra, F. Mélin, K. Moore, A. Morel, T.E. Reddy, J. Ryan, M. Scardi, T. Smyth, K. Turpie, G. Tilstone, K. Waters y Y. Yamanaka. 2006. A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color. *Deep-Sea Research II* 53: 741-770.
- Castro, P. y M.E. Huber. 2007. *Biología Marina*. Ed. McGraw-Hill Interamericana. 6ta edición. Madrid, España.
- Demarcq, H. 2009. Trends in primary production, sea surface temperature and wind in upwelling systems (1998-2007). *Progress in Oceanography* 83: 376-385.
- Durazo, R. y G. Gaxiola-Castro. 2010. Introducción. 13-18 p. En: Gaxiola-Castro G. y Durazo R. (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California*.
- Durazo, R., A.M. Ramírez, L.E. Miranda y L.A. Soto-Mardones. 2010. Climatología de variables hidrográficas. 25-27 p. En: Gaxiola-Castro G, y Durazo R. (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California*.

- Espinosa Carreón, T.L., P.T. Strub, E. Beier, F. Ocampo-Torres y G. Gaxiola-Castro. 2004. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height and temperature off Baja California. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109: C03039.
- Espinosa Carreón, T.L. y J.E. Valdez-Holguín. 2007. Variabilidad interanual de clorofila en el Golfo de California. *Ecología Aplicada* 6(1,2): 83-92.
- Gaxiola-Castro, G., R. Durazo, B. Lavaniegos, M.E. De La Cruz-Orozco, E. Millán-Núñez, L. Soto Mardones y J. Cepeda-Morales. 2008. Respuesta del sistema pelágico a la variabilidad interanual del océano frente a Baja California. *Ciencias Marinas* 34(2): 263-270.
- Gaxiola-Castro, G., J. Cepeda-Morales, S. Nájera-Martínez, T.L. Espinosa-Carreón, M.E. De la Cruz-Orozco, R. Sosa-Avalos, E. Aguirre-Hernández y J.P. Cantú-Ontiveros. 2010. Biomasa y producción del fitoplancton. 59-85 p. En: Gaxiola-Castro G., y Durazo R. (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California*.
- Hernández, B., G. Gaxiola-Castro y S. Najera-Martinez. 2004. Efectos del ENSO en la producción primaria frente a Baja California. *Ciencias Marinas* 30(3): 427-441.
- Juárez-Colunga, M.C., J.M. Hernández-Ayón, R. Durazo, R. Lara-Lara, G. Gaxiola-Castro, A. Siqueiros-Valencia y O. Salmerón-García. 2010. Variación espacial y temporal del pH. 181-196 p. En: Gaxiola-Castro G, y Durazo R. (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California*.
- Kirk, J. 2003. *Light and Photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press. Third Edition.
- Lalli, C.M. y T.R. Parsons. 1997. *Biological Oceanography an Introduction*. Ed. Elsevier Butterwoth-Heinemann. Second Edition.
- Lara-Lara, J.R., R. Millán-Núñez, J.L. Lara-Osorio y C. Bazán-Guzmán. 1993. Productividad y biomasa del fitoplancton por clases de tamaño, en la parte central del Golfo de California durante primavera, 1985. *Ciencias Marinas* 19(2): 137-154.
- Lavaniegos, B.E., G. Gaxiola-Castro, L.C. Jiménez-Pérez, M.R. González Esparza, T. Baumgartner y J. García-Córdova. 2003. 1997-98 El Niño effects on the pelagic ecosystem of the California Current off Baja California, México. *Geofísica internacional* 42(3): 483-494.

- Lluch-Cota, S.E., S. Álvarez-Borrego, E.M. Santamaría-del Ángel, S.E. Hernández-Vázquez y F.E. Müller-Karger. 1995. El Golfo de Tehuantepec y áreas adyacentes: variación espaciotemporal de pigmentos fotosintéticos derivados de satélite. *Ciencias Marinas* 23(3): 329-340.
- López-Sandoval, D.C., J.R. Lara-Lara, M.F. Lavín, S. Álvarez-Borrego y G. Gaxiola-Castro. 2009. Productividad primaria en el Pacífico Oriental Tropical adyacente a Cabo Corrientes, México. *Ciencias Marinas* 35(2): 169-182.
- López-Sandoval, D.C., J.R. Lara-Lara y S. Álvarez-Borrego. 2009. Phytoplankton production by remote sensing in the region off Cabo Corrientes, México. *Hidrobiológica* 19(3): 185-192.
- Millán-Núñez, E. y R. Millán-Núñez. 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.
- Morales-Zarate, M.V., S.E. Lluch-Cota, E. Serviere-Zaragoza y S. Guzmán del Prío. 2011. Modeling an exploited rocky coastal ecosystem: Bahía Tortugas, Mexico. *Ecological Modelling* 222: 1185-1191.
- Parés-Sierra, A., M. López y E.G. Pavía. 1997. Oceanografía Física del Océano Pacífico Nororiental. 1-24 p. En: Lavín M.F. (ed.), *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*. Monografía N°3, Unión Geofísica Mexicana.
- Valdez-Holguín, J.E. y J.R. Lara-Lara. 1987. Productividad primaria en el Golfo de California efectos del evento El Niño 1982-1983. *Ciencias Marinas* 13(2): 34-50.
- Zaytsev, O., R. Cervantes-Duarte, O. Montante y A. Gallegos-García. 2003. Coastal upwelling activity on the Pacific Shelf of the Baja California Peninsula. *Journal of Oceanography* 59: 489-502.
- Zuria-Jordan, I.L., S. Álvarez-Borrego, E. Santamaría-del Ángel y F.E. Müller-Karger. 1995. Estimación de biomasa fitoplanctónica, derivada de datos de satélite, frente a Baja California Sur. *Ciencias Marinas* 21(3): 265-280.