

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



---

**Maestría en Ciencias  
en Ecología Marina**

---

**Efectos de eventos físicos en la biomasa y producción  
fitoplanctónicas de la región sur del golfo de California en el  
siglo XXI**

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

Presenta:

**Josué Alejandro Gómez Toledo**

Ensenada, Baja California, México  
2019

Tesis defendida por  
**Josué Alejandro Gómez Toledo**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Saúl Álvarez Borrego**  
Director de tesis

**Dr. José Rubén Lara Lara**

**Dr. Silvio Guido Lorenzo Marinone Moschetto**



---

**Dr. Jorge Adrián Rosales Casián**  
Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

---

**Dra. Rufina Hernández Martínez**  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Josué Alejandro Gómez Toledo** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina

## **Efectos de eventos físicos en la biomasa y producción fitoplanctónicas de la región sur del golfo de California en el siglo XXI.**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Saúl Álvarez Borrego  
**Director de tesis**

Se estudiaron las variaciones de la biomasa y productividad fitoplanctónicas en la región de la boca del golfo de California. Esta zona tiene una gran importancia comercial y pesquera, sin embargo, se requiere complementar los estudios sobre la región. Esto supone un problema en cuanto al conocimiento y manejo de la zona. Los datos generados por sensores orbitando en satélites han revolucionado la oceanografía biológica permitiendo muestreos amplios en el sentido espacio-temporal. Los muestreos de este trabajo se realizaron en tres transectos, los cuales atraviesan el golfo de la costa oeste a la costa este. El primero se ubicó de Punta Coyote, BCS, hasta Topolobampo, Sinaloa; el segundo de Cabo Pulmo, BCS, hasta El Dorado, Sinaloa; y el tercero de Cabo San Lucas, BCS, hasta Cabo Corrientes, Jalisco. Se descargaron composiciones mensuales de temperatura superficial del mar (TSM) y de concentración de clorofila *a* ( $Chl_{sat}$ ) obtenidas por el sensor Aqua-MODIS de Julio de 2002 a diciembre de 2017. Los datos de productividad fitoplanctónica (PP) se obtuvieron del sitio "Ocean Productivity" de Oregon State University, para las mismas fechas. El procesamiento de los datos se realizó mediante la programática "SeaDAS v. 7.4" facilitada por la NASA. Los años promedio muestran una clara variación estacional entre "veranos" e "inviernos" y los diagramas Hovmöller y las series de tiempo muestran una clara variación entre los periodos Normales, los eventos cálidos de El Niño y "El Blob" y los eventos de La Niña en los tres transectos y sus respectivas zonas costeras. Los valores más altos de TSM se registraron en la costa de Topolobampo durante el traslape de los eventos de El Niño EP 2015 y "El Blob" (hasta 33°C) mientras que los más bajos se presentaron en la misma costa durante el evento de La Niña en 2008 (hasta 16°C). Los valores más altos de  $Chl_{sat}$  se presentaron durante el evento de La Niña en 2011 (hasta 22.6 mg m<sup>-3</sup>) en la costa de Cabo Corrientes, Jalisco. Mientras que los valores más bajos se presentaron durante el traslape de los eventos de El Niño 2015 y "El Blob" en los tres transectos (hasta 0.1 mg m<sup>-3</sup>). Un comportamiento similar se observó en la PP ya que el valor más elevado se registró en la costa de Cabo Corrientes, Jalisco (hasta 10.2 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) y los valores más bajos (hasta 0.2 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) se registraron en los tres transectos durante el traslape de los eventos de El Niño 2015 y "El Blob". La surgencia intensa en invierno en conjunto con los eventos de La Niña y la fase fría de la Oscilación Decadal del Pacífico son los factores que más repercuten positivamente en la  $Chl_{sat}$  y la PP en la costa este del sur del golfo de California, mientras que durante "verano", los eventos de El Niño, "El Blob" y la fase cálida de la Oscilación Decadal del Pacífico se pueden observar decrementos en la concentración de  $Chl_{sat}$  y PP y estos son más drásticos cuando se presenta un traslape de eventos cálidos como en este caso el evento de El Niño EP 2015 y "El Blob".

**Palabras clave:** Biomasa y productividad fitoplanctónicas, región sur del golfo de California, variaciones intra e inter anuales, ciclos ENSO, "El Blob"

Abstract of the thesis presented by **Josué Alejandro Gómez Toledo** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology.

**Effects of physical events on phytoplankton biomass and productivity in the southern region of the Gulf of California in the XXI century.**

Abstract approved by:

---

Dr. Saúl Álvarez Borrego  
Thesis Director

Variations of phytoplankton biomass and productivity in the mouth region of the Gulf of California were studied. There are significant commercial and fishing activities in this area. However, it is necessary to complement knowledge on this region to better management of this part of the gulf. Data generated by sensors orbiting on satellites have revolutionized biological oceanography allowing broad sampling in the space-time sense. Samplings for this work were carried out on three transects, which cross the gulf from the west coast to the east coast. I located the first from Punta Coyote, BCS, to Topolobampo, Sinaloa; the second from Cabo Pulmo, BCS, to El Dorado, Sinaloa; and the third from Cabo San Lucas, BCS, to Cabo Corrientes, Jalisco. I downloaded monthly sea surface temperature (SST) and chlorophyll a concentration ( $Chl_{sat}$ ) compositions elaborated with data generated by the Aqua-MODIS sensor from July 2002 to December 2017. I obtained phytoplankton productivity (PP) data for the same period from the "Ocean Productivity" site of Oregon State University. I processed the data using the software package "SeaDAS v. 7.4" facilitated by NASA. The average year showed a clear annual cycle, and the Hovmöller diagrams and time series showed clear differences between SST,  $Chl_{sat}$ , and PP during La Niña and those of Normal periods, El Niño, and "The Blob," on the three transects. Highest values of SST occurred in the Topolobampo coastal zone during the overlap of the 2015 El Niño and "The Blob" (up to 33 ° C). Lowest SST occurred on the same coast during the 2008 La Niña event (down to 16 ° C). Highest  $Chl_{sat}$  values occurred during the 2011 La Niña event (up to 22.6 mg m<sup>-3</sup>) in the Cabo Corrientes coastal zone. Lowest  $Chl_{sat}$  values occurred during the overlap of the 2015 El Niño and "The Blob" on the three transects (down to 0.1 mg m<sup>-3</sup>). Primary productivity had a behavior very similar to that of  $Chl_{sat}$  with the highest value in the Cabo Corrientes, Jalisco, coastal zone (up to 10.2 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). The PP lowest values (down to 0.2 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) occurred on the three transects during the overlap of the El Niño 2015 and "The Blob." Intense upwelling in winter simultaneous with La Niña and the cold phase of the Pacific Decadal Oscillation was the factors that most positively impacted  $Chl_{sat}$  and PP in the southern region of the Gulf of California. While El Niño, "The Blob" and the warm phase of the Pacific Decadal Oscillation caused the  $Chl_{sat}$  and PP lowest values.

**Keywords: Phytoplankton biomass and productivity, Gulf of California southern region, intra and interannual variations, ENSO cycles, "The Blob"**

## Dedicatoria

*A mis padres, Wilfrido y Martha Elva.  
A mis hermanos, Agnes Fabiola y Luis Ángel.*

*Por su sacrificio, motivación, dedicación y apoyo incondicional en todas mis metas y sueños. Ustedes son mi ejemplo, nunca bajaron los brazos y siempre estuvieron ahí incluso en la adversidad. Aun cuando la distancia nos separe, no habrá un amor como el que ustedes me han dado.*

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (becario N° 615432) por el apoyo económico para la realización de mis estudios de maestría.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por aceptarme en su programa de posgrado en Ecología Marina.

A la Administración Nacional de la Atmósfera y del Espacio de los Estados Unidos (NASA, por sus siglas en inglés) por poner a disposición de forma gratuita los datos para la realización de este estudio.

A mi director de tesis el Dr. Saúl Álvarez Borrego por su tiempo, pero sobre todo por su paciencia y motivación otorgadas para la realización de este trabajo.

A mis sinodales, el Dr. José Rubén Lara Lara por sus cuestionamientos y fomentar en mí la búsqueda de respuestas y al Dr. Silvio Guido Lorenzo Marinone Moschetto por sus acertados comentarios, opiniones y correcciones, todos ellos necesarios para el debido entendimiento y comprensión de este trabajo.

A los docentes del posgrado, por compartir su conocimiento conmigo y cada uno de mis compañeros, en especial al M.C. Vicente Ferreira Batrina, descanse en paz.

A mis compañeros de generación Roger, Felipe, Tania, Frida, Mily, Abril, Michelle, Aurora, Violeta y Alesa por los momentos compartidos en el transcurso del posgrado.

A Paola, por su cariño y paciencia, por estar ahí siempre para soportar mis desvelos y mis corajes. Te quiero mucho.

A la Dra. María Lucila del Carmen Lares Reyes por todo su apoyo en la resolución de dudas y conflictos. A Elizabeth Avilés por su ayuda en las correcciones y formato de este trabajo y a Elizabeth Farías por su apoyo moral y psicológico en mis momentos de crisis.

A todos aquellos que me hicieron pasar agradables momentos en el transcurso de mi maestría, en especial a los Galácticos: Pepe, Eduardo, Gabo, Luis, Mario, Manuel y Sergio. A las personas que me recibieron y apapacharon en mi llegada a Ensenada: Maricarmen, Lolita, Gabriel, Ricardo e Isabel, no habrían sido momentos tan gratos de no ser por ustedes.

A los mariquitas: Claudia, Gaby, Fernanda y Javier aunque no estemos juntos siempre los llevo en mi corazón, gracias por compartir sus sonrisas conmigo.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	x
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	1
1.1.1 El fitoplancton, biomasa y productividad.....	1
1.1.2 Sensores remotos para estimación de biomasa y productividad primaria.....	2
1.1.3 El Niño, La Niña y “El Blob”.....	3
1.1.3.1 El Niño-Oscilación del Sur.....	3
1.1.3.2 Condiciones normales.....	4
1.1.3.3 El Niño.....	5
1.1.3.4 La Niña.....	5
1.1.3.5 “El Blob”.....	6
1.1.4 El Golfo de California.....	7
1.2 Antecedentes.....	8
1.2.1 El ambiente físico del golfo de California.....	8
1.2.2 Biomasa fitoplanctónica y productividad primaria en el golfo de California.....	9
1.2.3 Uso de sensores satelitales durante ENSO en el golfo de California.....	10
1.3 Justificación.....	11
1.4 Hipótesis.....	13
1.5 Objetivos.....	13
1.5.1 Objetivo general .....	13
1.5.2 Objetivos específico.....	13
<b>Capítulo 2. Metodología.....</b>	<b>14</b>
2.1 Área de estudio.....	14
2.2 Productos satelitales.....	15

2.3	Procesamiento de los datos de las imágenes.....	15
2.4	Análisis estadístico.....	16
<b>Capítulo 3.</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>17</b>
3.1	Años Promedio.....	17
3.2	Variaciones espacio-temporales.....	17
3.2.1	Temperatura superficial del mar.....	17
3.2.2	Clorofila satelital.....	21
3.2.3	Productividad primaria.....	24
3.3	Análisis estadístico.....	27
3.3.1	Zonas costeras.....	27
3.3.2	Variabilidad entre eventos físicos.....	27
3.3.2.1	Temperatura superficial del mar.....	27
3.3.2.2	Clorofila satelital.....	28
3.3.2.3	Productividad primaria.....	29
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Discusión.....</b>	<b>31</b>
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>36</b>
	<b>Literatura citada.....</b>	<b>37</b>

## Lista de figuras

Figura		Página
1	Se muestra el golfo de California con los tres transectos a estudiar en la parte sur del mismo. Uno en la zona norte, otro al centro (boca interior) y otro al sur (boca exterior).....	14
2	Promedios mensuales de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ) Y Chl <sub>sat</sub> ( $\text{mg m}^{-3}$ ) para las seis zonas costeras muestreadas: a) Punta Coyote, b) Topolobampo, c) Cabo Pulmo, d) El Dorado, e) Cabo San Lucas y f) Cabo Corrientes.....	18
3	Diagramas Hovmöller de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ) para los tres transectos: a) Punta Coyote – Topolobampo, b) Cabo Pulmo – El Dorado y c) Cabo San Lucas – Cabo Corrientes. Las líneas coloreadas bajo el eje horizontal representan los eventos de El Niño (rojo), La Niña (azul) y “El Blob” (naranja). Los números de los años están centrados en julio.....	19
4	Series de Tiempo de TSM para el promedio de los primeros 3 pixeles cercanos a las costas de cada transecto: a) Punta Coyote – Topolobampo, b) Cabo Pulmo – El Dorado y c) Cabo San Lucas – Cabo Corrientes. Los valores de la costa este corresponden a la línea punteada, mientras que los de la costa oeste corresponden a la línea continua.....	20
5	Diagramas Hovmöller de Chl <sub>sat</sub> ( $\text{mg m}^{-3}$ ) para los transectos: a) Punta Coyote – Topolobampo, b) Cabo Pulmo – El Dorado y c) Cabo San Lucas – Cabo Corrientes. Las líneas de colores en la parte horizontal indican eventos de El Niño (rojo), La Niña (azul) y “el Blob” (naranja).....	22
6	Series de tiempo de Chl <sub>sat</sub> ( $\text{mg m}^{-3}$ ) para el promedio de los 3 pixeles más cercanos a la costa de cada transecto: a) Punta Coyote – Topolobampo, b) Cabo Pulmo – El Dorado y c) Cabo San Lucas – Cabo Corrientes. Los valores de la costa este corresponden a la línea continua, mientras que los valores de la costa oeste corresponden a la línea punteada.....	23
7	Diagramas Hovmöller de PP ( $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) para los tres transectos: a) Punta Coyote – Topolobampo, b) Cabo Pulmo – El Dorado y c) Cabo San Lucas – Cabo Corrientes. Las líneas abajo coloreadas bajo el eje horizontal representan los eventos de El Niño (rojo), La Niña (azul) y “El Blob” (naranja).....	25
8	Series de tiempo de PP ( $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) para el promedio de los 3 pixeles más cercanos a la costa de cada transecto: a) Punta Coyote – Topolobampo, b) Cabo Pulmo – El Dorado y c) Cabo San Lucas – Cabo Corrientes. Los valores de la costa este corresponden a la línea continua, mientras que los valores de la costa oeste corresponden a la línea punteada.....	26
9	Compuestos mensuales de Chl <sub>sat</sub> obtenidos del sensor Aqua-MODIS mostrando el golfo de California. Los transectos pertenecientes a este trabajo están marcados por las líneas negras, y de izquierda a derecha se representan los meses de octubre-febrero de los años 2007-2008.....	32

## Lista de tablas

Tabla		Página
1	Interpretación del factor de Bayes (Jeffreys, 1967).....	16
2	Resultados del análisis a posteriori para encontrar diferencias con alta credibilidad entre los valores de TSM, $Chl_{sat}$ y PP entre la costa este y la costa oeste para cada transecto. Las diferencias se encuentran resaltadas en negritas.....	27
3	Resultados del ANOVA bayesiano para TSM, $Chl_{sat}$ , y PP para cada una de las costas y para cada evento. Las diferencias se encuentran resaltadas en negritas.....	30

# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1 Introducción

### 1.1.1 El Fitoplancton, biomasa y productividad

En el ambiente acuático se puede encontrar una gran diversidad de plantas con distintos orígenes filogenéticos como son: algas bentónicas, macroalgas, corales, pastos marinos, manglares y fitoplancton, todos ellos con la capacidad de convertir el carbono inorgánico en compuestos orgánicos, con ayuda de energía solar (Taylor 1978; Raven y Richardson 1986; Valiela 1995).

Se conoce como fitoplancton a aquellos microorganismos fotoautótrofos que se encuentran en los ecosistemas acuáticos (Beijerinck, 1890; Reynolds, 2006). Estos organismos son la principal entrada de energía a los ecosistemas marinos, ya que la mayoría de la producción primaria proviene del proceso de fotosíntesis, en el cual el fitoplancton transforma la energía solar luminosa en compuestos orgánicos (Warburg, 1919; Badger *et al.*, 1977; Pérez-Arvizu *et al.* 2013).

El fitoplancton se encuentra representado en su mayoría por ocho grupos: Cyanobacterias, Clorofitas, Dinofitas, Euglenofitas, Haptofitas, Crysofitas, Criptofitas y Bacilariofitas (Taylor, 1978; Raven y Richardson, 1986). Estos grupos producen el 95% de la producción primaria del océano, lo que los convierte en la base de las redes tróficas del ecosistema marino, ya que promueven el flujo de energía en el ecosistema y son fundamentales para diversos ciclos biogeoquímicos (Steeman-Nielsen, 1975; Valiela, 1995; Reynolds, 2006; Pal y Kumar, 2014). Es decir, el fitoplancton es el principal productor primario de la energía química en las zonas pelágicas de los océanos y las aguas continentales (Miller, 2004).

En los ecosistemas acuáticos, el flujo y transferencia de energía hacia niveles tróficos más elevados depende principalmente de los productores primarios. Si la concentración del fitoplancton es elevada, el desarrollo y abundancia de los niveles tróficos más elevados será mayor, ya que al introducir compuestos orgánicos a la cadena trófica afecta positivamente a las grandes comunidades de invertebrados, peces, aves y mamíferos (Valiela, 1995; Álvarez-Borrego, 2007; Uitz *et al.*, 2015).

La biomasa y la producción fitoplanctónicas son de suma importancia en el estudio de los océanos y están en función tanto de factores bióticos (v. g.: pastoreo) como abióticos (luz, nutrientes, temperatura, etc.). Estos a su vez están determinados por las condiciones locales de cada región (Valiela, 1995). Uno de

los fenómenos oceanográficos más importantes y que tiene un efecto muy marcado en la biomasa fitoplanctónica son las surgencias, que se definen como el ascenso de aguas frías y ricas en nutrientes desde capas medias o profundas hacia la superficie. Las surgencias pueden ser ocasionadas por mecanismos distintos como el efecto de Coriolis, el transporte de Ekman o por el efecto de los vientos (Bakun, 1990). Al llegar a la superficie, los nutrientes son aprovechados por el fitoplancton y, por consecuencia, por los siguientes niveles tróficos (Anderson y Lucas, 2008).

Para conocer la fertilidad de un ecosistema marino se toman en cuenta diversas variables entre las que destacan la biomasa fitoplanctónica (Chl) y la producción primaria (PP), mismas que se utilizaron para el desarrollo de este estudio. La productividad fitoplanctónica puede ser medida de diversas maneras: producción de oxígeno disuelto (Gaardner y Gran, 1927); mediante la incorporación de carbono 14 ( $^{14}\text{C}$ ) (Steemann-Nielsen, 1952); por medio de la fluorescencia (Kiefer *et al.*, 1989), o por modelos que utilizan datos de Chl obtenidos mediante sensores remotos (Platt y Gallegos, 1980; Gaxiola-Castro *et al.*, 2010, Beherenfield y Falkowski, 1997).

### **1.1.2 Sensores remotos para estimación de biomasa y productividad primaria**

Los sensores remotos han estimulado el estudio de la oceanografía biológica ya que proporcionan datos rápidos que abarcan grandes regiones oceánicas y que han permitido estudiar de manera eficaz las variaciones de la biomasa fitoplanctónica a través del espacio-tiempo (Müller-Karger *et al.*, 1991; Santamaria-del-Ángel *et al.*, 1994a; Zuria-Jordan *et al.*, 1995)

El sensor mide la radiancia ascendente promedio de la primera profundidad óptica del océano, en canales de intervalos de longitud de onda de la parte visible del espectro. Se considera el límite inferior de la zona eufótica justo donde llega el 1% de la irradiancia incidente en la superficie del mar (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010; y otros citados por ellos). La zona eufótica tiene 4.6 profundidades ópticas, por lo que el sensor mide radiancias ascendentes que provienen de aproximadamente un 22% superior de la zona eufótica (aproximadamente 5-7 m de profundidad) . Estas radiancias se convierten a concentración de clorofila *a* ( $\text{Chl}_{\text{sat}}$ ) mediante el uso de algoritmos empíricos (Kirk, 1994).

El primer satélite equipado con un sensor de color del océano fue el Coastal Zone Color Scanner (CZCS) que fue puesto en órbita en octubre de 1978 y generó datos hasta junio de 1986 (Legeckis, 1978;

Müller-Krager, 1991). Posteriormente se han puesto en órbita muchos otros satélites, pero entre los más conocidos se encuentran: el Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) (Abbot, 1994) que generó datos en el periodo 1997-2010; y el Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS-Aqua) que se puso en órbita en 2002 y que genera información hasta el presente. Mediante el uso de imágenes satelitales de temperatura superficial del mar (TSM) y  $Chl_{sat}$  se pueden observar los efectos que causan fenómenos como la secuencia de eventos de surgencia, ciclos ENSO (El Niño - La Niña) (Santamaria-del-Angel, 1994a; Kharu, 2004) y la onda marina de calor conocida con el apodo "El Blob" (Bond *et al.*, 2015; Mirabal-Gómez, 2015; Ortiz-Ahumada, 2015).

### **1.1.3 El Niño, La Niña y "El Blob"**

#### **1.1.3.1 El Niño-Oscilación del Sur**

El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es uno de los fenómenos climáticos más importantes y más estudiados del planeta. El fenómeno ENSO provoca variaciones a gran escala en las presiones del nivel del mar, las temperaturas de la superficie del mar, las precipitaciones y los vientos. Estas variaciones no se observan solamente en los trópicos, también se pueden observar en otras regiones del mundo (IRI, 2018).

El fenómeno de ENSO es una variación periódica irregular de los vientos y las temperaturas de la superficie del mar sobre el Océano Pacífico oriental tropical, que afecta el clima de gran parte de los trópicos y subtrópicos. La fase de calentamiento de la temperatura del mar se conoce como El Niño y la fase de enfriamiento como La Niña. El Niño está acompañado de alta, y La Niña con baja presión de la superficie del aire en el Pacífico occidental tropical (NOAA, 2012). Los dos períodos duran varios meses cada uno (típicamente ocurren cada pocos años) y sus efectos varían en intensidad (Trenberth *et al.*, 2007).

Los eventos de El Niño-Oscilación del Sur son un fenómeno acoplado océano-atmósfera (Trenberth *et al.*, 2007). El Niño se refiere al componente oceánico de ENSO. La parte de la Oscilación del Sur del término ENSO se refiere al componente atmosférico: el desplazamiento de la presión atmosférica entre el Pacífico central/oriental y el Pacífico occidental. Previo al gran interés por el estudio de ENSO en el siglo XX, los pescadores peruanos notaban las aguas oceánicas más cálidas de la costa sudamericana y

el impacto que la temperatura tenía en sus pesquerías. Llamaron al fenómeno El Niño debido a que los efectos a menudo se veían más prominentemente durante la temporada navideña (Philander, 1990).

### **1.1.3.2 Condiciones normales**

Entre los eventos de El Niño y La Niña se pueden encontrar varios años de condiciones normales (o neutrales), que se conocen como las etapas de transición entre las fases cálidas y frías de ENSO (IRI, 2018). Los periodos normales abarcan cerca de la mitad de todos los eventos registrados, en los cuales la temperatura del mar, la precipitación y los patrones del viento se encuentran cerca de las condiciones promedio (IRI, 2018; NOAA, 2018).

El clima del Pacífico ecuatorial actúa como un "sistema acoplado" debido a que del océano y la atmósfera dependen el uno del otro, ya que, a medida que cambian las condiciones del océano, la atmósfera responde, y viceversa. Los principales indicadores de estos cambios son la presión y la temperatura.

Debido a que los vientos de niveles bajos se mueven hacia las aguas cálidas de la superficie en los trópicos, la diferencia en la temperatura de la superficial del mar (TSM) entre el Pacífico oriental más frío y el Pacífico occidental más cálido refuerza los vientos alisios del este en condiciones neutrales. Este gradiente de TSM este-oeste induce fuertes vientos del este, que fuerzan el agua hacia el oeste y causan una mayor surgencia de agua más fría en el este. Las surgencias de agua fría también aumentan el gradiente de TSM este-oeste, reforzando de nuevo los fuertes vientos alisios del este a través del Pacífico. El océano y la atmósfera crean un sistema acoplado que continúa este proceso hasta que se interrumpe.

Durante años neutros la presión atmosférica es baja en el Pacífico tropical occidental más cálido y relativamente más alta en el Pacífico tropical central/oriental. El aire se mueve naturalmente de áreas de alta presión a baja presión, por lo que esta diferencia de presión mueve los vientos alisios, desde la costa de América del Sur hacia el Océano Pacífico occidental. Durante las condiciones neutrales, en el pacífico oriental, las surgencias ocurren a lo largo del ecuador y en las costas de América del sur. Dado que las aguas de surgencia se originan en capas más profundas, son frías y ricas en nutrientes. Cuando el agua superficial desplazada llega a las costas del pacífico occidental, el margen continental supone una barrera

física dando paso a un apilamiento de las masas de agua. Como consecuencia, el nivel medio del mar aumenta alrededor de medio metro en las costas de Indonesia con respecto a las costas de Ecuador.

### **1.1.3.3 El Niño**

Se conoce como El Niño a la fase cálida del ciclo ENSO y se vincula a un calentamiento periódico de la TSM en el Pacífico ecuatorial central y central-oriental. Este fenómeno trae consigo cambios ambientales alrededor del planeta como son: el aumento de lluvias en las zonas intertropicales de la costa del Pacífico oriental y central-oriental, mientras que en la parte del Pacífico occidental las lluvias se ven disminuidas, con lo que se han reportado diversas épocas de sequía durante la temporada en la que prevalece la fase cálida de ENSO (NOAA, 2018).

Las perturbaciones en el océano causan cambios en los patrones principales de temperatura y afectan los vientos en el sistema acoplado. Durante El Niño, los vientos alisios se debilitan e incluso, en algunas condiciones pueden llegar a invertirse. Dependiendo de su intensidad y duración pueden desencadenar onda de Kelvin de cientos de kilómetros de ancho que se encuentra entre los 100 y 200 m por debajo de la superficie del mar (IRI, 2018).

Esta onda de Kelvin se desplaza desde la parte occidental del Pacífico hasta la parte oriental, ocasionando un aumento del nivel del mar y el hundimiento de la termoclina en el este, así como el hundimiento del nivel del mar y la elevación de la termoclina en el oeste del océano Pacífico (NOAA, 2018). La onda de Kelvin queda retenida en la costa y generalmente es transportada hacia el norte (Santamaría-del-Ángel, 1994). Con el hundimiento de la termoclina en el este las sugerencias con aguas frías y ricas en nutrientes se ven reducidas, y por tanto, hay un aumento en la TSM y una disminución en el aporte de nutrientes que repercute en una menor cantidad de biomasa fitoplanctónica, lo que conlleva a una menor productividad primaria, afectando a los diversos niveles tróficos (NOAA, 2018).

### **1.1.3.4 La Niña**

Se le conoce como La Niña a la contraparte de El Niño y por lo tanto, a la fase fría de ENSO. Se caracteriza por una presión del aire mayor al promedio y caracterizada por temperaturas del agua por debajo del promedio en el Pacífico ecuatorial oriental y temperaturas por encima el promedio en el Pacífico

occidental y con ello las precipitaciones en esta zona. Durante esta fase los vientos alisios son más intensos de lo normal extendiendo masas de agua fría a lo largo el Pacífico ecuatorial oriental y central llevando el agua hacia el oeste, elevando la termoclina en el este y generando su hundimiento en la parte occidental (IRI, 2018; NOAA, 2018).

Con lo anterior, aumenta la frecuencia e intensidad de las surgencias en la parte este del Pacífico debido al enfriamiento de la superficie del mar, lo que se traduce en un mayor aporte de nutrientes a la zona eufótica y por tanto un aumento en la biomasa fitoplanctónica y productividad primaria, así como a los niveles superiores de la cadena trófica.

#### **1.1.3.5 “El Blob”**

“El Blob”, compuesto de agua entre 1 y 4°C más caliente de lo usual ha tenido tres fases: “El Blob” 1.0 que apareció en la costa sur de Alaska en otoño del 2013 y persistió por cerca de ocho meses. La masa de agua de aproximadamente 1600-2000km de ancho y 60-100m de profundidad pareció haberse mantenido por el patrón climático cíclico y creó una cresta masiva de presión atmosférica alta que dominó el clima sobre el oeste de Norteamérica. La cresta desvió los vientos que usualmente remueven aguas frías y profundas y empujan agua y aire fríos desde latitudes altas hacia alrededor de la costa del Pacífico (Bond *et al.*, 2015; Kintisch, 2015).

Durante la primavera de 2014, después de que se disipara la presión alta, apareció “El Blob” 2.0 con parches de agua caliente extendidos a lo largo de la costa desde Alaska hasta el centro de México. Al parecer, los vientos tropicales fueron conductores clave. “El Blob” 3.0 apareció en la primavera de 2015 como un depósito caliente que se dividió en dos parches distintos, uno frente al estado de Washington y el otro frente a Baja California en México aún no se conocen las razones de esta división (Kintisch, 2015).

“El Blob” trajo consigo diversas afectaciones al medio biológico en el sistema de la Corriente de California, que es un sistema en el cual los florecimientos algales nocivos (FANs) no son muy comunes. Doughton (2016) reportó un largo intervalo de tiempo en el que los FANs coincidieron con las anomalías de “El Blob”, los cuales causaron diversas enfermedades y el colapso de varias pesquerías importantes (Cavole *et al.*, 2016).

La menor disponibilidad de fitoplancton y las elevadas TSM causaron variaciones en la abundancia, composición específica, así como cambios en la distribución en las comunidades zooplancton e invertebrados alrededor de la costa oeste norteamericana (Cavole *et al.*, 2016). También, con las anomalías de TSM diversos peces pelágicos expandieron o redujeron sus rangos geográficos cambiando su estructura poblacional y/o incorporando presas alternativas a sus dietas p.ej. Milstein (2015) y Hendricks (2015) durante el transcurso de “El Blob” reportaron capturas cercanas a la costa de especies pelágicas como atún, jurel, dorado, marlín, tiburón martillo, entre otros.

#### **1.1.4 El Golfo de California**

El golfo de California es una cuenca alargada de aproximadamente 1,200 km de longitud que se ubica entre la península de Baja California y los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit, colindando en el norte con la desembocadura del río Colorado y al sur con el Océano Pacífico (Castro, 2000). Su anchura varía entre los 80 y los 209 km, mientras que en la boca abarca alrededor de 220 km de ancho desde cabo San Lucas, Baja California Sur, hasta cabo Corrientes, Jalisco (Álvarez-Borrego, 1983). Debido al clima árido de Sonora, el norte de Sinaloa y la península de Baja California, el clima del golfo de California tiene una mayor influencia continental que oceánica ya que se encuentra aislado del Océano Pacífico (Álvarez-Borrego, 1983).

Debido a la elevada concentración de los nutrientes en profundidades relativamente someras, por efecto de fenómenos como las surgencias estas aguas ascienden a la superficie con un gasto relativamente pequeño de energía y fertilizan la capa de mezcla convirtiendo al golfo de California en uno de los ecosistemas más productivos del planeta (Zeitchel, 1969; Escalante-Almazán *et al.*, 2013). La productividad del golfo es tres veces mayor que en el océano Atlántico y el océano Pacífico en latitudes similares (Zeitchel, 1969), pudiéndose comparar incluso con zonas altamente productivas como la Corriente de California y la corriente de Humboldt (Álvarez-Borrego, 2012a). Lo anterior se debe a que el golfo posee tres formas naturales de fertilización: intercambio de agua con el océano Pacífico; surgencias costeras en la parte oriental y mezcla por corrientes de marea (Alvarez-Borrego, 2012b).

La estacionalidad del golfo de California se encuentra bien definida y se pueden distinguir dos épocas: invierno (diciembre-mayo) y verano (julio-octubre), también se incluyen épocas de transición en junio y noviembre (Roden y Groves, 1959; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2004). Esta estacionalidad es la principal fuente de variación en la PP del golfo (Kahru *et al.*, 2004) ya que durante la época de invierno

se presentan surgencias que ocasionan un aumento de la biomasa fitoplanctónica, esto se debe a que durante esta época predominan los vientos del noroeste (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Gaxiola-Castro *et al.*, 1995). Durante el verano también se presentan algunas surgencias a lo largo de la costa oeste, pero su efecto es muy débil en la biomasa fitoplanctónica debido a la estratificación originada por las altas temperaturas (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994b).

Con base en las diferentes condiciones oceanográficas, físicas y biológicas, el golfo de California ha sido dividido en varias regiones (Gilbert y Allen, 1943; Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994; Gaxiola-Castro *et al.*, 1995; Arias-Aréchiga, 1998; Valdéz- Holguín *et al.*, 1999; Hidalgo-González y Alvarez-Borrego, 2001; Kahru *et al.*, 2004;), aunque generalmente se divide en tres zonas: norte, centro y sur (Roden y Groves, 1959).

## **1.2 Antecedentes**

### **1.2.1 El ambiente físico del golfo de California**

Los efectos del océano Pacífico y el estrés del viento son importantes en el sur del golfo, donde producen una fluctuación anual. Durante el invierno la fuerza del viento del noroeste produce una circulación significativa en el norte y transporta corrientes superficiales en bloque hacia el sur (Marinone, 2000). Los flujos de calor y el agua dulce no producen un efecto significativo en la circulación media y estacional. En otras palabras, la circulación termohalina es muy débil en comparación con la producida por el viento, las mareas y la influencia del océano Pacífico. La entrada de agua hacia el golfo se da en las capas más profundas (de 200 a 600 m) mientras que la salida de agua hacia el Pacífico sucede en las capas superficiales (arriba de los 200 m). Esta circulación es anticiclónica durante el invierno mientras que en verano es ciclónica (Bray, 1988; Lavin y Marinone, 2003).

La región sur del golfo presenta la convergencia de dos diferentes masas de agua superficiales: el Agua del Golfo de California; y el Agua Superficial del Pacífico Tropical Oriental. Además hay una masa de agua subsuperficial, el Agua Subsuperficial Subtropical. Estas masas de agua determinan los procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en la zona eufótica de dicha región, aunado al gran forzamiento dinámico que ejerce el océano Pacífico sobre la zona (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Torres-Orozco, 1993). Esta dinámica ocasiona que en la entrada del golfo, en verano, la zona eufótica

presente bajas concentraciones de nutrientes y alta temperatura, que generan condiciones oligotróficas en la región sur del golfo, con bajos valores de producción primaria (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991).

Por otro lado, se han llevado a cabo pocos trabajos de campo en la región sur del golfo y de acuerdo a Lara-Lara *et al.* (2008) la mayoría de los resultados son el producto de la observación de cruceros con cobertura espacial y temporal limitada. Sin embargo, los resultados se complementan con observaciones satelitales que permiten describir con más detalle las variaciones espacio-temporales de las concentraciones de clorofila, con altos valores asociados a eventos de surgencia u otros factores que afectan el suministro de nutrientes en la columna de agua, y bajos valores asociados a la influencia de El Niño (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994a; Kahru *et al.*, 2004; Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín, 2007).

### **1.2.2 Biomasa fitoplanctónica y productividad primaria en el golfo de California**

El golfo de California, a pesar de haber sido sugerida como un área altamente productiva por Gilbert y Allen (1943) a partir de la colecta y los conteos de muestras de fitoplancton en esa zona, fue prácticamente ignorada hasta entrada la década de 1960. Roden (1958) afirmó que las surgencias basadas en los conteos de fitoplancton publicados casi una década antes aunada a la mezcla por estrés del viento y la convección de invierno en ciertas áreas del golfo podrían resultar en una alta productividad.

Zeitzschel (1969) realizó mediciones in situ de PP en 31 estaciones mediante variaciones del método de  $^{14}\text{C}$  en el golfo de California a lo largo de seis cruceros entre los años 1960 y 1968. A partir de las cuales reportó que el golfo de California es un área con un alto rango de PP y que esto se podría deber a las surgencias estacionales y una mezcla de la columna de agua debido al estrés del viento en conjunto con una termoclina muy somera. Encontró los valores más altos de PP en la región norte del golfo, especialmente en el canal de Ballenas, mientras que en la parte sur los valores de PP disminuyeron considerablemente. Concluyó que la PP del GC es comparable con áreas de gran productividad como la Bahía de Bengala, la zona de surgencias de Baja California o el norte de África y llega a ser de 2 a 3 veces mayor que en otras regiones de los océanos Pacífico y Atlántico ubicadas en latitudes similares.

Álvarez-Borrego y Lara-Lara (1991) reportaron que los altos rangos de productividad del golfo de California se deben a sus características hidrográficas, ya que aguas con bajos niveles de oxígeno y altos niveles de nutrientes se encuentran en la zona somera. Por lo que la energía necesaria para el aporte de

nutrientes a la zona eufótica es relativamente poca. En general, la circulación del golfo está caracterizada por la entrada de agua profunda (fría y rica en nutrientes) y la salida de agua superficial. Las surgencias ocurren en la costa este durante el invierno y primavera debido a los vientos del noroeste y por contraparte en la costa oeste durante el verano con los vientos del sureste. Una fuerte mezcla por corriente de mareas en el interior y al norte del golfo causa bajas temperaturas en la superficie en la región de canal de Ballenas. También reportan que no hay una disminución de del PP en el golfo de California durante los eventos de El Niño debido a la alta permanencia de nutrientes, no así en la parte más sureña en donde sí se notaron algunos efectos posiblemente relacionados a una alta influencia del Océano Pacífico.

Gaxiola-Castro *et al.* (1994) describieron la distribución espacial de Chl-*a* y la productividad primaria en relación a la estructura física durante el invierno en el golfo de California. Los muestreos se realizaron con ayuda de un CTD a través de 60 estaciones distribuidas en 235 millas náuticas entre el 16 de febrero y el 3 de marzo de 1990. Realizaron colectas para Chl-*a* cada 20 millas náuticas y en el caso de PP las muestras se colectaron diariamente a las profundidades correspondientes a 90, 45, 24 y 1% de irradiancia incidente. Establecieron que se pueden distinguir claramente tres zonas. Una con turbulencias altas muy cercana a las islas, una segunda zona con turbulencias moderadas en la parte central del golfo y una tercera zona en la parte sur del golfo que presenta una alta estratificación. La zona entre Ángel de la Guarda e Isla Tiburón presentó la menor estratificación, la cual se asocia con bajas temperaturas superficiales, alta concentración de Chl-*a*, mientras que en las partes centrales y sureñas del golfo reportan valores altos de Chl-*a* y PP debido a la turbulencia y estratificación moderada ya que permiten el crecimiento de fitoplancton.

### **1.2.3 Uso de sensores satelitales durante ENSO en el golfo de California**

Santamaría-del-Ángel *et al.*, (1994b) documentaron el evento de El Niño 1982-1984 para el golfo de California utilizando compuestos mensuales del sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS) con el que generaron series de tiempo para 33 locaciones durante 8 años a lo largo del golfo . Reportaron que generalmente los efectos en la concentración de Chl y PP no eran claros, ya que la Chl y PP eran bajas en la boca mientras que en la zona central y norte del golfo eran altos. Concluyen que El Niño causó concentraciones bajas de pigmentos en la zona de entrada del golfo debido a ma mezcla vertical débil, mientras que las locaciones en el centro y norte del golfo mostraron un debil efecto de El Niño. El Canal

de Ballenas tuvo un incremento de concentración de los pigmentos durante 1983 y un decremento en 1984 debido a que la turbulencia moderada promovió el crecimiento del fitoplancton.

Kharu *et al.*, (2004) generaron series de tiempo de  $Chl_{sat}$  y PP en el golfo de California mediante datos de satélite obtenidos de OCTS, SeaWiFS, MODIS, A VHRR y en modelo de PP VGPM. La serie de tiempo de 6 años (1997-2003) mostró una variación en múltiples escalas en las que dominó el ciclo anual. Los máximos de  $Chl_{sat}$  se obtuvieron durante la primavera. Destacaron que la variabilidad interanual fue dominada por el evento de El Niño 1997-1998 y la consiguiente La Niña, en los cuales el primero causó una disminución de PP entre el 30-40% en la parte sur del golfo, mientras que en la parte central y norte los efectos fueron menos evidentes.

Escalante *et al.* (2013) describieron las variaciones de TSM,  $Chl_{sat}$  y PP mediante datos obtenidos del sensor SeaWiFS de 1997-2010. Reportaron que los eventos de El Niño y La Niña tienen efectos más evidentes en la boca del golfo, en donde registraron las temperaturas más elevadas, mientras que las temperaturas más bajas se reportaron en la región de grandes islas y la cuenca de Guaymas. En las cuales los efectos de El Niño y La Niña no fueron significativos. En la zona de la boca las condiciones de El Niño redujeron significativamente el promedio de  $Chl_{sat}$  con respecto a las condiciones normales, mientras que La Niña tuvo un efecto inverso.

Burgos-Othón (2018) caracterizó la variabilidad espacio-temporal de la biomasa y producción fitoplanctónicas en la parte central del golfo de California mediante tres transectos que atravesaban el golfo de California desde la costa de Baja California hasta la costa de Sonora. Con datos de TSM y  $Chl_{sat}$  obtenidos del sensor Aqua-MODIS y datos de PP del sensor VGPM, generó series de tiempo de julio de 2002 a diciembre de 2017. Concluyó que la parte central del golfo muestra una clara variación anual con una estacionalidad clara entre “inviernos” y “veranos”. El Niño y “El Blob” causaron disminución en los valores de  $Chl_{sat}$  y PP sin embargo, no hubo un cambio a condiciones oligotróficas durante el invierno, sino un cambio taxonómico en la composición de la comunidad fitoplanctónica.

### **1.3 Justificación**

De acuerdo con el reporte de CONAPESCA emitido en el 2014, la región sur del golfo de California abarca aproximadamente el 7% del litoral pesquero nacional (1,198 km) y en él laboran alrededor de 64 mil 607

pescadores. Las estadísticas señalan que la actividad pesquera de la zona aporta el 32.34% del tonelaje total nacional (el cual ronda el millón 700 mil toneladas) y por lo tanto, se traduce en un valor de \$8,625 millones 90 mil pesos (11,067 millones 950 mil 500 pesos si se incluye la producción acuícola). El esfuerzo pesquero de la región está principalmente dirigido a la captura de sardina (202,141 t = 36% de la producción pesquera nacional), túnidos (104,457 t = 58% de la producción nacional), almeja (17,485 = 67% de la producción nacional), camarón (87,262t = 55% de la producción nacional) y el calamar (29,560 t = 76% de la producción nacional).

Es importante mencionar que en cuanto a la captura de túnidos, el estado de Sinaloa contribuye con el 56% del total nacional mientras que el otro 2% es capturado en costas de Baja California sur y Nayarit. Del mismo modo, éste estado lidera las capturas de camarón de la zona sur del golfo de California abarcando el 42% del tonelaje total nacional. Además, Sinaloa es el segundo mayor productor de sardina a nivel nacional con capturas superiores a las 560 mil toneladas lo que representa el 19% de las capturas de esta especie a nivel nacional (CONAPESCA, 2014).

De esta manera Sinaloa ocupa el primer lugar nacional en cuanto a valor económico y el segundo estado con mayor volumen de captura. Por su parte, el estado de Baja California sur ocupa el tercer lugar nacional tanto en valor económico como en volumen de pesca y es líder nacional en captura de almeja (14,131 t) y calamar (25,723 t) y representan el 50 y 66% de las capturas a nivel nacional, respectivamente. Este estado también ocupa el cuarto lugar en capturas de sardina con 94,703 t que representan 17% de la producción nacional (CONAPESCA, 2014).

El golfo de California es reconocido por su alta diversidad y productividad (Brusca *et al.*, 2010). En la región sur del golfo, específicamente en la costa norte de Sinaloa, la surgencia costera intensa que se desarrolla en invierno y primavera representa un fenómeno que sostiene importantes pesquerías y el desarrollo de una zona de alimentación para varias especies como tortugas marinas, mamíferos marinos y aves (Zavala-Norzagaray *et al.*, 2008).

Los eventos asociados a ENSO y “El Blob” pueden causar variaciones en la distribución y reproducción tanto de especies carismáticas como el lobo marino y el pelicano café, como en especies de importancia comercial como el atún, la sardina y el calamar gigante (Rui *et al.*, 2013; Cavole *et al.*, 2016).

## 1.4 Hipótesis

Los valores de  $Chl_{sat}$  y PP son significativamente mayores en las partes cercanas a la costa este que en la costa oeste de la parte sur del golfo de California debido a las surgencias intensas en la primera.

Los valores de  $Chl_{sat}$  y PP disminuyen significativamente durante los eventos El Niño y “El Blob”.

Los valores de  $Chl_{sat}$  y PP aumentan significativamente durante los eventos La Niña.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo general

Determinar los efectos de eventos físicos en la biomasa y producción fitoplanctónicas de la región sur del golfo de California en el siglo XXI, utilizando series de tiempo relativamente largas de 2002 a 2017.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- Analizar series de tiempo de 2002 a 2017 de TSM,  $Chl_{sat}$  y PP para tres transectos en la zona de estudio.
- Comparar la variabilidad espacial de TSM,  $Chl_{sat}$  y PP de las zonas más cercanas a las costas este y oeste de la parte sur del golfo de California.
- Determinar los efectos de eventos El Niño, La Niña y “El Blob” en la TSM,  $Chl_{sat}$  y PP de la parte sur del golfo de California.

## Capítulo 2. Metodología

### 2.1 Área de estudio

La zona de estudio fué la parte sur del golfo de California desde Punta Coyote, BCS hasta Cabo San Lucas, BCS en la costa oeste y desde Topolobampo, Sinaloa hasta Cabo Corrientes, Jalisco. El muestreo se realizó mediante tres transectos perpendiculares a las líneas de costa (Fig. 1). Uno al norte desde punta Coyote, Baja California Sur ( $24.712^{\circ}\text{N}$  y  $-110.687^{\circ}\text{O}$ ) a Topolobampo, Sinaloa ( $25.56^{\circ}\text{N}$  y  $-109.161^{\circ}\text{O}$ ), otro al centro, particularmente en la “boca interior” desde cabo Pulmo, Baja California Sur ( $23.453^{\circ}\text{N}$  y  $-109.894^{\circ}\text{O}$ ) hasta El Dorado, Sin. ( $24.238^{\circ}\text{N}$  y  $-107.412^{\circ}\text{O}$ ) y en la zona sur mejor conocida como la “boca exterior” desde Cabo San Lucas, BCS ( $22.875^{\circ}\text{N}$  y  $-109.894^{\circ}\text{O}$ ) a Cabo Corrientes, Jal. ( $20.411^{\circ}\text{N}$  y  $-105.700^{\circ}\text{O}$ ).



**Figura 1.** Se muestra la parte sur del Golfo de California con los tres transectos estudiados. Uno en la zona norte (Punta Coyote, BCS – Topolobampo, Sin.), otro al centro en la zona conocida como “la boca interior” (Cabo Pulmo, BCS – El Dorado, Sin.) y otro al sur en la zona conocida como “la boca exterior” (Cabo San Lucas, BCS – Cabo Corrientes, Jal.).

## 2.2 Productos Satelitales

Se generaron series de tiempo a partir de composiciones mensuales de TSM y  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer que navega a bordo del satélite Aqua (Earth Observing System PM) (Aqua-MODIS). Los datos abarcaron de julio de 2002 a diciembre de 2017. Estos datos fueron descargados de la página de la NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>), con una resolución de  $9 \times 9 \text{ km}^2$ , nivel 3 de procesamiento (L3), el cual tiene información en bytes-formato valor, posición geográfica y filtros para remover la información no útil. Los datos de TSM corresponden a la radiación de  $11 \mu\text{m}$  en periodo diurno y se expresan en  $^{\circ}\text{C}$ . Los datos de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  se expresan en  $\text{mg m}^{-3}$ .

Los datos de PP se descargaron para las mismas fechas de la página de la Universidad Estatal de Oregón (<http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity>) con formato .hdr (Hierarchical Data Format) y con una resolución de  $18 \times 18 \text{ km}^2$ .

Para distinguir los eventos El Niño, La Niña, y “El Blob” se utilizó el índice multivariado de los eventos ENSO, conocido como MEI por sus siglas en inglés, de la página de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA por sus siglas en inglés) (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>) y las imágenes de anomalías de TSM del océano Pacífico de NOAA (<http://www.ospo.noaa.gov>).

## 2.3 Procesamiento de los datos de las imágenes

Las imágenes satelitales se procesaron mediante el software de la NASA “SeaWiFS Data Analysis System” (SeaDAS 7.4) (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/>).

Se extrajo un perfil para cada variable (TSM,  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  y PP) y para cada mes, para cada transecto abarcando el área de estudio de costa a costa, con el fin de describir la variación espacial y temporal. Para la zona costera se extrajo un promedio de los primeros tres píxeles ( $27 \text{ km}$ ) en el caso de la TSM y  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  y de los primeros 2 píxeles ( $36 \text{ km}$ ) en el caso de la PP para cada una de las 6 zonas costeras. Con los datos obtenidos se realizaron diagramas Hovmöller mediante la programática ODV V. 4.0 para cada transecto y series de tiempo con ayuda de la programática Microsoft Excel 2015 para cada zona costera de cada una

de las variables, así como los años promedio de TSM y  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  para cada una de las zonas costeras muestreadas en este trabajo.

## 2.4 Análisis estadístico

Los datos obtenidos para el promedio de los primeros tres píxeles de TSM y  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  (27 km) y los primeros dos píxeles de PP (36 km) de cada una de las seis zonas costeras muestreadas no cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Por lo que se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de tipo bayesiano con ayuda del software JASP 0.8.6.0 para conocer si existen diferencias significativas entre las zonas costeras muestreadas. El objetivo del factor de Bayes ( $B$ ) es cuantificar el soporte para un modelo sobre otro, independientemente de si estos modelos son correctos (ecuación 1)

$$B = \frac{P(x|M_1)}{P(x|M_2)} \quad (1)$$

donde  $P(x/M_i)$  se denomina verosimilitud marginal o verosimilitud integrada.

Con base al valor  $B$  obtenido se puede categorizar la situación más probable a ocurrir (Tabla 1). Se realizaron los ANOVAS bayesianos y análisis a posteriori para comparar las variables TSM y  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  de los cuadrantes cercanos a las costas de cada uno de los transectos. Las bases de datos se dividieron para comparar los valores de estas mismas variables durante los periodos El Niño, La Niña, “El Blob” y neutrales, y se comparó si existen diferencias longitudinalmente entre los cuadrantes (Jeffreys 1967).

**Tabla 1.** Interpretación del factor de Bayes (Jeffreys, 1967).

$B$	Fuerza de la evidencia a favor de $M1$
<1	Negativa (apoya $M2$ )
1.00-3.00	Escasa
3.00-10.00	Sustancial
10.00-30.00	Fuerte
30.00-100.00	Muy fuerte
>100.00	Decisiva

## Capítulo 3. Resultados

---

### 3.1 Años Promedio

La TSM en el sur del golfo de California presentó una oscilación anual muy marcada, para las seis zonas costeras ya que mostraron intervalos muy similares y se observa una clara variación estacional (20.3 a 31.6 °C), con mínimos de enero a marzo y máximos de agosto a octubre (Fig. 2). En el caso de la  $Chl_{sat}$  el comportamiento fue más variable entre la costa este y la costa oeste del golfo ya que el intervalo de la primera fue de 0.25 a 5.1 mg m<sup>-3</sup> con máximos en marzo y abril y mínimos en julio. En contraparte, la zona costera oriental presentó intervalos más bajos (0.21 a 1.53 mg m<sup>-3</sup>) con máximos en enero-febrero para Punta Coyote y Cabo Pulmo, mientras que la zona costera de Cabo San Lucas presentó un máximo en junio. En cuanto a los valores mínimos, estos se presentaron durante octubre en las tres zonas costeras de BCS.

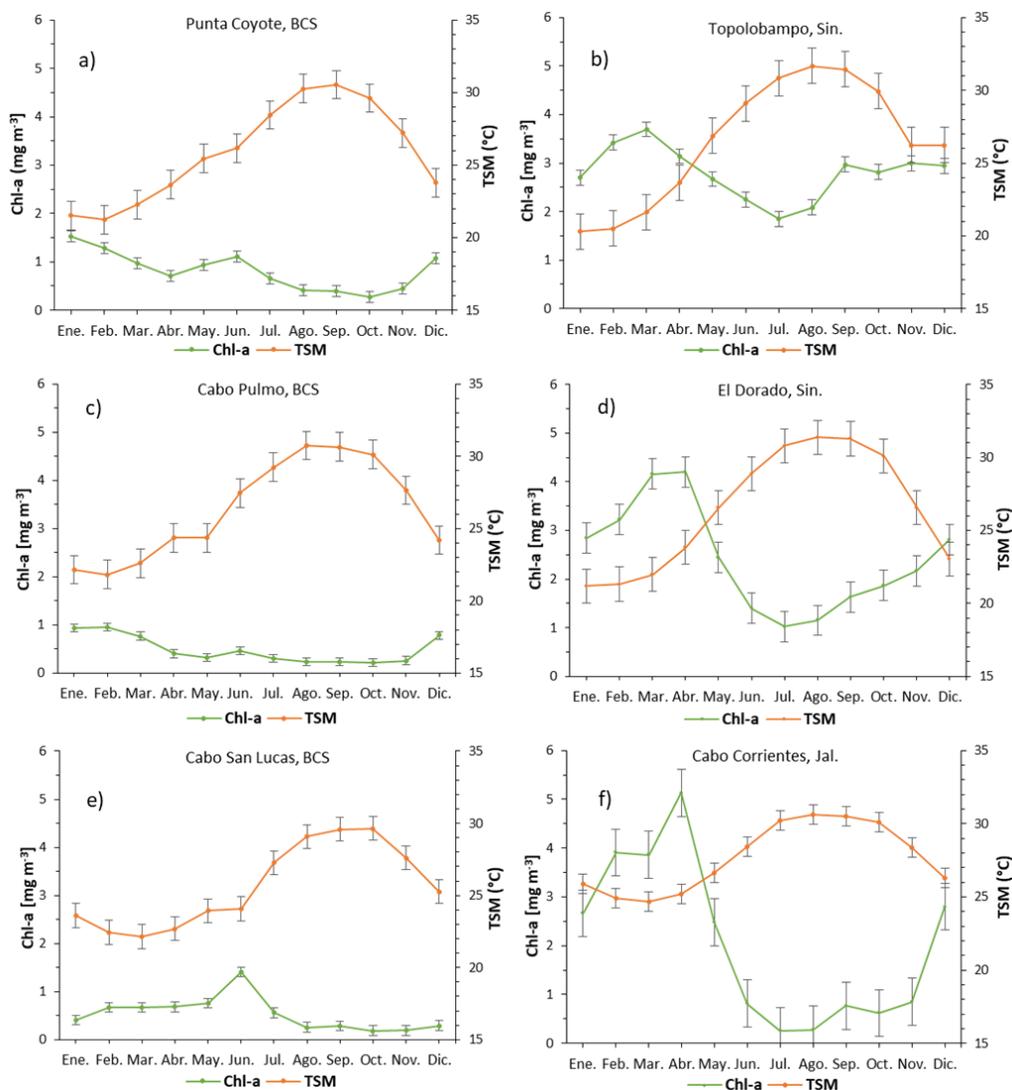
### 3.2 Variaciones espacio-temporales

#### 3.2.1 Temperatura superficial del mar

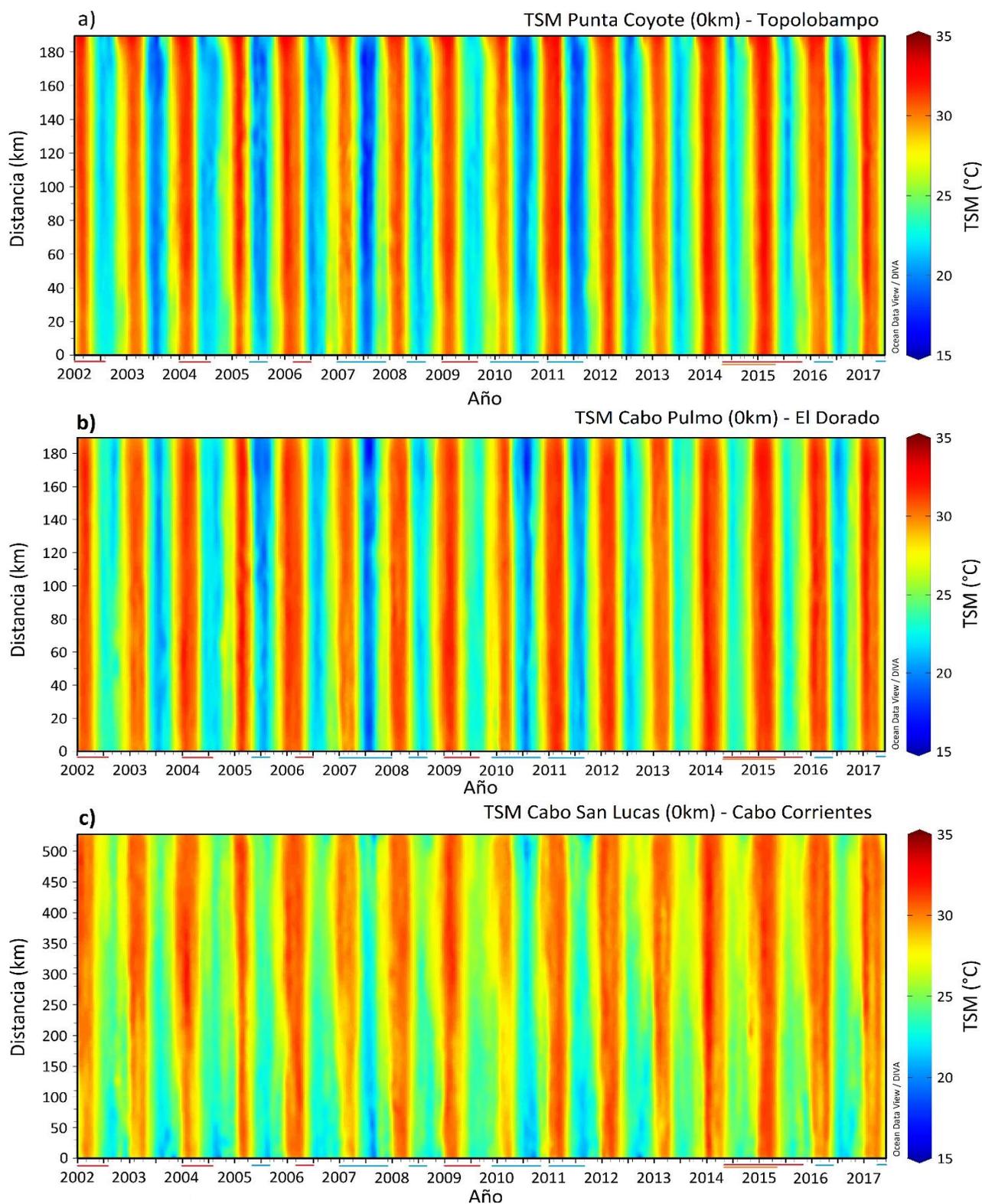
Durante el periodo de muestreo se presentó un intervalo de temperatura de 33.09 – 16.8 °C para los tres transectos muestreados en los cuales se observa una marcada estacionalidad entre los “veranos” e “inviernos” (Fig. 3). El transecto Punta Coyote - Topolobampo (PC-T) fue el que presentó mayores variaciones en la temperatura a lo largo del periodo de muestreo (presentó la temperatura más alta y más baja de los 3 transectos muestreados) (Fig. 3a). En la mayoría de los casos en este transecto las TSMs más altas se registraron en las zonas cercanas a la costa de T (hasta 32.5 °C) (Fig. 4) que también presentó temperaturas más altas y más bajas que la costa de PC (hasta 31.9 °C) (Fig. 4a). Para ambas costas, los valores de temperatura más elevados se presentaron durante el verano de 2015, mientras que los más bajos se presentaron durante el invierno de 2008 en el cual la costa de Topolobampo presentó valores de hasta 17.3 °C, mientras que en la costa de PC el valor más bajo fue 19.3 °C.

El transecto de Cabo Pulmo – El Dorado (CP-ED) zona mejor conocida como “la boca interior” presentó un intervalo de TSM entre los 32.6 y 17.34 °C. En este transecto las temperaturas más elevadas se presentaron en la costa de ED (Fig. 4b) (hasta 32.3 °C), mientras que las menos elevadas se obtuvieron

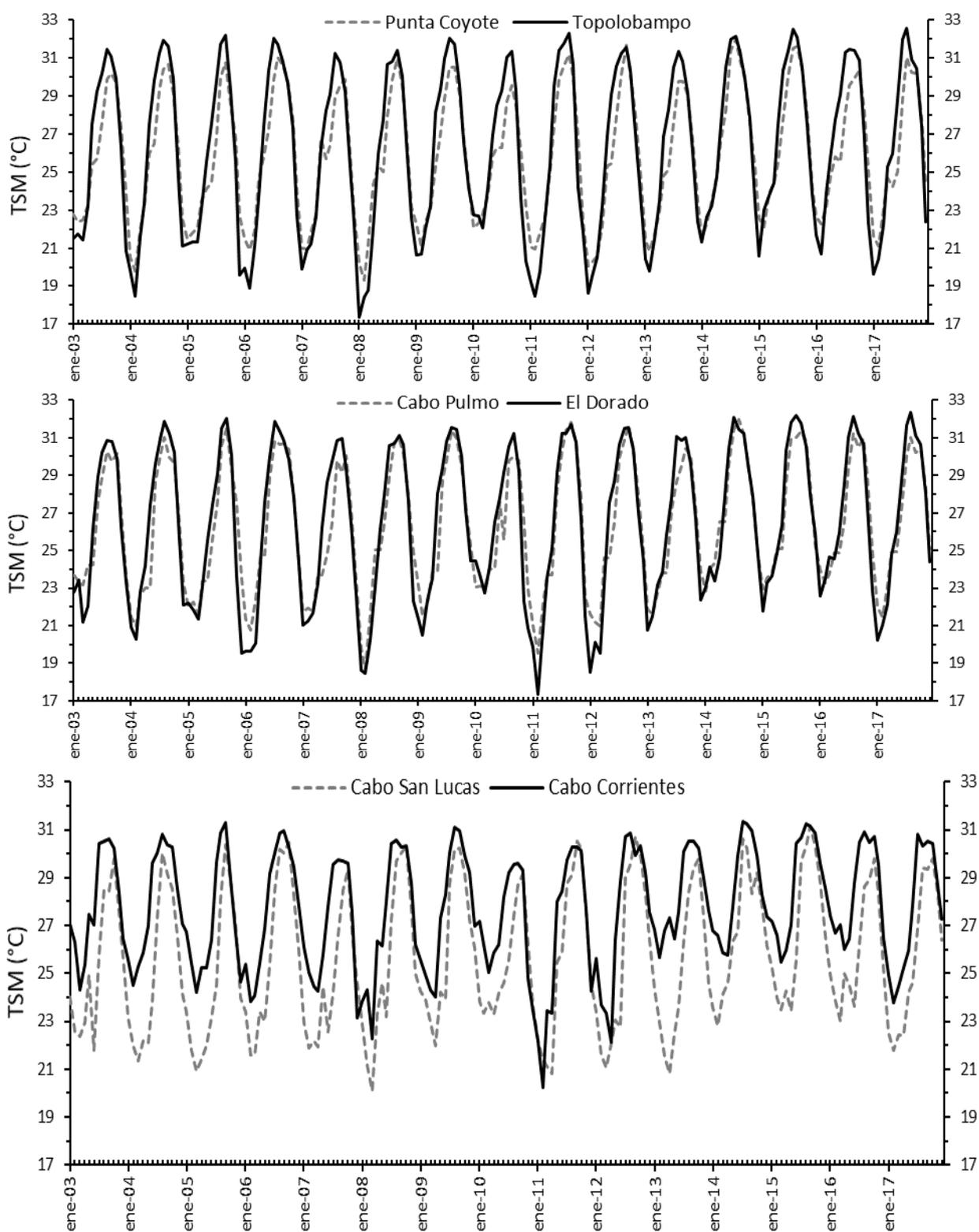
en la costa de CP (hasta 32 °C). En este transecto las temperaturas más cálidas se registraron durante los veranos de 2014-2017 (Fig. 3b) siendo el año 2014 el que presentó la temperatura más alta de las altas y la temperatura más alta de las bajas (32.6 - 22.55 °C). El año más frío en este transecto fue el año 2008 con un intervalo de temperatura entre los 31.26 y 17.01 °C. El transecto ubicado en la zona conocida como “la boca exterior” que abarca desde Cabo San Lucas, BCS a Cabo Corrientes (CSL-CC) presentó la menor variación de temperatura del estudio ya que el intervalo de temperatura de 32.4 °C - 18.8 °C (Fig. 3c) y, a diferencia de los transectos anteriores, las temperaturas más elevadas no se registraron en la zona costera. En este caso las temperaturas más bajas se registraron en la costa de CSL (hasta 20.1 °C), mientras que las más altas se presentaron en CC (hasta 31.32 °C) (Fig. 4c). Los años más cálidos se registraron durante 2014 y 2017, siendo el 2014 el año más cálido con un intervalo de temperatura de 32.3 – 22.5 °C, mientras que el año con las TSM más baja fue 2008 con un intervalo de temperatura de 30.9 - 19.6 °C.



**Figura 2.** Promedios mensuales de TSM (°C) Y Chlsat (mg m<sup>-3</sup>) para las seis zonas costeras muestreadas: a) Punta Coyote, b) Topolobampo, c) Cabo Pulmo, d) El Dorado, e) Cabo San Lucas y f) Cabo Corrientes



**Figura 3.** Diagramas Hovmöller de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ) para los tres transectos: a) Punta Coyote – Topolobampo, b) Cabo Pulmo – El Dorado y c) Cabo San Lucas – Cabo Corrientes. Las líneas coloreadas bajo el eje horizontal representan los eventos de El Niño (rojo), La Niña (azul) y “El Blob” (naranja). Los números de los años están centrados en julio.

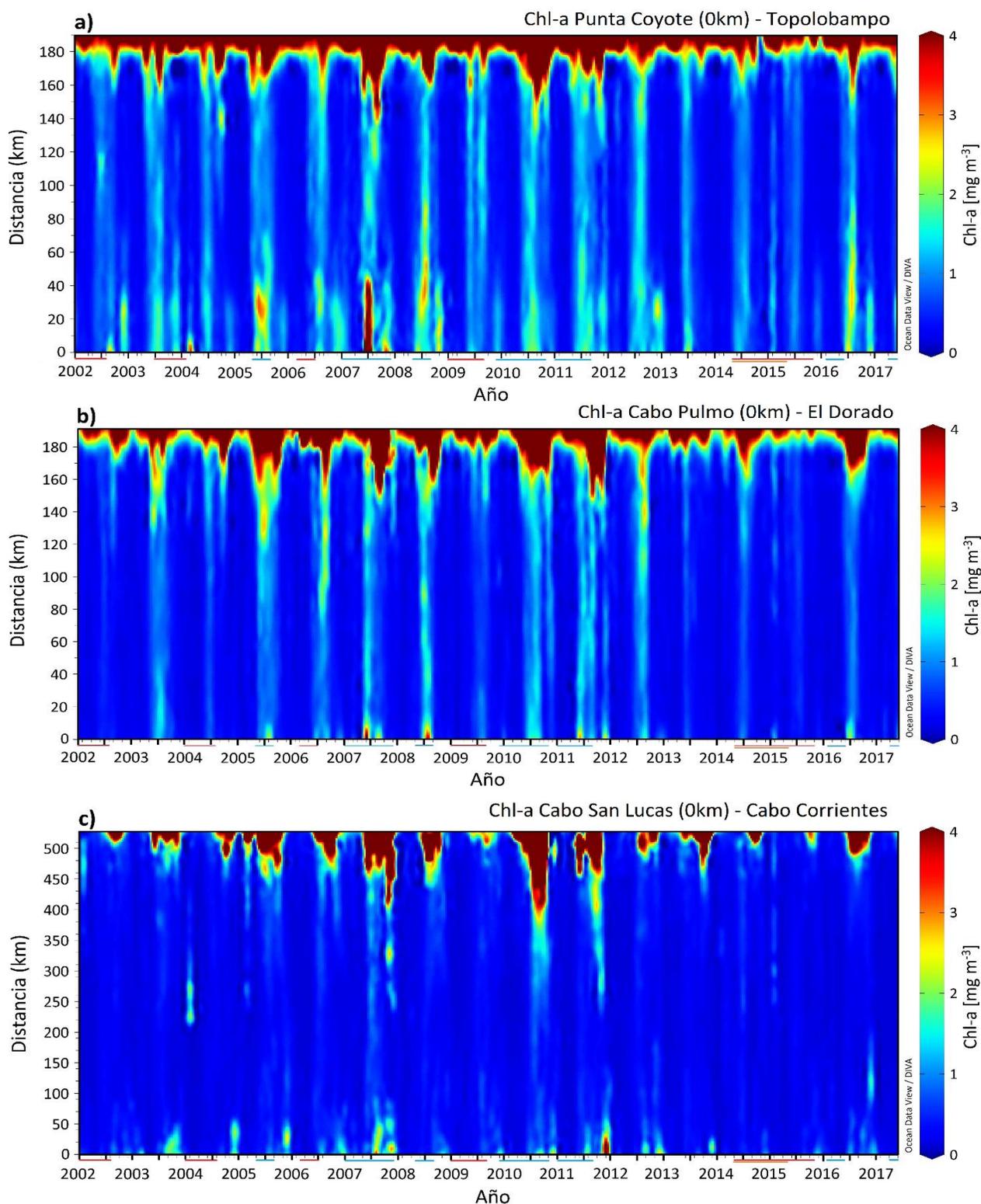


**Figura 4.** Series de Tiempo de TSM para el promedio de los primeros 3 pixeles cercanos a las costas de cada transecto: a) Punta Coyote – Topolobampo, b) Cabo Pulmo – El Dorado y c) Cabo San Lucas – Cabo Corrientes. Los valores de la costa este corresponden a la línea punteada, mientras que los de la costa oeste corresponden a la línea continua.

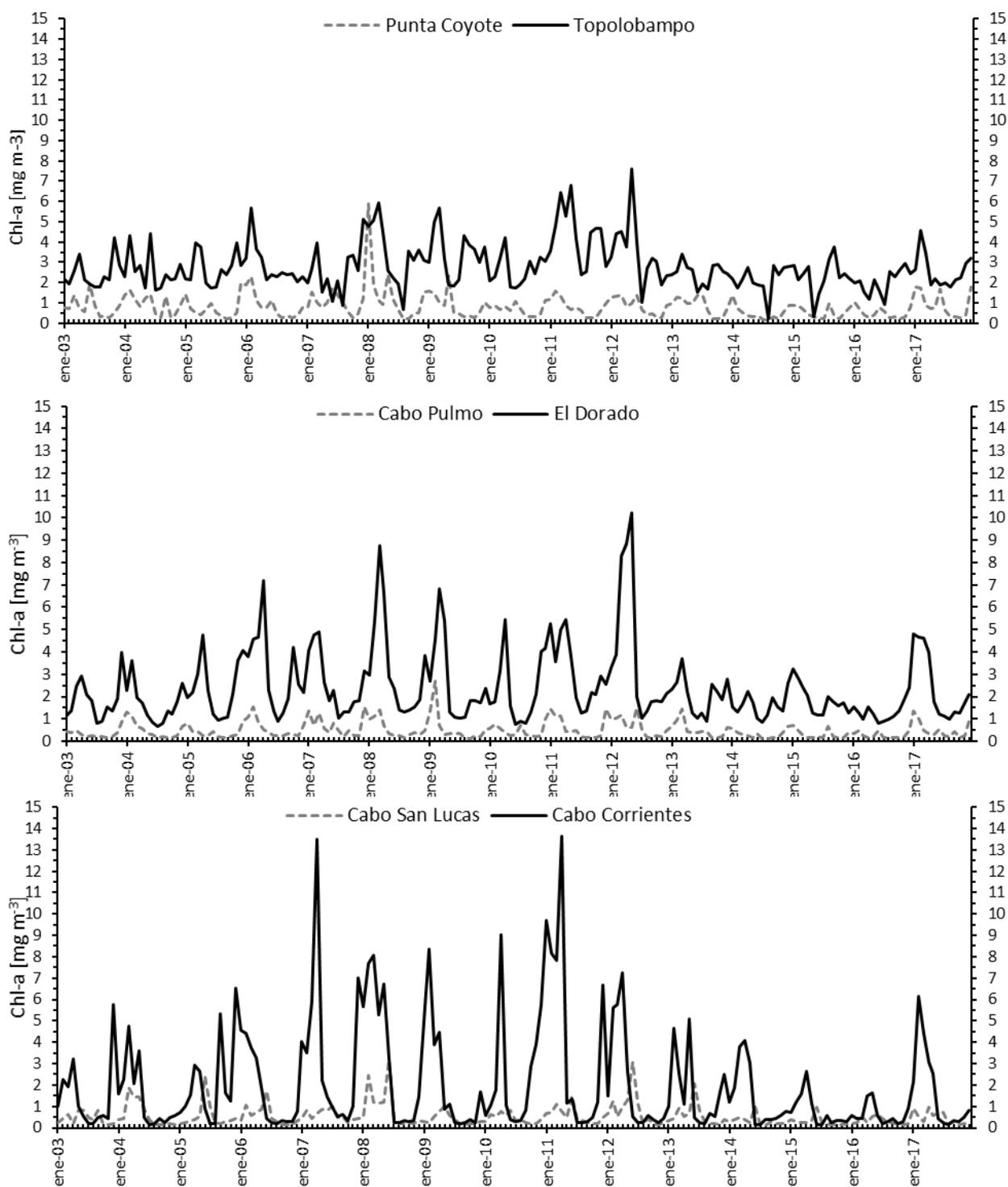
### 3.2.2 Clorofila satelital

El análisis de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  para la zona de estudio durante todo el periodo arrojó un intervalo de  $0.07 - 32.61 \text{ mg m}^{-3}$ . Se observó que en las partes cercanas a la costa este, los valores de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  fueron más elevados que los de la costa oeste en todos los transectos, así como ciclos estacionales y variaciones interanuales muy marcadas (Fig. 5). Para el transecto Punta Coyote – Topolobampo (PC-T) se presentó un intervalo de  $21 - 0.1 \text{ mg m}^{-3}$  (Fig. 5a). Los valores más elevados se observaron a menudo en las zonas cercanas a la costa de CC (hasta  $21 \text{ mg m}^{-3}$ ) mientras que en la costa de PC se presentaron valores menos elevados (hasta  $5.8 \text{ mg m}^{-3}$ ) (Fig. 6). Generalmente, los valores mínimos de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  se presentaron en la costa de PC (hasta  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$ ) mientras que en la costa de T se reportaron mínimos más altos (hasta  $0.2 \text{ mg m}^{-3}$ ), ambos mínimos tuvieron lugar durante el verano de 2014. El máximo de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  para la costa de T fue  $21 \text{ mg m}^{-3}$ , durante la primavera de 2004, mientras que para la costa de PC fue  $11.2 \text{ mg m}^{-3}$  en invierno de 2007 - 2008. En todo el transecto se observan lengüetas con valores altos en la costa de T, las cuales generalmente se intensifican en invierno, a diferencia de la costa de PC en donde las lengüetas son más cortas y de menor intensidad (Fig. 6a).

El intervalo de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  para el transecto Cabo Pulmo – El Dorado (CP-ED) fue de  $17.8$  a  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$ . En este transecto se observa una estacionalidad muy marcada con lengüetas desde la costa de ED hacia la zona oceánica y rara vez se observan en la costa de CP y suelen ser de muy baja intensidad (Fig. 5b). Los valores más bajos de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  para la costa de ED se observaron en verano de 2004 (hasta  $0.6 \text{ mg m}^{-3}$ ), mientras que para la costa de CP los valores más bajos se observaron 2014 y 2015 (hasta  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$ ). En contraparte los valores más altos para la costa de ED se presentaron durante la primavera de 2012 (hasta  $10.2 \text{ mg m}^{-3}$ ), pero también resaltan los periodos de invierno-primavera de 2006 y 2008 con valores  $>7 \text{ mg m}^{-3}$ , mientras que en la costa de CP el valor más alto se presentó en el invierno de 2008-2009 con valores de hasta  $2.6 \text{ mg m}^{-3}$  (Fig. 6b). En el transecto Cabo San Lucas – Cabo Corrientes (CSL-CC) se presentó un intervalo entre  $22.6$  y  $0.07 \text{ mg m}^{-3}$  (Fig. 5c). Se observaron lengüetas prominentes ( $>50 \text{ km}$  alejadas de la costa y con valores de  $\text{Chl}_{\text{sat}} < 8 \text{ mg m}^{-3}$ ) en CC durante los años 2007, 2008, 2010, 2011 y 2012, mientras que en CSL las lengüetas se observan con menor frecuencia, más cortas, con valores bajos de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  y de menor intensidad (hasta  $3.1 \text{ mg m}^{-3}$  en junio 2008). Los valores máximos se presentaron en la costa de CC durante la primavera de 2007 (hasta  $13.6 \text{ mg m}^{-3}$ ) y primavera de 2011 (hasta  $13.5 \text{ mg m}^{-3}$ ) (Fig. 6c). En ambas costas se observa un notable decremento de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  para 2014-2016, en la que los valores de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  no rebasaron los  $4 \text{ mg m}^{-3}$  alcanzando los valores más bajos durante el verano de 2015 en el cual se presentaron valores de hasta  $0.12 \text{ mg m}^{-3}$  en ambas costas.



**Figura 5.** Diagramas Hovmöller de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  ( $\text{mg m}^{-3}$ ) para los transectos: a) Punta Coyote – Topolobampo, b) Cabo Pulmo – El Dorado y c) Cabo San Lucas – Cabo Corrientes. Las líneas de colores en la parte horizontal indican eventos de El Niño (rojo), La Niña (azul) y “el Blob” (naranja).



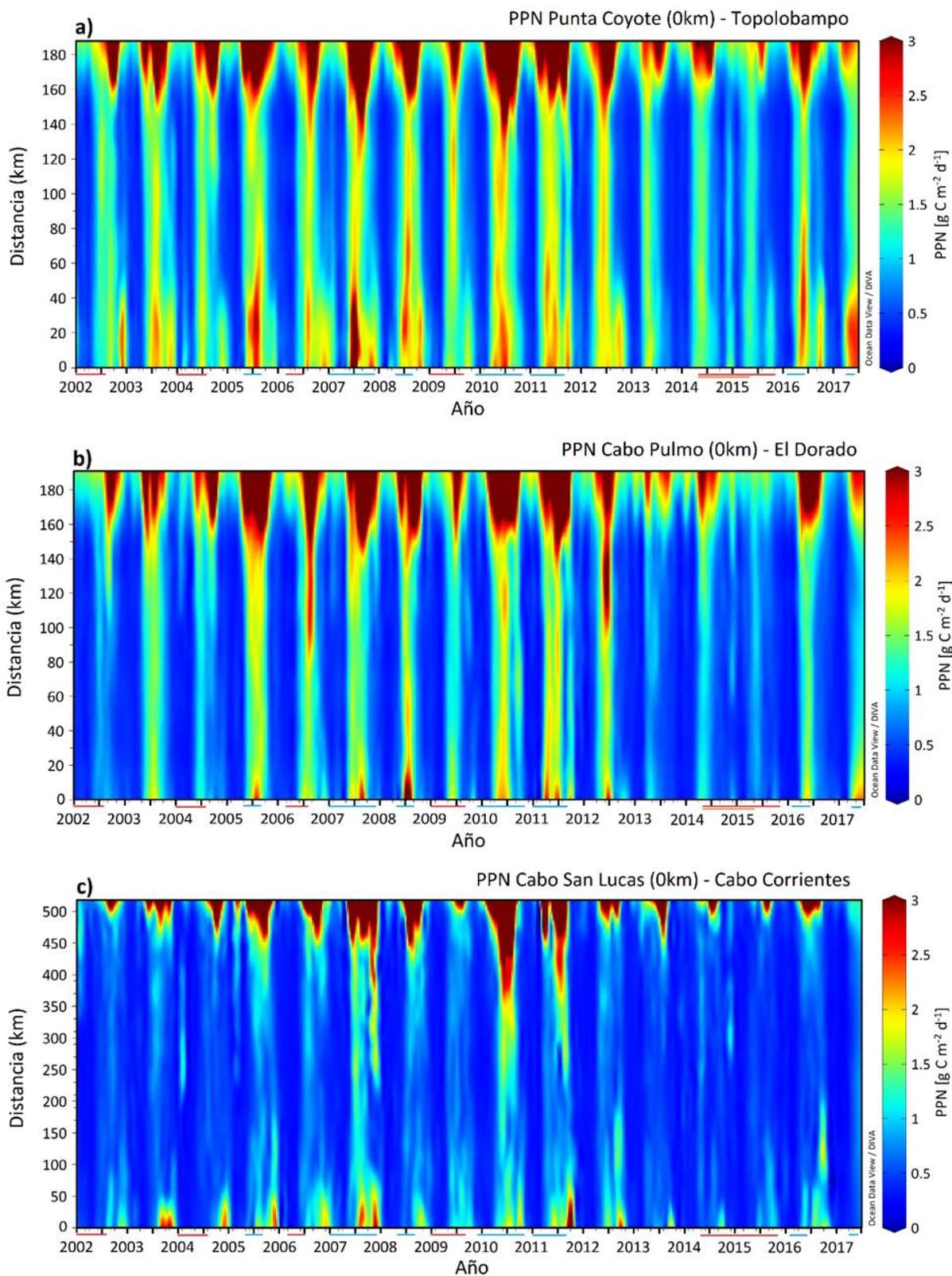
**Figura 6.** Series de tiempo de  $Chl_{sat}$  ( $mg\ m^{-3}$ ) para el promedio de los 3 píxeles más cercanos a la costa de cada transecto: a) Punta Coyote – Topolobampo, b) Cabo Pulmo – El Dorado y c) Cabo San Lucas – Cabo Corrientes. Los valores de la costa este corresponden a la línea continua, mientras que los valores de la costa oeste corresponden a la línea punteada

### 3.2.3 Productividad primaria

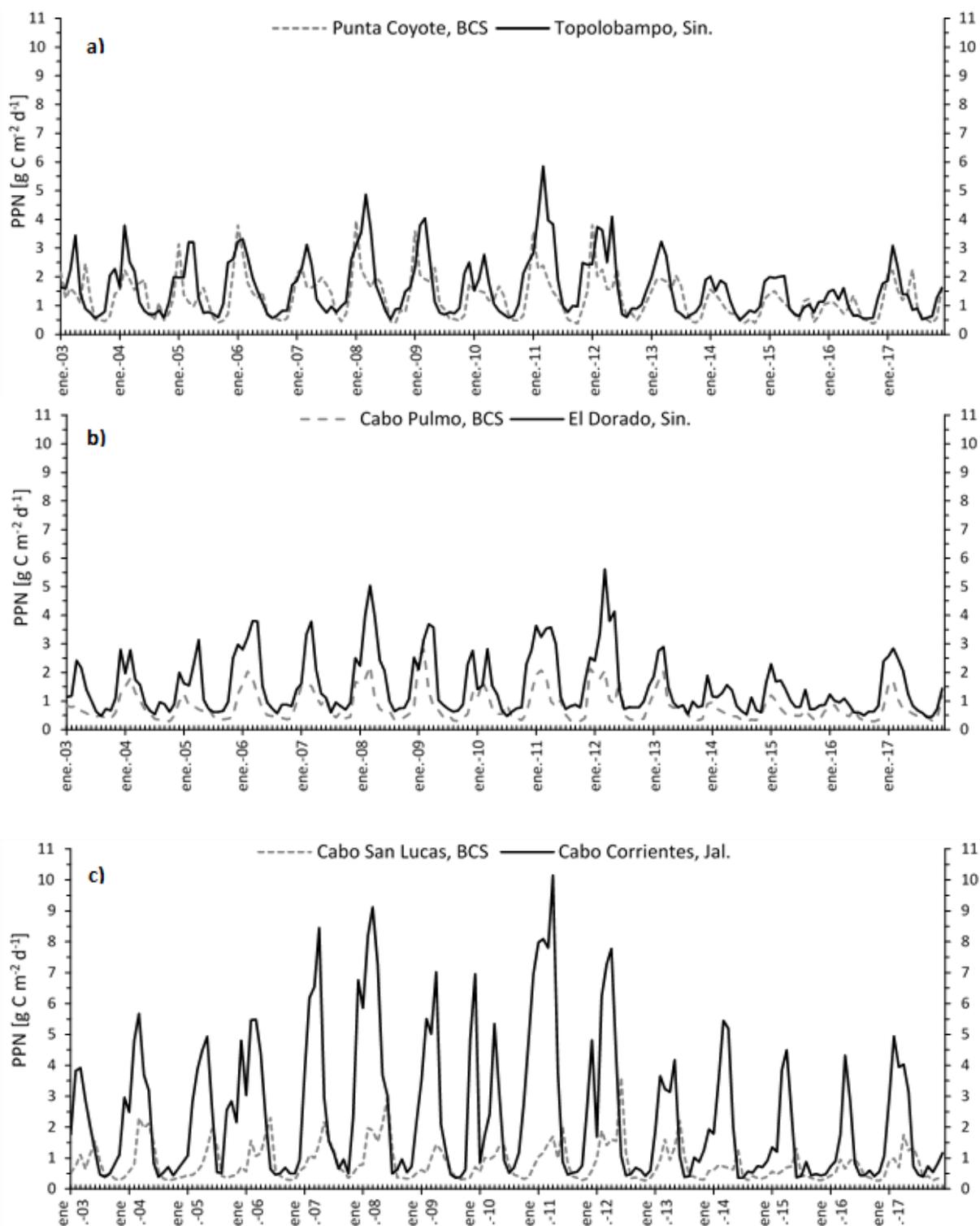
Durante el periodo de tiempo analizado la zona de estudio presentó un intervalo de PP de  $0.21 - 10.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Se observó una variación anual muy clara en los tres transectos con valores relativamente altos en la costa este (Sinaloa, Nayarit y Jalisco) (Fig. 7). En general, los tres transectos presentaron una distribución espacial muy similar a la  $\text{Chl}_{\text{sat}}$ , especialmente en la costa oriental (Fig. 8). El transecto Punta Coyote – Topolobampo (PC-T) se presentó un intervalo de  $0.3 - 7.2 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Fig. 7a), los valores más elevados se presentaron en la costa de T, mientras que los valores más bajos se presentaron en la costa de PC (Fig. 8a). En cuanto a la zona costera, PC presentó un máximo de  $3.9 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en el año 2008 y un mínimo de  $0.3 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en 2016, mientras que la costa de T presentó un intervalo con valores más elevados, con un máximo de  $5.8 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en el año 2011 y un mínimo de  $0.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en el año 2014.

El intervalo de PP que presentó el transecto Cabo Pulmo – El Dorado (CP-ED) durante el periodo de tiempo muestreado fue de  $0.28 - 7.92 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Fig. 7a). La costa de ED presentó valores más altos (hasta  $7.92 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) que la costa de CP (hasta  $2.8 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (Fig. 8a). En la primera los valores más elevados se reportaron en 2011, también destacan los valores presentados en 2008 y 2009, mientras que en la segunda el valor más elevado se observó durante 2008. En contraparte a lo anterior, los valores más bajos se presentaron en 2017 y 2010 (hasta  $0.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) para la costa de ED y en los años 2004 y 2016 (hasta  $0.28 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) para la costa de CP.

El transecto Cabo San Lucas - Cabo Corrientes (CSL-CC) presentó valores entre  $0.21$  y  $10.56 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Fig. 7c). La costa este fue notablemente más productiva que la costa oeste ya que los valores de CSL nunca llegaron a igualar a los de CC, cuyos valores máximos fueron de  $10.56 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en el año 2011 y  $9.11 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en el año 2008. Por otro lado, la costa de CSL presentó valores máximos de  $3.61 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en 2012 y  $2.95 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en 2008 (Fig. 8c). Los valores mínimos en la costa de CSL se registraron en 2016 y 2017, en ambos casos hubo un descenso de hasta  $0.27 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  mientras que en la costa de CC los mínimos tuvieron lugar durante los años de 2014 con valores de hasta  $0.35 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  y en 2015 con valores de hasta  $0.37 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ .



**Figura 7.** Diagramas Hovmöller de PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) para los tres transectos: a) Punta Coyote – Topolobampo, b) Cabo Pulmo – El Dorado y c) Cabo San Lucas – Cabo Corrientes. Las líneas abajo coloreadas bajo el eje horizontal representan los eventos de El Niño (rojo), La Niña (azul) y “El Blob” (naranja).



**Figura 8.** Series de tiempo de PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) para el promedio de los 3 píxeles más cercanos a la costa de cada transecto: a) Punta Coyote – Topolobampo, b) Cabo Pulmo – El Dorado y c) Cabo San Lucas – Cabo Corrientes. Los valores de la costa este corresponden a la línea continua, mientras que los valores de la costa oeste corresponden a la línea punteada.

### 3.3 Análisis Estadístico

#### 3.3.1 Zonas Costeras

El ANOVA bayesiano mostró que en el caso de la TSM los transectos de PC – T y CP – ED no muestran diferencias entre ambas costas, mientras el transecto CSL – CC sí muestra evidencia decisiva en cuanto a TSM ( $B = 1.10e^{+9} \pm 2.66e^{-15} \%$ ). En el caso de la  $Chl_{sat}$  los tres transectos muestran diferencia decisiva, PC – T ( $B = 1.10e^{+57} \pm 7.46e^{-64} \%$ ), CP- ED ( $B = 4.52e^{+36} \pm 1.86e^{-42} \%$ ) y CSL – CC ( $B = 1.03e^{+11} \pm 1.62e^{-17} \%$ ). Por otra parte, la PP presentó diferencia muy fuerte entre la zona costera de PC-T ( $B = 75.3 \pm 1.56e^{-7}$ ), mientras que para las otras dos zonas costeras presentó diferencia decisiva, CP – ED ( $B = 7.02e^{12} \pm 1.35e^{-19} \%$ ) y CSL – CC ( $B = 8.10e^{+14} \pm 1.49e^{-21} \%$ ).

**Tabla 2.** Resultados del análisis a posteriori para encontrar diferencias con alta credibilidad entre los valores de TSM,  $Chl_{sat}$  y PP entre la costa este y la costa oeste para cada transecto. Las diferencias con alta credibilidad se encuentran resaltadas en negritas.

Costas	TSM		Chl- $\alpha$		PPN	
	B	% error	B	% error	B	% error
Punta Coyote, BCS - Topolobampo, Sin.	0.165	8.37E-05	<b>1.10E+57</b>	<b>7.46E-64</b>	<b>7.53E+01</b>	<b>1.56E-07</b>
Cabo Pulmo, BCS - El Dorado, Sin.	0.122	1.13E-04	<b>4.52E+36</b>	<b>1.86E-42</b>	<b>7.02E+12</b>	<b>1.35E-19</b>
Cabo San Lucas, BCS - Cabo Corrientes, Jal.	<b>1.10E+09</b>	<b>2.66E-15</b>	<b>1.03E+11</b>	<b>1.62E-17</b>	<b>8.10E+14</b>	<b>1.49E-21</b>

#### 3.3.2 Variabilidad entre eventos físicos

##### 3.3.2.1 Temperatura superficial del mar

El ANOVA Bayesiano señaló que para las costas del primer transecto, la costa de Topolobampo presenta diferencias sustanciales en la TSM entre los periodos La Niña – Normal ( $B = 6.64 \pm 4.90e^{-7} \%$ ). En contraparte la costa de Punta Coyote no presenta diferencias en la variabilidad de la TSM entre ningún periodo (Tabla 3). En el transecto central, la costa este (ED) el análisis presentó diferencia escasa entre los eventos de La Niña – “El Blob” ( $B = 1.005 \pm 0.008 \%$ ), así como también diferencias sustanciales entre los eventos de La Niña y Normal ( $B = 6.804 \pm 4.67e^{-7} \%$ ). Por otro lado, la costa oeste ubicada en Cabo Pulmo,

BCS no presentó diferencias en la variabilidad de TSM entre un evento y otro. En cuanto a la TSM de las zonas costeras ubicadas en el transecto de la boca exterior, la costa de Cabo Corrientes presentó diferencia escasa entre los eventos de La Niña – Normal ( $B = 2.555 \pm 0.003 \%$ ) y La Niña – “El Blob” ( $B = 1.945 \pm 0.002 \%$ ) y a su vez, la TSM presentó diferencia sustancial entre los eventos de El Niño – La Niña ( $B = 3.046 \pm 0.002 \%$ ). La costa de Cabo San Lucas solamente presentó diferencia escasa en los eventos Normal – “El Blob” ( $B = 1.06 \pm 7.03e^{-4} \%$ ).

### 3.3.2.2 Clorofila satelital

En el transecto Punta Coyote – Topolobampo, para la costa este (T) el ANOVA Bayesiano arrojó diferencias fuertes en la  $Chl_{sat}$  entre los eventos La Niña y “El Blob” ( $B = 10.346 \pm 7.81e^{-4} \%$ ) y evidencia decisiva entre los eventos El Niño – La Niña ( $B = 645.5 \pm 637e^{-6} \%$ ) y La Niña – Normal ( $B = 7420 \pm 9.94e^{-10} \%$ ). Para la costa de Punta Coyote se obtuvieron diferencias escasas entre los eventos de La Niña – Normal ( $B = 1.621 \pm 0.003 \%$ ), La Niña – “El Blob” ( $B = 1.391 \pm 0.008 \%$ ) y Normal – “El Blob” ( $B = 1.032 \pm 8.822e^{-4} \%$ ) y diferencias sustanciales entre los eventos de El Niño – La Niña ( $B = 3.097 \pm 0.002 \%$ ).

En el caso de la  $Chl_{sat}$  del transecto ubicado en la zona conocida como “la boca interior” (CP-ED) Ambas costas presentaron diferencia escasa entre los eventos de La Niña – “El Blob” (B Cabo Pulmo =  $1.841 \pm 0.002 \%$  y B El Dorado =  $1.923 \pm 0.002 \%$ ), la costa de Cabo Pulmo presentó diferencia sustancial entre los eventos de El Niño – La Niña ( $B = 3.653 \pm 0.002 \%$ ) y diferencia fuerte entre los eventos de La Niña – Normal ( $B = 16.308 \pm 2.09e^{-7} \%$ ). Entre los eventos de La Niña – Normal, la costa de El Dorado presentó diferencia sustancial ( $B = 3.469 \pm 0.003 \%$ ) y diferencia fuerte entre los eventos de El Niño – La Niña ( $B = 27.695 \pm 1.81 e^{-4} \%$ ).

El transecto de la zona conocida como “la boca exterior” (CSL-CC) la costa este presentó diferencia escasa entre los eventos Normal – “El Blob” ( $B = 1.021 \pm 9.53e^{-4} \%$ ), también presentó diferencia sustancial entre los eventos de El Niño – Normal ( $B = 4.429 \pm 5.66e^{-4} \%$ ), La Niña – Normal ( $B = 7.243 \pm 4.43e^{-7} \%$ ) y La Niña- “El Blob” ( $B = 5.529 \pm 6.70e^{-4} \%$ ) y a su vez, presentó diferencia decisiva entre los eventos de El Niño – La Niña ( $B = 196 \pm 1.48e^{-5} \%$ ). En contraparte, la costa oeste presentó diferencia escasa entre los eventos de La Niña – “El Blob” ( $B = 1.048 \pm 0.008 \%$ ) y Normal – “El Blob” ( $B = 2.702 \pm 0.001 \%$ ), mientras que para los eventos de El Niño – La Niña presentó diferencia sustancial ( $B = 6.917 \pm 0.001 \%$ ), también presentó diferencia muy fuerte entre los eventos El Niño – Normal ( $B = 79.608 \pm 2.17e^{-5} \%$ ).

### 3.3.2.3 Productividad primaria

Para la costa este del transecto más norteño (Topolobampo) el ANOVA Bayesiano arrojó diferencias escasas de PP entre los eventos La Niña – “El Blob” ( $B = 2.035 \pm 0.002 \%$ ), también presentó diferencia sustancial entre los eventos de El Niño – La Niña ( $B = 9.766 \pm 6.92e^{-4} \%$ ) y diferencia muy fuerte entre los eventos de La Niña – Normal ( $B = 48.258 \pm 7.31e^{-8} \%$ ). La costa oeste (Punta Coyote) presentó diferencias escasas entre los eventos La Niña – “El Blob” ( $B = 1.125 \pm 0.02 \%$ ), El Niño – La Niña ( $B = 2.025 \pm 0.002 \%$ ) y La Niña – Normal ( $B = 2.294 \pm 0.003 \%$ ).

En la “boca interior” Cabo Pulmo ubicado en la costa oeste presentó diferencias escasas entre los eventos de El Niño – La Niña ( $B = 2.128 \pm 0.002 \%$ ) y La Niña – “El Blob” ( $B = 1.399 \pm 0.008 \%$ ), también presentó diferencia fuerte entre los eventos de La Niña – Normal ( $B = 11.834 \pm 2.83 e^{-7} \%$ ). En el caso de la costa de El Dorado, el ANOVA Bayesiano arrojó diferencia escasa entre los eventos de La Niña – “El Blob” ( $B = 2.44 \pm 0.002 \%$ ), diferencia fuerte entre los eventos de El Niño – La Niña ( $B = 21.991 \pm 3.00 e^{-7} \%$ ) y diferencia muy fuerte entre los eventos La Niña – Normal ( $B = 31.675 \pm 1.10e^{-7} \%$ ).

La costa de Cabo Corrientes presentó diferencia sustancial entre los eventos de La Niña – “El Blob” ( $B = 3.238 \pm 0.003 \%$ ) y La Niña - Normal ( $B = 4.385 \pm 6.80e^{-7} \%$ ), también arrojó diferencia fuerte entre los eventos El Niño – La Niña ( $B = 12.452 \pm 6.45e^{-4} \%$ ). Para la costa de Cabo San Lucas el ANOVA Bayesiano presentó diferencia escasa entre los eventos de La Niña – “El Blob” ( $B = 1.23 \pm 0.008 \%$ ), también se obtuvo diferencia sustancial entre los eventos de El Niño – La Niña ( $B = 7.888 \pm 0.001 \%$ ) y Normal – “El Blob” ( $B = 3.836 \pm 911e^{-4} \%$ ), así como también se encontró diferencia decisiva entre los eventos de El Niño – Normal ( $B = 130.516 \pm 1.43e^{-5} \%$ ).

**Tabla 3.** Resultados del ANOVA bayesiano para TSM, Chl<sub>sat</sub>, y PP para cada una de las costas y para cada evento. Las diferencias se encuentran resaltadas en negritas.

COSTA	Situación	Niño vs. Niña		Niño vs. Normal		Niño vs. Blob		Niña vs. Normal		Niña vs. Blob		Normal vs. Blob	
		FB	% error	FB	% error	FB	% error	FB	% error	FB	% error	FB	% error
Topolobampo	TSM	0.322	0.015	0.579	1.94E-04	0.521	0.006	6.64	4.90E-07	0.924	0.008	0.3	0.021
	Chl-a	<b>645.5</b>	<b>6.37E-06</b>	0.274	0.034	0.321	0.004	<b>7420.7</b>	<b>9.94E-10</b>	<b>10.346</b>	<b>7.18E-04</b>	0.323	0.021
	PPN	<b>9.766</b>	<b>6.92E-04</b>	0.254	0.033	0.335	0.004	<b>48.258</b>	<b>7.31E-08</b>	<b>2.035</b>	<b>0.002</b>	0.348	0.021
El Dorado	TSM	0.479	0.007	0.337	0.031	0.452	0.008	<b>6.809</b>	<b>4.67E-07</b>	<b>1.005</b>	<b>0.008</b>	0.309	0.021
	Chl-a	<b>27.695</b>	<b>1.81E-04</b>	0.52	2.69E-04	0.34	0.006	<b>3.469</b>	<b>0.003</b>	<b>1.923</b>	<b>0.002</b>	0.368	0.021
	PPN	<b>21.991</b>	<b>3.00E-04</b>	0.363	0.033	0.322	0.004	<b>31.675</b>	<b>1.10E-07</b>	<b>2.44</b>	<b>0.002</b>	0.383	0.022
Cabo Corrientes	TSM	<b>3.046</b>	<b>0.002</b>	0.279	0.034	0.37	0.05	<b>2.555</b>	<b>0.003</b>	<b>1.945</b>	<b>0.002</b>	0.467	0.023
	Chl-a	<b>196</b>	<b>1.48E-05</b>	<b>4.429</b>	<b>5.66E-04</b>	0.321	0.004	<b>7.243</b>	<b>4.43E-07</b>	<b>5.529</b>	<b>6.70E-04</b>	<b>1.021</b>	<b>9.53E-04</b>
	PPN	<b>12.452</b>	<b>6.45E-04</b>	0.715	1.64E-04	0.322	0.004	<b>4.385</b>	<b>6.80E-07</b>	<b>3.238</b>	<b>0.003</b>	0.83	0.003
Punta Coyote	TSM	0.272	0.016	0.26	0.034	0.539	0.006	0.493	0.005	0.833	0.009	0.411	0.022
	Chl-a	<b>3.097</b>	<b>0.002</b>	0.816	1.508	0.41	0.005	<b>1.621</b>	<b>0.003</b>	<b>1.391</b>	<b>0.008</b>	<b>1.032</b>	<b>8.82E-04</b>
	PPN	<b>2.025</b>	<b>0.002</b>	0.369	0.033	0.367	0.003	<b>2.294</b>	<b>0.003</b>	<b>1.225</b>	<b>0.02</b>	0.58	0.016
Cabo Pulmo	TSM	0.288	0.016	0.244	0.033	0.459	0.006	0.473	0.006	0.656	0.012	0.366	0.021
	Chl-a	<b>3.653</b>	<b>0.002</b>	0.256	0.033	0.387	0.005	<b>16.308</b>	<b>2.09E-07</b>	<b>1.841</b>	<b>0.002</b>	0.462	0.023
	PPN	<b>2.128</b>	<b>0.002</b>	0.234	0.032	0.379	0.005	<b>11.834</b>	<b>2.83E-07</b>	<b>1.399</b>	<b>0.008</b>	0.41	0.022
Cabo San Lucas	TSM	0.438	0.01	0.49	2.06E-04	0.417	0.006	0.19	0.063	0.941	0.008	<b>1.06</b>	<b>7.03E-04</b>
	Chl-a	<b>6.917</b>	<b>0.001</b>	<b>79.608</b>	<b>2.17E-05</b>	0.328	0.004	0.239	0.041	<b>1.048</b>	<b>0.008</b>	<b>2.702</b>	<b>0.001</b>
	PPN	<b>7.888</b>	<b>0.001</b>	<b>130.516</b>	<b>1.43E-05</b>	0.322	0.004	0.362	0.015	<b>1.23</b>	<b>0.008</b>	<b>3.836</b>	<b>9.11E-04</b>

## Capítulo 4. Discusión

---

La dinámica estacional de la zona superficial del golfo de California se rige principalmente por la circulación atmosférica y oceánica, las cuales se revierten estacionalmente presentando una clara variabilidad intra-anual que repercute en la mayoría de los efectos de los procesos físicos, como son los ciclos estacionales de TSM,  $Chl_{sat}$  y PP (Álvarez-Borrego, 1983). En los años promedio, las temperaturas más altas se observaron durante los meses de “verano” en la parte sur del golfo, lo cual se debe a la circulación estacional ampliamente dominada por la influencia del océano Pacífico en la boca del golfo; las más bajas se presentaron durante los meses de diciembre y marzo debido principalmente a las surgencias intensas de “invierno” (Castro *et al.*, 1994; Ripa, 1997; Marinone y Lavín, 2003; Escalante *et al.*, 2013).

En el caso de la  $Chl_{sat}$ , también se muestra una clara variación estacional con concentraciones más elevadas durante los meses de “invierno”, especialmente durante enero y febrero. Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994b) reportaron un comportamiento similar en la boca del golfo, con máximos de noviembre a mayo ( $>10 \text{ mg m}^{-3}$ ) y mínimos entre junio y octubre ( $<0.1 \text{ mg m}^{-3}$ ) debido a que en general, en todo el golfo de California la diferencia entre las dos estaciones es muy drástica y la mezcla por corriente de mareas es relativamente baja en verano debido a que las altas temperaturas dificultan los procesos de mezcla (Álvarez-Borrego, 2008).

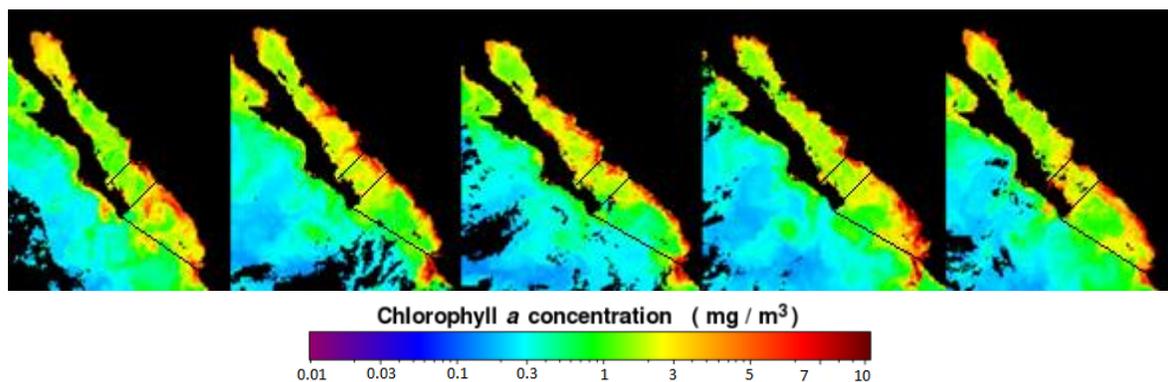
Las fuertes anomalías interanuales de TSM,  $Chl_{sat}$  y PP en el golfo de California se deben al fenómeno ENSO (Baumgartner y Christensen, 1985; Bray y Robles, 1991) y recientemente a las anomalías de agua cálida conocidas popularmente como “El Blob” (Burgos-Othón, 2018). Teniendo en cuenta que la entrada del golfo se ubica a los  $23^{\circ}\text{N}$  y que la velocidad de la onda atrapada en la costa producida por El Niño en el Pacífico oriental tropical es de 100 – 200 km/d, los efectos de El Niño pueden alcanzar la boca del golfo en aproximadamente un mes (Strub y James, 2002; Lavín y Marinone, 2003).

Actualmente se conoce más de un tipo de evento ENSO en el Pacífico tropical y estos pueden clasificarse según su dirección de propagación, periodicidad, tiempo de inicio o la estructura zonal asociada a la TSM. El Niño del Pacífico oriental (EP, por sus siglas en inglés) es el más tradicional y normalmente se desarrolla en la costa sudamericana y se propaga hacia el este del Pacífico ecuatorial (Rasmusson y Carpenter, 1982) y El Niño del Pacífico central (CP, por sus siglas en inglés) cuyas anomalías comienzan en el Pacífico central ecuatorial y se extienden a través del Pacífico oriental (Wang, 1995). El Niño CP también es conocido como Niño “Modoki”, que en japonés significa “similar, pero diferente” (Ashok *et al.*, 2009).

La dispersión de las anomalías de TSM del Ecuador hacia el Pacífico nororiental es más notoria y de mayor impacto en el ENSO de tipo EP que en el de tipo CP.

En el golfo de California se han documentado los eventos de El Niño EP de 1982-1984 (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994b), y 1997-1998 (Kharu *et al.*, 2004) y no se volvió a registrar un evento de este tipo hasta 2015 (Ortiz-Ahumada *et al.*, 2018; Mirábal-Gómez *et al.*, 2018). Mee *et al.* (1985) realizaron series de tiempo de temperatura durante 1979-1984 y de Chl durante 1979-1983 a 30 km de la costa oriental en la boca del golfo. Estos últimos autores reportaron surgencias intensas en 1981 y con valores de Chl de hasta  $12 \text{ mg m}^{-3}$  y débiles en 1983 con promedios de  $\text{Chl} < 2 \text{ mg m}^{-3}$ . Dejando constancia del efecto negativo del evento de El Niño de 1983 en la biomasa fitoplanctónica en la parte sureste del golfo.

Durante El Niño 1982-1984 las concentraciones de los pigmentos fueron muy bajas en el centro y oeste de la entrada del golfo, sin embargo durante el invierno los valores de los pigmentos en la entrada del golfo fueron más altos en la parte oriental de la entrada del golfo debido al efecto de las surgencias en esa zona y a su vez, estas aguas de surgencia son transportadas a la costa oeste por los remolinos y en donde posiblemente pierden una parte de su biomasa fitoplanctónica debido al pastoreo o al hundimiento durante el transporte (Santamaría-del-Ángel, 1994b). En este trabajo se observó un evento similar en PC-T durante el invierno de 2007-2008, en el cual la costa de PC presentó su valor más elevado (Fig. 9).



**Figura 9.** Compuestos mensuales de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  obtenidos del sensor Aqua-MODIS mostrando el golfo de California. Los transectos pertenecientes a este trabajo están marcados por las líneas negras, y de izquierda a derecha se representan los meses de octubre-febrero de los años 2007-2008.

Kharu *et al.* (2004) generaron series de tiempo de 1997-2003 y reportaron que en el sur del golfo la variabilidad interanual fue dominada por el evento de El Niño 1997-1998 y seguido por La Niña. En la región sur del golfo los valores de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  y PP disminuyeron 30-40% durante el periodo El Niño. Los datos

reportados en el presente estudio muestran un claro efecto de los eventos ENSO y “El Blob” en los tres transectos muestreados, con diferencias en la biomasa fitoplanctónica y PP entre periodos El Niño y La Niña, tal y como se muestra en los estudios anteriormente mencionados.

A diferencia de El Niño EP, los eventos de El Niño CP se documentaron con mayor frecuencia en el golfo de California (durante los años 2004, 2006 y 2009). En particular el evento ocurrido en 2009 tuvo un rápido decaimiento y derivó en un evento La Niña muy fuerte (Kim *et al.*, 2011). Durante los eventos de El Niño CP la costa oeste de México puede experimentar inviernos más calurosos ya que, en general, todo el Pacífico Este puede sufrir calentamiento anómalo en invierno durante el evento. Los eventos El Niño CP pueden no tener efectos significativos sobre la biomasa fitoplanctónica en las zonas costeras de la parte este de la boca del golfo.

Escalante *et al.* (2013) reportaron que los efectos de El Niño y de La Niña sobre  $Chl_{sat}$  y PP tuvieron impacto significativo en la boca del golfo. Durante los eventos de El Niño se observó un decremento en la Chl y PP, mientras que La Niña tuvo el efecto inverso, ya que aumentaron las concentraciones de  $Chl_{sat}$  y PP. Estos últimos autores sugieren que los aumentos y decrementos de Chl y PP no se relacionan con la intensidad de los eventos de El Niño y de La Niña, sino con la alternancia de eventos anormales con periodos normales que permitieron el reestablecimiento de las anomalías. Los eventos El Niño que ellos analizaron fueron de tipo CP con periodos de duración relativamente cortos a diferencia de El Niño EP que tuvo lugar en 2015. Lo anterior en conjunto con “El Blob” tuvo un impacto significativo en la parte más sureña muestreada por Burgos-Othón (2018), al norte de mi área de estudio.

Es importante resaltar que los valores de PP para la zona costera obtenidos en este trabajo pudieran estar sobreestimados. El algoritmo del VGPM integra una zona eufótica que supone que es homogénea y sin estratificación. Esto implica que la distribución vertical de Chl por tanto también será homogénea. Lo cual no es correcto, ya que en la zona costera típicamente podemos encontrar valores altos de Chl que decrecen conforme a la profundidad o, en las zonas alejadas de las costas se puede presentar un máximo profundo de Chl (Ortiz-Ahumada *et al.*, 2018). Con lo anterior, en lugar de considerar los valores absolutos de PP es preferible observar más a detalle sus tendencias en los comportamientos espaciales y temporales (Mirabal-Gómez *et al.*, 2017)

El impacto de los diferentes eventos ENSO sobre la biomasa fitoplanctónica siempre será distinto uno del otro ya que también es dependiente de otros factores como la Oscilación Decadal del Pacífico Norte. El evento de El Niño 1982-1984 coincidió con un régimen caliente del Pacífico Norte en el cual las

temperaturas permanecieron altas hasta la primavera de 1984. Durante este tiempo se reportó una baja biomasa de fitoplancton en las aguas costeras frente al norte de Baja California y las poblaciones de macroalgas empezaron a recuperarse hasta otoño de 1984 (Torres-Moye y Álvarez-Borrego, 1987). El impacto del evento de El Niño 1997-1998 tuvo menor duración que el evento de 1982-1984 debido a que coincidió con un régimen frío (Ladah *et al.*, 1999; Newman *et al.*, 2003).

En este trabajo se reportaron los valores más bajos de  $Chl_{sat}$  y PP durante 2014-2016 que coincidieron con el traslape de 2 eventos: El Niño EP y “El Blob”. Ortíz-Ahumada *et al.* (2018) reportaron una disminución de  $Chl_{sat}$  y PP de >50% en las aguas costeras de Cabo San Lucas y Cabo San Lázaro, BCS, durante los eventos de “El Blob” en 2014 y El Niño EP en 2015-2016 debido a la alta TSM registrada durante estos eventos, lo que ocasionó el hundimiento de la termoclina y alta estratificación desde el verano de 2014 hasta el invierno de 2015-2016. Durante ese periodo también reportaron que aunque hubo una disminución en la  $Chl_{sat}$  y la PP, estas no fueron críticas debido a que el fitoplancton de tamaño pequeño está adaptado a condiciones oligotróficas y sus poblaciones suelen ser relativamente estables.

Durante El Niño 1982-1984 se observó un comportamiento similar en el fitoplancton en el noroeste de la península de Baja California, ya que en muestras superficiales se encontró una dominancia del nanofitoplancton con valores de Chl de hasta  $2 \text{ mg m}^{-3}$  (Torres-Moye y Álvarez-Borrego, 1987). Lo mismo ocurrió en el canal de Santa Bárbara, California, en el cual el 80% del fitoplancton filtrado fue <5  $\mu\text{m}$  y la fracción dominante fueron las cianobacterias cuando la dominancia normal se encuentra representada por diatomeas y dinoflagelados en las aguas costeras del Sur de la Corriente de California (Putt y Prezelin, 1985; Lara-Lara *et al.*, 1980).

La prevalencia de altas temperaturas y el cambio de composición en la comunidad fitoplanctónica que tuvo lugar durante “El Blob” en 2014 y El Niño en 2015-2016 trajeron consigo impactos en los niveles superiores de la trama trófica. Las larvas de pelágicos menores comienzan a alimentarse de fitoplancton (principalmente dinoflagelados de  $\sim 45 \mu\text{m}$ ) al acabarse su saco vitelino, pero si solamente se encuentran disponibles células de menor tamaño (p. ej. cianobacterias) la alimentación pasará a ser deficiente, lo cual provoca un reclutamiento bajo.

Anderson *et al.* (2017) reportaron un fracaso reproductivo continuo, rangos de distribución más extremos, así como también un bajo rendimiento de pelícanos y otras aves marinas en el golfo de California durante el periodo de calentamiento anómalo de 2014-2016. Sus resultados evidenciaron un fracaso reproductivo a pesar de un mayor esfuerzo de anidación en las colonias de pelicano café

(*Pelecanus occidentalis californicus*). Lo anterior pudo deberse a que el número de reproductores que llegaban a las colonias anidantes no era el esperado, un abandono de las colonias y migraciones antes de lo esperado y a un deficiente éxito reproductivo de las pocas parejas que intentaron reproducirse. Esto refuerza la idea de un colapso de la trama trófica aunque no haya habido valores extremadamente bajos de  $Chl_{sat}$ .

Banuet-Martínez *et al.* (2017) reportaron una disminución del 77% en la colonia de lobos marinos del archipiélago San Benito, al norte del Pacífico mexicano, en febrero de 2016 en comparación al año anterior (584 en 2016 y 2,555 en 2015), así como pocos cachorros vivos (343 en 2016 y 1,567 en 2015). Además, los autores también reportaron que la mayoría de los cachorros presentes se encontraron en un estado endeble y decaído debido a la alta TSM que se registró en ese periodo y que estuvo relacionada con los eventos de “El Blob” y El Niño, los cuales volvieron vulnerable al ecosistema. Con lo anterior, se hace constar que tanto “El Blob” como El Niño que tuvieron lugar durante 2014-2016 no solamente afectaron a los eslabones inferiores de la trama trófica, sino que también tuvieron un impacto en los organismos de los niveles tróficos más altos en el golfo de California.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

A lo largo del periodo de estudio, los tres transectos mostraron una variación anual muy clara entre “inviernos” y “veranos” para las tres variables analizadas (TSM,  $Chl_{sat}$  y PP) en las series de tiempo y los diagramas Hovmöller.

Los valores más altos de  $Chl_{sat}$  se encontraron en la zona costera de Cabo Corrientes debido a que esta zona aún no se encuentra tan aislada geográficamente del océano Pacífico y por lo cual recibe mayor proporción de agua Subsuperficial Subtropical, la cual es más fría y rica en nutrientes. Los valores más altos de TSM se encontraron durante el periodo de El Niño en interacción con “El Blob” en el transecto Punta Coyote – Topolobampo que es el más norteño de mi área de estudio y por lo tanto tiene una mayor variabilidad estacional, es decir acumula mayor cantidad de calor que los transectos más sureños de este estudio.

La costa este del golfo de California, a la que pertenece Sinaloa, Nayarit y parte de Jalisco, posee mayor biomasa y productividad primaria que la costa oeste a la que pertenece Baja California Sur, debido a las surgencias de “invierno”, esto incluso durante eventos El Niño.

Los impactos de El Niño y “El Blob” fueron más notorios en la costa este del golfo de California que en su costa occidental. Durante el transcurso de estos eventos se observó un aumento en los valores de TSM, así como una disminución de los valores de  $Chl_{sat}$  y PP. Lo anterior pudo derivar en un cambio taxonómico en la composición específica del fitoplancton de la zona hacia especies de menor tamaño, incluyendo cianobacterias. El impacto positivo en la TSM y negativo en la  $Chl_{sat}$  y la PP en la parte sur de golfo de California suele ser gradual y a su vez puede intensificarse durante el traslape de dos o más de los siguientes eventos: verano, El Niño (CP y EP), la fase cálida de la Oscilación Decadal del Pacífico y “El Blob”. Actualmente no se conoce cuál es el aporte individual de cada uno de los eventos durante el traslape, tal y como ocurrió en este trabajo durante el traslape de El Niño EP de 2015 con “El Blob”.

En las zonas costeras del golfo de California, los periodos de El Niño, “El Blob” y Normal no presentaron diferencias en la TSM,  $Chl_{sat}$  y PP. En contraparte, los eventos de La Niña si presentaron diferencias respecto a los periodos mencionados anteriormente, ya que los impactos (negativo en la TSM y positivo en la  $Chl_{sat}$  y PP) tuvieron una mayor intensidad que los impactos inversos que se registraron durante los eventos cálidos.

## Literatura citada

---

- Abbott M.R., Brown O.B., Evans R.H., Gordon H.R., Carder K.L., Müller-Karger F. E. and Esaias W.E. 1994. Ocean Color in the 21st Century: A Strategy for a 20-Year Time Series. Hooker, S.B. and Firestone E.R. (eds.). SeaWiFS Technical Report Series, NASA Technical Memorandum 104566, 17: 20.
- Álvarez-Borrego S. 1983. Gulf of California. *In* K. BH, editor. Estuaries and Enclosed Seas Elsevier Amsterdam. 427-449.
- Álvarez-Borrego S. 2007. Principios generales del ciclo del carbono en el océano. En: Gaxiola-Castro, G., Hernández, B., (Eds.). Carbono en ecosistemas acuáticos de México. Instituto Nacional de Ecología México. 11-28.
- Álvarez-Borrego S. 2008. Oceanografía de la región de las grandes islas. Cap. 2. En: Danemann G. y Ezcurra E. (Eds.), Bahía de los Ángeles: Recursos Naturales y Comunidad. Línea base 2007. SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, Pronatura noroeste, A.C. y San Diego Natural History Museum, México, D.F. 45-65.
- Álvarez-Borrego S. 2012a. Phytoplankton biomass and production in the Gulf of California: a review. *Botánica Marina*. 55: 119-128.
- Álvarez-Borrego S. 2012b. New phytoplankton production as a tool to estimate the vertical component of water exchange between the Gulf of California and the Pacific Producción fitoplanctónica nueva como herramienta para estimar el componente vertical del intercambio de agua entre el golfo de California y el Pacífico. *Ciencias Marinas*. 38: 89-99.
- Álvarez-Borrego S. and Lara-Lara J.R. 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. *In*: Dauphin JP & Simoneit B (Eds), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists. Tulsa. 47: 555–567.
- Álvarez-Borrego S. y Sachwartzlose R. 1979. Masas de agua del golfo de California. *Ciencias Marinas*. 6(1,2): 43-61.
- Anderson D. W., Gondínez-Reyes C. R., Velarde E., Avalos-Tellez R., Ramírez-Delgado D., Moreno-Prado H., Bowen T., Gress F., Trejo-Ventura J., Adrean L. y Meltzer L. 2017. Pelicano pardo, *Pelecanus occidentalis californicus* (Aves: Pelecanidae): Cinco décadas con ENOS, anidación dinámica y estatus contemporáneo de reproducción en el golfo de California. *Ciencias Marinas*. 43(1):1-34.
- Anderson T. and Lucas M. 2008. Upwelling ecosystems. En: S.E. Jorgensen (Ed.) *Ecosystem Ecology*. National Oceanography Centre, Southampton, UK. 450-460.

- Aranceta-Garza, F. 2016. Análisis Bioeconómico de la pesquería de camarón en el Golfo de California. Tesis de Doctorado. CICIMAR. IPN.
- Arias-Aréchiga, J.P. 1998. Regionalización del Golfo de California: una propuesta a partir de concentración de pigmentos fotosintéticos (CZCS). Tesis profesional. UABCS. México.
- Ashok K. y Yamagata T. 2009. Climate change: The El Niño with a difference. *Nature*. 461(7263): 481–484.
- Ashok K., Behera S. K., Rao S., Weng A. H., Yamagata T. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res.* 112: C11007.
- Badger, M. R., Kaplan, A., Berry, J. A. 1977. A mechanism for concentrating CO<sub>2</sub> [carbon dioxide] in *Chlamydomonas reinhardtii* and *Anabaena variabilis* [Algae] and its role in photosynthetic C, O<sub>2</sub> fixation. *Carnegie Yearbook*. 76, 362
- Bakun A. (1990). Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science*. 247: 198-201.
- Banuet-Martínez M., Espinosa-de-Aquino W., Elorriaga-Verplancken F. R., Flores-Morán A., García O. P., Camacho M. y Acevedo-Whitehouse K. 2017. Climatic anomaly affects the immune competence of California sea lions. *PLoS ONE*. 12(6): e0179359.
- Baumgartner T. R. and N. Christensen. 1985. Coupling of the Gulf of California to large-scale interannual climatic variability. *J. Mar. Res.* 43: 825-848.
- Beijerinck M. W. 1890. Culturversuche mit Zoochlorellen, Lichenengonidien und anderen niederen Algen. *Botanisch Zeitung*. 48: 725-39, 741-54, 757-68, 781-5.
- Bond N. A., Cronin M. F., Freeland H. and Mantua N. 2015. Causes and Impacts of the 2014 Warm Anomaly in the NE Pacific. *Geophysics Research Letters*. 42: 3414–3420
- Bray, N. A. 1988. Thermohaline circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. 93: 4993–5020.
- Bray N. A. and Robles J.M. 1991. Physical Oceanography of the Gulf of California. In *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. *Mem. Am. Assoc. Pet. Geol.* 47: 511-553.
- Castro R., Lavin M. F. and Ripa P. 1994. Seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. 99: 3249–3261.

- Castro R., Mascarenhas A., Durazo R., Collins, A. 2000. Variación estacional de la temperatura y salinidad en la entrada del Golfo de California, México. *Ciencias Marinas*. 26(4): 561-583.
- Cavole L.M., Demko A.M., Diner R.E., Giddings A., Koester I., Pagniello, C.M.L.S., Paulsen M. L., Ramirez-Valdez A., Schwenck S.M., Yen N.K., Zill M.E. and Franks P.J.S. 2016. Biological impacts of the 2013–2015 warm-water anomaly in the Northeast Pacific: winners, losers, and the future. *Oceanography* 29(2): 273–285.
- Doughton S. 2016. Toxic algae bloom might be largest ever. Recuperado en diciembre de 2018 de: The Seattle Times, Junio 16, 2016 de: <http://www.seattletimes.com/seattle-news/health/toxic-algae-bloom-might-be-largest-ever>.
- Escalante F., Valdez-Holguín J. E., Álvarez-Borrego S. and Lara-Lara J. R. 2013. Temporal and spatial variation of sea surface temperature, chlorophyll a, and primary productivity in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 39(2): 203-215.
- Espinosa-Carreón T.L. and Valdez-Holguín J.E. 2007. Variabilidad interanual de clorofila en el Golfo de California. *Ecología Aplicada*. 26: 561–583.
- Gardner T. and Gran H. H. 1927. Investigations of the production of plankton in the Oslo Fjord. *Journal du Conseil Permanent pour l'exploration de la Mer* 42: 1-48.
- Gaxiola-Castro G., Cepeda-Morales, J., Nájera-Martínez, S., Espinosa-Carreón, T.L., De la Cruz-Orozco, M., Sosa-Avalos, R., Aguirre-Hernández, E., Cantú-Ontiveros, J.P. 2010. Biomasa y producción del fitoplancton, In: Gaxiola-Castro, G., Durazo, R. (Eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997–2007: Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California*. INE-SEMARNAT/CICESE/UABC, Ensenada, pp. 59–85.
- Gaxiola-Castro G., Garcia-Cordova J., Valdez-Holguin J. E., and M. Botello-Ruvalcaba. 1995. Spatial distribution of chlorophyll  $\alpha$  and primary productivity in relation to winter physical structure in the Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 15: 1043-1059.
- Gilbert J.Y. and Allen, W.E. 1943. The phytoplankton of the Gulf of California obtained by the E. W. Scripps in 1939 and 1940. *Journal and Marine Research*, 5: 89-110.
- Hendricks J. 2015. Bluefin tuna invade southern California waters. *Sport Fishing*, Recuperado en Junio 1, 2018 de: <http://www.sportfishingmag.com/bluefin-tuna-invade-southern-california-waters>.
- Hidalgo-González R. M. and Álvarez-Borrego S. 2004. Total and new production in the Gulf of California estimated from ocean color data from the satellite sensor SeaWiFS. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 51:739-752.

- Hidalgo-González R.M. and Alvarez Borrego, S. 2001. Chlorophyll profiles and the water column structure in the Gulf of California. *Oceanologica Acta*, 24: 19-28.
- IRI International Research Institute for Climate and Society. 2018. What is ENSO?. Recuperado en octubre 2018 – diciembre 2018 de:  
[http://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/ENSO/ENSO\\_Info.html](http://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/ENSO/ENSO_Info.html)
- Jeffreys S. H. 1967. *Theory of probability* (3rd ed.). Clarendon Press.
- Kahru M., Marinone S., Lluch-Cota S. E., Parés-Sierra A. and Mitchell B. G. 2004. Ocean-color variability in the Gulf of California: Scales from days to ENSO. *Deep-Sea Res.* 51(1):139-146.
- Kiefer D. A., Chamberlin N. S and Booth, C. R. 1989. Natural fluorescence of chlorophyll a: Relationship to photosynthesis and chlorophyll concentration in the western south Pacific gyre. *Limnology & Oceanography*, 34(5): 868-881.
- Kim W., Yeh S.W. Kim J.H. Kug, J.S. and Kwon M. 2011. The unique 2009–2010 El Niño event: A fast phase transition of warm pool El Niño to La Niña, *Geophys. Res. Lett.* 38.
- Kintisch E. 2015. “The Blob” invades pacific flummoxing, climate experts. *Science*. 348 (6230): 17-18.
- Kirk J.T.O. 1994. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press, New York. 509.
- Ladah L., Zertuche-González J. A. and Hernández-Carmona G. 1999. Giant kelp (*Macrocystis pyrifera*, Phaeophyceae) recruitment near its southern limit in Baja California after mass disappearance during ENSO 1997–1998. *Journal of Phycology*. 35:1106–1112.
- Lara-Lara J. R., Álvarez-Borrego S. and Small L. F. 1980. Variability and tidal exchange of ecological properties in a costal lagoon. *Estuar. Coast. Mar. Sci.* 11(6):613–637.
- Lara-Lara J.R., Arenas-Fuentes V., Bazán-Guzmán C., Díaz-Castañeda V., Escobar-Briones E., García-Abad M.C., Gaxiola-Castro G., Robles-Jarero G., Sosa-Ávalos R., Soto-González L.A., Tapia-García M. y Valdez-Holguín J.E., 2008. Los ecosistemas marinos, en *Capital natural de México. Conocimiento Actual De La Biodiversidad*. Conabio, México. 135–159.
- Lavín M.F. and Marinone S.G. 2003. An Overview of the Physical Oceanography of the Gulf of California. In: Velasco Fuentes O.U., Sheinbaum J., Ochoa J. (eds) *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Springer, Dordrecht.
- Legeckis R. 1978. A survey of worldwide sea surface temperature fronts detected by environmental satellites. *Journal of Geophysics Research: Oceans*. 83: 4501-22

- Marinone S. G. 2000. Tidal currents in the Gulf of California: Intercomparison among two and three dimensional models with observations. *Ciencias Marinas*. 26: 275-301.
- Marinone S. G. 2003. A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* 108(C10):3325.
- Mee L. D., Ramírez-Flores A., Flores-Verdugo F. and González-Farías F. 1985. Coastal upwelling and fertility of the southern Gulf of California: impact of the 1982-1983 ENSO event. *Tropical Ocean and Atmosfere Newsletter*. 31:9-10.
- Miller C. 2004. *Biological oceanography*. Wiley-Blackwell. Australia. 416 pp.
- Milstein M. 2015. Oncoming El Niño likely to continue species shakeup in Pacific. National Oceanic and Atmospheric Administration Northwest Fisheries Science Center, Recuperado en octubre de 2018 de: [http://www.nwfsc.noaa.gov/news/features/el\\_nino/index.cfm](http://www.nwfsc.noaa.gov/news/features/el_nino/index.cfm).
- Mirabal-Gómez U., Álvarez-Borrego S. and Lara-Lara J. R. 2018. Satellite-derived phytoplankton biomass and production variability in 2 contrasting coastal areas: off southern California and off northern Baja California. *Cienc. Mar.* 43(4):229-248.
- Mirabal-Gómez U., Álvarez-Borrego S. y Lara-Lara J.R. 2017. Satellite-derived phytoplankton biomass and production variability in 2 contrasting coastal areas: off southern California and off northern Baja California. *Ciencias Marinas*. 43(4).
- Mirabal-Gómez, U. 2015. Variabilidad espacio-temporal de la biomasa y producción fitoplanctónicas frente al sur de California y norte de Baja California. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Muller-Karger F.E., Walsh J.J., Evans R.H. and Meyers M.B. 1991. On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperatura cycles of the Gulf of Mexico as determined by satélites. *Journal of Geophysics Research*. 96(12): 645-665.
- NASA National Aeronautical and Space Administration. 2018. Ocean Color web. Recuperado en julioy 2017–marzo de 2018 de: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>.
- NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration. 2018. Frequently Asked Questions about El Niño and La Niña. Recuperado en octubre 2018-diciembre 2018 de: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml)
- NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration. 2018. MEI Index. Recuperado en octubre 2017–enero 2018 de: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei.table.html>.

- NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration. 2018. Office of satellite and products operations. National environmental satellite, data, and information services. Recuperado en diciembre 2017– abril 2018 de: <http://www.ospo.noaa.gov>.
- Ortiz-Ahumada J. C., Álvarez-Borrego S. and Gómez-Valdés J. 2018. Effects of seasonal and interannual events on satellite-derived phytoplankton biomass and production in the southernmost part of the California Current System during 2003-2016.
- Ortiz-Ahumada, J. C. 2015. Variación espacial y temporal de la biomasa y producción fitoplanctónicas frente a Cabo San Lázaro y Cabo San Lucas, B.C.S. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- OSU Oregon State University. 2018. Ocean Net Primary Productivity of Oregon State University. Recuperado en julio 2017– abril 2018 de: <http://www.science.oregonstate.edu/oceano.productivity/index.php>.
- Pal R. and Kumar A. 2014. An introduction to phytoplankton: Diversity and Ecology. *Journal of Marine Systems*, 77: 1–20.
- Pérez-Arvizu E. M., Aragón-Noriega E. A. y Espinosa-Carreón T. L. 2013. Variabilidad estacional de la clorofila a y su respuesta a condiciones El Niño y La Niña en el Norte del Golfo de California. *Revista de biología marina y oceanografía*. 48: 131-141.
- Platt T. and Gallegos C.L. 1980. Modelling primary production. 339-362. In: Falkowski P. G. 1980 primary Productivity in the Sea. Plenum Press. New York. 531pp
- Putt M. and Prézelin B. B. 1985. Observations of diel patterns of photosynthesis in cyanobacteria and nanoplankton in the Santa Barbara Channel during “El Niño”. *J. Plankton Res.* 7(6):779–790.
- Rasmusson E. M. and Carpenter T. H. 1982. Variation in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with Southern Oscillation/El Niño, *Mon. Weather Rev.* 110: 354–384.
- Raven J.A., and Richardson K. 1986. Marine environments. 337-396 in N.R Baker and S.P. Long (eds.), *Photosynthesis in Contrasting Environments*. Elsevier Sci. Publ.
- Reynolds C.S. 2006. *The Ecology of Phytoplankton*. Cambridge University Press. 535 pp.
- Ripa P. 1997 Towards a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California, *J. Phys. Ocean*, 27: 597-614.
- Roden G.I. and Groves G.W. 1959. Recent oceanographic investigations in the Gulf of California., *Journal of Marine Research*, 18:10-35.

- Santamaría-del-Ángel E., Alvarez-Borrego S. and Müller-Karger F.E. 1994b. The 1983-1984 El Niño in the Gulf of California as seen in coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysics Research*, 99: 7423-7343.
- Santamaría-del-Ángel E., Alvarez-Borrego, S., Müller-Karger, F. 1994a. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 99, 7411-7421.
- Steeemann-Nielsen E. 1952. The use of radioactive carbon ( $^{14}\text{C}$ ) for measuring organic production in the sea. *Journal du Conseil Permanent pour l'exploration de la Mer* 18(2): 117-140.
- Steeemann-Nielsen E. 1975. *Marine photosynthesis with special emphasis on the ecological aspects*. Amsterdam: Elsevier Oceanography Series. 13.
- Strub P. T. and James C. 2002. Altimeter-derived surface circulation in the large-scale NE Pacific Gyres. Part 2: 1997-1998 El Niño anomalies. *Progr. Oceanogr.* 53: 185-214.
- Taylor F.J.R. 1978. Problems in the development of an explicit hypothetical phylogeny of the larval eukaryotes. *Biosystems*, 10: 67-89.
- Torres-Moye G. and Álvarez-Borrego S. 1987. Effects of the 1984 El Niño on the summer phytoplankton of a Baja California upwelling zone. *J. Geophys. Res.* 92(C13):14383–14386.
- Torres-Orozco, E. 1993. *Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California*. Tesis de Maestría. CICESE.
- Trenberth K.E., Jones P.D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein Tank A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J.A., Rusticucci M., Soden B. and Zhai P. 2007. *Observations: Surface and Atmospheric Climate Change*. [Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. and Miller H.L. (Eds.)]. In: *Climate Change. 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Uitz J., Stramski D., Reynolds R.A. and Dubranna, J. 2015. Assessing phytoplankton community composition from hyperspectral measurements of phytoplankton absorption coefficient and remote-sensing reflectance in open-ocean environments. *Remote Sensing of Environment*, 171: 58–74.
- Valdez-Holguín J. E., Álvarez-Borrego S. and Trees C. 1999. Caracterización estacional y espacial de los parámetros fotosintéticos el fitoplancton del golfo de California. *Ciencias Marinas*, 25 (4): 445-467.
- Valiela I. 1995. *Marine Ecology Processes*. Second edition. Springer Science + Business Media New York. 645pp.

Wang B. 1995. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades. *J. Climate*. 8: 267-285.

Zavala-Norzagaray A., Briseño R., Aguirre M. y Ramos A. 2008. Bahías y costas del norte de Sinaloa, México: Una evaluación como hábitat de alimentación y desarrollo para tortugas marinas. 1ª Reunión Bienal de la Agenda de Investigación del programa de Ordenamiento Ecológico Marino del Golfo de California.

Zeitzschel B. 1969. Primary productivity in the Gulf of California. *Marine Biology* 3: 201-207.

Zuria-Jordan I., Álvarez-Borrego S., Santamaría-del-Ángel E. and Müller-Karger F. 1995. Satellite-derived estimates of phytoplankton biomass off southern Baja California. *Ciencias Marinas* 21, 265-280.