



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



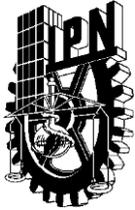
**PREFERENCIAS AMBIENTALES Y  
VARIABILIDAD DE LA ESTRUCTURA DE  
TALLAS DEL TIBURÓN SEDOSO *Carcharhinus  
falciformis* (Müller & Henle 1839) CAPTURADO  
EN EL PACÍFICO CENTRAL MEXICANO**

**Biól. Natalia Michelle Melgar Martínez**

**Directores**

**Dra. Sofía Ortega García**

**Dr. Heriberto Santana Hernández**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de **La Paz, B.C.S.**, siendo las **12:00** horas del día **11** del mes de **Junio** del **2021** se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de: **CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS** para examinar la tesis titulada:

**“Preferencias ambientales y variabilidad de la estructura de tallas del tiburón sedoso *Carcharhinus falciformis* (Müller & Henle 1839) capturado en el Pacífico Central Mexicano”** del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	MELGAR	Apellido Materno:	MARTÍNEZ	Nombre (s):	NATALIA MICHELLE
-------------------	--------	-------------------	----------	-------------	------------------

Número de registro: **B 1 9 0 5 1 8**

Aspirante del Programa Académico de Posgrado: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene **16** % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo **SI NO SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

#### JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:

El porcentaje de similitud se encuentra en su mayoría en las citas referidas a la fuente original por lo que no se considera plagio

**\*\*Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR**  **SUSPENDER**  **NO APROBAR**  la tesis por **UNANIMIDAD**  **MAYORÍA**  en virtud de los motivos siguientes:

**"SATISFACE LOS REQUISITOS SEÑALADOS POR LAS DISPOSICIONES REGLAMENTARIAS VIGENTES"**

### COMISIÓN REVISORA DE TESIS

**DRA. SOFÍA ORTEGA GARCÍA**  
Director de Tesis  
Nombre completo y firma

**DR. FELIPE GALVÁN MAGAÑA**  
Nombre completo y firma

**DR. HÉCTOR VILLALOBOS ORTIZ**  
Nombre completo y firma

**DR. HERIBERTO SANTANA HERNÁNDEZ**  
Director de Tesis  
Nombre completo y firma

**DR. ULIANOV JAKES COTA**  
Nombre completo y firma

**DR. SERGIO HERNÁNDEZ TRUJILLO**  
Nombre completo y firma  
**PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 22 del mes de Junio del año 2021

El (la) que suscribe BIÓL. NATALIA MICHELLE MELGAR MARTÍNEZ Alumno (a) del Programa  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro B190518 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS  
manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DRA. SOFÍA ORTEGA GARCÍA Y DR. HERIBERTO SANTANA HERNÁNDEZ  
y cede los derechos del trabajo titulado:

“Preferencias ambientales y variabilidad de la estructura de tallas del tiburón sedoso  
Carcharhinus falciformis (Müller & Henle 1839) capturado en el Pacífico Central Mexicano”

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: natmelmar@hotmail.com - sortega@ipn.mx -

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

BIÓL. NATALIA MICHELLE MELGAR MARTÍNEZ

*Nombre y firma del alumno*



Tesis\_Natalia\_Melgar.pdf

Jun 14, 2021

16598 palabras/92977 caracteres

Dr. Mario Alberto Castillo Soria

# Tesis\_Natalia\_Melgar.pdf

## Resumen de fuentes

# 16%

SIMILITUD GENERAL

1	www.biblioteca.cicimar.ipn.mx INTERNET	4%
2	tesis.ipn.mx INTERNET	2%
3	www.inapesca.gob.mx INTERNET	1%
4	repositoriodigital.ipn.mx INTERNET	1%
5	docplayer.es INTERNET	<1%
6	eprints.uanl.mx INTERNET	<1%
7	worldwidescience.org INTERNET	<1%
8	www.uc.cl INTERNET	<1%
9	doczz.net INTERNET	<1%
10	www.ea1uro.com INTERNET	<1%
11	www.redalyc.org INTERNET	<1%
12	www.banrepcultural.org INTERNET	<1%
13	pesquisa.bvsalud.org INTERNET	<1%
14	digeset.ucoj.mx INTERNET	<1%
15	www.iccat.es INTERNET	<1%
16	archive.org INTERNET	<1%

## **Agradecimientos**

Primero que nada, a mi familia: Miguel, Sylvia y Samantha. Gracias por apoyarme desde un principio a seguir mis sueños, aunque fuera tan lejos de casa; gracias por las llamadas y mensajes que me recordaban que siempre estarán cerca de mí sin importar los kilómetros. La pandemia hizo más severo todo, pero siempre serán mi motivación, mi mayor soporte y mi luz al final del camino.

Un agradecimiento especial a la Dra. Sofía Ortega García, sin su apoyo, consejos, comentarios y jalones de oreja (en el buen sentido) no hubiera aprendido tanto. Gracias por transmitirme una parte de su conocimiento y ayudarme a ser mejor estudiante, investigadora y persona.

A Paul Antonio. Gracias por alentarme a ser mejor, por retarme, por hacerme ver que puedo llegar a hacer grandes cosas por mí misma, por apoyarme incondicionalmente y también por ser un miembro externo de mi comité, JEJE.

A mi Filo y a mi Carnal, por ser esos amigos que siempre me apoyaron y estuvieron en las buenas y no tan buenas. Aprecio mucho su apoyo.

A mis padres paceños, Maura y Antonio. Gracias por el cariño y la compañía durante estos dos años.

A CICIMAR por el apoyo institucional brindado para llevar a cabo mi proyecto de tesis.

A CONACYT por el apoyo económico brindado a través de la beca de posgrado.

A los miembros de mi comité Dr. Heriberto Santana Hernández, Dr. Ulianov Jakes Cota, Dr. Héctor Villalobos y Dr. Felipe Galván por los comentarios realizados en las reuniones y en el escrito. Gracias por brindarme una parte de su conocimiento.

## Contenido

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABLAS.....	viii
GLOSARIO.....	ix
RESUMEN .....	xi
ABSTRACT .....	xiii
INTRODUCCIÓN .....	1
ANTECEDENTES .....	3
JUSTIFICACIÓN .....	7
HIPÓTESIS .....	8
OBJETIVOS .....	8
Objetivos específicos:.....	8
MATERIALES Y MÉTODOS .....	9
Área de estudio.....	9
Base de datos:.....	11
Información pesquera.....	11
Información ambiental:.....	12
Análisis estadísticos.....	13
Análisis de tallas de los organismos capturados.....	13
Análisis de la captura de los organismos .....	14
Isolíneas de la variabilidad inter e intraanual .....	14
Cálculo de las anomalías .....	15
Relación del recurso con el medio ambiente.....	15
Modelación del hábitat .....	16
Predicción espacial .....	17

RESULTADOS .....	18
Análisis de tallas de los organismos capturados .....	18
Análisis de la captura de los organismos.....	20
Caracterización ambiental del área de estudio .....	23
Relación del recurso con el medio ambiente .....	30
Modelación del hábitat.....	32
DISCUSIÓN .....	36
Análisis de tallas de los organismos capturados .....	36
Caracterización ambiental .....	40
Relación del recurso con el medio ambiente .....	41
Modelación del hábitat.....	44
CONCLUSIONES.....	47
RECOMENDACIONES .....	48
LITERATURA CITADA .....	49
ANEXOS .....	59

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> <i>Carcharhinus falciformis</i> . .....	2
<b>Figura 2.</b> Posición geográfica de los lances realizados (cruces blancas) por la flota palangrera de mediana altura que operó en el Puerto de Manzanillo, Col. durante 2003-2017. ....	9
<b>Figura 3.</b> Corrientes que convergen en el Pacífico Central Mexicano. (CRCC: Corriente Costera de Costa Rica; TTB: Termoclina de la Cuenca de Tehuantepec; MCC: Corriente Costera Mexicana; TCCD: Termoclina del Domo de Cabo Corrientes; CC: Corriente de California). Tomado de: Gómez-Valdivia et al., 2015. ....	10
<b>Figura 4.</b> Palangre de superficie utilizado por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo en el Pacífico Central Mexicano. ....	12
<b>Figura 5.</b> Esquema de las longitudes del tiburón sedoso. LT= Longitud Total; LF = Longitud Furcal; LI = Longitud Interdorsal. ....	13
<b>Figura 6.</b> Frecuencia del número de organismos de tiburón sedoso capturados en el Pacífico Central Mexicano en el periodo 2003 al 2017 por intervalo de clase de longitud total (LT): neonatos ( $LT \leq 83$ cm LT), juveniles ( $83 > LT \leq 180$ cm LT) y adultos ( $LT > 180$ cm). La línea punteada indica la LT promedio encontrada en este estudio. ....	18
<b>Figura 7.</b> Variabilidad interanual de la longitud total de los organismos de tiburón sedoso capturados por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo en el Pacífico Central Mexicano, durante el periodo 2003-2017. Los cuadros grises señalan el patrón de aumento de tallas encontrado durante el periodo de estudio. Media = Media; Media $\pm$ EE = Media $\pm$ Error Estándar; Media $\pm$ DE = Media $\pm$ Desviación Estándar. ....	19
<b>Figura 8.</b> Variabilidad intraanual para un año promedio (2003-2017) de la longitud total (LT) de tiburón sedoso capturados por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo en el Pacífico Central Mexicano Los cuadros grises señalan los meses donde se encontraron las mayores tallas promedio. Media = Media; Media $\pm$ EE = Media $\pm$ Error Estándar; Media $\pm$ DE = Media $\pm$ Desviación Estándar. ....	19

<b>Figura 9.</b> Frecuencia del número de organismos correspondientes a machos y hembras que fueron capturados anualmente por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo durante el periodo 2003-2017 en el Pacífico Central Mexicano. ....	20
<b>Figura 10.</b> Isolíneas de captura promedio mensual para los machos de tiburón sedoso capturados por la flota de mediana altura en el Pacífico Central Mexicano durante el periodo de 2003-2017. Los cuadros rojos señalan los periodos donde hubo mayor número de organismos capturados por cuadrante. ....	21
<b>Figura 11.</b> Isolíneas de captura promedio mensual para las hembras de tiburón sedoso capturados por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo en el Pacífico Central Mexicano durante el periodo de 2003-2017. Los cuadros rojos señalan los periodos donde hubo mayor captura por cuadrante. ....	21
<b>Figura 12.</b> Distribución interanual en cuadrantes de 0.5° de los tiburones sedosos capturados por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo en el Pacífico Central Mexicano durante el periodo 2003-2017. ....	22
<b>Figura 13.</b> Distribución intraanual de los tiburones sedosos capturados por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo en el Pacífico Central Mexicano durante un año tipo promedio (2003-2017). ....	23
<b>Figura 14.</b> Variabilidad interanual de la temperatura superficial del mar (TSM) del Pacífico Central Mexicano durante el periodo 2003-2017. ....	24
<b>Figura 15.</b> Variabilidad interanual de la concentración de clorofila a (CChl-a) en el Pacífico Central Mexicano en el periodo 2003-2017. ....	24
<b>Figura 16.</b> Variabilidad interanual de la altura superficial del mar (ASM) en Pacífico Central Mexicano en el periodo 2003-2017. ....	25
<b>Figura 17.</b> Variabilidad intraanual de la temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico Central Mexicano para un año tipo promedio (2003-2017). ....	25
<b>Figura 18.</b> Variabilidad intraanual de la concentración de clorofila (CChl-a) en el Pacífico Central Mexicano para un año tipo promedio (2003-2017). ....	26
<b>Figura 19.</b> Variabilidad intraanual de la altura superficial del mar (ASM) del Pacífico Central Mexicano para un año tipo promedio (2003-2017). ....	26
<b>Figura 20.</b> Isolíneas de la temperatura superficial del mar (TSM) para el periodo 2003-2017 en el Pacífico Central Mexicano. El cuadro azul marca la época con	

temperaturas menores, mientras que el cuadro rojo hace referencia a la temperatura máxima registrada en el periodo. .... 27

**Figura 21.** Isolíneas de la concentración de clorofila a (CChl-a) para el periodo 2003-2017 en el Pacífico Central Mexicano. Los cuadros azules señalan los periodos con valores menores, mientras que los cuadros rojos indican los valores más altos..... 28

**Figura 22.** Isolíneas de la altura superficial del mar (ASM) durante 2003-2017 en el Pacífico Central Mexicano. El cuadro azul hace referencia a los valores bajos de la ASM, mientras que el cuadro rojo señala el periodo donde se presentaron los valores más altos. .... 28

**Figura 23.** Correlaciones cruzadas entre las anomalías de las variables ambientales del Pacífico Central Mexicano en el periodo 2003-2017. .... 29

**Figura 24.** Batimetría del Pacífico Central Mexicano. Se señala la ubicación de la trinchera mesoamericana dentro del área de estudio. .... 30

**Figura 25.** Relación entre las capturas de tiburón sedoso (puntos negros) en el Pacífico Central Mexicano y la batimetría del área de estudio en el periodo 2003-2017. .... 30

**Figura 26.** Relación de las variables ambientales y la CPUE durante el periodo 2003-2017 en el Pacífico Central Mexicano. CPUE = Captura Por Unidad de Esfuerzo; Anom-TSM = Anomalías de la Temperatura Superficial del Mar; Anom-CChl-a = Anomalías de la Concentración de Clorofila a; Anom-ASM = Anomalías de la Altura Superficial del Mar..... 31

**Figura 27.** Gráficos de efectos parciales de las variables predictivas sobre la captura del tiburón sedoso en el Pacífico Central Mexicano. a) Longitud y Latitud, b) Año, c) Mes, d) Temperatura Superficial del mar (TSM), e) Concentración de clorofila-a (CChl-a), f) Altura Superficial del Mar (ASM), g) Batimetría ..... 34

**Figura 28.** Predicción espacial de las capturas de tiburón sedoso en el Pacífico Central Mexicano a través del mejor modelo ajustado..... 35

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Porcentaje de devianza explicada de cada una de las variables predictivas utilizadas en este modelo. TSM= Temperatura Superficial del Mar, ASM= Altura Superficial del Mar, CChla=concentración de clorofila-a, Lon= longitud y Lat=latitud. ....	32
<b>Tabla 2.</b> Proceso de construcción del modelo estadístico adecuado para describir el efecto de las variables predictivas en la captura del tiburón sedoso en el PCM. ....	33

## GLOSARIO

**Áreas de crianza:** regiones donde los organismos juveniles de tiburón nacen o residen hasta el momento en que maduran sexualmente.

**Altura superficial del mar (ASM):** es la diferencia entre la altura del mar observada y la altura promedio esperada de una zona en particular.

**Anomalía:** desviación de las características normales o naturales de un fenómeno.

**Batimetría:** medida y cálculo de la profundidad de los cuerpos de agua. Topografía submarina.

**Clorofila-a (Chl-a):** sustancia verdosa vegetal producida por el fitoplancton que forman la base de nutrientes de los ecosistemas oceánicos. La clorofila-a tiene su máximo de absorción de la luz a 420 nm y 690 nm.

**Correlación cruzada:** medida de similitud entre dos señales. Esta medida es considerada una función de un desfase en el tiempo, desfase que es aplicado a una de las señales.

**Depredador tope:** organismo que se encuentra en el ápice de la cadena alimenticia.

**Filopatría:** derivada del griego "amante del hogar" y es la tendencia de un individuo a regresar o quedarse en su área de origen, sitio natal u otra localidad adoptada.

**Hábitat esencial:** en pesquerías, se define como un hábitat necesario para el desove, reproducción, alimentación o crecimiento hasta la madurez.

**Modelos Aditivos Generalizados (GAM, por sus siglas en inglés):** los modelos aditivos generalizados son descritos como una generalización de los modelos lineales generalizados, en el cual se utiliza una suma de "funciones suavizadoras" de las variables predictivas.

**Organismo pelágico:** organismos marinos que viven y se desplazan en la columna de agua.

**Palangre:** aparejo de pesca que consta de una línea principal (línea madre) de la que cuelgan cada cierta distancia líneas secundarias (reinales) con anzuelos en sus extremos, en la zona donde inicia cada reinal se coloca una boya que facilita el mantenimiento de la verticalidad de aquel e indica su posición.

**Surgencia:** movimientos ascendentes mediante los cuales las aguas de los niveles subsuperficiales son llevadas hasta la superficie, desde profundidades generalmente

menores de 100-200 metros, y removidas desde el área de transporte por el flujo horizontal, produciéndose así un aporte de nutrientes a las aguas superficiales empobrecidas por el consumo biológico.

## RESUMEN

El tiburón sedoso (*Carcharhinus falciformis*) es una de las especies de mayor importancia económica y de mayores volúmenes de captura en el Pacífico Central Mexicano (PCM). Las investigaciones sobre las preferencias ambientales y la distribución de las especies pueden ayudar a reducir la captura incidental de organismos juveniles durante las operaciones de pesca comercial y beneficiar su conservación. El objetivo de este trabajo fue analizar la distribución espacio-temporal por tallas y sexos del tiburón sedoso, así como determinar sus preferencias ambientales. La información pesquera corresponde a registros de captura de organismos muestreados en el programa de monitoreo de tiburones del INAPESCA, así como la información mensual del esfuerzo pesquero durante 2003-2017, con lo que fue posible estimar la CPUE (no. organismos capturados / 1000 anzuelos (CPUE). Las variables ambientales analizadas fueron la temperatura superficial del mar (TSM), concentración de clorofila-a (CChl-a) y altura superficial del mar (ASM), además de contar con la batimetría del área de estudio. Por medio de Modelos Aditivos Generalizados se determinó el efecto de las variables ambientales en las capturas del tiburón sedoso. De los 19,672 registros analizados, el 86% fueron organismos juveniles. Las tallas presentaron una variabilidad interanual e intra-anual significativa, con tallas desde los 48 hasta los 256 cm, un promedio de 140 cm de longitud total. La proporción sexual fue de 0.85:1 H-M. No se encontró un patrón diferencial en la distribución por tallas y sexos. El área de estudio se caracteriza por una TSM de 24°-30 °C, CChl-a de 0.08-0.48 mg/m<sup>3</sup> y una ASM de -0.12-0.28 m, con variabilidad interanual e intra-anual significativa. El modelo final obtenido reveló que la probabilidad de captura del tiburón sedoso en el PCM fue mayor en ambientes pelágicos, durante los años 2005-2008 y 2014-2016, en los meses de abril a septiembre, cuando la TSM fue >27 °C y la CChl-a fue >0.2 mg/m<sup>3</sup>, en zonas de convergencia es decir con valores de ASM > 0.1 m y a profundidades mayores a los 3000 m. La presencia de una gran cantidad de organismos juveniles de tiburón sedoso sugiere que el PCM podría ser utilizado como área de crianza, además de que esta especie podría tener una tendencia a la filopatría, retornando a estas áreas cada cuatro años. Debido a que el tiburón sedoso es una especie con capturas

importantes en todo el Pacífico Mexicano, es de gran importancia implementar estrategias de manejo para esta especie considerando la variabilidad de las tallas, preferencias ambientales, espaciales y temporales de los organismos de tiburón sedoso encontradas en el presente trabajo.

## ABSTRACT

The silky shark (*Carcharhinus falciformis*) is one of the most economically important species and capture higher volumes in the Mexican Central Pacific (PCM). Research on environmental preferences and species distribution can help reduce bycatch of juvenile organisms during commercial fishing operations and benefit their conservation. The objective of this work was to analyze the spatio-temporal distribution by size and sex of the silky shark, as well as to determine its environmental preferences. The fishing information corresponds to the catch records of organisms sampled in the INAPESCA shark monitoring program, as well as the monthly information of the fishing effort during 2003-2017, with which it was possible to estimate the CPUE (no. Organisms caught / 1000 hooks (CPUE). The environmental variables analyzed were sea surface temperature (TSM), chlorophyll-a concentration (CChl-a) and sea surface height (ASM), in addition to having the bathymetry of the study area. The effect of environmental variables on the silky shark captures was assessed by means of generalized additive models (GAMs). Of the 19,672 records analyzed, 86% were juvenile organisms. The sizes showed significant interannual and intra-annual variability, with lengths from 48 to 256 cm, an average of 140 cm in total length. The sex ratio was 0.85:1 F-M. No spatial pattern was observed related to the size and sex distribution of the sharks. The study area is characterized by SST of 24°-30° C, CChl-a of de 0.08-0.48 mg/m<sup>3</sup> and a SSH of -0.12-0.28 m, with a significant inter and intra-annual variability. The final model showed a spatial preference out of the coast, during 2005-2008 and 2014-2016, on April to September, as well as an environmental preference for temperatures of 27 °C, 0.2 mg\*m<sup>3</sup> CChl-a concentration, in convergence zones with 3000 m of depth. The presence of a large number of juvenile organisms suggest that Mexico Central Pacific could be used as a nursery area by the silky shark, in addition to the fact the this species could have a tendency to the philopatry, returning to these areas every four years. Because the silky shark is an species with important catches throughout the Mexican Pacific, it is of great importance to implement management strategies according to the sizes variability, enviromental, spatial and time preferences found for silky shark in this study.

## INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los tiburones han adquirido un papel importante en la vida del ser humano debido a la gran cantidad de productos que se han obtenido a partir de ellos, como es el caso de productos comestibles o fármacos. Cabe mencionar que el mercado de aletas y piel tiene un gran valor económico, motivo por el cual se intensificó la pesca hacia este grupo (Pratt *et al.*, 1990; CONAPESCA-INP, 2004).

En México la pesca es una actividad económica muy importante, en la cual se utilizan embarcaciones menores, de mediana altura y de altura que con ayuda de distintos artes de pesca como las redes de enmalle o palangres capturan distintas especies, dentro de las cuales se encuentran los pelágicos mayores, grupo al que pertenecen diversas especies de tiburones (Santana-Hernández, 2001; 2008; Beléndez-Moreno *et al.*, 2014).

En las capturas de tiburones y rayas que se realizan en México se han registrado aproximadamente 50 especies diferentes. De la producción total, el 40% es aportado por embarcaciones menores, mientras que el 60% corresponde a embarcaciones de mediana altura y de altura. Los tiburones con capturas mayores pertenecen a las familias Alopiidae, Carcharhinidae, Squatinidae, Sphyrnidae y Triakidae (DOF, 2015).

Dentro de la familia Carcharhinidae se encuentra el tiburón sedoso (*Carcharhinus falciformis*), el cual es de los más capturados en diferentes pesquerías tropicales, tanto artesanales como comerciales y deportivas, así como especie secundaria en redes de enmalle, palangres y cerco (CONAPESCA, 2004; Bonfil, 2008; SEMARNAT, 2018). En el océano Pacífico mexicano, las áreas de mayor captura para la especie son el Golfo de California y el Golfo de Tehuantepec (Soriano *et al.*, 2006).

El tiburón sedoso es una de las especies más grandes de la familia Carcharhinidae, con una talla máxima registrada de 330 cm de longitud total (Compagno, 1984; Bonfil, 2008, Fig. 1). Se caracteriza por tener una longevidad de hasta 16 años, así como un tipo de reproducción vivípara placentaria (Bransteter, 1987; Galván-Tirado *et al.*, 2015). El período de gestación es de aproximadamente 12 meses y el número de embriones por camada varía geográficamente (Bonfil,

2008). Además, se ha descrito como un depredador oportunista que se alimenta principalmente de sardina, jurel, calamares y langostilla (Compagno, 1984; Bonfil, 2008; Cabrera-Chávez-Costa *et al.*, 2010; Barajas-Calderón, 2018).



**Figura 1.** *Carcharhinus falciformis*.

Se sabe que es una especie migratoria con la capacidad de recorrer grandes distancias a una velocidad máxima estimada de unos 60 km/día. Es uno de los tiburones pelágicos más abundantes cerca de las plataformas continentales y en zonas insulares oceánicas con aguas cálidas de temperaturas mayores a los 23 °C, aunque también está presente en mar abierto (Compagno, 1984; Bonfil, 2008). En el océano Pacífico Oriental (OPO) su distribución abarca la zona oceánica desde California hasta Perú (29° N, 115° W - 17° S, 71° W).

El tiburón sedoso se encuentra dentro del Apéndice II de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (CITES, 2016), mientras que la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés) lo catalogan como una especie vulnerable (Rigby *et al.*, 2017).

## ANTECEDENTES

La conservación de elasmobranquios requiere del conocimiento de su hábitat de reproducción, alimentación, rutas migratorias, etc. Se sabe que las demandas energéticas de procesos metabólicos y fisiológicos importantes para tiburones y rayas (e.g. digestión y osmorregulación) fluctúan en respuesta a cambios en factores abióticos como la temperatura y la salinidad. Los movimientos de estos organismos pueden ocurrir en respuesta a un límite fisiológico alcanzado o a una preferencia fisiológica, donde los individuos se mueven para mantenerse dentro de niveles de los factores abióticos que les proporcionan alguna forma de ventaja (Bernal *et al.*, 2012; Schfaal *et al.*, 2014; Williamson *et al.*, 2019).

La temperatura ha sido utilizada ampliamente para describir la preferencia de hábitat de las especies. Sin embargo, dada la complejidad para obtener datos de la temperatura de la columna de agua, la temperatura superficial del mar (TSM) resulta un indicador oceanográfico viable (Klimley, 1988; Jaime-Rivera, 2004).

La mayoría de los organismos que conforman el fitoplancton se caracterizan por tener clorofila-a (Chl-a), motivo por el cual esta variable se utiliza como un indicador o una referencia de la cantidad de alimento disponible en el sistema ya que son la base de la cadena trófica, por lo que de ellos depende la presencia y abundancia de los consumidores primarios, secundarios y terciarios (Sartimbul *et al.*, 2010).

La altura superficial del mar (ASM) es una variable que ha sido poco utilizada para analizar la distribución y abundancia de las especies, sin embargo, en la actualidad son varios los estudios en los que se ha incluido para tratar de explicar el hábitat de los pelágicos mayores debido a que la misma ha sido relacionada no solo con las corrientes oceánicas, sino también con otros procesos oceanográficos como giros de mesoescala (cyclónicos o anticiclónicos), zonas de convergencia o divergencia, así como también con el fenómeno de “El Niño” (Zainuddin *et al.*, 2008, Vögler *et al.*, 2012; Nan-Jay *et al.*, 2014).

Para conocer y entender el comportamiento de las poblaciones de elasmobranquios en relación con las variables ambientales muchos estudios alrededor del mundo se basan en información derivada de satélites en donde la

mayoría de las variables ambientales que utilizan son las antes mencionadas (Williamson *et al.*, 2019). Uno de los estudios se llevó a cabo en el Atlántico Norte por Gaube *et al.* (2018) quienes analizaron el comportamiento de dos tiburones blancos (*Carcharodon carcharias*) en relación con giros de mesoescala y determinaron que estos organismos tienen una preferencia por el interior de los remolinos anticiclónicos, los cuales se caracterizan por temperaturas cálidas. Además, se registraron inmersiones a 1000 m en los giros anticiclónicos, donde probablemente se alimentaban de presas mesopelágicas.

En el sureste de Florida se determinó que los juveniles de tiburón toro (*Carcharhinus leucas*) prefieren aguas con temperaturas mayores a 30 °C y una salinidad entre 7% y 17.5% (Simpfendorfer *et al.*, 2005). Asimismo, para el tiburón azul (*Prionace glauca*) que se distribuye en el noreste del océano Pacífico, se ha determinado que existe un hábitat preferencial diferente para machos y hembras, así como para juveniles y adultos (Vögler *et al.*, 2012).

En el océano Atlántico, López *et al.* (2017), analizaron la abundancia de las poblaciones de tiburón sedoso en relación con factores oceanográficos. Encontraron una relación significativa entre los eventos de surgencia estacional y características de mesoescala con la abundancia de este recurso, sugiriendo una fuerte interacción entre sistemas productivos y la dinámica espacio-temporal de esta especie.

Para *Carcharhinus falciformis*, *C. longimanus*, *Sphyrna lewini* y *S. zygaena* se ha determinado que la TSM es la variable ambiental que más explica la variabilidad de sus capturas en el OPO (Cruz-Cosío, 2018). Para el caso de *C. falciformis*, el autor identificó una zona importante al norte del ecuador, en la cual la especie estuvo presente durante todo el año principalmente en el primer trimestre, registrando además variaciones espaciales. En general, se estableció que *C. falciformis* tiene una preferencia de hábitat en un rango de TSM entre 22° a 27 °C y de 0.07 a 0.3 mg/m<sup>3</sup> de Chl-a.

Por otro lado, Martínez-Rincón (2012) analizó el efecto de la variabilidad ambiental en la distribución de las capturas incidentales de diversos pelágicos mayores en el OPO. Una de las especies analizadas fue el tiburón sedoso. Por medio de modelos aditivos generalizados (GAMs) y árboles de regresión impulsados

(ARI) determinó que la probabilidad de ocurrencia del tiburón sedoso es mayor en ambientes costeros con temperaturas mayores a los 25 °C, así como en zonas de convergencia, durante los meses de enero a mayo y con eventos moderados de La Niña y El Niño. En las predicciones espaciales por medio de los GAMs y el modelo ARI, el autor encontró que existe una franja entre las latitudes 10° y 20° N que podría considerarse importante en la distribución de la especie.

En México, Soriano *et al.* (2006) registraron que durante el fenómeno El Niño 1997-1998, las poblaciones de *C. falciformis*, *S. lewini* y otras especies de tiburones capturadas en el Golfo de Tehuantepec disminuyeron, hecho que se reflejó en una correlación inversa significativa con la TSM mientras que al final del periodo de El Niño e inicios del periodo de La Niña (1998-2000) la diversidad de tiburones aumentó, declinando nuevamente hacia agosto del 2001, aparentemente como un retorno a condiciones previas. Estos patrones sugieren la influencia de dichos fenómenos sobre la diversidad y abundancia de los tiburones en la región.

Los estudios de *C. falciformis* tienen como base la información derivada de sus capturas, ya sea dirigida o incidental, aunque se ha descrito que es la especie de tiburón con mayor captura incidental en la pesquería atunera de cerco a nivel mundial (Amandé *et al.*, 2008).

En el Pacífico ecuatorial, Lennert-Cody *et al.* (2017, 2018, 2019), utilizando información de varios años analizaron la relación entre la distribución y abundancia de *C. falciformis* y los fenómenos oceanográficos. En los dos primeros trabajos utilizaron el Índice Tripolar Indopacífico (TPI por sus siglas en inglés) para analizar el periodo de 1994 a 2016. Este es un índice de la Oscilación Interdecadal del Pacífico (IPO, por sus siglas en inglés) que se basa en la diferencia entre el promedio de las anomalías de la temperatura superficial del mar sobre el Pacífico ecuatorial central y el promedio de estas anomalías en el Pacífico noroccidental y sudoccidental (Henley *et al.*, 2015). Los autores señalan que en la zona oceánica la presencia de tiburones juveniles aumentó un año antes del valor más alto del TPI. Este valor fue registrado durante los dos eventos de El Niño más fuertes (1997-1998 y 2015-2016). Sin embargo, en el área ecuatorial costera se registró un retraso de un año entre el máximo del TPI (1997-1998) y la presencia de los tiburones juveniles (1998-1999).

Hutchinson *et al.* (2019) analizaron el comportamiento de los movimientos horizontales y verticales de los juveniles de tiburón sedoso capturados en el océano Pacífico Oriental. Los autores reportan que los tiburones que estuvieron migrando cerca de la costa pasaron la mayor parte del tiempo en las aguas cálidas y poco profundas de la capa de mezcla, entre los 5 y 10 m de profundidad, habitando también en un rango de temperatura muy estrecho, entre los 26° y 28 °C. Por otro lado, los tiburones que estuvieron en áreas oceánicas pasaron la mayor parte del tiempo en profundidades menores a los 100 m, ocupando un rango de temperatura entre 28° y 30 °C.

Las actividades de muestreo realizadas durante los cruceros de investigación coordinados por el Instituto Nacional de la Pesca a bordo de los barcos palangreros, ha permitido sistematizar las bases de datos con el propósito de realizar análisis apropiados que conduzcan a propuestas de manejo de estos recursos, de conformidad con las normas establecidas en el código de pesca responsable de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), del que México ha sido uno de los principales promotores (Santana-Hernández, 2001).

Es importante resaltar que los datos de capturas de *C. falciformis* a nivel mundial siguen siendo insuficientes, variables y no representativos de los índices de abundancia de esta especie, por lo que las estimaciones de la disminución actual de las poblaciones y la mortalidad por pesca no son confiables y no deben utilizarse como base para la implementación de medidas de manejo (Clarke, 2018).

En la costa del Pacífico mexicano el tiburón sedoso es la especie con mayores volúmenes de captura, siendo Puerto Madero, Chis., donde se registran los valores más altos. De acuerdo con Soriano *et al.* (2006) el tiburón sedoso utiliza la zona comprendida entre Boca del Cielo, Chis., y Salina Cruz, Oax., como un área de crianza. Particularmente en los litorales de Jalisco, Colima y Michoacán *C. falciformis* es la especie que soporta la pesquería de estos puertos con el 88.12% del total de captura de elasmobranquios (Cruz *et al.*, 2011).

## **JUSTIFICACIÓN**

En la costa del Pacífico mexicano, se han realizado diversos análisis sobre la distribución y abundancia de algunas especies de pelágicos mayores, sus posibles interacciones con otras especies, así como su relación con los factores ambientales más significativos. A pesar del predominio del tiburón sedoso en las capturas de aguas tropicales y de su importancia comercial, el conocimiento que se tiene acerca de la especie es limitado, por lo que es necesario incrementar el esfuerzo de investigación, con el fin de contar con mejores herramientas para un manejo y conservación óptimos.

Uno de los aspectos que es importante considerar para su manejo es el hábitat preferencial que presentan las especies de pelágicos mayores, ya que se ha registrado que algunos organismos, dependiendo de la talla y sexo pueden presentar preferencia por ciertos rangos de temperaturas y otras variables ambientales, lo que hace que sean más abundantes en una zona u otra. Es decir, las anomalías que ocurren en las variables ambientales oceánicas podrían causar cambios en la distribución y abundancia de estas especies y consecuentemente en el equilibrio del ecosistema marino. Por lo que, identificar los hábitats de las especies marinas migratorias es de gran importancia tanto para las especies individuales como para el establecimiento de planes de manejo.

Por todo lo anterior, el presente estudio pretende determinar la distribución espacio-temporal y preferencias ambientales del tiburón sedoso capturado por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo, Colima en el Pacífico Central Mexicano, conocimiento que puede ayudar a determinar si las variables ambientales tienen un efecto en la variabilidad espacio-temporal de las capturas, tallas y sexo de la especie, lo cual puede ser de gran ayuda en el establecimiento de estrategias de manejo de estos organismos.

## **HIPÓTESIS**

Las condiciones anómalas de la temperatura superficial del mar (TSM), concentración de clorofila-*a* (CChl-*a*) y la altura superficial del mar (ASM) del Pacífico Central Mexicano modifican la distribución del tiburón sedoso tanto en escala espacial como temporal, siendo el efecto diferencial en tallas y sexos.

## **OBJETIVOS**

Analizar la distribución espacio-temporal, preferencias ambientales y estructura de tallas del tiburón sedoso capturado por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo, Colima en el Pacífico Central Mexicano.

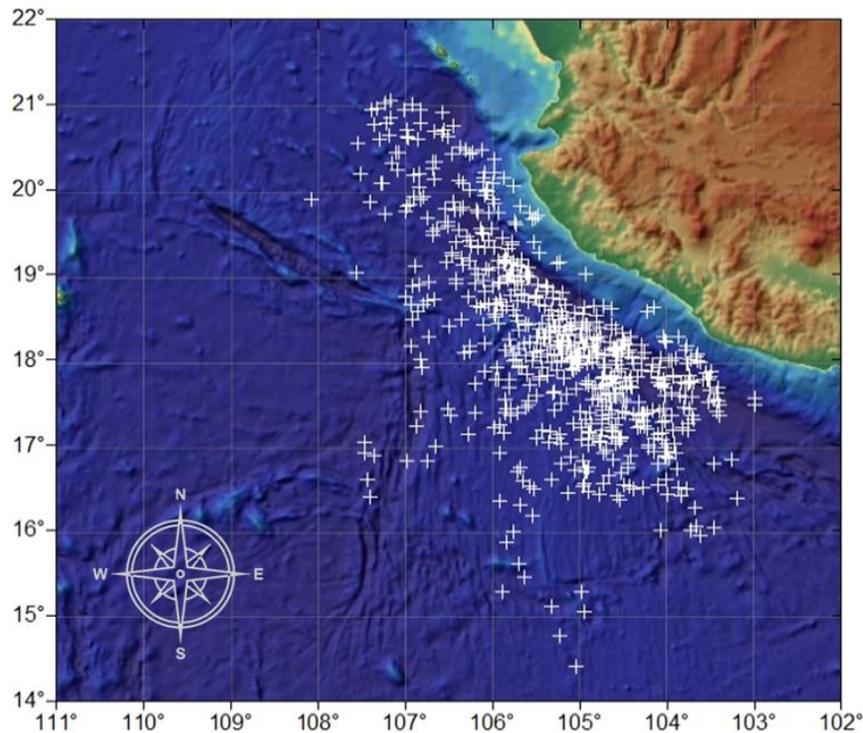
### **Objetivos específicos:**

1. Analizar la variabilidad interanual e intraanual así como la distribución espacio-temporal de los organismos capturados por tallas y sexos.
2. Caracterizar el área de operación de la flota con base en las condiciones ambientales y la batimetría.
3. Estimar la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) y evaluar su relación con las variables ambientales.
4. Modelar el hábitat del tiburón sedoso mediante la aplicación de un modelo aditivo generalizado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

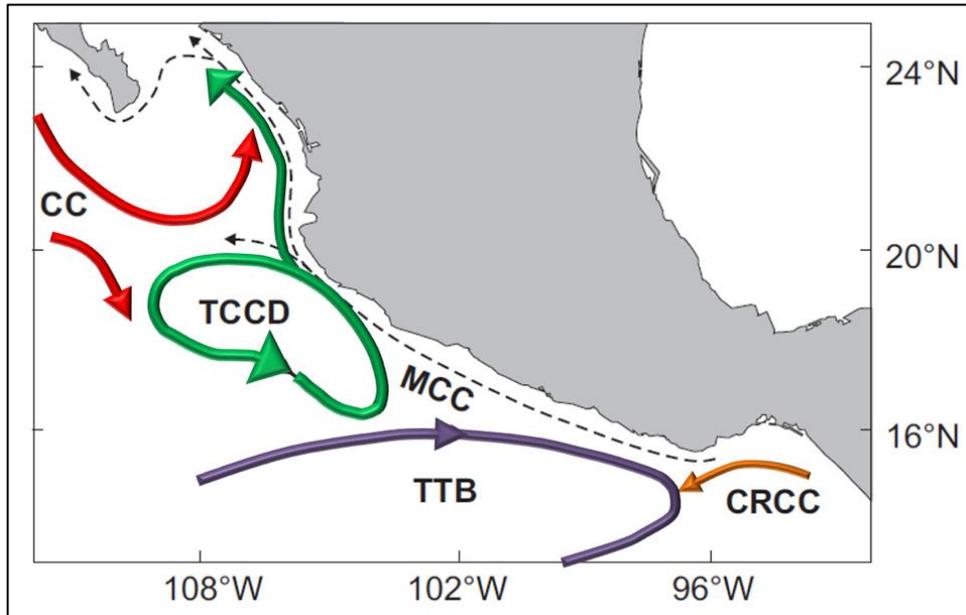
El área de operación de la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo está ubicada en el PCM (Fig. 2), la cual abarca las aguas costeras de los estados de Jalisco, Colima y Michoacán. Presenta una plataforma estrecha que generalmente tiene de 10 a 15 km de ancho desde la costa y que cae abruptamente a profundidades de hasta 3,000 m (Wilkinson *et al.*, 2009).



**Figura 2.** Posición geográfica de los lances realizados (cruces blancas) por la flota palangrera de mediana altura que operó en el Puerto de Manzanillo, Col. durante 2003-2017.

El PCM es una zona de confluencia de dos sistemas que rigen la circulación oceánica: la influencia de la Corriente de California que fluye hacia el sur durante invierno y primavera, y la influencia de agua tropical que llega a formar la Corriente Costera Mexicana, la cual fluye al norte durante verano y otoño (Fig. 3) (Filonov, 2000). Ambas hacen que esta región sea considerada como una zona de transición donde se generan distintas estructuras dinámicas, que se originan por las

variaciones en la estructura termohalina de la columna de agua. (Wilkinson *et al.*, 2009; Portela *et al.*, 2016).



**Figura 3.** Corrientes que convergen en el Pacífico Central Mexicano. (CRCC: Corriente Costera de Costa Rica; TTB: Termoclina de la Cuenca de Tehuantepec; MCC: Corriente Costera Mexicana; TCCD: Termoclina del Domo de Cabo Corrientes; CC: Corriente de California). Tomado de: Gómez-Valdivia *et al.*, 2015.

Las masas de aguas que predominan en esta región son: Agua de la Corriente de California, Agua Tropical Superficial que es transportada por la Corriente Costera Mexicana originada por la Corriente Costera de Costa Rica y Agua del Golfo de California. Por debajo de las masas de agua anteriores se encuentran el Agua Subtropical Subsuperficial, el Agua Intermedia del Pacífico y el Agua Profunda del Pacífico (Lavín *et al.*, 2009; Pantoja *et al.*, 2012; Portela *et al.*, 2016). En esta área también se encuentran la Termoclina del Domo de Tehuantepec y la Termoclina del Domo de Cabo Corrientes las cuales tienen efectos sobre la Corriente Costera de Costa Rica y la Corriente Costera Mexicana durante su trayecto (Gómez-Valdivia *et al.*, 2015). La confluencia superficial de estas masas de agua convierte al PCM en una región compleja, una zona de generación de remolinos y filamentos de mesoescala (Wilkinson *et al.*, 2009; Pantoja *et al.*, 2012).

La temperatura registrada para esta área fluctúa entre 25 y 28 °C en invierno y un promedio de 29.5 °C en verano. La termoclina de esta área se mantiene entre los

20 y 40 m de profundidad, volviéndose más somera de norte a sur (Wilkinson *et al.*, 2009; CONANP, 2012; Portela *et al.*, 2016). Los vientos en el PCM son principalmente del noroeste durante gran parte del año producidos por un transporte de Ekman y llegan a esa zona por el direccionamiento topográfico del continente, y son precisamente estos vientos los que mantienen una termoclina somera la mayor parte del año. Durante el verano, la componente meridional del esfuerzo del viento se debilita en la entrada al Golfo de California, e incluso llega a cambiar de dirección (Kessler, 2006; Lavín *et al.*, 2009; Pantoja *et al.*, 2012).

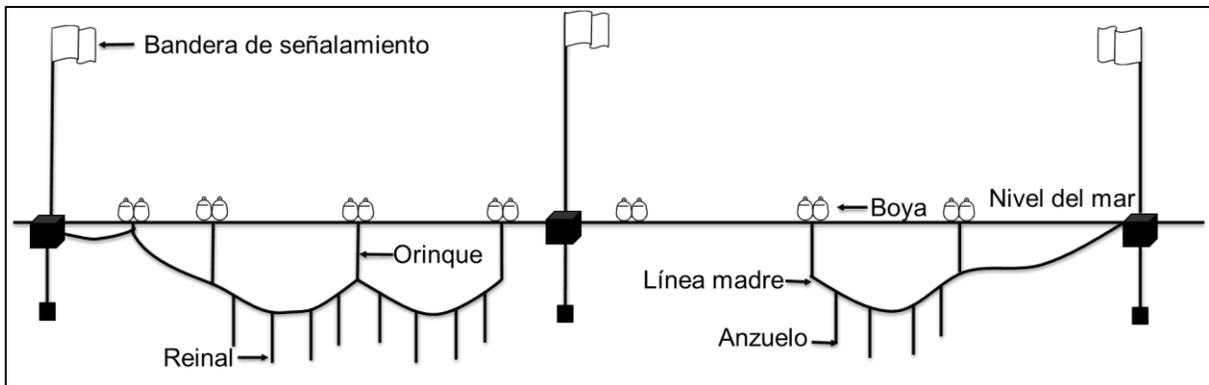
Esta área es la más grande del país con el 33% de la Zona Económica Exclusiva Mexicana (ZEEM), considerada de las más importantes a nivel mundial en términos de biodiversidad, debido a sus ecosistemas con una elevada productividad y sus rasgos oceanográficos en el mar profundo (CONANP, 2012).

#### **Base de datos:**

##### *Información pesquera*

La información corresponde a la base de datos generada por el programa de monitoreo llevado a cabo por el Centro Regional de Investigación Acuícola y Pesquera (CRIAP-Manzanillo) – INAPESCA a bordo de barcos palangreros de mediana altura. Estas embarcaciones tienen unas dimensiones de eslora de entre 9 a 14 m, una manga (ancho mayor de la embarcación) de 3 a 4 m, una capacidad de bodega de 4 a 5 t y tienen una autonomía máxima de 10 a 12 días de navegación.

El arte de pesca utilizado por la flota es el palangre de superficie, que consiste en una línea principal o línea madre que mide entre 22.22-38.89 km, de donde penden líneas secundarias llamadas reinales, que se distribuyen en 4-5 secciones, cuyos límites son dos líneas verticales llamadas orinques que están sostenidos por boyas (Cruz *et al.*, 2011, Santana-Hernández *et al.*, 2001; Fig. 4). La profundidad del palangre de superficie es de aproximadamente 16-18 m. El número de anzuelos utilizados va de 300 a 600 por lance.



**Figura 4.** Palangre de superficie utilizado por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo en el Pacífico Central Mexicano.

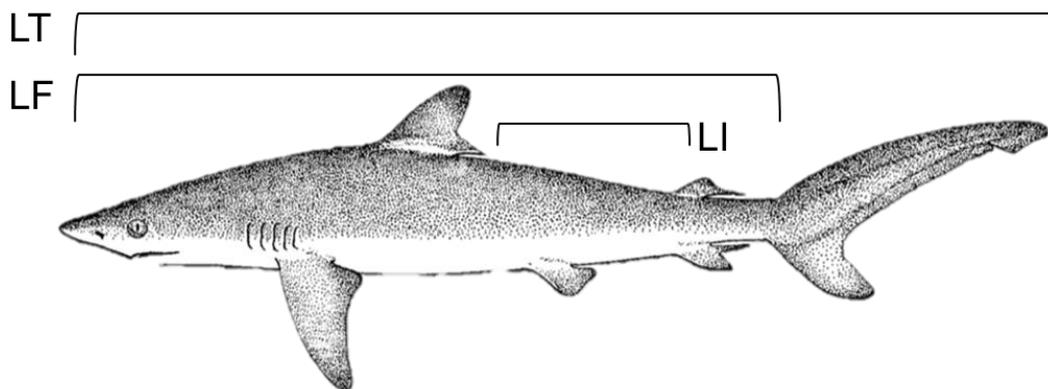
La base de datos consiste en registros de capturas de *C. falciformis* realizadas por la flota palangrera de mediana altura que operó en el PCM durante el periodo 2003-2017, teniendo como base el Puerto de Manzanillo. En cada registro se detalla la fecha, posición geográfica de cada lance (latitud-longitud), la longitud furcal (LF en cm) y sexo de cada organismo capturado. Además, se cuenta con información de captura y esfuerzo (número de anzuelos) mensual.

*Información ambiental:*

Para realizar la caracterización ambiental del área de operación de la flota y el posterior análisis de la relación entre la distribución y abundancia de los organismos con las variables ambientales, se utilizó información ambiental derivada de imágenes de satélite. La TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ) y CChl-a ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) se obtuvieron a partir de los sensores MODIS-aqua con una resolución de 4 km para el periodo 2003-2017 (<https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/erdMH1sstmday.html>), mientras que la información de ASM se obtuvo del sensor Copernicus Sentinel-3 con una resolución de 9 km (<https://resources.marine.copernicus.eu>). Además, se obtuvo información de la batimetría del área de estudio con una resolución de 1.8 km ([http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/data/bedrock/grid\\_registered/binary/etopo1\\_bed\\_g\\_f4.zip](http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/data/bedrock/grid_registered/binary/etopo1_bed_g_f4.zip)).

## Análisis estadísticos

*Análisis de tallas de los organismos capturados.*



**Figura 5.** Esquema de las longitudes del tiburón sedoso. LT= Longitud Total; LF = Longitud Furcal; LI = Longitud Interdorsal.

Debido a que se ha recomendado una estandarización de los métodos de medición para *C. falciformis* que permitan comparar las poblaciones en todo el mundo (Santana-Hernández *et al.*, 2014), la longitud furcal se transformó a longitud total, utilizando las ecuaciones propuestas por Santana-Hernández *et al.* (2014), sustituyendo el valor de la longitud furcal de la ecuación 1 para obtener la longitud interdorsal y esta a su vez sustituirla en la ecuación 2 para obtener la longitud total:

$$LI = \frac{LF - 6.561}{3.39} \dots\dots\dots (1) \quad LT = 3.974LI + 8.277 \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

LI = Longitud Interdorsal

LT = Longitud Total

LF = Longitud Furcal

Una vez obtenidas las longitudes totales y tomando en cuenta los trabajos de Hoyos-Padilla *et al.* (2011), Galván-Tirado *et al.* (2015) y Alejo-Plata *et al.* (2016), los individuos de tiburón sedoso se clasificaron de la siguiente manera: neonatos (LT

≥83 cm), juveniles (83 < LT ≤180 cm) y adultos (LT >180 cm), mismos que se representaron en un histograma.

Con la finalidad de tener una representación gráfica que reflejara en mayor medida la variabilidad interanual e intraanual de las tallas de tiburón sedoso se decidió representarlas con un gráfico de caja con la media y el error estándar. Para realizar los análisis estadísticos y tomando en cuenta los análisis de normalidad y homocedasticidad realizados previamente, se utilizó estadística no paramétrica. Todos los análisis se llevaron a cabo con paquetes del lenguaje de programación R (R Core Team, 2019).

Asimismo, se elaboró un histograma de frecuencias de machos y hembras y se determinó la proporción sexual. Para evaluar si existían diferencias significativas en la proporción sexual se aplicó una prueba de Chi-cuadrada ( $\chi^2$ ).

#### *Análisis de la captura de los organismos*

Para representar la captura promedio mensual por sexos se realizaron gráficos de isolíneas utilizando el software Golden Software Surfer (versión 10). En estos gráficos se combina para toda el área de estudio el año, mes y los valores promedio mensuales para cada sexo.

Por otro lado, para determinar la distribución espacial y temporal de las capturas de los organismos estas se representaron por medio de cuadrantes de medio grado, elaborando mapas utilizando el paquete “ggplot2” (Wickham, H., 2016).

#### *Isolíneas de la variabilidad inter e intraanual*

Para analizar la variabilidad inter e intraanual de las variables ambientales se aplicaron análisis de varianza y se crearon gráficos de caja. Con la finalidad de mostrar visualmente esta variabilidad, se elaboraron gráficos de isolíneas mediante el uso del programa Surfer. Al igual que en los gráficos de isolíneas realizados para machos y hembras, se combinaron para toda el área de estudio el año, el mes y los valores promedio mensuales de cada variable.

### *Cálculo de las anomalías*

Las anomalías de TSM, CChI-a y ASM, fueron estimadas eliminando la estacionalidad, es decir calculando primero el promedio mensual de las variables analizadas para todo el periodo de estudio mediante la siguiente ecuación:

$$An = \frac{Y_i - \bar{Y}_{2003-2017}}{S_{2003-2017}}$$

Donde:

An= Anomalía promedio mensual

$Y_i$ = CPUE, TSM, ASM o CChI-a promedio mensual del i-ésimo mes

$\bar{Y}_{2003-2017}$ = CPUE, TSM, ASM o CChI-a promedio mensual para el año tipo

$S_{2003-2017}$ = desviación estándar mensual para el año tipo

Una vez obtenidas las anomalías, se suavizaron mediante la aplicación de un promedio móvil simple de seis meses. Para establecer la relación entre las variables ambientales se utilizaron métodos de análisis de correlación cruzada.

Para poder caracterizar la batimetría del área de estudio se obtuvieron los valores promedio para cuadrantes de medio grado y se representó gráficamente utilizando el software Golden Software Surfer por medio de la interpolación Kriging. Con la finalidad de representar gráficamente la relación de la batimetría del área de estudio con la captura del tiburón sedoso, se realizó un gráfico de puntos utilizando los valores de captura promedio por cuadrante.

### *Relación del recurso con el medio ambiente*

A partir de la información de captura y esfuerzo mensual, se estimó la Captura Por Unidad de Esfuerzo (CPUE) expresada en número de organismos por cada 1000 anzuelos como un estimador de la abundancia relativa. Adicionalmente, se estimaron las anomalías de la CPUE utilizando la ecuación anteriormente descrita para las variables ambientales. De igual manera, estas anomalías se suavizaron mediante la aplicación de la técnica de promedios móviles simple de seis meses.

Para establecer la relación entre las variables ambientales y la CPUE, se analizaron las series de tiempo de las anomalías, utilizando métodos de análisis de correlación simple de Pearson y correlación cruzada. Los valores de R que resultaron cercanos a 0 se interpretaron como una relación nula entre las variables, mientras que los valores cercanos a 1 o -1 indicaron la existencia de una relación (positiva o negativa) entre las variables.

### *Modelación del hábitat*

Con la finalidad de detectar si existe un efecto de las variables ambientales, espaciales y temporales en las capturas del tiburón sedoso en el PCM se construyó un modelo estadístico. Para ello se utilizaron los Modelos Aditivos Generalizados (GAMs, por sus siglas en inglés), los cuales trabajan con funciones suavizadoras no paramétricas, donde la relación entre la variable de respuesta y las variables predictivas puede ser lineal o no lineal (Zuur *et al.*, 2009).

Este modelo estadístico permitió modelar la captura de la especie (variable respuesta) a partir de las variables predictivas: las variables ambientales (TSM, CChl-a, ASM, batimetría), las variables espaciales (longitud y latitud) y variables temporales (mes y año). Debido a que la CPUE no se encontraba georreferenciada, la variable de respuesta utilizada fue el número de organismos capturados por cuadrante de medio grado.

Para la construcción del modelo se usaron todas las variables predictivas y en el caso de las variables espaciales fueron utilizadas en interacción para poder evaluar el efecto del área de pesca. Los GAMs pueden trabajar con diferentes familias de distribución dependiendo del tipo de datos que se utilice. En este caso, después de que los datos de captura se transformaron logarítmicamente, la distribución de las frecuencias de los datos correspondió al tipo normal o Gaussiana, por lo tanto, se utilizó este tipo de distribución de datos en la construcción de los modelos.

Todos los GAMs fueron ajustados utilizando el paquete “mgcv” (Wood, 2017) del lenguaje de programación R (versión 3.6.3) y se hizo de la siguiente manera:

$$\log(\text{captura}) = f1(TSM_i) + f2(CChla_i) + f3(ASM_i) + (Año_i) + (Mes_i) \\ + f4(Longitud_i, Latitud_i)$$

Donde *captura* es la variable respuesta y  $f_i$  son las funciones suavizadoras. El año y el mes se utilizaron como factores. En la modelación estadística el proceso de selección del mejor modelo fue mediante la incorporación de variables, iniciando un modelo con solo una variable predictiva y posteriormente se fueron adicionando otras variables. Se eligió el mejor modelo de acuerdo con los siguientes criterios: que la contribución de todas las variables predictivas fueran estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) para el modelo, que éste tuviera el valor más bajo del criterio de información de Akaike (AIC) así como el mayor porcentaje de devianza explicada.

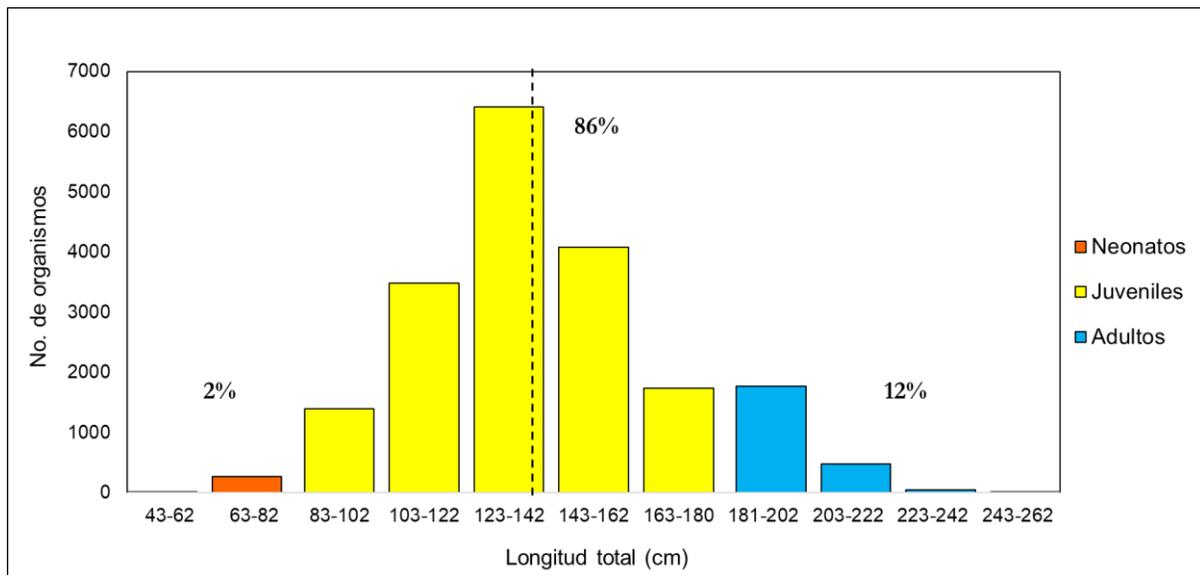
#### *Predicción espacial*

Una vez definido el modelo y con ayuda de este se llevó a cabo la predicción espacial de la captura del tiburón sedoso en el PCM.

## RESULTADOS

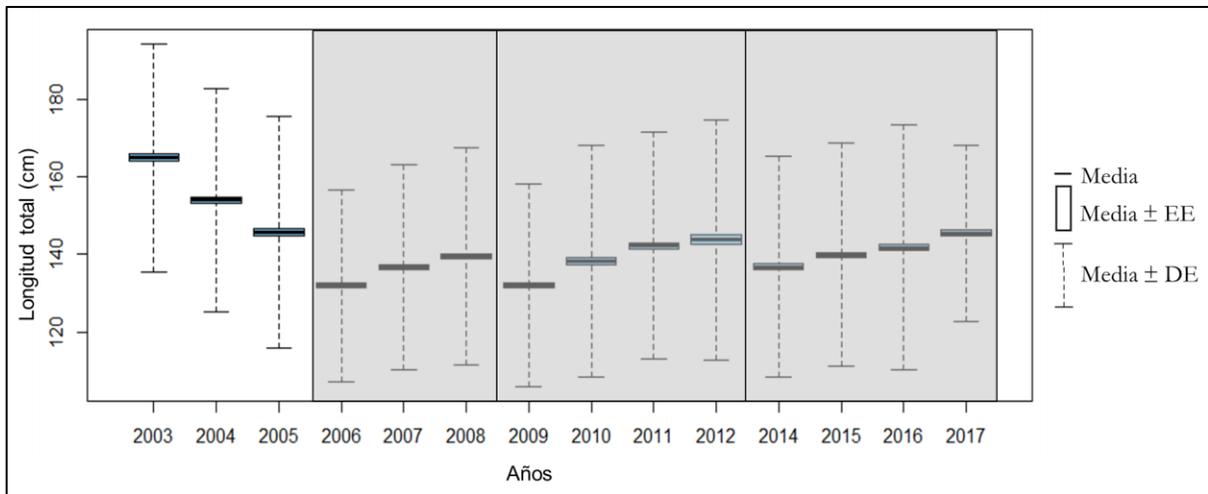
### Análisis de tallas de los organismos capturados

Durante el periodo de 2003 al 2017, se capturaron un total de 19,672 tiburones, de los cuales 274 fueron neonatos (2%), mientras que la mayor proporción fueron de organismos juveniles con un total de 17,106 tiburones (86%). Los adultos de tiburón sedoso solo representaron el 12%, con un total de 2,292 organismos. La LT promedio fue de 140.83 cm con una mayor presencia de organismos juveniles (Fig. 5).



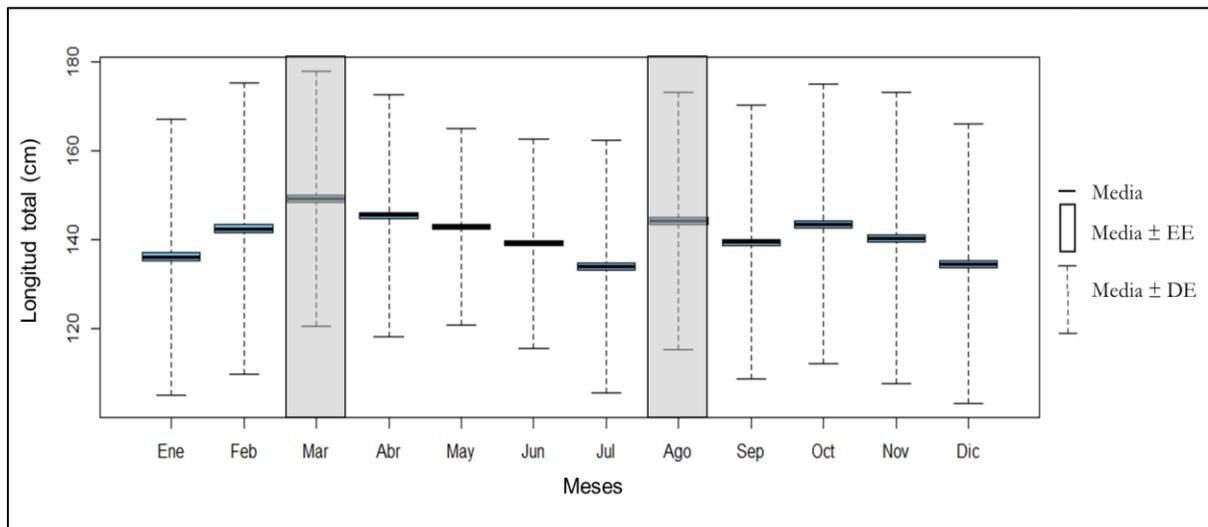
**Figura 6.** Frecuencia del número de organismos de tiburón sedoso capturados en el Pacífico Central Mexicano en el periodo 2003 al 2017 por intervalo de clase de longitud total (LT): neonatos ( $LT \leq 83$  cm LT), juveniles ( $83 > LT \leq 180$  cm LT) y adultos ( $LT > 180$  cm). La línea punteada indica la LT promedio encontrada en este estudio.

El análisis de variabilidad interanual de las tallas promedio de los organismos resultó ser significativo ( $H_{(13,19558)} = 1255.1$   $p < 0.05$ ). En la figura 7 se observa una marcada disminución de la LT de los organismos del 2003 a 2006. Posteriormente la LT promedio se mantuvo por debajo de la encontrada en 2003. Cabe mencionar que se observa cierto patrón de aumento-disminución de tallas cada tres-cuatro años.



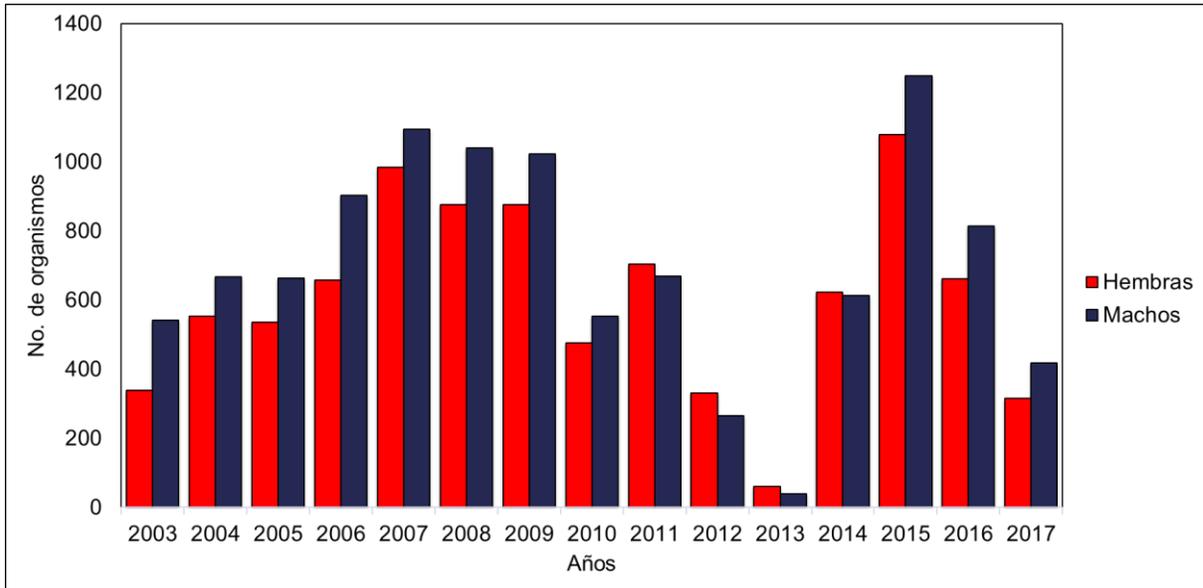
**Figura 7.** Variabilidad interanual de la longitud total de los organismos de tiburón sedoso capturados por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo en el Pacífico Central Mexicano, durante el periodo 2003-2017. Los cuadros grises señalan el patrón de aumento de tallas encontrado durante el periodo de estudio. Media = Media; Media  $\pm$  EE = Media  $\pm$  Error Estándar; Media  $\pm$  DE = Media  $\pm$  Desviación Estándar.

De igual manera y para un año promedio (2003-2017) se encontró una variabilidad intraanual significativa ( $H_{(13,19660)} = 491.63$ ,  $p < 0.05$ ), donde las tallas mayores se registraron en los meses de marzo y agosto. El mes con las tallas promedio menores fue julio (Fig. 8).



**Figura 8.** Variabilidad intraanual para un año promedio (2003-2017) de la longitud total (LT) de tiburón sedoso capturados por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo en el Pacífico Central Mexicano. Los cuadros grises señalan los meses donde se encontraron las mayores tallas promedio. Media = Media; Media  $\pm$  EE = Media  $\pm$  Error Estándar; Media  $\pm$  DE = Media  $\pm$  Desviación Estándar.

En cuanto a los sexos, para todo el periodo de estudio, el 46% de los organismos fueron hembras y el 54% machos (Fig. 6). Se obtuvo una proporción sexual de 0.85 hembras por cada macho con diferencias significativas de la proporción 1:1 ( $p < 0.05$ ).

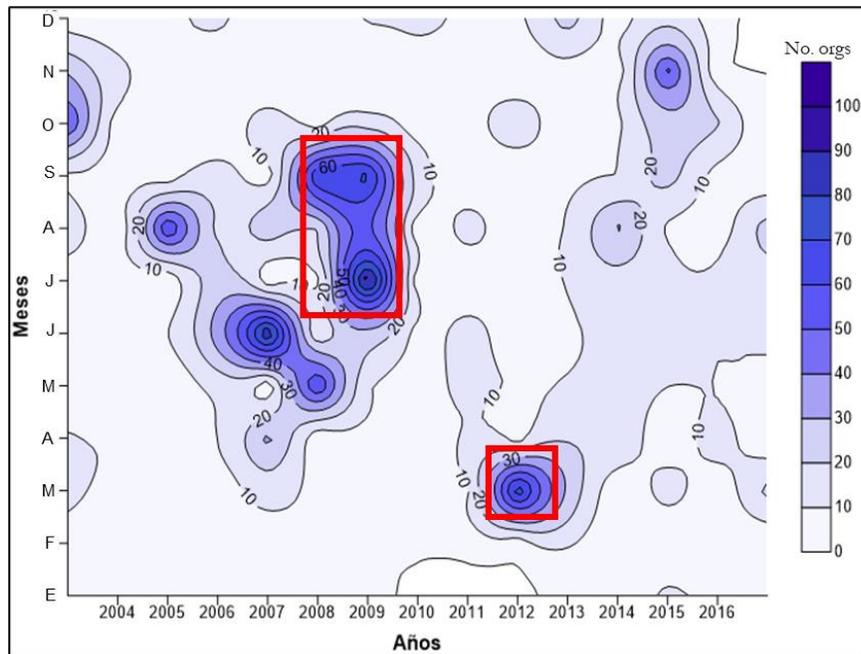


**Figura 9.** Frecuencia del número de organismos correspondientes a machos y hembras que fueron capturados anualmente por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo durante el periodo 2003-2017 en el Pacífico Central Mexicano.

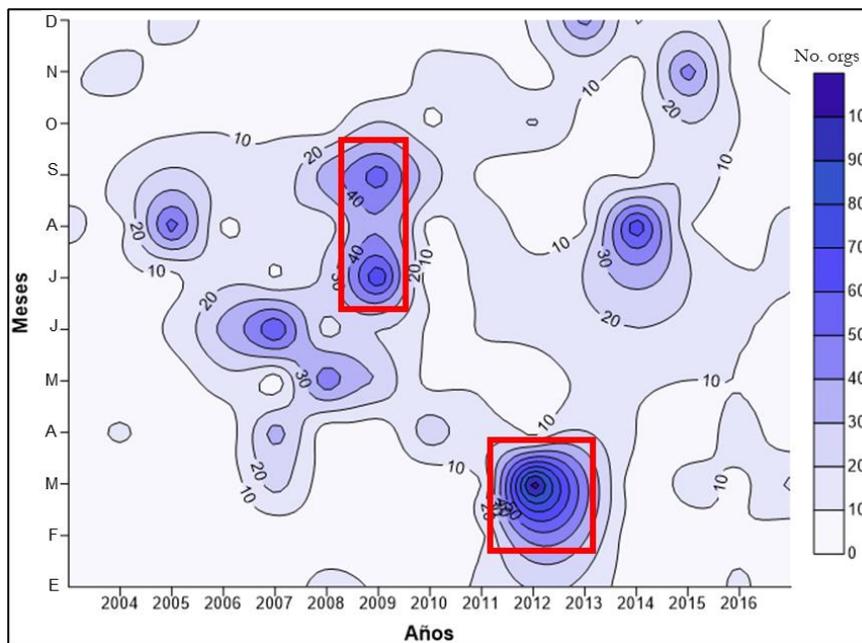
### **Análisis de la captura de los organismos.**

El gráfico de isolíneas realizado para machos (Fig. 9) muestra que los meses de mayo a octubre fueron los de mayor captura promedio en el PCM durante el periodo de 2006 al 2009. De 2011 a 2014 las capturas mayores promedio se registraron de febrero a abril.

Para el caso de las hembras (Fig. 10), se muestran dos periodos con mayor captura: la estación de frío que abarca los meses de febrero a abril en los años de 2011 a 2013 y otro menor a este en los meses de junio a septiembre durante 2008-2010.



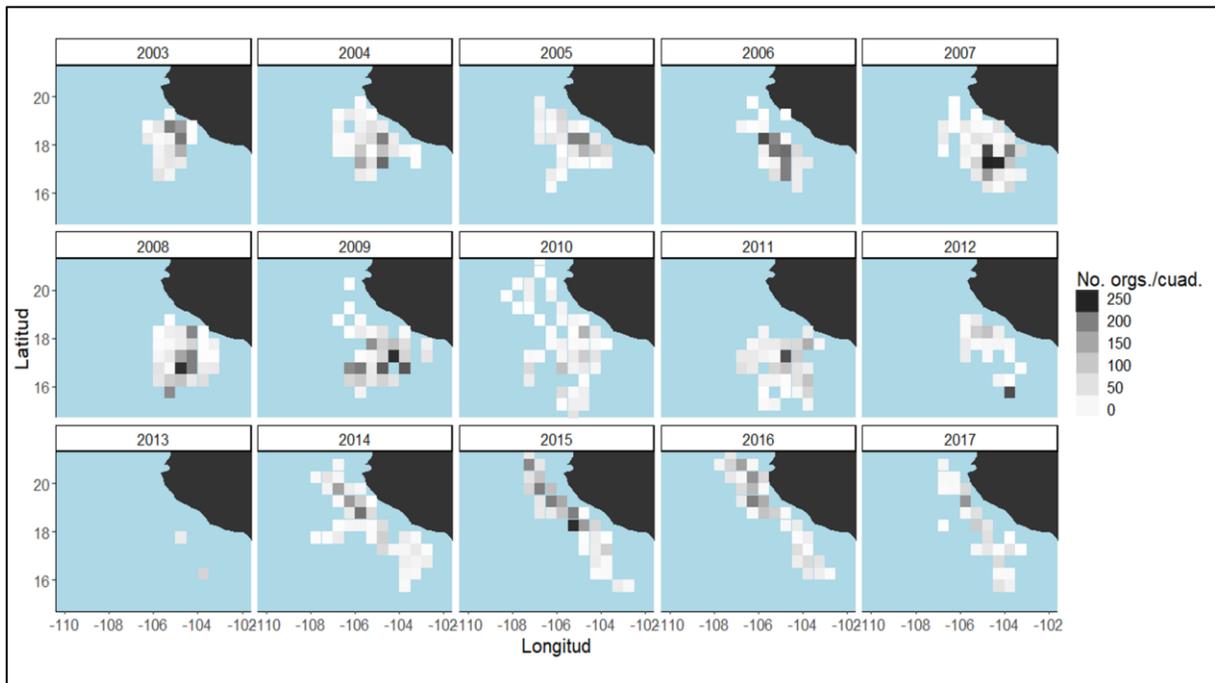
**Figura 10.** Isolíneas de captura promedio mensual para los machos de tiburón sedoso capturados por la flota de mediana altura en el Pacífico Central Mexicano durante el periodo de 2003-2017. Los cuadros rojos señalan los periodos donde hubo mayor número de organismos capturados por cuadrante.



**Figura 11.** Isolíneas de captura promedio mensual para las hembras de tiburón sedoso capturados por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo en el Pacífico Central Mexicano durante el periodo de 2003-2017. Los cuadros rojos señalan los periodos donde hubo mayor captura por cuadrante.

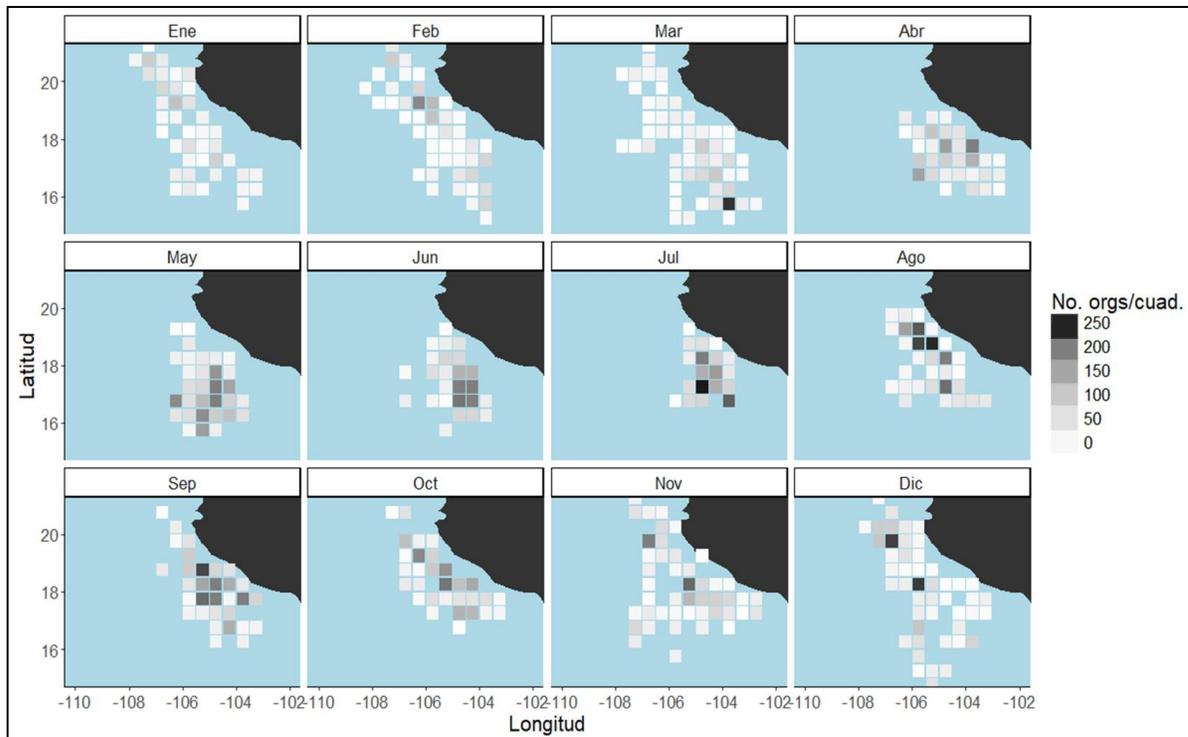
En la Figura 11 se muestra la distribución interanual de las capturas en cuadrantes de  $0.5^\circ$ , donde es posible observar un patrón de distribución agregado en el periodo del 2003 al 2012. Sin embargo, durante el periodo de 2014-2017 la distribución de los organismos se extendió de forma paralela a la costa desde la latitud  $16^\circ$  N hasta la  $22^\circ$  N.

Los años donde hubo mayor número de organismos capturados fueron 2007 y 2015. Cabe resaltar que durante el análisis exploratorio no se encontró algún patrón diferencial de distribución entre tallas y sexos (Anexo 1, 2 y 3).



**Figura 12.** Distribución interanual en cuadrantes de  $0.5^\circ$  de los tiburones sedosos capturados por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo en el Pacífico Central Mexicano durante el periodo 2003-2017.

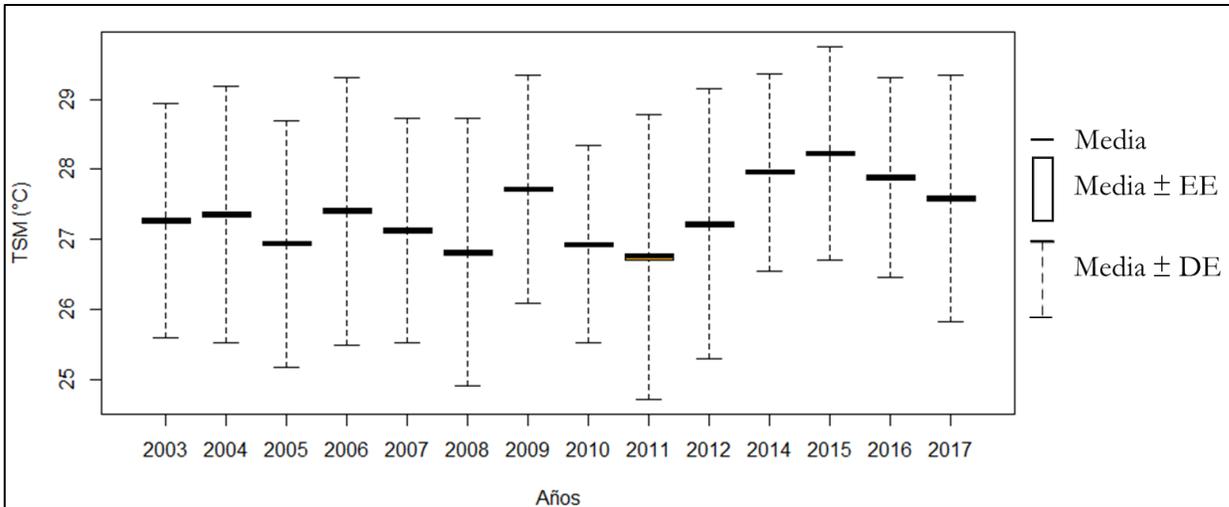
Para el año tipo promedio, la distribución intraanual fue homogénea en el PCM de diciembre a marzo, mientras que durante los meses de abril a octubre los organismos estuvieron agregados principalmente frente a la costa de Manzanillo. Se registraron capturas mayores en los meses de mayo y septiembre (Fig. 12).



**Figura 13.** Distribución intraanual de los tiburones sedosos capturados por la flota palangrera de mediana altura de Manzanillo en el Pacífico Central Mexicano durante un año tipo promedio (2003-2017).

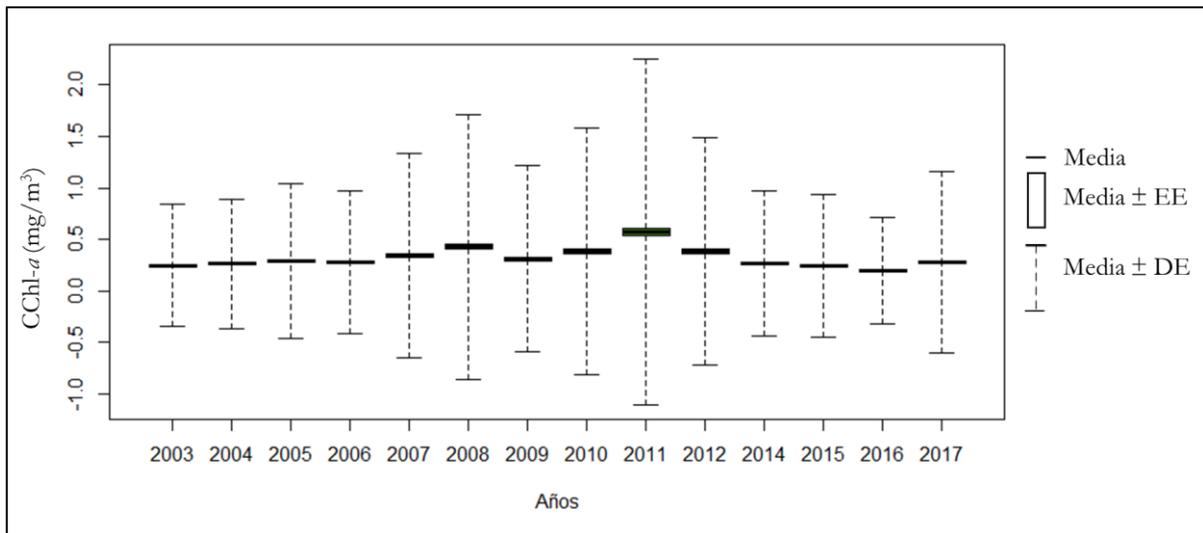
### **Caracterización ambiental del área de estudio**

Para caracterizar el área de estudio se utilizaron tres variables ambientales: la TSM, CChl-*a* y la ASM. La TSM presentó una variabilidad significativa entre años ( $H_{(13, 40129)}=47.610$ ,  $p<0.05$ ) con un marcado aumento durante el periodo 2014-2016, (Fig. 13).

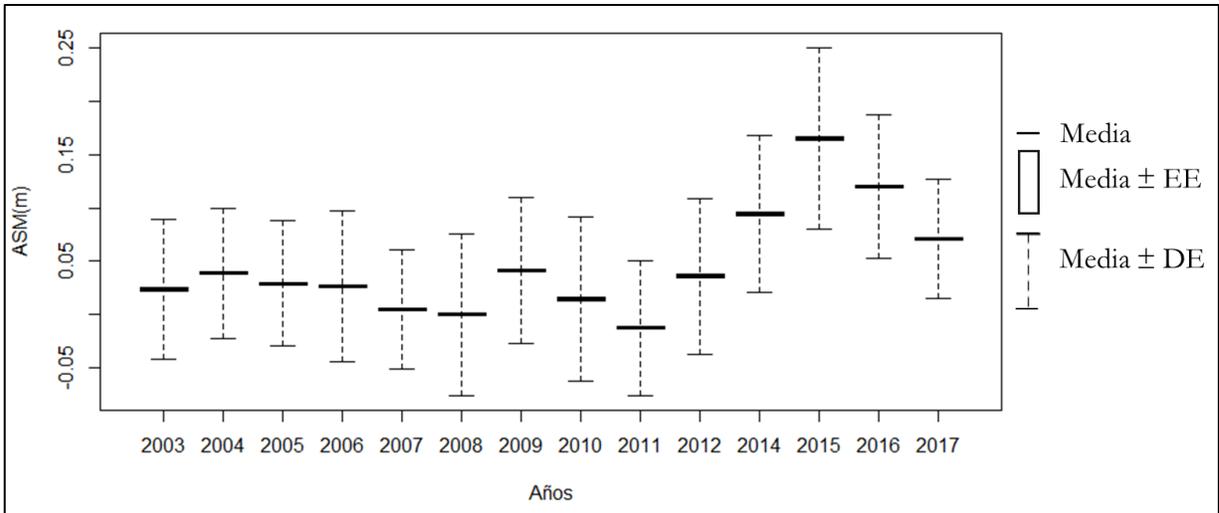


**Figura 14.** Variabilidad interanual de la temperatura superficial del mar (TSM) del Pacífico Central Mexicano durante el periodo 2003-2017.

La CChl-*a* presentó una variabilidad interanual significativa ( $H_{(13,41917)}=70.01$ ,  $p<0.05$ ) con valores altos en los años 2010 y 2011, mientras que en el periodo 2015-2016 se observó una disminución de los valores promedio (Fig. 14). Asimismo, la variabilidad interanual de la ASM fue significativa ( $H_{(13, 41818)}=211.85$ ,  $p<0.05$ ), registrando valores por debajo del promedio durante el periodo 2004-2008, y por arriba del mismo en el periodo 2012-2015 (Fig. 15).

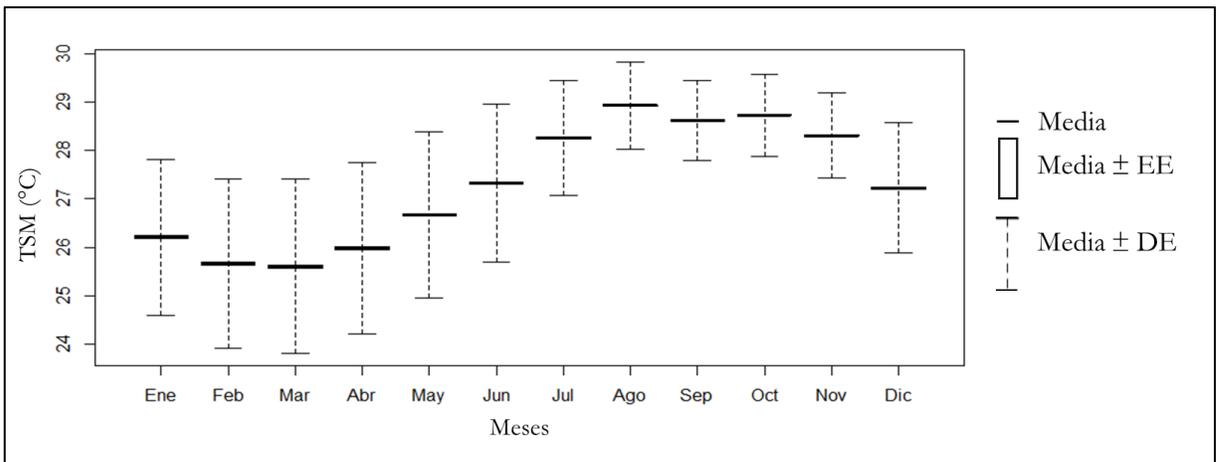


**Figura 15.** Variabilidad interanual de la concentración de clorofila a (CChl-*a*) en el Pacífico Central Mexicano en el periodo 2003-2017.

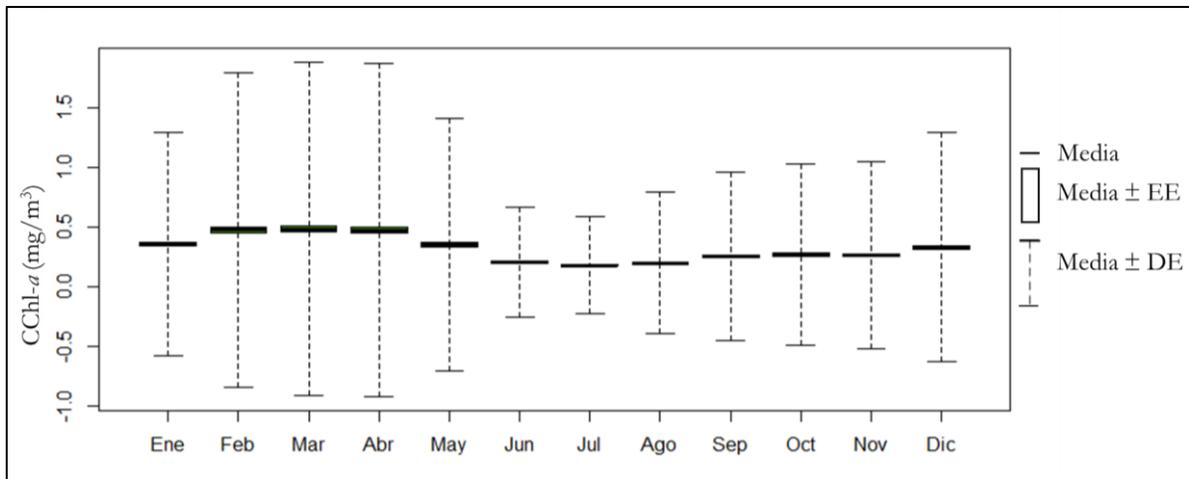


**Figura 16.** Variabilidad interanual de la altura superficial del mar (ASM) en Pacífico Central Mexicano en el periodo 2003-2017.

Para el año tipo promedio, la TSM registró un aumento gradual de la temperatura a partir de marzo hasta llegar a su máximo en el mes de agosto, para posteriormente disminuir (Fig. 16). La variabilidad intraanual fue significativa ( $H_{(11, 40129)}=605.88$ ,  $p<0.05$ ). Por su parte la CChl-*a* se mantuvo en el valor promedio durante la mayor parte del año, a excepción de febrero, marzo y abril, donde los valores fueron significativamente mayores ( $H_{(11, 41917)}=150.52$ ,  $p<0.05$ ; Fig. 17).

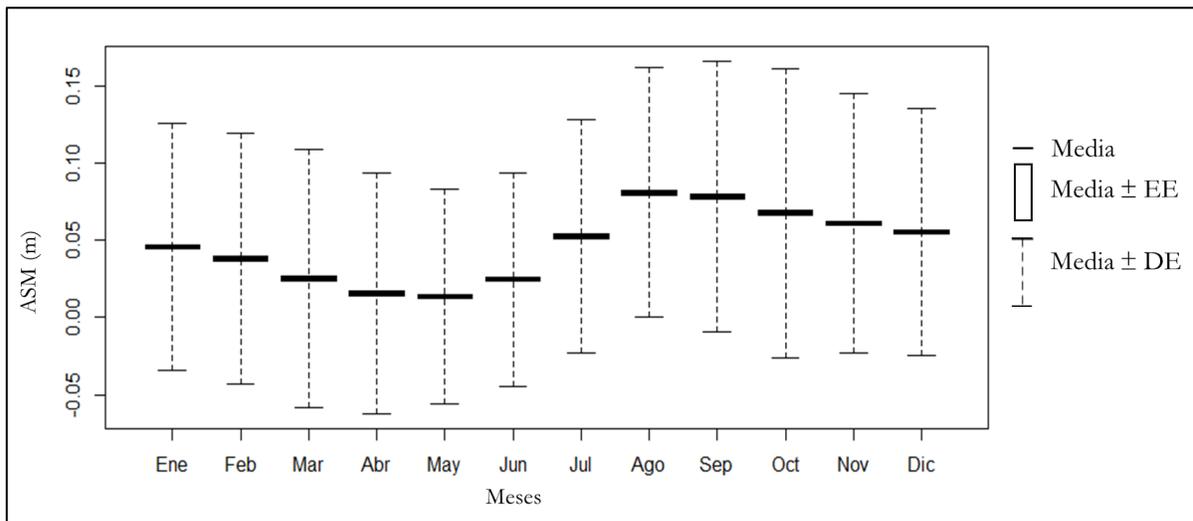


**Figura 17.** Variabilidad intraanual de la temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico Central Mexicano para un año tipo promedio (2003-2017).



**Figura 18.** Variabilidad intraanual de la concentración de clorofila (CChl-a) en el Pacífico Central Mexicano para un año tipo promedio (2003-2017).

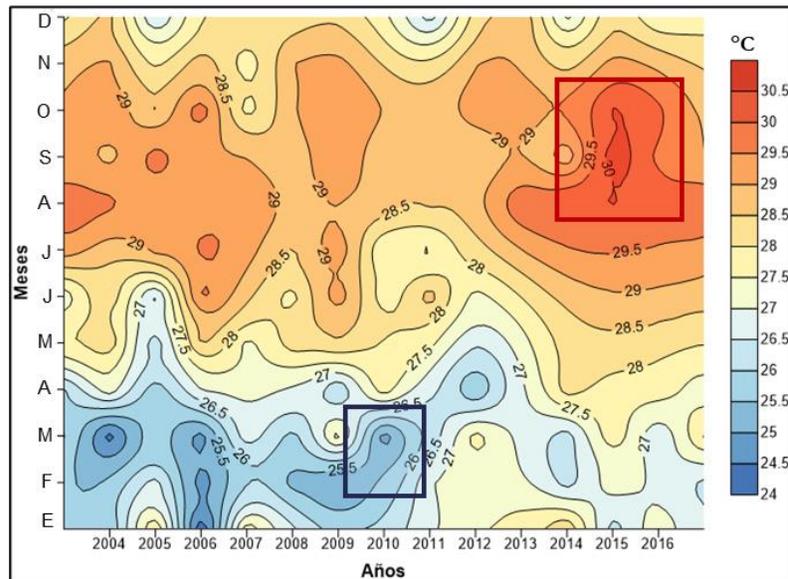
La ASM disminuyó durante los primeros meses del año, para posteriormente registrar valores altos durante los meses de agosto y septiembre, con una variabilidad intraanual significativa ( $H_{(11, 41818)}=332.98, p<0.05$ ; Fig. 18).



**Figura 19.** Variabilidad intraanual de la altura superficial del mar (ASM) del Pacífico Central Mexicano para un año tipo promedio (2003-2017).

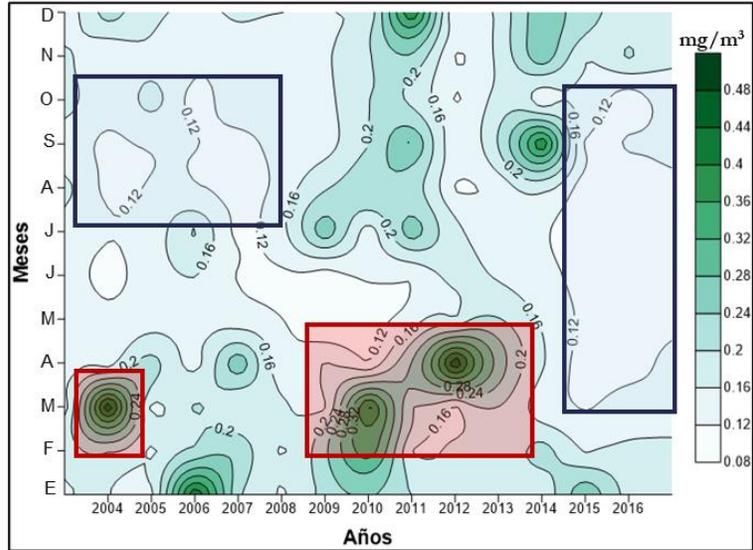
Para el análisis de las variables ambientales del PCM se realizaron isolíneas de variabilidad promedio mensual a lo largo del periodo de estudio para la TSM, CChl-a y ASM. Para el primer caso, las temperaturas más bajas registradas fueron durante los meses de enero, febrero y marzo durante el año 2010 con un promedio

de 24.5 °C. Asimismo, la temperatura más alta se registró en los meses de agosto, septiembre y octubre durante el año 2015 con un promedio de 30 °C (Fig. 19).



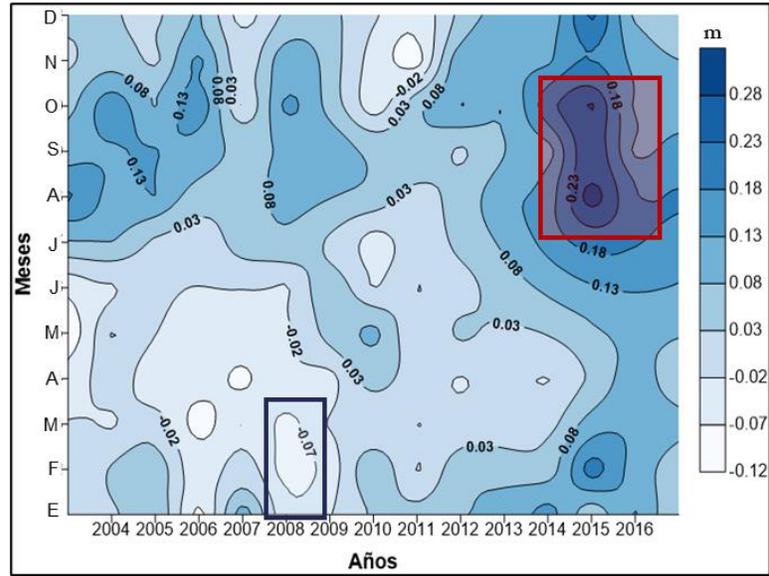
**Figura 20.** Isolíneas de la temperatura superficial del mar (TSM) para el periodo 2003-2017 en el Pacífico Central Mexicano. El cuadro azul marca la época con temperaturas menores, mientras que el cuadro rojo hace referencia a la temperatura máxima registrada en el periodo.

Las isoterma del promedio mensual de CChl-a muestran que de julio a octubre del periodo 2003 a 2008 se registraron los valores más bajos. Por el contrario, los meses con valores mayores fueron de febrero a abril, sobre todo durante el año 2003 y durante el periodo 2009-2014. Cabe resaltar que el año donde hubo mayor variabilidad fue el 2004, en el cual se registraron picos de mayor y menor concentración, mientras que los años 2015 y 2016 se mantuvieron constantes con valores bajos de CChl-a (Fig. 20).



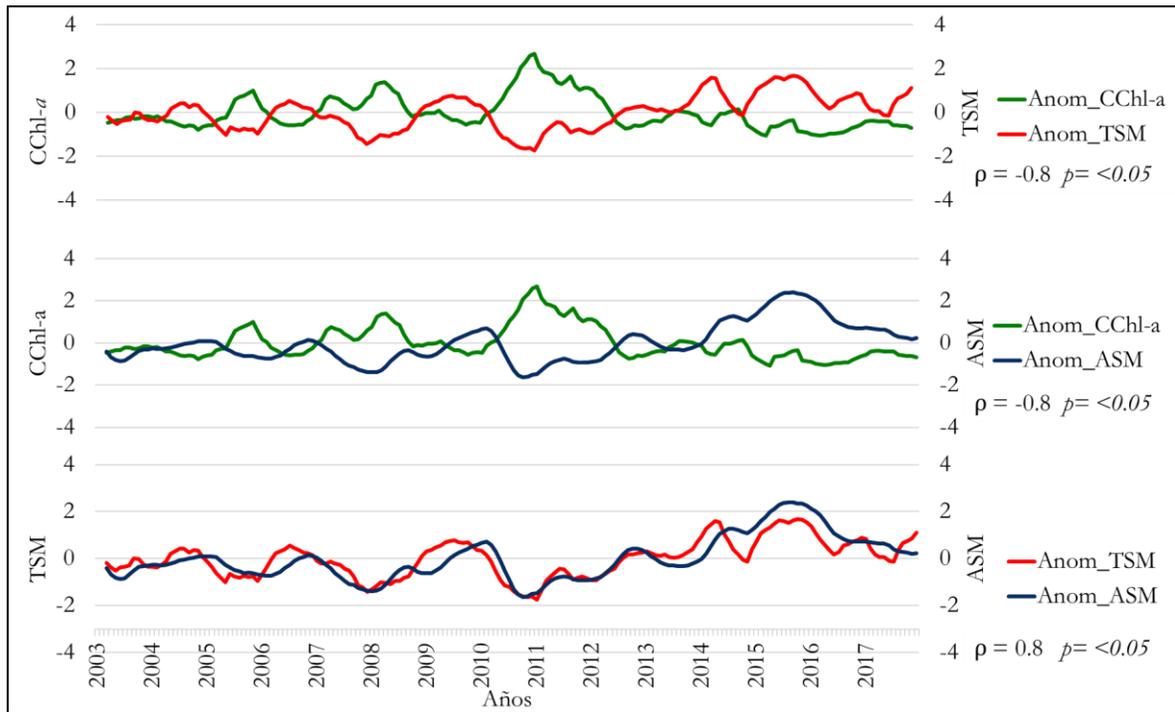
**Figura 21.** Isolíneas de la concentración de clorofila a (CChl-a) para el periodo 2003-2017 en el Pacífico Central Mexicano. Los cuadros azules señalan los periodos con valores menores, mientras que los cuadros rojos indican los valores más altos.

Las isolíneas de promedio mensual para la ASM muestran que los meses de julio a noviembre del año 2015 fueron los que registraron los valores mayores de ASM, mientras que en el mes de febrero del año 2008 se registró el valor más bajo (Fig. 21).



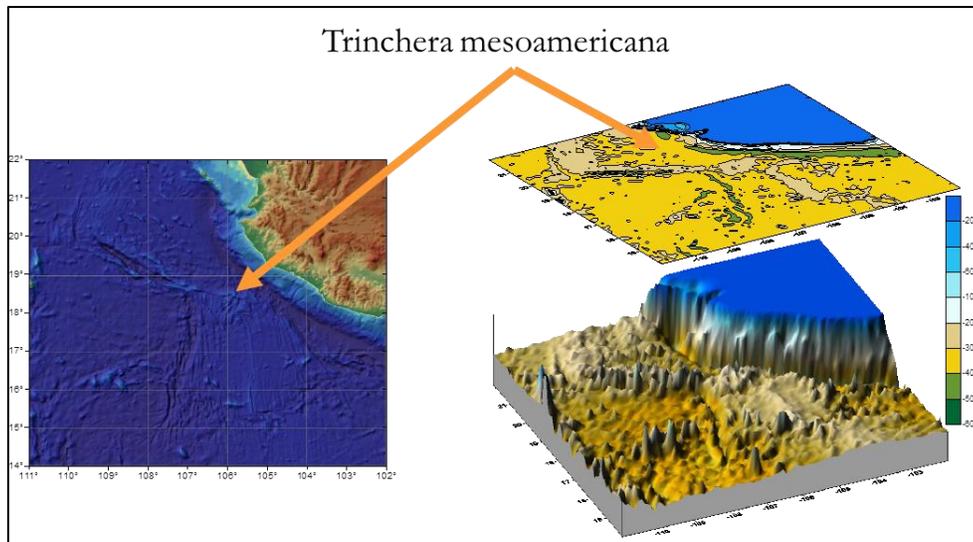
**Figura 22.** Isolíneas de la altura superficial del mar (ASM) durante 2003-2017 en el Pacífico Central Mexicano. El cuadro azul hace referencia a los valores bajos de la ASM, mientras que el cuadro rojo señala el periodo donde se presentaron los valores más altos.

Por último, se realizó una correlación entre cada una de las variables ambientales (TSM, CChl-a y ASM; Fig. 22). El valor de correlación entre la CChl-a y la TSM fue negativo ( $\rho = -0.76$ ,  $p < 0.05$ ), al igual que entre la CChl-a y la ASM ( $\rho = -0.69$ ,  $p < 0.05$ ). Por otro lado, el valor de correlación entre la TSM y la ASM fue positivo ( $\rho = 0.82$ ,  $p < 0.05$ ).

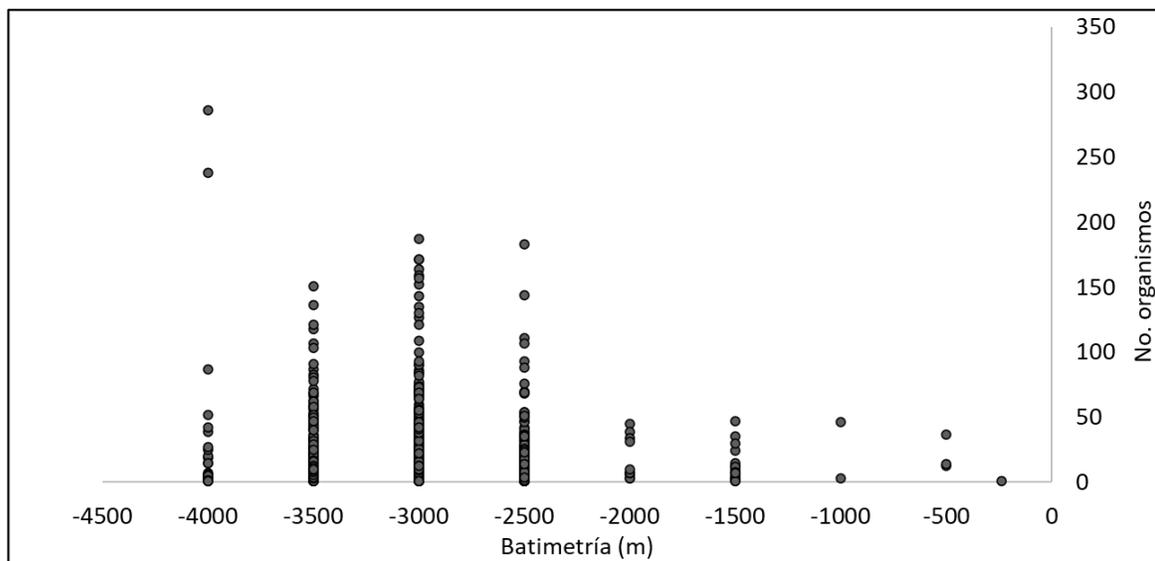


**Figura 23.** Correlaciones cruzadas entre las anomalías de las variables ambientales del Pacífico Central Mexicano en el periodo 2003-2017.

Se caracterizó la batimetría del PCM, mostrando un mapa del relieve en la figura 23. Debido a que solo los datos de captura de los organismos se encuentran georreferenciados, se realizó un análisis de la relación entre estos y la batimetría del área donde se observa que las mayores capturas se realizaron en áreas donde las profundidades oscilaban entre los 2600 y 4300 m (Fig. 24).



**Figura 24.** Batimetría del Pacífico Central Mexicano. Se señala la ubicación de la trincheras mesoamericana dentro del área de estudio.



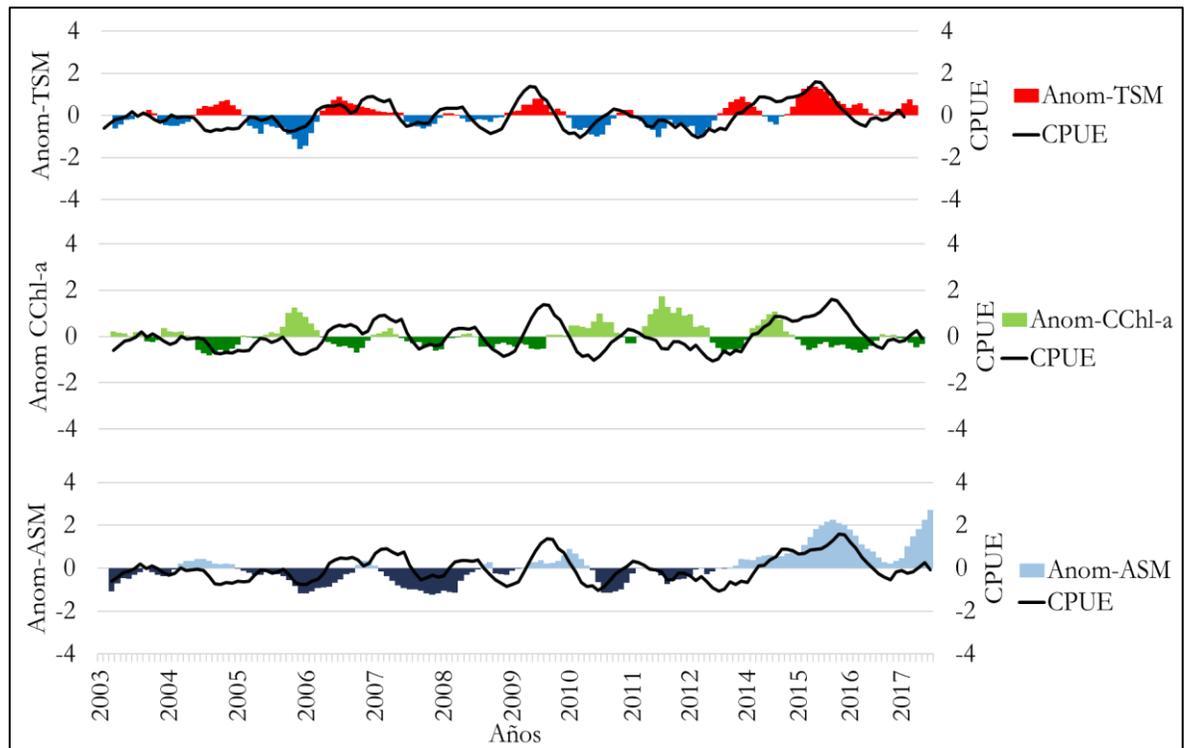
**Figura 25.** Relación entre las capturas de tiburón sedoso (puntos negros) en el Pacífico Central Mexicano y la batimetría del área de estudio en el periodo 2003-2017.

### Relación del recurso con el medio ambiente

Se calcularon los datos de CPUE para todo el periodo de estudio; sin embargo, en 2013 no se obtuvieron datos de captura debido a la falta de observadores en la flota palangrera, por lo que este año no fue considerado para el análisis de variabilidad de tallas ni en la modelación y predicción.

Los valores de CPUE obtenidos para el periodo analizado mostraron que los años con CPUE mayor fueron el 2007 con 31.1 organismos/1000 anzuelos, 2009 y 2015 con 25.4 y 24.7 org./1000 anz., respectivamente. El año con CPUE menor fue el 2012 con un valor de 10.8 org./1000 anz. Para el año tipo promedio la CPUE registró los valores más altos durante los meses de agosto y septiembre, con valores de 29.5 org./1000 anz. En tanto que, los valores bajos se presentaron en los meses de febrero y marzo con 10.8 y 10.15 org./1000 anz, respectivamente.

En el análisis de correlación cruzada de la CPUE con las variables ambientales se encontró que la CPUE está más relacionada con la TSM ( $\rho = 0.6$ ,  $p < 0.05$ ), al igual que con la ASM ( $\rho = 0.5$ ,  $p < 0.05$ ), mientras que con la concentración de Chl-a ( $\rho = -0.2$ ,  $p < 0.05$ ) hubo una correlación negativa muy baja (Fig. 25).



**Figura 26.** Relación de las variables ambientales y la CPUE durante el periodo 2003-2017 en el Pacífico Central Mexicano. CPUE = Captura Por Unidad de Esfuerzo; Anom-TSM = Anomalías de la Temperatura Superficial del Mar; Anom-CChl-a = Anomalías de la Concentración de Clorofila a; Anom-ASM = Anomalías de la Altura Superficial del Mar.

## Modelación del hábitat

El modelo final obtenido explicó el 27.5% de la devianza total y fue creado con todas las variables predictivas ambientales, espaciales y temporales. Los resultados demostraron que la TSM es la variable que tiene el mayor poder explicativo en las capturas del tiburón sedoso, seguido del mes y la ASM (Tabla 1).

A pesar de que algunas variables tuvieron un porcentaje de devianza bajo, se consideraron en el modelo, ya que su aporte a este fue significativo.

**Tabla 1.** Porcentaje de devianza explicada de cada una de las variables predictivas utilizadas en este modelo. TSM= Temperatura Superficial del Mar, ASM= Altura Superficial del Mar, CChla=concentración de clorofila-a, Lon= longitud y Lat=latitud.

Variable	<i>p</i>	Devianza explicada
TSM	<0.0001	15.3%
Mes	-	11.8%
ASM	<0.0001	7.24%
Año	-	6.68%
Chla	<0.0001	6.38%
Lon, Lat	0.01	4.32%
Batimetría	0.127	0.799%

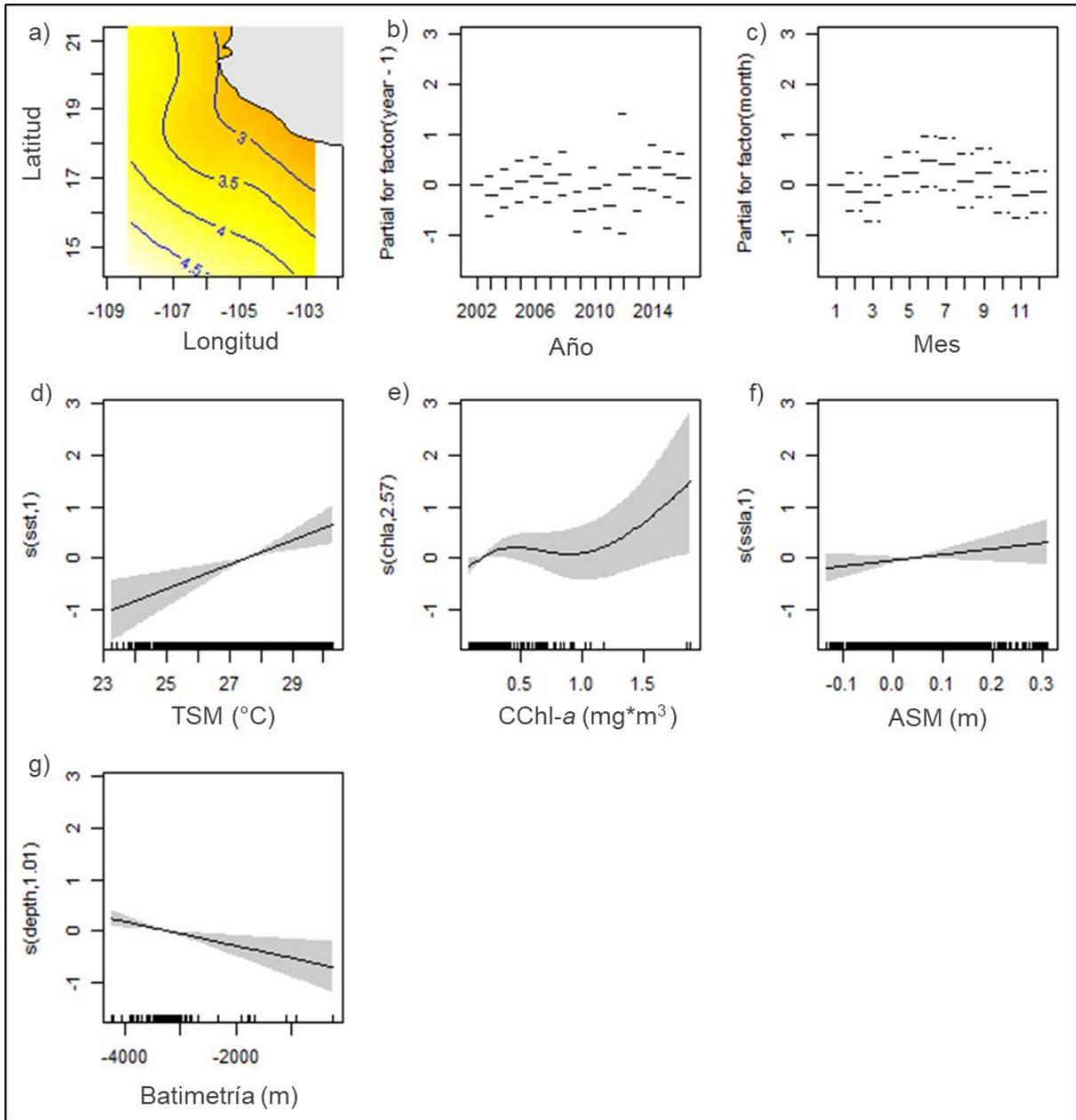
Por otro lado, el proceso de selección del mejor modelo estadístico para describir el efecto de las variables predictivas en la captura del tiburón sedoso en el PCM se describe en la Tabla 2. El modelo final obtenido explica que la probabilidad de captura del tiburón sedoso en el PCM fue mayor en ambientes pelágicos, durante los años 2005-2008 y 2014-2016, en los meses de abril a septiembre, cuando la TSM fue mayor a 27 °C y hubo una CChl-a mayor a 0.2 mg/m<sup>3</sup>, en zonas de convergencia es decir con valores de ASM > 0.1 m y a profundidades mayores a los 3000 m. Por el contrario, las capturas de tiburón sedoso fueron más bajas en zonas costeras con profundidades menores a 3000 m, en los meses de octubre a marzo, en aguas con TSM menores a 27 °C, CChl-a menores a 0.2 mg/m<sup>3</sup> y en zonas de divergencia (Fig. 26).

En la figura 27 se muestra la predicción espacial de probabilidad de captura del tiburón sedoso en el PCM, lo que sugiere que las probabilidades de captura más altas (>20) se presentan en zonas alejadas de la costa y en mayor proporción al sur del PCM.

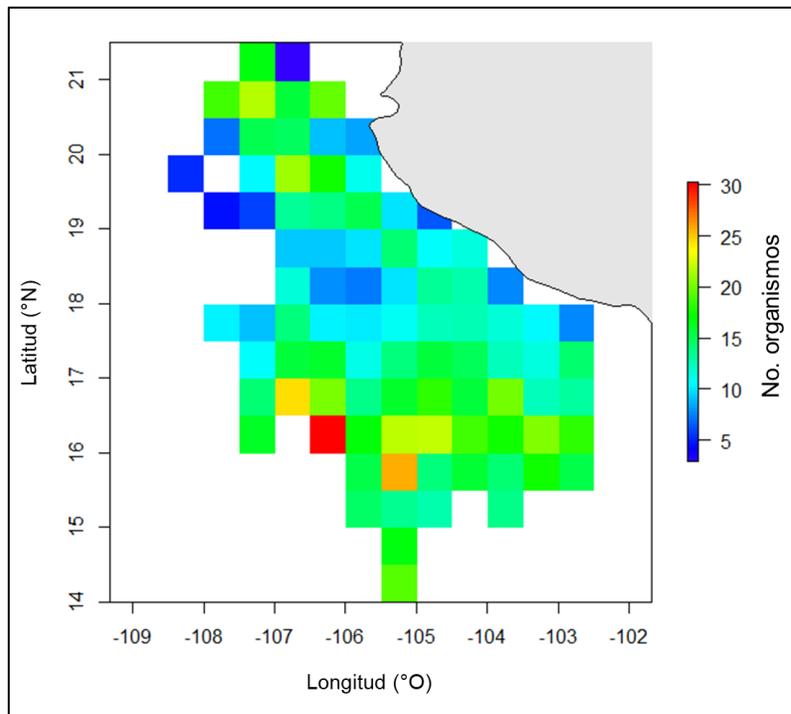
**Tabla 2.** Proceso de construcción del modelo estadístico adecuado para describir el efecto de las variables predictivas en la captura del tiburón sedoso en el PCM.

c=captura, TSM= Temperatura Superficial del Mar, ASM= Altura Superficial del Mar, CChla=concentración de clorofila-a, Lon= longitud y Lat=latitud.

<b>Modelo</b>	<b>Devianza</b>	<b>Devianza explicada</b>	<b>p</b>	<b>AIC</b>
c~1	1079.99	0%	<0.0001	2571.658
+TSM	914.71	15.3%	<0.0001	2437.52
+ASM	907.78	15.9%	<0.0001	2436.83
+CChla	905.80	16.1%	<0.0001	2438.98
+Año	870.17	19.4%	-	2429.558
+Mes	839.12	22.3%	-	2421.35
+Lon, Lat	791.82	26.7%	<0.0001	2394.04
+Batimetría	782.64	27.5%	<0.0001	2386.26



**Figura 27.** Gráficos de efectos parciales de las variables predictivas sobre la captura del tiburón sedoso en el Pacífico Central Mexicano. a) Longitud y Latitud, b) Año, c) Mes, d) Temperatura Superficial del mar (TSM), e) Concentración de clorofila-a (CChl-a), f) Altura Superficial del Mar (ASM), g) Batimetría



**Figura 28.** Predicción espacial de las capturas de tiburón sedoso en el Pacífico Central Mexicano a través del mejor modelo ajustado.

## DISCUSIÓN

### Análisis de tallas de los organismos capturados

La información analizada en el presente estudio corresponde a un periodo de 15 años. De acuerdo con Santana-Hernández (2001) los estudios que involucran el análisis de series de tiempo largas como este se consideran importantes debido al grado de confiabilidad que otorgan, ya que la información obtenida es suficientemente representativa para que proporcione las bases necesarias para la predicción de capturas de grupos de especies capturadas con palangre.

Dentro del periodo de estudio se obtuvieron 19,672 registros de capturas de *C. falciformis*, siendo los organismos juveniles los predominantes en las capturas en esta área, con una LT promedio de 140 cm. Se sabe que en las costas de Colima el tiburón sedoso soporta la pesquería con un 88%, del cual el 92% de los organismos son juveniles (Cruz *et al.*, 2011). Estos datos también coinciden con lo encontrado para las costas de Oaxaca y Chiapas, donde se ha reportado una abundancia alta de juveniles de tiburón sedoso, y donde la mortalidad por pesca impacta principalmente a grupos de tallas de 145-165 cm LT (Chong-Robles, 2006; Alejo-Plata *et al.*, 2007).

Una explicación de por qué en estas áreas del PCM se encuentran un gran número de organismos juveniles puede ser debido a que las aguas costeras poco profundas representan hábitats de menor riesgo para ellos debido a que pueden protegerse de la depredación de tiburones adultos (Heithaus, 2007). Aunado a lo anterior es probable que esta especie esté utilizando estas zonas costeras como áreas de crianza como ha sido sugerido por Hoyos-Padilla (2003). Las áreas de crianza se han descrito como hábitats esenciales ya que cumplen con los requerimientos necesarios para realizar actividades como desove, reproducción, alimentación o crecimiento de los organismos hasta su madurez (Heithaus, 2007). Se sabe que las áreas de crianza primarias son aquellas donde ocurre el parto y las crías viven por un periodo muy corto, mientras que las áreas de crianza secundarias son aquellas en las que los organismos juveniles se encuentran hasta alcanzar la madurez (Bass, 1978). Sin embargo, debido a la complejidad del desarrollo de vida de los tiburones se complica manejar una división de las áreas de crianza, por lo que

se propone que estas solo deben cumplir con los siguientes requerimientos: ser una zona de refugio y con gran cantidad de alimento para los juveniles, que exista la presencia de una gran cantidad de juveniles, y que el área sea utilizada a través de los años y los organismos sean filopátricos (Heupel *et al.*, 2007). De acuerdo con la frecuencia de tallas de los organismos capturados encontradas en este estudio, el reporte de hembras grávidas de tiburón sedoso en el área (Santana-Hernández & Valdez-Flores, 2014) y de la sugerencia de filopatría en la especie para el Pacífico Mexicano (Rodríguez-Matus, 2020) se puede suponer que el Pacífico Central Mexicano funciona como un área de crianza para la especie.

Otro factor por considerar es la tendencia a segregarse por tallas, debido a que los tiburones migratorios pueden clasificarse en diferentes grupos o categorías con base en la diferencia de velocidad de nado que presentan entre los individuos pequeños y los más grandes (Hoyos-Padilla, 2003). Además de los factores biológicos también es importante tener en cuenta el factor “palangre”, ya que algunos autores mencionan que el material con el que está elaborado el palangre podría influir en la captura de un mayor porcentaje de juveniles, debido a que estos tienen dificultad al romper los reinales de poliamida monofilamento a diferencia de un adulto, que lo hace con mayor facilidad (Beerkircher *et al.*, 2003; Barajas-Calderón, 2018).

Por otro lado, se ha descrito que algunas especies de tiburón presentan filopatría, como en el caso de las hembras de tiburón limón (*Negaprion brevirostris*), quienes regresan cada 2 años al mismo lugar donde nacieron para dar a luz a sus crías. El mismo comportamiento se ha reportado para los juveniles y adultos del tiburón puntas negras (*Carcharhinus limbatus*) (Feldheim *et al.*, 2002; Heupel *et al.*, 2004; Hueter & Heupel, 2004). En el caso del tiburón sedoso, Rodríguez-Matus (2020) menciona que las hembras y juveniles de esta especie presentan filopatría en áreas del Pacífico Mexicano. De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de variabilidad de tallas en el presente estudio, se sugiere que los organismos de esta especie podrían tener una tendencia a la filopatría, retornando a estas áreas cada cuatro años; sin embargo, es necesario realizar estudios de marcaje de la especie para poder confirmar este comportamiento.

En el análisis de variabilidad intraanual se encontraron las tallas mayores en los meses de marzo y agosto, coincidiendo con los periodos de apareamiento y fecundación (agosto-septiembre), así como con el periodo de nacimiento (marzo-mayo) que se ha reportado para *C. falciformis* en el Golfo de Tehuantepec (Galván-Tirado *et al.*, 2015). Coincidentemente durante los meses de marzo y agosto se capturó una mayor cantidad de organismos de tiburón sedoso en comparación con los demás meses del año, lo que confirma una mayor agregación de esta especie durante estos periodos para la reproducción y alumbramiento.

En cuanto al análisis por sexos, se obtuvo una proporción mayor de organismos machos, coincidiendo con lo reportado por Alejo-Plata *et al.* (2016) para las costas de Oaxaca. Algunos autores han mencionado la existencia de segregación por género para tiburones, donde una de las causas podría ser la competencia por alimento. Cabrera-Chávez-Costa *et al.* (2010) sugiere que las hembras de tiburón sedoso se encuentran en el área oceánica alimentándose principalmente de cefalópodos, mientras que los machos (juveniles y adultos) y hembras juveniles se encuentran en aguas costeras. Sin embargo, menciona que las hembras adultas también podrían migrar a aguas costeras esporádicamente con fines alimenticios. Murcientes *et al.* (2008) explican que esta segregación puede deberse a que las hembras tienen mayores requerimientos energéticos debido a que son de mayor tamaño en comparación con los machos, además de que deben estar preparadas para el periodo reproductivo y por esta razón migran a zonas oceánicas en búsqueda de alimento que les de la energía necesaria.

Asimismo, en los gráficos de isolíneas realizado para ambos sexos observamos que hay una mayor proporción de machos en los meses de mayo a octubre, lo que coincide con la temporada reproductiva, razón por la cual estos organismos se acercan a la costa. Por otro lado, a pesar de que las hembras también estuvieron presentes en los meses de mayo a octubre para la temporada reproductiva, se encontraron principalmente en los meses de febrero a abril, coincidiendo también con el periodo de alumbramiento que se lleva a cabo en estos meses (Galván-Tirado *et al.*, 2015). Cabe mencionar que para el PCM Santana-Hernández & Valdez-Flores (2014) reportaron un mayor número de hembras

grávidas de tiburón sedoso durante los meses de septiembre y octubre para el periodo 2003-2011.

En los mapas de distribución espacio-temporal no se encontró algún patrón diferencial para tallas y sexos; sin embargo se observan diferencias en las zonas de captura, mientras que para el periodo de 2003-2011 los lances se registraron cerca del puerto de Manzanillo y en un área muy concentrada al sur del PCM, para 2014-2017 los lances se registraron en zonas más alejadas de la costa y hacia el norte del puerto de Manzanillo. Santana-Hernández & Valdez-Flores (2014) mencionan que como parte de la evolución de la pesquería se fue realizando un incremento gradual de la distancia a la costa en que iniciaban los lances, comenzando desde las 73 mn en el 2003 y llegando hasta 116 mn en el 2011, lo cual se observa en la evolución del patrón de las distribuciones de los lances. En el periodo de 2014-2017 también se observa un incremento de la distancia a la costa en la que operaron las embarcaciones, cubriendo más áreas hacia el sur y el norte, pero también hacia mar abierto, fuera de la ZEEM.

En los mapas de distribución intraanual se corroboró una mayor presencia de los organismos frente a las costas de Colima presentando un patrón de distribución agregado en los meses de mayo a agosto. Esto puede estar relacionado con las diferentes distancias a las que operan las embarcaciones durante el año debido a las condiciones meteorológicas de esta área. Según lo reportado por Santana-Hernández & Valdez-Flores (2014) los lances de las embarcaciones palangreras de mediana altura se registran en un promedio de 80 mn a partir de la costa durante los meses de julio a octubre, coincidiendo con la temporada de ciclones tropicales que se presentan en el océano Pacífico, la cual abarca los meses de mayo hasta noviembre (Rosengaus-Moshinsky *et al.*, 2002). Por esta razón solo durante ciertas temporadas se permiten desplazamientos lejanos de las embarcaciones ya que es necesario tomar precauciones y no exponerse a situaciones de inseguridad (Santana-Hernández & Valdez-Flores, 2014).

## Caracterización ambiental

La variabilidad de la TSM y la ASM mostraron un comportamiento similar entre ellas, presentando valores mínimos en los años 2008 y 2011, años donde se registraron eventos La Niña de acuerdo con el Índice Oceánico del Niño (ONI, por sus siglas en inglés) (<https://origin.cpc.ncep.noaa.gov>), mientras que los valores promedio máximos se registraron en el periodo 2014-2016, coincidiendo este último con la presencia del evento El Niño.

Se sabe que el fenómeno de El Niño provoca cambios en el comportamiento de las variables ambientales oceanográficas, manifestándose principalmente en el aumento de varios centímetros de la ASM, así como el aumento de entre 4 a 5 °C de la TSM. Aunado a esto, El Niño genera un descenso en la termoclina, provocando una capa de mezcla más gruesa y con poca producción biológica (Bertrand *et al.*, 2020). Todos estos cambios pudieron ser observados en los análisis de variabilidad de la TSM y ASM del área de estudio ya que ambas variables presentaron anomalías positivas, contrario al comportamiento de la CChl-*a*, la cual presentó anomalías negativas durante los años 2015 y 2016.

El análisis de correlación entre la TSM y la CChl-*a* tuvo un valor negativo. De acuerdo con Pennington *et al.* (2006), esto se puede explicar por la relación que hay entre la temperatura y la nutriclina: en temperaturas cálidas la cantidad de nutrientes que hay en la columna de agua es poca, por lo tanto, la abundancia de fitoplancton es menor, en cambio en aguas con temperaturas frías la cantidad de nutrientes aumenta, por lo que en eventos de surgencia donde las aguas profundas frías y ricas en nutrientes salen a la superficie las áreas de productividad primaria son elevadas.

La correlación inversa que también se presenta entre la ASM y la CChl-*a* puede explicarse debido a la formación de remolinos o giros en el océano. Los giros ciclónicos están caracterizados por una divergencia de las aguas, donde en la superficie se observa una concavidad, provocando que la ASM disminuya. En estos casos se presenta un ascenso de la termoclina que provoca una elevación de la capa subsuperficial en algunas decenas de metros. Esta agua se caracteriza por ser rica en nutrientes, los cuales favorecen a la productividad biológica en la superficie, por lo que la CChl-*a* aumenta. Por el contrario, en los remolinos anticiclónicos se presenta

una convergencia del agua por lo que la ASM aumenta, mientras que todo el material en el centro del giro se hunde, provocando una baja CChl-a (López-Calderón *et al.*, 2006; Pennington *et al.*, 2006; Cruz-Gómez *et al.*, 2008).

Por otro lado, los comportamientos similares presentados por la TSM y la ASM se ven reflejados en una correlación positiva. Leuliette & Wahr (1999) reportan una estrecha relación entre estas variables con una correlación de 0.7 para el océano Pacífico. Se ha sugerido que esta correlación puede ser evidencia de un aumento de la altura superficial del mar debido al almacenamiento de calor cerca de la superficie del océano debido a causas indirectas, principalmente desplazamientos de agua por el viento, posiblemente por la variabilidad relacionada con el ENSO (Nerem *et al.*, 1994).

En cuanto a la batimetría, es importante mencionar que el PCM forma parte de la trinchera mesoamericana, fosa con profundidades de entre los 4,000 hasta los 5,000 m. Además, esta zona está marcada por numerosos montes submarinos con elevaciones de hasta 1,000 m sobre el fondo marino los cuales se han descrito como zonas importantes debido a la cantidad de nutrientes que aportan a zonas adyacentes gracias a las corrientes, por lo que incrementan la productividad en ciertas áreas (Wilkinson *et al.*, 2009; Bezaury-Creel *et al.*, 2011).

En cuanto a la relación entre la batimetría y la captura del tiburón sedoso se encontró que la mayoría de organismos fueron capturados en áreas con más de 2500 m de profundidad. La plataforma del PCM es muy estrecha, cayendo abruptamente a profundidades de hasta 3000 m a los 15 km de distancia a partir de la costa, por lo que aunque las embarcaciones palangreras operen cerca de la costa, las profundidades de estas áreas ya son considerables. Las características de la plataforma del PCM permite la presencia de especies pelágicas en zonas costeras (Wilkinson *et al.*, 2009).

### **Relación del recurso con el medio ambiente**

La captura por unidad de esfuerzo (CPUE) es un valor comúnmente utilizado en estimaciones de abundancia poblacional de peces, ya que elimina las tendencias regionales y es una herramienta con más precisión que los datos de captura por si

solos (Bonfil, 2005; Morgan & Burgess, 2005). El uso del número de organismos/1000 anzuelos se ha propuesto como indicador de la abundancia relativa del tiburón sedoso en pesquerías semi-industriales, por lo cual en este estudio se utilizó este valor como un índice de la abundancia poblacional de esta especie (Bonfil, 2005; Morgan & Burgess, 2005; Rodríguez-Madrigal *et al.*, 2017).

Los meses donde se aplicó un mayor esfuerzo pesquero fueron marzo, abril, mayo, septiembre y noviembre, sin embargo, agosto y septiembre fueron los meses que presentaron los valores de CPUE más altos, coincidiendo con las agregaciones de tiburón sedoso en la costa debido al periodo de reproducción (Galván-Tirado *et al.*, 2015). Aunque en el mes de marzo hay una mayor agregación de tiburón sedoso debido al inicio de la temporada de alumbramiento, este mes presentó uno de los valores de CPUE más bajos junto con el mes de febrero (Galván-Tirado *et al.*, 2015).

Durante el año 2012, la cantidad de anzuelos utilizados en cada mes fue elevada en comparación con otros años, sin embargo, el número de organismos capturados no fue el esperado, dando un valor de CPUE muy bajo. Por el contrario, los años con mayor CPUE fueron el 2007, 2009 y 2015, estos dos últimos años se caracterizaron por la presencia del evento El Niño, hecho que se confirmó con la presencia de anomalías positivas de TSM en el área de estudio.

A pesar de que se ha descrito que los eventos “El Niño” impactan negativamente los recursos pesqueros (Cruz *et al.*, 2011), en el presente estudio hubo un impacto favorable para las capturas de tiburón sedoso, coincidiendo con lo reportado por Jaime-Rivera (2004), quien menciona que La Niña 1999 influyó negativamente a la captura del tiburón sedoso en la costa oeste de Baja California Sur. Lennert-Cody *et al.* (2018) mencionan que la relación que existe entre las capturas de tiburones sedosos juveniles y la presencia de un evento El Niño probablemente se deba al movimiento que realizan los organismos en búsqueda de un hábitat favorable. Lo anterior debido a que las variables abióticas influyen en el uso del hábitat de los tiburones porque condicionan los requisitos fisiológicos de los organismos, afectando directamente su distribución y abundancia.

Además, otras alternativas que podrían explicar la relación entre la distribución de los tiburones juveniles y la presencia de un evento El Niño podrían ser las

migraciones verticales que realizan asociadas a la termoclina, los factores biológicos que afectan su supervivencia y madurez, así como el cambio en la distribución espacial y temporal de sus presas (Schlaff *et al.*, 2014; Cortés-Fuentes, 2018).

La CPUE presentó una mayor correlación con la TSM respecto a las otras variables. Se ha descrito que la TSM es un indicador válido de la presencia de tiburón sedoso, debido a que se han reportado correlaciones positivas y significativas entre estas (Jaime-Rivera, 2004; Santana-Hernández & Valdez-Flores, 2014).

De acuerdo a Heithaus (2007), Boyce *et al.* (2008) la temperatura del agua puede influir en el consumo de energía del tiburón, independientemente de la cantidad de alimento disponible a su alrededor. A medida que aumenta la temperatura del agua, también lo hace la tasa metabólica de los elasmobranquios, por lo que estos se mueven a diferentes zonas con temperaturas distintas para modificar la cantidad de energía que requieran, por lo que estas especies están adaptadas a vivir en ciertos rangos de temperatura.

Por otro lado, también se encontró una relación positiva entre la ASM y la CPUE del tiburón sedoso. Se sabe que la presencia de tiburón sedoso en zonas de convergencia puede deberse a la presencia de objetos flotantes, ya que estos funcionan como atractores debido a que estos pueden ser utilizados como zonas de alimentación, refugio, reproducción o como punto de referencia por varias especies, entre ellas los tiburones (Fréon & Dagorn, 2000; Martínez-Rincón, 2012). Además, Gaube *et al.* (2018) mencionan que las temperaturas cálidas durante la presencia de giros anticiclónicos hacen que las presas de los tiburones sean más accesibles, aunado a que estas áreas son energéticamente rentables para ellos debido a que estos reducen los costos fisiológicos de la termorregulación en agua fría, por lo que esto también explicaría la presencia de estos organismos en áreas donde la ASM aumenta. Es importante mencionar que la TSM y ASM están correlacionadas positivamente, por lo que estas variables tendrían un efecto similar sobre las capturas del tiburón sedoso.

En el presente estudio la CChl-a mostró una correlación casi nula con la CPUE del tiburón sedoso, coincidiendo con lo reportado por Jaime-Rivera (2004),

quien reporta que una de las razones de una correlación nula es que la alimentación de esta especie no concuerda con las zonas de concentración de fitoplancton.

Los análisis realizados en los ecosistemas marinos, la diversidad y abundancia de depredadores tope como el tiburón sedoso se han utilizado como indicadores del estado de equilibrio ecológico (Heithaus *et al.*, 2007). Es importante tener en cuenta la presencia de mecanismos o eventos que modifican los promedios de la TSM, CChl-a y ASM dentro del área de estudio, debido a que tienen efectos inmediatos sobre los recursos pesqueros, los cuales en su mayoría son especies con grandes capacidades de desplazamiento, por lo que con la presencia de condiciones ambientales desfavorables estas especies pueden modificar su distribución tanto vertical como horizontal. El tiburón sedoso es una especie altamente migratoria y debido a esto tiene gran facilidad de desplazamiento a áreas que se ajusten a sus necesidades fisiológicas (Heithaus, 2007).

### **Modelación del hábitat**

En el presente estudio el modelo realizado para relacionar las variables abióticas con la presencia de tiburón sedoso en las capturas del PCM mostró que la TSM es la variable que más explica la presencia de los organismos, encontrando estos una preferencia por un rango de temperaturas entre 27° y 30 °C. Lo anterior coincide con lo reportado por Cruz *et al.* (2011) quienes mencionan que dentro del PCM el tiburón sedoso se encuentra con un rango entre los 24 °C a los 32 °C. En general, para el océano Pacífico Oriental (OPO) otros autores han mencionado que *C. falciformis* habita en intervalos de temperatura más estrechos, entre los 24 y 28 °C (Crown *et al.*, 1996; Jaime-Rivera, 2004; Martínez-Rincón, 2012; Alejo-Plata *et al.*, 2016; Lennert-Cody *et al.*, 2017, 2018 y 2019; Cruz-Cosío, 2018).

Debido a que la temperatura es una variable que juega un papel importante en el control de la tasa metabólica de los tiburones, algunas especies solo pueden tolerar un rango específico de condiciones ambientales (Bernal *et al.*, 2012). Además, algunos autores mencionan que las capturas de *C. falciformis* aumentan conforme la TSM incrementa, sobre todo en el caso de organismos juveniles (Brenes, 2000; Alejo-Plata, 2016). En el presente estudio gran parte de los tiburones

capturados fueron juveniles, lo que explica el rango preferente tan estrecho de TSM que se encontró en el modelo.

Asimismo, el tiburón sedoso se encontró presente en aguas con una CChl-a  $>0.2 \text{ mg/m}^3$  y  $<2 \text{ mg/m}^3$ , coincidiendo con lo reportado por Cruz-Cosío (2018) quien menciona que la presencia de tiburón sedoso fue en aguas con CChl-a  $<1 \text{ mg/m}^3$ . Las diferencias en los intervalos de TSM y CChl-a reportado en este y otros trabajos posiblemente esté relacionada con la diferencia en la escala espacial, por ejemplo, el PCM es una zona relativamente costera, por lo que la concentración de Chl-a muestra valores más altos que en áreas oceánicas del resto del OPO. En el mismo sentido, la variación de la TSM no es igual en el PCM que en el OPO ya que, por ejemplo, en presencia de un evento EL Niño o La Niña la intensidad de estos no afecta de la misma manera a todo el OPO, ya que en eventos donde la intensidad es baja las anomalías solo pueden observarse en la parte ecuatorial y no en el resto del OPO (Martínez-Rincón, 2012).

El modelo también mostró que el tiburón sedoso prefiere las zonas de convergencia, como se observó en el análisis entre la CPUE y la ASM. En el PCM durante la mayor parte del año hay presencia de giros ciclónicos y anticiclónicos sin embargo, durante los meses de junio a septiembre la cantidad de giros anticiclónicos aumenta, provocando que la TSM y ASM aumenten (López-Calderón *et al.*, 2006; Olivos *et al.*, 2016; Kono-Martínez *et al.*, 2017). Esto coincide con la preferencia del tiburón sedoso al presentarse en los meses de abril a septiembre en el PCM.

Con respecto a la predicción espacial, el modelo sugirió una mayor presencia de tiburón sedoso entre las latitudes 14 y 17 °N y longitudes -103 y -107 °O. Esta área se ha descrito como una zona importante para la especie (Martínez-Rincón, 2012; Cruz-Cosío, 2018). Cabe mencionar que en estas latitudes se ha reportado un porcentaje considerable de las capturas incidentales de tiburón sedoso, donde la mayoría son organismos juveniles ( $<90 \text{ cm LT}$ ) (Watson *et al.*, 2008).

Los resultados encontrados en el presente estudio proporcionan información relevante sobre la presencia de organismos juveniles de tiburón sedoso en el PCM, así como también la preferencia de estos hacia ciertas áreas específicas dentro de la región. Hay que recalcar que a pesar de que los organismos juveniles no pueden

realizar grandes migraciones, son libres de elegir zonas específicas dentro de sus áreas de crianza con las mejores condiciones para su supervivencia (Heithaus, 2007). Debido a que el tiburón sedoso es una especie con capturas muy importantes en todo el Pacífico Mexicano, y donde un mayor porcentaje de organismos juveniles se encuentran en el PCM y la zona sur, es de gran importancia implementar estrategias que permitan un manejo sustentable de esta especie considerando la variabilidad de las tallas, preferencias ambientales, espaciales y temporales de los organismos de tiburón sedoso encontradas en el presente trabajo.

## CONCLUSIONES

Las capturas del tiburón sedoso en el PCM estuvieron caracterizadas por una mayor cantidad de organismos juveniles. Las tallas mayores se registraron durante los meses de marzo y agosto, a parecer relacionadas con los periodos de alumbramiento y reproducción, respectivamente. Además, se sugiere que los organismos de esta especie podrían tener una tendencia a la filopatría, retornando a estas áreas cada cuatro años. No se encontró un patrón diferencial en la distribución del tiburón sedoso por tallas o sexos.

El área de estudio se caracteriza por una TSM de 24°-30 °C, CChl-a de 0.08-0.48 mg/m<sup>3</sup> y una ASM de -0.12-0.28 m, con variabilidad inter e intra-anual significativas. La TSM y ASM se correlacionan positivamente, mientras que estas tienen una correlación negativa con la CChl-a.

La relación entre la batimetría y las capturas mostró una mayor cantidad de organismos en áreas con profundidades mayores a los 2500 m.

La CPUE mostró una correlación positiva tanto con la TSM y la ASM, por lo que estas variables ambientales son un indicador válido de la presencia del tiburón sedoso.

El modelo final mostró que el tiburón sedoso tiene preferencia por temperaturas superficiales del mar por arriba de los 27 °C y una CChl-a entre 0.2 y 2 mg/m<sup>3</sup>. Además, se presentan principalmente en los meses de abril a septiembre, en zonas de convergencia y a profundidades mayores a los 3000 m.

## **RECOMENDACIONES**

Obtener una base de datos más completa, evitando el vacío de datos para algunos periodos.

Ampliar la serie de tiempo para realizar un análisis más detallado en el que se puedan incluir comparaciones entre eventos El Niño y La Niña.

Realizar estudios de marcaje de organismos para confirmar la tendencia de filopatría de la especie en las costas del Pacífico Central Mexicano.

Evaluar el efecto que pudieran tener otras variables ambientales sobre las preferencias ambientales del tiburón sedoso, tal es el caso del oxígeno disuelto, salinidad, temperatura de la columna de agua, capa de mezcla, entre otros, con el fin de establecer un mejor conocimiento sobre el comportamiento de la especie.

Identificar el efecto en el comportamiento sobre el tiburón sedoso que pudieran tener otras especies de pelágicos mayores y pelágicos menores en el Pacífico Central Mexicano.

## LITERATURA CITADA

- Alejo-Plata, M.C., J.L. Gómez-Márquez, S. Ramos & E. Herrera. 2007. Presencia de neonatos y juveniles del tiburón martillo *Sphyrna lewini* (Griffith & Smith, 1834) y del tiburón sedoso *Carcharhinus falciformis* (Müller & Henle, 1839) en la costa de Oaxaca, México. *Rev. Bio. Mar. Oceanogr.* 42(3): 403-413.
- Alejo-Plata, M.C., M.A. Ahumada-Sempoal, J.L. Gómez-Márquez & A. González-Acosta. 2016. Estructura poblacional y aspectos reproductivos del tiburón piloto *Carcharhinus falciformis* (Müller y Henle, 1839) (Carcharhiniformes: Carcharhinidae) en la costa de Oaxaca, México. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 44(3): 513-524. DOI: 10.3856/vol44-issue3-fulltext-10.
- Amandé, M.J., E. Chassot, P. Chavance & R. Pianet. 2008. Silky shark (*Carcharhinus falciformis*) bycatch in the French tuna purse-seine fishery of the Indian Ocean. IOTC WPEB - 2008/016.
- Barajas-Calderón, A.V. 2018. Ecología trófica del tiburón piloto *Carcharhinus falciformis* (Müller & Henle, 1839) en la costa sur de Jalisco, México. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional.
- Bass, A.J. 1978. Problems in studies of sharks in the Southwest Indian Ocean. *In*: Hodgson, E.S & R.F Mathewson (eds). Sensory biology of sharks, skates and rays. Office of Naval Research, Department of the Navy, Arlington, V.A. 545-594.
- Beerkircher, L.R., M.S. Shivji, & E. Cortes. 2003. A Monte Carlo Demographic Analysis of the Silky Shark (*Carcharhinus falciformis*): Implications of Gear Selectivity. *Fish. Bull.*, (1):168-174.
- Beléndez-Moreno, L.F.J., E. Espino-Barr, G. Galindo-Cortes, M.T. Gaspar-Dillanes, L. Huidobro-Campos y E. Morales-Bojórquez. 2014. Sustentabilidad y Pesca Responsable en México. Instituto Nacional de Pesca. SAGARPA.
- Bernal D., J.K. Carlson, J. Kenneth & C.G. Lowe. 2012. Energetics, metabolism, and endothermy in sharks and rays. 211-237, *In*: Carrier, J.C., J.A. Musick, M.R. Heithaus (eds). Biology of sharks and their relatives. *CRC Press*. 672 p. DOI: 10.1201/b11867-10.

- Bertrand, A., M. Lengaigne, K. Takahashi, A. Avadí, F. Poulain, & C. Harrod. 2020. El Niño Southern Oscillation (ENSO) effects on fisheries and aquaculture. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 660. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca8348en>.
- Bezaury-Creel, J.E., E. Escobar-Briones, S. Schill, J. F. Torres, C. Molina-Islas, A. L. García-López, O. Pedrín-Osuna, M.A. Jiménez-Hernández, M. Beck, I. March-Misfut. 2011. Estudio previo justificativo para el establecimiento del área natural protegida Reserva de la Biosfera Submarina del Pacífico Transicional Mexicano y Centroamericano. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) - The Nature Conservancy. México D.F.
- Bonfil, R. 2008. The Biology and Ecology of the Silky Shark, *Carcharhinus falciformis*. Sharks of the open ocean: Biology. *Fish. and Conserv.* ISBN: 978-0632-05995-9. 114-127.
- Bonfil, R. 2005. Fishery stock assessment models and their application to sharks. En: FAO. Management techniques for elasmobranch fisheries. *Fish. Tech. Pap.*, 474.
- Boyce, D.G., Tittensor, D.P., Worm, B. 2008. Effects of temperature on global patterns of tuna and billfish richness. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 355, 267–276.
- Branstetter, S. 1987. Age, growth and reproductive biology of the silky shark, *Carcharhinus falciformis*, and the scalloped hammerhead, *Sphyrna lewini*, from the northwestern Gulf of Mexico. *Environ. Biol. Fish.* 19: 161-173.
- Brenes, C.L., A. Hernández & J. Campos. 2000. Distribución espacial de capturas de tiburón en el pacífico nicaragüense y su relación con algunas variables oceanográficas. *Rev. Biol. Trop.* 48(2/3): 399-411.
- Cabrera-Chávez-Costa, A.A., F. Galván-Magaña, O. Escobar-Sánchez. 2010. Food habits of the silky shark *Carcharhinus falciformis* (Müller & Henle, 1839) off the western coast of Baja California Sur, México. *J. Appl. Ichthyol.* 26: 499:503. DOI: 10.1111/j.1439-0426.2010.01482.x.
- Chong-Robles, J. 2006. Análisis de la captura incidental de elasmobranquios en la pesquería mexicana de atún con red de cerco en el Océano Pacífico Oriental.

- Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica de Educación Superior de Ensenada.
- Clarke, C. 2018. Pacific-wide silky shark (*Carcharhinus falciformis*) stock status assessment: covering note on stock status and conservation advice. Western and Central Pacific Fisheries Comision. WCPFC-SC14-2018/SA-WP-08.
- Compagno, L.J.V. 1984. FAO species catalogue. Vol. 4. *In*: Sharks of the world. An annotated and illustrated catalogue of shark species known to date. Part 2. Carcharhiniformes. FAO *Fisheries Synopsis*. 4(2): 251-655.
- CONANP. 2012. Reserva de la Biosfera Zona Marina Profunda Pacífico Central Mexicano y Centroamericano. CONANP. México. 113 p.
- CONAPESCA-INP. 2004. Plan de Acción Nacional para el Manejo y Conservación de Tiburones, Rayas y Especies Afines en México. Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca e Instituto Nacional de la Pesca, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Mazatlán, México. 80 p.
- Cortés-Fuentes, C. 2018. Distribución espacio-temporal y preferencias ambientales de tiburones en el área natural protegida Archipiélago de Revillagigedo. Tesis de Maestría. Centro de investigaciones biológicas del Noroeste, S.C.
- Crown, G.L., C.G. Lowe & B.M. Wetherbee. 1996. Shark records from longline fishing programs in Hawai'i with comments on Pacific Ocean distributions. *Pac. Sci.* 50(4): 382-392.
- Cruz, A., S.R. Soriano, H. Santana, C.E. Ramírez & J.J. Valdez. 2011. La pesquería de tiburones oceánicos-costeros en los litorales de Colima, Jalisco y Michoacán. *Rev. Biol. Trop.* 59(2): 655-667.
- Cruz-Cosío, R. 2018. Variación espacio temporal de la captura incidental de tiburones pelágicos en el Océano Pacífico Oriental Tropical y su relación con factores oceanográficos. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional.
- Cruz-Gómez, R.C., M.A. Monreal-Gómez & S.N. Bulgakov. 2008. Efectos de los vórtices en sistemas acuáticos y su relación con la química, biología y geología. *Interciencia*. 33(10): 741-746.

- Diario Oficial de la Federación. 2015. Proyecto de Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-029-PESC-2006. Pesca responsable de tiburones y rayas. Especificaciones para su aprovechamiento.
- Feldheim, K.A., S.H. Gruber & M.V. Ashley. 2002. The breeding biology of lemon sharks at a tropical nursery lagoon. *R. Soc. Long.* 269: 1655-1661. DOI 10.1098/rspb.2002.2051
- Filonov, A. E. (2000). Estructura espacial de los campos de temperatura y la salinidad en presencia de ondas internas en la plataforma continental de los estados de Jalisco y Colima (México). *Cienc. Mar.* 26(1):1-21.
- Fréon, P. & L. Dagorn. 2000. Review of fish associative behaviour: toward a generalization of the meeting point hypothesis. *Rev. Fish Biol. and Fisher.* 10: 183-207.
- Galván-Tirado, C., F. Galván-Magaña & R.I. Ochoa-Báez. 2015. Reproductive biology of the silky shark *Carcharhinus falciformis* in the southern Mexican Pacific. *J. Mar. Biol. Assoc. UK.* 95(3): 561-567.
- Gaube, P., C.D. Braun, G.L. Lawson, D.J. McGillicuddy Jr., A.D. Penna, G.B. Skomal, C. Fischer & S.R. Thorrold. 2018. Mesoscale eddies influence the movements of mature female white sharks in the Gulf Stream and Sargasso Sea. *Sci. Rep-UK.*, 8:7363. DOI:10.1038/s41598-018-25565-8.
- Golden Software Surfer 10. <https://www.goldensoftware.com/products/surfer/trial>.
- Gómez-Valdivia, F., A. Páres-Sierra, A.L. Flores-Morales. 2015. The Mexican Coastal Current: A subsurface seasonal bridge that connects the tropical and subtropical Northeastern Pacific. *Cont. Shelf Res.* 110: 100-107.
- Heithaus, M.R. 2007. Nursery areas as essential shark habitats: a theoretical perspective. *Ame. Fish. Soc. Symp.* 50:3-13.
- Henley, B.J., J. Gergis, D.J. Karoly, S. Power, J. Kennedy & C.K. Folland. 2015. A Tripole Index for the Interdecadal Pacific Oscillation. *Clim. Dyn.* DOI 10.1007/s00382-015-2525-1.
- Heupel, M.R., C.A. Simpfendorfer & R.R. Hueter. 2004. Estimation of shark home ranges using passive monitoring techniques. *Environ. Biol. Fish.* 71:135-142. DOI: 10.2960/J.v35.m493

- Hoyos-Padilla, E.M, B.P. Ceballos-Vázquez & F. Galván-Magaña. 2011. Reproductive Biology of the Silky Shark *Carcharhinus falciformis* (Chondrichthyes: Carcharhinidae) off the west coast of Baja California Sur, Mexico. *Int. J. of Ichthyol.* 18:15-24.
- Hueter, R.E. & M.R. Heupel. 2004. Evidence of philopatry in sharks and implications for the management of shark fisheries. *Journ. Of Northw. Atlant. Fish. Science.* 35. DOI: 10.5343/bms.2017.1162
- Hutchinson, M.R., D.M. Coffey, K. Holland, D. Itano, B. Leroy, S. Kohin, R. Vetter, A.J. Williams & J. Wren. 2019. Movements and habitat use of juvenile silky sharks in the Pacific Ocean inform conservation strategies. *Fisher. Res.* 210:131–142. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2018.10.016>
- Jaime-Rivera, M. 2004. Captura de tiburones pelágicos en la costa occidental de Baja California Sur y su relación con cambios ambientales. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas.
- Kessler W.S. 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog. Oceanogr.* 69: 181-217.
- Klimley, A.P., & S.B. Butler. 1988. Immigration and emigration of a pelagic fish assemblage to seamounts in the Gulf of California related to water mass movements using satellite imagery A. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 10:11–20.
- Kono-Martínez, T., C.D. Ortega-Ortíz, A. Olivos-Ortiz, E. Torres-Orozco & E. González-Rodríguez. 2017. Oceanographic conditions and marine mammals: identifying a potential relationship in the coastal region of the Mexican Central Pacific. *Rev. Biol. Mar. Oceano.* 52(3):479-494.
- Lavín M.F., R. Castro, E. Beier, V.M. Godínez, A. Amador & P. Guest. 2009. SST, thermohaline structure, and circulation in the southern Gulf of California in June 2004 during the North American Monsoon Experiment. *J. Geophys. R.* 114. DOI:10.1029/2008JC004896.
- Lennert-Cody C.E., S.C. Clarke, A. Aires-da-Silva, M.N. Maunder & M.H. Román. 2017. Updated stock status indicators for silky shark in the Eastern Pacific Ocean (1994-2016), with oceanographic considerations. Interamerican Tropical Tuna Comision. Scientific Advisory Committee. SAC-08-08a(i).

- Lennert-Cody C.E., S.C. Clarke, A. Aires-da-Silva, M.N. Maunder, P.J.S. Frankcs, M. Román, A.J. Miller & M. Minami. 2018. The importance of environment and life stage on interpretation of silky shark relative abundance indices in equatorial Pacific Ocean. *Fish. Oceanogr.* 43-53. DOI: 10.1111/fog.12385
- Lennert-Cody C.E., A. Aires-da-Silva & M.N. Maunder. 2019. Updated stock status indicators for silky shark in the Eastern Pacific Ocean (1994-2018). Interamerican Tropical Tuna Commission. Scientific Advisory Committee. SAC-10-17.
- Leuliette, E. W., y J. M. Wahr, 1999. Coupled pattern analysis of sea Surface temperature and TOPEX/Poseidon sea Surface height. *J. Phys. Oceanogr.* 29: 599–611.
- López, J., D. Alvarez-Berastegui, M. Soto & H. Murua. 2017. Modelling the oceanic habitats of silky shark (*Carcharhinus falciformis*), implications for conservation and management. Madrid, Spain: Informe presentado a la International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas. IOTC-2017-WPEB13-34 Rev\_1.
- López-Calderón, J., H. Manzo-Monroy, E. Santamaria-del-Ángel, R. Castro, A. González-Silvera & R. Millán-Núñez. 2006. Variabilidad de mesoescala del Pacífico tropical mexicano mediante datos de los sensores TOPEX y SeaWIFS. *Cienc. Mar.* 32(3): 539-549.
- Martínez-Rincón, R. O. 2012. Efecto de la variabilidad ambiental en la distribución de las capturas incidentales de pelágicos mayores en el Océano Pacífico Oriental. Tesis de Doctorado. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional.
- Morgan, A.C. & G.H. Burgess. 2005. Fishery-dependent sampling: total catch, effort and catch composition. *In*: FAO. 2005. Management techniques for elasmobranch fisheries. *Fisher. Tech. Pap.* 474.
- Murcientes, G.R., N. Queiroz, L.L Sousa, P. Tarroso and D.W. Sims. 2008. Sexual segregation of pelagic sharks and the potential threat from fisheries. *Biol. Leu.* DOI:10.1098/rsbl.2008.0761

- Nan-Jay, S., S. Chi-Lun, A.E. Punt, Y. Su-Zan & G. DiNardo. 2014. Environmental influences on seasonal movement patterns and regional fidelity of striped marlin *Kajikia audax* in the Pacific Ocean. *Fish. Res.* 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2014.07.017>
- Nerem, R. S., & E. J. Schrama. 1994. A preliminary evaluation of ocean topography from the TOPEX/Poseidon mission. *J. Geophys. Res.* 99(26): 565–583.
- Olivos-Ortiz, A., S. I., Quijano-Scheggia, A. Pérez-Morales, J.H. Gaviño-Rodríguez, T. Kono-Martínez, G.C. Pelayo-Martínez, C.D. Ortega- Ortiz C & M.G. Verduzco-Zapata. 2016. Condiciones hidrográficas en el Pacífico Central Mexicano relacionadas con florecimientos algales en la zona costera de Colima. p. 256-267. *In: García-Mendoza, E., Quijano-Scheggia, S. I., Olivos-Ortiz, A. y Núñez-Vázquez, E. J. (eds.). Florecimientos Algales Nocivos en México. Ensenada, México. CICESE. 438 pp.*
- Pantoja, D.A., S.G. Marinone, A., Parés-Sierra & F. Gómez-Valdivia. 2012. Modelación numérica de la hidrografía y circulación estacional y de mesoescala en el Pacífico Central Mexicano. *Cienc. Mar.* 38:2, 363-379.
- Pennington, J.T., K.L. Mahoney, V.S. Kuwahara, D.D. Lolber, R. Calienes & F.P. Chavez. 2006. Primary production in the eastern tropical Pacific: A review. Elsevier. 69: 285-317.
- Portela, E., E. Beier, E.D. Barton, R. Castro, V. Godínez, E. Palacios-Hernández, P.C. Fiedler, L. Sánchez-Velasco & A. Trasviña. 2016. Water masses and circulation in the Tropical Pacific off Central Mexico and surrounding areas. *Jour. Phys. Ocean.,* 46: 3069-3081.
- Pratt, Jr., H.L., S.H. Gruber & T. Taniuchi (eds.) 1990. Elasmobranchs as Living Resources: Advances in the Biology, Ecology, Systematics, and the Status of the Fisheries. NOAA Technical Report NMFS 90. U.S. Department of Commerce. 518 p.
- R Core Team, 2019. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rodríguez-Madrigal, J.A., H. Santana-Hernández, J.J. Valdez-Flores & J. Tovar-Ávila. 2017. Variación temporal de la captura de *Carcharhinus falciformis* en la

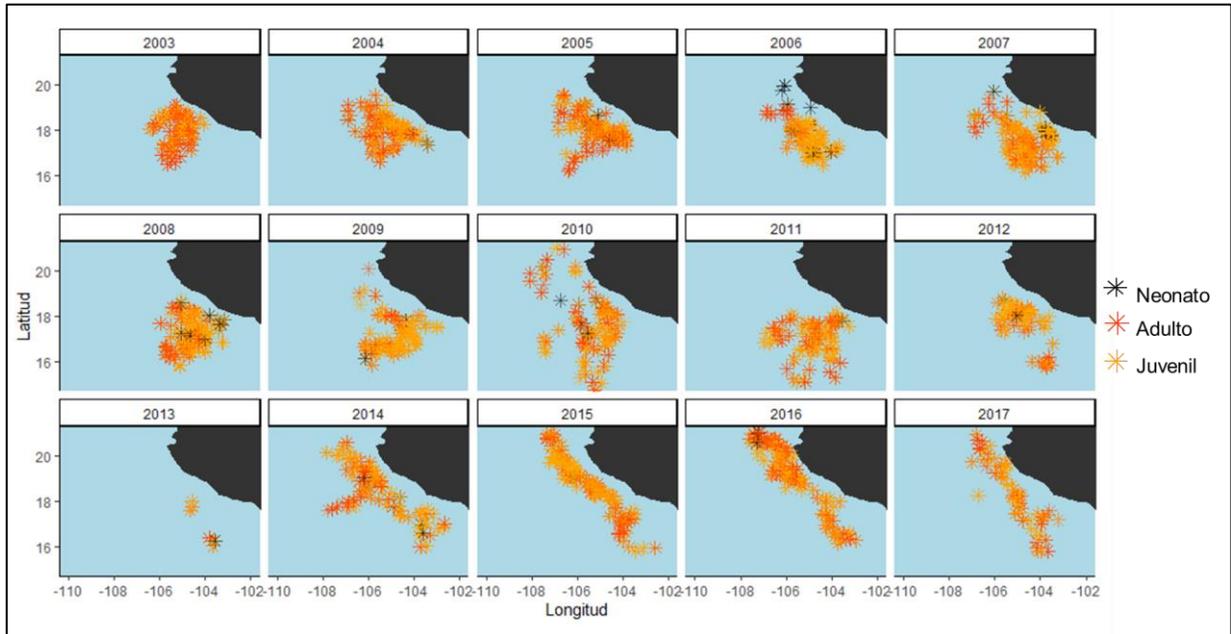
- pesquería semi-industrial del Pacífico Central mexicano y comparación de unidades de esfuerzo para estimar la captura por unidad de esfuerzo. *Cienc. Pesq.* 25(1):41-50.
- Rodríguez-Matus, A. 2020. Diversidad genética del tiburón piloto *Carcharhinus falciformis* (Müller y Henle, 1839) en el Pacífico Mexicano: conectividad y evidencia de filopatría. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional.
- Rosengaus-Moshinsky, M., M. Jiménez-Espinosa & M.T. Vázquez-Conde. 2002. Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. Secretaría de Gobernación. ISBN: 970-628-633-0.
- Rygby, C.L., C.S. Sherman, A. Chin & C. Simpfendorfer. 2017. *Carcharhinus falciformis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2017: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T39370A117721799.en>. Downloaded on 17 March 2021.
- Santana-Hernández, H. 2001. Estructura de la comunidad de pelágicos mayores capturados con palangre en el Pacífico mexicano (1983-1996) y su relación con la temperatura superficial del mar. Tesis Doctoral. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad de Colima, México. 122 p.
- Santana-Hernández, H., I. Méndez Gómez-Humarán, J.J. Valdez-Flores, & M.C. Jiménez-Quiroz. 2008. Experimento para determinar la selectividad y la eficiencia del palangre de deriva con tres tipos de anzuelo y dos tipos de carnada, en la pesca de tiburón con embarcaciones de mediana altura en el Pacífico central mexicano. *Cienc. Pesq.* 16:57-66.
- Santana-Hernández, H., & J.J. Valdéz-Flores, 2014. Pelágicos mayores obtenidos por la flota palangrera de mediana altura del puerto de Manzanillo, Colima. Instituto Nacional de Pesca.
- Santana-Hernández, H., J. Tovar-Ávila & J.J. Valdéz-Flores. 2014. Estimation of the total, fork and precaudal lengths for the silky shark, *Carcharhinus falciformis* (Carcharhiniformes: Carcharhinidae), from the interdorsal length. *Hidrobiologica*. 24(2): 159-162.

- Sartimbul, A., Nakata, H., Rohadi, E., Yusuf, B., & Kadarisman, H.P. 2010. Variations in chlorophyll-a concentration and the impact on *Sardinella lemuru* catches in Bali Strait, Indonesia. *Prog. Oceanogr.* 87: 168–174.
- Schlaff, A.M., M.R. Heupel & C.A. Simpfendorfer. 2014. Influence of environmental factors on shark and ray movement, behaviour and habitat use: a review. *Rev. Fish. Biol. Fisheries.* 24:1089-1103. DOI 10.1007/s11160-014-9364-8.
- SEMARNAT, 2018. Programa de Acción para la Conservación de las Especies Tiburones y Rayas, SEMARNAT/CONANP, México (Año de edición 2018).
- Simpfendorfer, C.A., G.G. Freitas, T.R. Wiley & M.R. Heupel. 2005. Distribution and habitat partitioning of immature bull sharks (*Carcharhinus leucas*) in a southwest Florida bay. *Estuaries.* 28(1):78-85.
- Soriano, V.S., D.S. Acal, L. Castillo-Géniz, N.G. Vázquez & E.S. Santiago. 2006. Tiburón del Golfo de Tehuantepec. En: S.F. Arreguín, M.J. Meléndez, M.I. Gómez-Humaran, S.R. Solana & D.C. Rangel (eds.). Sustentabilidad y pesca responsable en México: evaluación y manejo 1990-2000. INP, SAGARPA, México, 325-364.
- Vögler, R., E. Beier, S. Ortega-García, H. Santana-Hernández & J.J. Valdez-Flores. 2012. Ecological patterns, distribution and population structure of *Prionace glauca* (Chondrichthyes: Carcharhinidae) in the tropical-subtropical transition zone of the north-eastern Pacific. *Mar. Environ. Res.* 73: 37-52.
- Watson, J.T., T.E. Essington, C.E. Lennert-Cody & M.A. Hall. 2008. Trade-offs in the design of fishery closures: management of silky shark bycatch in the Eastern Pacific Ocean tuna fishery. *Conserv. Biol.* 23(3): 626-635.
- Wickham, H., 2016. Descargado de <https://ggplot2.tidyverse.org> ).
- Wilkinson, T., E. Wiken, J. Bezaury Creel, T. Hourigan, T. Agardy, H. Herrmann, L. Janishevski, C. Madden, L. Morgan & M. Padilla. 2009. Ecorregiones marinas de América del Norte. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, 200 p.
- Williamson, M.J., E.J. Tebbs, T.P. Dawson & D.M.P. Jacoby. 2019. Satellite Remote Sensing in Shark and Ray Ecology, Conservation and Management. *Front. Mar. Sci.* 6:135. DOI: 10.3389/fmars.2019.00135

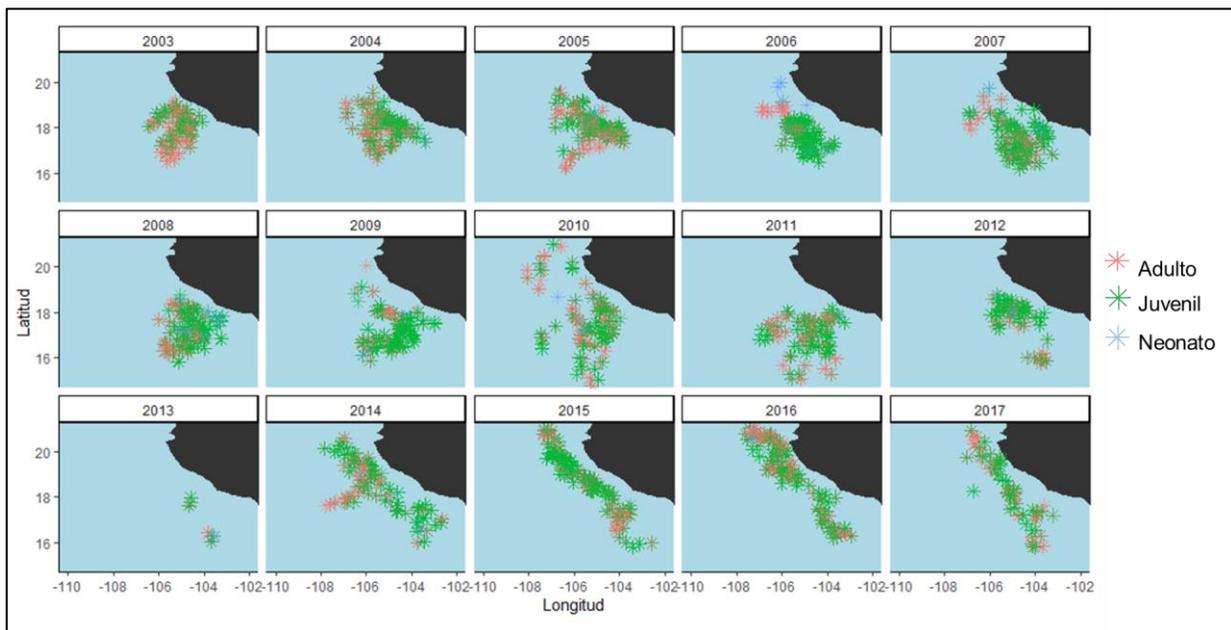
- Wood, S. N. (2011). Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *J. R. Stat. Soc. B.* 73(1):3–36.
- Wood, S.N. 2017. Package “mgcv”. <https://CRAN.R-project.org/package=mgcv>
- Zainuddin, M., K. Saitoh & S.I. Saitoh. 2008. Albacore (*Thunnus alalunga*) fishing ground in relation to oceanographic conditions in the western North Pacific Ocean using remotely sensed satellite data. *Fish. Oceanogr.* 17,61–73.
- Zuur, A.F., E.N. Ieno, N.J. Walker, A.A. Saveliev & G.M. Smith. 2009. Mixed effects models and extensions in ecology with R. *Springer*. ISBN 978-0-387-87457-9.

## ANEXOS

**Anexo 1.** Mapa de distribución por tallas del tiburón sedoso en el PCM durante el periodo 2003-2017.



**Anexo 2.** Mapa de distribución por tallas de hembras de tiburón sedoso en el PCM durante el periodo 2003-2017.



**Anexo 3.** Mapa de distribución por tallas de machos de tiburón sedoso en el PCM durante el periodo 2003-2017.

