



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y
TECNOLÓGICAS

POSGRADO EN BIOCENCIAS

VARIABILIDAD AMBIENTAL Y DINÁMICA OCEANOGRÁFICA DE REGIONES MARINAS PRIORITARIAS DEL NOROESTE DE MÉXICO.

TESIS

que para obtener el grado de:

DOCTOR EN BIOCENCIAS

presenta:

CARLOS MANUEL ROBLES TAMAYO

Hermosillo, Sonora, México

14 de abril de 2023

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”**



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

Hermosillo, Sonora a 14 de abril del 2023.

Asunto: Cesión de derechos

**UNIVERSIDAD DE SONORA
P R E S E N T E.**

Por este conducto hago constar que soy autor y titular de la obra denominada **Variabilidad ambiental y dinámica oceanográfica de regiones marinas prioritarias del noroeste de México**, en los sucesivos LA OBRA, realizada como trabajo terminal con el propósito de obtener el Grado de **Doctor en Biociencias**, en virtud de lo cual autorizo a la Universidad de Sonora (UNISON) para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública, distribución, distribución pública, distribución electrónica y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines académicos o propios de la institución y se integren a los repositorios de la universidad, estatales, regionales, nacionales e internacionales.

La UNISON se compromete a respetar en todo momento mi autoría y a otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente.

De la misma manera, manifiesto que el contenido académico, literario, la edición y en general cualquier parte de LA OBRA son de mi entera responsabilidad, por lo que deslindo a la UNISON por cualquier violación a los derechos de autor y/o propiedad intelectual y/o cualquier responsabilidad relacionada con la OBRA que cometa el suscrito frente a terceros.

ATENTAMENTE

Carlos Manuel Robles Tamayo

Nombre y Firma del Autor



LIC. GILBERTO LEÓN LEÓN
Abogado General
UNIVERSIDAD DE SONORA

Hermosillo, Sonora, México

Abril, 2023.

VARIABILIDAD AMBIENTAL Y DINÁMICA OCEANOGRÁFICA DE
REGIONES MARINAS PRIORITARIAS DEL NOROESTE DE MÉXICO

TESIS

que para obtener el grado de:
DOCTOR EN BIOCENCIAS
presenta:

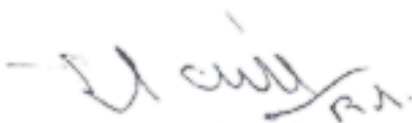
CARLOS MANUEL ROBLES TAMAYO

Hermosillo, Sonora, México

14 de abril de 2023

APROBACIÓN

Los miembros del Comité designado para revisar la tesis intitulada “Variabilidad ambiental y dinámica oceanográfica de Regiones Marinas Prioritarias del Noroeste de México” presentada por Carlos Manuel Robles Tamayo, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Biociencias.



Dr. José Raúl Romo León
Director y Presidente



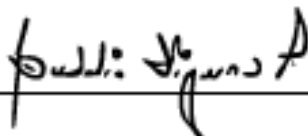
Dr. Ricardo García Morales
Co-Director



Dr. Luis Fernando Enriquez Ocaña
Sinodal Interno y Secretario



Dra. María Cristina Peñalba Garmendia
Sinodal Interno



Dra. Gudelia Figueroa Preciado
Sinodal Externo

“Lo que una persona no descubra, otra lo hará”.

Jacques-Yves Cousteau.

Carlos Manuel Robles Tamayo.

Abril 2023.

DEDICATORIA

A mi familia.

A mis amigos.

A mis compañeros del Posgrado en Biociencias de la Universidad de Sonora.

A mis profesores. En particular al Dr. José Eduardo Valdez Holguín (08/Octubre/1957-13/Junio/2019), distinguido Profesor-Investigador y ameritado docente del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora.

A Areli, mi nueva razón para sonreír.

Carlos Manuel Robles Tamayo.

Abril 2023.

AGRADECIMIENTOS

El haber concluido esta etapa académica tan significativa de mi vida es todo un logro importante para mí y tengo muchísimo que agradecer a varias personas e instituciones que hicieron que este resultado fuera posible.

Primero que nada, quiero agradecer a la Universidad de Sonora, mi gran Alma Mater que me recibió en agosto de 2010 al entrar a la Licenciatura en Biología, llegándome a formar de una manera ejemplar de forma profesional y personal al alcanzar el grado de biólogo con opción en ecología marina en noviembre de 2015. Sin embargo, esta formación académica siguió creciendo cuando decidí continuar estudiando al entrar al Posgrado en Biociencias continuando con mis estudios de Maestría (2016-2018) y de Doctorado (2018-2023), adquiriendo nuevos conocimientos durante el desarrollo de mis estudios y trabajo de tesis, lo cual me ha generado una visión más amplia de mi especialidad enfocada a la oceanografía y ecología marina al tener una mejor preparación y con buen rigor técnico al momento de la identificación, descripción y solución de problemas de los sistemas biológicos y ecológicos para contribuir en la generación e innovación de conocimientos científicos y tecnológicos. Puedo decir que ¡Soy Orgullosamente Búho! Y a mucha honra. Gracias por todo, Unison.

Igual, al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora (DICTUS) que me ha hecho rico en conocimiento y satisfacciones, en conjunto por su ambiente propicio y agradable para llevar clases y realizar mi trabajo de tesis, haciendo posible que alcance esta meta y que nunca deje de sonreír.

Agradezco a cada uno de los coordinadores de Licenciatura en Biología y del Posgrado en Biociencias, jefes, técnicos académicos y secretarías administrativas del DICTUS, que llegué a tratar a lo largo de estos 12 años de formación académica, desde la licenciatura hasta el doctorado. Estoy seguro les di lata con todas mis dudas académicas o administrativas. Cada una de estas personas han sido muy amables ayudándome mucho demostrándome su calidad humana. Estaré siempre agradecido con ustedes por su apoyo.

A toda mi familia, particularmente a mis padres, Carlos Alberto Robles Corbalá y Emma Patricia Tamayo Reyes. Ustedes son todo un ejemplo a seguir de pies a cabeza en toda la extensión de la palabra. Gracias por siempre haber confiado en mí, por brindarme ese apoyo incondicional y cariño único, por inculcarme desde que era niño una educación ejemplar con claros valores y principios en conjunto con sus conocimientos y consejos que me han permitido llegar a ser una persona de bien. Gracias por enseñarme la importancia del estudio, el trabajo, la responsabilidad, honestidad, perseverancia y el esfuerzo para llegar a cumplir todas las metas que me he llegado a proponer y poder ser una mejor persona a medida que pasa el tiempo, y este resultado de mi vida académica es gracias a ustedes. Gracias por estar conmigo.

A mi hermano Santiago Francisco Robles Tamayo que hemos compartido grandes y buenos momentos con sonrisas, risas a lo largo de esta vida a través de diversas pláticas, juegos, piteadas, salidas, etcétera. Agradezco que siempre me has llegado a brindar ese apoyo incondicional que te caracteriza con tus palabras de ánimo y ocurrencias para decirme que, si puedo seguir adelante en todo lo que haga, lo cual voy a tener en mi memoria para siempre.

A todos mis amigos que llegado a tener a lo largo de mi vida y que sé que puedo contar con ellos en cualquier momento, Jesús Héctor Castillo Sotelo, Jesús Benigno Zepeda López, Manuel Osvaldo Monzón Pérez, Karen Gabriela Verdugo Figueroa y Leticia Guadalupe Segura Campillo. Estoy completamente agradecido con su valiosa amistad, gracias por todo su apoyo, ánimos y maravillosos momentos que hemos llegado a tener y por los que faltan. Son lo mejor y estoy con ustedes para lo que sea.

A Celia Areli Figueroa Fontes, a quien de agradezco que nuevamente esté de vuelta en mi vida al habernos reencontrado varios años después y que actualmente hemos llegado a compartir maravillosos momentos juntos, conociéndonos mucho más. Gracias por tu confianza, ánimos, apoyo incondicional. Estoy contigo.

Por supuesto, a mis amigos que me acompañaron y que acompañé durante mis estudios de licenciatura en biología en los momentos de clases, laboratorios y salidas de campo. Agradezco a “Los Huracanes” Fernando Isaí Valle Jiménez, Yaredh Ramírez

Enríquez, Ana Diameleth Osuna Maldonado, Andrés Raso Ramírez, Gaspar Leonardo Luken Vega, Pablo Benavides Sechslingloff, Bernardo Murrieta Molina, Víctor Eduardo Téllez Palomares, José Emilio López Piña, Paúl Fernando Balderrama Aguilar y María Villagrán Romero. Gracias por la amistad que perdura hasta la actualidad, por todo lo que he aprendido y sigo aprendiendo de ustedes, por las experiencias compartidas, por las grandiosas fiestas que hemos tenido llenas de alegría. También agradezco a Adriana Isabel Encinas Miranda, a quien empecé a tratar a mitad de la licenciatura y con el paso del tiempo se volvió una valiosa amistad que me sigue acompañando, llena de consejos personales, grata compañía brindada en la que puedo confiar y por sus palabras y regaños al decirme que no descuide mi salud por el trabajo. No sabes la tranquilidad que me has dado tantas veces.

Por otra parte, también quiero agradecer a mis compañeros del Posgrado en Biociencias, especialmente a los del Laboratorio de Ecosistemas y Percepción Remota, Sara Dennis Pacheco, Masuly Guadalupe Vega Puga, Sofia Chozá Farias, Lara Alejandrina Cornejo Denman, Romeo Méndez Estrella y Juan Manuel Haro Medina, con quienes he tenido una buena relación de trabajo, compañerismo y amistad durante mis estudios de Maestría y Doctorado al compartir más allá del trabajo de investigación, con experiencias, seguir aprendiendo de ustedes en lo académico y personal y crecer en el ámbito humano y profesional. A cada uno de ustedes, saben que les deseo lo mejor y que la vida los lleve por caminos llenos de éxitos y satisfacciones.

Asimismo, agradezco con enorme gratitud a cada uno de los profesores-investigadores que me impartieron ya sea uno varios cursos a lo largo de mi formación académica desde la licenciatura hasta el doctorado al haber brindado una atención, conocimiento y apoyo único en mi aprendizaje al igual que por manifestar un compromiso, esfuerzo y dedicación en favor de mi formación académica, científica y humana. Sin lugar a duda, el haber llegado a esta meta es gracias a ustedes: Dora Julia Borbón González, Roberto Pedro Duarte Zamorano, Sergio Alfonso Cantúa Sesteaga, José Eduardo Valdez Holguín, María Cristina Peñalba Garmendia, Enrique Márquez Ríos, Alejandro Emilio Castellanos Villegas, Gerardina Nubes Ortiz, Marco Antonio López Torres, María Guadalupe Burboa Zazueta, Rosa María Montesinos Cisneros, Ricardo López Esparza,

Lorena Bringas Alvarado, José Manuel Grijalva Chon, Alejandro Varela Romero, Norberto Miguel Ángel Pastén Miranda, Luis Enrique Gutiérrez Millán, Alf Enrique Meling López, Reyna Amanda Castillo Gámez, Francisco Elizandro Molina Freaner, Aldo Hiram Gutiérrez Saldaña, Reina Castro Longoria, María Magdalena Ortega Nieblas, Clara Leonor Tinoco Ojanguren, José María del Castillo Alarcón, José Carlos Aguirre Rosas, Luis Fernando Enríquez Ocaña, Luz María Yépez Velázquez, Pedro Ortega Romero, Gudelia Figueroa Preciado, José Arturo Montoya Laos, Luis Rafael Martínez Córdova y José Raúl Romo León.

A mi Director de Tesis y Profesor-Investigador, el Dr. José Raúl Romo León, quien decidió dirigir este trabajo de investigación para que saliera adelante y se realizara en tiempo y forma. Agradezco su ayuda y guía en estos años del doctorado al igual que su apoyo constante, paciencia y dedicación de su tiempo para mi formación profesional. Gracias por las enseñanzas en el laboratorio, clases y seminarios caracterizadas por un apoyo constante a los tesisistas y por demostrar la importancia de actualizarse y aprender día a día en la ciencia y conocimiento. Estaré siempre agradecido con usted.

A mi Co-Director Externo, el Dr. Ricardo García Morales del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) Unidad Nayarit, quien tuve la oportunidad de conocer en el curso-taller “Uso de sensores remotos y su aplicación en el manejo de recursos naturales” del 22 al 26 de junio de 2015 aquí en Hermosillo y desde entonces no hemos dejado de trabajar juntos. Han sido varios años de aprendizaje, asesorías y trabajo con el objetivo de profundizar a detalle proyectos de investigación de manera eficaz. Agradezco su tiempo y disponibilidad de recibirme del 26 de noviembre al 07 de diciembre del 2018 al CIBNOR Unidad Nayarit durante mi primer semestre de doctorado donde obtuve nuevos conocimientos y habilidades en el uso y manejo de sensores remotos de variables oceanográficas y ambientales, desarrollando mi formación académica de manera óptima. Ha sido un honor trabajar con usted.

De igual manera, quiero agradecer profundamente al resto del comité de tesis doctoral, compuesto por el Dr. Luis Fernando Enríquez Ocaña, Dra. María Cristina Peñalba Garmendía y Dra. Gudelia Figueroa Preciado por todo el tiempo dedicado a la revisión exhaustiva, compartiendo observaciones, recomendaciones y correcciones bastante valiosas

con el objetivo de enriquecer a fondo este trabajo de investigación al igual que sus conocimientos transferidos, guiándome durante el desarrollo de esta investigación doctoral.

Al Dr. Hugo Herrera Cervantes del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) Unidad La Paz, quien fue mi sinodal externo de mi tesis de maestría y me recibió para realizar una estancia de investigación bajo su supervisión del 14 de octubre al 20 de noviembre del 2019 durante mi tercer semestre del doctorado, en donde aprendí habilidades de oceanografía física en el manejo de sensoria remota para la caracterización oceanografía y ambiental del viento al igual que sus efectos en los ecosistemas marinos. Ha sido un gusto conocerlo y poder trabajar con usted.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, institución del gobierno de México que me otorgó una beca durante mis estudios de Posgrado con el número de CVU 785574, de igual manera agradezco a la Dr. Ricardo García Morales por permitirme colaborar en su proyecto de investigación.

Finalmente, quisiera agradecer desde lo más profundo de mi ser al Dr. José Eduardo Valdez Holguín, quien fue mi director de tesis de licenciatura, maestría y en el primer año del doctorado. Sinceramente no tengo las palabras suficientes para agradecer todo lo que hizo por mí. Primero que nada, quiero agradecerle por haberme brindado excelentes clases a lo largo de mi formación académica, desde biología general y oceanografía en licenciatura hasta oceanografía, biología marina y sus seminarios de investigación del equipo del laboratorio durante mi formación en el Posgrado en Biociencias y por haberme aceptado por realizar mis estancias de investigación durante el quinto semestre de licenciatura, porque ahí fue cuando me atrapó por completo el maravilloso mundo de la oceanografía y la ecología marina y me hizo que amara esas líneas de investigación, decidiendo que quiero seguir aprendiendo cada vez más realizando mis tesis de licenciatura, maestría y del doctorado con usted. Gracias por ser todo un Profesor-Investigador ejemplar con sus enseñanzas dentro y fuera del área de clase y laboratorio caracterizadas por tener una seriedad y responsabilidad profesional ganándose el respeto de los profesores-investigadores del DICTUS al igual que el de los alumnos, entre ellos el mío. Gracias por su apoyo incondicional a lo largo de mi desarrollo académico y humano, por inculcarme la importancia de seguir actualizándose en adquirir nuevos conocimientos,

demostrando un entusiasmo para que siga aprendiendo día a día y su calidad humana en favor de mi formación profesional a lo largo de mi formación en mi Alma Mater. Fue todo un honor haber trabajado con usted, por haber sido su alumno y sobre todo su tesista. Donde quiera que se encuentre, le digo de todo corazón ¡Muchísimas gracias por todo, Dr. José Eduardo Valdez Holguín! Sé que en este momento estaría muy orgulloso de mí por haber alcanzado esta meta diciéndome “Felicidades, Charlie. Sigue adelante”. Estaré agradecido con usted por siempre a lo largo de mi vida.

Carlos Manuel Robles Tamayo.

Abril 2023.

RESUMEN

En el noroeste de México se han identificado Regiones Marinas Prioritarias (RMP), consideradas áreas importantes para la conservación de la biodiversidad. El análisis de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) es indispensable para la caracterización de procesos físicos y biológicos al ser considerada una variable esencial (climática y oceánica) para determinar tendencias de cambio en los ecosistemas marinos. Por otra parte, el análisis de Clorofila *a* (Chl *a*) es importante al cuantificar la biomasa del fitoplancton, considerada la base principal de redes tróficas en ecosistemas marinos, además de determinar niveles de productividad primaria y estado trófico. El objetivo de este trabajo es describir la variabilidad oceanográfica de 24 RMP localizadas en el noroeste de México a través del estudio de TSM y Chl *a* mediante mediciones mensuales de imágenes satelitales en diferentes periodos de tiempo. A través de un análisis de cluster de los valores de TSM, se determinaron 18 regiones que mostraron un gradiente latitudinal y una diferente variabilidad estacional en las regiones del Golfo de California y el Océano Pacífico con valores máximos durante agosto y septiembre y valores mínimos entre enero y marzo. Por otra parte, se obtuvo otra regionalización con los valores de Chl *a* al determinar 18 regiones con diferente variabilidad estacional entre las regiones del Océano Pacífico (valores máximos en primavera-verano y valores mínimos en otoño-invierno) y del Golfo de California (valores máximos en invierno-primavera y valores mínimos en verano-otoño). El análisis espectral de Fourier en cada región mostró 4 frecuencias principales de variación: anual, semianual, estacional e interanual, esta última asociada a los fenómenos El Niño y La Niña.

ABSTRACT

In Northwestern Mexico, Priority Marine Regions (PMR) have been identified, considered important areas for the conservation of the biodiversity. Sea Surface Temperature (SST) analysis is critical for the characterization of the physical and biological processes, as it is considered an essential variable (climatic and oceanic) to determine trends of change in the marine ecosystems. On the other hand, Chlorophyll *a* (Chl *a*) analysis is important for it helps quantifying the phytoplankton biomass, considered the main base of the trophic web in marine ecosystems, in addition to determine primary productivity levels and trophic state index. The objective of this work is to describe the oceanographic variability of 24 PMR located in the northwest of Mexico through the study of SST and Chl *a* through monthly measurements of satellite images in different time periods. Through a cluster analysis of SST values, 18 regions were determined that showed a latitudinal gradient and different seasonal variability in the regions of the Gulf of California and Pacific Ocean with maximum values during August and September and minimum levels between January and March. On the other hand, another regionalization was obtained with the Chl *a* values by determining 18 regions with different seasonal variability between the regions of the Pacific Ocean (maximum levels in spring-summer and minimum values in autumn-winter) and the Gulf of California (maximum levels in winter-spring and minimum levels in summer-autumn). The Fourier spectral analysis in each region showed 4 main frequencies of variation: annual, semiannual, seasonal and interannual, the latter one associated with the El Niño and La Niña phenomena.

INDICE GENERAL

	Página
APROBACIÓN	i
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
I. ANTECEDENTES.....	5
I.1. Criterios para la definición y establecimiento de Regiones Marinas Prioritarias (RMP) en México	5
I.2. Variabilidad ambiental y oceanográfica en el sistema océano-atmósfera y su efecto en los ecosistemas marinos y costeros del Pacífico Mexicano.....	8
I.3. Análisis oceanográficos en el Pacífico Sudcaliforniano y Golfo de California	12
II. JUSTIFICACIÓN	16
III. HIPÓTESIS CIENTÍFICA.....	17
IV. OBJETIVOS.....	18
IV.1. Objetivo general	18
IV.2. Objetivos específicos.....	18
V. METODOLOGÍA.....	19
V.1. Área de estudio	19
V.2. Caracterización oceanográfica y ambiental y obtención de datos mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila <i>a</i> (Chl <i>a</i>).....	24
V.3. Procesamiento y análisis de datos mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila <i>a</i> (Chl <i>a</i>).....	27
V.4. Análisis estadístico de datos mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila <i>a</i> (Chl <i>a</i>)	29
VI. RESULTADOS	32
VI.1. Caracterización de regiones biogeográficas en base a los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y concentración de Clorofila <i>a</i> (Chl <i>a</i>)	32
VI.2. Análisis de series de tiempo	39

VI.3. Análisis de series de tiempo de anomalías	48
VI.4. Análisis de Fourier	57
VI.5. Análisis de ciclo anual.....	64
VI.6. Análisis estadístico	71
VII. DISCUSIÓN	83
VII.1. Caracterización de regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano y Golfo de California y su ciclo anual	83
VII.2. Análisis de series de tiempo.....	90
VII.3. Análisis de series de tiempo de anomalías.....	94
VII.4. Análisis de Fourier	99
VII.5. Influencia en los ecosistemas marinos y costeros	102
VIII. CONCLUSIONES	106
IX. RECOMENDACIONES	109
X. LITERATURA CITADA	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa de las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) del noroeste de México para la obtención y análisis de datos mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila a (Chl a).	22
Figura 2.	Procesamiento de imagen satelital a través del software WIM/WAM para la obtención de datos mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) del noroeste de México.	26
Figura 3.	Procesamiento de imagen satelital a través del software WIM/WAM para la obtención de datos mensuales de Clorofila a (Chl a) de las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) del noroeste de México.	26
Figura 4.	Análisis de cluster de las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) del noroeste de México en base a los valores promedio mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM). Distancia de enlace: línea punteada.	33
Figura 5.	Regionalización del análisis de cluster de las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) del noroeste de México en base a los valores promedio mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM).	34
Figura 6.	Análisis de cluster de las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) del noroeste de México en base a los valores promedio mensuales de Clorofila a (Chl a). Distancia de enlace: línea punteada.	35
Figura 7.	Regionalización del análisis de cluster de las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) del noroeste de México en base a los valores promedio mensuales de Clorofila a (Chl a).	36
Figura 8.	Series de tiempo de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano.	42
Figura 9.	Series de tiempo de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.	43
Figura 10.	Series de tiempo de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.	44
Figura 11.	Series de tiempo de los niveles de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano.	46
Figura 12.	Series de tiempo de los niveles de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.	47
Figura 13.	Series de tiempo de los niveles de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.	48
Figura 14.	Series de tiempo de anomalías de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano.	51

Figura 15. Series de tiempo de anomalías de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.	52
Figura 16. Series de tiempo de anomalías de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.	53
Figura 17. Series de tiempo de anomalías de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano.....	55
Figura 18. Series de tiempo de anomalías de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.	56
Figura 19. Series de tiempo de anomalías de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.	57
Figura 20. Análisis de Fourier de las series de tiempo de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.	59
Figura 21. Análisis de Fourier de las series de tiempo de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.	60
Figura 22. Análisis de Fourier de las series de tiempo de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.	61
Figura 23. Análisis de Fourier de las series de tiempo de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.	62
Figura 24. Análisis de Fourier de las series de tiempo de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.	63
Figura 25. Análisis de Fourier de las series de tiempo de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.	64
Figura 26. Análisis de ciclo anual de los niveles de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano. ...	66
Figura 27. Análisis de ciclo anual de los niveles de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.	67
Figura 28. Análisis de ciclo anual de los niveles de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.	68
Figura 29. Análisis de ciclo anual de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano.	69
Figura 30. Análisis de ciclo anual de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.....	70
Figura 31. Análisis de ciclo anual de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Lista de coordenadas geográficas de las Regiones Marinas Prioritarias del noroeste de México.....	23
Tabla 2.	Estadística descriptiva de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.....	38
Tabla 3.	Estadística descriptiva de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.	39
Tabla 4.	Estadística descriptiva de las series de tiempo suavizadas de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.....	41
Tabla 5.	Estadística descriptiva de las series de tiempo suavizadas de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.	45
Tabla 6.	Estadística descriptiva de las series de tiempo de anomalías suavizadas de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.	50
Tabla 7.	Estadística descriptiva de las series de tiempo de anomalías suavizadas de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.	54
Tabla 8.	Valores de la Prueba de Elliot-Rothenberg ($p < 0.05$) para la detección de tendencias de cambio de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.....	72
Tabla 9.	Valores de la Prueba de Elliot-Rothenberg ($p < 0.05$) para la detección de tendencias de cambio de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.	73
Tabla 10.	Prueba de permutación por pares del análisis intranual de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) en primavera durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México.....	75
Tabla 11.	Prueba de permutación por pares del análisis intranual de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) en verano durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México.....	76
Tabla 12.	Prueba de permutación por pares del análisis intranual de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) en otoño durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México.....	77
Tabla 13.	Prueba de permutación por pares del análisis intranual de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) en invierno durante los eventos	

interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México..... 78

Tabla 14. Prueba de permutación por pares del análisis intranual de la concentración de Clorofila a (Chl a) en primavera durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México. 79

Tabla 15. Prueba de permutación por pares del análisis intranual de la concentración de Clorofila a (Chl a) en verano durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México.... 80

Tabla 16. Prueba de permutación por pares del análisis intranual de la concentración de Clorofila a (Chl a) en otoño durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México.... 81

Tabla 17. Prueba de permutación por pares del análisis intranual de la concentración de Clorofila a (Chl a) en invierno durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México.... 82

INTRODUCCIÓN

La mayoría de la superficie del Planeta Tierra está compuesta por océanos y mares, considerados sistemas dinámicos asociados a corrientes superficiales y profundas, que en conjunto con factores como la temperatura y salinidad establecen características en la columna de agua de los océanos. Lo anterior comprende fenómenos tales como la estratificación, los sistemas de corrientes marinas, efectos de surgencias y procesos de mezcla en la columna de agua, que determinan (a nivel local y regional) las características del clima, el transporte de calor y los niveles de agua en la atmósfera, contribuyendo a la biodiversidad del planeta en los ecosistemas marinos y costeros (Castro y Huber., 2007; Lara-Lara *et al.*, 2008b).

Los océanos presentan gran importancia desde un punto de vista ecológico, económico y social, al ser un componente determinante del clima global, al determinar la condición límite de la temperatura atmosférica en el 70% de la cobertura del Planeta Tierra.

Es importante mencionar que los océanos absorben el 97% de la radiación solar que incide en ellos, y proporcionan el 85% del vapor de agua a la atmósfera, debido a esto son considerados reguladores del clima al servir como masa térmica para el almacenamiento de calor (Constanza, 1999). Por otra parte, los océanos presentan una gran diversidad biótica, y por ende una gran cantidad de recursos naturales, los cuales son aprovechados dentro de actividades económicas primarias como la acuicultura y la pesca (Martínez-López *et al.*, 2001; Barraza-Guardado *et al.*, 2014; Barbier, 2017).

México cuenta con 11,592.76 km de línea de costa, 231,813 km² de mar territorial y un total de 3,149,920 km² de zona económica exclusiva, sitios geográficos caracterizados por presentar diferentes ambientes con una alta riqueza oceánica y costera, cuya posición geográfica clave determina su alta diversidad biológica y ecosistémica (Lara-Lara *et al.*, 2008b). Entre las regiones marítimas importantes dentro del país se encuentra el Pacífico Sudcaliforniano, el cual comprende la Península de Baja California y el Golfo de California. Estas áreas se caracterizan por tener hábitats marinos ricos en biota, como los mamíferos marinos y tiburones en el caso del Pacífico (Rosales-Naudaca *et al.*, 2011;

Saldaña-Ruíz *et al.*, 2019) al igual que especies endémicas como la Totoaba y Vaquita Marina en el Golfo de California (Lluch-Cota *et al.*, 2007 y 2010; Arreguín-Sánchez *et al.*, 2017). Ambas regiones marinas presentan diversas especies importantes para su conservación debido a sus altos niveles de productividad primaria, característica que las hace también importantes en las pesquerías de diferentes especies (Espinosa, 2004; Lluch-Cota *et al.*, 2007 y 2010).

Durante el año 1998 la Comisión Nacional de la Biodiversidad (CONABIO), propone el establecimiento de 70 Regiones Marinas Prioritarias (RMP) en México, consideradas zonas importantes para la conservación de la biodiversidad y recursos naturales mediante la caracterización y análisis de diferentes criterios ambientales (biótico y abiótico), económicos (pesquerías, turismo, ecoturismo) y de amenaza (impacto ambiental, contaminación marina) (Arriaga-Cabrera *et al.*, 2009). El análisis de estos criterios permitió la caracterización espacial de cada una de las RMP a través de herramientas de batimetría, así como mapeo oceánico y costero, considerando sus aspectos biológicos para obtener información acerca de los ecosistemas presentes en cada una de estas regiones (Arriaga-Cabrera *et al.*, 2009; Wilkinson *et al.*, 2009).

En la actualidad se han utilizado diferentes variables oceanográficas y climatológicas para la descripción de la variabilidad ambiental y dinámica oceanográfica de los ecosistemas marinos y costeros. Entre ellas se encuentran la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila *a* (Chl *a*). La TSM es considerada una de las variables más importantes en oceanografía al ser clasificada como una variable climática y oceanográfica esencial, que influye en las características fisicoquímicas y aspectos biológicos de la columna de agua (Filipponi *et al.*, 2017; Fingas, 2019). Por otra parte, el análisis de Chl *a* es clave para el estudio de los océanos en la cuantificación de la biomasa del fitoplancton, considerada la base principal de las redes tróficas en el ecosistema pelágico del océano, pues este es el responsable de la transformación de la energía luminosa y carbono inorgánico a compuestos orgánicos en la cadena trófica, determinando la producción primaria (fotosíntesis) en los océanos (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010b; Valiela, 1995).

El análisis de TSM y Chl *a* es importante para el estudio asociado a tendencias de cambio (natural o antropogénico) en los ecosistemas marinos (Morales-Hernández *et al.*,

2016). Durante el pasado (XX) y el presente (XXI) siglos, las actividades antropogénicas han modificado las condiciones climáticas en el Planeta Tierra y han tenido repercusiones en los aspectos fisicoquímicos de la columna de agua, incrementando los niveles de TSM (Harley *et al.*, 2006; Alexandre *et al.*, 2018) e inhibiendo la disponibilidad de nutrientes, haciendo declinar los valores de Chl *a* (Boyce *et al.*, 2010; Boyce *et al.*, 2014). Por otra parte, los eventos interanuales como el Niño-Oscilación del Sur (El Niño-Southern Oscillation; ENSO por sus siglas en inglés) generan una interacción entre el océano y la atmósfera originando una variabilidad climática con intervalos irregulares en la región de los trópicos con sus dos fases El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría) (Rohli y Vega, 2015) que tiene efectos en los valores de TSM y Chl *a* al igual que en el propio ecosistema (Soto-Mardones *et al.*, 1999; Lluch-Cota *et al.*, 2010). Lo anterior, genera gran incertidumbre, pues existen pocos estudios que intenten determinar cuál es el efecto de 1) la tendencia generalizada de cambio del clima y 2) las variaciones intranuales, interanuales e incluso interdecadales, en las variables antes expuestas.

El uso de imágenes satelitales obtenidas mediante percepción remota es una técnica útil para la observación, cuantificación y análisis de variables oceanográficas a diferentes escalas espacio-temporales (Rajeesh y Dwarakish, 2015). Estudios previos han enfatizado el uso de percepción remota en el análisis de variables como la TSM y Chl *a*, con el fin de obtener información sinóptica de datos de áreas extensas, para describir aspectos físicos y biológicos de la columna de agua en diferentes escalas espaciales y temporales (Longhurst., 2007; Gayathri *et al.*, 2015). Específicamente, los procesos a mesoescala, que presentan dimensiones desde decenas hasta cientos de kilómetros y una duración que va desde semanas hasta meses (Oschlies y Garçon, 1998; López-Calderón *et al.*, 2006). Generalmente, estos son producto de la interacción del forzamiento atmosférico y oceánico en conjunto con la barimetría, generando diferentes fenómenos tales como remolinos, surgencias, filamentos y frentes térmicos (Zamudio *et al.*, 2008; García-Morales *et al.*, 2017a). Los fenómenos anteriormente mencionados guardan una estrecha relación con la TSM y Chl *a*, a menudo afectando su variabilidad estacional e interanual (García-Morales *et al.*, 2017a; Farach-Espinoza *et al.*, 2021; Farach-Espinoza *et al.*, 2022).

El análisis de TSM y Chl *a* ha permitido realizar estudios enfocados a procesos de regionalización de ecosistemas marinos y costeros, considerado un tema esencial en el manejo de los recursos y su caracterización ambiental que permiten describir fenómenos climatológicos y aspectos oceanográficos que influyen en la productividad de los ecosistemas marinos (Santamaría-del-Angel *et al.*, 1994; Heras-Sánchez *et al.*, 2019). Debido a su importancia y estructura trófica de los ecosistemas marinos y costeros, es importante delimitar y caracterizar los niveles de TSM y concentración de Chl *a*, en función de la variabilidad oceanográfica.

Se han realizado diversos trabajos en el Pacífico Sudcaliforniano y Golfo de California con el objetivo de describir la variabilidad oceanográfica, condiciones ambientales, procesos de regionalización y eventos de mesoescala mediante el análisis de TSM y Chl *a*, sin embargo, no han sido desarrollados en todas las RMP del noroeste de México, resultando en una falta de estudios de variabilidad. Las PMR son consideradas sitios vulnerables a cambios naturales o antropogénicos, por lo que se requiere más información que contribuya a estudios a largo plazo de TSM y Chl *a* considerados indispensables para la caracterización de procesos físicos, climatológicos y biológicos de los océanos al igual que para los estudios de tendencias de cambio en ecosistemas marinos y costeros y para determinar cómo influye en la distribución y abundancia de organismos marinos y su efecto en el funcionamiento del ecosistema (García-Morales *et al.*, 2017a; García-Morales *et al.*, 2017b; Heras-Sánchez *et al.*, 2019).

El objetivo de este trabajo es describir la variabilidad ambiental y dinámica oceanográfica de RMP del noroeste de México a través del análisis de datos de TSM y Chl *a*. Específicamente, se busca caracterizar lo anterior, mediante el uso de percepción remota, haciendo énfasis en el análisis de fenómenos macro climáticos que pudieran afectar ambas variables entre estaciones o entre años.

I. ANTECEDENTES

I.1. Criterios para la definición y establecimiento de Regiones Marinas Prioritarias (RMP) en México

Las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) son ecorregiones importantes relativamente grandes caracterizadas por tener condiciones climáticas, características ecológicas y comunidades naturales particulares, presentando una relación con los seres vivos de su entorno, siendo sitios importantes para la conservación de la biodiversidad. En base a estas características, el establecimiento de estas RMP responde a una necesidad para la conservación de la biodiversidad de los ecosistemas marinos de América del Norte, además de servir para fomentar el conocimiento del medio marino, planeación de investigaciones, iniciativas de política pública y decisiones de manejo, difusión y educación para la conservación (Wilkinson *et al.*, 2009).

En la actualidad, las estrategias de manejo y aprovechamiento sustentable de los recursos marinos, conservación de biodiversidad, indicadores de presión-estado-respuesta, planificación y gestión integral de los mares se basan en conocimiento sólido con un marco analítico enfocado al ecosistema. Estos requerimientos pueden abordarse en los siguientes aspectos con un marco o sistema de clasificación de los ecosistemas marinos, como es el caso de las RMP (Wilkinson *et al.*, 2009):

Escalable: que responda a las perspectivas e intereses locales por naturaleza al igual que los de mayor alcance.

Enfoque ecosistémico: que se base en una gama de parámetros biológicos, oceanográficos y fisiográficos que estén fuertemente relacionados para que contemplen de forma adecuada los factores socioeconómicos.

Vinculado: que esté asociado con otros mapas y sistemas de clasificación marinos y terrestres al igual que otras disciplinas.

Estos aspectos enfocados a las RMP fomentan la conservación de la biodiversidad como prioridad ante la crisis ambiental que se presenta al nivel mundial que se ha

incrementado en las últimas décadas. En este contexto, es necesario el desarrollo y uso de nuevas metodologías para analizar los cambios espacio-temporales de los ecosistemas, tomando en cuenta la diversidad biológica, la estructura y funcionamiento del ecosistema al igual que las respuestas a diferentes intensidades de disturbio y modificación (Hannah *et al.*, 2002; Pretty y Smith, 2004; Regan *et al.*, 2008).

La identificación de RMP para la conservación de la biodiversidad en América del Norte es el resultado de diversas iniciativas implementadas por instituciones gubernamentales y no gubernamentales para generar un desarrollo adecuado de la investigación y conservación de la biodiversidad; esto se realiza mediante diferentes metodologías para su identificación y clasificación en base a los siguientes criterios (Arriaga-Cabrera *et al.*, 2009):

Criterios ambientales: Son los criterios donde se toma en cuenta los medios biótico y abiótico, los cuales son parte de la integridad ecológica funcional; diversidad de hábitat; endemismo; riqueza de especies; especies indicadoras; zonas de migración, crecimiento, reproducción y refugio; procesos oceánicos relevantes, los cuales pueden ser asociados a la dinámica física (transporte de Ekman, procesos de surgencias, efecto de marea, turbulencia) y a la concentración, retención y enriquecimiento de nutrientes y fitoplancton. Todos estos criterios bióticos y abióticos son tomados en cuenta por la influencia que tienen en los procesos de reproducción, alimentación, crecimiento de diversos organismos marinos.

Criterios económicos: Debido a que en las RMP convergen diferentes sectores enfocados a diferentes actividades tanto a nivel oceánico como a nivel costero, se toman también en cuenta criterios económicos que pueden desarrollarse en las regiones, los cuales son los siguientes: especies de importancia comercial; zonas pesqueras importantes; tipos de organización pesquera; zonas turísticas importantes; tipos de turismo; importancia económica para otros sectores (petrolero, industrial, minero, transportes marítimos), uso y extracción de recursos estratégicos para el desarrollo económico de la región (nódulos de manganeso, cobalto, gas natural, petróleo).

Criterios de amenaza: Considerando que se realizan diversas actividades en estas áreas, pueden generar un impacto ambiental que puede influir en variables ambientales y

oceanográficas, y por consecuencia, en la distribución y abundancia de organismos marinos, afectando el funcionamiento del ecosistema. Por ello también es necesaria la identificación de zonas de conflicto de interés con la conservación de la biodiversidad. Los criterios de amenaza que se analizan son los siguientes: modificación del entorno (relleno e invasión de áreas propensas a las inundaciones, destrucción de arrecifes, descarga de agua dulce); contaminación marina; efectos a distancia (aporte de sedimentos), presión en especies clave de la zona; concentración de especies en riesgo de peligro de extinción; impacto ambiental causado por embarcaciones; especies introducidas; prácticas de manejo inadecuadas.

Todos estos criterios son analizados para generar la delimitación espacial de los polígonos de cada RMP mediante procesos de cartografía y batimetría a nivel oceánico y costero correspondientes a las provincias biogeográficas de cartas batimétricas de Áreas Naturales Protegidas (ANP) a nivel estatal y federal, tomando en cuenta los puntos de muestreo de diversos grupos biológicos que se encuentran en el área de estudio (Arriaga *et al.*, 1998; Arriaga-Cabrera *et al.*, 2009). El análisis de estos criterios trata de brindar una mejor información sobre los ecosistemas marinos con el objetivo de generar el conocimiento oceanográfico y satisfacer necesidades e intereses de diversos sectores asociados a estas regiones. Sin embargo, para realizar la descripción del ecosistema, es importante que se estudie y maneje de forma precisa como un único sistema, por lo que la manera más idónea de realizar esto es poder diferenciar un área de mar de otra, es decir, mediante un proceso de regionalización.

El proceso de regionalización es considerado una herramienta importante para el establecimiento de unidades geográficas temáticas (Luccarelli, 1995). En el caso de las regionalizaciones biológicas, estas se caracterizan por comprender diferentes componentes del área como el clima, relieve, y otros recursos naturales, cuya cuantificación y clasificación es utilizada para la conservación de la biodiversidad (Wilkinson *et al.*, 2009), estableciendo áreas relativamente grandes que presentan un conjunto geográficamente distintivo de comunidades y ecosistemas que comparten un número importante de especies, condiciones ambientales y dinámicas de especies, poblaciones, comunidades y ecosistemas (Abell *et al.*, 1999; Jepson, 2003), teniendo como objetivo mantener el conjunto de

condiciones ecológicas que prevalecen en un área geográfica determinada con especies específicas y permitiendo realizar evaluaciones de los ecosistemas, hábitats, especies y variables representativas del medio marino.

I.2. Variabilidad ambiental y oceanográfica en el sistema océano-atmósfera y su efecto en los ecosistemas marinos y costeros del Pacífico Mexicano

El océano y la atmósfera presentan una frontera en común que es la interfaz aire-océano, por la cual se permite el intercambio de materia y energía en diferentes números de formas y escalas temporales que pueden ser desde diarias hasta decadales (Bigg., 1996). Esta interacción océano atmósfera se caracteriza por jugar un papel de importancia en la variabilidad ambiental y evolución de los efectos de los cambios de clima en un área específica, siendo complicado determinar cómo el océano afecta la circulación atmosférica a través de soluciones analíticas y razonamientos físicos (Manabe., 1969). Los efectos más importantes de esta interacción océano-atmósfera corresponden a los transportes de calor y gases, las variaciones en el nivel medio del mar y el desarrollo de sistemas de corrientes derivado de los gradientes de densidad asociados a la variabilidad de la temperatura y a los cambios de salinidad producidos por el efecto de evaporación (Bigg, 1996; Ruíz-Villareal *et al.*, 2012). Cabe mencionar que los océanos influyen en las condiciones atmosféricas, principalmente en los niveles más bajos mediante el intercambio de calor, agua, sales y gases, sin embargo. Estos diferentes procesos de la interacción océano-atmósfera ocurren con distintas frecuencia e intensidad, y tienen un efecto en la variabilidad de TSM y Chl *a*, siendo determinadas por la interacción océano atmósfera asociados a sus patrones de circulación atmosférica (Shelton, 1988; Bigg, 1996; Chapin III *et al.*, 2002; Garrison, 2010).

La circulación atmosférica se define como el movimiento a gran escala del aire presente en la atmósfera que en conjunto con los sistemas de corrientes de los océanos distribuyen el calor derivado de la energía solar en el Planeta Tierra. Esta distribución espacial de energía determina variaciones globales de temperatura en dimensiones verticales y horizontales localizadas en bajas y altas latitudes (Shelton, 1988), permitiendo

mantener la estructura vertical de la temperatura y desarrollando patrones de estacionalidad a lo largo del año que contribuyen a las características climáticas de un área determinada. Los movimientos de masas de aire presentes en la atmósfera se deben a los gradientes de presión, los cuales determinan la dirección y velocidad de los vientos con diferentes variabilidades temporales (Shelton, 1988; Bigg, 1996).

Por otra parte, la circulación oceánica complementa la circulación atmosférica como el mayor mecanismo de distribución de energía en la superficie terrestre, estando determinada por los cambios de densidad por la interacción océano-atmósfera y por el efecto de viento que causa desplazamiento en la superficie oceánica (Shelton., 1988). La circulación oceánica de la capa superficial de la columna de agua está determinada por los efectos del viento, mientras que en las aguas profundas, la circulación es definida por las variaciones de la densidad asociadas a las diferencias de temperatura y salinidad que tienen un efecto de gradiente latitudinal derivado de los flujos de calor, dando origen al término de circulación termohalina que tiene una participación importante en el sistema climático y en el proceso de re oxigenación de aguas profundas (Berner y Berner., 2012; Rodríguez-Martínez., 2013).

En base a las características de la circulación atmosférica y oceánica, se sabe que son sistemas dinámicos que presentan ciertos modos de variabilidad que reflejan patrones climáticos y sistemas de circulación que ocurren en diferentes escalas temporales, así como la distribución de elementos climatológicos como la precipitación y la temperatura (Luna *et al.*, 2004; Guarín y Taboada., 2010).

Sin embargo, lo largo de los siglos XX y XXI se han presentado cambios en las condiciones climáticas alrededor del Planeta Tierra debido al aumento de las actividades antropogénicas. Estas han sido asociadas al cambio climático y han generado la modificación de aspectos fisicoquímicos en los ecosistemas marinos y costeros mediante el cambio de la temperatura en el continente y en los océanos, el incremento de los valores promedio de la TSM al igual que en los niveles de estratificación de la columna de agua y cambios en los procesos atmosféricos (Harley *et al.*, 2006; Doney *et al.*, 2012; Alexandre *et al.*, 2018). El cambio climático genera un calentamiento global, acidificación y desoxigenación en los océanos, afectando los diversos procesos oceanográficos (McLean *et*

al., 2001). Estas alteraciones, asociadas al cambio climático y a las actividades antropogénicas, generan un impacto en los patrones de circulación de los océanos (Lara-Lara *et al.*, 2008a) y en la limitación de la disponibilidad de nutrientes causando un decrecimiento en su concentración (Boyce *et al.*, 2010; Boyce *et al.*, 2014). Además, estos cambios tienen una influencia en la productividad, desarrollo, alimentación, reproducción, distribución y abundancia de los organismos marinos, provocando cambios en el funcionamiento de los ecosistemas (Martínez-Arroyo *et al.*, 2011; Yao y Somero., 2014) y alterando diversos procesos y características biológicas en los ecosistemas marinos y costeros a diferentes escalas espacio-temporales (Brierley y Kingsford., 2009; Hoegh-Guldberg y Bruno., 2010; Doney *et al.*, 2012; Yao y Somero., 2014).

En el Pacífico Mexicano pueden presentarse cambios en aspectos climatológicos asociados al ENSO, fenómeno interanual que forma parte de la interacción océano-atmósfera que puede generar un patrón persistente de anomalías de presión a gran escala y que puede abarcar grandes áreas geográficas. Estas interacciones océano-atmósfera donde las temperaturas oceánicas superficiales cálidas y frías pueden influir en los patrones de precipitación de áreas distantes de la Tierra se denominan teleconexiones (Ahrens., 2007), las cuales puede perdurar varios años consecutivos y presentarse su influencia en la variabilidad interanual e interdecadal de la circulación atmosférica, abarcando diferentes cuencas oceánicas al igual que continentes. En el caso del hemisferio norte, los índices de teleconexión pueden ser aplicados para analizar su variabilidad climática, considerándose principalmente la temperatura oceánica y la presión atmosférica, que pueden influir en el clima tanto a nivel regional como global en sus patrones climáticos.

En este contexto, existen diversas interacciones océano-atmósfera que pueden presentar un efecto a largo plazo en los patrones climáticos globales. Un ejemplo es la Oscilación Decadal del Pacífico (Pacific Decadal Oscillation; PDO por sus siglas en inglés) que describe la variabilidad mensual de la temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico a los 20° N. Presenta una periodicidad de 15 a 20 años presentando cambios en la temperatura que generan un impacto en el clima de Norteamérica alterando el patrón de vientos, mostrando una fase positiva (cálida) y una negativa (fría). Durante la fase positiva se presentan aguas superficiales inusualmente cálidas a lo largo de la costa oeste de

América del Norte, mientras que el Pacífico Norte Central permanece más frío de lo normal. Al mismo tiempo, el Ciclón Aleutiano en el Golfo de Alaska se fortalece, causando mayores tormentas en los territorios de Alaska y California y por consecuencia, hace que los inviernos sean más cálidos y secos en el noroeste de América del Norte. Mientras que durante la fase negativa se tienen aguas superficiales más frías que el promedio a lo largo de la costa oeste de América del Norte al igual que aguas superficiales más cálidas de lo normal que abarcan desde Japón hasta el Pacífico Norte Central. Los inviernos en esta fase suelen ser más fríos y húmedos en el noroeste de América del Norte y más secos en el sur de Estados Unidos (Ahrens., 2007).

Por otra parte, en el Pacífico Sudcaliforniano al igual que en el Golfo de California, áreas localizadas en el Pacífico Mexicano, presentan eventos de carácter interanual, cuya variación principal que se detecta es el ENSO debido a que son áreas que tienen influencia de la zona ecuatorial y se ven afectadas en los aspectos climatológicos y oceanográficos, generando un impacto en los ecosistemas marinos y costeros, alterando los niveles de TSM y concentración de Chl *a*. El fenómeno interanual ENSO es una interacción entre el océano y la atmósfera que se desarrolla en la región del Océano Pacífico Tropical con una frecuencia de entre 2 y 7 años, caracterizado por presentar una variabilidad climática y oceanográfica (Rohli y Vega, 2015). Este fenómeno tiene dos etapas: una etapa cálida denominada “El Niño” y una etapa fría conocida como “La Niña”, las cuales tienen un efecto en los niveles de TSM y en la concentración de Chl *a* (Soto-Mardones *et al.*, 1999; Lluch-Cota *et al.*, 2010).

La fase cálida de El Niño se caracteriza por desarrollar un calentamiento anormal de la superficie de agua a lo largo del Océano Pacífico Ecuatorial Oriental, con conexiones climáticas globales, y es considerada la variabilidad dominante cíclica del clima en escalas sub decadales (Yen *et al.*, 2009). Además del calentamiento oceánico anormal en el Pacífico, se presenta una alteración en la presión atmosférica en el nivel del mar tropical entre el Pacífico Oriental y Occidental asociada al debilitamiento de los vientos alisios sobre el Pacífico Tropical (Hamedani-Azmoordehfar y Ali-Azarmsa, 2013; Vikas y Dwarakish, 2015). En consecuencia, esto genera un proceso de advección de aguas cálidas en el este de la cuenca oceánica, que deprime la termoclina en la columna de agua y con

ello, debilita los procesos de surgencias de agua fría ricas en nutrientes a lo largo de la costa oeste de América del Sur, lo cual afecta la productividad biológica del fitoplancton. El incremento en la TSM, a su vez, altera los patrones de precipitación, (Vikas y Dwarakish, 2015) al igual que las actividades económicas de la zona costeras como las pesquerías al generar alteraciones biológicas severas como la migración, el aumento de la tasa de mortalidad, fallas en el reclutamiento de individuos y crecimientos somáticos disminuidos (Lluch-Cota *et al.*, 1999).

Durante la fase fría de La Niña, por el contrario, se genera un aumento en la intensidad de los vientos alisios, lo cual incrementa una acumulación de agua cálida en el Pacífico Ecuatorial Occidental, y genera un proceso de enfriamiento en el Pacífico Tropical Oriental fomentando los procesos de surgencias de manera significativa. Esto genera una depresión de la termoclina del Pacífico Ecuatorial Oriental y una termoclina más somera en el lado oeste (Trenberth, 1997; Rohli y Vega, 2015).

Con base en las características de la circulación atmosférica y oceánica, se sabe que los eventos interanuales El Niño y La Niña son sistemas dinámicos que presentan ciertos modos de variabilidad que influyen en patrones climáticos y los sistemas de circulación. Además de las características previamente mencionadas, presentan diferentes escalas temporales y la distribución de elementos ambientales y oceanográficos como la variabilidad de niveles de TSM y concentración de Chl *a* de los ecosistemas marinos y costeros.

I.3. Análisis oceanográficos en el Pacífico Sudcaliforniano y Golfo de California

El Pacífico Sudcaliforniano y Golfo de California son áreas marinas con alta importancia ecológica y oceanográfica, por lo que se han realizado varios estudios mediante el análisis de diversas variables ambientales y oceanográficas, para explicar su variabilidad que abarca diferentes frecuencias de tiempo, desde estacionales hasta interanuales. Estas frecuencias de variación temporal se caracterizan por presentar una influencia en las condiciones ambientales en los diversos ecosistemas al igual que en sus recursos marinos.

En el Pacífico Sudcaliforniano, Hernández-de la Torre *et al.* (2015) regionalizaron la zona oceánica y costera del Pacífico Norte frente a la Península de Baja California mediante estimaciones de temperatura y productividad primaria, obteniendo 9 regiones (3 oceánicas y 6 costeras) con una variabilidad estacional de forma latitudinal a diferentes profundidades para la temperatura y productividad debido a la presencia de aguas subárticas y subtropicales y efectos de surgencias y forzamientos físicos que generan un transporte vertical de nutrientes a la zona eufótica. Ortiz-Ahumada *et al.* (2018) caracterizaron la TSM, Chl *a* y productividad primaria en el extremo sur del Sistema de la Corriente de California reportando una variabilidad estacional mayor que la interanual con valores de Chl *a* y productividad primaria mayores en la zona costera que en la oceánica, detectando valores máximos entre febrero y agosto y valores mínimos entre septiembre y enero. Al mismo tiempo, registraron valores de TSM mayores en la zona oceánica en comparación de la zona costera con valores mínimos de enero a junio y valores máximos de julio a diciembre. Lo anterior se asoció a la variación espacial de la dinámica costera del Sistema de la Corriente de California que presenta un efecto a lo largo del área de estudio generando diferentes valores de TSM y Chl *a*.

Por otra parte, se han hecho estudios enfocados al análisis de la variabilidad interanual que reportan que este tipo de variaciones tienen un efecto en el ecosistema asociado a los efectos de las anomalías en los niveles de TSM y Chl *a*. Así, la influencia de un calentamiento anómalo, particularmente en la superficie, genera cambios en la comunidad fitoplanctónica en la columna de agua (González-Silvera *et al.*, 2020). Otro estudio (Cervantes-Duarte *et al.* 2021a) reporta que el efecto de la variabilidad interanual está asociada al efecto de eventos de calentamiento como “El Niño” y “El Blob” caracterizados por presentar masas de agua relativamente cálida a lo largo de la costa de Norteamérica del Océano Pacífico, que causa un efecto de estratificación significativo en la columna de agua limitando la disponibilidad de nutrientes a nivel superficial.

Estudios similares se han realizado en el Golfo de California enfocados al análisis oceanográfico mediante la regionalización, como es el caso de Heras-Sánchez *et al.* (2019) que realizaron una caracterización oceanográfica a través de un análisis de clúster utilizando una serie de datos mensuales de TSM y Chl *a* obtenidos de sensores remotos,

obteniendo como resultado 4 conglomerados correspondientes a la TSM y 3 para la Chl *a* determinando en total 12 regiones para todo el Golfo de California con diferentes niveles tróficos al igual que una clara estacionalidad en cada una de las variables, asociada principalmente a fenómenos físicos y climatológicos, los cuales, a la vez, causan una relación inversa entre la variabilidad entre la concentración de Chl *a* y TSM. Por otra parte, también se han realizado estudios de variabilidad estacional como el que fue reportado por Herrera-Cervantes (2019) en la Bahía de La Paz, obteniendo que la amplitud anual es la señal dominante en los valores de TSM (valores máximos en septiembre y mínimos en febrero) y Chl *a* (valores máximos en invierno-primavera y valores mínimos en verano-otoño) asociado al ciclo estacional derivado del efecto de calentamiento y enfriamiento de la bahía por los efectos de surgencias costeras reguladas por el patrón estacional del forzamiento del viento y el intercambio de agua entre la bahía y el Golfo de California. Resultado similar fue reportado en el mismo sitio por Cervantes-Duarte *et al.* (2021b) obteniendo una variabilidad estacional en la Productividad Primaria Neta (PPN) con valores máximos en invierno-primavera y valores mínimos en verano-otoño, resultado asociado a la baja profundidad de las aguas de carácter subtropical en conjunto con los procesos de divergencia y efectos de mezcla que provee una alta disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica, incrementando la PPN y por consecuencia la biomasa del fitoplancton.

Por otra parte, también se han realizado estudios enfocados al análisis de la variabilidad interanual como el de Herrera-Cervantes *et al.* (2020) que muestra anomalías positivas de Chl *a* asociadas a la fase fría del ENSO en conjunto con un patrón de forzamiento del viento que inhibe los efectos de los eventos Niño. Igualmente se da una interrupción significativa en la productividad biológica debido al evento Niño 2015-2016 en el que se desarrollaron anomalías cálidas y un debilitamiento de la velocidad del viento, factores físicos que derivaron en la alteración de procesos biológicos, mostrando la interacción entre ambos procesos. Otro estudio (Farach-Espinoza *et al.* 2021) describe los diversos procesos de mesoescala en el Golfo de California mediante datos de TSM y Chl *a* identificando la frecuencia de cada evento al igual que su duración y evaluando la variabilidad interanual con los índices climáticos siguientes: Índice ENSO Multivariado

(Multivariate ENSO Index; MEI por sus siglas en inglés) y Oscilación Decadal del Pacífico (Pacific Decadal Oscillation; PDO por sus siglas en inglés), reportando que la variabilidad interanual y su frecuencia están asociadas a eventos Niño y Niña fuertes e intensos.

La mayoría de estos estudios han sido realizados en áreas muy específicas del Pacífico Sudcaliforniano al igual que en el Golfo de California, particularmente en áreas marinas y costeras. Sin embargo, no han sido realizados en las diversas RMP localizadas en el noroeste de México, resultando en una falta de estudio en estas áreas de gran importancia ecológica, por lo que se requiere el aporte de más información ambiental y oceanográfica mediante el análisis de variables como la TSM y Chl *a*, consideradas importantes en los ecosistemas marinos y costeros para realizar caracterizaciones ecológicas óptimas, análisis de tendencias de cambio asociadas a factores ambientales, oceanográficos o antropogénicos que pueden tener un posible efecto en los recursos marinos, fomentando el conocimiento de la oceanografía de estas regiones a través del uso de percepción remota.

II. JUSTIFICACIÓN

Las observaciones en los océanos a largo plazo son fundamentales en el análisis y predicción de cambios en los ecosistemas marinos, y se requieren para desarrollar un manejo adecuado de los mismos. El análisis de variables ambientales y oceanográficas en regiones marinas prioritarias del noroeste de México nos permitirá entender las tendencias de cambio asociadas a factores ambientales y oceanográficos, mismas que influyen en los ecosistemas y los recursos marinos de la zona.

III. HIPÓTESIS CIENTÍFICA

La variabilidad de las condiciones ambientales y oceanográficas en las regiones marinas prioritarias del noroeste de México está influenciada por la dinámica del Océano Pacífico (corrientes y climatología) y su ubicación geográfica que generan procesos de diferentes escalas espacio-temporales de alta frecuencia (cambios estacionales y anuales) y de baja frecuencia (como El Niño y La Niña).

IV. OBJETIVOS

IV.1. Objetivo general

Analizar la variabilidad ambiental y dinámica oceanográfica espacio-temporal de en regiones marinas prioritarias del noroeste de México (Pacífico Sudcaliforniano y Golfo de California), a través del análisis de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y de Clorofila *a* (Chl *a*) medidas vía percepción remota.

IV.2. Objetivos específicos

- Determinar variabilidad de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) entre 1981 y 2018 y de Clorofila *a* (Chl *a*) de 1997 a 2018 y sus principales frecuencias de variación en el noroeste de México.
- Caracterización de regiones biogeográficas de las Regiones Marinas Prioritarias del noroeste de México mediante el análisis de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila *a* (Chl *a*).
- Analizar el efecto intranual y estacional del ENSO en los niveles de TSM y concentración de Chl *a*.

V. METODOLOGÍA

V.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a dos regiones marinas importantes del Océano Pacífico Mexicano: El Pacífico Sudcaliforniano y el Golfo de California. El Pacífico sudcaliforniano presenta una circulación atmosférica dominada por el alto centro de presión del Pacífico Norte (Northern Pacific High; NPH por sus siglas en inglés) (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010a) y forma parte del Sistema de la Corriente de California (desde la Columbia Británica hasta la Península de Baja California), abarcando ecosistemas marinos y costeros con productividad elevada debido a los vientos que generan procesos de surgencias de agua fría, relativamente salada y rica en nutrientes en la zona eufótica de las áreas costeras (Linacre *et al.*, 2010; Arroyo-Loranca *et al.*, 2015), en conjunto con diversos eventos de mesoescala como meandros, remolinos y frentes térmicos que abarcan decenas hasta cientos de kilómetros a lo largo de este sistema de corriente (Peláez y McGowan, 1986; Lynn y Simpson, 1987; Gallaudet y Simpson, 1994; Espinosa-Carreón *et al.*, 2004; Espinosa-Carreón *et al.*, 2012).

El Pacífico Sudcaliforniano presenta un transporte de Agua Subártica en dirección norte a sur por el Sistema de la Corriente de California y Agua Subtropical Superficial proveniente del sur y suroeste de la península de Baja California (Durazo, 2015). Esto genera una variación espacio-temporal que determinan aspectos fisicoquímicos y biológicos en la columna de agua, al igual que un impacto en las poblaciones de invertebrados y peces localizados en las latitudes de la Corriente de California (Gaxiola-Castro *et al.*, 2008; Wilkinson *et al.*, 2009; Gaxiola-Castro y Durazo-Arvizu, 2010; Espinoza-Carreón *et al.*, 2012). Durante la primavera, el Pacífico Sudcaliforniano presenta una mayor influencia de la Corriente de California con altos valores de Chl *a* debido a un aumento de la intensidad del viento que genera afloramiento de aguas ricas en nutrientes (Durazo, 2015) y eventos de mesoescala (Espinosa-Carreón *et al.*, 2004; Espinosa-Carreón *et al.*, 2012). Por el contrario, en otoño-invierno, se presenta un debilitamiento del afloramiento de aguas ricas en nutrientes debido a la presencia de agua tropical y

subtropical. Esta variabilidad genera una división en el área de Baja California: norte de Punta Eugenia (carácter subártico) y sur de Punta Eugenia (carácter cálido) (Durazo, 2009; Durazo, 2015).

Por otra parte, el Golfo de California es considerado un mar marginal que presenta un clima más continental que oceánico, contribuyendo a la variabilidad de la TSM y por presentar un campo de viento monzónico que influye en la disponibilidad de nutrientes y productividad primaria (Álvarez-Borrego., 2010; Álvarez-Borrego., 2012). Su estructura hidrográfica y circulación están influenciadas por el forzamiento dinámico del Océano Pacífico a través de la región de la boca, mediante los procesos de mareas (Marinone y Lavín, 1997) y ondas internas de diferentes escalas espacio-temporales, desde eventos de mesoescala, tales como frentes térmicos, giros, chorros, convección, efectos de tormentas y huracanes, hasta ondas de origen ecuatorial costeras por la presencia de agua superficial ecuatorial (Lavín *et al.*, 1997). El Golfo de California presenta variaciones temporales de forma senoidal de carácter anual, originando un ciclo estacional de su patrón de circulación y circulación termohalina de la columna de agua mediante el movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical, el cual genera un efecto de distribución latitudinal de los sistemas de corrientes de origen ecuatorial que influyen en el Sistema de la Corriente Mexicana (sur a norte) y la Corriente de California (norte a sur) (Lavín *et al.*, 1997; Flores-Morales *et al.*, 2009) y por consecuencia, determina la concentración de Chl *a* y niveles de TSM a lo largo del golfo.

El Golfo de California presenta una dinámica asociada a los vientos estacionales, procesos de surgencias, efectos por mareas que, en conjunto con una significativa radiación solar, determinan una dinámica física y ecológica de carácter estacional que genera un patrón de circulación en la columna de agua (Álvarez-Borrego., 2010). Presenta vientos del noroeste de diciembre a mayo, que favorecen procesos de surgencias intensas a lo largo de la costa oriental, generando las “condiciones de invierno” caracterizadas por presentar una entrada de nutrientes que favorece el incremento de la biomasa fitoplanctónica. En cambio, de julio a octubre, los vientos dominantes provienen del sureste, los cuales son más débiles y carecen de energía suficiente para romper la fuerte estratificación térmica de la columna de agua, desarrollando las “condiciones de verano”, y debido a esa fuerte estratificación, los

nutrientes no están al alcance del fitoplancton, disminuyendo su biomasa. Los meses de junio y noviembre son considerados períodos de transición entre ambos tipos de condiciones (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Álvarez-Borrego, 2010). Debido a esta dinámica física y ecológica, el Golfo de California cuenta con altos niveles de productividad primaria y por consecuencia una alta diversidad biológica, al presentar especies tanto nectónicas como bentónicas, algunas de ellas endémicas y que son consideradas de gran interés para la conservación al igual que de interés comercial (Lluch-Cota *et al.*, 2007; Lluch-Cota *et al.*, 2010).

El área de estudio comprendió un total de 24 RMP (Figura 1) localizadas en el noroeste del Océano Pacífico y georreferenciadas, que abarca desde el norte del Pacífico Sudcaliforniano hasta el sur del Golfo de California (Tabla 1). El procedimiento de asignación del polígono para cada una de las regiones fue determinado por la CONABIO en conjunto con organizaciones gubernamentales y no gubernamentales mediante procedimientos de cartografía y batimetría a nivel oceánico y costero. Estos polígonos fueron generados con el objetivo de conservar estas áreas marinas y costeras caracterizadas por presentar condiciones ambientales y niveles de biodiversidad particulares. Por lo tanto, es necesario realizar una descripción adecuada de los aspectos físicos y biológicos de estas áreas y promover una mejor información de los ecosistemas y su variabilidad oceanográfica, al igual que para generar un desarrollo de investigación y conservación de los recursos naturales (Arriaga-Cabrera *et al.*, 2009).

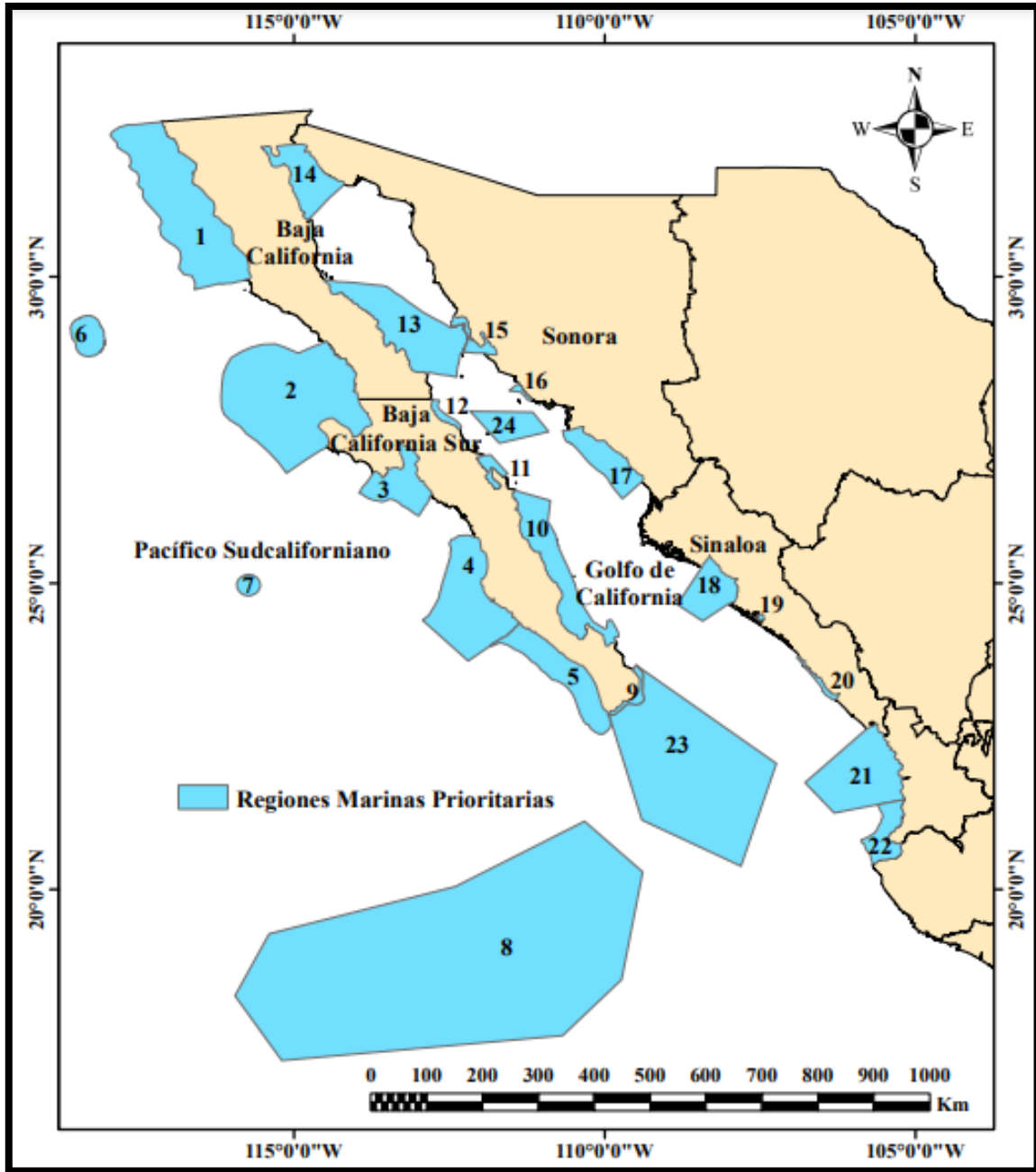


Figura 1. Mapa de las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) del noroeste de México para la obtención y análisis de datos mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila *a* (Chl *a*).

Tabla 1. Lista de coordenadas geográficas de las Regiones Marinas Prioritarias del noroeste de México.

Número	Región Marina Prioritaria	Latitud	Longitud
1	Ensenada	32° 31'48" 29°45'36" N	117°58'12" 115°42' W
2	Vizcaíno	28°57'36" 26°47'24" N	116°10'48" 113°43'48" W
3	San Ignacio	27°18'36" 26°4'48" N	114°1'48" 112°46'48" W
4	Bahía Magdalena	25°47'24" 23°43'48" N	112°55'48" 111°21'36" W
5	Barra de Malva-Cabo Falso	24°21' 22°30'36" N	111°51' 109°54'36" W
6	Isla Guadalupe	29°22'12" 28°42' N	118°36' 118°2'24" W
7	Cayos Alijos	25°08'24" 24°46'12" N	115°55'48" 115°32'24" W
8	R.B. Archipiélago Revillagigedo	21°05'24" 17°24'00" N	115°57'36" 109°30'00" W
9	Los Cabos	23°39' 22°49'48" N	109°57'36" 109°21'36" W
10	Complejo Insular de Baja California Sur	26°31'48" 23°41'24" N	111°28'12" 109°47'24" W
11	Bahía Concepción	27°07'12" 26°31'48" N	112°05'24" 111°33' W
12	Costa Oriental Vizcaíno	27°59'24" 27°29'24" N	112°47'24" 112°18'36" W
13	Complejo Insular de Baja California	29°57'36" 28°31'36" N	114°31'48" 112°12'36" W
14	Alto Golfo	32°10'12" 30°55'48" N	115°31'48" 114°11'24" W
15	Canal del Infiernillo	29°22'12" 28°43'48" N	112°28'48" 111°43'48" W
16	Cajón del Diablo	28°16'48" 27°58'48" N	111°33' 111°09'36" W
17	Sistema Lagunar del Sur de Sonora	27°34'12" 26°21'36" N	110°41'24" 109°21'36" W
18	Lagunas de Santa María La Reforma	25°26'24" 24°22'12" N	108°51' 107°49'48" W
19	Laguna de Chiricahueto	24°29'24" 24°49'48" N	107°33' 107°25'48" W
20	Piactla-Urías	23°48' 23°5'24" N	106°55'48" 106°13'48" W
21	Marismas Nacionales	22°41'24" 21°14'24" N	106°47'24" 105°9'36" W
22	Bahía de Banderas	21°27'36" 20°23'24" N	105°54' 105°11'24" W
23	Boca del Golfo	22°51' 20°22'48" N	109°56'24" 107°14'24" W
24	Guaymas	27°49'12" 27°17'24" N	112°09'36" 110°54'36" W

V.2. Caracterización oceanográfica y ambiental y obtención de datos mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila *a* (Chl *a*)

Para realizar la caracterización oceanográfica y ambiental de estas regiones, se utilizaron imágenes satelitales de TSM y Chl *a* obtenidas mediante percepción remota, con el objetivo de analizar su variabilidad durante los diferentes periodos de estudio en las 24 RMP. Las imágenes satelitales de TSM y Chl *a* presentan resolución temporal de un mes, las cuales fueron procesadas a Nivel 3, caracterizadas por ser productos mapeados en una proyección cartográfica conocida o se han colocado en una cuadrícula bidimensional con una resolución especial conocida, siendo agregados a lo largo del tiempo y es espacio (National Research Council, 2011). Los productos de datos de Nivel 3 son compuestos espaciales y temporales asignados a una cuadrícula terrestre fija en donde cada punto contiene el valor promedio, número de píxeles, desviación estándar y asimetría (NASA, 1986). Cada producto contiene una imagen de un parámetro geofísico y se almacena Formato Jerárquico de Datos (Hierarchical Data Format; HDF por sus siglas en inglés).

En el caso de la TSM, las imágenes se obtuvieron de la página web del Centro de Archivo Activo Distribuido de Oceanografía Física (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center; PODAAC por sus siglas en inglés) del laboratorio de propulsión a chorro del Instituto Tecnológico de California (<https://podaac.jpl.nasa.gov/>) y de la página web de procesamientos y análisis satelital Windows Image Manager (WIM/WAM) Wimsoft (<http://www.wimsoft.com/CAL/>). Los sensores utilizados del PODAAC corresponden al Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR-Pathfinder) versiones 5.1 y 5.0 para el periodo de septiembre de 1981 a enero de 2000, de los cuales se obtienen datos mensuales durante el período diurno en grados centígrados (°C), con una resolución espacial de 4 km. Para completar la serie de tiempo, se utilizaron productos compuestos de imágenes satelitales, que fueron desarrolladas por el Instituto de Oceanografía, en San Diego, California (http://www.wimsoft.com/Satellite_Projects.htm) para el período febrero 2000 hasta octubre 2018, estos productos de imágenes satelitales cuentan con una resolución especial de 1 km, y cubren el área del Sistema de la Corriente de California al igual que el Golfo de California. El desarrollo de estos compuestos

mensuales de imágenes satelitales fue realizado mediante el uso de imágenes diarias de múltiples sensores remotos: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra y Aqua y Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) (Kahru *et al.*, 2012).

En el caso de los datos mensuales de Chl *a*, debido a que se presentan datos constantes a partir del año 1997, únicamente se utilizaron productos compuestos de imágenes satelitales con una resolución especial de 1 km para el período septiembre 1997 a octubre 2018, generando una base de datos de 21 años un mes. La generación de las mediciones de Chl *a*, se utilizaron imágenes diarias de los siguientes sensores: Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS); Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra and Aqua; Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS); Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS); Visible Infrared Imaging Radiometer Suite-Joint Polar Satellite System (VIIRS-JPSS1); Ocean and Land Color Instrument-Water Reduced Resolution (OLCI-WRR) A and B (OLCIA-WRR 230 and (OLCIB-WRR), las cuales fueron obtenidas de la página web del Ocean Color de la NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Con el uso de estas imágenes, se generaron compuestos de imágenes satelitales mediante el uso de franjas individuales de cada sensor que fueron mapeadas en una sola proyección común a través de una proyección cónica de Albers. Los píxeles libres de nubes se fusionaron para crear el compuesto de imágenes satelitales obteniendo la máxima cobertura espacial y temporal mediante la combinación y uso de múltiples sensores remotos (Kahru *et al.*, 2012).

Los productos derivados de imágenes satelitales fueron procesadas y analizadas mediante el uso del software Windows Image Manager Automation Module software (WIM/WAM) Wimsoft versión 9.06 1991-2015, Copyright© Mati Kahru (wim@wimsoft.com). El análisis y procesamiento se realizó al extraer los valores promedio mensuales de TSM (Figura 2) y Chl *a* (Figura 3) de cada una de las 24 RMP, localizadas en el Pacífico Sudcaliforniano y Golfo de California. Específicamente, se extrajeron áreas determinadas por los polígonos de sugeridos por CONABIO (<http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/marinas.html>), para cada una de las RMP de estudio.

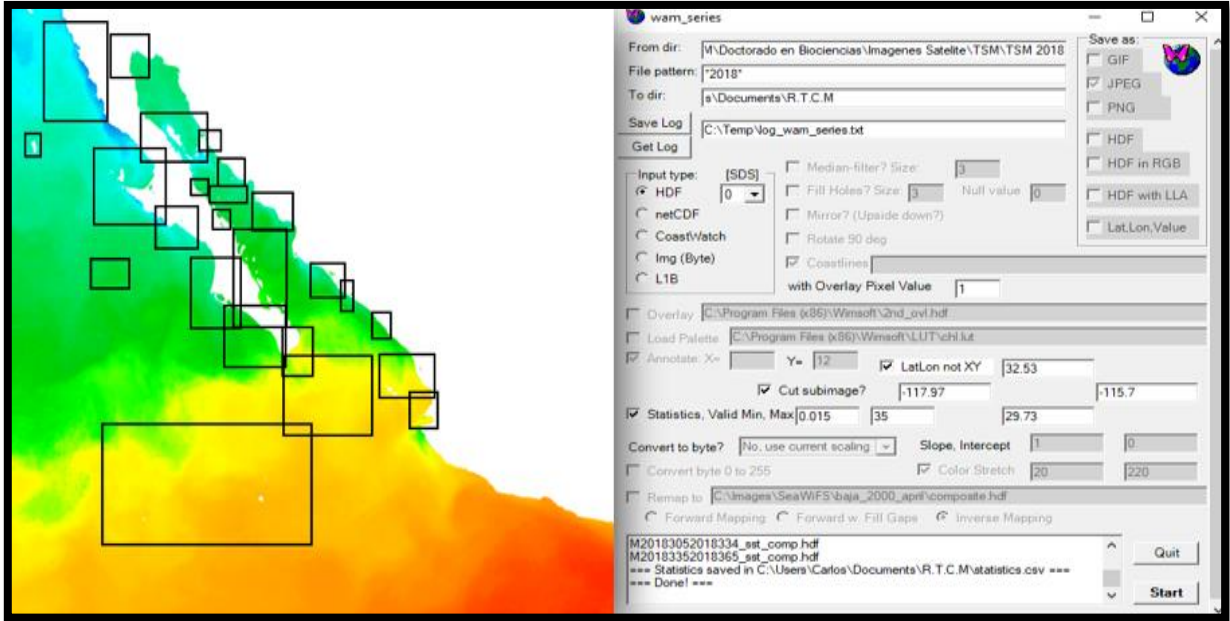


Figura 2. Procesamiento de imagen satelital a través del software WIM/WAM para la obtención de datos mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) del noroeste de México.

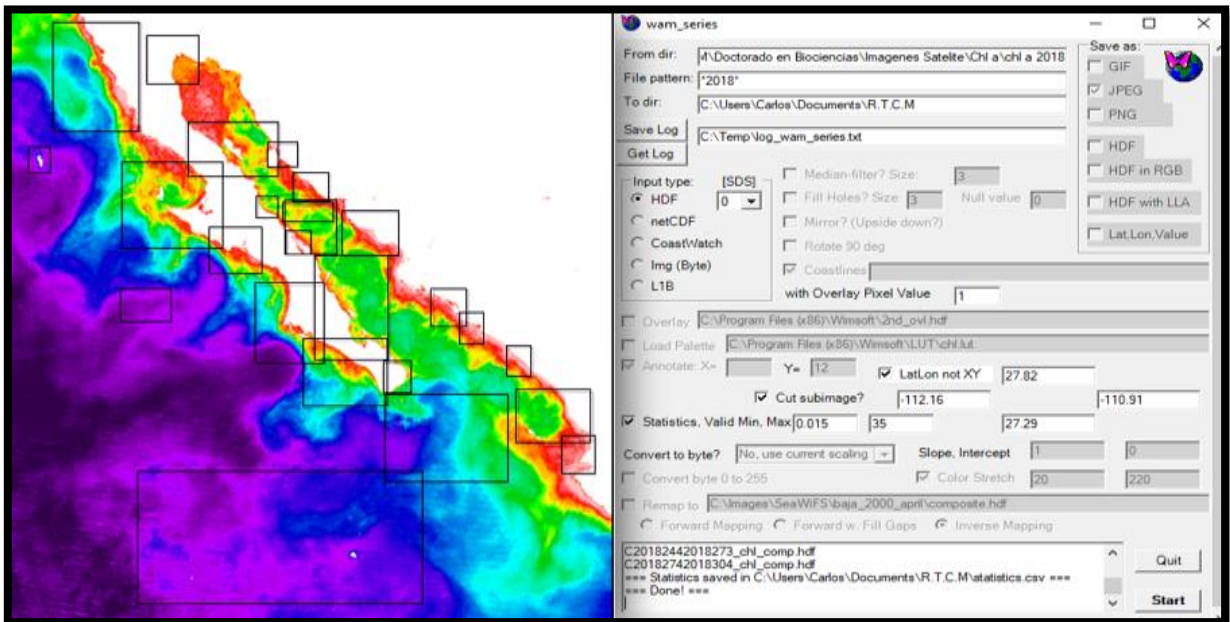


Figura 3. Procesamiento de imagen satelital a través del software WIM/WAM para la obtención de datos mensuales de Clorofila *a* (Chl *a*) de las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) del noroeste de México.

V.3. Procesamiento y análisis de datos mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila *a* (Chl *a*)

Antes de realizar los análisis correspondientes para cada una de las variables, en el caso de la TSM se procedió a realizar un proceso de calibración entre los datos del sensor AVHRR-Pathfinder versión 5.0 con los datos correspondientes a los productos compuestos de imágenes satelitales que se desarrollaron en el Instituto de Oceanografía en San Diego, California (http://www.wimsoft.com/Satellite_Projects.htm) con el objetivo de ajustar los valores de los diferentes sensores remotos a través de una regresión lineal.

Para ello, se utilizó un periodo de siete años (febrero 2000 a febrero 2007) en donde coinciden los datos de las imágenes satelitales del sensor AVHRR-Pathfinder versión 5.0 con los productos compuestos de imágenes satelitales de diversos sensores del portal WimSoft correspondientes al conjunto de datos de 4 km derivados de satélite fusionados del Sistema de la Corriente de California (<http://spg-satdata.ucsd.edu/CC4km/>). El proceso de calibración se realizó ajustando los valores mensuales de AVHRR-Pathfinder versión 5.0, a los valores de los productos compuestos de imágenes satelitales de diversos sensores, obteniendo una correlación significativa entre ambas series de tiempo al igual que una intersección diferente de cero, lo cual significa que los valores son prácticamente similares.

Una vez realizada la calibración de los datos de TSM, se hizo un análisis de clúster, tanto para TSM como para Chl *a* con el fin de agrupar los valores promedio mensuales correspondientes a todo periodo de estudio de cada RMP tanto del Pacífico Sudcaliforniano y del Golfo de California. El agrupamiento de los valores promedio mensuales de cada variable se realizó para establecer el máximo nivel de homogeneización en cada grupo al igual que la mayor diferencia entre los grupos obtenidos, estableciendo una distancia de enlace y determinando regiones biogeográficas en base a los niveles de TSM (°C) y concentración de Chl *a* (mg/m³).

Después, para cada una de las regiones biogeográficas se realizó estadística descriptiva (promedio, desviación estándar, máximo, mínimo), análisis de series de tiempo y análisis de series de tiempo de anomalías con el objetivo de describir su variabilidad oceanográfica. Las series de tiempo de anomalías de cada variable fueron calculadas en

cada una de las series de tiempo mediante la diferencia del valor promedio mensual en específico y el valor promedio que se obtiene del mes correspondiente en todos los años, dividiendo esto entre la desviación estándar de ese grupo de meses. En el caso de las anomalías de los niveles de TSM, estas fueron comparadas con la base de datos mensuales del índice climático Oscilación Decadal del Pacífico (Pacific Decadal Oscillation; PDO por sus siglas en inglés) de la página web de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA por sus siglas en inglés) (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>). El índice climático PDO describe la variabilidad de la TSM en el Océano Pacífico con una periodicidad de 15 a 20 años presentando cambios en la temperatura generando un impacto en el clima de Norteamérica alterando el patrón de los vientos con una fase positiva (cálida) y negativa (fría) (Trenberth y Hurrell, 1994; Ahrens., 2007; Jiménez-Quiroz, 2011), presentando una variabilidad climática que tiene efectos en el Pacífico Mexicano. Por otra parte, para el análisis de anomalías de Chl *a* se compararon con otro índice climático, el Índice de la Oscilación del Sur (Southern Oscillation Index; SOI por sus siglas en inglés) (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/soi>) de la página web de la NOAA. Este índice monitorea el patrón climático del ENSO a través de una medida estandarizada para determinar características de gradientes de presión atmosférica, específicamente la presión atmosférica del nivel del mar que ocurre entre los territorios de Tahití y Darwin, midiendo así las diferencias de presión entre el Pacífico Tropical del Este y el Pacífico Tropical del Oeste (Jiménez-Quiroz, 2011; Shen y Somerville, 2019), causando variabilidad en aspectos climatológicos en el Pacífico Sudcaliforniano y Golfo de California. Además, tanto las series de tiempo de TSM y Chl *a* como sus series de tiempo de anomalías fueron transformadas mediante un suavizamiento exponencial, técnica estadística que consiste en realizar una ponderación entre los datos más recientes y datos más antiguos de una serie de tiempo. El proceso de ponderación consiste en eliminar el peso de los datos más antiguos de forma exponencial a medida que está más alejado de los datos recientes. El modelo de suavizamiento exponencial se basa en que la importancia de la información pasada debe ir desapareciendo de forma gradual y no abrupta, a comparación de las medias móviles, existiendo diferencias de importancia (peso) entre los datos más recientes y anteriores

(Alvarado-Valencia y Obagi-Araujo, 2008). En este estudio las series analizadas se aplicó un suavizamiento exponencial simple, pues no se observó una tendencia en ellas. Por otra parte, se realizó el análisis del ciclo anual de TSM y Chl *a* para analizar la climatología de cada una de las regiones biogeográficas describiendo su variabilidad estacional a lo largo del año. Además, en cada una de las series de tiempo de TSM y Chl *a* se calculó la densidad espectral mediante una transformada rápida de Análisis de Fourier para describir el comportamiento de la variabilidad de la TSM y Chl *a* determinando las principales frecuencias de variación temporal (estacional, semianual, anual e interanual).

V.4. Análisis estadístico de datos mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila *a* (Chl *a*)

El análisis estadístico de datos de TSM y Chl *a* se realizó a través de una prueba de Elliot-Rothenberg y análisis de permutaciones. La prueba de Elliot-Rothenberg es una prueba estadística que permite probar si la serie de tiempo tiene raíz unitaria, es decir, que la serie de tiempo no presenta estacionariedad, asumiendo que la variable en la serie de tiempo tiene una tendencia diferente de cero (Elliot *et al.*, 1996; Maddala y Kim, 1998; Otero y Baum, 2017). En la prueba de Elliot-Rothenberg se plantea la hipótesis nula H_0 : la serie de tiempo no es estacionaria, es decir, hay una tendencia de cambio en la variabilidad de la serie de tiempo; frente a una hipótesis alternativa H_1 : la serie de tiempo es estacionaria, lo cual indica que la serie de tiempo no presenta raíz unitaria, indicando que no hay una tendencia de cambio en su variabilidad (Pfaff, 2008; Otero y Baum, 2017). Por lo tanto, los p valores obtenidos de la prueba permiten determinar si existe evidencia o no respecto a la no estacionariedad en la serie de tiempo planteada en la hipótesis nula. En nuestro caso de estudio, en la hipótesis nula se plantea la no estacionariedad en los niveles de TSM, así como de concentración de Chl *a* durante el periodo de estudio para cada una de las regiones biogeográficas.

Además, para complementar el análisis estadístico de datos se realizó un análisis de permutaciones, las cuáles se definen como un arreglo en un orden particular de objetos que conforman un conjunto (Blanco-Castañeda, 2004). El análisis de permutaciones permite

trabajar dos o más muestras bajo el supuesto de hipótesis nula (H_0): las muestras provienen de una misma población o distribución, es decir, la diferencia observada se encuentra dentro de un conjunto de diferencias que por azar se obtendrían de las permutaciones. Si la diferencia observada es un evento atípico en la distribución de estas permutaciones entonces se concluye que los datos proporcionan evidencia significativa en contra de la hipótesis nula al nivel de significancia seleccionado (Bruce *et al.*, 2022). En base a lo planteado previamente, la prueba de permutaciones se utiliza para analizar el efecto intranual y por estación a través de la identificación de diferencias significativas en los niveles de TSM y concentración de Chl *a* en cada una de las regiones durante los eventos interanuales del ENSO (El Niño y La Niña) y condiciones neutras durante el periodo de estudio para todas las estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno).

Los eventos interanuales y condiciones neutras se determinaron tomando en cuenta cuál de estos eventos estaba más presente, acorde al registro del Índice del Niño Oceánico (Oceanic Niño Index; ONI por sus siglas en inglés) obtenido de la página web del Servicio Meteorológico Nacional de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental de la NOAA (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).

Este índice climático desarrollado por la agencia NOAA se ha catalogado como un identificador estándar de los eventos interanuales Niño y Niña a lo largo del Pacífico Tropical. Se calcula a partir de 3 meses de anomalías de los niveles de TSM para la región del Niño 3.4 (5° N-5° S y 120° O-170° O), siendo posible categorizarlos en base a unidades de anomalías de la TSM como eventos Niño débiles (0.5 a 0.9 unidades de anomalías), moderados (1 a 1.4 unidades de anomalías), fuertes (1.5 a 1.9 unidades de anomalías) y muy fuertes (≥ 2 unidades de anomalías). Cabe señalar que para la clasificación de intensidad de los eventos Niño debe igualarse o superarse el umbral durante al menos 3 periodos de 3 meses consecutivos (Pandey *et al.*, 2019). Los episodios fríos y cálidos se definen cuando las anomalías se encuentran por abajo o por arriba respectivamente del umbral (+ 0.5 °C) por al menos 5 meses consecutivos (Jiménez-Quiroz, 2011), cuyo proceso de categorización se realiza desde 1955 hasta la actualidad para determinar la presencia de los eventos interanuales El Niño y La Niña.

Todos estos análisis fueron hechos en el programa Statistical Software versión 7.5 y R Software versión 3.4. En este último software las librerías utilizadas fueron las siguientes: para el desarrollo de la prueba de Elliot-Rothenberg se utilizaron las librerías zoo, tseries, funitRoots y urca; en el análisis de permutaciones, las librerías utilizadas fueron wperm, lmperm y FSA.

VI. RESULTADOS

VI.1. Caracterización de regiones biogeográficas en base a los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y concentración de Clorofila *a* (Chl *a*)

De las 24 RMP del noroeste de México, el análisis de cluster de los valores promedio mensuales de TSM determinó cinco grupos como regiones biogeográficas, de los cuales cuatro están compuestos por 2 RMP y un grupo por 3 RMP, mientras que 13 RMP fueron clasificadas como regiones individuales (Figura 4). Estas regiones biogeográficas fueron definidas a partir de una distancia de enlace de 22 unidades debido a que esa distancia determina regiones que estén compuestas de RMP localizadas geográficamente cercanas una de otra y exclusivamente en una misma área marina (Pacífico Sudcaliforniano o Golfo de California). Por lo tanto, estas regiones biogeográficas comparten características ambientales y oceanográficas similares, un aspecto importante para realizar este proceso de regionalización, en este caso es a través de los niveles de TSM. Los grupos obtenidos en el análisis de cluster de TSM son los siguientes y se encuentran numerados de derecha a izquierda: Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe); Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas); Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto); Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California) y Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas). El resto de las 13 regiones fueron catalogadas como individuales, estableciendo un total de 18 regiones biogeográficas en el noroeste de México (Figura 5).

El análisis de cluster basado en los valores promedio mensuales de Chl *a* determinó cuatro grupos como regiones biogeográficas, compuestos de dos a cuatro RMP, mientras que 14 RMP fueron clasificadas como regiones individuales con una sola RMP, estableciendo un total de 18 regiones biogeográficas en base a la concentración de Chl *a* (Figura 6). Estas regiones fueron determinadas con una distancia de enlace de aproximadamente ocho unidades, distancia que permite caracterizar regiones biogeográficas con RMP cercanas unas a otras y localizadas en una sola área marina, compartiendo características oceanográficas y ambientales como lo es la concentración de

Chl *a*. Los grupos obtenidos son los siguientes: Grupo 1 (Ensenadense y Vizcaíno); Grupo 2 (Complejo Insular de Baja California Sur y Guaymas); Grupo 3 (Isla Guadalupe, Cayos Alijos, R.B. Archipiélago Revillagigedo y Boca del Golfo) y el Grupo 4 (Bahía Magdalena y Barra de Malva-Cabo Falso) (Figura 7).

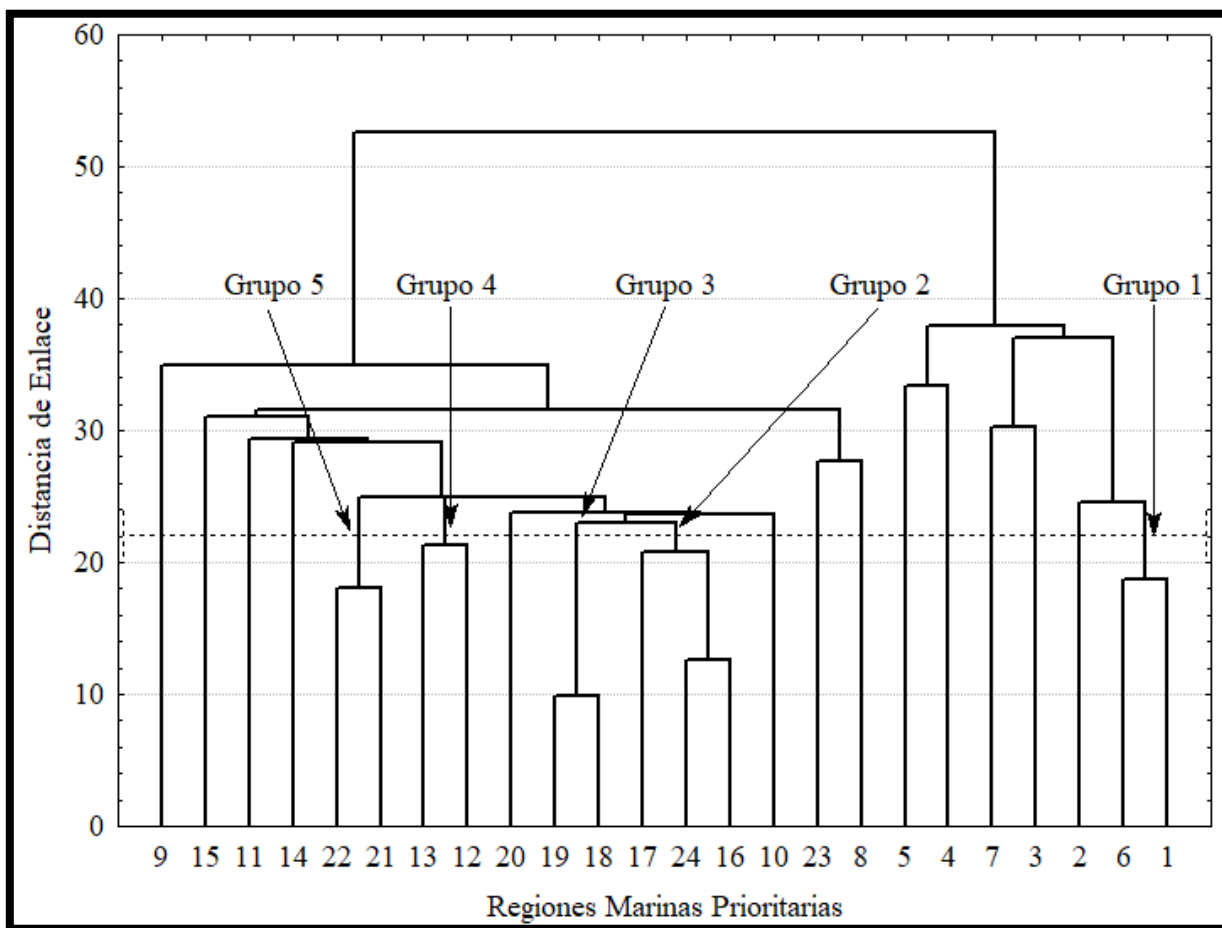


Figura 4. Análisis de cluster de las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) del noroeste de México en base a los valores promedio mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM). Distancia de enlace: línea punteada.

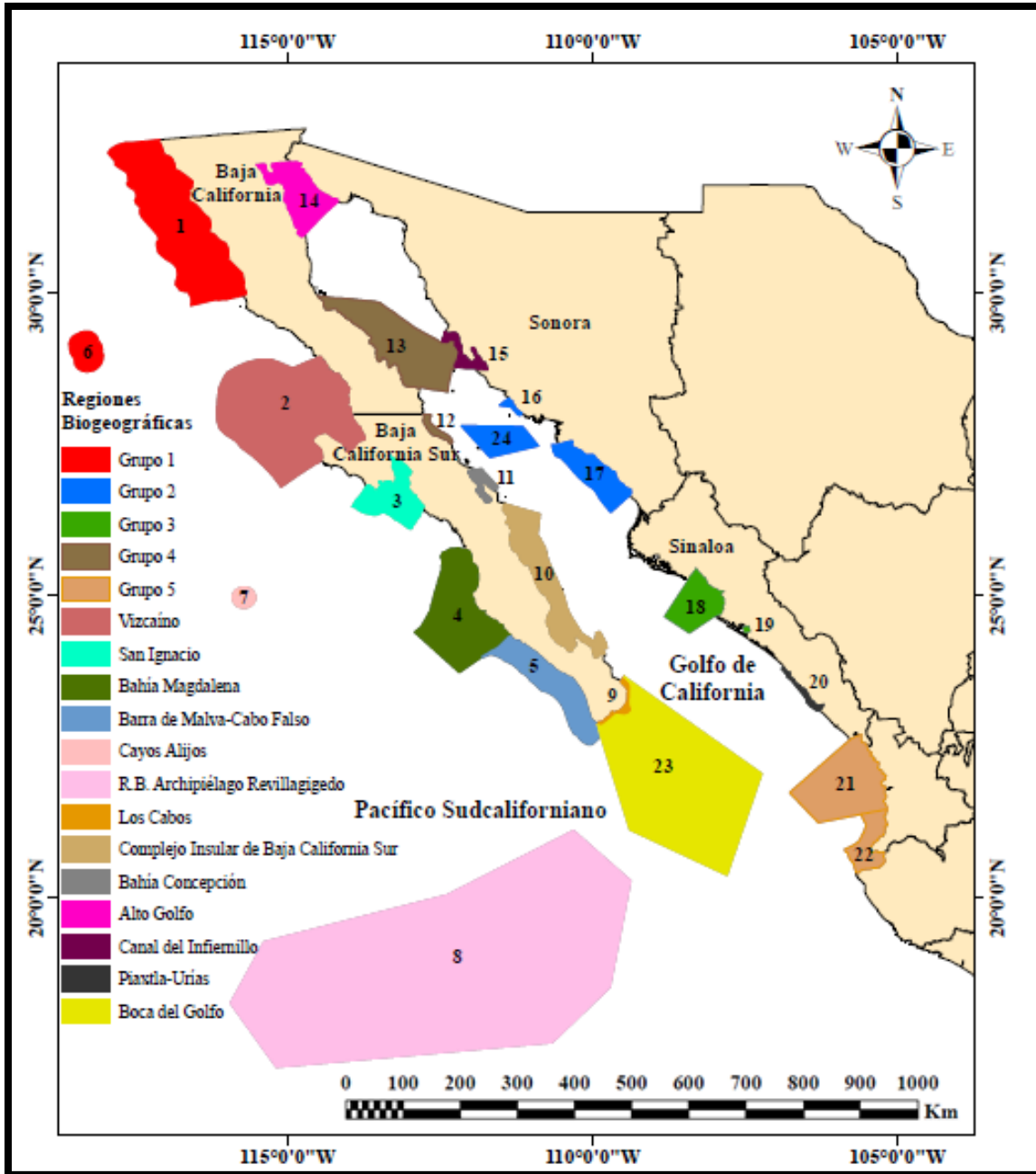


Figura 5. Regionalización del análisis de cluster de las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) del noroeste de México en base a los valores promedio mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM).

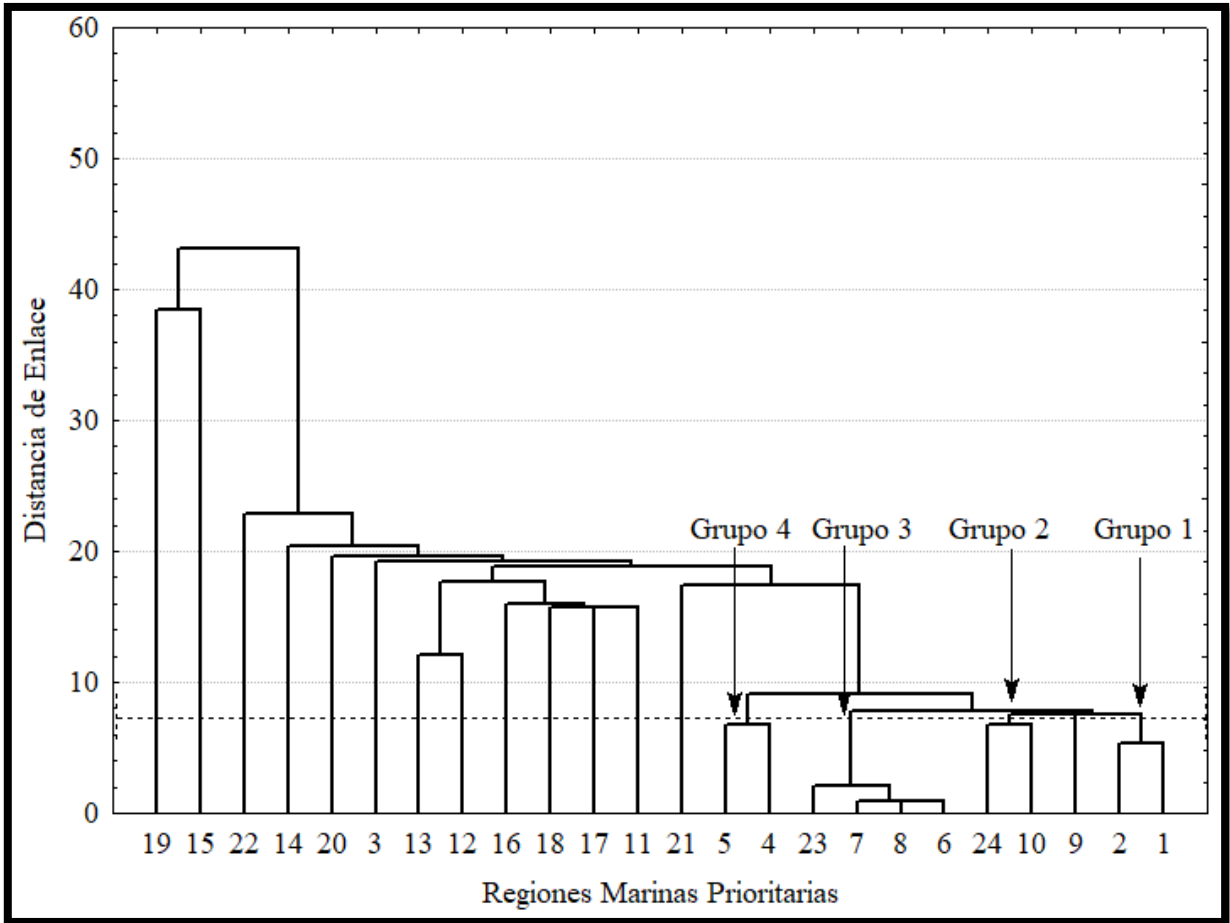


Figura 6. Análisis de cluster de las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) del noroeste de México en base a los valores promedio mensuales de Clorofila *a* (Chl *a*). Distancia de enlace: línea punteada.

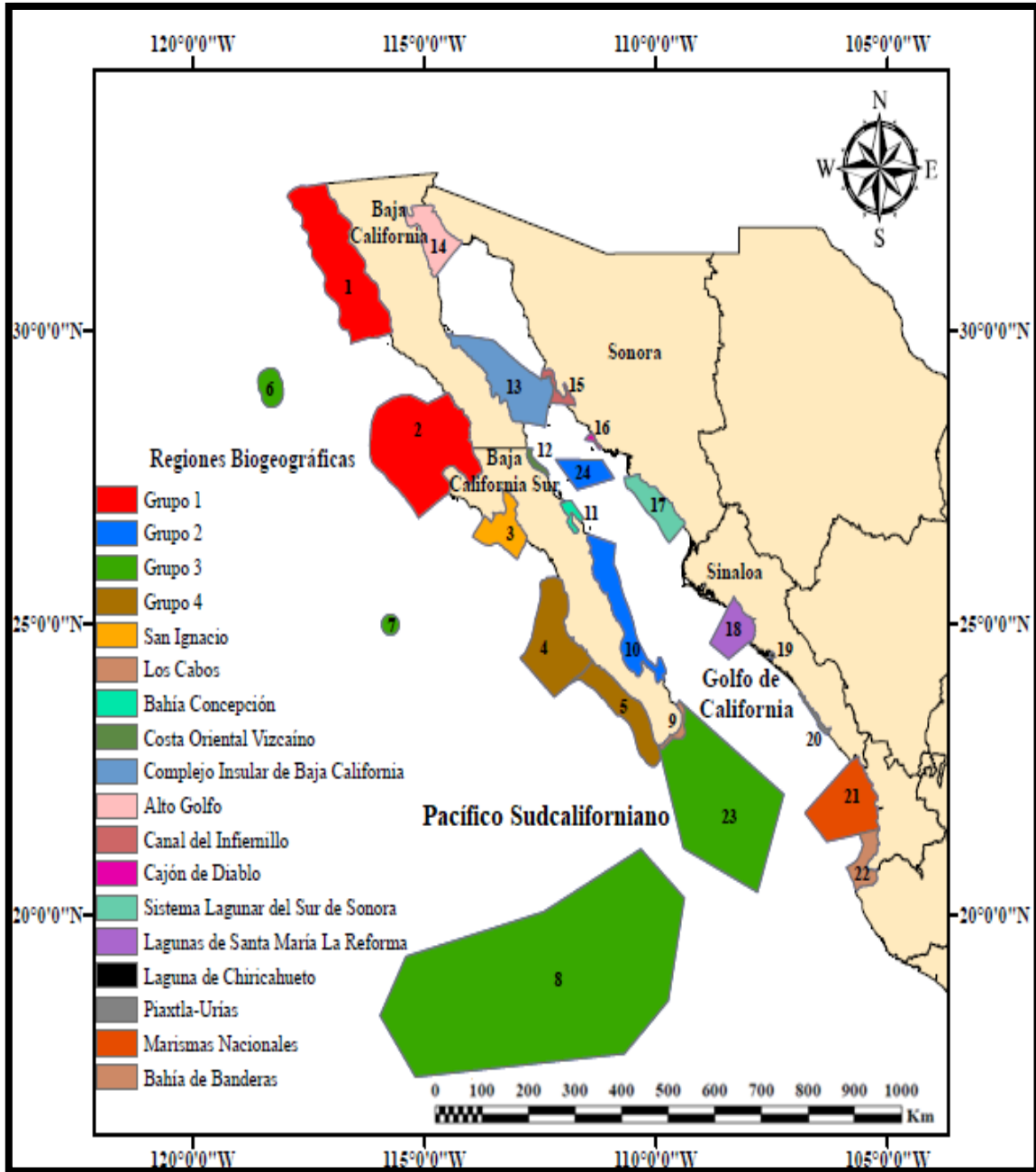


Figura 7. Regionalización del análisis de cluster de las Regiones Marinas Prioritarias (RMP) del noroeste de México en base a los valores promedio mensuales de Clorofila *a* (Chl *a*).

En base a las regionalizaciones previamente realizadas utilizando cada variable, se procedió a utilizar la correspondiente a la TSM para realizar los análisis de variabilidad oceanográfica de los niveles de TSM y concentración de Chl *a* al presentar un cluster con una regionalización más adecuada, con menos regiones individuales a comparación con el cluster de Chl *a*.

El análisis descriptivo de los niveles de TSM (Tabla 2) muestra que las regiones con menores niveles de esta variable son las correspondientes al Pacífico Sudcaliforniano (Grupo 1, Vizcaíno, Cayos Alijos y San Ignacio) entre los 18 a 21 °C, mientras que las regiones con los mayores valores fueron las localizadas en el sur del Golfo de California (Grupo 5, Piaxtla-Urías, Boca del Golfo y Grupo 3) con rango entre los 26 a 28 °C. En el caso del análisis descriptivo de la concentración de Chl *a* (Tabla 3), el análisis descriptivo mostró que las regiones con menores concentraciones fueron las regiones oceánicas del Pacífico Sudcaliforniano (Revillagigedo y Cayos Alijos), Boca del Golfo, en el sur del Golfo de California, mientras que las regiones que presentaron mayores concentraciones corresponden a las del Golfo de California, principalmente en zonas costeras (Canal del Infiernillo, Grupo 3 y Alto Golfo).

Tabla 2. Estadística descriptiva de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Promedio ± Desviación Estándar (°C)	Mínimo (°C)	Máximo (°C)
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	18.2 ± 1.8	12.8	22.8
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	24.4 ± 4.9	15.3	32.2
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	26 ± 4	16.1	31.9
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	23 ± 4.8	13.7	34.1
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	27.7 ± 2.5	21.6	32.2
Vizcaíno	18.9 ± 2.4	14.6	25.9
San Ignacio	20.7 ± 3.1	15.1	29.9
Bahía Magdalena	22.4 ± 3.1	17.1	29.8
Barra de Malva-Cabo Falso	23.9 ± 3	18.9	29.9
Cayos Alijos	20.5 ± 2.2	16.4	26.3
R.B. Archipiélago Revillagigedo	25.7 ± 1.6	16.4	26.3
Los Cabos	25.6 ± 3.2	15.9	31.2
Complejo Insular de Baja California Sur	25 ± 4	16.8	31.7
Bahía Concepción	24.5 ± 4.6	13.7	32.2
Alto Golfo	23.7 ± 5.5	13.8	32.7
Canal del Infiernillo	24.2 ± 5.8	9.8	33.1
Piactla-Urías	26.5 ± 3.3	17.9	31.8
Boca del Golfo	26.3 ± 2.5	20.6	31.5

Tabla 3. Estadística descriptiva de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Promedio ± Desviación Estándar (mg/m³)	Mínimo (mg/m³)	Máximo (mg/m³)
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	0.40 ± 0.21	0.15	1.21
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	1.49 ± 1.04	0.30	5.55
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahuetto)	3.94 ± 1.69	0.91	15.78
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	1.82 ± 0.79	0.57	4.32
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	1.45 ± 1.58	0.30	12.22
Vizcaíno	0.81 ± 0.45	0.27	2.55
San Ignacio	1.76 ± 1.46	0.29	7.27
Bahía Magdalena	0.96 ± 0.78	0.15	4.88
Barra de Malva-Cabo Falso	0.66 ± 0.68	0.11	4.27
Cayos Alijos	0.13 ± 0.05	0	0.51
R.B. Archipiélago Revillagigedo	0.11 ± 0.03	0.08	0.42
Los Cabos	0.54 ± 0.43	0.11	3.58
Complejo Insular de Baja California Sur	0.81 ± 0.45	0.17	2.89
Bahía Concepción	1.73 ± 1.07	0.29	5.43
Alto Golfo	2.67 ± 0.65	1.62	8.79
Canal del Infiernillo	4.72 ± 1.76	2.08	12.10
Piactla-Urías	1.84 ± 1.70	0.21	13.32
Boca del Golfo	0.22 ± 0.10	0.10	0.69

VI.2. Análisis de series de tiempo

Las series de tiempo de TSM suavizadas en general presentaron un rango de variabilidad entre los 16.6 y 29.6 °C (Tabla 4). En el caso de las regiones del Pacífico Sudcaliforniano, su variabilidad fue entre los 16.7 a 27°C (Figura 8), siendo la región biogeográfica R.B.

Archipiélago Revillagigedo la que presentó mayores niveles de TSM con un rango de variabilidad entre los 24.4 a 27 °C; mientras que el Grupo 1 presentó los valores menores de TSM con un rango de variabilidad (16.7 a 20.1°C), siendo esta última la que presenta con los valores más bajos de TSM de todas las regiones biogeográficas. Por otra parte, las regiones del Golfo de California presentaron un rango diferente de variabilidad de TSM, el cual fue entre los 19.9 a 29.6°C (Figura 9 y 10), obteniendo que el Grupo 5 presentó el mayor nivel de TSM con un rango de variabilidad entre los 25.8 a 29.6°C, siendo esta región la que presentó los niveles más altos en todo el noroeste de México. Otras regiones que presentaron altos niveles de TSM fueron Piaxtla-Urías (24.4 a 28.7°C) y la región Boca del Golfo (24.5 a 27.9 °C); mientras que las regiones con los valores más bajos de TSM fueron el Canal del Infiernillo (19.9 a 27.6 °C) y el Alto Golfo (20.7 a 26.2°C).

Por otra parte, las series de tiempo suavizadas de la concentración de Chl *a* mostraron una variabilidad entre los 0.09 a 6.69 mg/m³ (Tabla 5). Las series de tiempo de las regiones del Pacífico Sudcaliforniano obtuvieron una variabilidad de la concentración de Chl *a* entre los 0.09 a 3.05 mg/m³ (Figura 11), mostrando que las regiones con mayores concentraciones fueron San Ignacio (0.90 a 3.05 mg/m³) y Bahía Magdalena (0.54 a 1.88 mg/m³); mientras que las regiones oceánicas que presentaron los valores más bajos menores a 0.5 mg/m³, las cuales corresponden a R.B. Archipiélago Revillagigedo (0.09 a 0.15 mg/m³) y Cayos Alijos (0.10 a 0.20 mg/m³), siendo las regiones con la menor concentración de Chl *a* para el todo noroeste de México. Sin embargo, para las regiones del Golfo de California, las series de tiempo presentaron una variabilidad diferente, entre 0.16 a 6.69 mg/m³ (Figura 12 y 13). Las regiones con los mayores valores de Chl *a* del Golfo de California y de toda el área de estudio corresponde a regiones costeras, las cuales son el Canal de Infiernillo (3.33 a 6.69 mg/m³) y Piaxtla-Urías (0.82 a 3.96 mg/m³). Por el contrario, en las siguientes regiones del sur del Golfo de California se presentaron las menores concentraciones de Chl *a*: Boca del Golfo (0.16 a 0.33 mg/m³), Los Cabos (0.28 a 0.99 mg/m³) y el Complejo Insular de Baja California Sur (0.49 a 1.30 mg/m³).

Tabla 4. Estadística descriptiva de las series de tiempo suavizadas de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Promedio \pm Desviación Estándar ($^{\circ}\text{C}$)	Mínimo ($^{\circ}\text{C}$)	Máximo ($^{\circ}\text{C}$)
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	18.1 \pm 0.6	16.7	20.1
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	24.4 \pm 1.1	22	26.6
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	26 \pm 1	23.7	28.3
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	22.9 \pm 1.1	19.9	25.5
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	27.6 \pm 0.8	25.8	29.6
Vizcaíno	18.9 \pm 0.8	16.9	21.6
San Ignacio	20.7 \pm 1	18.3	23.3
Bahía Magdalena	22.4 \pm 0.9	20.1	24.8
Barra de Malva-Cabo Falso	23.8 \pm 0.8	21.9	26
Cayos Alijos	18.3 \pm 0.8	16.6	20.8
R.B. Archipiélago Revillagigedo	25.7 \pm 0.5	24.7	27
Los Cabos	25.5 \pm 0.9	22.9	27.9
Complejo Insular de Baja California Sur	24.9 \pm 0.9	23	27.2
Bahía Concepción	24.5 \pm 1.1	21.3	27.1
Alto Golfo	23.7 \pm 1.2	20.7	26.2
Canal del Infiernillo	24.1 \pm 1.5	19.9	27.6
Piactla-Urías	26.5 \pm 0.8	24.4	28.7
Boca del Golfo	26.3 \pm 0.6	24.5	27.9

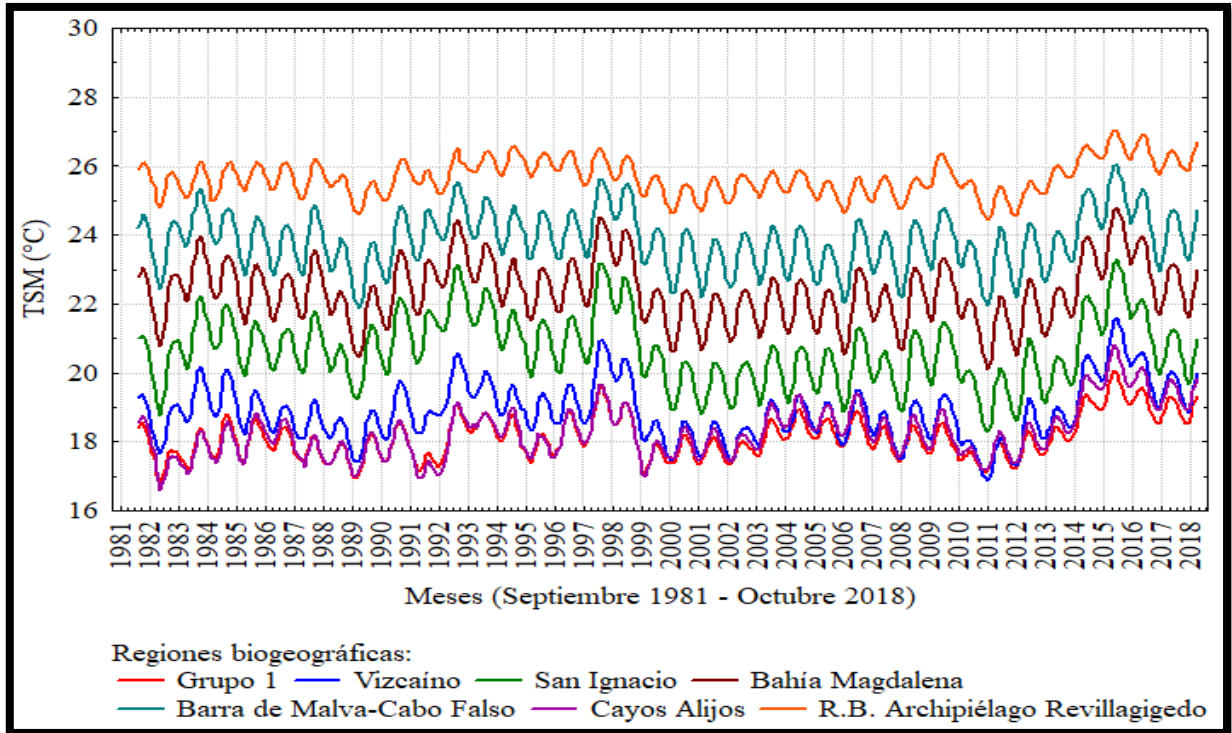


Figura 8. Series de tiempo de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano.

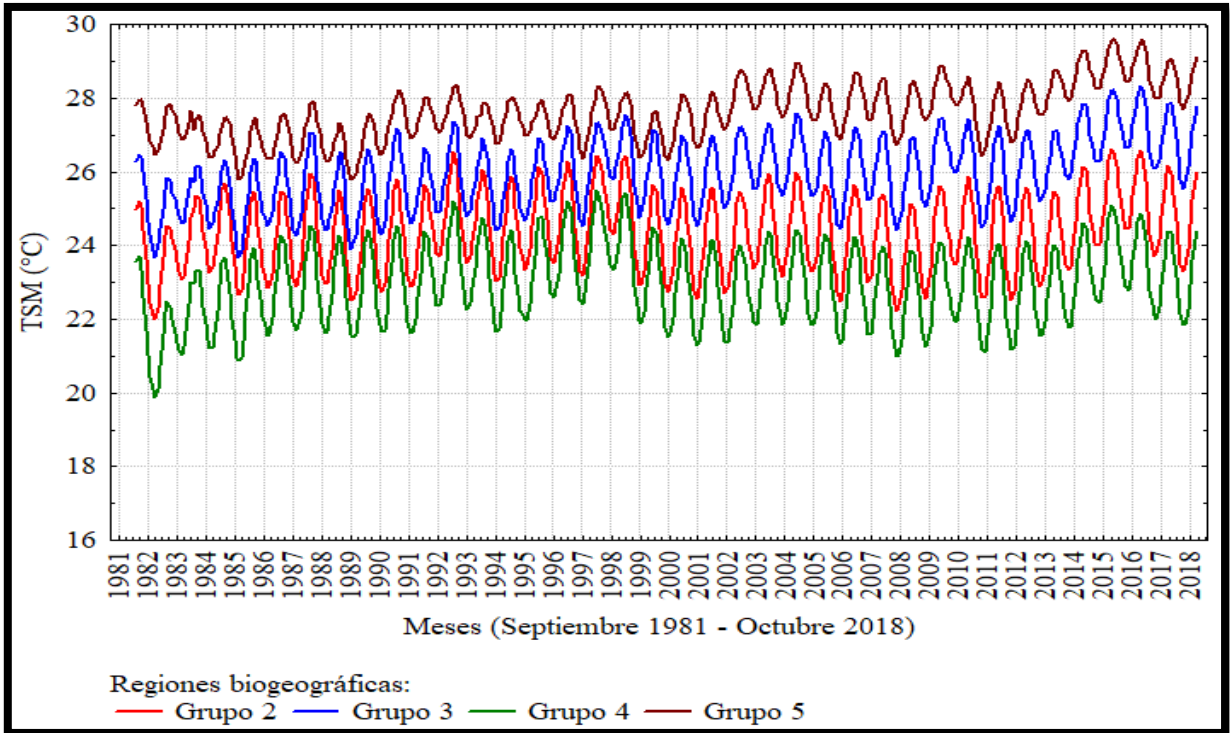


Figura 9. Series de tiempo de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.

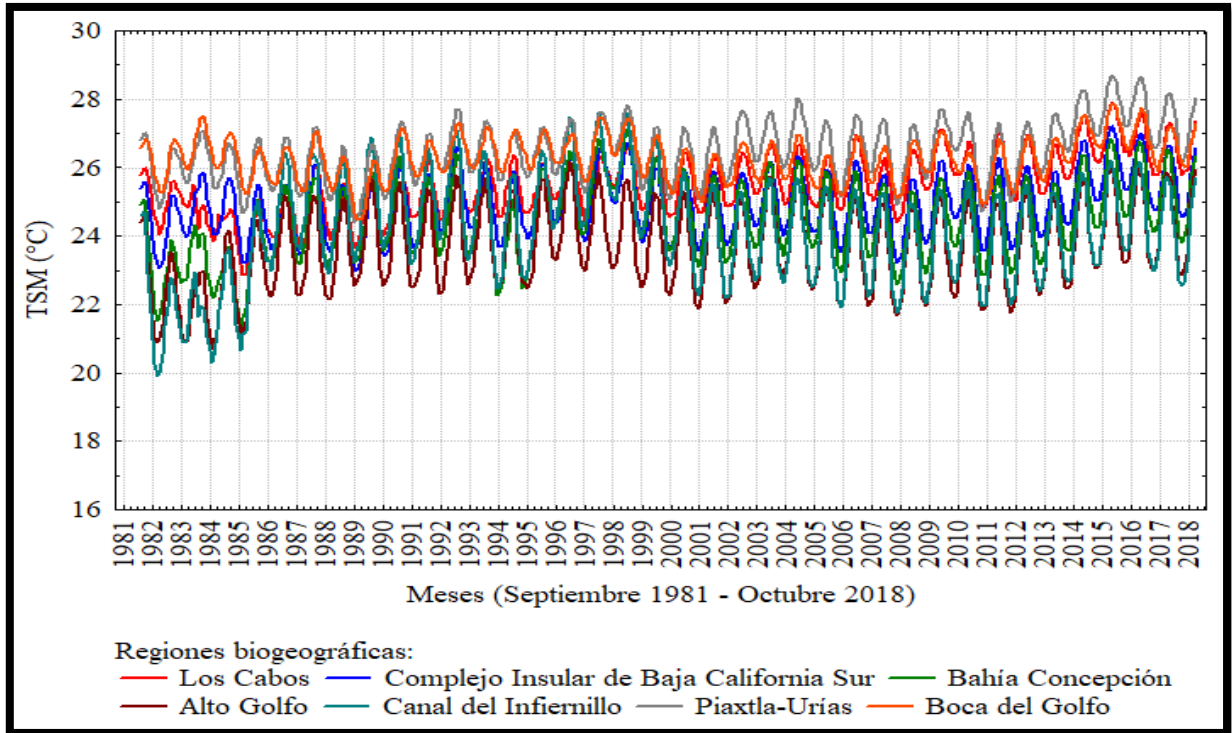


Figura 10. Series de tiempo de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.

Tabla 5. Estadística descriptiva de las series de tiempo suavizadas de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Promedio ± Desviación Estándar (mg/m³)	Mínimo (mg/m³)	Máximo (mg/m³)
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	0.40 ± 0.08	0.27	0.63
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	1.50 ± 0.31	0.92	2.46
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	3.96 ± 0.65	2.74	5.78
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	1.83 ± 0.24	1.31	2.61
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	1.47 ± 0.74	0.67	5.06
Vizcaíno	0.81 ± 0.17	0.50	1.24
San Ignacio	1.77 ± 0.50	0.90	3.05
Bahía Magdalena	0.97 ± 0.26	0.54	1.88
Barra de Malva-Cabo Falso	0.66 ± 0.22	0.32	1.43
Cayos Alijos	0.13 ± 0.02	0.10	0.20
R.B. Archipiélago Revillagigedo	0.11 ± 0.01	0.09	0.15
Los Cabos	0.54 ± 0.15	0.28	0.99
Complejo Insular de Baja California Sur	0.82 ± 0.16	0.49	1.30
Bahía Concepción	1.73 ± 0.48	0.91	2.95
Alto Golfo	2.69 ± 0.34	2.10	3.85
Canal del Infiernillo	4.72 ± 0.74	3.33	6.69
Piactla-Urías	1.86 ± 0.73	0.82	3.96
Boca del Golfo	0.23 ± 0.04	0.16	0.33

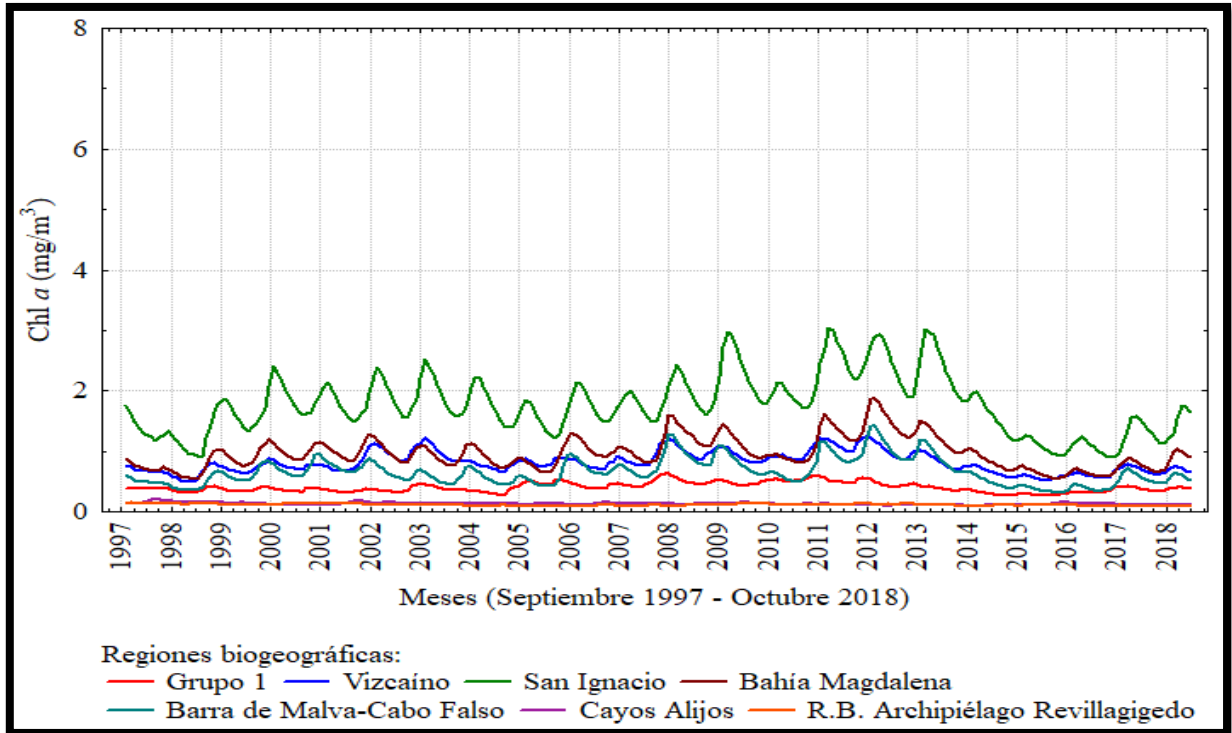


Figura 11. Series de tiempo de los niveles de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) de las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano.

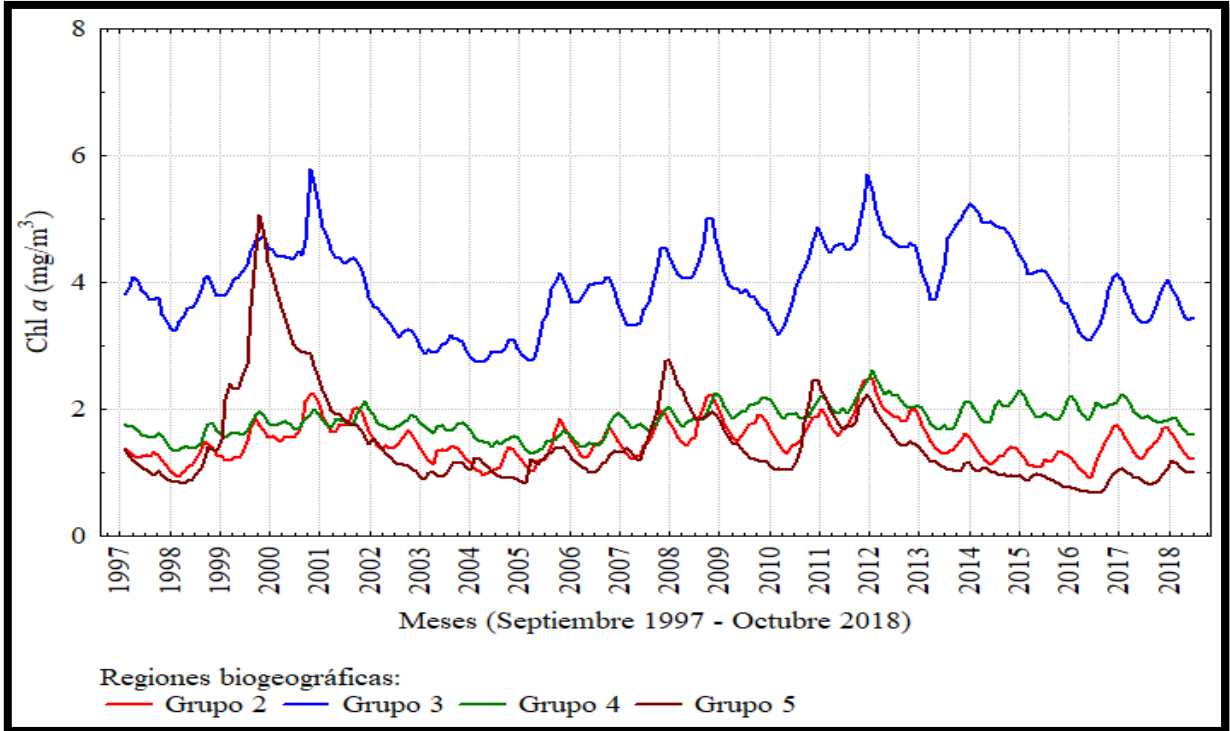


Figura 12. Series de tiempo de los niveles de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.

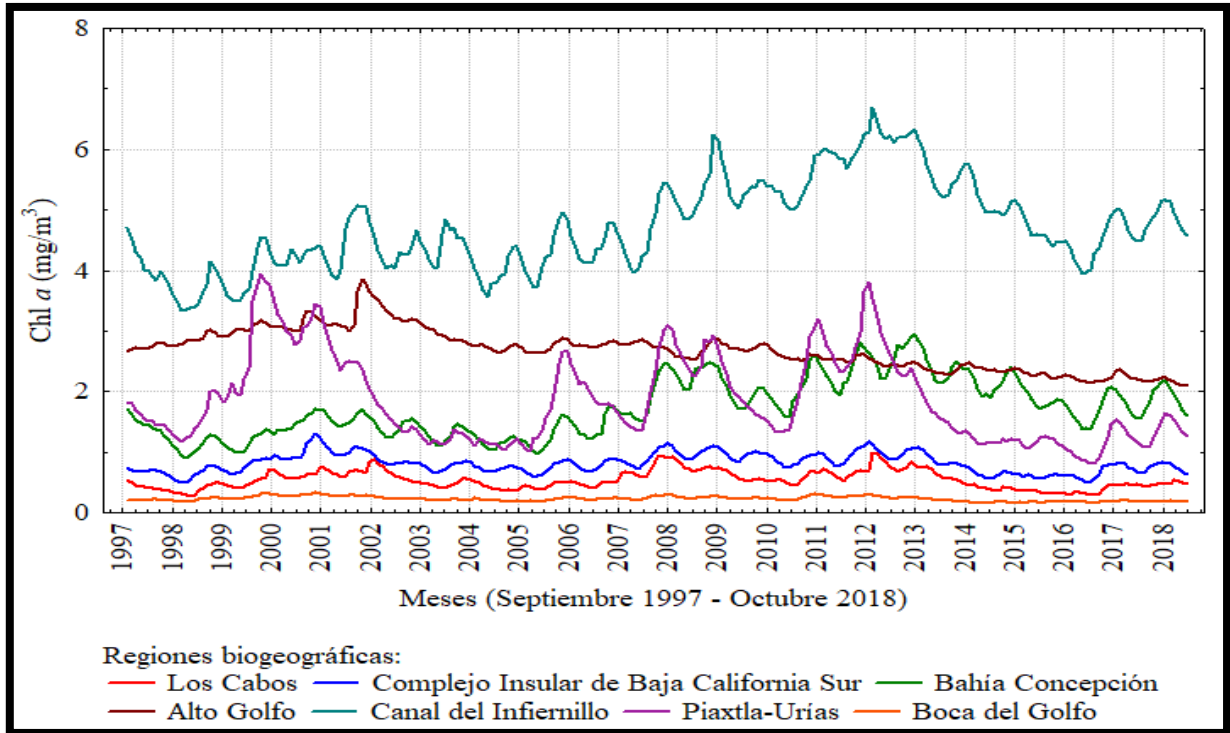


Figura 13. Series de tiempo de los niveles de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.

VI.3. Análisis de series de tiempo de anomalías

El análisis de anomalías en las TSM suavizadas de todas las regiones biogeográficas mostró un rango de variabilidad entre -2.0937 a 1.7156 unidades de anomalías (Tabla 6), las cuales fueron comparadas con la base de datos global de la Oscilación Decadal del Pacífico (Pacific Decadal Oscillation; PDO por sus siglas en inglés) con un rango de anomalías entre -1.9485 a 1.1345 unidades, mostrando una variabilidad de anomalías de la TSM con fases positivas (cálidas) y negativas (frías), las cuales presentan una señal similar correspondiente a los fenómenos interanuales El Niño y La Niña respectivamente. Las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano presentaron un rango de anomalías entre -1.2899 a 1.7156, de las cuales las regiones de Bahía Magdalena y el Grupo 1 fueron los que presentaron el mayor rango de anomalías, mientras que las regiones con el menor rango fueron San Ignacio y R.B. Archipiélago Revillagigedo, esta última con el rango más bajo

de anomalías de toda el área de estudio (Figura 14). En el caso de las regiones biogeográficas del Golfo de California, el rango de anomalías presentó una variabilidad entre -2.0937 a 1.5957 unidades (Figuras 15 y 16), siendo el Alto Golfo y el Grupo 4 las regiones con el mayor rango de anomalías, esta última fue la región que presentó el mayor rango de anomalías de TSM de todas las regiones biogeográficas del noroeste de México, caso contrario fueron Los Cabos y el Grupo 3 al presentar el menor rango de anomalías de TSM en el Golfo de California.

Por otra parte, el análisis de anomalías correspondiente a la concentración de Chl *a* determinó un rango de anomalías en general abarcando todas las regiones biogeográficas entre -1.2426 a 1.9861 unidades (Tabla 7). Estas anomalías de Chl *a* fueron comparadas con la base de datos del Índice de la Oscilación del Sur (Southern Oscillation Index; SOI por sus siglas en inglés), que presentó un rango de anomalías entre -0.9285 a 1.4490 unidades, determinando en la variabilidad la presencia de anomalías de tipo positivas (frías) asociados a eventos Niña y de tipo negativas (cálidas) asociadas a eventos Niño. La variabilidad de anomalías de la concentración de Chl *a* en las regiones del Pacífico Sudcaliforniano mostró un rango entre -0.9439 y 1.5239 unidades, observando que las regiones de San Ignacio y Bahía Magdalena presentan el rango más amplio de anomalías, caso contrario es Cayos Alijos al presentar el rango más estrecho de anomalías de todo el noroeste de México (Figura 17). Las regiones del Golfo de California presentaron un rango diferente de anomalías de Chl *a* (-1.2426 a 1.9861 unidades) (Figuras 18 y 19), obteniendo que la región de Piaxtla-Urías tiene el rango más estrecho de anomalías de todas las regiones del Golfo de California, caso contrario fueron las regiones Grupo 5 y Alto Golfo al tener los rangos de anomalías más amplios, siendo el Alto Golfo la región biogeográfica con el rango mayor de todo el noroeste de México.

A lo largo del periodo de estudio, las series de tiempo de anomalías de TSM y Chl *a* presentaron efectos de los eventos Niño y Niña con diferentes intensidades en varios periodos de tiempo. Los eventos Niño tuvieron presencia en los siguientes periodos con cuatro tipos de niveles de intensidad: débil (2004-2005, 2006-2007, 2014-2015 y 2018-2019); moderado (1986-1987, 1994-1995, 2002-2003 y 2009-2010), fuerte (1987-1988 y 1991-1992) y muy fuerte (1982-1983, 1997-1998 y 2015-2016).

En el caso de los eventos Niña, se presentaron tres diferentes intensidades en otros periodos de tiempo: débil (1983-1984, 1984-1985, 2000-2001, 2005-2006, 2008-2009, 2016-2017 y 2017-2018), moderado (1995-1996 y 2011-2012) y fuerte (1988-1989, 1998-1999, 1999-2000, 2007-2008 y 2010-2011).

Tabla 6. Estadística descriptiva de las series de tiempo de anomalías suavizadas de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Mínimo	Máximo	Rango
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	-1.09	1.72	2.81
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	-1.31	1.38	2.69
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	-1.19	1.31	2.51
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	-1.78	1.60	3.37
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	-1.43	1.44	2.87
Vizcaíno	-1.11	1.66	2.77
San Ignacio	-1.12	1.45	2.57
Bahía Magdalena	-1.29	1.52	2.81
Barra de Malva-Cabo Falso	-1.20	1.46	2.66
Cayos Alijos	-1.14	1.54	2.68
R.B. Archipiélago Revillagigedo	-1.12	1.23	2.35
Los Cabos	-1.32	1.16	2.48
Complejo Insular de Baja California Sur	-1.08	1.43	2.51
Bahía Concepción	-1.48	1.32	2.80
Alto Golfo	-2.09	1.03	3.13
Canal del Infiernillo	-1.68	1.29	2.97
Piactla-Urías	-1.30	1.42	2.71
Boca del Golfo	-1.50	1.16	2.65

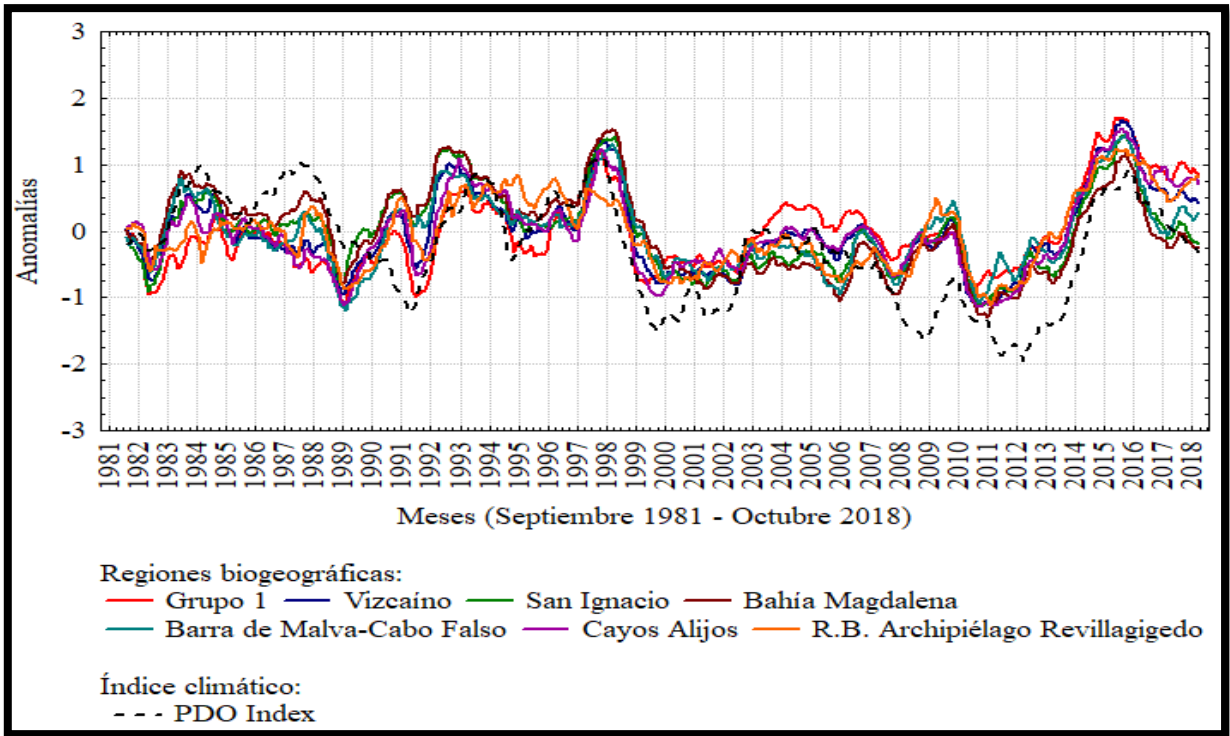


Figura 14. Series de tiempo de anomalías de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano.

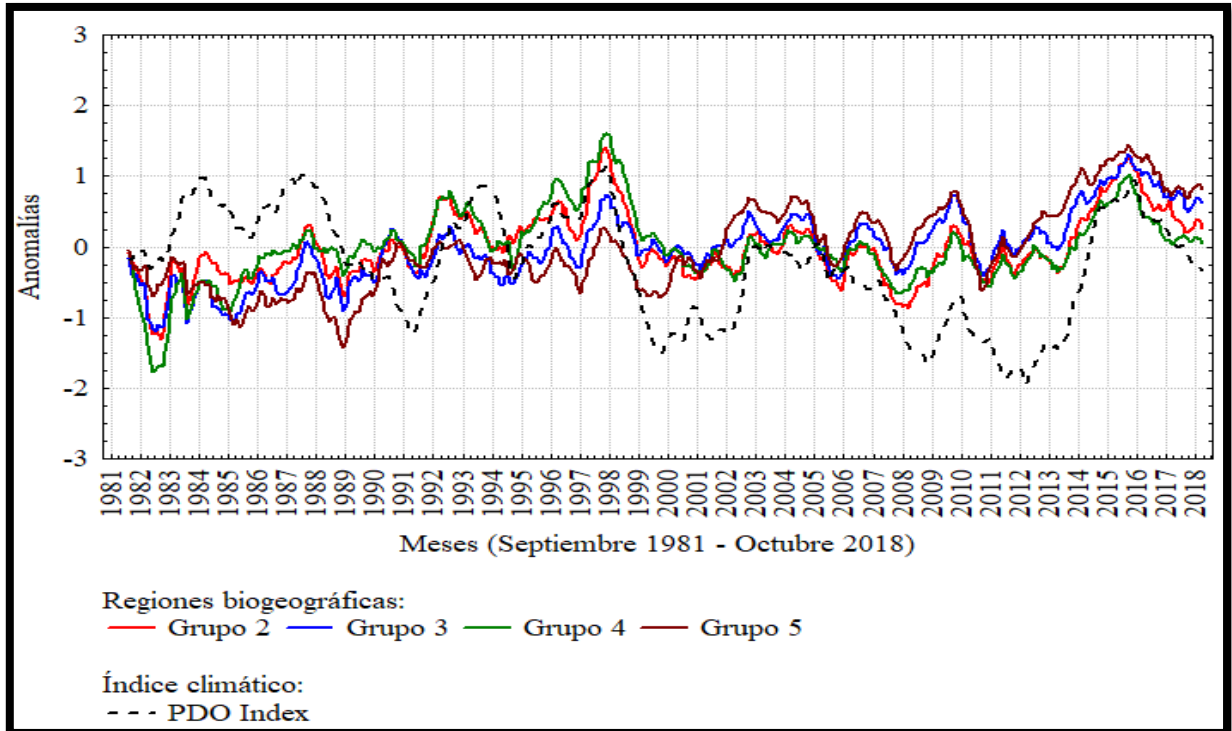


Figura 15. Series de tiempo de anomalías de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.

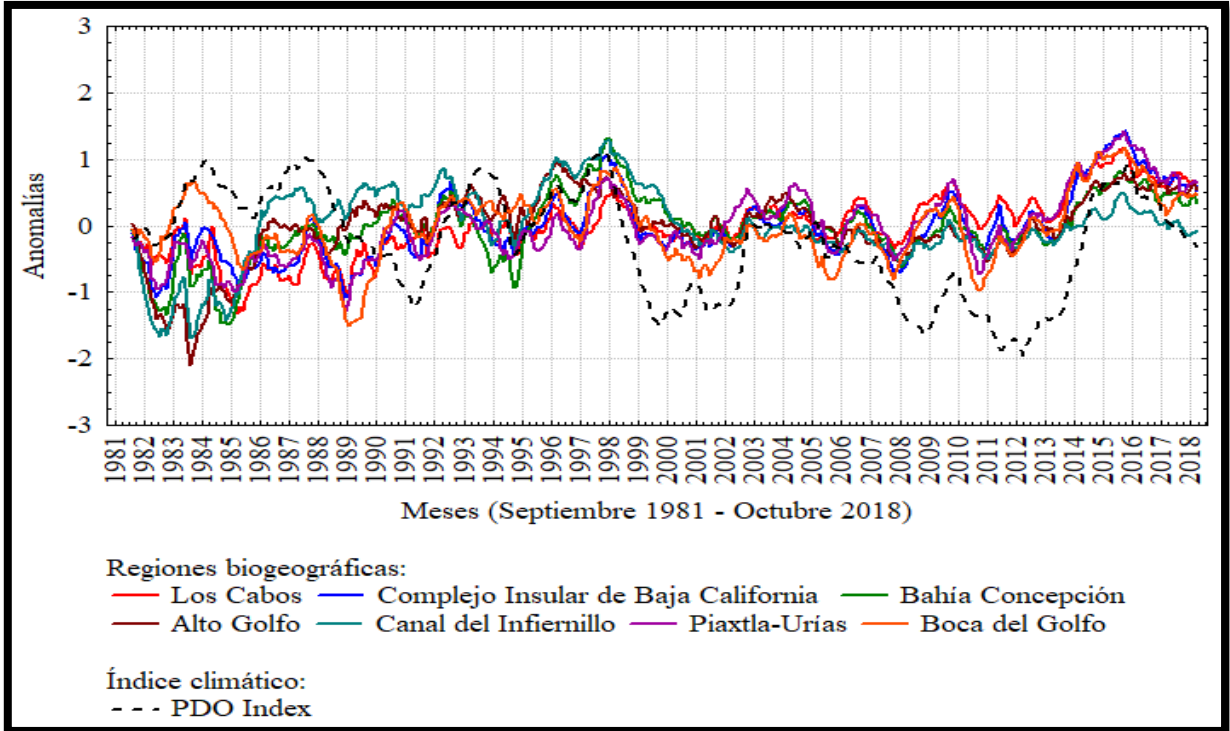


Figura 16. Series de tiempo de anomalías de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.

Tabla 7. Estadística descriptiva de las series de tiempo de anomalías suavizadas de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Mínimo	Máximo	Rango
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	-0.89	1.16	2.05
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	-0.71	1.22	1.94
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	-0.92	1.15	2.07
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	-0.93	1.17	2.10
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	-0.53	1.99	2.52
Vizcaíno	-0.90	1.31	2.21
San Ignacio	-0.94	1.52	2.47
Bahía Magdalena	-0.88	1.45	2.33
Barra de Malva-Cabo Falso	-0.86	1.34	2.20
Cayos Alijos	-0.75	0.99	1.74
R.B. Archipiélago Revillagigedo	-0.87	1.21	2.08
Los Cabos	-0.76	1.14	1.90
Complejo Insular de Baja California Sur	-0.89	1.16	2.04
Bahía Concepción	-0.94	1.38	2.32
Alto Golfo	-1.24	1.52	2.76
Canal del Infiernillo	-0.95	1.46	2.41
Piactla-Urías	-0.64	1.11	1.75
Boca del Golfo	-0.88	1.10	1.98

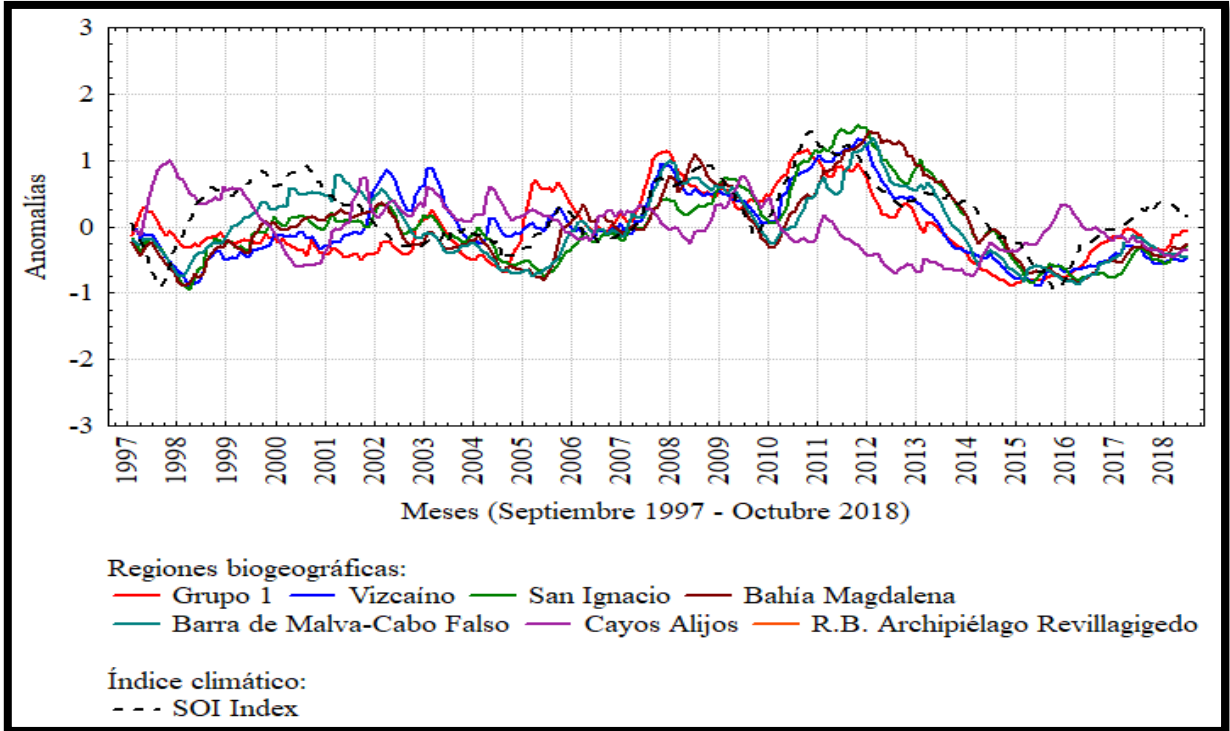


Figura 17. Series de tiempo de anomalías de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) de las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano.

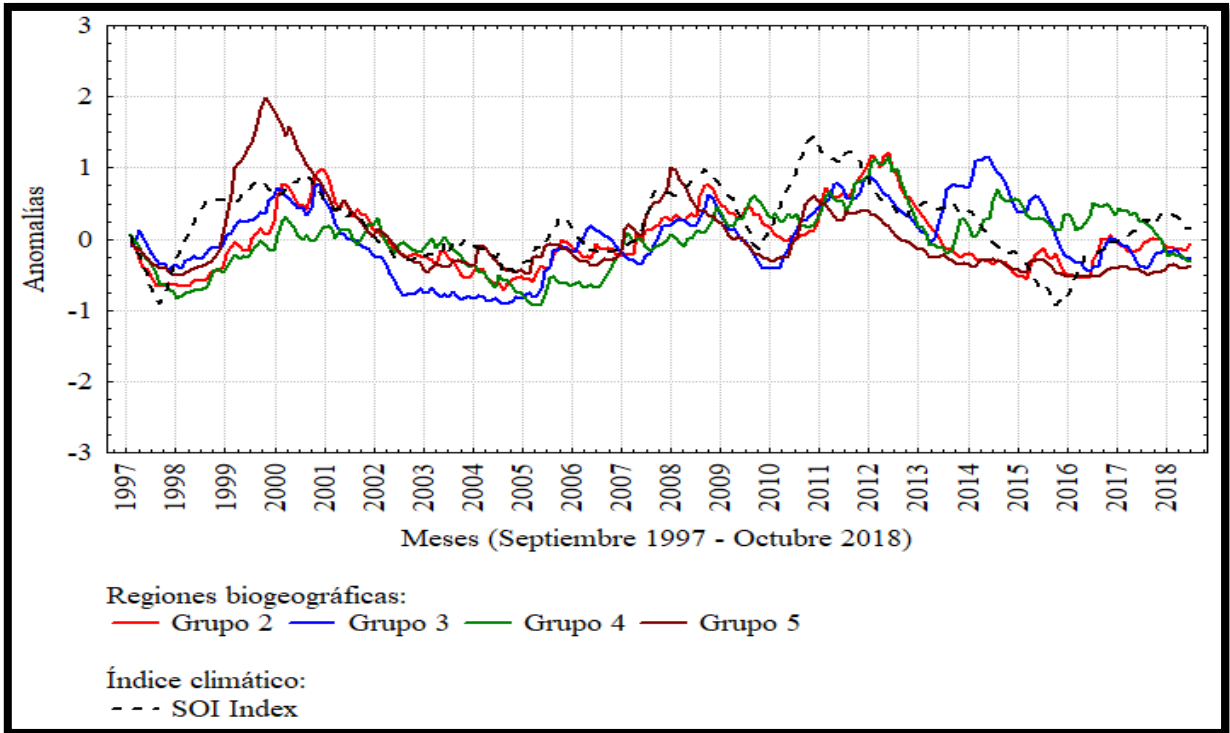


Figura 18. Series de tiempo de anomalías de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.

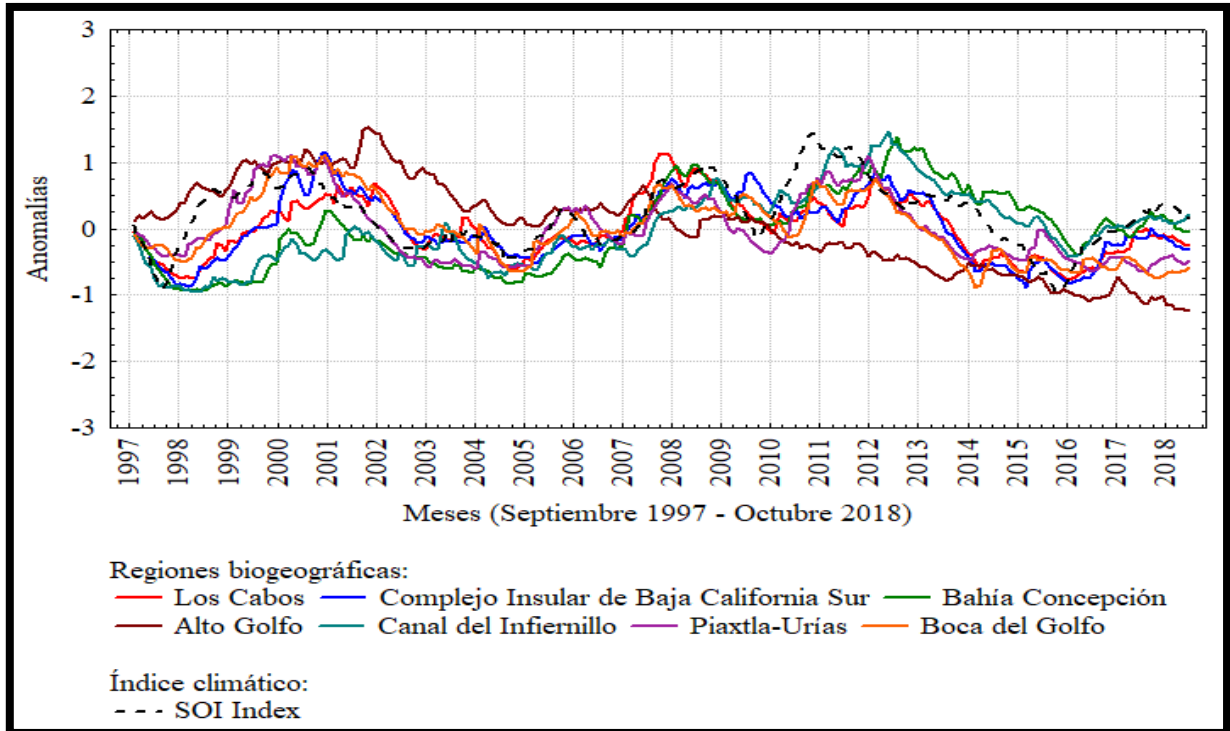


Figura 19. Series de tiempo de anomalías de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.

VI.4. Análisis de Fourier

El análisis espectral de Fourier de cada una de las regiones biogeográficas determinó un total de cuatro frecuencias de variabilidad temporal en cada una de las series de tiempo de TSM (Figuras 20, 21 y 22) al igual que en las de Chl *a* (Figuras 23, 24 y 25), las cuales fueron las siguientes: frecuencia anual (cambios que se dan por año), semianual (cambios cada seis meses), estacional (cambios de tres o cuatro meses) e interanual (cambios de tres a cinco años), esta última frecuencia de variación está asociada a los fenómenos climáticos El Niño y La Niña. En las series de Fourier de la TSM se observa una clara dominación de la frecuencia anual en todas las regiones biogeográficas, seguido de la frecuencia semianual, sin embargo, en algunas regiones como el Grupo 2, Grupo 3 y Piaxtla-Urías la frecuencia estacional presenta una densidad espectral similar con la semianual, mientras que en Las regiones del Pacífico Sudcaliforniano (Grupo 1, Vizcaíno, San Ignacio, Bahía

Magdalena, Barra de Malva-Cabo Falso, Cayos Alijos y R.B. Archipiélago Revillagigedo) y algunas del sur del Golfo de California (Grupo 5, Canal del Infiernillo, Piaxtla-Urías y Boca del Golfo), la frecuencia interanual tuvo una densidad espectral similar o en algunos casos mayores que la frecuencia semianual.

En el caso del análisis espectral de Fourier correspondiente a las series de tiempo de la concentración de Chl *a*, también se presentó una dominancia de la frecuencia anual para la mayoría de las series de Fourier de las regiones biogeográficas del noroeste de México, menos el Grupo 5 al presentar la frecuencia interanual como la principal frecuencia. La segunda frecuencia principal fue la semianual, a excepción en el Grupo 4 y Alto Golfo al obtener una densidad espectral similar con respecto a la frecuencia anual. Por otra parte, la frecuencia estacional obtuvo una densidad espectral similar o mayor que la semianual en algunas regiones del Pacífico Sudcaliforniano (Grupo 1) y Golfo de California (Grupo 2 y Boca del Golfo). Por último, la frecuencia interanual tuvo una presencia importante en las siguientes regiones del Pacífico Sudcaliforniano: Grupo 1, Vizcaíno, Cayos Alijos y R.B. Archipiélago Revillagigedo; mientras que en el Golfo de California fueron la mayoría a excepción del Grupo 4 y Alto Golfo.

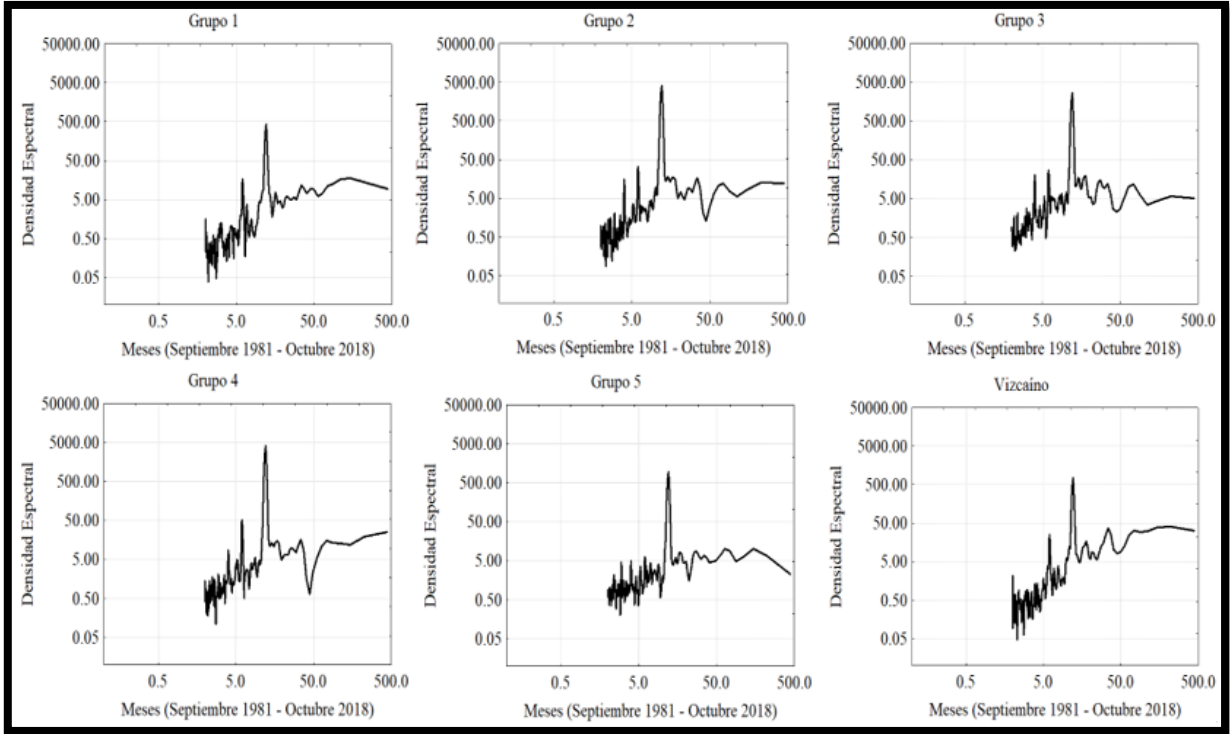


Figura 20. Análisis de Fourier de las series de tiempo de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

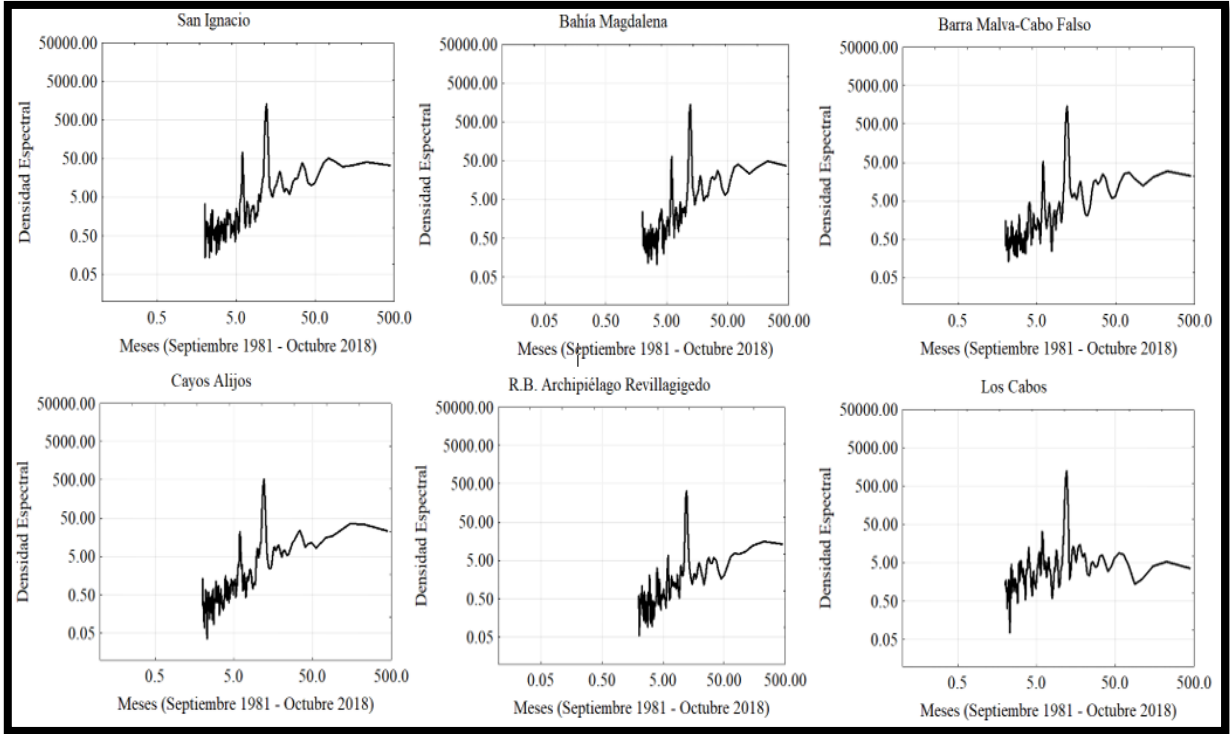


Figura 21. Análisis de Fourier de las series de tiempo de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

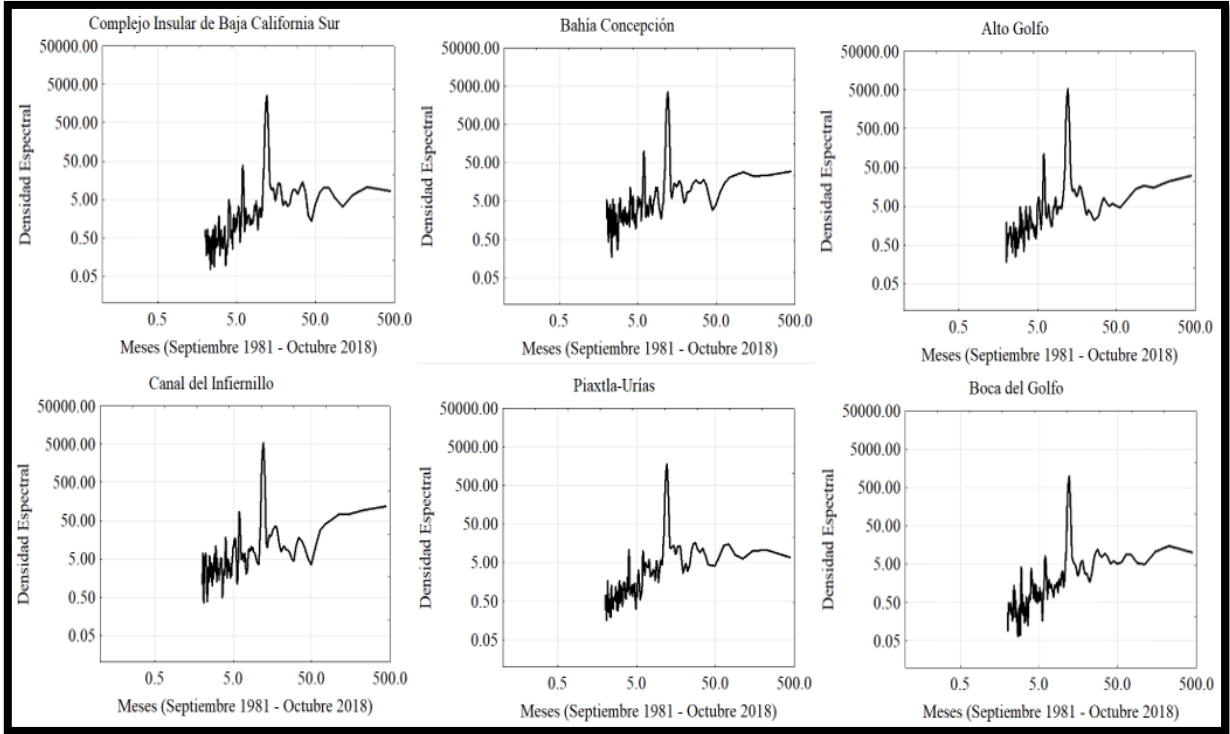


Figura 22. Análisis de Fourier de las series de tiempo de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

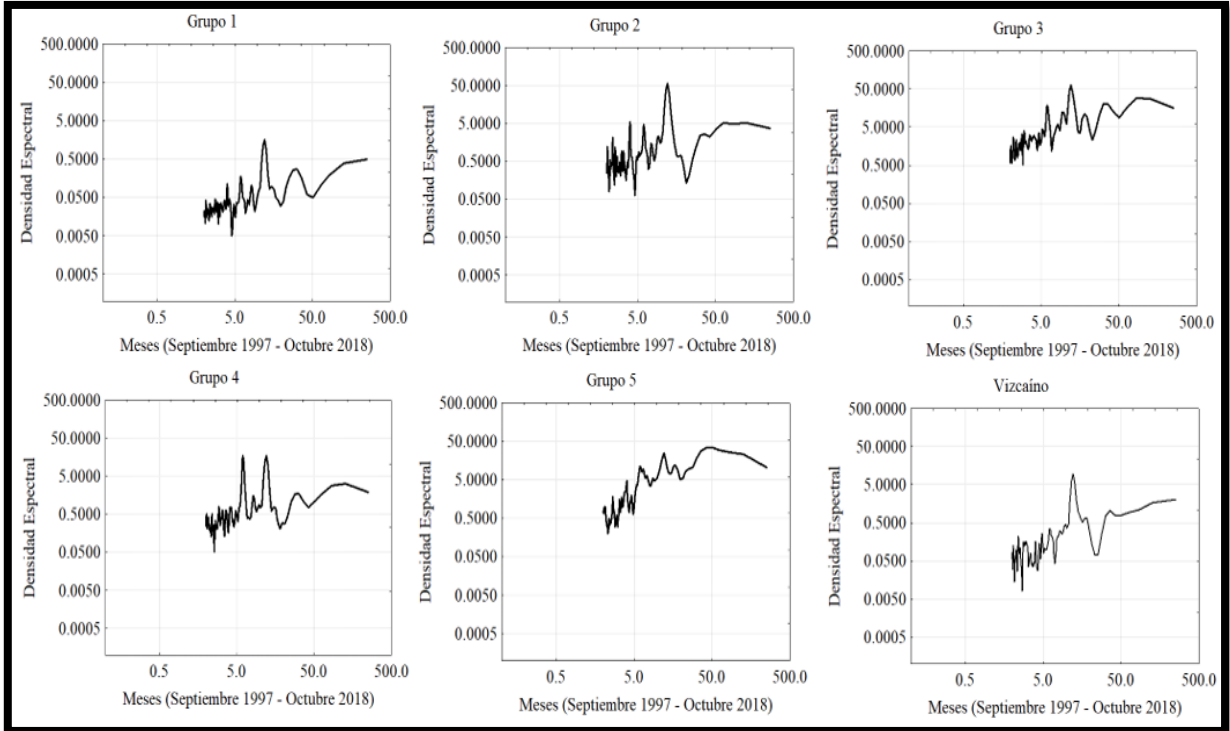


Figura 23. Análisis de Fourier de las series de tiempo de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

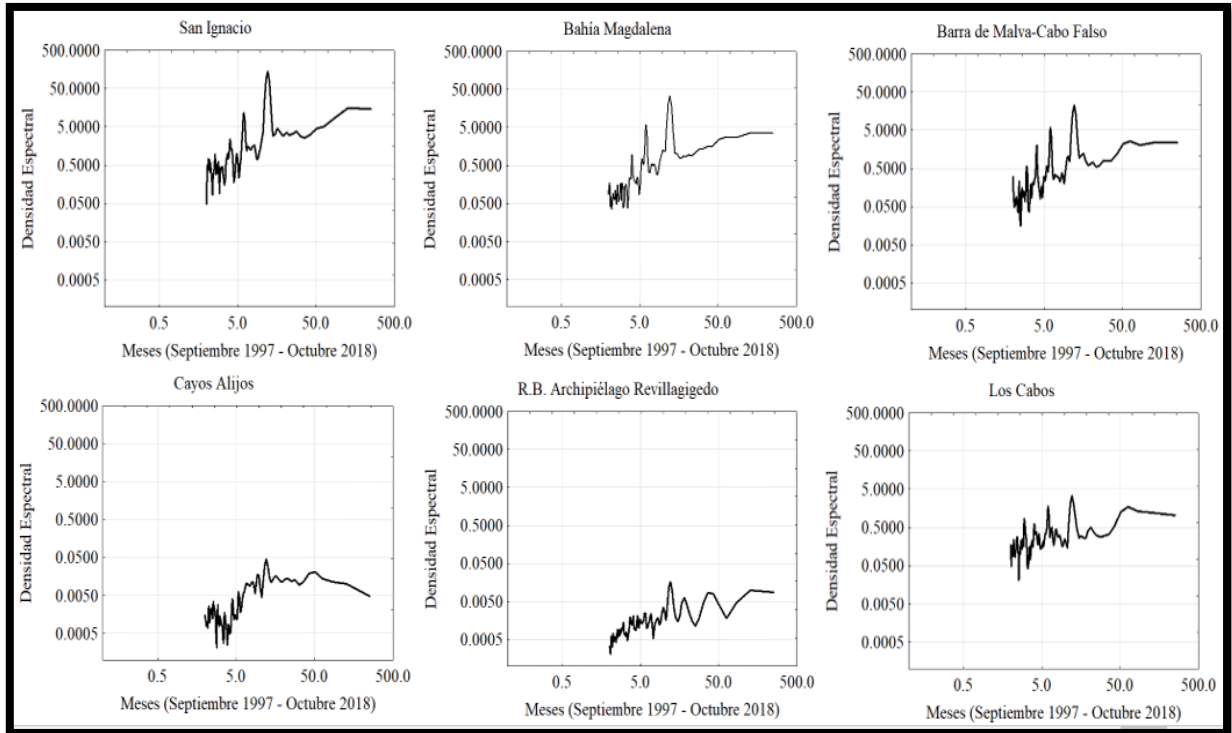


Figura 24. Análisis de Fourier de las series de tiempo de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

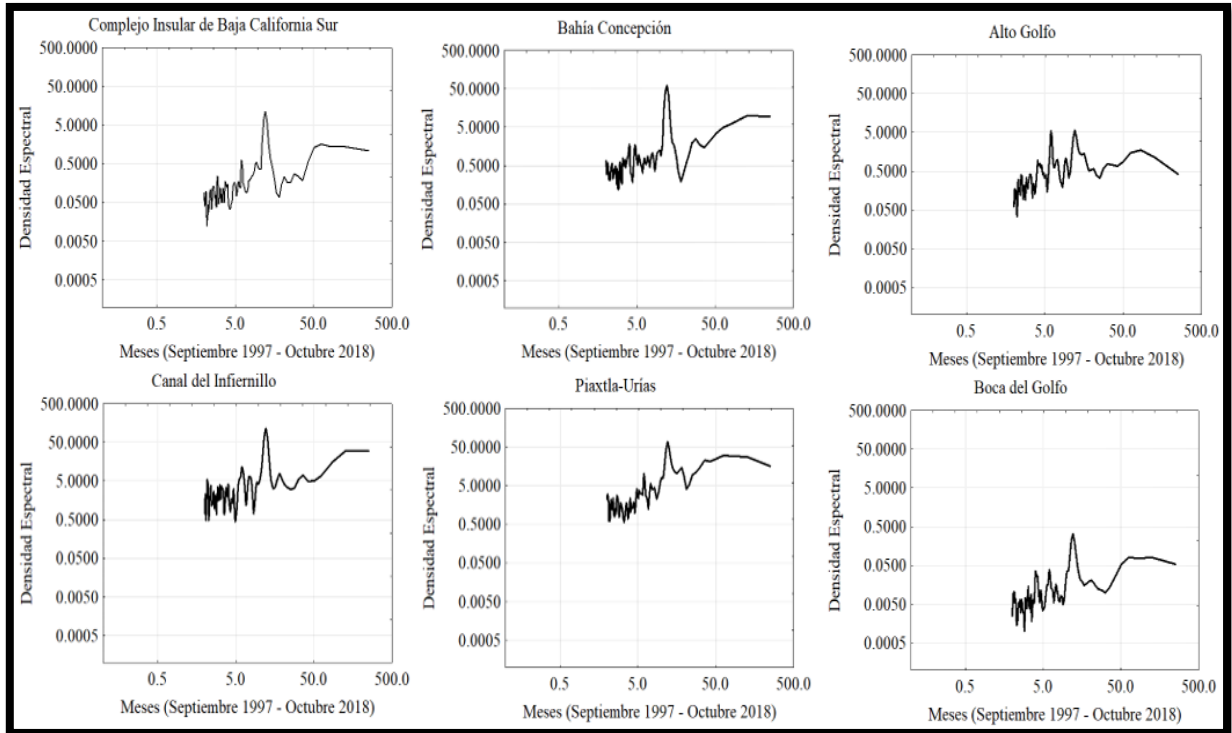


Figura 25. Análisis de Fourier de las series de tiempo de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

VI.5. Análisis de ciclo anual

El análisis de ciclo anual tanto de TSM como de Chl *a* para cada una de las regiones biogeográficas mostró una variabilidad estacional con valores máximos y mínimos en diferentes estaciones del año. El ciclo anual de la TSM de las regiones del Pacífico Sudcaliforniano presentó valores máximos entre agosto y septiembre (verano-otoño) entre los 19 a 28 °C, siendo las regiones R.B. Archipiélago Revillagigedo y Barra de Malva-Cabo Falso las que presentaron los mayores niveles de TSM de todas las regiones con un valor de 27.6 °C en agosto y 28 °C durante septiembre, respectivamente. En general, se observa un decrecimiento de los niveles de TSM a partir del mes de octubre, hasta alcanzar los valores mínimos entre los meses de febrero y abril (invierno-primavera) entre los 16 a 26 °C, observando los valores más bajos de TSM en las regiones Grupo 1 durante febrero

(16.3 °C) y Vizcaíno en el mes de marzo (16.7 °C) (Figura 26). En el caso de las regiones del Golfo de California (Figuras 27 y 28) se presentó un ciclo anual diferente, al presentar un efecto importante de homogenización de los niveles de TSM al momento de alcanzar valores máximos entre julio y septiembre (verano-otoño) entre los 28 a 32 °C, observando los mayores valores de TSM en la región del Alto Golfo (31.3 °C) y el Grupo 2 (30.9 °C) en el mes de agosto. Después de alcanzar los valores máximos, se observa un decrecimiento a partir de los meses de octubre-noviembre, obteniendo valores mínimos entre enero y marzo (invierno-primavera) entre los 15 a 26 °C, siendo el Alto Golfo y Canal de Infiernillo los que presentaron las temperaturas mínimas más bajas durante el mes de enero (15.8 °C).

Con respecto al ciclo anual de la concentración de Chl *a*, las regiones del Pacífico Sudcaliforniano (Figura 28) presentaron valores máximos entre marzo y julio (primavera-verano) con un rango entre los 0.13 a 3.88 mg/m³, siendo San Ignacio (2.23 mg/m³) y Bahía Magdalena (3.88 mg/m³) quienes presentaron los valores más altos de Chl *a* durante el mes de junio. A partir del mes de julio ocurre un decrecimiento en general de la concentración de Chl *a* hasta obtener valores mínimos durante otoño-invierno menores a 1 mg/m³, sin embargo, los valores mínimos más bajos se presentaron en las regiones oceánicas de Cayos Alijos (0.1 mg/m³) en el mes de junio y R.B. Archipiélago Revillagigedo (0.09 mg/m³) durante el mes de agosto. Por otra parte, el ciclo anual de la concentración de Chl *a* del Golfo de California (Figuras 29 y 30) obtuvo valores máximos en general entre diciembre a mayo (invierno-primavera) con un rango entre los 0.31 a 6.29 mg/m³, encontrando los mayores valores máximos en el Canal del Infiernillo (6.29 mg/m³) y el Grupo 3 (4.97 mg/m³) durante el mes de abril para ambas regiones. A partir del mes de mayo empieza la transición a la etapa cálida hasta obtener valores mínimos de concentración de Chl *a* entre junio y noviembre (verano-otoño) con valores que rondan entre los 0.14 a 3.06 mg/m³, teniendo un efecto más significativo en la Boca del Golfo al obtener 0.14 mg/m³ en octubre y 0.15 mg/m³ en septiembre y noviembre y en la región de Los Cabos con concentraciones de 0.21 mg/m³ durante octubre y 0.23 mg/m³ en el mes de noviembre.

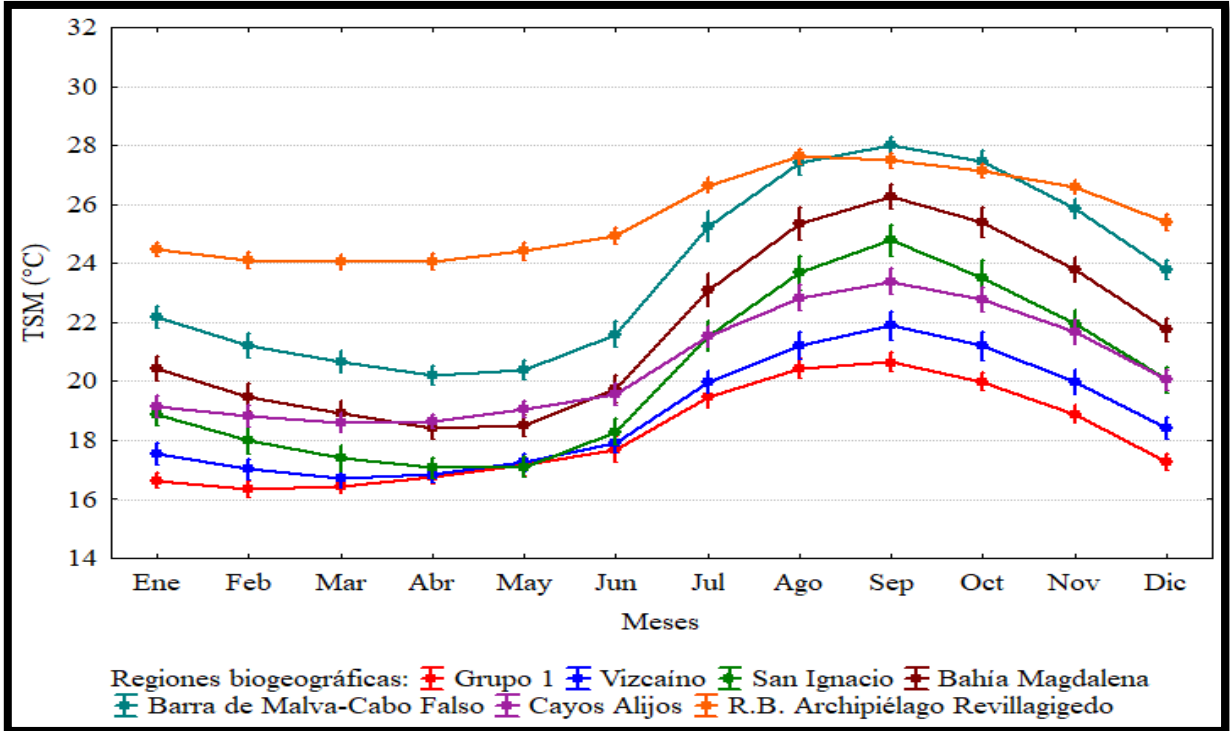


Figura 26. Análisis de ciclo anual de los niveles de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano.

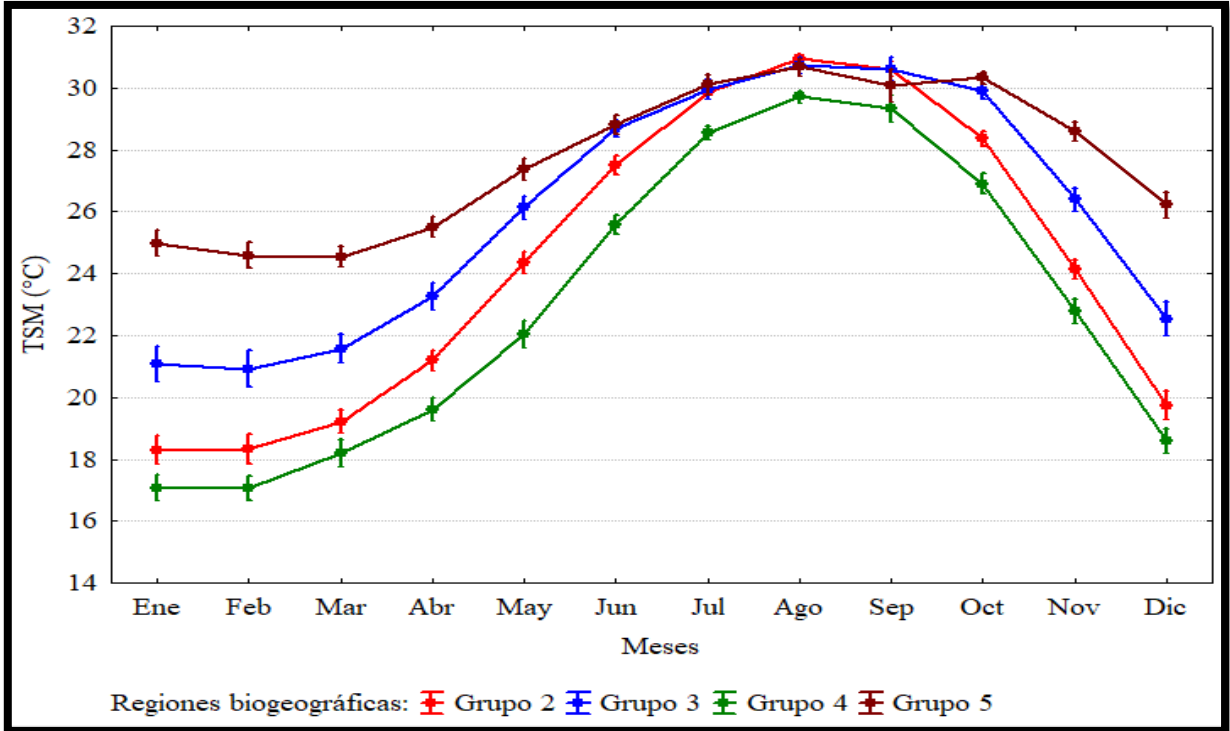


Figura 27. Análisis de ciclo anual de los niveles de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.

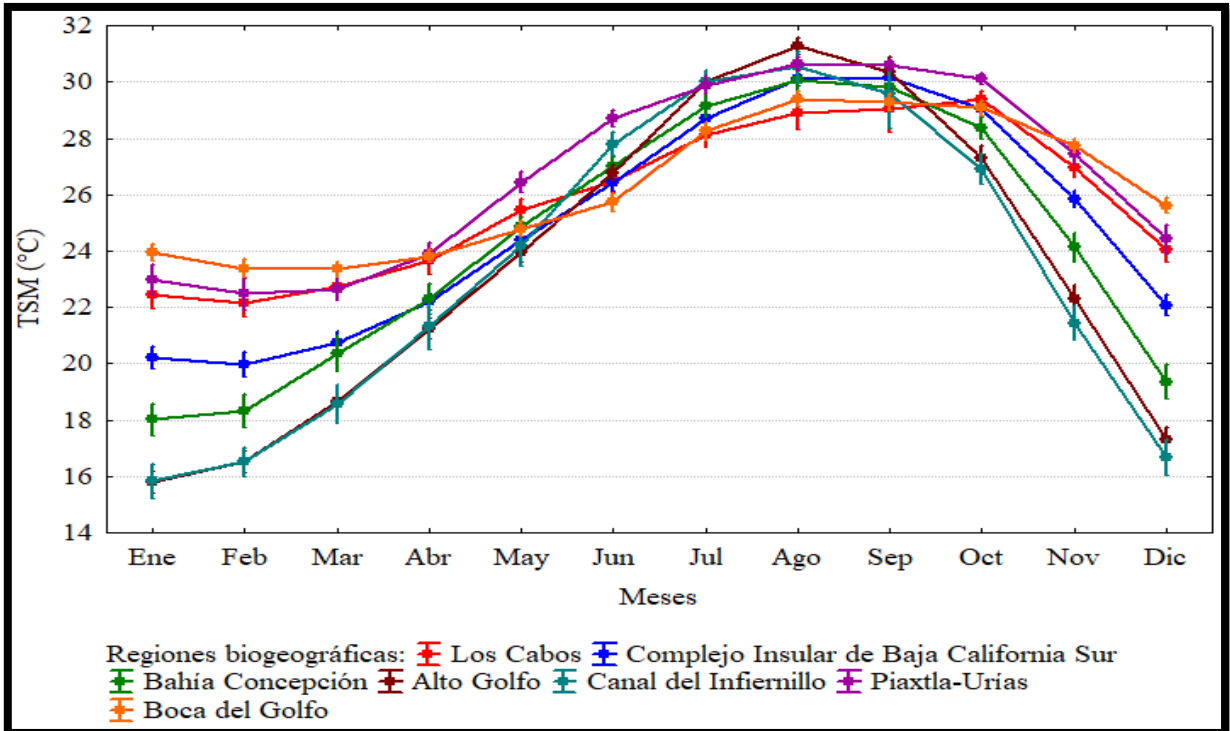


Figura 28. Análisis de ciclo anual de los niveles de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.

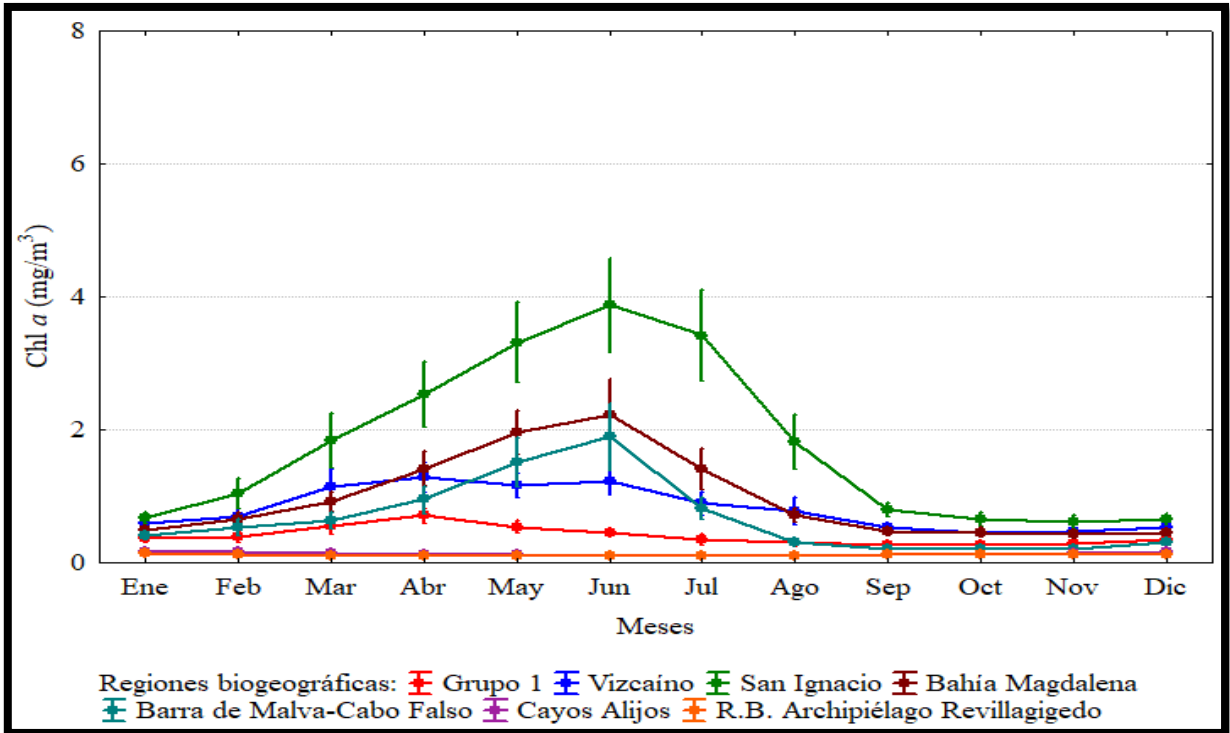


Figura 29. Análisis de ciclo anual de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano.

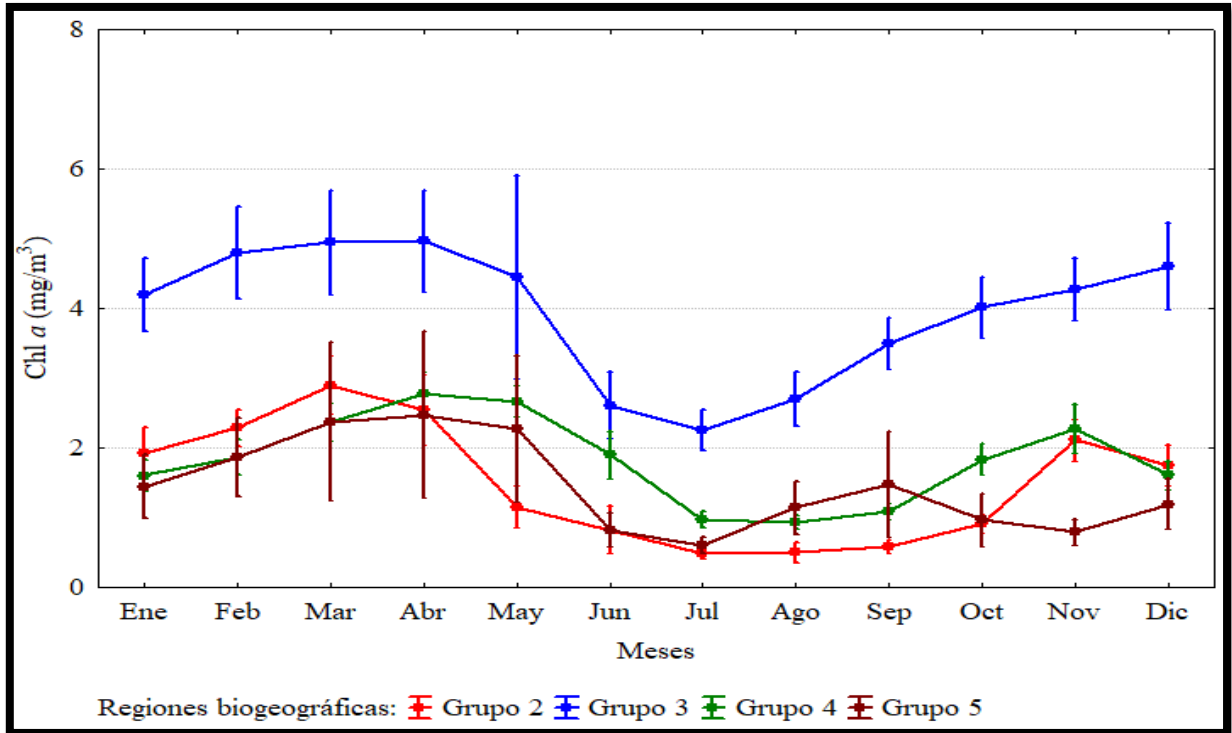


Figura 30. Análisis de ciclo anual de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.

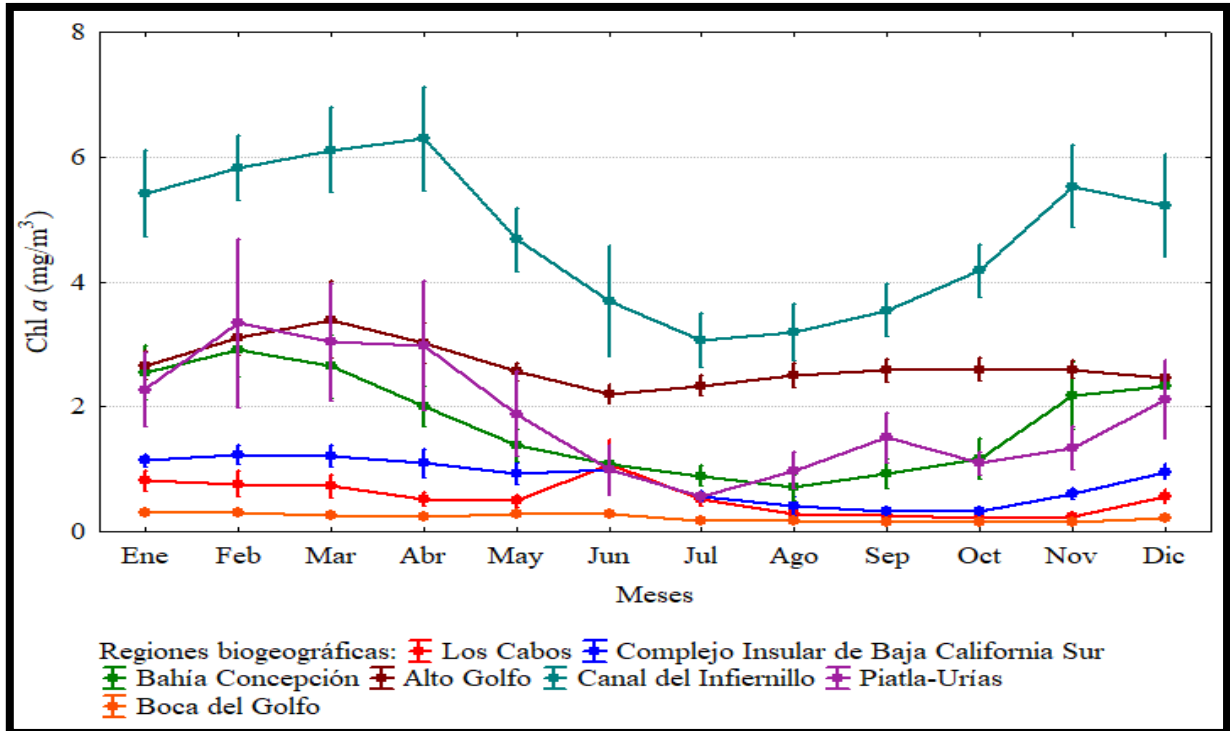


Figura 31. Análisis de ciclo anual de la concentración de Clorofila a (Chl a) de las regiones biogeográficas del Golfo de California.

VI.6. Análisis estadístico

Para determinar si se presentaron tendencias de cambios significativas en los niveles de TSM (Tabla 8) y concentración de Chl a (Tabla 9) en cada una de las regiones biogeográficas, se realizó una prueba de Elliot-Rothenberg ($p < 0.05$). En todas las regiones del noroeste de México se obtuvo un rechazo de las hipótesis nulas ($p < 0.0001$). Aparentemente, no hay suficiente evidencia estadística para determinar tendencias de cambio significativas en las series de tiempo de cada una de las variables en cada una de las regiones biogeográficas tanto del Pacífico Sudcaliforniano como del Golfo de California.

Tabla 8. Valores de la Prueba de Elliot-Rothenberg ($p < 0.05$) para la detección de tendencias de cambio de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Valor de la prueba estadística	P-Valor
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	-4.44	< 2.2e-16
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	-4.61	< 2.2e-16
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	-9.41	< 2.2e-16
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	-4.54	< 2.2e-16
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	-9.43	< 2.2e-16
Vizcaíno	-3.86	< 2.2e-16
San Ignacio	-5.61	< 2.2e-16
Bahía Magdalena	-4.60	< 2.2e-16
Barra de Malva-Cabo Falso	-5.62	< 2.2e-16
Cayos Alijos	-3.44	< 2.2e-16
R.B. Archipiélago Revillagigedo	-4.91	< 2.2e-16
Los Cabos	-9.46	< 2.2e-16
Complejo Insular de Baja California Sur	-5.21	< 2.2e-16
Bahía Concepción	-7.35	< 2.2e-16
Alto Golfo	-4.27	< 2.2e-16
Canal del Infiernillo	-8.42	< 2.2e-16
Piactla-Urías	-7.60	< 2.2e-16
Boca del Golfo	-5.91	< 2.2e-16

Tabla 9. Valores de la Prueba de Elliot-Rothenberg ($p < 0.05$) para la detección de tendencias de cambio de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Valor de la prueba estadística	P-Valor
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	-3.88	4.657e-05
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	-5.36	4.88e-06
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	-4.35	1.988e-07
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	-4.34	2.292e-15
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	-4.12	2.277e-08
Vizcaíno	-5.83	3.939e-09
San Ignacio	-5.13	1.892e-09
Bahía Magdalena	-4.42	1.834e-11
Barra de Malva-Cabo Falso	-5.21	4.909e-10
Cayos Alijos	-6.15	7.338e-16
R.B. Archipiélago Revillagigedo	-0.18	0.1398
Los Cabos	-3.98	3.306e-13
Complejo Insular de Baja California Sur	-4.19	2.622e-05
Bahía Concepción	-5.09	8.791e-05
Alto Golfo	-3.44	1.286e-11
Canal del Infiernillo	-3.77	1.969e-06
Piactla-Urías	-5.82	3.315e-10
Boca del Golfo	-4.20	1.998e-06

Por otra parte, para comparar y analizar la variabilidad intra anual de los niveles de TSM y concentración de Chl *a* en cada una de las regiones biogeográficas durante los eventos ENSO (El Niño y La Niña) y condiciones neutras, se realizó un análisis de permutaciones por pares. En el caso de los niveles de TSM, el análisis de permutaciones se realizó utilizando la media de los valores promedio mensuales de temperatura para todo el periodo de estudio, mientras que para la concentración de Chl *a*, el análisis se realizó

utilizando la suma de los valores promedio de la concentración de clorofila. Posteriormente cada variable se dividió durante los eventos El Niño, La Niña y condiciones neutras para cada una de las estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno).

El análisis de permutaciones por pares permite el proceso de inferencia en base a una hipótesis nula que asume que los niveles de TSM y Chl *a* bajo las condiciones de los eventos interanuales y condiciones neutras no tienen una diferencia significativa en los valores obtenidos de cada variable. Al mismo tiempo, se toman en cuenta los resultados de la influencia de los eventos interanuales y condiciones neutras de forma independiente para cada una de las regiones, permitiendo realizar una cantidad importante de muestreos para proporcionar una distribución de permutación aproximada y adecuada. Acorde a los análisis, los valores de TSM y Chl *a* en fueron estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) para todas las regiones biogeográficas del noroeste de México en cada una de las estaciones del año durante los eventos interanuales y condiciones neutras.

Estas diferencias fueron detectadas a través de una prueba post hoc de permutación por pares. Los p valores significativos se indican con letras en los análisis de los niveles de TSM (Tablas 10, 11, 12 y 13) al igual que en los correspondientes de la concentración de Chl *a* (Tablas 14, 15, 16 y 17) y durante los eventos Niño, Niña y condiciones neutras para cada una de las estaciones del año. Sin embargo, cuando los eventos interanuales en una región biogeográfica para una temporada en específico comparten la misma letra, significa que no se encontró suficiente evidencia estadística.

En el caso de los niveles de TSM, 10 de las 18 regiones biogeográficas presentaron diferencia significativa durante primavera. Sin embargo, en verano esas diferencias significativas fueron menores al presentarse solamente en 4 de las 18 regiones. En el caso de otoño, el número de regiones con diferencias significativas fue también bajo al presentarse en 6 de las 18 regiones. Caso contrario se obtuvo en invierno, al observarse diferencias significativas en casi todas las regiones biogeográficas (16 de 18).

Por otra parte, la concentración de Chl *a* presentó diferencias significativas en 14 de las 18 regiones biogeográficas durante primavera. Caso contrario se observó en verano (2 de 18) y otoño (3 de 18) al no presentarse muchas diferencias significativas en las regiones

biogeográficas durante los eventos interanuales y condiciones neutras. Sin embargo, durante la época de invierno, el número de regiones con diferencias significativas fue mayor al obtenerse en 11 de las 18 regiones biogeográficas.

Tabla 10. Prueba de permutación por pares del análisis intranual de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) en primavera durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Eventos Niño	Eventos Niña	Condiciones neutras
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	16.92(a)	16.16(a)	16.91(ab)
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	22.02(a)	20.93(a)	21.63(ab)
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	23.89	23.13	23.73
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	20.39	19.41	19.95
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	25.96	25.35	25.89
Vizcaíno	17.64(a)	15.90(b)	16.74(c)
San Ignacio	18.62(a)	16.75(b)	17.42(b)
Bahía Magdalena	20.24(a)	18.14(b)	19.05(c)
Barra de Malva-Cabo Falso	21.65(a)	19.71(b)	20.60(c)
Cayos Alijos	19.12(a)	17.72(b)	18.80(a)
R.B. Archipiélago Revillagigedo	24.31(a)	23.59(a)	24.35(ab)
Los Cabos	23.81	23.05	23.63
Complejo Insular de Baja California Sur	22.86(a)	21.62(a)	22.40(ab)
Bahía Concepción	23.24	22.15	22.64
Alto Golfo	21.60	21.21	21.56
Canal del Infiernillo	22.40	21.78	22.19
Piactla-Urías	24.58	23.68	24.18
Boca del Golfo	24.46(a)	23.28(a)	24.14(ab)

Tabla 11. Prueba de permutación por pares del análisis intranual de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) en verano durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Eventos Niño	Eventos Niña	Condiciones neutras
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	18.77(a)	18.85(a)	19.50(ab)
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	29.53	29.23	29.48
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	30.03	29.59	29.78
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	27.83	27.89	28.01
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	30.27	29.53	29.83
Vizcaíno	19.46(a)	19.21(a)	20.19(ab)
San Ignacio	21.47	21.24	21.91
Bahía Magdalena	23.39	22.83	23.55
Barra de Malva-Cabo Falso	25.13	24.40	25.03
Cayos Alijos	20.83(a)	20.89(a)	21.73(b)
R.B. Archipiélago Revillagigedo	26.69(a)	26.11(a)	26.65(ab)
Los Cabos	28.27	27.38	27.69
Complejo Insular de Baja California Sur	28.72	28.24	28.45
Bahía Concepción	29.09	28.88	28.83
Alto Golfo	29.31	29.41	29.70
Canal del Infiernillo	30.26	30.61	30.40
Piactla-Urías	29.81	29.44	29.53
Boca del Golfo	28.15	27.56	27.92

Tabla 12. Prueba de permutación por pares del análisis intranual de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) en otoño durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Eventos Niño	Eventos Niña	Condiciones neutras
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	19.97	19.51	20.05
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	28.02(a)	27.48(b)	27.78(ab)
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	29.07	28.85	29.04
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	26.53	26.05	26.55
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	29.98	29.24	29.84
Vizcaíno	21.72(a)	20.47(a)	21.70(ab)
San Ignacio	24.75(a)	22.85(b)	24.38(a)
Bahía Magdalena	26.53(a)	24.88(b)	26.10(a)
Barra de Malva-Cabo Falso	27.75(a)	26.69(b)	27.35(a)
Cayos Alijos	23.06(a)	22.01(a)	23.10(ab)
R.B. Archipiélago Revillagigedo	27.38	27.01	27.30
Los Cabos	28.62	28.13	28.61
Complejo Insular de Baja California Sur	28.61	28.21	28.46
Bahía Concepción	27.57	27.37	27.92
Alto Golfo	26.56	26.76	27.32
Canal del Infiernillo	27.08	26.49	27.29
Piactla-Urías	29.42	28.94	29.35
Boca del Golfo	29.01	28.59	28.88

Tabla 13. Prueba de permutación por pares del análisis intranual de los niveles de Temperatura Superficial del Mar (TSM) en invierno durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Eventos Niño	Eventos Niña	Condiciones neutras
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	16.95(a)	16.44(a)	16.96(ab)
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	19.63(a)	18.16(b)	18.73(b)
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	22.29(a)	20.85(b)	21.57(ab)
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	18.35(a)	17.20(b)	17.26(b)
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	25.69(a)	24.62(a)	25.60(ab)
Vizcaíno	18.19(a)	17.01(b)	17.78(a)
San Ignacio	20.10(a)	18.72(b)	19.61(a)
Bahía Magdalena	21.69(a)	20.60(b)	21.24(a)
Barra de Malva-Cabo Falso	23.08(a)	22.14(b)	22.78(a)
Cayos Alijos	19.67(a)	18.69(b)	19.67(a)
R.B. Archipiélago Revillagigedo	24.93(a)	24.37(b)	25.03(a)
Los Cabos	23.01	22.18	22.44
Complejo Insular de Baja California Sur	21.37(a)	20.17(b)	20.53(b)
Bahía Concepción	19.59(a)	18.45(b)	18.41(b)
Alto Golfo	17.24	16.65	16.54
Canal del Infiernillo	17.93(a)	16.96(b)	16.54(b)
Piactla-Urías	23.87(a)	22.23(b)	23.52(a)
Boca del Golfo	24.76(a)	23.93(b)	24.66(a)

Tabla 14. Prueba de permutación por pares del análisis intranual de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) en primavera durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Eventos Niño	Eventos Niña	Condiciones neutras
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	1.12(a)	2.19(b)	1.83(b)
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	3.47(a)	7.65(b)	6.97(b)
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	9.17(a)	19.26(b)	12.18(a)
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	7.89	8.21	7.61
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	2.48(ab)	14.62(a)	4.53(b)
Vizcaíno	1.94(a)	4.66(b)	3.47(c)
San Ignacio	4.12(a)	10(b)	7.39(b)
Bahía Magdalena	2.31(a)	5.67(b)	4.11(c)
Barra de Malva-Cabo Falso	1.34(a)	4.35(b)	2.90(c)
Cayos Alijos	0.51	0.32	0.37
R.B. Archipiélago Revillagigedo	0.32	0.34	0.31
Los Cabos	0.83(a)	2.35(b)	1.65(c)
Complejo Insular de Baja California Sur	1.67(a)	3.74(b)	3.35(b)
Bahía Concepción	3.98(a)	7.55(ab)	6.04(b)
Alto Golfo	7.77	8.29	9.62
Canal del Infiernillo	13.53(a)	19.20(b)	16.90(ab)
Piactla-Urías	3.06(a)	13.69(b)	6.20(a)
Boca del Golfo	0.52(a)	1.07(b)	0.72(a)

Tabla 15. Prueba de permutación por pares del análisis intranual de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) en verano durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Eventos Niño	Eventos Niña	Condiciones neutras
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	1.05	1.12	1.13
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	1.41	2.28	1.67
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	7.83	6.60	6.91
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	3.58	3.94	3.78
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	2.97(ab)	3.30(a)	2.04(b)
Vizcaíno	3.31	2.75	2.80
San Ignacio	10.53	8.81	8.76
Bahía Magdalena	4.39	4.21	4.43
Barra de Malva-Cabo Falso	2.74	2.69	3.30
Cayos Alijos	0.29	0.32	0.31
R.B. Archipiélago Revillagigedo	0.30	0.30	0.28
Los Cabos	1.82	1.90	1.87
Complejo Insular de Baja California Sur	1.87	2.03	1.97
Bahía Concepción	2.43	3	2.60
Alto Golfo	7.28(a)	7.71(ab)	6.58(a)
Canal del Infiernillo	8.04	10.60	10.27
Piactla-Urías	2.28	3.41	2.15
Boca del Golfo	0.73	0.61	0.62

Tabla 16. Prueba de permutación por pares del análisis intranual de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) en otoño durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Eventos Niño	Eventos Niña	Condiciones neutras
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	0.76	0.91	0.78
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	3.14	4	3.31
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	10.86	11.74	10.98
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	4.67	5.50	5.10
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	2.12(a)	4.12(ab)	3.40(b)
Vizcaíno	1.34	1.53	1.38
San Ignacio	1.86	2.27	1.94
Bahía Magdalena	1.14	1.39	1.53
Barra de Malva-Cabo Falso	0.52(a)	0.65(b)	0.63(ab)
Cayos Alijos	0.42	0.36	0.35
R.B. Archipiélago Revillagigedo	0.38	0.32	0.34
Los Cabos	0.58(a)	0.77(ab)	0.79(b)
Complejo Insular de Baja California Sur	1.11	1.35	1.18
Bahía Concepción	2.88	4.45	4.87
Alto Golfo	7.28	8.04	7.68
Canal del Infiernillo	11.67	13.46	14.18
Piactla-Urías	3.35	4.33	3.98
Boca del Golfo	0.40	0.46	0.46

Tabla 17. Prueba de permutación por pares del análisis intranual de la concentración de Clorofila *a* (Chl *a*) en invierno durante los eventos interanuales (Niño y Niña) y condiciones neutras de las regiones biogeográficas del noroeste de México.

Regiones Biogeográficas	Eventos Niño	Eventos Niña	Condiciones neutras
Grupo 1 (Ensenadense e Isla Guadalupe)	0.91	1.19	0.96
Grupo 2 (Cajón del Diablo, Sistema Lagunar del Sur de Sonora y Guaymas)	4.47(a)	6.65(b)	5.21(ab)
Grupo 3 (Lagunas de Santa María La Reforma y Laguna de Chiricahueto)	9.23(a)	15.08(b)	13.38(b)
Grupo 4 (Costa Oriental Vizcaíno y Complejo Insular de Baja California)	4.65	5.05	4.79
Grupo 5 (Marismas Nacionales y Bahía de Banderas)	2.31(a)	6.13(b)	3.31 (ab)
Vizcaíno	1.35(a)	2.06(b)	1.63(ab)
San Ignacio	1.74(a)	2.68(b)	2.14(ab)
Bahía Magdalena	1.13(a)	1.79(b)	1.52(ab)
Barra de Malva-Cabo Falso	0.79(a)	1.50(b)	1.08(ab)
Cayos Alijos	0.47	0.43	0.49
R.B. Archipiélago Revillagigedo	0.34	0.40	0.36
Los Cabos	1.14(a)	2.58(b)	2.19(b)
Complejo Insular de Baja California Sur	2.61(a)	3.51(b)	3.28(ab)
Bahía Concepción	5.97	8.04	8.15
Alto Golfo	7.12	8.46	7.63
Canal del Infiernillo	12.81	17.43	16.70
Piactla-Urías	3.92(a)	11.14(b)	5.24(a)
Boca del Golfo	0.62(a)	0.94(b)	0.73(ab)

VII. DISCUSIÓN

VII.1. Caracterización de regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano y Golfo de California y su ciclo anual

La caracterización ecológica obtenida mediante el análisis de cluster en base a los valores promedio mensuales de TSM determinó un total de 18 regiones biogeográficas del noroeste de México en el Océano Pacífico, de las cuales el Pacífico Sudcaliforniano obtuvo 7 regiones (Grupo 1, Vizcaíno, San Ignacio, Bahía Magdalena, Barra de Malva-Cabo Falso, Cayos Alijos y R.B. Archipiélago Revillagigedo), mientras que el Golfo de California se observan 11 regiones (Grupo 2, Grupo 3, Grupo 4, Grupo 5, Los Cabos, Complejo Insular de Baja California Sur, Bahía Concepción, Alto Golfo, Canal del Infiernillo, Piaxtla-Urías y Boca del Golfo), a comparación de las 24 RMP designadas por CONABIO. El proceso de regionalización a través del análisis de cluster permite una agrupación mediante conglomerados al presentar una distancia de enlace que determina un alto nivel de homogeneidad interna en el mismo conglomerado al igual que un grado importante de heterogeneidad entre cada uno de los conglomerados obtenidos (Pedroza y Dicovskyi, 2007), siendo capaz de definir grupos al reducir el número de datos al momento de definir un cluster que representa una muestra de representación para el estudio (Serrano-Gallego, 2003). Estas características y ventajas del análisis de cluster permite definir una clasificación más adecuada de regiones biogeográficas en base a la variable observada, como es el caso de la TSM, pues las regiones biogeográficas obtenidas son el resultado de una combinación particular de aspectos fisicoquímicos, climatológicos y biológicos y sus variaciones en el área de estudio que influyen en la variabilidad de la TSM. El utilizar un análisis de cluster a través de datos de TSM nos permite realizar una caracterización ecológica mediante el proceso de regionalización, considerado una herramienta útil en el análisis de variabilidad ambiental y oceanográfica enfocada al estudio de tendencias de cambio y sus efectos en las pesquerías y ecosistemas (Santamaría-del Angel *et al.*, 2011). En este estudio, el proceso de regionalización a través de cluster fue determinado utilizando los valores promedio mensuales de los niveles de TSM en lugar de los valores mensuales

de la concentración de Chl *a*, debido a que esta última variable se caracteriza por presentar una mayor variabilidad a comparación de la TSM, pues la Chl *a* está determinada por la dinámica física (efectos de mezcla, procesos de surgencias, patrones de vientos) al igual que aspectos biológicos (crecimiento, efecto de pastoreo, nivel nutricional) presentes en la columna de agua (Robles-Tamayo, 2018; Robles-Tamayo *et al.*, 2018; Robles-Tamayo *et al.*, 2020), obteniendo un mayor número de regiones individuales en el proceso de regionalización.

Estudios similares enfocados a la regionalización se han realizado en diversas áreas a lo largo del Pacífico Sudcaliforniano a través del estudio de la variabilidad oceanográfica utilizando datos mensuales de TSM y Chl *a* derivados de imágenes satelitales; entre estos estudios corresponden a la descripción de fenómenos de mesoescala y su relación con la abundancia y distribución de los stocks de sardina (García-Morales, 2012) así como para el análisis espacio-temporal de la variabilidad estacional de la concentración de Chl *a* y sus tendencias de cambio (Thomas, 2013). El número de regiones biogeográficas obtenidas en este estudio fue diferente al reportado por Hernández-de la Torre *et al.* (2015) en el Pacífico Norte Mexicano frente a la Península de Baja California, donde determinaron un total de 9 regiones (6 costeras y 3 oceánicas) a través de datos de temperatura y producción primaria nueva para describir la dinámica oceanográfica y su variabilidad, demostrando el efecto de un gradiente latitudinal desde la costa hacia el océano a través de datos mensuales de TSM y Chl *a*, influyendo en el proceso de regionalización del área de estudio. Sin embargo, el número de regiones obtenidas en este estudio correspondiente al Pacífico Sudcaliforniano es el resultado de procesos de interacción océano atmósfera que determinan una climatología específica en conjunto con los patrones de vientos estacionales de carácter ecuatorial paralelos a la costa que generan efectos de surgencias caracterizados por presentar aguas subsuperficiales frías y ricas en nutrientes (Espinosa-Carreón *et al.*, 2004; Durazo, 2015), influyendo en la concentración de Chl *a* y en los niveles de productividad (Zaytsev *et al.*, 2003; Pérez-Brunius *et al.*, 2007; De la Cruz-Orozco *et al.*, 2017) al igual que en los valores de TSM (Cervantes-Duarte *et al.*, 2010; Cervantes-Duarte *et al.*, 2013; Martínez-Fuentes *et al.*, 2016) a lo largo de la Península de Baja California. Esta variabilidad de TSM y Chl *a* en este estudio frente a la Península de Baja California genera

un fujo de carácter estacional y es producto derivado del Sistema de la Corriente de California.

La regionalización obtenida en el Pacífico Sudcaliforniano correspondiente a este estudio es producto derivado del ciclo anual que genera una variabilidad que influye en los niveles de TSM y Chl *a*. Esta variabilidad de TSM y Chl *a* está determinada por la interacción entre el océano y atmósfera que influye en la dinámica física de la columna de agua, y a la vez en establecer una climatología particular a lo largo del área con una variabilidad de carácter estacional. La variabilidad estacional de TSM y Chl *a* está asociada principalmente a los cambios que ocurren en el flujo del Sistema de la Corriente de California (Durazo, 2009; Durazo, 2015) en conjunto con la variabilidad espacial y temporal del campo de viento, considerado un factor importante en el flujo de la Corriente de la California al generar surgencias costeras debido al transporte de Ekman que ocurre hacia fuera de la zona costera (Espinosa-Carreón *et al.*, 2004; Pérez-Brunius *et al.*, 2007) y que está determinado por el Centro de Alta Presión del Pacífico Norte (CAP), causando fuentes gradientes de presión y desarrollando componentes de viento constantes en dirección predominante sur-sureste hacia el ecuador a lo largo del año (Zaytsev *et al.*, 2003; Castro y Martínez, 2010).

Durante primavera-verano, se presenta una intensificación de los vientos estacionales del noroeste (Palacios-Hernández *et al.*, 1996; Pares-Sierra *et al.*, 1997) que favorecen los eventos de surgencias costeras a lo largo de la costa occidental de la Península de Baja California entre marzo y junio (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010*b*; Durazo *et al.*, 2010), caracterizadas por presentar aguas frías y ricas en nutrientes que generan un aumento en la biomasa del fitoplancton. Caso contrario ocurre durante otoño-invierno, pues los efectos de surgencias son más débiles debido al cambio de intensidad de los vientos regionales (Castro y Martínez, 2010) al igual que por la entrada de aguas de tipo tropical y subtropical (Durazo y Baumgartner, 2002; Durazo, 2009; Durazo, 2015) que provocan una disminución en la profundidad de nutrientes y por consecuencia, causando un decrecimiento en la biomasa fitoplanctónica.

Sin embargo, se ha reportado que la variabilidad oceanográfica de la región del Pacífico Sudcaliforniano tiene una influencia periódica de procesos climáticos globales,

como lo reportaron Jiménez-Quiroz et al. (2019) en Bahía Magdalena, al sur de la Península de Baja California, donde describieron que la TSM en el noreste del Océano Pacífico fue mayor entre 2013 a 2016 debido a los fenómenos El Blop (otoño 2013-primavera 2015) y la fase cálida del ENSO (El Niño; verano 2015-primavera 2016) causando una alteración atmosférica y oceánica debido a la presencia de fluctuaciones atmosféricas subtropicales provenientes del suroeste. Estas fluctuaciones causan anomalías positivas, en conjunto con un decrecimiento de la intensidad del giro subtropical del Pacífico Norte, un decrecimiento en la Corriente de California y una limitación de nutrientes debido a la limitación de eventos de surgencias. Efecto similar fue reportado por Gómez-Ocampo (2017) en la zona tropical-sub tropical del Pacífico Mexicano al reportar un decrecimiento de la biomasa del fitoplancton durante El Niño y el Blop debido al hundimiento de la capa de mezcla y piconclina. Estas fluctuaciones atmosféricas generan una variación estacional influenciada por la presencia de la Masa de Agua de Transición transportada por la Corriente del Sur de California entre los meses de febrero a julio al igual que por el agua Superficial Subtropical que está presente de agosto a enero (Cervantes-Duarte *et al.*, 2013).

Por otra parte, Durazo *et al.* (2010) explicaron que la variabilidad de la TSM está influenciada por la Corriente de California cuando los eventos de surgencia suelen ser más débiles y por la presencia de una contracorriente a nivel superficial que fluye cerca de la zona costera que genera mayores niveles de TSM y menores concentraciones de Chl *a* durante otoño-invierno que en primavera-verano. Resultado similar fue reportado por Arroyo-Loranca *et al.* (2015) en el Sistema de la Corriente de California frente a Punta Eugenia, concluyendo que esta contracorriente superficial acumula agua cerca de la zona costera mediante el efecto de Coriolis, provocando afloramientos costeros inminentes, que repercuten en los niveles de TSM con valores máximos y mínimos asociados a los diversos fenómenos de mesoescala como meandros y remolinos al igual que las corrientes geostroficas que presentan estructuras ciclónicas que determinan la variabilidad estacional a lo largo del área (Durazo, 2009; Durazo, 2015).

Todos estos fenómenos y eventos previamente mencionados tienen un efecto en los aspectos oceanográficos y ambientales como en la variabilidad de la TSM y Chl *a* y, por lo

tanto, llegan a influir en el aspecto de homogeneidad de los valores mensuales de TSM al momento de realizar el análisis de cluster, obteniendo un total de 7 regiones biogeográficas, de las cuáles se obtuvo solamente un grupo (Grupo 1) que abarca las regiones Ensenadense e Isla Guadalupe correspondiente a la región norte del Pacífico Sudcaliforniano, influenciada de forma más directa por la Corriente de California con Agua de tipo Subártica (Durazo, 2015) al igual que por el Frente Ensenada (Espinosa-Carreón *et al.*, 2004), caracterizando valores similares de TSM. Caso contrario ocurre en el resto de las regiones se catalogaron como individuales (Vizcaíno, San Ignacio, Bahía Magdalena, Barra de Malva-Cabo Falso, Cayos Alijos y R.B Archipiélago Revillagigedo) para el Pacífico Sudcaliforniano debido al efecto más directo de aguas de carácter tropical y subtropical (Durazo y Baumgartner, 2002; Durazo, 2009; Durazo, 2015) a comparación de las aguas de tipo subártico, causando una división a lo largo de la Península de Baja California: carácter subártico al norte y carácter cálido al sur (Durazo, 2009; Durazo, 2015).

Por otra parte, en el Golfo de California se han realizado diversas propuestas de regionalización basadas en diversos criterios y a través de distintas variables ambientales y oceanográficas. Algunos ejemplos son los siguientes: con base a la distribución y abundancia de fitoplancton en los sedimentos distribuidos en la columna de agua (Round, 1967); el uso de imágenes satelitales obtenidas de sensores remotos para el análisis de series de tiempo de diferentes periodos de estudio a través de los niveles de TSM y de la concentración de Chl *a* (Santamaría-del Angel *et al.*, 1994; Robles-Tamayo *et al.*, 2018; Heras-Sánchez *et al.*, 2019).

El número de regiones obtenido en este trabajo fue similar a los reportados por Méndez-Ramos (2011) y Heras-Sánchez *et al.* (2019) al obtener 15 y 12 respectivamente, cuyo resultado es producto derivado de los patrones de circulación atmosférica y vientos estacionales (Álvarez-Borrego, 1983; Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Álvarez-Borrego, 2010) que establecen claras diferencias en el ciclo anual en los niveles de TSM y concentración de Chl *a* y presentan una variación en base a un rango de carácter latitudinal en la zona este y oeste del golfo en conjunto con el relieve de cadenas montañosas que influyen en el patrones de circulación y, por consecuencia en la variabilidad de la TSM y Chl *a*. Las 11 regiones biogeográficas (Grupo 2, Grupo 3, Grupo 4, Grupo 5, Los Cabos,

Complejo Insular de Baja California Sur, Bahía Concepción, Alto Golfo, Canal del Infiernillo, Piaxtla-Urías y Boca del Golfo) obtenidas en el Golfo de California son también producto del mismo patrón de circulación atmosférica que determina una variabilidad estacional caracterizada por presentar un periodo cálido y otro frío, estableciendo un ciclo anual que tiene un efecto en ambas variables, a pesar de que se añaden años con condiciones oceanográficas y climáticas algo diferentes.

La transición al periodo cálido ocurre durante el mes de junio al presentarse un incremento en los niveles de TSM debido a un proceso de advección por el efecto de la comunicación directa con el Océano Pacífico, permitiendo la entrada de Agua Subsuperficial Ecuatorial, caracterizada por ser más cálida que la del golfo (Álvarez-Borrego, 1983; Torres-Orozco, 1993) en combinación con una alta radiación solar y efectos de evaporación que causan un efecto significativo de estratificación en la columna de agua, inhibiendo los efectos de surgencias a lo largo de la zona occidental del golfo de julio a octubre (verano-otoño) en conjunto con débiles vientos del sureste que no tienen un efecto importante en la dinámica de la columna de agua (Santamaría-del Ángel *et al.*, 1999). Sin embargo, en el mes de noviembre empieza la transición al período frío que abarca de diciembre a mayo (invierno-primavera) presentando fuertes vientos estacionales provenientes de noroeste que favorecen de forma significativa los eventos de surgencias y procesos de mezcla a lo largo de la zona este del golfo, lo que incrementa la biomasa del fitoplancton (Santamaría-del Ángel *et al.*, 1994; Álvarez-Borrego, 2010), así como otros factores que favorecen los niveles de fertilidad del fitoplancton, como son los sistemas de mezcla por mareas y el intercambio directo de agua con el Océano Pacífico que determinan las condiciones oceanográficas, como la concentración de Chl *a*, alcanzando valores de hasta 10 mg/m³ en la Región de las Grandes Islas (Santamaría-del Ángel *et al.*, 1994; Álvarez-Borrego, 2012); valores similares fueron obtenidos en este trabajo en regiones obteniendo valores máximos mayores de 10 mg/m³ en diferentes zonas del golfo (Grupo 3 con 15.78 mg/m³; Grupo 5 con 12.22 mg/m³; Canal del Infiernillo con 12.10 mg/m³ y Piaxtla-Urías con 13.32 mg/m³).

Por otra parte, los niveles de TSM tienen un decrecimiento importante a lo largo del golfo debido a la dinámica física de la columna de agua, particularmente por efectos de

mezcla por mareas, eventos de surgencias y patrones de vientos estacionales, principalmente en la Región de las Grandes (Robles y Marinone, 1987) y en el norte del Golfo de California (Álvarez-Borrogo, 1983). Efecto similar fue reportado en este estudio en las regiones biogeográficas localizadas en áreas previamente mencionadas en el golfo con valores mínimos menores a 15 °C (Grupo 4 y Bahía Concepción con 13.7 °C; Alto Golfo 13.8 °C y Canal del Infiernillo con 9.8 °C). Estos bajos valores de TSM se asocian principalmente a la dinámica física constante de mareas, surgencias y vientos, fenómenos que generan un movimiento y mezcla en la columna de agua en conjunto con sistemas de corrientes, determinando condiciones oceanográficas diferentes en esas regiones del Golfo de California. Este efecto ha sido reportado por López *et al.* (2006) y Álvarez-Molina *et al.* (2013) en el Canal de Ballenas, obteniendo una disminución de los niveles de TSM por el flujo constante de corrientes y mezcla por mareas que generan una circulación particular en comparación con otras regiones del golfo, desarrollando eventos regulares de surgencias de aguas profundas con alto contenido de nutrientes que fomentan altos niveles de Chl *a* y de productividad primaria.

Esta dinámica física particular del Golfo de California genera una variabilidad importante en los niveles de TSM y concentración de Chl *a*, sobre todo en regiones específicas donde dicha dinámica es más constante en ciertas áreas que en otras, situación que puede explicar el resultado obtenido en el proceso de regionalización al obtener 11 regiones biogeográficas en base a los valores promedio mensuales de TSM, de las cuales 4 son grupos (Grupo 2, Grupo 3, Grupo 4 y Grupo 5), pues son RMP con valores afines de TSM que fueron agrupados en grupos específicos debido a que presentan una variabilidad similar al estar presente en áreas específicas del golfo; caso contrario fueron las 7 regiones biogeográficas individuales (Los Cabos, Complejo Insular de Baja California Sur, Bahía Concepción, Alto Golfo, Canal del Infiernillo, Piaxtla-Urías y Boca del Golfo) al presentar una variabilidad diferente asociado a una dinámica física particular que se presenta en las Regiones de las Grandes Islas al igual que en la región norte del golfo, obteniendo valores diferentes de TSM que no permiten que se combinen con otras RMP para formar un solo grupo.

Es importante resaltar que la regionalización obtenida en este trabajo tanto en el Pacífico Sudcaliforniano como en el Golfo de California están determinada por procesos y factores físicos y climatológicos que determinan el comportamiento del ciclo anual de cada una de las variables descritas en este estudio. La variabilidad de la TSM y Chl *a* se presenta tomando en cuenta los aspectos de ubicación geográfica al igual que su forma, regularidad e intensidad, aspectos que a la vez influyen al momento de establecer un proceso de regionalización a través de un análisis de cluster utilizando variables oceanográficas como la temperatura y clorofila, considerando una distancia de enlace que determine regiones biogeográficas en base a valores homogéneos de una variable en específico, en este caso se determinó la distancia de enlace de 22 unidades en base a valores promedio mensuales de TSM de RMP localizadas en una misma área marina (Pacífico Sudcaliforniano o Golfo de California) y así, tomando en cuenta las características ambientales y aspectos oceanográficos de las dos áreas marinas localizadas en el noroeste de México y así, poder describir la variabilidad ambiental y dinámica oceanográfica de una forma ideal a través de los valores promedio mensuales de TSM que se utilizaron para realizar la regionalización a través del análisis de cluster.

VII.2. Análisis de series de tiempo

El análisis de series de tiempo de la TSM al igual que su estadística descriptiva mostraron que las regiones biogeográficas con el menor nivel de temperatura promedio fueron el Grupo 1 (18.1°C), Cayos Alijos (18.3 °C) y Vizcaíno (18.9 °C), localizadas en el norte y la región de océano abierto del Pacífico Sudcaliforniano. Resultados con valores cercanos fueron reportados por Martínez-Fuertes *et al.* (2016) de tipo templado (15.5 °C) en la Bahía de San Sebastián Vizcaíno, valores que pueden estar asociados a una circulación abierta con el Océano Pacífico a lo largo de la Península de Baja California, lo cual permite una influencia directa de las masas de agua provenientes del Sistema de la Corriente de California que transporta agua fría rica en nutrientes en dirección norte a sur y desarrolla eventos de surgencias que hacen decrecer los niveles de TSM (Wilkinson *et al.*, 2009; Gaxiola-Castro y Durazo-Arvizu, 2010; Espinosa-Carreón *et al.*, 2012) generando

condiciones climáticas particularmente templadas en la zona norte y central del Pacífico Sudcaliforniano. Sin embargo, otro factor importante que pueden influir en los estos bajos valores de TSM es la intensificación de los vientos que transportan un mayor volumen de agua del Océano Pacífico Norte, tal como lo han reportado Durazo *et al.* (2005) y Herrera-Cervantes *et al.* (2014).

En cuanto a las regiones biogeográficas que presentaron las series de tiempo con los valores promedio más altos de TSM fueron las del Grupo 5 (27.6 °C), Piaxtla-Urías (26.5 °C) y la Boca del Golfo (26.3 °C), localizadas en el sur del Golfo de California. Estos altos valores están asociados al efecto de gradiente latitudinal por estar localizadas en una zona del golfo que presenta mayores efectos de evaporación (Roden, 1958) y por presentar comunicación más directa con el Océano Pacífico, estando en contacto con Agua Superficial Ecuatorial (Torres-Orozco, 1993), caracterizada por ser más cálida a comparación con el agua del Golfo de California y por generar efectos de advección de agua cálida tropical en la columna de agua debido al desplazamiento en dirección sur a norte de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ por sus siglas en inglés) (Baumgartner y Christensen, 1985), obteniendo valores máximos durante agosto y septiembre. Efecto similar fue reportado por Castro *et al.* (2000) en la entrada del golfo al mostrar un aumento de la termoclina de la columna de agua, fenómeno asociado a los intercambios que modifican la entrada y salida de masas de agua. Resultados con un rango de valores similar fueron descritos por Cepeda-Morales *et al.* (2017) en la plataforma continental de Nayarit, en el sur del Golfo de California, reportando valores promedio alrededor de los 30 °C durante el período cálido mostrando un claro patrón estacional en la variabilidad de la TSM, en conjunto con la influencia de los eventos interanuales El Niño y La Niña, asociados a la variabilidad interanual.

Por otra parte, el análisis de series de tiempo de la concentración de Chl *a* de las regiones biogeográficas y su estadística descriptiva mostraron que las regiones con la menor concentración promedio de clorofila corresponden a las regiones oceánicas del Pacífico Sudcaliforniano que son R.B. Archipiélago Revillagigedo (0.11mg/m³) y Cayos Alijos (0.13 mg/m³) y la Boca del Golfo (0.23 mg/m³), en el sur del Golfo de California. Los resultados obtenidos con respecto a las primeras dos regiones biogeográficas

localizadas en el Pacífico Sudcaliforniano se deben a que se localizan en un ecosistema de tipo oceánico con mayor profundidad, principalmente R.B. Archipiélago Revillagigedo al presentar una profundidad de 5000 metros (Wilkinson *et al.*, 2009), además de tener una influencia directa con el Océano Pacífico Tropical Oriental, considerada un área con aguas claras, bajas concentraciones de clorofila y por consecuencia, baja productividad fitoplanctónica (Stevenson, 1970). Sin embargo, a pesar de tener una influencia importante del Sistema de la Corriente de California al igual que por la Contracorriente Ecuatorial del Norte que transporta agua fría rica en nutrientes y agua superficial cálida de baja salinidad, siendo capaz de desarrollar concentraciones moderadas de biomasa fitoplanctónica y productividad primaria (Pennington *et al.*, 2006; López-Sandoval *et al.*, 2009), estas regiones biogeográficas tienden a desarrollar concentraciones de Chl *a* inferiores a 1 mg/m³ en comparación con la zona epipelágica y costera donde se presentan factores físicos, climatológicos y biológicos que fomentan mayores niveles de Chl *a*. En el caso de la Boca del Golfo, los valores registrados se explican, ya que se encuentra en una zona que tiene una comunicación directa con el Océano Pacífico, lo que permite la entrada de agua cálida ecuatorial (Torres-Orozco, 1993) que genera procesos de advección en la columna de agua, limitando así la disponibilidad de nutrientes y causando un decrecimiento en los niveles de Chl *a*.

Con respecto a las regiones biogeográficas que presentaron un valor promedio alto corresponden a Canal del Infiernillo (4.72 mg/m³), Grupo 3 (3.96 mg/m³) y el Alto Golfo (2.69 mg/m³), localizadas en la región central, sur y norte del golfo, respectivamente. Valores similares al Canal del Infiernillo fueron reportados por García-Morales *et al.* 2017a y Robles-Tamayo *et al.* (2020) en la zona costera oriental del golfo, asociados a los intensos patrones de vientos estacionales del noroeste que influyen en los eventos de surgencias, procesos de mezcla por marea y flujos de corrientes a lo largo de la zona costera del Estado de Sonora donde se localiza el Canal del Infiernillo, clasificada como un área estrecha con bajos niveles de profundidad que permite procesos de mezcla constantes en la columna de agua (Lancin, 1985); este efecto de flujo constante fue reportado por López *et al.* (2006) y Álvarez-Molina *et al.* (2013) en el Canal de Ballenas, describiendo un patrón de circulación constante en comparación con otras áreas del Golfo de California,

generando una alta disponibilidad de nutrientes que desarrollan niveles importantes de productividad primaria, como lo reportó Santamaría-del Angel *et al.* (1994) en un área caracterizada por altos florecimientos de fitoplancton debido a una importante concentración y disponibilidad de pigmentos fotosintéticos. Por otra parte, la serie de tiempo de correspondiente al Grupo 3 presentó altos niveles de concentración de Chl *a*, a pesar de su ubicación en el área sur del golfo, caracterizada por la presencia de aguas oligotróficas y cálidas que inhiben la disponibilidad de nutrientes en la columna de agua. Valores similares fueron registrados por Héras-Sánchez *et al.* (2019) y Robles-Tamayo *et al.* (2020) en las zonas costeras de Sonora y Sinaloa. Estos resultados pueden explicarse por una alta escorrentía provenientes de granjas camaronícolas y campos agrícolas que realizan descargas altas en nitrógeno y fósforo en combinación con otros nutrientes inorgánicos como hierro y fósforo, aumentando los niveles de nutrientes inorgánicos y alimentando las floraciones de fitoplancton hasta un 80% en comparación con su forma natural y modificando el funcionamiento de los ecosistemas (Alonso-Rodríguez y Páez-Osuna, 2003; Beman *et al.*, 2005). Este efecto fue reportado por Valenzuela-Sánchez *et al.* (2021) en la región central del golfo, describiendo un efecto significativo de los efluentes de las granjas camaronícolas en la distribución, abundancia y diversidad de las comunidades fitoplanctónicas cuando se encuentran en operación, característica considerada como un indicador de impacto de los efluentes de camarón en los ecosistemas al igual que un posible generador de florecimientos fitoplanctónicos con un mayor volumen de efluentes con impactos negativos al ambiente. Con respecto a la región biogeográfica del Alto Golfo, se reportaron altas concentraciones de Chl *a*, a pesar de ser un área de baja profundidad (< 30metros) (Lavín y Marinone, 2003). Resultados similares han sido obtenidos en esta área, como es el caso de Ramírez-León *et al.* (2015) en el norte del Golfo de California, caracterizada por ser un sitio con altos niveles de turbulencia en la columna de agua por efectos de mezcla por mareas y eventos de surgencias que desarrollan altos niveles de concentración de Chl *a* en conjunto con una alta disponibilidad de nutrientes inorgánicos de tipo terrígeno y materia total en suspensión (Santamaría-del Angel *et al.*, 1994; Pérez-Arvizu *et al.*, 2013; Brusca *et al.*, 2017).

En general, las series de tiempo de cada variable presentaron diferentes tendencias de carácter positivo o negativo, lo cual puede tener implicaciones en la variabilidad ambiental y dinámica oceanográfica en el noroeste de México y generar cambios en el funcionamiento de los ecosistemas. Sin embargo, el análisis estadístico correspondiente a las Pruebas de Elliot-Rothenberg determinó que las tendencias de cambio en las series de tiempo tanto de TSM como de Chl *a* no fueron significativas debido posiblemente a que se requiere actualizar las bases de datos para generar series de tiempo más amplias y así, conocer las tendencias de cambio que describan variaciones estacionales hasta decadales.

VII.3. Análisis de series de tiempo de anomalías

El análisis de series de tiempo de anomalías mostró evidencia de anomalías positivas y negativas en la variabilidad de los niveles de TSM y concentración de Chl *a* en diversos periodos en las series de tiempo. El análisis de series de tiempo de anomalías de los niveles de TSM presentaron fases positivas (cálidas) asociadas a eventos El Niño y fases negativas (frías) asociadas a eventos La Niña. Por otra parte, las series de tiempo de anomalías de la concentración de Chl *a* mostraron fases positivas (frías) y negativas (cálidas) asociadas a los eventos interanuales La Niña y El Niño. Los eventos interanuales presentaron un mayor efecto en distintos periodos; los eventos de El Niño, las series de tiempo de anomalías presentaron una mayor variabilidad durante los periodos 1982-1983, 1987-1988, 1991-1992, 1997-1998 y 2015-2016; por otra parte, el evento interanual La Niña presentó un mayor efecto en la variabilidad de las series de tiempo de anomalías durante los periodos 1988-1989, 1998-1999, 1999-2000, 2007-2008 y 2010-2011. El efecto de estos eventos interanuales se mostraron en el análisis de permutaciones al determinar diferencias significativas en los niveles de TSM (°C) y concentración de Chl *a* (mg/m³) entre los eventos interanuales (El Niño y La Niña) y sus condiciones neutras durante todas las estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno) para todas las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano y Golfo de California, principalmente durante invierno y primavera tanto para TSM como para Chl *a*.

El efecto de estos eventos interanuales y condiciones normales en el Pacífico Sudcaliforniano a través de datos de TSM han sido descritos por Cervantes-Duarte *et al.* (2016) en Bahía Magdalena durante el evento El Niño, reportando una influencia importante de este fenómeno en las condiciones oceanográficas al obtener valores mayores que el promedio anual, al igual que una presencia importante de Agua Subtropical entre los meses de julio y agosto, incrementando la salinidad y hundiendo la termoclina y nutriclina (Durazo y Baumgartner, 2002; Durazo, 2009). Por otra parte, otro factor importante que tiene un efecto en la variabilidad interanual es el debilitamiento de patrones de vientos a lo largo de la costa occidental de la Península de Baja California, lo cual causa procesos de advección de aguas tropicales y subtropicales provenientes del sur, abarcando el exterior de la península asociado a la presencia de un flujo que va en dirección norte (Durazo, 2009), a excepción en abril y mayo debido a que los eventos de surgencia son más intensos, transportando agua fría hacia la bahía mediante los sistemas de corrientes (Zaytsev *et al.*, 2003; Cervantes-Duarte *et al.*, 2013). Efecto similar lo registran Durazo *et al.* (2017) en la Bahía de Todos Los Santos, describiendo los efectos de los eventos El Blop y El Niño en la TSM durante el período 2013-2016, eventos cálidos de escala interanual que determinaron anomalías positivas alrededor de los 5 °C a nivel superficial desde el Pacífico Nororiental hasta la Península de Baja California, principalmente durante el mes de septiembre de 2015 y una clara dominancia de la variabilidad interanual sobre los procesos locales de la región durante otoño debido a un debilitamiento de los vientos estacionales al igual que los eventos de surgencias. Estos efectos previamente mencionados pueden explicar en el caso de este estudio la presencia de anomalías en los niveles de TSM causadas por una mayor dominancia de la variabilidad interanual que genera un forzamiento oceánico mayor sobre la variabilidad estacional que se da a nivel local, principalmente durante invierno y primavera al obtener diferencias significativas entre los eventos interanuales y las condiciones neutras en todas las 7 regiones biogeográficas localizadas en el Pacífico Sudcaliforniano, obteniendo un caso particular en las regiones de Bahía Magdalena y Barra de Malva-Cabo Falso donde los niveles de TSM fueron diferentes entre El Niño, La Niña y las condiciones neutras, posiblemente al estar localizadas en un área de transición de aguas tropicales y subtropicales que fluyen en dirección sur a norte y que influyen de manera más

directa a comparación de otras regiones del Pacífico y de aguas frías de la Corriente de California. Mientras que, para verano y otoño, estas diferencias significativas fueron menores al ser reportadas solamente en 4 y 5 regiones biogeográficas respectivamente.

Además, el análisis de anomalías y la variabilidad interanual de Chl *a* en la Península de Baja California, correspondiente al área del Pacífico Sudcaliforniano han sido reportados por en diferentes trabajos. Entre ellos corresponde al de Gómez-Ocampo *et al.* (2018) al reportar un decrecimiento en la biomasa fitoplanctónica en la zona central y sur del Sistema de la Corriente de California entre 2013 y 2016 a través de la correlación de anomalías de Chl *a* con diferentes índices climáticos (PDO, NPGO, MEI y ONI), indicando un debilitamiento de surgencias costeras, reducción de los procesos de mezcla y turbulencia y hundimiento de la nutriclina, lo cual causa un aumento de la estratificación en la columna de agua y disminuyendo la biomasa fitoplanctónica debido a los efectos de los eventos El Blop y El Niño. Efecto similar fue reportado por González-Silvera *et al.* (2020) en la zona norte de la Península de Baja California al obtener un decrecimiento de la biomasa fitoplanctónica debido a la influencia de una anomalía cálida durante el año 2014 y el evento El Niño entre 2015 y 2016, principalmente a nivel superficial y causando cambios significativos en la composición de las comunidades de fitoplancton. Por otra parte, otros estudios como el de Herrera-Cervantes *et al.* (2014) y Espinosa-Carreón *et al.* (2015) han reportado la presencia de aguas subárticas anómalas a lo largo de la costa oeste de Baja California que influyen en la variabilidad interanual en aguas profundas y por ende en la intensidad de los eventos interanuales. La variabilidad de las series de tiempo de anomalías de Chl *a* correspondiente a este trabajo, reportan resultados similares a los previamente mencionados, indicando la presencia de eventos interanuales, los cuales tienen una distribución marcados por el efecto de gradientes latitudinales y, por consecuencia, influyen en el número de diferencias significativas obtenidas en el análisis de permutaciones entre los eventos interanuales y condiciones neutras. Nuevamente el mayor número de diferencias significativas se presentó durante primavera e invierno en 5 y 4 regiones biogeográficas respectivamente al igual que el mismo caso particular en Bahía Magdalena y Barra de Malva-Cabo en donde las concentraciones de Chl *a* fueron diferentes entre El Niño, La Niña y las condiciones neutras debido al estar localizadas en áreas de transición

de diferentes tipos de aguas (cálidas y frías) influyendo en la biomasa fitoplanctónica. Mientras que en verano ninguna region biogeográfica del Pacífico Sudcaliforniano presentó diferencias significativas y en otoño solamente Barra de Malva-Cabo Falso presentó diferencias significativas en la concentración de Chl *a* entre el evento El Niño y La Niña.

Con respecto al Golfo de California, el análisis de anomalías y el efecto de los eventos interanuales y condiciones neutras también han sido descritos en diferentes trabajos a través de datos de TSM y Chl *a*. El efecto de las anomalías de TSM se asocia a la presencia de los eventos interanuales, efecto que ha sido descrito y analizado en diferentes trabajos (Baumgartner y Christensen, 1985; Robles y Marinone, 1987; Lavín *et al.*, 2003; Robles-Tamayo, 2018; Robles-Tamayo *et al.*, 2018) al reportar un mayor efecto de anomalías positivas en las regiones sur y central del golfo a comparación de las regiones de las Grandes Islas y norte. Estas anomalías positivas también fueron reportadas por Lavín *et al.* (2003), explicando que están asociadas a procesos de advección de agua más cálida a comparación de la del Golfo de California, la cual tiene un efecto significativo en la región sur y central del golfo al tener una comunicación directa con el Océano Pacífico, mientras que las anomalías negativas asociadas al evento La Niña carecen de un patrón de distribución. Sin embargo, se han reportado que los efectos de los eventos interanuales pueden tener un menor efecto en la variabilidad de la TSM y por consecuencia en la serie de tiempo de anomalías. Este efecto fue reportado por Robles y Marinone (1987) en la región central y de las Grandes Islas del Golfo de California debido la dinámica física particular que presentan esas áreas caracterizadas por presentar efectos de mezcla por mareas y eventos de surgencias constantes a comparación de otras áreas del golfo. Por otra parte, Herrera Cervantes Herrera-Cervantes *et al.* (2007) describe la variabilidad de la TSM influenciada por el fenómeno ENSO, determinando que es el mayor responsable en la variabilidad interanual en el Golfo de California, teniendo el efecto de modificar los patrones de vientos estacionales y, por consecuencia, los eventos de surgencias a lo largo de la zona costera oriental, siendo este efecto más significativo durante invierno. Los efectos reportados en los trabajos anteriores se presentaron en este estudio, los cuales se visualizaron en los análisis de series de tiempos de anomalías de los niveles de TSM al mostrar resultados similares de anomalías positivas y negativas asociados a los fenómenos

El Niño y la Niña respectivamente. Estos resultados se observaron al obtener diferencias significativas en el análisis de permutaciones al presentar un mayor efecto en la época del invierno al obtener diferencias significativas en 9 de las 11 regiones biogeográficas del Golfo de California entre los eventos interanuales y condiciones neutras, a comparación de las otras estaciones del año en donde las diferencias fueron pocas como en primavera (3) y otoño (1) o nulas como en verano.

Por otra parte, estudios enfocados al análisis de anomalías y los efectos de la variabilidad interanual en la concentración de Chl *a* también han sido reportados en diferentes áreas del Golfo de California (Escalante *et al.*, 2013; Robles-Tamayo *et al.*, 2020; Herrera-Cervantes *et al.*, 2020) donde describen que la variabilidad oceanográfica está influenciada por el Océano Pacífico Tropical debido a la comunicación directa que permite la entrada de Agua Ecuatorial Superficial (Torres-Orozco, 1993), caracterizada por ser más cálida que la del golfo, al igual que más oligotrófica, teniendo efectos en la variabilidad interanual de la concentración de Chl *a*. Este efecto ha sido reportado por Cepeda-Morales *et al.* (2017) en la plataforma continental de Nayarit, ellos describen una variabilidad interanual de clorofila con un rango entre 0.7 a 11.5 mg/m³ asociado al fenómeno ENSO. Sin embargo, es importante mencionar que los efectos correspondientes al fenómeno ENSO no llegan a tener un efecto significativo en el Golfo de California, como es el caso de la región central y en la Región de las Grandes Islas debido a los efectos de mezcla por mareas y eventos de surgencias constantes en la columna de agua (López *et al.*, 2006; Álvarez-Molina *et al.*, 2013) que inhiben el efecto de los eventos El Niño y La Niña. Efecto similar ha sido reportado en la región norte del Golfo de California (Pérez-Arvizu *et al.*, 2013; Ramírez-León *et al.*, 2015), mostrando que la biomasa del fitoplancton tiene una baja respuesta a los eventos interanuales debido al efecto directo de los patrones de vientos del noroeste. Estos efectos de la variabilidad interanual y las anomalías de carácter positivo y negativo asociadas a los eventos Niña y Niño se presentaron en este estudio con resultado similar, principalmente en invierno y primavera al obtener 7 y 9 diferencias significativas en la concentración de clorofila entre los eventos interanuales y sus condiciones neutras a comparación de verano y otoño a presentar solamente diferencias significativas en 2 regiones biogeográficas.

Todos estos factores previamente descritos tanto en Pacífico Sudcaliforniano como en el Golfo de California pueden explicar los resultados obtenidos en los análisis de permutaciones que determinaron diferencias significativas de los valores mensuales de TSM y Chl *a* de todas las regiones biogeográficas durante los eventos interanuales y condiciones neutras en cada una de las estaciones del año para los periodos de estudio correspondientes a cada una de las variables.

VII.4. Análisis de Fourier

El análisis de Fourier de TSM y de Chl *a* determinó que la principal frecuencia de variación temporal fue la anual, correspondiente a la variabilidad que se presenta a lo largo del año con valores máximos y mínimos representada en el ciclo anual para cada variable. Este resultado coincide con Ortíz-Ahumada *et al.* (2018) en la parte sur del área occidental de la Península de Baja California, al reportar que esta frecuencia está asociada a la dinámica física del Sistema de la Corriente de California, la cuál es responsable de establecer el ciclo anual con valores mínimos entre enero y junio y valores máximos de julio a diciembre, mientras que los valores máximos de Chl *a* ocurren entre febrero y julio y valores mínimos entre agosto y diciembre. Esta frecuencia de variación también fue reportada previamente por Espinosa-Carreón *et al.* (2004) correspondiente a la variabilidad de la Chl *a* en la región occidental de la Península de Baja California, obteniendo valores máximos durante primavera, particularmente en regiones costeras generando un incremento en la biomasa del fitoplancton.

En el caso del Golfo de California, la frecuencia de variabilidad anual también fue la frecuencia principal de variación temporal tanto en los niveles de TSM como en la concentración de Chl *a*. Efecto similar fue reportado por García-Morales *et al.* (2017a) en la costa central del Golfo de California, concluyendo que esta frecuencia determina la mayor parte de la variabilidad en la TSM en dirección sur a norte, asociada particularmente por la influencia del Océano Pacífico Tropical a través del desplazamiento de la ITCZ que genera efectos de gradientes latitudinales que modulan los valores de TSM (Lavín *et al.*, 1997; Flores-Morales *et al.*, 2009). Esta variabilidad ha sido también reportada por Soto-

Mardones *et al.* (1999), Lavín *et al.* (2003) y Herrera-Cervantes *et al.* (2007), describiendo que la frecuencia anual determina la mayoría de la variabilidad en la TSM por procesos de calentamiento y enfriamiento a lo largo del golfo debido a los periodos cálidos y fríos. Esta frecuencia anual tiene un efecto en la variabilidad de la Chl *a*, como se reportó por García-Morales *et al.* (2017a), indicando una influencia de la interacción océano-atmósfera que presenta vientos estacionales que desarrollan una variabilidad barotrópica y energía cinética responsable de la dinámica física en la columna de agua y diversos procesos de mesoescala, entre ellos se encuentran los eventos de surgencias y los giros ciclónicos y anticiclónicos que generan una distribución de la Chl *a* y nutrientes que influye en la biomasa del fitoplancton.

Con respecto a la frecuencia semianual asociada a los cambios que se dan cada seis meses, está caracterizada por el desarrollo de patrones de circulación específicos de la columna de agua que determinan valores de TSM y Chl *a*. Particularmente, este tipo de frecuencia fue determinada por los eventos de surgencias y procesos de mesoescala que se presentan en ese período de tiempo durante los periodos fríos al igual que por los efectos de estratificación durante los periodos cálidos (Álvarez-Molina *et al.*, 2013; Ramírez-León *et al.*, 2015). Esta frecuencia de variación de la concentración de Chl *a* presentó una densidad espectral similar con la frecuencia anual en regiones del Golfo de California (Grupo 4 y Alto Golfo) debido a eventos de surgencia, procesos de mezcla por marea y flujos de calor que se presentan entre la región central y norte del Golfo de California (Lavín *et al.*, 1997; Lavín y Marinone., 2003). Este efecto fue reportado por Herrera-Cervantes (2019) en la Bahía de La Paz, describiendo que la frecuencia semianual juega un rol importante en la variabilidad de la concentración de Chl *a* al influir aproximadamente un 31% en sus niveles alcanzando concentraciones de hasta 1.5 mg/m³; este resultado se asocia a eventos de surgencias y corrientes costeras determinadas por patrones de vientos estacionales.

Por otra parte, la frecuencia de variación estacional asociada a los cambios que se dan cada 3 o 4 meses, tuvo una presencia importante en las series de Fourier de la TSM en el Grupo 2, Grupo 3 y Piaxtla-Urías, correspondientes al Golfo de California al obtener una frecuencia estacional con una densidad espectral similar con la semianual. En el caso de las series de Fourier de Chl *a*, el Grupo 1, Grupo 2 y la Boca del Golfo presentaron una

densidad espectral similar o mayor que la semianual. Resultado similar fue reportado por Ripa y Marinone (1989) en la región central del Golfo de California, indicando que la frecuencia estacional está asociada particularmente a la interacción atmosférica a través de la difusión de calor. Por otra parte, esta frecuencia de variación puede estar asociada a un patrón significativo de patrones de circulación en la columna de agua (Lavín y Marinone, 2003), teniendo un efecto importante en ciclo estacional desarrollando un intercambio de agua, particularmente en la costa oriental del Golfo de California (Álvarez-Borrego, 1983; Badan-Dangon *et al.*, 1985), determinando la frecuencia estacional de la TSM y Chl *a*.

Con respecto a la frecuencia interanual, relacionada a cambios que se dan entre 3 a 5 años, se observó en la mayoría de las regiones de las áreas de estudio, en ocasiones presentando una densidad espectral similar o mayor que la frecuencia semianual. En el caso de las series de Fourier del TSM de las regiones del Pacífico Sudcaliforniano y regiones del sur del Golfo de California, mientras que en el caso de las series de Fourier de Chl *a*, la frecuencia interanual tuvo presencia en pocas regiones del Pacífico Sudcaliforniano (Grupo 1, Vizcaíno, Cayos Alijos y R.B. Archipiélago Revillagigedo) mientras que en las regiones del Golfo de California, esta frecuencia se presentó en la mayoría de las regiones, a excepción del Grupo 4 y Alto Golfo, ocurriendo principalmente en las regiones localizadas al sur. Esta frecuencia de variación ha sido reportada en el Pacífico Sudcaliforniano (Gómez-Ocampo *et al.*, 2018; González-Silvera *et al.*, 2020) al igual que en el Golfo de California (Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín, 2007; Escalante *et al.*, 2013) debido al efecto de advección de aguas subtropicales y la presencia de aguas anómalas, como las aguas subárticas que ha sido reportado en diferentes trabajos en el Pacífico Sudcaliforniano (Espinosa-Carreón *et al.*, 2015; Martínez-Fuentes *et al.*, 2016; Ortiz-Ahumada *et al.*, 2018). En el Golfo de California, esta frecuencia interanual ha sido reportada en diversos trabajos, como es el caso de Lavín *et al.* (2003) quienes reportaron resultados similares al de este estudio al detectar anomalías en la TSM de tipo positivas relacionadas a eventos cálidos (El Niño) y negativas asociadas a eventos fríos (La Niña). Por otra parte, Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín (2007) reportaron una clara variabilidad interanual generada por los eventos El Niño y La Niña en diferentes periodos de tiempo.

VII.5. Influencia en los ecosistemas marinos y costeros

Con base a los resultados descritos y discusiones analizadas de la variabilidad ambiental y dinámica oceanográfica de las regiones biogeográficas obtenidas en el noroeste de México a través de datos mensuales de TSM ($^{\circ}\text{C}$) y Chl *a* (mg/m^3) se determinó que estas variables están influenciadas principalmente por diversos factores climatológicos y procesos físicos que se presentan a diferentes escalas espacio-temporales. Estos factores y procesos pueden tener un efecto en el funcionamiento y estructura en los ecosistemas de ambientes marino y costeros presentes en las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano y del Golfo de California, al igual que posibles cambios en la distribución y abundancia de organismos y recursos marinos (García-Morales *et al.*, 2017a; García-Morales *et al.*, 2017b; Heras-Sánchez *et al.*, 2019).

Sánchez-Velasco *et al.* (2017) quienes describen la distribución de larvas de peces en el Océano Pacífico Oriental Tropical durante El Niño Godzilla (2015-2016), reportando un decrecimiento de los volúmenes de zooplancton, aunque una alta abundancia de larvas de peces en la capa superficial de mezcla, que muestra un patrón invertido en la distribución normal, asociado posiblemente al aumento de la capa subóxica. Lo anterior indica un posible proceso de adaptación de las especies tropicales a largos períodos cálidos de condiciones hidrográficas cálidas en la columna de agua. Otro estudio corresponde al de Sandoval-Lugo *et al.* (2020) que analizó el movimiento de tortuga boba (*Caretta caretta*) en el Golfo de California a través de rastreo satelital utilizando datos de TSM y Chl *a*, con el objetivo de determinar sus movimientos y la preferencia de hábitats, concluyendo que esta especie se distribuye en aguas con profundidades entre los 10 a 80 metros y condiciones eutróficas de concentración de Chl *a* entre los 0.28 a 13.14 mg/m^3 .

Otro ejemplo es el trabajo de investigación de Silveyra-Bustamante *et al.* (2020) en el Parque Nacional Cabo Pulmo, en el Golfo de California, el cual describe la variabilidad estacional del zooplancton gelatinoso, determinando que su abundancia presentó una asociación positiva con la concentración de Chl *a* en la superficie del mar, en conjunto con la dirección y velocidad de los patrones de vientos estacionales, influyendo de manera

significativa en la abundancia durante octubre, lo anterior indica que las condiciones mesotróficas sustentan una alta biomasa y diversidad del zooplancton en Cabo Pulmo.

Por otra parte, Hakspiel-Segura *et al.* (2022) describieron la variabilidad temporal de la Chl *a* en la región central del Golfo de California como un indicador de resiliencia con el objetivo de monitorear señales tempranas de los impactos del cambio climático al igual que sus transiciones abruptas en las tendencias temporales de tipo interanual de la variabilidad climática. Ellos reportan tendencias de cambio positivas como negativas en los datos de TSM, asociadas a las variabilidades decadales y multianuales (Oscilación Decadal del Pacífico, Modoki El Niño y Modo Meridional del Pacífico), en conjunto con el evento de calentamiento multianual derivado del evento Niño correspondiente al periodo 2015-2016. En ese trabajo se determinó un proceso de regulación de los valores de Chl *a* durante los periodos cálidos y fríos del Golfo de California, indicando un mecanismo de resiliencia de los ecosistemas a la variabilidad climática a diferentes escalas espaciales y temporales.

En base a los estudios anteriores de análisis de TSM y Chl *a* para determinar sus condiciones oceanográficas y ambientales al igual que su influencia recursos marinos a nivel oceánico y costero del noroeste de México, se observa que la variabilidad de TSM y Chl *a* tiene un efecto en el funcionamiento del ecosistema influyendo en el número y distribución de especies. Esta influencia directa que tienen la TSM y Chl *a* en la distribución y abundancia de organismos marinos se debe principalmente a que los cambios que se dan en estas variables están influenciados por las características de los patrones de circulación y estructura hidrográfica de sus aguas superficiales causado por la variabilidad de diversos factores. Entre ellos está la dinámica del propio Océano Pacífico que genera el movimiento estacional de la Zona de Convergencia Intertropical que genera un patrón de distribución latitudinal de los sistemas de corrientes ecuatoriales que repercuten en base a la distribución de la Corriente Mexicana (dirección al norte) y la Corriente de California (dirección al sur) (Lavín *et al.*, 1997; Flores-Morales *et al.*, 2009), modulando los niveles de temperatura y clorofila en la columna de agua.

Otros factores asociados corresponden al nivel del mar al presentar valores máximos en verano y mínimos en invierno (Pattullo *et al.*, 1955) asociada a cambios de temperatura y salinidad en la columna de agua derivados del flujo de calor y de agua superficial. Por

otra parte, otro factor importante que influyen en los niveles de TSM y concentración de Chl *a* que genera un efecto en la distribución y abundancia de recursos marinos es el flujo superficial de calor y el efecto de turbulencia. El flujo superficial de calor influye en el forzamiento y ciclo estacional al intervenir la rapidez del viento en conjunto con aspectos meteorológicos como la temperatura ambiental, humedad del área y presión atmosférica. El efecto de turbulenta a nivel superficial se desarrolla donde la energía del viento genera los sistemas de corrientes que determinan la circulación y energía cinética en la superficie del océano por efectos del oleaje (Lavín *et al.*, 1997).

El análisis de variabilidad ambiental y dinámica oceanográfica de RMP en el Pacífico Sudcaliforniano y Golfo de California a través del análisis de TSM, Chl *a* permite determinar las diferentes frecuencias de variación temporal al igual que determinar las principales escalas de variabilidad temporal al igual que determinar si existe una tendencia de cambio significativa en los valores de cada variable de estudio y generar una caracterización ecológica de cada área de forma óptima, permitiendo establecer que el análisis de TSM y Chl *a* en las RMP del noroeste de México pueden influir en la oceanografía de los ecosistemas marinos y costeros a diferentes escalas espacio-temporales, desde estacionales hasta interanuales, permitiendo entender su ecología y tendencias de cambio derivadas de factores ambientales, oceanográficos o antropogénicos y por consecuencia en los recursos marinos en cada una de las RMP del Pacífico Sudcaliforniano y Golfo de California. Además, el análisis de TSM y Chl *a* en estas áreas puede generar un manejo adecuado de estos recursos naturales a nivel oceánico y costero. Sin embargo, estos análisis de distribución y abundancia de diversas especies de interés en RMP del noroeste de México requieren series de tiempo largas tanto de variables ambientales y oceanográficas al igual que de las especies a estudiar con el objetivo de analizar sus tendencias de cambio a largo plazo, pues el explicar la influencia que tienen esas variables es aspectos biológicos, principalmente en ecosistemas marinos y costeros que presentan altas fluctuaciones ambientales, se requiere de un conocimiento más amplio de los aspectos ecológicos y biológicos de las especies y sus tendencias de cambio a factores ambientales y oceanográficos.

Los resultados obtenidos de este trabajo de investigación muestran evidencia de que los análisis de variabilidad espacio-temporal de los niveles de TSM ($^{\circ}\text{C}$) y concentración de Chl *a* (mg/m^3) son indispensables para describir los aspectos oceanográficos y ambientales, considerados a su vez necesarios para explicar diversos procesos físicos, climatológicos y biológicos de los ecosistemas marinos y costeros del noroeste de México que pueden influir en la distribución y abundancia de los organismos y recursos marinos. En conclusión, el proceso de realizar una caracterización ecológica óptima de estas variables es posible determinar tendencias de cambio asociadas a factores oceanográficos, ambientales y el efecto de los eventos interanuales que pueden influir en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Estos análisis permiten generar información útil para el manejo y toma de decisiones de gestión de los recursos marinos y pesqueros.

VIII. CONCLUSIONES

Los análisis de TSM y Chl *a* muestran que su variabilidad en el Pacífico Sudcaliforniano y en el Golfo de California está influenciada por la climatología continental al igual que por una comunicación directa con el Océano Pacífico, lo que determina sus condiciones oceanográficas a diferentes escalas espacio-temporales, desde nivel estacional hasta interanual debido a diversos procesos físicos, biológicos y climatológicos delimitando diferentes niveles de TSM al igual que concentraciones de Chl *a* en las RMP del noroeste de México.

El estudio de variabilidad oceanográfica a través de uso de datos mensuales de TSM permitió una caracterización ecológica de las 24 RMP localizadas en el Pacífico Sudcaliforniano y Golfo de California mediante un proceso de regionalización a través de un análisis de cluster, determinando un total de 18 regiones biogeográficas (7 en el Pacífico Sudcaliforniano y 11 en el Golfo de California) en base a los niveles de TSM, considerando una adecuada distancia de enlace para agrupar RMP con aspectos oceanográficos y ambientales similares, permitiendo comprender los diferentes procesos oceanográficos y costeros.

La estadística descriptiva mostró que las regiones biogeográficas con los niveles más bajos de TSM fueron las correspondientes a las localizadas en el Pacífico Sudcaliforniano (Grupo 1, Vizcaíno, Cayos Alijos y San Ignacio) y las regiones con los mayores valores corresponden a las localizadas en sur del Golfo de California (Grupo 5, Piaxtla-Urías, Boca del Golfo y Grupo 3).

En el caso de la concentración de Chl *a*, las regiones biogeográficas con las menores concentraciones fueron las regiones oceánicas del Pacífico Sudcaliforniano (Revillagigedo y Cayos Alijos) y la Boca del Golfo, en el sur del Golfo de California, mientras que las regiones del Golfo de California, particularmente las zonas costeras, presentaron las mayores concentraciones de Chl *a* (Canal del Infiernillo, Grupo 3 y Alto Golfo).

Las series de tiempo de TSM y Chl *a* presentaron una variación anual con valores máximos y mínimos a lo largo del período de estudio con diferentes tendencias de cambio positivas y negativas en los niveles de TSM y concentración de Chl *a*, sin embargo, no se encontró suficiente evidencia estadística para determinar una tendencia de cambio significativa en las series de tiempo para cada una de las variables de las regiones biogeográficas del Pacífico Sudcaliforniano y Golfo de California.

Las series de tiempo de anomalías correspondientes a TSM y Chl *a* mostraron la presencia de anomalías con fases positivas (cálidas) y negativas (frías) asociadas a los eventos interanuales El Niño y La Niña en el caso de la TSM, mientras que en el caso de la Chl *a* se observaron anomalías de tipo positivas (frías) asociados a eventos Niña correspondiente a aguas frías con valores altos de Chl *a* y de tipo negativas (cálidas) asociadas a eventos Niño asociado a aguas cálidas con bajos valores de Chl *a*.

El análisis de Fourier determinó cuatro frecuencias de variación que influyen en los niveles de TSM y en la concentración de Chl *a* que se presenta en diferentes escalas temporales, siendo la frecuencia anual la principal frecuencia de variabilidad en cada una de las regiones biogeográficas, seguida por las frecuencias de tipo semianual, estacional e interanual.

Los ciclos anuales de la TSM y la Chl *a* presentaron una variabilidad estacional diferente para cada una de las áreas marinas del noroeste de México. En el caso de las regiones del Pacífico Sudcaliforniano, el ciclo anual mostró valores máximos de TSM entre agosto y septiembre y valores (verano-otoño) y valores mínimos entre febrero y abril (invierno-primavera), mientras que para la Chl *a* se obtuvieron valores máximos entre marzo y julio (primavera-verano) y valores mínimos entre octubre y enero (otoño-invierno).

Por otra parte, las regiones del Golfo de California presentaron un ciclo anual con valores máximos de TSM entre julio y septiembre (verano-otoño) y valores mínimos entre enero y marzo (invierno-primavera), caso contrario fue la Chl *a* al obtener valores máximos entre diciembre a mayo (invierno-primavera) y valores mínimos entre junio y noviembre (verano-otoño).

El análisis de permutaciones enfocado a la variabilidad intranual de los datos mensuales de TSM y Chl *a* en todas las regiones biogeográficas del noroeste de México fue estadísticamente diferente durante los eventos Niño, Niña y condiciones neutras para cada una de las estaciones del año.

IX. RECOMENDACIONES

Esta investigación permite hacer las siguientes recomendaciones:

Actualizar de forma constante la base de datos mensuales de TSM y Chl *a* de las RMP con los valores promedio más recientes, con el objetivo de detectar tendencias de cambio significativas a futuro que pueden influir en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas marinos y costeros de estas regiones.

Utilizar otras variables y parámetros ambientales y oceanográficos como lo son la salinidad, vientos, nivel medio del mar, batimetría, entre otros, con la finalidad de complementar los estudios de variabilidad oceanográfica generando nuevas bases de datos y series de tiempo.

Complementar los estudios de variabilidad oceanográfica analizando de forma particular los diversos fenómenos y estructuras de mesoescala como giros ciclónicos, anticiclónicos, surgencias, meandros, etcétera, a través de percepción remota al igual que con bases de datos de recursos pesqueros importantes explotados en el área de estudio para determinar la influencia de la variabilidad ambiental de TSM, Chl *a* y estructuras de mesoescala en el ecosistema y de sus recursos marinos.

Generar un sistema de validación de datos de sensores remotos con datos *In Situ* para desarrollar una caracterización oceanográfica más precisa en las RMP.

En el caso del análisis de anomalías, se recomienda utilizar otros índices climáticos para describir el efecto de los eventos interanuales, como es el Índice de la Oscilación del Norte (NOI), Índice del Pacífico Norte (NPI), Índice ENSO Multivariado (MEI), Índice del Niño Oceánico (ONI), entre otros.

X. LITERATURA CITADA

- Abell, R.A., D.M. Olson, E. Dinerstein, P.T. Hurley, J.T. Diggs, W. Eichbaum, S. Walters, W. Wettengel, T. Allnut, C.J. Loucks y P. Hedao. 1999. Freshwater ecoregions of North America. A conservation assessment. Island Press, Washington, D.C.
- Ahrens, C.D. 2007. *Meteorology Today: An introduction to Weather, Climate and Environment*; 8° Edition. Thompson Brooks/Cole. Belmont, CA, USA.
- Alexandre, M.A., J.D. Scott, K.D. Friedland, K.E. Mills., J.A. Nye, A.J. Pershing y A.C. Thomas. 2018. Projected Sea Surface Temperature over the 21st century: Changes in the mean, variability and extremes for large marine ecosystems regions of Northern Oceans. *Elementa Science of the Anthropocene*, 6(9): 1-25. doi.org/10.1525/elementa.191.
- Alonso-Rodríguez, R y Páez-Osuna, F. 2003. Nutrients, phytoplankton and harmful algal blooms in shrimp ponds: a review with special reference to the situation in the Gulf of California. *Aquaculture*, 219(1-4): 317-336. [doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00509-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00509-4).
- Alvarado-Valencia, J.A y Obagi-Araujo, J.J. 2008. Fundamentos de inferencia estadística; 1° Edición. Editorial Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.
- Álvarez-Borrego, S. 1983. Gulf of California. 427-449. En: Ketchum, B. H. (Ed.), *Estuaries and enclosed seas*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Álvarez-Borrego, S. 2010. Physical, chemical, and biological oceanography of the Gulf of California. 24-48 p. En: Brusca, R.C. (Eds.), *The Gulf of California: biodiversity and conservation*. University of Arizona Press. Estados Unidos.
- Álvarez-Borrego, S. 2012. Phytoplankton Biomass in the Gulf of California: a review. *Botánica Marina*, 55:119-128. doi.org/10.1515/bot.2011.105.
- Álvarez-Borrego, S y J.R. Lara-Lara. 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. 555-567 p. En: Dauphin and Simoneit. (Eds.), *The Gulf of California, province of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists. Memoria 47. Tulsa, Oklahoma, Estados Unidos.
- Álvarez-Molina, L.L., S. Álvarez-Borrego, J.R. Lara-Lara y S.G. Marinone. 2013. Variaciones anual y semianual de la biomasa y producción fitoplanctónica en el Golfo de California central estimadas mediante datos de satélite. *Ciencias Marinas*, 39(2):217-230. doi.org/10.7773/cm.v39i2.2189.
- Arreguín-Sánchez, F., P. del Monte-Luna, M.J. Zetina-Rejón y M.O. Álvarez-Lucero. 2017. The Gulf of California Large Marine Ecosystem: Fisheries and other natural resources. *Environmental development*, 22:71-77. doi.org/10.1016/j.envdev.2017.03.002.

- Arriaga, L., E. Vásquez-Domínguez, J. González-Cano, R. Jiménez-Rosenberg, E. Muñoz-López y V. Aguilar-Sierra. 1998. Regiones marinas prioritarias de México. Comisión Nacional para el Desarrollo de la Biodiversidad. CONABIO. México.
- Arriaga-Cabrera, L., V. Aguilar y J.M. Espinoza. 2009. Regiones prioritarias y planeación para la conservación de biodiversidad 433-457 p. En: Sarukhán, J (Ed.), Capital Natural de México. Vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. CONABIO. México.
- Arroyo-Loranca, R.G., S. Álvarez-Borrego, M. Ortiz-Figueroa y L.E. Calderón-Aguilera. 2015. Spatial and temporal variation of satellite-derived phytoplankton biomass and production in the California Current System off Punta Eugenia during 1997-2012. *Hidrobiológica*, 25(3): 321-334.
- Badan-Dangon, A., C.J. Koblinsky y T. Baumgartner. 1985. Spring and summer in the Gulf of California: Observations of surface thermal patterns. *Oceanología Acta*, 8(1):13-22.
- Baumgartner, T.R y N. Christensen. 1985. Coupling of the Gulf of California to large-scale interannual climatic variability. *Journal of Marine Research*, 43:825-848. doi.org/10.1357/002224085788453967.
- Barbier, E.B. 2017. Primer marine ecosystem services. *Current biology magazine*, 27: 431-510. doi.org/10.1016/j.cub.2017.03.020.
- Barraza-Guardado, R.H., L.R. Martínez-Córdova, L.F. Enríquez-Ocaña, M. Martínez-Porchas, A. Miranda-Baeza y M.A. Porchas-Cornejo. 2014. Efecto de efluentes de granjas camaronícolas sobre parámetros de la calidad del agua y del sedimento frente a la costa de Sonora. *Ciencias Marinas*, 40(4): 221-235. doi.org/10.7773/cm.v40i4.2424.
- Beman, M., K.R. Arrigo y P.A. Matson. 2005. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas in the ocean. *Nature*, 434: 211-214. doi.org/10.1038/nature03370.
- Berner, E.K., R.A. Berner. 2012. Global Environment: Water, Air, and Geochemical Cycles; 2° Edition. University Press, Cambridge. Great Britain.
- Bigg, G.R., 1996. The oceans and climate; 1° Edition. University Press, Cambridge. Great Britain.
- Blanco-Castañeda, L. 2004. Probabilidad. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Boyce, D.G., M.R. Lewis y B. Worm. 2010. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*, 466: 591-596. doi.org/10.1038/nature09268.
- Boyce, D.G., M. Down, M.R. Lewis y B. Worm. 2014. Estimating phytoplankton over the past century. *Progress in Oceanography*, 122: 163-173. doi.org/10.1016/j.pocean.2014.01.004.

- Brierley, A.S. y M.J. Kingsford. 2009. Impacts of climate change on Marine Organism and Ecosystems. *Current Biology*, 19(14): 602-614. doi.org/10.1016/j.cub.2009.05.046.
- Bruce, P., A. Bruce y P. Gedeck. Estadística práctica para ciencia de datos con R y Python; 2° Edición. Editorial Marcombo. Barcelona, España.
- Brusca, R., S. Álvarez-Borrego, P.A. Hastings y L.T. Findley. 2017. Colorado River flow and biological productivity in the northern Gulf of California, Mexico. *Earth-Sciences Review*, 164, 1-30. doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.012.
- Castro, P., M.E. Huber. 2007. Biología Marina; 6° Edición. Editorial McGraw-Hill Interamericana. Madrid. España.
- Castro, R., A.S. Mascarenhas, R. Durazo y C.A. Collins. 2000. Seasonal variation of the temperature and salinity at the entrance of the Gulf of California, Mexico. *Ciencias Marinas*, 26(4): 561-583. doi.org/10.7773/cm.v26i4.621.
- Castro, R y J.A. Martínez. 2010. Variabilidad espacial y temporal del campo del viento. 129-147 p. En: Gaxiola-Castro, G., y Durazo-Arvizu, R. (Eds.), Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Centro de Investigación Científica y Superior de Ensenada. Universidad Autónoma de Baja California. México.
- Cepeda-Morales, J., F. Hernández-Vásquez, J. Rivera-Caicedo, C. Romero-Bañuelos. E. Inda-Díaz y O. Hernández-Almeida. 2017. Seasonal variability of satellite derived chlorophyll and sea surface temperature on the continental shelf of Nayarit, Mexico. *Revista Bio Ciencias*, 4(6), 1-17. doi.org/10.15741/revbio.04.06.07.
- Cervantes-Duarte, R., S. López-López, E. González-Rodríguez y S. Futema-Jiménez. 2010. Ciclo estacional de nutrientes, temperatura, salinidad, clorofila *a* en Bahía Magdalena, BCS, México (2006-2007). *CICIMAR Oceanides*, 25(2): 111-120.
- Cervantes-Duarte, R., R. Prego, S. López-López, F. Aguirre-Bahena, Ospina-Álvarez, N. 2013. Annual patterns of nutrients and chlorophyll in a subtropical coastal lagoon under the upwelling influence (SW of Baja-California Peninsula). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 120: 54-63. doi.org/10.1016/j.ecss.2013.01.020.
- Cervantes-Duarte-R y F.J. García-Romero. 2016. Características hidrográficas en el litoral de Bahía Magdalena, BCS, México durante El Niño 2015. *CICIMAR Oceanides*, 31(2): 9-19.
- Cervantes-Duarte, R., M.C. Jiménez-Quiroz, R. Funes-Rodríguez, S. Hernández-Trujillo, R. González-Armas y E. Anaya-Godínez. 2021a. Interannual variability in the trophic status and water quality of Bahía Magdalena, Mexico, during the 2015–2018 period: TRIX. *Regional studies in Marine Science*, 42: 101638. doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101638.

- Cervantes-Duarte, R., E. González-Rodríguez, R. Funes-Rodríguez, A. Ramos-Rodríguez, M.Y. Torres-Hernández y F. Aguirre-Bahena. 2021b. Variability of Net Primary Productivity and Associated Biophysical Drivers in Bahía de La Paz (Mexico). *Remote Sensing*, 13: 1644. doi.org/10.3390/rs13091644.
- Chapin III, F.S., P.A. Matson, H.A. Mooney. 2002. Principles of Terrestrial Ecology. Springer. United States.
- Constanza, R. 1999. The ecological, economic and social importance of the oceans. *Ecological economics*, 31: 199-213. [doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00079-8).
- De la Cruz-Orozco, M.E., E. Gómez-Ocampo, L.E. Miranda-Bojorquez, J. Cepeda-Morales, R. Durazo, B. Lavaniegos, T.L. Espinosa-Carreón, R. Sosa-Ávalos, E. Aguirre-Hernández y G. Gaxiola-Castro. 2017. Phytoplankton biomass and production off the Baja California Peninsula: 1997–2016. *Ciencias Marinas*, 43(4): 217-228. doi.org/10.7773/cm.v43i4.2793.
- Doney, S.C., M. Ruckelshaus., J.E. Duffy, J.P. Barry, F. Chan, C.A. English, H.M. Galindo, J.M. Grebmeier, A.B. Hollowed, N. Knowlton, J. Polovina, N.N. Rabalais, W.J. Sydeman y L.D. Talley. 2012. Climate change impacts on marine ecosystems. *The Annual Review of Marine Science*, 4:11-37. doi.org/10.1146/annurev-marine-041911-111611.
- Durazo, R. 2009. Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997-2008. *Progress in Oceanography*, 83: 361-368. doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.043.
- Durazo, R. 2015. Seasonality of the transitional region of the California Current System off Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120: 1173-1196. doi.org/10.1002/2014JC010405.
- Durazo, R y T. Baumgartner. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Progress in Oceanography*, 54: 129-147. [doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00041-1).
- Durazo, R., G. Gaxiola-Castro, B. Lavaniegos, R. Castro-Valdez, J. Gómez-Valdés y A. Da-S-Mascarenhas Jr. 2005. Oceanographic conditions west of the Baja California coast, 2002–2003: A weak El Niño and subarctic water enhancement. *Ciencias Marinas*, 31(3): 537-552. doi.org/10.7773/cm.v31i3.43.
- Durazo, R., A.M. Ramírez-Manguilar, L.E. Miranda y L.A. Soto-Mardones. 2010. Climatología de las variables oceanográficas. 25-57 p. En: Gaxiola-Castro, G., y Durazo-Arvizu, R. (Eds.), Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Centro de Investigación Científica y Superior de Ensenada. Universidad Autónoma de Baja California. México.
- Durazo, R., R. Castro, L.E. Miranda, F. Delgadillo-Hinojosa y A. Mejía-Trejo. 2017. Anomalous hydrographic conditions off the northwestern coast off Baja California

- peninsula during 2013-2016. *Ciencias Marinas*, 43(2): 81-92. doi.org/10.7773/cm.v43i2.2754.
- Elliot, G., T.J. Rothenberg y J.H. Stock, 1996. Efficient test for an autoregressive unit root. *Econometrica*, 64(4): 813-836. doi.org/10.2307/2171846.
- Escalante, F., J.E. Valdez-Holguín, S. Álvarez-Borrego y J.R. Lara-Lara. 2013. Variación temporal y espacial de temperatura superficial del mar, clorofila *a* y productividad primaria en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 39(2): 203–215. doi.org/10.7773/cm.v39i2.2233.
- Espinosa, H. 2004. El Pacífico Mexicano. *Ciencias*. 76: 14-21.
- Espinosa-Carreón, L y J.E. Valdez-Holguín. 2007. Variabilidad interanual de clorofila en el Golfo de California. *Ecología Aplicada*, 6:83-92. dx.doi.org/10.21704/rea.v6i1-2.344.
- Espinosa-Carreón, T.L., P.T. Strub, E. Beier, F. Ocampo-Torres y G. Gaxiola-Castro. 2004. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height and temperature off Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(c03039): 1-20. doi.org/10.1029/2003JC002105.
- Espinosa-Carreón, T.L., G. Gaxiola-Castro, E. Beier, P.T. Strub y J.A. Kurczyn. 2012. Effects of mesoscale processes on phytoplankton chlorophyll off Baja California. *Journal of Geophysical Research*, 117: C04005. doi.org/10.1029/2011JC007604.
- Espinosa-Carreón, T.L., G. Gaxiola-Castro, R. Durazo, M.D. De la Cruz-Orozco, M. Norzagaray-Campos y E. Solana-Arellano. 2015. Influence of anomalous subarctic water intrusion on phytoplankton production off Baja California. *Continental Shelf Research*, 92: 108-121. doi.org/10.1016/j.csr.2014.10.003.
- Farach-Espinoza, E.B., J. López-Martínez, R. García-Morales, M.O. Nevárez-Martínez, D.B. Lluch-Cota y S. Ortega-García. 2021. Temporal Variability of Oceanic Mesoscale Events in the Gulf of California. *Remote Sensing*, 13: 1744. doi.org/10.3390/rs13091774.
- Farach-Espinoza, E.B., J. López-Martínez, R. García-Morales, M.O. Nevárez-Martínez, S. Ortega-García y D.B. Lluch-Cota. 2022. Coupling oceanic mesoscale events with catches of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California. *Progress in Oceanography*, 206: 102858. doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102858.
- Filliponi, F., Valentini, E., Taramelli, A. Sea Surface Temperature changes analysis, an Essential Climate Variable for Ecosystems Service Provisioning. 244-251 p. En: 9th International Workshop of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp2017). Brugge, Belgium, 27-29 June 2017.
- Fingas, M. 2019. Chapter 5 – Remote Sensing for Marine Management. 103-119. En: Sheppard, C (Eds.), *World Seas: An Environmental Evaluation Volume III: Ecological Issues and Environmental Impacts*. (Second Edition). Academic Press. United Kingdom.

- Flores-Morales, A.L., A. Pares-Sierra, S.G. Marinone. 2009. Seasonal variability of the sea surface temperature in the Eastern Tropical Pacific Ocean. *Geofísica Internacional* 48: 337-349.
- Gallaudet, T.C y Simpson, J.J. 1994. An empirical orthogonal function analysis of remotely sensed sea surface temperature variability and its relation to interior oceanic processes off Baja California. *Remote Sensing of Enviromental*, 47(3): 375-389. [doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90105-8](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90105-8).
- García-Morales, R. 2012. Variabilidad oceanográfica del hábitat de los stocks de *Sardinops sagax* (Jenyns, 1842) (Clupeiformes: Clupeidae) en el Sistema de Corriente de California (1981-2005). Tesis de Doctorado. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-Instituto Politécnico Nacional. La Paz, Baja California, Sur.
- García-Morales, R., J. López-Martínez, J.E. Valdez-Holguín, H. Herrera-Cervantes y L.D. Espinosa-Chaurand. 2017a. Environmental variability and Oceanographic Dynamics of the Central and Southern Coastal Zone of Sonora in the Gulf of California. *Journal of Remote Sensing*, 9:925. doi.org/10.3390/rs9090925.
- García-Morales, R., E.L. Pérez-Lezama y B. Shirasago-Germán. 2017b. Influence of environmental variability of baleen whales (suborden Mysticeti) in the Gulf of California. *Marine Ecology*, 38:10. doi.org/10.1111/maec.12479.
- Garrison, T. 2010. Oceanography: An invitation to Marine Science; 7^o Edition. Brooks/Cole. Belmont, CA, USA.
- Gaxiola-Castro, G., R. Durazo, B. Lavaniegos, M.E. De la Cruz-Orozco, E. Millán-Núñez, L. Soto-Mardones y J. Cepeda-Morales. 2008. Pelagic ecosystem response to interannual variability off Baja California. *Ciencias Marinas*, 34(2): 263-270. doi.org/10.7773/cm.v34i2.1413.
- Gaxiola-Castro, R., R. Durazo-Arvizu. 2010. Introducción. 13-25 p. En: Gaxiola-Castro, G., y Durazo-Arvizu, R. (Eds.), Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Centro de Investigación Científica y Superior de Ensenada. Universidad Autónoma de Baja California. México.
- Gaxiola-Castro, G., B.E. Lavaniegos, A. Martínez, R. Castro y T.L. Espinosa-Carreón. 2010a. Pelagic ecosystem response to climate variability in the Pacific Ocean off Baja California. 163-182 p. En: Simard, S., y Austin, M.E. (Eds.), Climate Change and Variability. InTech. Croacia.
- Gaxiola-Castro, G., J. C. A. Cepeda-Morales, S. Nájera-Martínez, T. L. Espinosa-Carreón, M. E. De La Cruz-Orozco, R. Sosa-Avalos, E. Aguirre-Hernández y J. P. Cantú-Ontiveros. 2010b. Biomasa y producción de fitoplancton. 59-85 p. En: Gaxiola-Castro, G., y Durazo-Arvizu, R. (Eds.), Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional

de Ecología. Centro de Investigación Científica y Superior de Ensenada. Universidad Autónoma de Baja California. México.

- Gayathri, K.D., B.P. Ganasri y G.S. Dwarakish. 2015. Applications of Remote in Satellite Oceanography: A review. *Aqua Procedia*, 4, 579-584. doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.075.
- Gómez-Ocampo, E. 2017. Effects of physical processes on tropical-subtropical California Current phytoplankton. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California.
- Gómez-Ocampo, E., G. Gaxiola-Castro, R. Durazo y E. Beier. 2018. Effects of the 2013-2016 warm anomalies on the California Current phytoplankton. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 151: 64-76. doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.01.005.
- González-Silvera, A., E. Santamaría-del-Angel, V. Camacho-Ibar, J. López-Calderón, J. Santander-Cruz y A. Mercado-Santana. 2020. The Effect of Cold and Warm Anomalies on Phytoplankton Pigment Composition in Waters off the Northern Baja California Peninsula (México): 2007–2016. *Journal of Marine Sciences and Engineering*, 8: 533. doi.org/10.3390/jmse8070533.
- Guarín, D, y J.J. Taboada. 2010. Influencia de los diferentes patrones de teleconexión en el Atlántico Norte sobre la lluvia y precipitación en Galicia (NO España). *ACT 1*, 81-94.
- Hakspiel-Segura, C., A. Martínez-López, J.A. Delgado-Contreras, C.J. Robinson y J. Gómez-Gutiérrez. 2022. Temporal variability of satellite chlorophyll-a as an ecological resilience indicator in the central region of the Gulf of California. *Progress in Oceanography*, 205, 102825. doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102825.
- Hamedani-Azmoordehfar, M y S. Ali-Azarmsa. 2013. Assessment the effect of ENSO on weather temperature changes using fuzzy analysis (Case study: Chababar). *APCBEE Procedia*, 5: 508-513. doi.org/10.1016/j.apcbee.2013.05.086.
- Hannah, L., G.F. Midgley, T. Lovejoy, W.J. Bond y M. Bush. 2002. Conservation of biodiversity in a changing climate. *Conservation Biology*, 16: 264-268.
- Harley, C.D.G., A.R. Hughes, K.M. Hultgren, B.G. Miner, C.J.B. Sorte, C.S. Thornber, L.F. Rodríguez, L. Tomanek y S.L. Williams. 2006. The impacts of climate change in coastal marine ecosystems. *Ecology Letters*, 9: 228-241. doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00871.x.
- Heras-Sánchez, M.C., J.E. Valdez-Holguín, J. Garatuza-Payán, M.A. Cisneros-Mata, L.M. Díaz-Tenorio, A. Robles-Morua, R.G. Hazas-Izquierdo. 2019. Regions of the Gulf of California determined by the distribution of sea surface temperature and chlorophyll-a concentration. *Biotechnia*, 21(1). 13-21.
- Hernández-de la Torre, B., R. Aguirre-Gómez, G. Gaxiola-Castro, S. Álvarez-Borrego, A. Gallegos-García, F. Rosete-Vergés y G. Bocco-Verdinelli. 2015. Ordenamiento ecológico marino: propuesta metodológica. *Hidrobiológica*, 25(2): 151-163.

- Herrera-Cervantes, H., D.B. Lluch-Cota, S.E. Lluch-Cota y G. Gutiérrez-de Velasco. 2007. The ENSO signature in sea-surface temperature in the Gulf of California. *Journal of Marine Research*, 65:589-605. doi.org/10.1357/002224007783649529.
- Herrera-Cervantes, H., S.E. Lluch-Cota, D.B. Lluch-Cota y G. Gutiérrez-de-Velasco. 2014. Interannual correlations between sea surface temperature and concentration of chlorophyll pigment off Punta Eugenia, Baja California, during different remote forcing conditions. *Ocean Science*, 10(3): 345-355. doi.org/10.5194/os-10-345-2014.
- Herrera-Cervantes, H. 2019. Sea surface temperature, ocean color and wind forcing patterns in the Bay of La Paz, Gulf of California: Seasonal variability. *Atmósfera*, 32(1): 25-38. doi.org/10.20937/ATM.2019.32.01.03.
- Herrera-Cervantes, H., S.E. Lluch-Cota, J. Cortés-Ramos, L. Farfán y R. Morales-Aspeitia. 2020. Interannual variability of surface satellite-derived chlorophyll concentration in the bay of La Paz, Mexico, during 2003–2018 period: The ENSO signature. *Continental Shelf Research*, 209: 104254. doi.org/10.1016/j.csr.2020.104254.
- Hoegh-Guldberg, O. y J.F. Bruno. 2010. The impacts of Climate Change on the World's Marine Ecosystems. *Science*, 328(5985): 1523-1528. [10.1126/science.1189930](https://doi.org/10.1126/science.1189930).
- Jepson, P. 2003. Ecoregions, ecosystem geography, and sustainability. *Journal of Biogeography*, 30: 1465-1465.
- Jiménez-Quiroz, M. C., 2011. Anexo del Informe Técnico: Elaboración de un boletín con información hidroclimática de los mares de México. Disponible en: <https://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/publicaciones/BOLETINES/hidroclimatico/INDICES-CLIMATICOS.pdf>. Acceso el: 01/Junio/2020.
- Jiménez-Quiroz, M.C., R. Cervantes-Duarte, R. Funes-Rodríguez, S.A. Barón-Campis, F.J. García-Romero, S. Hernández-Trujillo, D.U. Hernández-Becerril, R. González-Armas, R. Martell-Dubois. S. Cerdeira-Estrada, J.I. Fernández-Méndez, L.V. González-Ania, M. Vásquez-Ortíz y F.J. Barrón-Barraza. 2019. Impact of the “Blob” and “El Niño” in the SW Baja California Peninsula: Plankton and Environmental Variability of Bahía Magdalena. *Frontiers in Marine Science*, 6. 25. doi.org/10.3389/fmars.2019.00025.
- Kahru, M., R.M. Kudela, M. Manzano-Sarabia y B. Greg-Mitchell. 2012. Trends in the surface chlorophyll of the California Current: Merging data from multiple ocean colors satellites. *Deep-Sea Res Part II: Topical Studies in Oceanography*, 77-80, 89-98. 1030. doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.007.
- Lara-Lara, J.R., J.A. Arreola-Lizárraga, L.E. Calderón-Aguilera, V.F. Camacho-Ibar, G. de la Lanza-Espino, A. Escofet-Giansone, M.I. Espejel-Carbajal, M. Guzmán-Arroyo, L.B. Ladah, M. López-Hernández, A.E. Meling-López, P. Moreno-Casasola Barceló, H. Reyes-Bonilla, E. Ríos-Jara y J.A. Zertuche-González. 2008a. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. 109-134 p. En: Soberón, J., Halffter, G y Llorente, J. (Eds.), Capital Natural de México. Vol. I: Conocimiento

- actual de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. CONABIO. México.
- Lara-Lara, J.R., V. Arenas-Fuentes, C. Bazán-Guzmán, V. Díaz-Castañeda, E. Escobar-Briones, M. García-Abad, M. I. Espejel-Carvajal, M. Guzmán-Arroyo, L. B. Ladah, M. López-Hernández, G. Gaxiola-Castro, G. Robles-Jarero, R. Sosa-Ávalos, L.A. Soto-González, M. Tapia-García y J.E. Valdez-Holguín. 2008b. Los ecosistemas marinos. 135-159 p. En: Soberón, J., Halffter, G y Llorente, J. (Eds.), Capital Natural de México. Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. CONABIO. México.
- Lancin, M. 1987. Geomorfología y génesis de las fuerzas litorales del Canal del Infiernillo, Estado de Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 6(1): 52-72.
- Lavín, M.F., E. Beier y A. Badan. 1997. Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. 141-172 p. En: Lavín, M.F. (Ed.), Contribuciones a la Oceanografía Física en México. Unión Geofísica Mexicana. Ensenada, Baja California, México.
- Lavín, M.F. y S.G. Marinone. 2003. An overview of the physical Oceanography of the Gulf of California. 173-204 p. En: Velasco-Fuentes, O.I., Sheinbaum, J, Ochoa-de la Torre, J.L. (Eds.), Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands.
- Lavín, M.F., E. Palacios-Hernández y C. Cabrera. 2003. Sea Surface anomalies in the Gulf of California. *Geofísica Internacional* 42(3):363-375.
- Linacre, L., R. Durazo, J.M. Hernández-Ayón, F. Delgadillo-Hinojosa, G. Cervantes-Díaz, J.L. Lara-Lara, V. Camacho-Ibar, A. Siqueiros-Valencia y C. Bazán-Guzmán. 2010. Temporal variability of the physical and chemical water characteristics at a coastal monitoring observatory: Station ENSENADA. *Continental Shelf Research*, 30(16): 1730-1742. doi.org/10.1016/j.csr.2010.07.011.
- Lluch-Cota, D.B., D. Lluch-Belda, S. Lluch-Cota, J. López-Martínez, M. Nevárez-Martínez, G. Ponce-Díaz, G. Salinas-Zavala, A. Vega-Velázquez, J.R. Lara-Lara. G. Hammann y J. Morales. 1999. 137-178 p. Las pesquerías y El Niño: Impactos de El Niño en el sector pesquero. En: Magaña-Rueda, V.O.(Ed.), Impactos de El Niño en México. Dirección General de Protección Civil. México.
- Lluch-Cota, S.E., E.A. Aragón-Noriega, F. Arreguín-Sánchez, D. Auriolles-Gamboa, J.J. Bautista-Romero, R.C. Brusca, R. Cervantes-Duarte, R. Cortés-Altamirano, P. Del-Monte-Luna, A. Esquivel-Herrera, G. Fernández, M.E. Hendrickx, S. Hernández-Vázquez, H. Herrera-Cervantes, M. Kahru, M. Lavín, D. Lluch-Belda, D.B. Lluch-Cota, J. López-Martínez, S.G. Marinone, M.O. Nevárez-Martínez, S. Ortega-García, E. Palacios-Castro, A. Parés-Sierra, G. Ponce-Díaz, M. Ramírez-Rodríguez, C.A. Salinas-Zavala, R.A. Schwartzlose y A.P. Sierra-Beltrán. 2007. The Gulf of California: Review of ecosystem and sustainability challenges. *Progress in Oceanography*, 73: 1-26. doi.org/10.1016/j.pocean.2007.01.013.

- Lluch-Cota, S.A., A. Parés-Sierra, V.O. Magaña-Rueda, F. Arreguín-Sánchez, G. Bazzino, H. Herrera-Cervantes y D. Lluch-Belda. 2010. Changing climate in the Gulf of California. *Progress in Oceanography*, 57: 114-126. doi.org/10.1016/j.pocean.2010.09.007.
- López, M., J. Candela y M.L. Argote. 2006. Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California?. *Geophysical Research Letters*, 33:5. doi.org/10.1029/2006GL025908.
- López-Calderón, J., H. Manzo-Monroy, E. Santamaría-del Angel, R. Castro, A. González-Silvera y R. Millán-Núñez. 2006. Mesoscale variability of the Mexican Tropical Pacific using TOPEX and SeaWiFS data. *Ciencias Marinas*, 32(3): 539-549. <https://doi.org/10.7773/cm.v32i3.1125>.
- López-Sandoval, D.C., J.R. Lara-Lara, M.F. Lavín, S. Álvarez-Borrego y G. Gaxiola-Castro. Primary productivity in the eastern tropical Pacific Ocean off Cabo Corrientes, Mexico. *Ciencias Marinas*, 35(2): 169-182. doi.org/10.7773/cm.v35i2.1530.
- Longhurst, A.R., 2007. *Ecological Geography of the Sea*; 2° Edición. Editorial Elsevier. San Diego. Estados Unidos.
- Luccarelli, M. 1995. *Lewis Mumford and the Ecological Region. The Politics of Planning*. The Guilford Press. Londres. Inglaterra.
- Luna, M.L., A. Morata, M.L. Martín, y F. Valero. 2004. Influencia de los patrones de teleconexión del Atlántico Norte en la precipitación primaveral del Mediterráneo occidental. *Física de la Tierra*, 16: 137-148.
- Lynn, R.J y Simpson, J.J. 1987. the California Current system: The seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 92(C12): 12947-12966. <https://doi.org/10.1029/JC092iC12p12947>.
- Maddala, G.S e I.M. Kim. 1998. *Unit Roots, Cointegration, and Structural Change*; 1° Edición. Editorial Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- Manabe, S. 1969. Climate and the ocean circulation. *Monthly Weather Review*, 97(11): 739-774.
- Marinone, S.G y Lavín, M.F. 1997. Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California. 113-140 p. En: Lavín, M.F. (Ed.), *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*. Unión Geofísica Mexicana. Ensenada, Baja California, México.
- Martínez-Arroyo, A., S. Manzanilla-Naim y J. Zavala-Hidalgo. 2011. Vulnerability to Climate change of marine and coastal fisheries. *Atmósfera*, 24: 103-123.
- Martínez-Fuentes, L.M., G. Gaxiola-Castro, E. Gómez-Ocampo y M. Kahru. 2016. Effects of interannual events (1997-2012) on the hydrography and phytoplankton biomass of Sebastian Vizcaíno Bay. *Ciencias Marinas*, 42(2): 81-97. doi.org/10.7773/cm.v42i2.2626.

- Martínez-López, A., R. Cervantes-Duarte, A. Reyes-Salinas y J.E. Valdez-Holguín. 2001. Cambio estacional de clorofila *a* en la Bahía de La Paz, Baja California Sur. *Hidrobiológica*, 11(1): 45-52.
- Méndez-Ramos, C. 2011. Regionalización del Golfo de California con base en el ciclo anual de la concentración de clorofila-*a*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. México. D.F.
- Mclean, R.F., A. Tsyban, V. Burkett, J.O. Codignott, D.L. Forbes, N. Minura, R.J. Beamish y V. Ittekkot. 2001. Coastal Zones and Marine Ecosystems. 345-372 p. En: McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J., y White, K.S. (Eds.), *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Morales-Hernández, J.C., F.M. Carrillo-González, L.M. Farfán-Molina y V.M. Cornejo-López. 2016. Vegetation change cover in the coastal region of Bahía de Banderas, Mexico. *Caldasia*, 38(1): 17-29.
- NASA., 1986. MODIS, Moderate-Resolution Imaging Spectrometer, Earth Observing System. Volume Iib. Instrument Panel Report. NASA Goddard Space Flight Center. Greenbelt, Maryland. Estados Unidos.
- National Research Council., 2011. *Assessing the Requirements for Sustained Ocean Color Research and Operations*. National Academic Press. Washington, D.C. Estados Unidos.
- Pfaff, B. 2008. *Analysis of Integrated and Cointegrated Time Series with R*; 2º Edición. Editorial Springer. Nueva York, Estados Unidos.
- Oschlies, A y V. Garçon. 1998. Eddy-induced enhancement of primary production in a model of the North Atlantic Ocean. *Nature*, 394: 266-269. doi.org/10.1038/28373.
- Otero, J., y C.F. Baum. 2017. Response surface models for the Elliot, Rothenberg, and Stock unit-root test. *The Stata Journal*, 17(4): 985-1002. doi.org/10.1177/1536867X1801700.
- Ortíz-Ahumada, J.C., S. Álvarez-Borrego y J. Gómez-Valdés. 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. *Ciencias Marinas*, 44(1): 1-20. doi.org/10.7773/cm.v44i1.2743.
- Palacios-Hernández, E., M.L. Argote-Espinosa, A. Amador-Buenrostro y M. Mancilla-Peraza. 1996. Simulación de la circulación barotrópica inducida por el viento en Bahía Sebastián Vizcaíno, B.C. *Atmósfera*, 9: 171-188.
- Pandey, V., A.K. Misra, y S.B. Yadav. 2019. Impact of El-Nino and La Nina on Indian Climate and Crop Production. 11-20 p. En: Sheraz-Mahdi, S. (Ed.). *Climate change and agriculture in India: Impact and Adaptation*. Springer. Cham. Switzerland.
- Pares-Sierra, A., M. López y E.G. Pavía. 1997. Oceanografía del Océano Pacífico Nororiental. 1-24 p. En: Lavín. M.F. (Ed.), *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*. Unión Geofísica Mexicana. Ensenada, Baja California, Mexico.

- Pattullo, J., W. Munk, R. Revelle y E. Strong. 1955. The seasonal oscillation in sea level. *Journal of Marine Research*, 14: 88-155.
- Pedroza, H., y L. Dicovskyi. 2007. Sistema de Análisis Estadístico con SPSS. Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria. Managua, Nicaragua.
- Peláez, J y J.A. McGowan. 1986. Phytoplankton pigment patterns in the California Current as determined by satellite. *Limnology and Oceanography*, 31(5): 927-950. doi.org/10.4319/lo.1986.31.5.0927.
- Pennington, T.J., K.L. Mahoney, V.S. Kuwahara, D.D. Kolber, R. Calienes y F.P. Chavez. 2006. Primary production in the eastern tropical pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4): 285-317. doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.012.
- Pérez-Arvizu, E.M., E.A. Aragón-Noriega y T. L. Espinoza-Carreón. 2013. Variabilidad estacional de clorofila *a* y su respuesta a condiciones El Niño y La Niña en el Norte del Golfo de California. *Biología Marina y Oceanografía*, 48(1):131-141. doi.org/10.4067/S0718-19572013000100011.
- Pérez-Brunius, P., M. López, A. Páres-Sierra y J. Pineda. 2007. Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind data sources. *CalCOFI Report*, 48: 204-212.
- Pretty, J y D. Smith. 2004. Social capital in biodiversity conservation and management. *Conservation Biology*, 18: 631-638.
- Rajeesh, R., G.S. Dwarakish. 2015. Satellite oceanography-A review. *Aquatic Procedia*, 4: 165-172. doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.023.
- Ramírez-León, M.R., S. Álvarez-Borrego, C. Turrent-Thompson, G. Gaxiola-Castro y G. Heckel-Dziendzielewski. 2015. Nutrient input from the Colorado River to the northern Gulf of California is not required to maintain a productive pelagic ecosystem. *Ciencias Marinas*, 41(2): 169-188. doi.org/10.7773/cm.v41i2.2483.
- Regan, H.M., L.A. Hierl, J. Franklin, D.H. Deutschman y H.L. Schmalbach. 2008. Species prioritization for monitoring and management in regional multiple species conservation plans. *Diversity and Distributions*, 14: 462-471.
- Ripa, P y Marinone S.G. 1989. Seasonal variability of temperature, salinity, velocity, vorticity and sea level in the central Gulf of California, as inferred from historical data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 115:887-913. doi.org/10.1002/qj.49711548807.
- Robles, J.M. y Marinone, S.G. 1987. Seasonal and interannual thermohaline variability in the Guaymas Basin in the Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 7(7):715-733. [doi.org/10.1016/0278-4343\(87\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0278-4343(87)90013-6).
- Robles-Tamayo, C.M. 2018. Variabilidad oceanográfica de la zona costera del Estado de Sonora. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora.
- Robles-Tamayo, C.M., J.E. Valdez-Holguín, R. García-Morales, G. Figueroa-Preciado, H. Herrera-Cervantes, J. López-Martínez y L.F. Enríquez-Ocaña. 2018. Sea Surface

- Temperature (SST) Variability of the Eastern Coastal Zone of the Gulf of California. *Remote Sensing*, 10(9), 1434. doi.org/10.3390/rs10091434.
- Robles-Tamayo, C.M., R. García-Morales, J.E. Valdez-Holguín, G. Figueroa-Preciado, H. Herrera-Cervantes, J. López-Martínez y L.F. Enríquez-Ocaña. 2020. Chlorophyll *a* Concentration Distribution on the Mainland Coast of the Gulf of California, México. *Remote Sensing*, 12(8), 1335. doi.org/10.3390/rs12081335.
- Roden, G.I. 1958. Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pacific Science*, 12(1): 21-45.
- Rodríguez-Martínez, J. 2013. *Ecología*; 1º Edición. Editorial Pirámide. Madrid, España.
- Rohli, R.V., A. Vega., 2015. *Climatology*. Jones & Bartlett Learning. Burlington, Massachusetts, 1131 United States of America.
- Rosales-Naudaca, H., T. Gerrodete, J. Urban-R, G. Cárdenas-Hinojosa y J. Medrano-González. 2011. Macroecology of marine mammal species in the Mexican Pacific Ocean: diversity and distribution. *Marine Ecology Progress Series*, 431: 281-291. doi.org/10.3354/meps09120.
- Round, F.E. 1967. The Gulf of California. Part I: Its composition, distribution and contribution to the sediments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1: 76-97. [doi.org/10.1016/0022-0981\(67\)90008-1](https://doi.org/10.1016/0022-0981(67)90008-1).
- Ruíz-Villareal, M., J.M. Cabanas, G. González-Nuevo, A. Bode, E. Nogueira, C. González-Pola, y A. Lavín. 2012. Clima y meteorología. 37-68 p. En: Bode, A., Lavín, A., y Valdés, L. (Eds.), *Cambio climático y oceanográfico en el Atlántico Norte de España*. Instituto Español de Oceanografía: Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid, España.
- Saldaña- Ruíz, L.E., E. García-Rodríguez, E. Pérez-Jiménez, J. Tovar-Ávila y J. Rivera-Téllez. 2019. Chapter Two-Biodiversity and Conservation of Sharks in Pacific Mexico. 11-60 p. En: Larson, S.E y Lowry, D. (Eds.), *Advances in Marine Biology*. Academic Press. Cambridge, Massachusetts, United States.
- Sandoval, Lugo, A.G., T.L. Espinosa-Carreón, J.A. Seminoff, C.E. Hart, C.P. Ley-Quíñonez, A. Alonso-Aguirre, T. Todd-Jones y A.A. Zavala-Norzagaray. 2020. Movements of loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) in the Gulf of California: integrating satellite telemetry and remotely sensed environmental variables. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 100 (5), 817-824. doi.org/10.1017/S0025315420000636.
- Sánchez-Velasco, L., E. Beier, V.M. Godínez, E.D. Barton, E. Santamaría-del Angel, S.P.A. Jiménez-Rosenberg y S.G. Marinone. 2017. Hydrographic and fish larvae distribution during the “Godzilla El Niño 2015–2016” in the northern end of the shallow oxygen minimum zone of the Eastern Tropical Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(3): 2156-2170. doi.org/10.1002/2016JC012622.

- Santamaría-del Angel, E., S. Álvarez-Borrego y F.E. Muller-Karger. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research*, 99(24):7411-7421. doi.org/10.1029/93JC02154.
- Santamaría-del Angel, E., S. Álvarez-Borrego., R. Millán-Núñez y F.E. Muller-Karger. 1999. Sobre el efecto de las surgencias de verano en la biomasa del fitoplancton en el Golfo de California. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 49: 207-212.
- Santamaría-del Angel, E., A. González-Silvera, R. Millán-Núñez, M.E. Callejas-Jiménez, y R. Cajal-Medrano. 2011. Determining Dynamic Biogeographic Regions using Remote Sensing Data. 273-293 p. En: *Handbook of Satellite Remote Sensing Image Interpretation: Applications for Marine Living Resources Conservation and Management*. EU PRESPO y IOCCG. Dartmouth, NS, Canada.
- Serrano-Gallego, R. 2003. Introducción al análisis de datos experimentales: tratamiento de datos en ensayos. Universitat Jaume I. Castellón de la Plana, España.
- Shelton, M. 1988. *Climate and Weather: A Spatial Perspective*. Kendall/Hunt Publishing Company. Dubuque, Iowa, United States.
- Shen, S.S.P y R.C.J. Somerville. 2019. *Climate Mathematics. Theory and Applications*; 1° Edition. Editorial Cambridge University Press. United Kingdom.
- Soto-Mardones, L., S.G. Marinone y A. Parés-Sierra. 1999. Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 25(1):1-30. doi.org/10.7773/cm.v25i1.658.
- Stevenson, M.R. 1970. On the physical and biological oceanography near to the entrance of the Gulf of California, October 1966-August 1967. *Bulletin Interamerican Tropical Tuna Commission*, 14(3): 389-504.
- Silveyra-Bustamante, A.A., J. Gómez-Gutiérrez, E. González-Rodríguez, C. Sánchez, A. Schiariti y M.A. Mendoza-Becerril. 2020. Seasonal variability of gelatinous zooplankton during an anomalously warm year at Cabo Pulmo National Park, Mexico. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 48 (5), 779-793. doi.org/10.3856/vol48-issue5-fulltext-2441.
- Thomas, A.C., R. Mendelssohn y R. Weatherbee. 2013. Background trends in California Current surface chlorophyll concentrations: A state-space view. *Journal of Physical Research*, 118(10): 5296-5311. doi.org/10.1002/jgrc.20365.
- Torres-Orozco, E. 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Departamento de Oceanografía Física. Ensenada. Baja California, México.
- Trenberth, K.E. 1997. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12): 2771-2777. [doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2).

- Trenberth, K.E y J.W. Hurrell. 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dynamics*, 9: 303-319. doi.org/10.1007/BF00204745.
- Valenzuela-Sánchez, C.G., N.M.A. Pastén-Miranda, L.F. Enríquez-Ocaña, R.H. Barraza-Guardado, Valdez-Holguín, J.E y L.R. Martínez-Córdova. 2021. Phytoplankton composition and abundance as indicators of aquaculture effluents impact in coastal environments of mid Gulf of California. *Heliyon*, 7(2): e06203. doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06203.
- Valiela, I. 1995. *Marine Ecology Processes*; 2° Edition. Editorial Springer. Nueva York. Estados Unidos.
- Vikas, M y G.S. Dwarakish. 2015. El Niño: A Review. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 8(2): 130-137.
- Wilkinson, T., E. Wilken, J. Bezaury-Creel, T. Hourigan, T. Agardy, H. Herrmann, L. Janishevski, C. Madden, L. Morgan y M. Padilla. 2009. Ecorregiones marinas de América del Norte. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá.
- Yao, C.L y G. N. Somero. 2014. The impact of ocean warming on marine organism. *Chinese Science Bulletin*, 59: 468-479. doi.org/10.1007/s11434-014-0113-0.
- Yen, S.W., J.S. Kug, B. Dewitte, M.H. Kwon, B.P. Kirtman y F.F. Jin. 2009. El Niño in a changing climate. *Nature*, 461: 511-514. doi.org/10.1038/nature08316.
- Zamudio, L., P. Hogan y E.J. Metzger. 2008. Summer generation of the Southern Gulf of California eddy train. *Journal of Geophysical Research*, 113: C6. doi.org/10.1029/2007JC004467.
- Zaytsev, O., R. Cervantes-Duarte, O. Montante y A. Gallegos-García. 2003. Coastal upwelling activity on the Pacific shelf of the Baja California Peninsula. *Journal of Oceanography*, 59(4): 489-502. doi.org/10.1023/A:1025544700632.